

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

BİLİM DERGİSİ



ATU

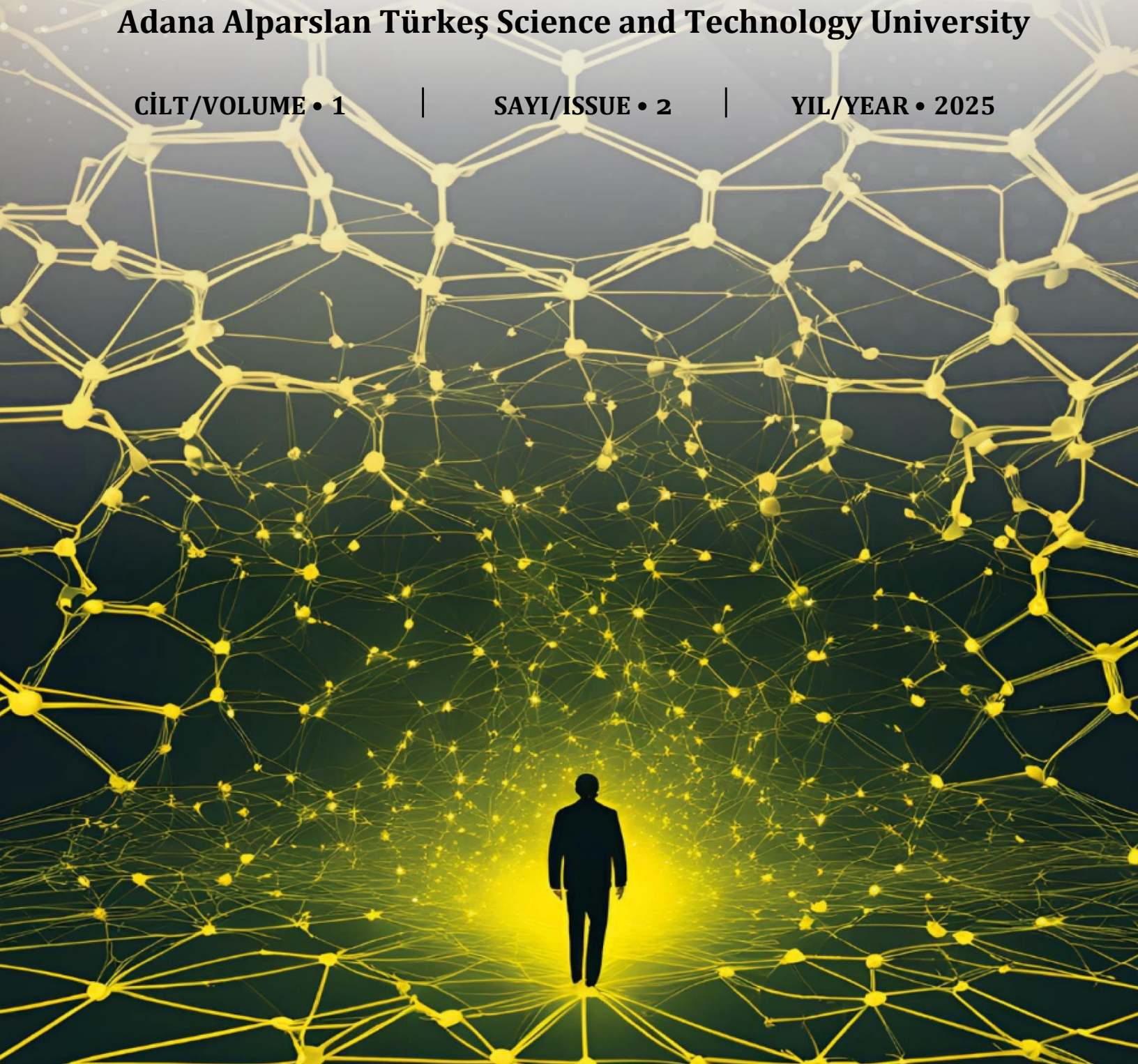
JOURNAL OF SCIENCE

Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University

CİLT/VOLUME • 1

| SAYI/ISSUE • 2

| YIL/YEAR • 2025



Dergi Adı
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji
Üniversitesi Bilim Dergisi

Journal Name
Adana Alparslan Türkeş Science and Technology
University Journal of Science

Yayımcı
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji
Üniversitesi

Publisher
Adana Alparslan Türkeş Science and Technology
University

Yayımlama Periyodu
Yılda iki kez (Haziran ve Aralık)

Publication Period
Published twice a year (June and December)

Yayın Dili
Türkçe veya İngilizce

Publication Language
Turkish or English

Yayın Değerlendirme
Hakemli (kör)

Publication Reviewing Process
Peer-reviewed (blind)

Yayın Politikası
Açık kaynak (ücretsiz)

Publication Policy
Open access (free)

Dergi Hakkında

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Bilim Dergisi mühendislik ve fen bilimleri konularını kapsayan bir dergidir. ATÜ Bilim Dergisi, ulusal ve uluslararası düzeyde bilim, mühendislik ve teknoloji alanlarında özgün araştırma makalelerini veya ilgili alandaki bilimsel makaleleri yeterli sayıda tarayıp konuyu bugünkü bilgi düzeyinde özetleyen ve deneysel/teorik bulguları karşılaştırarak yorumlayan tarama makalelerini kabul etmektedir.

About the Journal

Adana Alparslan Türkeş Science and Technology Journal of Science is a journal covering engineering and science subjects. ATÜ Science Journal accepts original research articles in the fields of science, engineering and technology at national and international levels or review articles that scan a sufficient number of scientific articles in the relevant field, summarize the subject at the current level of knowledge and compare and interpret experimental/theoretical findings.

Dergi Adı Kısaltması

ATU Bilim Dergisi

Journal Title Abbreviation

ATU Journal of Science

Dergi Sahibi

Prof. Dr. Adnan Sözen
(Rektör/Rector)

Journal Owner

Baş Editör

Prof. Dr. Mustafa Akyol

Editor in Chief

Editör Yardımcısı

Prof. Dr. Erinc Uludamar

Deputy Editor

Alan Editörleri

Section Editors

Prof. Dr. Ahmet Ekicibil	Çukurova University, Türkiye	Material Physics, Electronic and Magnetic Properties of Condensed Matter; Superconductivity
Prof. Dr. M. Yusuf Tanrikulu	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye	Photonic and Electro-Optical Devices, Sensors and Systems, Microelectronics, Microelectromechanical Systems (MEMS)
Prof. Dr. Salih Yılmaz	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye	Material Physics, Photovoltaic Devices (Solar Cells), Semiconductors
Prof. Dr. Ahmet Beycioglu	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye	Construction Materials, Production Technologies
Prof. Dr. Haluk Koralay	Gazi University, Türkiye	General Physics, Electronic and Magnetic Properties of Condensed Matter; Superconductivity
Prof. Dr. Tayfun Yusuf Yünsel	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye	Mining Engineering
Prof. Dr. Kazım Yalçın Arga	Marmara University, Türkiye	Bioinformatics, Artificial Intelligence, Bioinformatics and Computational Biology, Systems Biology, Biostatistics, Bioengineering
Assoc. Prof. Dr. Müslüm Demir	Boğaziçi University, Türkiye	Electrochemistry, Wastewater Treatment Processes, Electrochemical Technologies
Assoc. Prof. Dr. Ali İnan	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye	Information Security and Cryptology
Assoc. Prof. Dr. Yeliz Gurdal	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye	Catalysis and Mechanisms of Reactions, Theoretical and Computational Chemistry
Assoc. Prof. Dr. Gökay Dışken	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye	Signal Processing
Assoc. Prof. Dr. Kemal Şen	Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Türkiye	Food Sciences, Fermentation Technology, Food Technology, Fruit-Vegetables Technology
Assoc. Prof. Dr. Yelda Durgun Şahin	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye	Urban History, Transport Planning, Architectural Design, Universal and Unobstructed Design
Assoc. Prof. Dr. Mehmet Ali Olğar	Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye	Physics Education, Condensed Matter Characterization Technique Development
Assoc. Prof. Dr. Tahir Durhasan	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye	Fluid Mechanics and Thermal Engineering, Aerodynamics, Computational Methods in Fluid Flow
Asst. Prof. Dr. Erdi Tosun	Çukurova University, Türkiye	Renewable Energy Resources , Internal Combustion Engines, Automotive Combustion and Fuel Engineering
Asst. Prof. Dr. Mustafa İstanbullu	Çukurova University, Türkiye	Analog Electronics and Interfaces, Electronics, Electronic Sensors, Microelectronics, Semiconductors

Yayın Editörü

Publication Editor

Asst. Prof. Dr. Volkan Korkut

Dil Editörleri

Language Editors

Assoc. Prof. Dr. Duygu İşpınar Akçayoğlu
Res. Asst. Beyza Betül Tanrikulu
Dr. Hilal Gülben Gerek
Gözde Salur

Yayın Etiği Kurulu

Publication Ethics Board

Prof. Dr. Başak Doğru Mert
Prof. Dr. Gökhan Tüccar

Sekreter Secretary

Res. Asst. Ümit Kılıç

Teknik Sorumlu Technical Support

Burak Somuncu

Danışma Kurulu Advisory Board

Prof. Dr. Serkan Selli	Çukurova University, Türkiye
Prof. Dr. Haşim Kelebek	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Türkiye
Prof. Dr. Recep Zan	Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye
Prof. Dr. Muharrem Karaaslan	İskenderun Technical University, Türkiye
Prof. Dr. Mustafa Çam	Erciyes University, Türkiye
Prof. Dr. Hakan Ateş	Gazi University, Türkiye
Prof. Dr. Çetin Karataş	Gazi University, Türkiye
Prof. Dr. Murat Hoşöz	Kocaeli University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Battal Doğan	Gazi University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Adem Tekerek	Gazi University, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Zeynep Aytaç	Gazi University, Türkiye

İletişim Contact

ATU Bilim Dergisi Editörlüğü

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

01250 Sarıçam

ADANA –TÜRKİYE

Tel : 0322-455 00 00

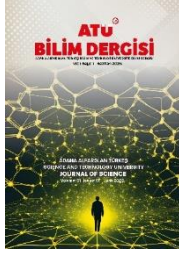
Fax : 0322-455 00 02

atubd@atu.edu.tr

www.dergipark.com/atujscience

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Articles		Sayfa No / Page Number
1	Design and Simulations of a Stable Oscillator Circuit in 90 nm CMOS Technology <i>Emre Baysal, Ulaş Reyhan, Berke Ersöz, Emre Berkan Sungur, Yılmaz Zini, Mahmud Yusuf Tanrıkulu</i>	50-61
2	Investigation of the Effects of Sodium Pentaborate Pentahydrate on MC3T3-E1 Mouse Pre-osteoblast Cell Line <i>Oula Alkhalifa Aldham, Merve Çapkın Yurtsever</i>	62-69
3	Design and Implementation of an Automated Reporting Solution for DCS and SCADA Systems via OPC in Thermal Power Stations <i>Mahmut Kiriktir, Fırat Ekinci</i>	70-83
4	Ekolojik ve Endüstriyel Atıklardan Yalıtım Malzemesi Üretimi <i>Muharrem Eren, Erdem Alıç</i>	84-95
5	Bio-Heat Transfer in Cancer Treatment: A Mathematical Framework for Hyperthermia-Assisted Radiotherapy Using Monte Carlo Simulation <i>Tuka Fattal, Birnur Bozdoğan, Recep Yumrutaş</i>	96-109
6	Yüksek Hücüm Açılarında Çeşitli Naca Kanat Profillerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Akış İyileştirilmesi <i>Ömer Gündoğan, Mehmet Akif Emre, Muhammed Emin Özen, Ünsal Eren Erdoğan, Murat Erbaş, Muhittin Bilgili, Abuzer Özsunar</i>	110-123
Derleme / Review		Sayfa No / Page Number
7	Çimlenmenin Baklagillerin Fonksiyonel Özelliklerine Etkisi <i>Nejla Dağsuyu, Haşim Kelebek</i>	124-135



Design and Simulations of a Stable Oscillator Circuit in 90 nm CMOS Technology

Emre Baysal^{1, #}, Ulaş Reyhan², Berke Ersöz³, Emre Berkan Sungur⁴,
Yılmaz Zini⁵, Mahmud Yusuf Tanrıkulu⁶

^{1,2,3,4,5,6}Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, Postcode, 01250, Adana, Türkiye

ORCID¹: 0009-0009-9220-1910

ORCID²: 0009-0004-8248-3348

ORCID³: 0009-0002-8742-0632

ORCID⁴: 0009-0003-2831-6867

ORCID⁵: 0009-0006-9732-3667

ORCID⁶: 0000-0001-7956-1289

#Corresponding Author:
byslemre2380@gmail.com

Abstract

In the realm of modern integrated circuit design, the need for efficient, low-power, and high-accuracy systems has led to the development of advanced circuit components. This study focuses on the design and integration of Bandgap Reference (BGR) circuits, Low-Dropout (LDO) regulators, and Voltage-Controlled Oscillators (VCOs) to enhance the performance of low-power integrated systems. These circuits address critical challenges, including temperature stability, power efficiency, and frequency accuracy, making them indispensable for applications in mobile devices, communication systems, and embedded electronics. The proposed designs have been developed using 90 nm CMOS technology and validated through extensive simulations. Key performance metrics such as temperature coefficient, power consumption, phase noise, and output stability have been optimized to demonstrate the practical applicability of the circuits. The findings highlight the potential for combining BGR, LDO, and VCO circuits to achieve a unified solution that meets the demands of modern low-power electronic systems. This work not only contributes to the advancement of circuit design methodologies but also sets the stage for future innovations in mixed-signal and low-power integrated circuits. By addressing the interplay between these components, the study provides a foundation for developing more efficient, reliable, and versatile electronic systems.

Keywords: Bandgap Reference; Low-Dropout; Voltage-Controlled Oscillator; Complementary Metal-Oxide-Semiconductor; Temperature coefficient

Bir Kararlı Salıncı Devresinin 90 nm CMOS Teknolojisinde Tasarımı ve Simülasyonları

Öz

Modern entegre devre tasarımında, verimli, düşük güç tüketimli ve yüksek doğruluklu sistemlere olan ihtiyaç, gelişmiş devre bileşenlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu çalışma, düşük güçlü entegre sistemlerin performansını arttırmak amacıyla Bant Aralığı Referansı (BGR) devreleri, Düşük kayıplı (LDO) Regülatörleri ve Gerilim Kontrollü Salıncılar (VCO) tasarımına ve entegrasyonuna odaklanmaktadır. Bu devreler, sıcaklık kararlılığı, güç verimliliği ve frekans doğruluğu gibi kritik zorlukları ele alarak mobil cihazlar, haberleşme ve gömülü sistemler gibi uygulamalar için vazgeçilmez hale gelmektedir. Önerilen tasarımlar CMOS teknolojisi kullanılarak geliştirilmiş ve kapsamlı simülasyonlarla doğrulanmıştır. Sıcaklık katsayısı, güç tüketimi, faz gürültüsü ve çıkış kararlılığı gibi temel performans metrikleri optimize edilerek devrelerin pratik uygulanabilirliği gösterilmiştir. Bulgular, BGR, LDO ve VCO devrelerinin birleştirilerek modern düşük güçlü elektronik sistemlerin gereksinimlerini karşılayan bütünlük bir çözüm elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, yalnızca devre tasarım metodolojilerinin ilerlemesine katkıda bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda karma sinyal ve düşük güçlü entegre devrelerde gelecekteki yenilikler için bir temel oluşturmaktadır. Bu bileşenler arasındaki etkileşimi ele alarak daha verimli, güvenilir ve çok yönlü elektronik sistemlerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bant Aralığı Referansı; Düşük Kayıplı; Gerilim Kontrollü Salıncı; Tümlayıcı Metal Oksit Yarı İletken; Sıcaklık katsayısı

Received: 16/05/2025

Accepted: 21/08/2025

Online Published: 25/12/2025

How to Cite: Baysal E., Reyhan U., Ersöz B., Sungur E. B., Zini Y., Tanrıkulu M. Y. "Design and Simulations of a Stable Oscillator Circuit in 90 nm CMOS Technology" Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University Journal of Science, 1 (2): 50-61 (2025).

1. Introduction

In today's rapidly evolving technological landscape, the demand for low-power, high-accuracy, and reliable integrated circuits (ICs) has grown significantly. The proliferation of electronic devices, ranging from portable gadgets to advanced communication networks, has amplified the need for efficient power management and robust frequency stability to ensure optimal system performance. At the core of these advancements lie critical circuit components such as Bandgap Reference (BGR) circuits, Low Dropout (LDO) regulators, and Voltage-Controlled Oscillators (VCOs). These components form the backbone of modern integrated systems, enabling stability, precision, and efficiency in applications where minimizing power consumption and enhancing reliability are paramount [1].

1.1 Bandgap Reference (BGR) Circuit

BGR circuits are indispensable in providing a stable reference voltage that remains unaffected by temperature variations and power supply fluctuations. This stability is crucial for maintaining the accuracy and functionality of ICs across a myriad of applications [2], including mobile devices, industrial control systems, and medical equipment [3]. By leveraging the principles of proportional to absolute temperature coefficient (PTAT) and complementary to absolute temperature (CTAT) currents, BGR circuits achieve temperature compensation, ensuring consistent performance under varying environmental conditions [1]. These circuits typically incorporate an intricate combination of transistors, resistors, and operational amplifiers to balance these currents and generate a highly stable reference voltage. Innovations in BGR design now focus on minimizing power consumption while maintaining exceptional accuracy, making them ideal for energy-efficient and portable systems where every milliwatt of power savings matters [4] [5].

1.2 Low-Dropout (LDO) Regulator

LDO regulators play a pivotal role in power management by delivering a stable and precise output voltage with minimal input-to-output voltage difference. These circuits are widely deployed in applications demanding low noise, high efficiency, and compact design. The integration of LDO regulators into ICs facilitates effective power distribution, mitigates thermal challenges, and prolongs the operational life of electronic systems by shielding sensitive components from voltage irregularities [6]. Modern LDO designs incorporate advanced techniques, including dynamic feedback control, adaptive biasing, and transient response optimization, to address challenges posed by varying load conditions [7]. The inclusion of sophisticated elements such as error amplifiers and current mirrors has further enhanced their performance, offering robust solutions for stability and efficiency under fluctuating power demands [8] [9].

1.3 Voltage Controlled Oscillator (VCO)

VCOs are essential for frequency generation and synchronization in a wide range of applications, including communication systems, phase-locked loops (PLLs), and clock generation circuits [10]. By providing a voltage-controlled mechanism for frequency tuning, VCOs offer the flexibility required for diverse applications, from wireless communication to high-speed signal processing [11]. The performance of VCOs is often evaluated based on key parameters such as tuning range, phase noise, and power consumption. Current-starved VCO architectures have gained prominence for their ability to balance power efficiency with a wide frequency tuning range, meeting the stringent requirements of modern communication systems [12]. Furthermore, state-of-the-art VCO designs now incorporate innovative noise reduction techniques and enhanced linearity, ensuring minimal phase noise and improved signal integrity, even in high-frequency scenarios [13] [14].

In this study the design and the integration of Bandgap Reference (BGR) circuits, Low-Dropout (LDO) regulators, and Voltage-Controlled Oscillators (VCOs) are performed to enhance the performance of low-power integrated systems. The proposed designs have been designed using 90 nm CMOS technology and validated through extensive simulations [15]. Key performance metrics such as temperature coefficient, power consumption, phase noise, and output stability have been obtained to demonstrate the practical applicability of the circuits.

2. Material and Methods

In this study, Bandgap Reference (BGR), Low-Dropout (LDO) Regulator, and Voltage-Controlled Oscillator (VCO) circuits are designed, simulated, and analyzed to enhance the performance of low-power integrated systems. The study consists of three main stages, which are circuit design, simulation, and performance analysis. The design of the BGR, LDO, and VCO circuits are carried out using 90nm CMOS technology. Each circuit is optimized to ensure temperature stability, low power consumption, and high accuracy. Figure 1 shows the system created using this technology.

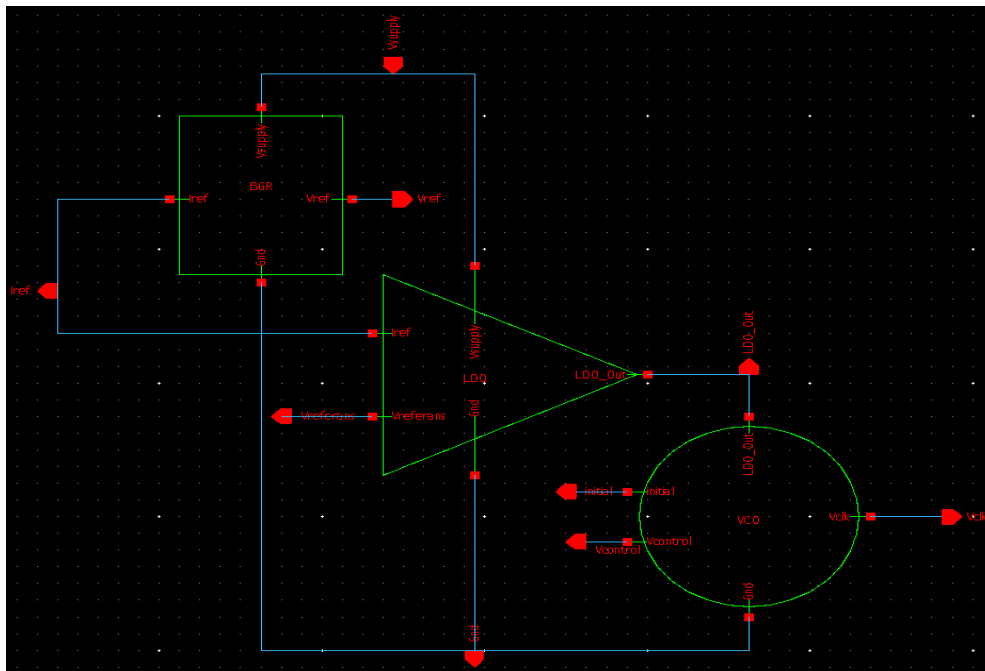


Figure 1. System architecture.

2.1 BGR

In the BGR circuit, a CMOS-based bandgap reference architecture was chosen to provide a stable reference current against temperature variations. During the design process, temperature coefficient minimization is considered to improve the accuracy of the reference current.

Figure 2 shows the BGR circuit which consists of transistors and resistors to generate a stable reference current against temperature variations. These components produce two opposing currents, which counteract temperature changes within the circuit.

The **core structure** shown in Figure 2 is designed using **M1, M2, R1, R2, and R4** components. Also, the operational amplifier (op-amp) structure consists of **M3, M4, M5, M6, and M7** MOSFETs [16]. **M9, M10, M11, M12, and M14** PMOS transistors are used as current mirrors in the circuit, transmitting a constant reference current to various points of the circuit. Thus, a stable current is ensured in the relevant circuit components. Additionally, **M13** and **M15** PMOS transistors are used as source followers. These structures ensure impedance matching between the BGR circuit and the load connected to the circuit. Consequently, it allows the BGR circuit to deliver a stable reference current to the load.

The node voltage V_a is set equal to the node voltage V_b by the input voltage definition of op-amp [4].

$$V_a = V_b \quad (1)$$

The temperature coefficient value of the thermal voltage (V_T) can be calculated from Equation 2 as having a positive temperature coefficient [14].

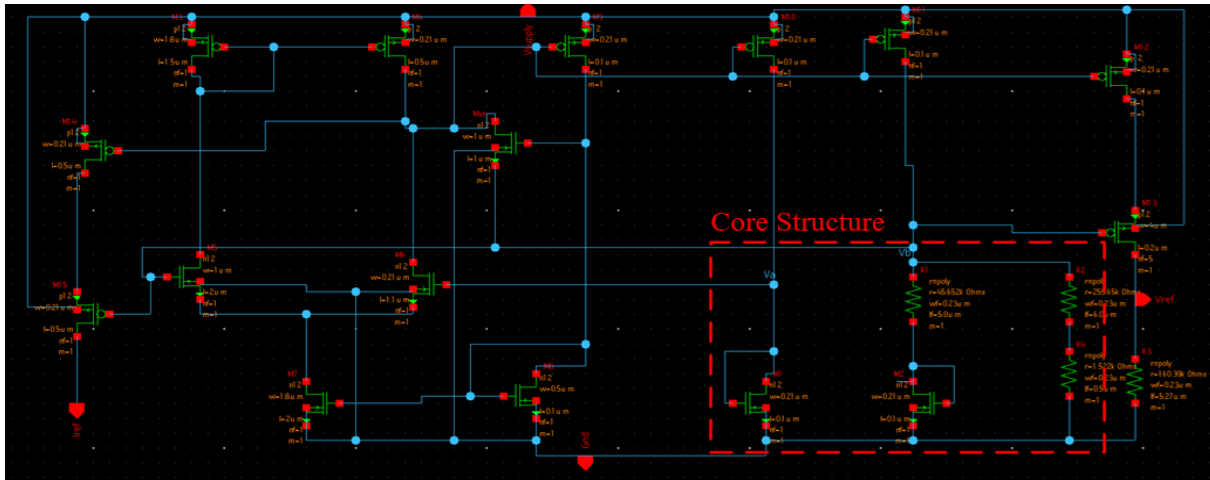


Figure 2. Bandgap reference circuit schematic and its core structure.

$$\frac{\partial V_T}{\partial T} = \frac{k}{q} \quad (2)$$

A positive temperature coefficient of current (PTAT) is generated across resistor R_1 due to the difference in the gate-source voltages of M1 and M2 NMOS transistors according to Equation 3 [4].

$$I_{R1} = \frac{\Delta V_{gs}}{R_1} \quad (3)$$

$I_{R2,4}$ is proportional to the V_{gs1} , which is set equal to V_b . Thus, we can obtain the current with a negative temperature coefficient (CTAT) from Equation 4.

$$I_{R2,4} = \frac{V_{gs1}}{R_2 + R_4} = \frac{V_a}{R_2 + R_4} = \frac{V_b}{R_2 + R_4} \quad (4)$$

The current I_{R1} with a positive temperature coefficient and the current $I_{R2,4}$ with a negative temperature coefficient together create the temperature-compensated current I_b .

$$I_b = I_{R1} + I_{R2,4} \quad (5)$$

Thus, the I_b current from the Equation 5 can be used as I_{ref} at any point in the circuit using the specified PMOS transistors. Figure 3 shows the layout of the designed BGR circuit occupying an area of $346 \mu m^2$.

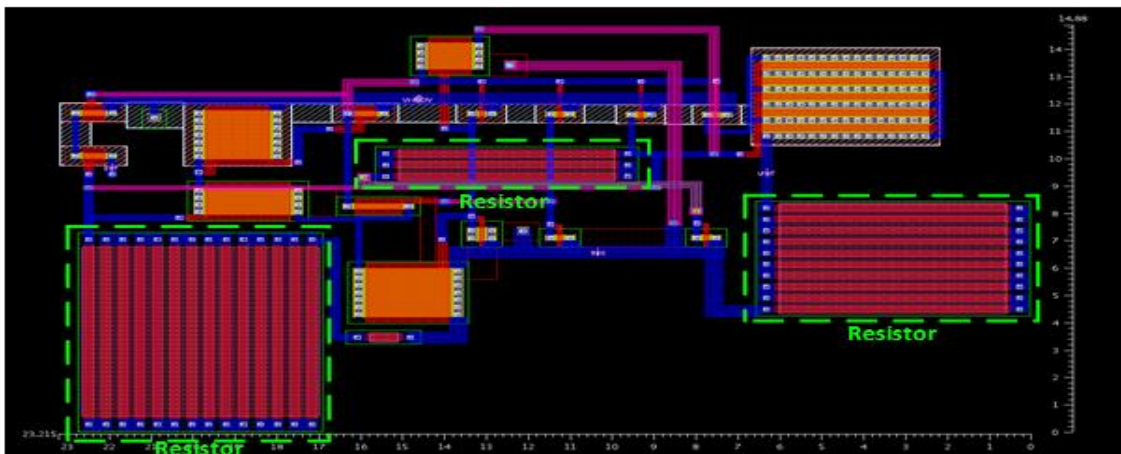


Figure 3. BGR layout design.

2.2 LDO Regulator

The LDO regulator circuit is designed to operate efficiently even when the difference between the input voltage and output voltage is low [17]. In the circuit, a PMOS-based output transistor is used to guarantee a low dropout

voltage and to enhance the stability of the output load. In Figure 4, which shows the general structure of the LDO voltage regulator, the PMOS transistor is connected to the input voltage and controls the output voltage. The PMOS transistor enters cut-off mode under high input voltage conditions, thereby reducing the output voltage. The output voltage of the error amplifier provides the control voltage for the PMOS transistor. This voltage makes certain that the desired output voltage is achieved. The error amplifier in the LDO circuit regulates the output voltage when the supply voltage is higher than the output.

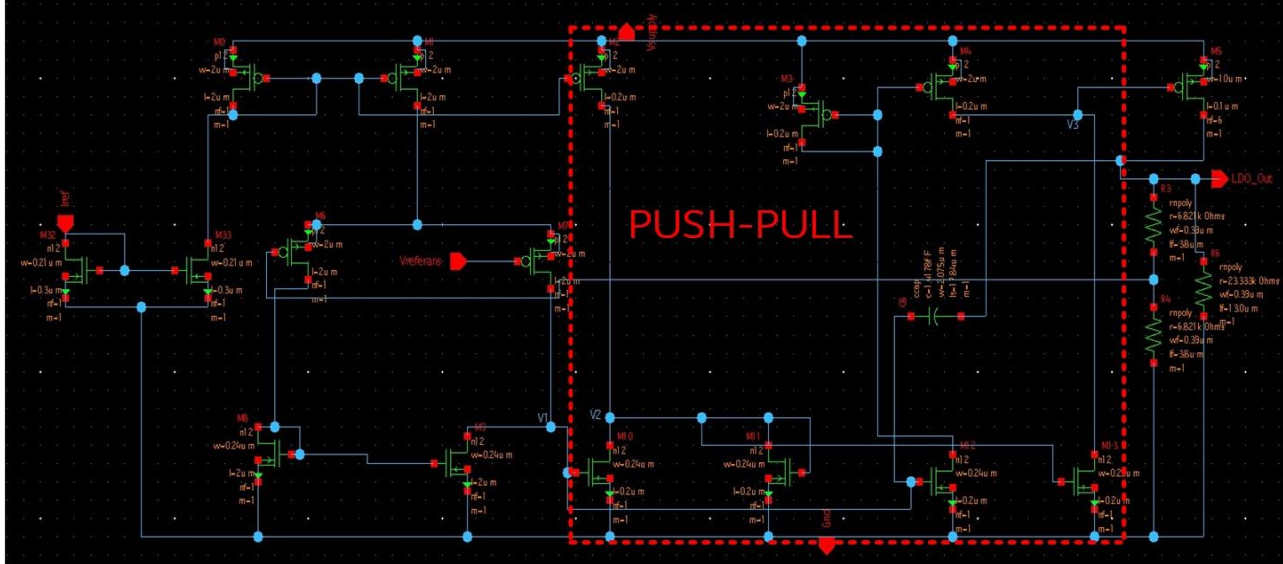


Figure 4. LDO circuit and PUSH-PULL structure.

In the circuit shown in Figure 4, the **M0-M13** MOSFETs are used as switching elements to control the current. The reference current provided by the BGR circuit to the LDO circuit is defined in the LDO circuit with a current source called I_{ref} . The resistors **R1**, **R2**, and **R3** with values of $6.82k\Omega$, $6.82k\Omega$ and $23.33k\Omega$ respectively regulate the output voltage. Additionally, a capacitor with a value of $1.41fF$ confirms system stability and improves the transient response of the system. V_1 and V_2 are fixed reference voltages, while V_3 determines the output voltage. **M0** and **M1** operate in a current mirror configuration providing a constant current. The reference current (I_{ref}) flows through **M0** and is mirrored by **M1**, making the current passing through **M1** equal to I_{ref} .

In addition to these MOSFETs, **M6-M9** compare the reference voltage (V_2) with the output voltage and create a feedback loop. The MOSFETs **M2**, **M3**, and **M4** together function as an error amplifier to carry on the **M5** MOSFET.

The **M5** MOSFET supplies the current of load and regulates the output voltage. This voltage is fed back to the reference voltage through resistors. The circuit offers a stable and accurate output voltage even at low input-output voltage differences [8].

Figure 4 also shows the push-pull configuration used to increase the gate drive current dynamically when the load changes. This structure reduces power consumption and affords low forward gain and low output resistance [8].

$$V_{LDO_Out} = \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \cdot V_{reference} \quad (6)$$

The output voltage obtained in the LDO voltage regulator circuit can be derived from Equation 6. This output voltage, which is $1.2V$ DC, serves as the supply source for the VCO circuit. The connection ensures that the VCO operates with a stable and regulated DC voltage source. Figure 5 shows the layout of the designed LDO regulator occupying an area of $783 \mu m^2$.

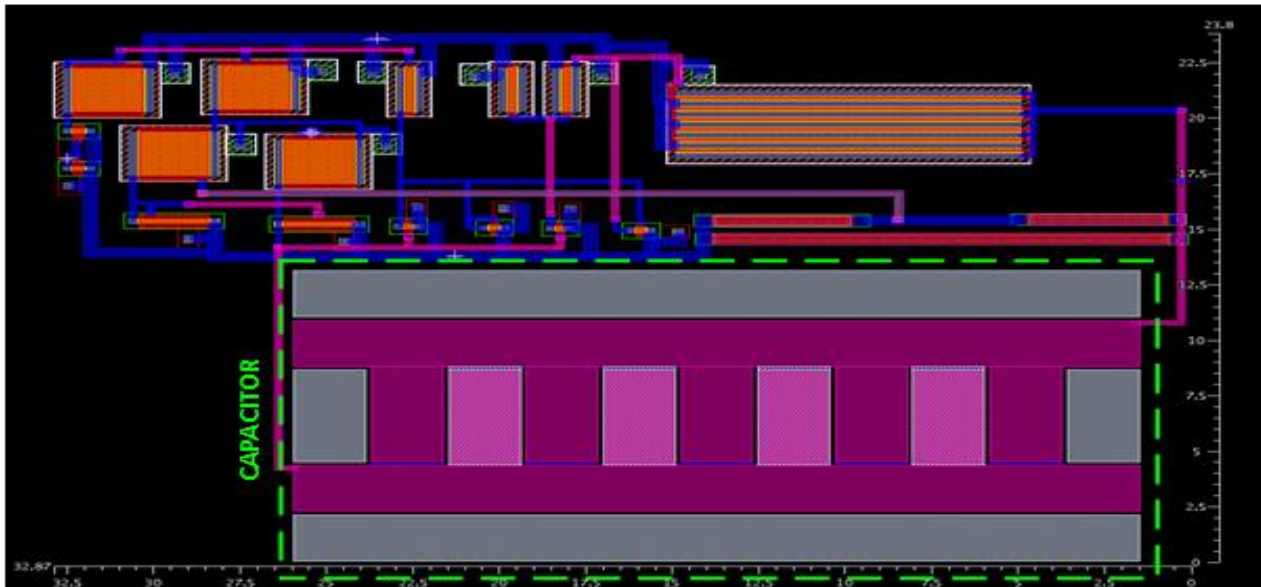


Figure 5. LDO layout design.

2.3 VCO

In this study, a CSVCO (Current Steering Voltage-Controlled Oscillator) is preferred as an oscillator structure that offers a wide tuning range and meets various performance requirements. The primary reason for using the CSVCO is that it supports a balanced solution among power consumption, area, and phase noise due to its wide tuning range [18].

Figure 6 shows the schematic view of the VCO circuit. The circuit consists of five differential delay cells and two buffer cells. The differential delay cells increase the oscillation frequency and decrease phase noise, while the buffer cells convert the oscillations into square waves.

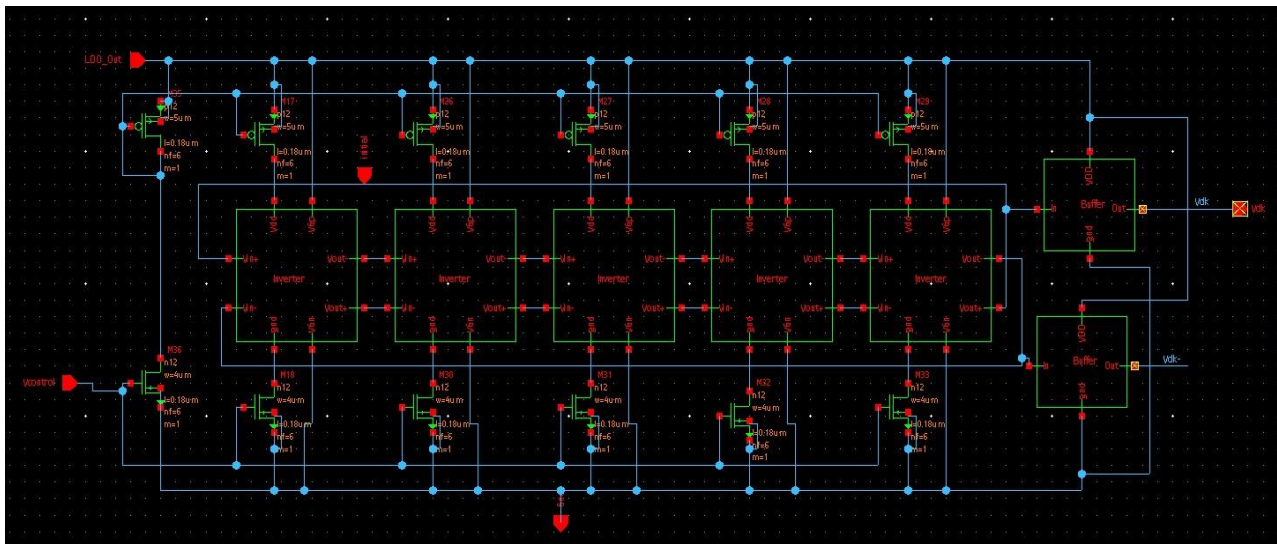


Figure 6. The schematic view of the VCO circuit together with the node voltages of the differential pairs.

Figure 7 shows the differential delay cell, which serves as a building block for the CSVCO. This circuit increases the oscillation frequency and keeps down the leakage power loss caused by phase noise. To maximize these benefits, five differential delay cells are used in the circuit.

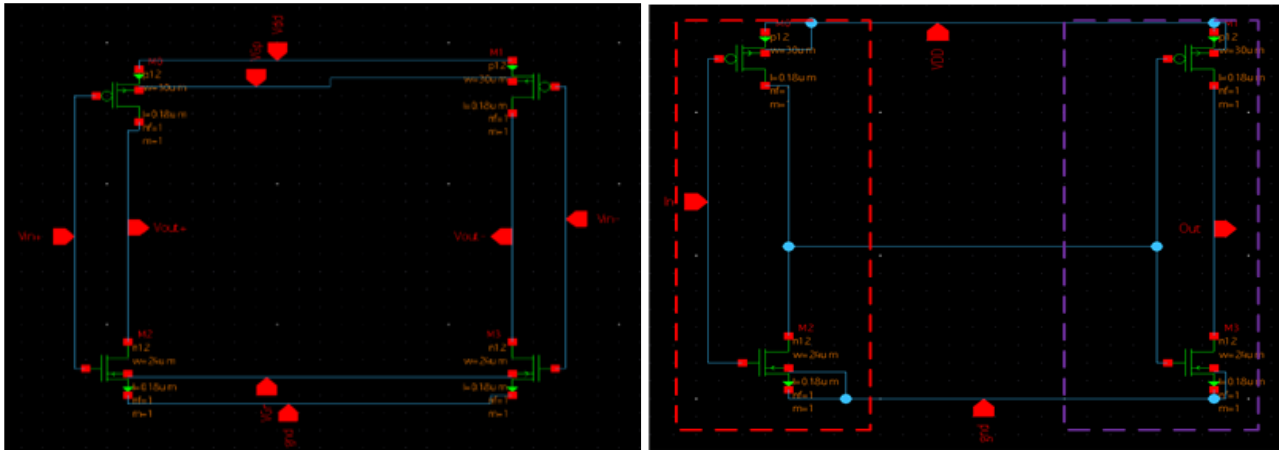


Figure 7. Differential delay cell and buffer circuit.

When the control voltage ($V_{control}$) of the current-starved VCO exceeds the threshold voltage, the M36 MOSFET turns on, and the current mirror MOSFETs **M36**, **M35**, **M17**, **M26**, **M27**, **M28**, and **M29** enter the active region. In the differential delay cell, the **M2** and **M3** (n-type) MOSFETs form the pulling network. The differential inverter switches on since the MOSFETs **M0**, **M1**, **M2**, and **M3** become active. The connection of the five differential delay cells in the CSVCO is made in series, with the *out* + and *in* – labels connected in series, while the *out* – and *in* + labels are also connected in the same manner. The output of the fifth inverter is fed back to the input of the first inverter, creating a continuous signal loop. As a result of this loop, the control voltage is inverted between each delay cell, and the CSVCO begins to produce oscillations.

In addition to all the processes, as the control voltage increases, the frequency of the oscillations also increases linearly, just like in a traditional VCO situation [13]. Figure 7 also shows the buffer circuit, formed by the series connection of the inverters shown in red and purple, which converts the sinusoidal oscillations produced by the differential cells in the CSVCO circuit into square pulses. Figure 8 shows the layout of the designed VCO circuit occupying an area of $1531 \mu m^2$.

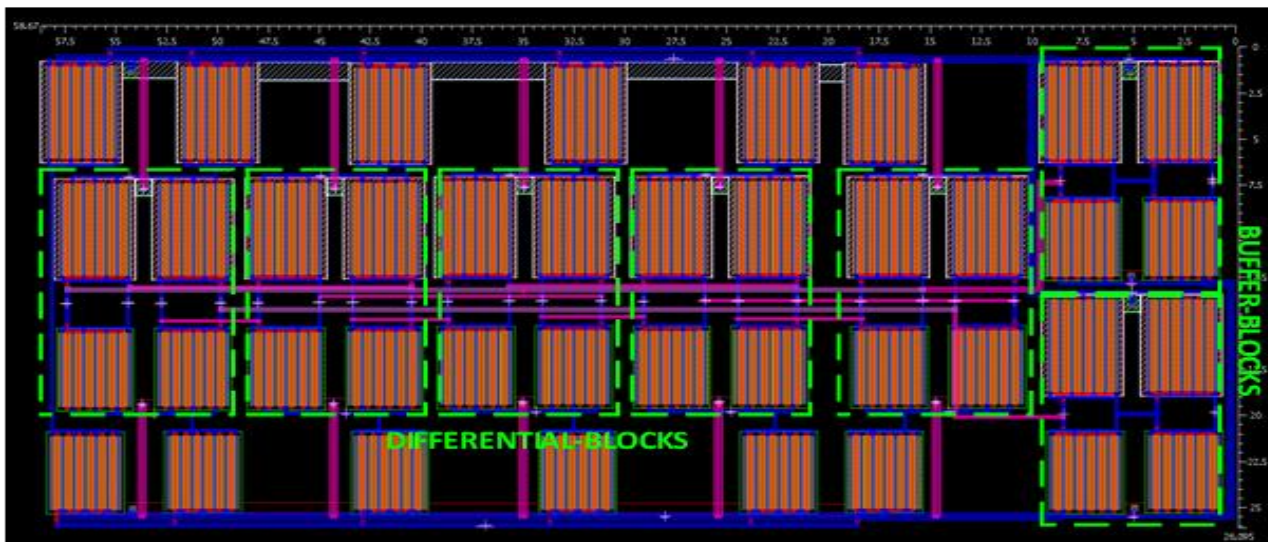


Figure 8. VCO layout design.

3. Results and Discussion

In this section, simulation results which are conducted using the Synopsys application to evaluate the functionality of the designs are presented. The layouts formed for the post-layout simulations of all designs have successfully passed the DRC and LVS checks.

3.1. BGR Simulations

In the BGR test environment, dc, tran, and xf analyses are used to meet the requirements. Among these analyses, the dc analysis is executed to determine the values of the reference voltage (V_{ref}) and the node voltages. By utilizing the sweep feature within the dc analysis, voltage variations dependent on temperature are observed, and the resulting voltage values are used to calculate the ppm value. The tran analysis was applied to obtain a time-dependent graph. This allows for the observation of both the reference voltage and its variations when the supply voltage (V_{supply}) decreases and increases by 10%. The xf analysis enabled us to determine the PSRR value. During this analysis, an 1V AC voltage was applied to the circuit's supply voltage.

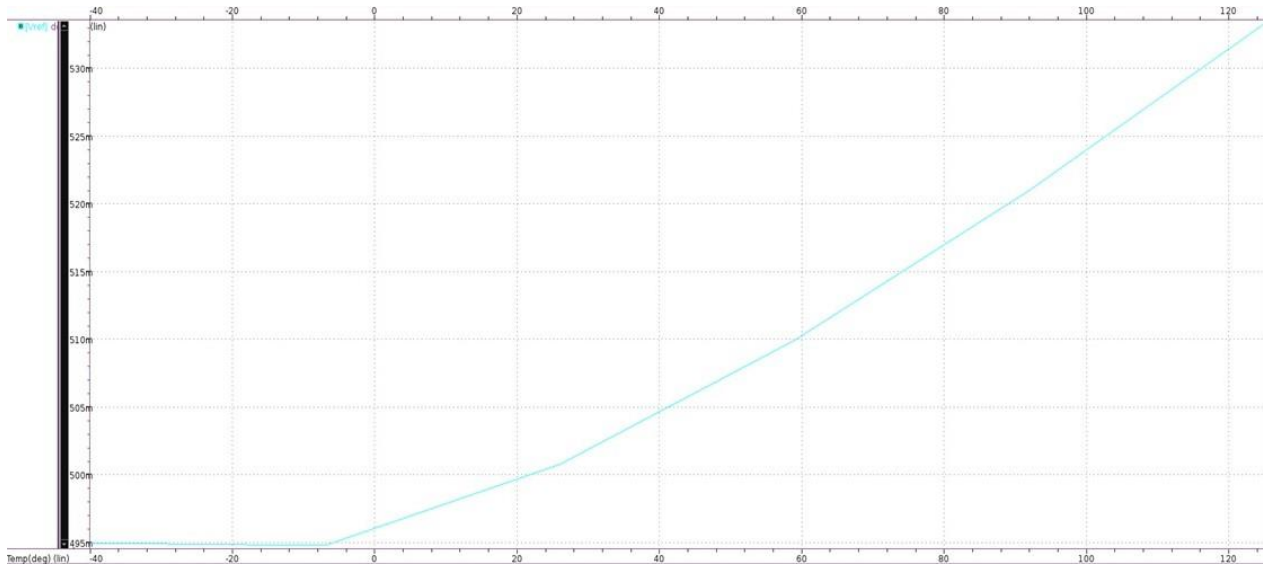


Figure 9. Temperature variation graph in the schematic design.

Figure 9 shows the temperature variation of the BGR schematic circuit between -40°C and 125°C for a 500 mV reference voltage. The reference voltage in this range remains between 495 mV and 533 mV.

$$TCV_o = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{nominal} (T_{max} - T_{min})} \cdot 10^6 \quad (7)$$

Based on the ppm calculation formula provided in Equation 7, the temperature variation of the circuit is estimated approximately as $460 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$. The same simulation is also carried out for the layout of the BGR circuit, which is close to the schematic results.

Table 1. BGR simulation results.

	Schematic Simulation Results	Post-Layout Simulation Results
Reference Voltage	501 mV	488 mV
PSRR	-2.4 dB	-2.9 dB
Temperature Coefficient	460 ppm/ $^{\circ}\text{C}$	509 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
Power Consumption	0.185 mW	0.167 mW
Reference Voltage in Supply	In 1.8V+10%, 498 mV	In 1.8V+10%, 485 mV
1.8V$\pm$10%	In 1.8V-10%, 503 mV	In 1.8V-10%, 491 mV
Start-up Circuit	Added	Added

3.2. LDO Simulations

In the LDO test environment, dc, tran, and lstb analyses have been used to simulate important parameters of the circuit. Among these analyses, the dc analysis has been run to evaluate the output voltage and node voltages. The tran analysis has been applied to obtain graphical outputs. The lstb analysis has determined the loop gain and

phase margin. During this analysis, a supply voltage of 1V (AC) was applied to the circuit. By using the **dc** and **tran** analyses together, the power consumption, line regulation, and load regulation of the circuit is examined.

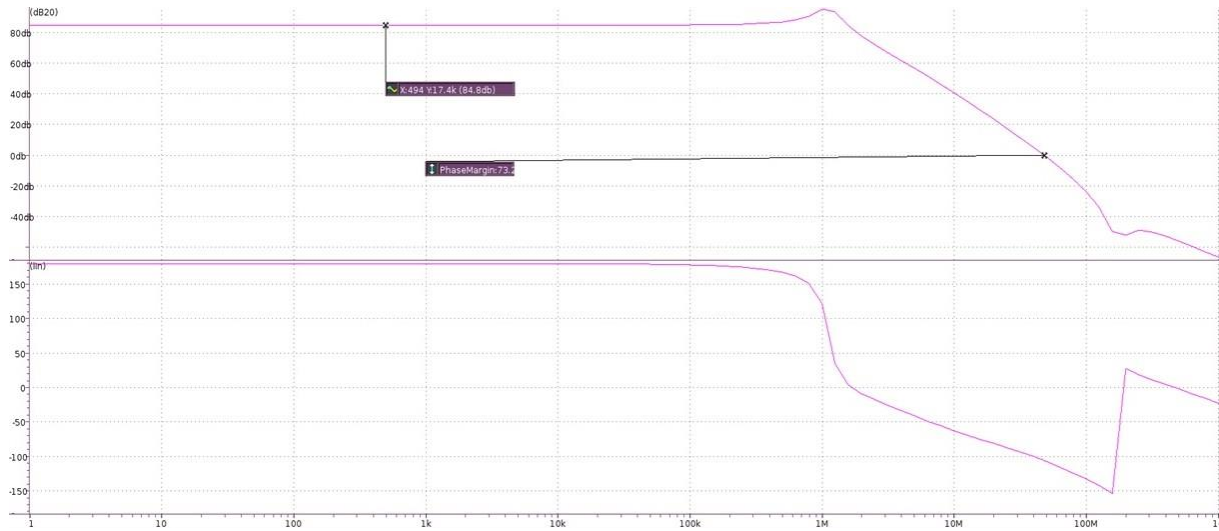


Figure 10. Loop gain and phase margin graph in the schematic design.

To get the loop gain and phase margin, a capacitor with a value of 500 pF was connected to the output of the LDO circuit, and a constant current of 1 mA was drawn using a current source from the output. Figure 10 shows the lsb analysis graph, where the loop gain of the LDO circuit is 84.8 dB, and the phase margin is 73.2°. When the LDO circuit has no output load, a maximum power consumption of 1.69 mW has been achieved.

Table 2. LDO simulation results.

	Schematic Simulation Results	Post-Layout Simulation Results
Output Voltage	1.2 V	1.2 V
Loop Gain and Phase Margin	84.8 dB and 73.2°	74.5 dB and 110°
Power Consumption	1.69 mW	1.67 mW
Output Voltage Against Current Pulses	1.56 V deviation	2.52 V deviation
Line Regulation	Constant Output Voltage	Constant Output Voltage
Load Regulation	Constant Output Voltage	Constant Output Voltage

3.3. VCO

In the VCO test environment, dc, tran, sn, and snnoise analyses have been used to simulate the circuit. The dc analysis was employed to observe the output voltage (V_{clk}) and the node voltages. The tran analysis aimed to visualize the time-dependent variation of the square pulse and its frequency value. To achieve this waveform, an 'initial condition' was provided to the circuit. The given initial condition was applied between the V_{in+} terminal of the first inverter and the V_{out+} terminal of the fifth inverter. Additionally, the rise and fall times were calculated and observed using this analysis. The sn and snnoise analyses were utilized to assess the phase noise values. Finally, a sweep analysis was performed to calculate the KVCO value.

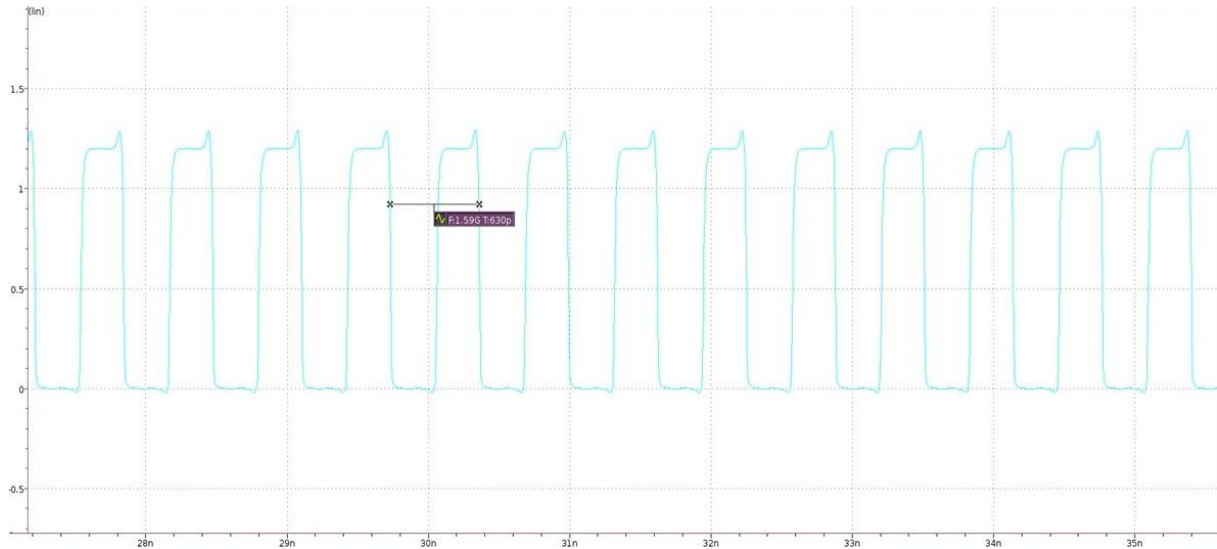


Figure 11. The operating frequency of the VCO schematic circuit.

Figure 11 shows the waveform produced by the VCO schematic circuit when it operates without a load. The frequency of the generated waveform has been observed to be 1.59 GHz. The output voltage (V_{clk}) of the circuit varies between 0 V and 1.2 V.

Table 3. VCO simulation results.

	Schematic Simulation Results	Post-Layout Simulation Results
Operating Frequency	1.59 GHz	1.26 GHz
Duty Cycle	43.7%	44.1%
Power Consumption	Max 13 mW	Max 12 mW
Range of Square Wave	0-1.2 V	0-1.23 V
Control Voltage	0.77 V	0.77 V
KVCO	733 MHz/V	567 MHz/V
Phase Noise	-97.1 dBc	-99.9 dBc
Rise and Fall Time at 1600MHz	0.195 ns	-

3.4. Entire System

The designed circuits are combined to get a stable oscillator structure as given in Fig.1. The simulations of the entire system are also performed to understand the performance. Figure 12 shows the layout of the entire system occupying an area of 3645 μm^2 . This area represents the overall physical footprint of the system, including all components and interconnections.



Figure 12. Entire system layout design.

The total power consumption of the schematic of the entire circuit is simulated to be 21.5 mW while this value is 18.2 mW for the post-layout simulations. These values represent the total energy consumption of the system, considering all components and their activities during operation.

Table 4. Entire system simulation results.

	Schematic Simulation Results	Post-Layout Simulation Results
BGR Reference Current	-1.74 μ A	Between -1.4 μ A and -1.62 μ A
LDO Output Voltage	0.361-1.57 V	1.11-1.25 V
VCO Operation Frequency	1.8 GHz	1.2 GHz
Power Consumption	Max 21.5 mW	Max 18.2 mW

4. Conclusions

This study presents the design and performance analyses of Bandgap Reference (BGR), Low Dropout Regulator (LDO), and Voltage Controlled Oscillator (VCO) circuits for low-power integrated systems. Our work presents an approach that simultaneously addresses the requirements of low power consumption, temperature stability, and frequency accuracy by integrating these three circuits. These features are particularly important in areas where power efficiency is critical, such as mobile devices and embedded systems, and our research expands upon the limited studies in the literature regarding the combined use of these circuits. The BGR circuit provides a stable reference current against temperature variations. These results validate that the BGR circuit offers temperature stability in line with previous studies, supporting its applicability in mobile and industrial applications. The LDO circuit delivers efficient power regulation with a low dropout voltage and possesses the ability to respond quickly to changes in load conditions, thus giving solutions for various power management requirements. This feature enhances the stability of the LDO circuit in integrated systems, ensuring long-lasting and reliable power management. The VCO circuit operates with low phase noise across a wide frequency range, offering a critical solution for communication systems. Its capability to generate a frequency with sufficient accuracy to meet signal synchronization requirements demonstrates that the VCO is suitable for applications in the field of communications. These findings demonstrate that the study serves as a fundamental work for temperature stability, power efficiency, and frequency accuracy in low-power systems. This work presents a new perspective on the combined use of BGR, LDO, and VCO circuits to improve the performance of integrated circuits, representing a significant step toward achieving more efficient and reliable performance in low-power systems. For future work, process variation analyses, advanced reliability studies, and actual silicon testing should be performed to validate the practical implementation and ensure robust performance under real-world conditions. These works will fill the gap between simulation results and commercial viability of the proposed integrated system.

Authors' Contributions

EB, UR, BE, EBS, YZ: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing - Original Draft, Visualization (Authors contributed equally). **MYT:** Writing - Review & Editing, Validation, Supervision.

Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Conflict of Interest

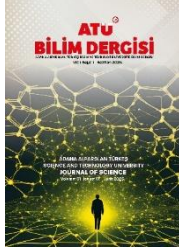
There is no conflict of interest in this study.

Funding Institution

Teknofest Chip Design Competition

References

- [1] Razavi, B. (2021). The design of a low-voltage bandgap reference, *IEEE Solid-State Circuits Magazine* 13(3), 6-16.
- [2] Banba, H., Shiga, H., Umezawa, A., Miyaba, T., Tanzawa, T., Atsumi, S., Sakui, K. (1999). A CMOS bandgap reference circuit with sub-1-V operation, *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 34(5), 670-674.
- [3] Pakravan, E., Mojarad, M., Mashoufi, B. (2023). A low-power bandgap voltage reference circuit with ultra-low temperature coefficient. In *Proceedings of the 5th Iranian International Conference on Microelectronics (IICM2023)*, 16-20.
- [4] Hongprasit, S., Sa-ngiamvibool, W., Aurasopon, A. (2012). Design of bandgap core and startup circuits for all CMOS bandgap voltage reference, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 88(4a), 277-280.
- [5] Lee, C.-L., Sidek, R. M., Rokhani, F. Z., Sulaiman, N. (2015). A low power bandgap voltage reference for low-dropout regulator. In *Proceedings of RSM 2015*.
- [6] Khan, D., Basim, M., Qurrat-ul-Ain, Q., Shah, S. A. A., Shehzad, K., Verma, D., Lee, K. Y. (2022). Design of a power regulated circuit with multiple LDOs for SoC applications, *Electronics* 11(17), 2774.
- [7] Bhuiyan, M. A. S., Hossain, M. R., Minhad, K. N., Haque, F., Hemel, M. S. K., Dawi, O. M., Reaz, M. B. I., Ooi, K. J. A. (2022). CMOS low-dropout voltage regulator design trends: An overview, *Electronics* 11(2), 193.
- [8] Zhang, R., Liu, Z., Wang, X. (2021). A capacitor-less LDO with nested Miller compensation and bulk-driven techniques in 90 nm CMOS. In *Proceedings of the 4th International Conference on Circuits, Systems and Simulation (ICCSS)*, 51-55.
- [9] Magod, R., Suda, N., Ivanov, V., Balasingam, R., Bakkaloglu, B. (2017). A low-noise output capacitorless low-dropout regulator with a switched-RC bandgap reference, *IEEE Transactions on Power Electronics* 32(4), 2856-2864.
- [10] Hajimiri, A., Lee, T. H. (1998). A general theory for phase noise in electrical oscillators, *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 33(2), 179-194.
- [11] Chang, Y.-H., Luo, Y.-L. (2024). CMOS voltage-controlled oscillator with complementary and adaptive overdrive voltage control structures, *Electronics* 13(2), 440.
- [12] Anjum, N., Yadav, V. K. S., Nath, V. (2023). Design and analysis of a low power current starved VCO for ISM band application, *International Journal of Microsystems and IoT* 1(2), 82-98.
- [13] Rahul, R., Thilagavathy, R. (2014). A low phase noise CMOS voltage-controlled differential ring oscillator. In *Proceedings of the International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, 1025-1028.
- [14] Razavi, B. (2017). *Design of analog CMOS integrated circuits* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [15] Ito, T. (2003). Research and development of advanced CMOS technologies, *FUJITSU Scientific & Technical Journal* 39(1), 3-8.
- [16] Sangolli, S. S., Rohini, S. H. (2015). Design of low voltage bandgap reference circuit using subthreshold MOSFET. In *Proceedings of the 5th Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*.
- [17] Huang, C. H., Liao, W. C. (2020). A high-performance LDO regulator enabling low-power SoC with voltage scaling approaches, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* 28(5), 1141-1149.
- [18] Dinesh, S., Bharadwaj, S. (2017). New modified current starved ring voltage controlled oscillator and frequency to voltage rectifier for noise suppression from 1–6 GHz in 180 nm technology, *Procedia Computer Science* 115, 756-763.



Investigation of the Effects of Sodium Pentaborate Pentahydrate on MC3T3-E1 Mouse Pre-osteoblast Cell Line

Oula Alkhalifa Aldham¹ , Merve Çapkin Yurtsever^{2#} 

^{1,2}Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Bioengineering, 01250 Adana, Türkiye

ORCID¹: 0009-0004-6202-5112

ORCID²: 0000-0001-7874-4016

#Corresponding Author:
mcyurtsever@atu.edu.tr

Abstract

Boron compounds have been investigated in many studies for their positive effects on human health, antimicrobial properties and their effects on cell proliferation and differentiation. In this study, the effects of sodium pentaborate pentahydrate on the viability and osteogenic differentiation of MC3T3-E1 mouse osteoblast cell line were investigated. The effect of SPP on cell viability was examined by MTT and resazurin analyses. The osteogenic differentiation properties of cells with and without SPP treatment at selected concentrations were examined by invert phase contrast microscope images and alkaline phosphatase (ALP) staining methods. It was determined that the viability of MC3T3-E1 cells was not affected up to 2 mg/mL SPP in the culture medium after 24 hours of culture, while 0.25 mg/mL SPP significantly increased cell viability compared to the control group. Therefore, SPP concentrations of 0.125, 0.25 and 0.5 mg/mL were selected to understand the effect of SPP on osteogenic differentiation of MC3T3-E1 cells at days 7 and 14. Invert phase contrast images and ALP staining indicated that osteogenic differentiation capacity of MC3T3-E1 cell line was suppressed in the presence of SPP. There was no ALP stain in osteogenically induced cells in the presence of SPP. These findings showed that 0.125, 0.25 and 0.5 mg/mL SPP suppressed osteogenic differentiation in long-term cultures, although it had no negative effect on cell viability at 24 hours.

Keywords: MC3T3-E1 cell line; Osteogenic differentiation; SPP (NaB)

Sodyum Pentaborat Pentahidratın MC3T3-E1 Fare Pre-osteoblast Hücre Hattı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Öz

Bor bileşikler, insan sağlığı üzerindeki olumlu etkileri, antimikrobiyal özellikleri ve hücre çoğalmasını ve farklılaşmasını destekleyici etkileri ile pek çok çalışmada araştırılan bileşiklerdir. Bu çalışmada, sodyum pentaborat pentahidratın MC3T3-E1 fare osteoblast hücre hattının canlılığı ve kemik farklılaşması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. SPP'nin hücre canlılığı üzerindeki etkisi MTT ve resazurin analizleri ile incelenmiştir. Seçilen konsantrasyonlarda SPP uygulanan ve uygulanmayan hücrelerin kemik farklılaşma özellikleri invert faz kontrast mikroskop görüntüleri ve ALP boyama yöntemleri ile incelenmiştir. MC3T3-E1 hücrelerinin canlılığının 24 saatlik kültür sonrasında kültür ortamında 2 mg/mL SPP'ye kadar etkilenmediği, bunun yanında 0.25 mg/mL SPP'nin hücre canlılığını kontrol grubuna göre anlamlı olarak artırdığı belirlenmiştir. Bu nedenle, SPP'nin MC3T3-E1 hücrelerinin 7. ve 14. günlerde kemik farklılaşması üzerindeki etkisini anlamak için 0.125, 0.25 ve 0.5 mg/mL SPP konsantrasyonları seçilmiştir. Invert faz kontrast görüntüleri ve alkalın fosfataz boyaması, MC3T3-E1 hücre hattının kemik farklılaşma kapasitesinin SPP varlığında baskılandığını göstermiştir. SPP varlığında osteojenik olarak indüklenen hücrelerde ALP boyanması görülmemiştir. Bu bulgular, 0,125, 0,25 ve 0,5 mg/mL SPP'nin 24 saatte hücre canlılığı üzerinde olumsuz bir etki göstermemesine karşın uzun süreli kültürde osteojenik farklılaşmayı baskıladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: MC3T3-E1 hücre hattı; osteojenik farklılaşma; SPP (NaB)

Received: 15/06/2025

Accepted: 23/07/2025

Online Published: 25/12/2025

How to Cite: Alkhalifa Aldham O., Çapkin Yurtsever M. "Investigation of the Effects of Sodium Pentaborate Pentahydrate on MC3T3-E1 Mouse Pre-osteoblast Cell Line" Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University Journal of Science, 1 (2): 62-69 (2025).

1. Introduction

Based on the most recent data, bone transplantation is the second most common tissue transplant performed worldwide, after blood transfusions. While 4 million individuals worldwide need bone replacement surgery or transplants each year, the number of age-related bone problems in the US is predicted to rise from 2.1 million in 2005 to 3 million in 2025. Between 2010 and 2025, the number of fracture cases in Europe grew by almost 28% due to population growth. Effectively treating and curing bone disorders is very important clinically [1]. Tissue engineering offers an effective replacement for bone regeneration. In cases when fractures need surgery, tissue engineering offers a possible substitute for bone repair [2]. In this study, the effect of SPP (sodium pentaborate pentahydrate) on the osteogenic differentiation of MC3T3-E1 cells was investigated.

Bone tissue engineering applications reduces dependency on donor tissue while promoting bone regeneration through the use of biomaterials, cells, and bioactive substances. One of the biggest benefits is the possibility of only one surgery since well-made scaffolds with ideal mechanical qualities reduce the chance of implant failure and make it simpler to integrate with natural bone [2]. In order to provide more efficient and physiologically relevant treatment, tissue engineering of bone attempts to replicate the composition and functionality of natural bone tissue. To maintain and rebuild tissue, bone cells such as osteocytes, osteoblasts, and osteoclasts interact within a hybrid matrix. Researchers are developing biodegradable polymeric biomaterials as temporarily scaffolds that are similar to the natural extracellular matrix (ECM) in order to promote bone regeneration. As functional tissue is formed, these matrices, which serve as a scaffold for bone regeneration, progressively break down and are absorbed by the body [3].

Cell lines are essential instruments for scientific research because of their ease of indefinite culture growth. The MC3T3-E1 cell line, a common in vitro osteogenic model system, was generated from newborn mouse calvaria and has been widely used in bone tissue engineering research [4]. L-ascorbic acid and β -Glycerol phosphate must be added to MC3T3-E1 cells in order to trigger matrix mineralization. MC3T3E1 cell differentiation is influenced by the type of serum used in the culture medium, as well as growth factors and cytokines produced from serum. The addition of full fetal bovine serum increases the cells' ability to divide throughout the early stages of differentiation [5]. In order to determine the feasibility of their in vitro models for biomaterial testing, [6] examined the proliferation and maturation potential of three osteoblast cell lines (SaOs2, MG-63, and MC3T3-E1) with primary human osteoblast (HOb) cells. They found that MC3T3-E1 cells might be used as suitable models for biomaterial research since they showed comparable patterns of mineralization and proliferation to primary human osteoblasts [6].

Sodium pentaborate pentahydrate (SPP, $\text{NaB}_5\text{O}_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) is a boron compound which is produced using from boric acid and sodium carbonate. SPP compound is used in many fields with its fire retardant, anti-viral and antibacterial properties. In addition, its use in biomaterials is being investigated for various tissue regeneration studies. It can also be used as a component of enzymatic liquid detergents and as a feed additive to minimize viral and bacterial pathogen contamination in shrimp. It can also be added to medicines to accelerate the healing of cutaneous wounds [7]. In this study, the effects of SPP on the viability and bone differentiation capacity of MC3T3-E1 cells were investigated.

2. Materials and Methods

2.1. MC3T3 cell culture conditions

MC3T3-E1 pre-osteoblastic cells were initially cultured in growth medium, α -Minimum Essential Medium (α -MEM; Gibco) supplemented with 10% (v/v) fetal bovine serum (FBS; Gibco), 1% (v/v) penicillin-streptomycin (Gibco), and 1% (v/v) L-glutamine (Gibco). Cells were maintained in a humidified incubator at 37°C in 5% CO_2 . The culture medium was refreshed every two days. After one week of culture, cells were harvested using trypsin-EDTA solution (Gibco). Briefly, trypsin was added to the flask and incubated for 5 minutes at 37°C to detach the cells. To neutralize the trypsin and inhibit its activity, at least 1:1 of growth medium was added. The cell suspension was collected and centrifuged at 1000 rpm for 5 minutes. The supernatant was discarded, and the cell pellet was resuspended in fresh growth medium. Subsequently, the cells were seeded into multi-well plates for further experiments.

2.2. Viability of MC3T3-E1 cells in the presence of SPP

Sodium pentaborate pentahydrate (SPP, NaB) was dissolved in α -MEM culture medium that did not contain fetal bovine serum, L-glutamine, or penicillin-streptomycin. The solution was subsequently sterilized using a 0.22 μm syringe filter. Then, fetal bovine serum, L-glutamine, and penicillin-streptomycin were added into the SPP including growth medium. Maximum SPP concentration were adjusted to 8 mg/mL for cell culture studies and this stock solution was serially diluted for viability studies.

MC3T3-E1 pre-osteoblastic cells were cultured in 96 well plates as 10.000 cells / well for one day in growth medium at 37°C in 5% CO₂. The used medium was aspirated and serially diluted SPP containing growth medium and growth medium without SPP as control group was added onto the cells. They were cultured in these media for 24 h and viability analysis was carried out using MTT (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-Diphenyltetrazolium Bromide) solution. MTT assay is a colorimetric method that measures the metabolic activity of cells. It is based on the reduction of the yellow tetrazolium salt MTT to purple formazan crystals by mitochondrial dehydrogenase enzymes in viable cells. 2.5 mg/mL MTT in PBS was diluted in growth medium and the cells were incubated at 37°C in 5% CO₂ for 3 h. At the end of incubation, the used media were removed and formazan crystals were dissolved in dimethyl sulfoxide (DMSO). Absorbance values were recorded by spectrophotometer at 570 nm reference to 690 nm. The cells cultured without SPP was used as control group and the results were given as %cell viabilities compared to the control group.

2.3. Osteogenic differentiation of MC3T3-E1 cells with / without SPP

Osteogenic differentiation medium and solution preparations were carried out as follows. A total of 250 mL of normal medium (α -MEM) and 250 mL of osteogenic differentiation medium were prepared. For the β -glycerophosphate (β -G, G9422) solution, 0.216 g was dissolved in 10 mL, and 0.5832 g was dissolved in 27 mL of culture medium (excluding serum, L-glutamine, and P/S), then sterilized using a 0.22 μ m filter to achieve a final concentration of 10 mM through a 1/10 dilution in the differentiation medium. For the L-ascorbic acid (AA, A92902) solution, 0.035 g was dissolved in 7 mL of UPW and filtered through a 0.22 μ m filter. This was added at a 1/100 dilution to obtain a final concentration of 50 μ g/mL in the differentiation medium. Dexamethasone (D4902) was prepared by dissolving 0.0026 g in 6.62 mL of absolute ethanol (99.9%) to obtain a 10⁻³ M stock solution, which was further diluted 1:100 to 10⁻⁵ M in sterile ethanol and then to 1:1000 in the differentiation medium, resulting in a final concentration of 10 nM (10⁻⁸ M). For 250 mL of differentiation medium, 25 mL of β -glycerophosphate, 2.5 mL of L-ascorbic acid, and 250 μ L of dexamethasone solutions were added. SPP was applied to cells for 13 days at concentrations of 0.125, 0.25 and 0.5 mg/mL in both growth medium and osteogenic differentiation medium. The study groups are as given in Table 1. Cells were seeded and cultured as described in subheading 2.2.

Table 1. Sample names

Control Medium (CM) SPP (mg/mL)	Differentiation Medium (DM) SPP (mg/mL)
CM- 0 SPP	DM- 0 SPP
CM- 0.125 SPP	DM- 0.125 SPP
CM- 0.25 SPP	DM- 0.25 SPP
CM- 0.5 SPP	DM- 0.5 SPP

2.4. Resazurin analysis for control and osteo induced cells

In this section, resazurin sodium salt was used to determine cell viability as an alternative to MTT viability assay. Resazurin assay is a fluorometric and colorimetric method used to assess cell viability. Resazurin is a non-toxic dye that is reduced to the fluorescent compound resorufin by metabolically active cells, allowing for real-time monitoring without harming the cells. Resazurin stock solution was prepared as 0.6 mM stock in PBS supplemented with calcium and magnesium, and sterilized using a 0.22 μ m syringe filter. This stock solution was diluted 1:10 in growth medium to prepare the working solution. For the assay, 400 μ L of the 10% resazurin-containing medium was added to the cells in each group. The cells were then incubated at 37°C in a CO₂ incubator for 2 h. After incubation, 200 μ L of the supernatant from each sample was transferred into a 96-well plate, and the absorbance was measured at wavelengths of 570 nm and 600 nm. Resazurin analysis was performed on days 1, 3, 6, and 13. The culture medium was refreshed every 2 days.

2.5. ALP staining

ALP (Alkaline phosphatase) synthesis is an important marker for bone differentiation and ALP staining was carried out on day 14. Cultured cells were fixed using 10% neutral buffered formalin for 15 min and washed using UPW (ultra pure water) for 2 times. Then, they were stored at +4 oC for further ALP staining. The cells were brought to RT (room temperature) and washed with UPW. A fresh substrate solution was prepared by first dissolving 0.3127 g of Tris HCl in 10 mL of UPW and adjusting the pH to 8.0 using 200 μ L of 1 M NaOH. Subsequently, 0.0014 g of naphthol AS was dissolved in 56 μ L of dimethylformamide and mixed with 7 mL of UPW and 7 mL Tris-HCl buffer. Then, 0.0084 g of Fast Red Violet LB salt was added, and the entire solution was filtered

with a 0.22 μm filter. 400 μL of this fresh substrate solution was added to every well, and the samples were incubated for 1 hour. The wells were washed four times with UPW and allowed to stand for 1 hour after incubation. For silver nitrate staining, a 2.5% (w/v) silver nitrate solution was made by dissolving 0.5 g of AgNO_3 (silver nitrate) in 20 mL of UPW. The samples were incubated in this solution for 30 minutes and then rinsed three times with UPW. The samples were incubated in UPW for 5 minutes and then allowed to dry. The samples were observed under invert phase-contrast microscope.

2.6. Statistical analysis

Real Statistics Resource Pack software (Release 8.9.1). Copyright (2013 – 2023) from Charles Zaiontz (www.real-statistics.com) was used to perform one-way ANOVA test and Tukey-Kramer multiple comparisons test.

3. Results and Discussion

In this study, the effects of SPP, a boron compound, on viability of MC3T3-E1 cells and their osteogenic differentiation properties were investigated. When different concentrations of SPP were applied to the cells for 24 hours, it was determined that cell viability was not adversely affected up to a concentration as high as 2 mg/mL (Figure 1). It was determined that cells cultured in 0.25 mg/mL SPP concentration showed significantly higher viability compared to the control group without SPP. The cell viability decreased 92.85% and 49.1% at 4 mg/mL and 8 mg/mL SPP concentrations ($p < 0.001$ compared to all groups), respectively.

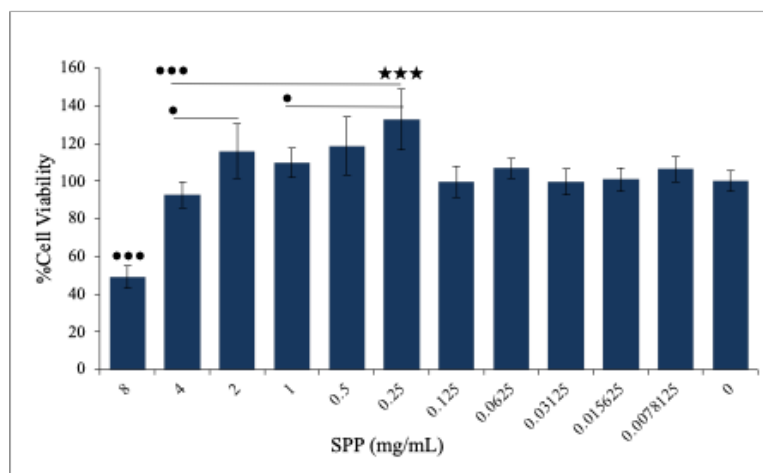


Figure 1. The effect of SPP on viability of MC3T3-E1 cells at 24 h culture. “★” is significantly higher and “●” is significantly lower than all other groups or compared group.

The osteogenic differentiation promoting properties of different boron compounds have been demonstrated in the literature with various cell lines and stem cells [8]. SPP has been used less in the literature than other boron compounds. One reason for this may be that SPP is not a natural boron compound but is synthesized using boric acid and sodium carbonate [9]. In this study, the effect of SPP on the osteogenic differentiation potential of MC3T3-E1 cells was analyzed by both resazurin assay and ALP staining. SPP was applied to the cells at selected concentrations both in growth medium and in osteogenic differentiation medium. 0.125, 0.25 and 0.5 mg/mL concentrations of SPP were selected according to the results of viability analysis. 0.25 mg/mL SPP was the group that supported cell viability the most compared to the control group. 0.125 and 0.5 mg/mL SPP groups were selected as groups that did not affect cell viability positively or negatively. Inverted phase contrast images of the cells both for growth medium and osteogenic differentiation medium with or without SPP are given in Figure 2. The morphology of MC3T3-E1 cells is generally spindle like at the beginning of culture. When the cells become dense and compacted in culture and with osteogenic differentiation, they gain a more cubic shape [4]. In our study, since the cells completely covered the surface and reproduced intensively on the 7th and 14th days, it is not possible to comment on the single cell morphology. However, the difference between control groups and SPP including groups were significant in invert phase contrast images. The density of the cells decreased with increasing SPP concentration resulting less cell viability as also given in resazurin analysis results in Figure 3. Unlike what is expected in osteogenic differentiation, cell extensions were also more prominent in SPP-treated groups compared to the control group.

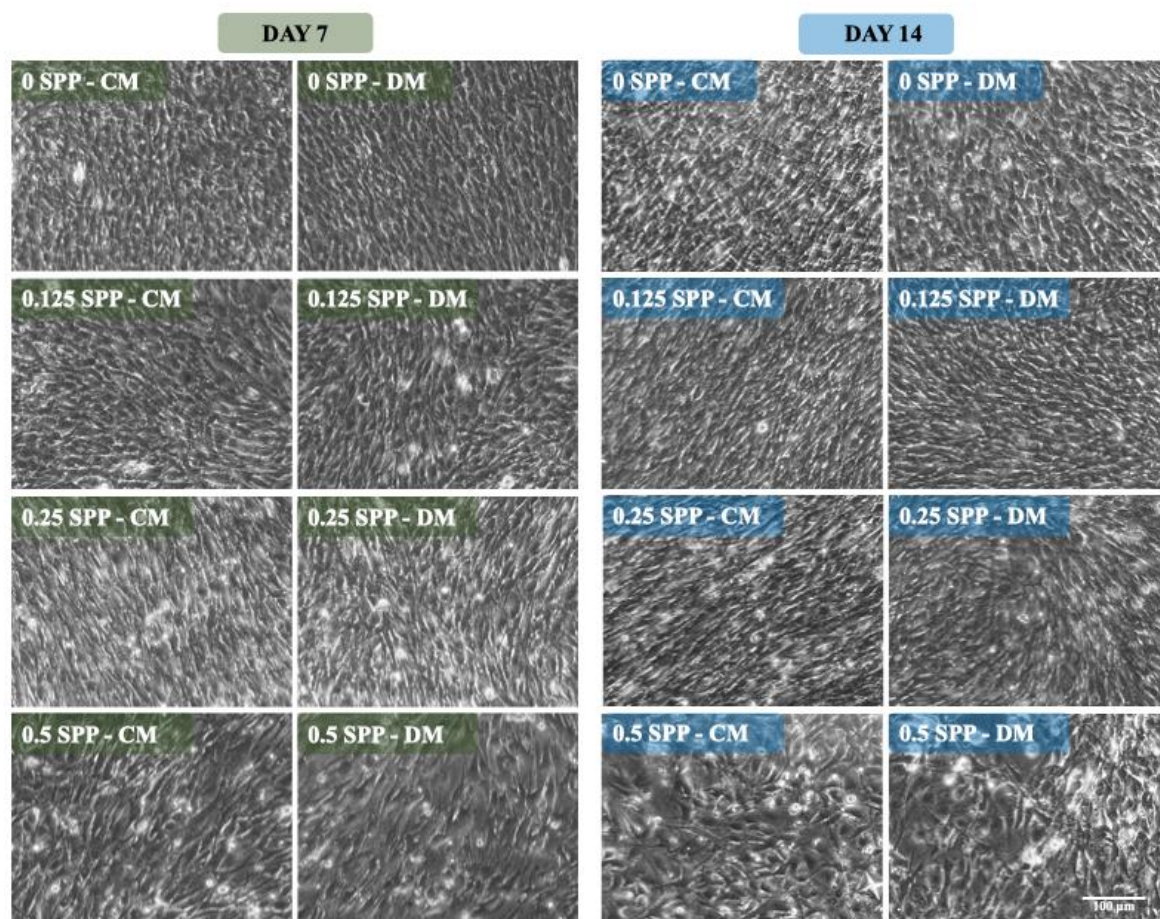


Figure 2. Invert phase contrast images of MC3T3-E1 cells with or without SPP at 0.125, 0.25 and 0.5 mg/mL concentrations both in culture medium and osteogenic differentiation medium (20X). Nomenclature is described in Table 1. Scale bar is the same for all images.

Viability of MC3T3-E1 cells with or without SPP and with or without osteogenic differentiation medium was determined by resazurin analysis. The results are given in Figure 3 and Figure 4. All groups are shown comparatively in Figure 3, while the results of the 13th day are shown in detail in Figure 4 by statistical analysis. Increased cell viabilities were recorded for all group from day 1 to day 13.

When the effect of differentiation medium on cell proliferation was examined, it was observed that the viability of the cells cultured in the differentiation medium was significantly lower than those cultured in the control medium ($p < 0.05$), while in the presence of 0.125 mg/mL SPP in the medium, the cell viability in the differentiation group was significantly ($p < 0.01$) higher than in the control group (Figure 4a). The significant differences in viability between the control and SPP groups at day 13 are better illustrated in Figure 4b. Cells in growth medium without SPP showed highest cell viability when compared to the SPP including groups. However, in differentiation medium, cells cultured with 0.125 mg/mL SPP showed higher viability than those cultured in differentiation medium alone ($p < 0.05$). The control group showed significantly higher viability than the groups with 0.25 mg/mL SPP and 0.5 mg/mL SPP in both media. In line with these results, the suppressive effect of SPP on cell viability was shown at values of 0.25 mg/mL and above as the culture time was prolonged. When the first day results were analyzed, it was observed that SPP concentrations, which did not show a negative effect on cell viability, suppressed cell proliferation in dose dependent manner as the culture time was prolonged.

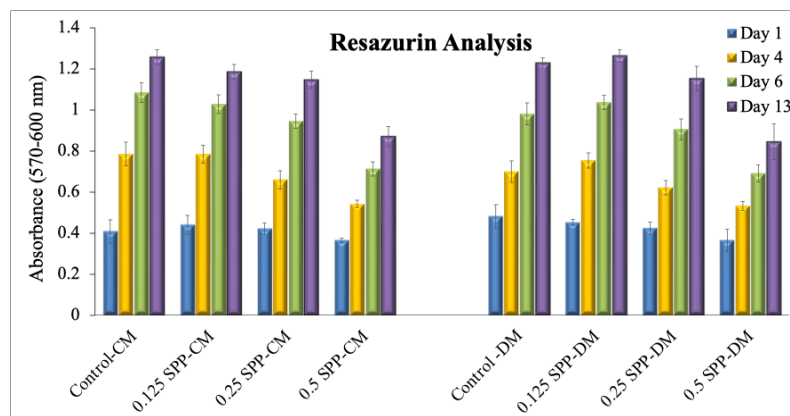


Figure 3. Resazurin analysis results of osteogenically induced and control MC3T3-E1 cells with / without SPP in culture medium at days 1, 4, 6, and 13.

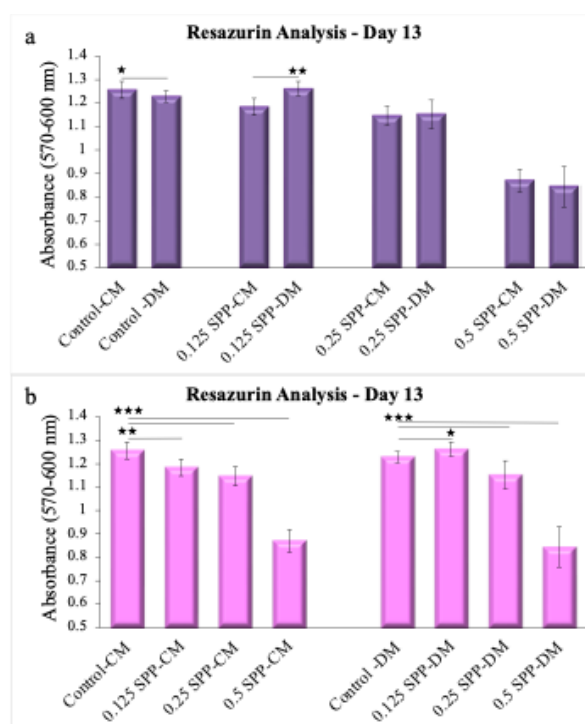


Figure 4. Resazurin analysis results of osteogenically induced and control MC3T3-E1 cells with / without SPP in culture medium at day 13. ★ ($p < 0.05$), ★★ ($p < 0.01$), and ★★★ ($p < 0.001$) mean significant difference between compared groups. a) Comparison of groups containing the same amount of SPP b) Comparison of cells cultured in control medium or differentiation medium containing different amounts of SPP. CM: control medium, DM: differentiation medium.

Alkaline phosphatase (ALP) activity is one of the most important and widely used parameters to demonstrate osteogenic differentiation of osteoblast cells and stem cells [10]. In this study, the effect of SPP on the osteogenic differentiation potential of MC3T3-E1 cells was analyzed by ALP staining. Inverted phase contrast images of ALP stained osteogenically induced MC3T3-E1 cells in control medium without SPP after 14 days of *in vitro* culture are given in Figure 5. ALP activity was observed only in osteogenic-induced MC3T3-E1 cells without SPP application. No ALP activity was observed in other groups (images not shown). The pink areas in the images show high ALP activity, while the darker areas show mineralization. Although there are studies in the literature investigating the effects of SPP on different cell lines and stem cells, no study with MC3T3-E1 cell line was found within the scope of our research. In a study, osteogenic and odontogenic differentiation of human tooth germ stem cells was investigated in the presence of 20 µg/mL SPP. Increased mineralization, ALP activity and expression of osteogenic and odontogenic markers were found for human tooth germ stem cells after 14-day of culture in differentiation medium [8]. This study differs from ours in that it uses different cells and has a lower SPP concentration (6.25 times lower than the lowest concentration utilized in our study, 0.125 mg/mL). In another study, the effects of SPP on primary human dermal fibroblasts and cutaneous wound healing was investigated. 0.15 µg/mL SPP concentration

significantly increased migration capacity and superoxide dismutase activity of the cells. In addition, combination of SPP in Pluronic gel supported cutaneous wound healing with increased collagen synthesis and contraction in wound area [11].

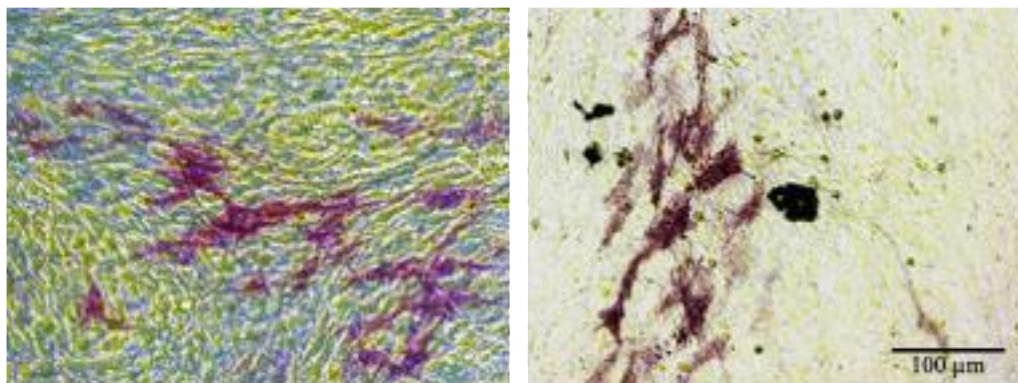


Figure 5. ALP staining results of osteogenically induced MC3T3-E1 cells in control medium without SPP after 14 days of *in vitro* culture (20x). Scale bar is the same for images.

4. Conclusions

In this study, the effects of SPP, a boron compound, on the viability and osteogenic differentiation capacity of MC3T3-E1 mouse pre-osteoblast cell line were investigated. MTT analysis results indicated that cells cultured in 0.25 mg/mL SPP concentration showed significantly higher viability compared to the control group without SPP at 24 h culture. The cell viability decreased 92.85% and 49.1% at 4 mg/mL and 8 mg/mL SPP concentrations ($p < 0.001$ compared to all groups), respectively. Osteogenic differentiation studies were carried out at 0, 0.125, 0.25 and 0.5 mg/mL concentrations of SPP. In addition, resazurin analysis indicated that the cells retained their proliferation capacity through 13 day of cell culture both in growth medium and osteogenic induction medium. However, SPP treatment reduced MC3T3-E1 cell proliferation except for cells cultured in 0.125 mg/mL SPP containing osteogenic differentiation medium. Besides that, there was no ALP activity in all SPP applied groups. ALP activity was only observed for cells cultured in SPP-free osteogenic differentiation medium. As a result, the SPP concentrations applied in this study generally suppressed the proliferation of MC3T3-E1 cells in both growth medium and bone differentiation medium, but also reduced their osteogenic differentiation potential. In future studies, the effects of lower concentrations of SPP on osteogenic differentiation of MC3T3-E1 cells can be examined both by *in vitro* cell culture techniques and molecular techniques.

Acknowledgement

The authors thank to the Scientific Research Projects Coordination Unit of Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University (BAP) with the project number 24303003.

Authors' Contributions

OAA: Investigation, Writing - Original Draft. **MÇY:** Supervision, Conceptualization, Investigation, Writing - Original Draft, Writing - review & editing, Resources, Methodology, Data Curation.

Declaration of Ethical Standards

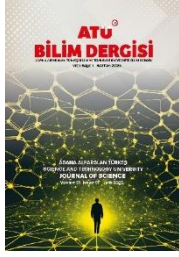
The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Conflict of Interest

The authors confirm that there is no conflict of interest in this work.

References

- [1] Xue, N., Ding, X., Huang, R., Jiang, R., Huang, H., Pan, X., Min, W., Chen, J., Duan, J. A., Liu, P., Wang, Y. (2022). Bone Tissue Engineering in the Treatment of Bone Defects. *Pharmaceuticals* 15, 7.
- [2] Manzini, B. M., Machado, L. M. R., Noritomi, P. Y., da Silva, J. V. L. (2021). Advances in Bone tissue engineering: A fundamental review. *Journal of Biosciences* 46, 1.
- [3] Maia, F. R., Bastos, A. R., Oliveira, J. M., Correlo, V. M., Reis, R. L. (2022). Recent approaches towards bone tissue engineering. *Bone* 154, 116256.
- [4] Yan, X. Z., Yang, W., Yang, F., Kersten-Niessen, M., Jansen, J. A., Both, S. K. (2014). Effects of continuous passaging on mineralization of MC3T3-E1 cells with improved osteogenic culture protocol. *Tissue Engineering - Part C: Methods* 20, 3.
- [5] Czeakańska, E. M. (2014). In vitro cell and culture models for osteoblasts and their progenitors, PhD thesis. Cardiff University, School of Biosciences, Cardiff, Galler.
- [6] Czekanska, E. M., Stoddart, M. J., Richards, R. G., Hayes, J. S. (2012). In search of an osteoblast cell model for in vitro research. *European Cells and Materials* 24.
- [7] Chen, X., Pei, Y. (2016). Effects of sodium pentaborate pentahydrate exposure on *Chlorella vulgaris* growth, chlorophyll content, and enzyme activities. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 132.
- [8] Taşlı, P. N., Doğan, A., Demirci, S., Şahin, F. (2013). Boron enhances odontogenic and osteogenic differentiation of human tooth germ stem cells (hTGSCs) in vitro. *Biological Trace Element Research* 153.
- [9] Şahin, E., Orhan, C., Erten, F., Şahin, F., Şahin, N., Şahin, K. (2023). The effect of different boron compounds on nutrient digestibility, intestinal nutrient transporters, and liver lipid metabolism. *Turkish Journal of Medical Sciences* 53, 3.
- [10] Ansari, S., Ito, K., Hofmann, S. (2022). Alkaline Phosphatase Activity of Serum Affects Osteogenic Differentiation Cultures. *ACS Omega* 7, 15.
- [11] Doğan, A., Demirci, S., Bayir, Y., Halici, Z., Karakus, E., Aydin, A., Cadirci, E., Albayrak, A., Demirci, E., Karaman, A., Ayan, A. K., Gundogdu, C., Şahin, F. (2014). Boron containing poly-(lactide-co-glycolide) (PLGA) scaffolds for bone tissue engineering. *Materials Science and Engineering C* 44.



Design and Implementation of an Automated Reporting Solution for DCS and SCADA via OPC in Thermal Power Stations

Mahmut Kiriktir ^{1#} , Fırat Ekinci ²

Abstract

This paper focuses on developing an automated reporting system for a thermal power plant, using OPC technology to collect accurate, time-stamped data. Reports are crucial for businesses at every stage, helping document progress and ensuring compliance with regulatory requirements. The study emphasizes the risks associated with manual data entry, such as human error, data loss, and inefficiency. An automated reporting system addresses these issues by ensuring greater accuracy, minimizing errors, and saving time. It also optimizes personnel needs and boosts productivity while supporting strategic decision-making. Data is gathered from SCADA and DCS, with PTC Kepware software facilitating communication, and stored in a Microsoft SQL Server database. The system, supported by Robosoft Control (Turkey), offers a reliable, efficient solution that enhances operational performance and regulatory compliance in the thermal power sector.

Keywords: Automated reporting; DCS; OPC; SCADA

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Electrical and Electronic Engineering, 01250 Adana, Türkiye

ORCID¹: 0009-0005-3315-8263

²Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Energy Systems Engineering, 01250 Adana, Türkiye

ORCID²: 0000-0002-4888-7881

#Corresponding Author:

mahmutkiriktir@hotmail.com

Termik Santrallerde OPC Aracılığıyla DCS ve SCADA Sistemleri için Otomatik Raporlama Çözümünün Tasarımı ve Uygulanması

Öz

Bu makale, bir termik santral için doğru, zaman damgalı veriler toplamak amacıyla OPC teknolojisini kullanan otomatik bir raporlama sistemi geliştirmeye odaklanmaktadır. Raporlar, işletmelerin her aşamasında ilerlemeyi belgelemelerine ve düzenleyici gerekliliklerle uyumu sağlamalarına yardımcı olduğu için oldukça önemlidir. Çalışma, el yazısı ile yazılan veri girişinin neden olduğu insan hatası, veri kaybı ve verimsizlik gibi risklere vurgu yapmaktadır. Otomatik bir raporlama sistemi, daha yüksek doğruluk sağlayarak, hataları minimize eder, zaman tasarrufu sağlar ve personel ihtiyaçlarını optimize eder. Ayrıca, üretkenliği artırır ve stratejik karar alma süreçlerini destekler. Veriler, SCADA ve DCS üzerinden toplanır, PTC Kepware yazılımı iletişimi kolaylaştırırken, veriler Microsoft SQL Server veritabanında depolanır. Robosoft Control (Türkiye) tarafından desteklenen sistem, termik santral sektöründe operasyonel performansı ve düzenleyici uyumu artıran güvenilir ve verimli bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: DCS; OPC; Otomatik Raporlama; SCADA

Received: 3/10/2025

Accepted: 3/11/2025

Online Published: 25/12/2025

How to Cite: Kiriktir M., Ekinci F. "Design and Implementation of an Automated Reporting Solution for DCS and SCADA via OPC in Thermal Power Stations" Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University Journal of Science, **1** (2): 70-83 (2025).

1. Introduction

Reports play a crucial role in business operations. They are essential not only during a company's launch but also for its ongoing growth, expansion, and long-term sustainability. Reports help track a business's progress over time and serve as a historical record. These documents are often necessary when seeking funding from investors or financial institutions. To comply with legal obligations, businesses produce time-based reports (daily, weekly, monthly, yearly, etc.) for stakeholders and government agencies. Additionally, reports support important decisions related to purchasing, expansion planning, or even selling the business.

SCADA and Distributed Control Systems (DCS) handle thousands to millions of input/output (I/O) channels within their own networks. The demand for these systems continues to grow as higher I/O capacities are adopted. Large-scale facilities benefit from SCADA and DCS—collectively known as Operational Technology (OT)—as they enable uninterrupted operations along with capabilities such as real-time monitoring, process control, engineering functions, and data archiving. However, these systems are not well-suited for reporting purposes, as they are process-oriented and often lack data in a usable tabular format.

To bridge the gap between OT and IT networks, the OPC protocol can be used to facilitate smooth data exchange. Once the necessary data is transferred to the IT environment, it can be organized in any desired tabular format.

This study proposes the development of a sample reporting system using OPC technology for a thermal power plant. The aim is to design a flexible reporting system that delivers accurate, reliable, and time-stamped data for both business and regulatory use. Key objectives include eliminating data loss from handwritten logs, reducing human error through automated calculations and formatting, saving time via streamlined reporting, establishing a robust reporting infrastructure, and allowing personnel to focus on their core responsibilities. By automating report generation and formatting, the system is expected to improve data accuracy, operational efficiency, and overall staff productivity.

1. Methodology

2.1 Literature Review

Caiza et al. created an architecture that used a laptop as an OPC UA client to generate digital twins on an online platform using AJAX for HMI web programming [1]. A Siemens S7-1200 was attached as a second client that could read and write tags to the OPC UA server operating on a Raspberry Pi. In the study, using an open API called DataLink, Ala-Laurinaho et al. assessed the viability of creating a digital twin [2]. They connected a switch to a GraphQL API gateway and set up an OPC UA server on a Raspberry Pi to run an overhead crane. The crane network experienced poor quality and delayed response times, with latency growing dramatically when additional devices connected or big data requests were made, even if the Raspberry Pi and crane PLC connection was successful. Abdelsattar, Park, and Marzouk's paper suggests an Industry 4.0-aligned digital twin architecture for SCADA [3]. The system combines OPC UA with Ignition software to generate digital twins of sensors and actuators, as demonstrated using a FESTO MPS processing station. A Raspberry Pi controller connected to conventional microcontrollers and mobile connectivity provide improved monitoring and control. The example confirms that the strategy is feasible for implementing digital twins in manufacturing automation.

To monitor and manage Industry 4.0 production processes, Caiza and Sanz's work suggests an architecture that incorporates an immersive Digital Twin into a production Execution System (MES) [4]. Following ISO 23247 guidelines, the system is deployed in a smart manufacturing lab with Festo equipment, utilizing technologies such as CPS, IoT, robots, AR/VR, and OPC UA. It includes dynamic digital modelling, real-time data collecting, interactive AR/VR interfaces, and 3D production line visualization. The method promotes greater customisation and innovation by improving production efficiency, facilitating real-time issue identification, and enhancing interoperability. In the study, the application of AI large models in the energy sector, particularly in Virtual Power Plants (VPPs), is examined. The research highlights how large models enhance VPP operations, market strategies, data management, and user interaction, improving efficiency, security, and service quality. Challenges such as data privacy, model transparency, and system integration are also discussed. Strategies are proposed to address these issues, promoting the sustainable and intelligent development of VPPs through AI technologies [5]. The feasibility of using the Open Platform Communication Unified Architecture (OPC UA) protocol for real-time reporting in mobile network-based Virtual Power Plants (VPPs) is investigated. Focusing on the Finnish TSO Fingrid and the power reserve market, the research evaluates OPC UA as a modern alternative to legacy protocols like IEC 60870-6. Simulation results demonstrate that OPC UA enhances communication efficiency and reliability, supporting its potential to modernize VPP operations and facilitate the integration of Distributed Energy Resources (DERs) into the smart grid [6].

A modular metaverse framework for power systems was developed to support simulation, 3D visualization, and real-time analysis of distributed solar generation. Tested on a solar power plant at Fluminense Federal University, Brazil, it integrated SCADA data, fault detection, and weather forecasts, demonstrating enhanced

monitoring, operational insights, and decision-making capabilities [7]. In the study, a Generative AI system using large language models was developed to automate report generation, data extraction, and graph updates in government entities. Tested on the *World Economic Situation and Prospects* report, it achieved error rates of 0.87–17.46% while improving efficiency, consistency, and analytical insights. A review workflow enables continuous model refinement [8]. In the study, an architecture is proposed for monitoring and visualizing automated workplaces using OPC UA, IBH Link UA, and the Bluebird platform. The solution enables real-time diagnostics, seamless connectivity, and remote management without full equipment replacement. Evaluation yielded Capability Index (CpK) values of 0.58–0.61 and Cp values of 0.58–0.63, highlighting potential for improved process stability. The approach offers a cost-effective, interoperable framework for digitalizing industrial processes in line with Industry 4.0/5.0 standards [9].

Lastly, a three-layer OPC UA-based architecture is proposed for secure, scalable, and real-time management of aggregated microgrid systems. The architecture integrates Microgrid Aggregation, Communication Platform, and Distributed Microgrid layers to support both high-level scheduling and real-time BESS control. Leveraging dynamic information models and edge cloud computing, it minimizes network overhead while ensuring interoperability across heterogeneous devices. Experimental validation demonstrates up to 17.86× latency reduction, confirming compliance with Industry 4.0 benchmarks and suitability for cloud-integrated microgrids [10]. Consequently, numerous studies have been conducted independently, addressing OPC UA-based architectures and reporting systems for various applications, but any of them specifically focus on thermal power stations' reporting systems. This article seeks to bridge this gap by integrating these technical developments into a cohesive framework, aiming to provide a systematic, streamlined, and functional approach that enhances both understanding and practical implementation in the context of power plant monitoring and reporting.

2.2 Industrial Control Systems

A Programmable Logic Controller (PLC) is a microprocessor-based device used for automating and controlling industrial processes. Developed in 1969 by Modicon, PLCs replace traditional control circuits. The programming device, program and data memory, CPU, input and output interfaces, communications interface, and power supply are among the basic parts of a PLC that are shown in Figure 1. As the primary component, the processor receives inputs from the input interface, processes the data using the stored program, and transmits commands via the output interface. While the power supply guarantees continuous system operation, the communications interface facilitates connectivity with external devices.

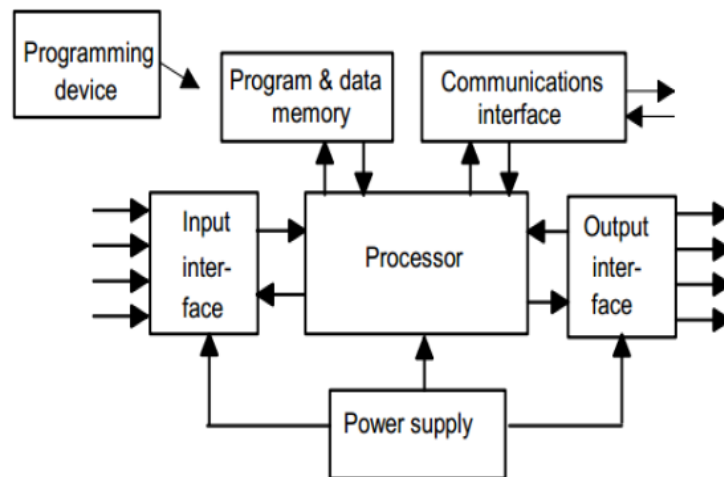


Figure 1. The Architecture of Programmable Logic Controller (PLC) [11].

PLCs communicate with external devices using field buses and are essential for industrial automation, offering flexibility, reliability, and precise control. Another Industrial Control System is SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). SCADA is a software system designed to monitor and control industrial processes. Initially introduced in 1973, SCADA have advanced alongside technology. These systems integrate both hardware and software to provide real-time insights and control over industrial operations through user-friendly interfaces. SCADA is typically centralized and consist of a network of hardware and software. They rely on Remote Terminal Units (RTUs) or Programmable Logic Controllers (PLCs) for control actions. These systems automate most operations but allow manual intervention when needed (e.g., adjusting water flow in a power plant or gas pipeline). The system involves four key components: Data Acquisition, which collects real-time data from sensors

to monitor process parameters such as pressure and flow; Data Communication, which transmits this data between sensors and controllers, often over the internet; Information Presentation, where Human-Machine Interfaces (HMIs) display the data for operators; and Monitoring and Control, enabling remote automation of processes with the option for human intervention when required.

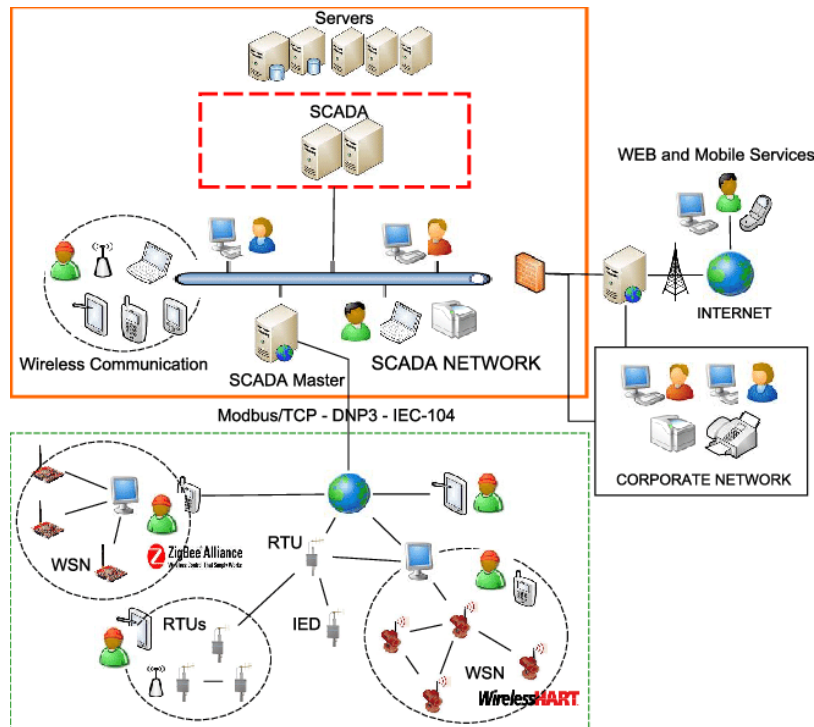


Figure 2. SCADA Network Architecture [12].

The system consists of several components: Field Devices/Sensors, which monitor physical parameters like temperature and pressure; Remote Telemetry Units (RTUs), which collect and transmit data to central systems; Programmable Logic Controllers (PLCs), responsible for controlling industrial processes; and SCADA Master Units, which process the data and issue commands. A Communication Network transfers data between the SCADA master units and RTUs. The Human-Machine Interface (HMI) allows operators to interact with the system, while a Database stores historical data for future analysis. Advanced Control Systems use complex algorithms to optimize and refine processes. SCADA is essential for monitoring and controlling critical infrastructure across diverse sectors. They are used in power generation and distribution, water and sewage management, manufacturing, public infrastructure (like traffic systems), oil and gas industries, communication networks, and building management systems (such as HVAC). SCADA enhances operational efficiency, safety, and real-time control, ensuring smooth, automated processes in these industries. Figure 3 illustrates a sample system demonstrating within a SCADA environment. SCADA offers several advantages, including real-time monitoring for enhanced operational control, improved decision-making through data collection, energy management to reduce penalties, and quick responses to system anomalies. They also feature failure detection through alarms and alerts, preventing potential issues. However, SCADA comes with disadvantages such as complexity in maintenance, high initial installation costs, potential job reductions due to automation, and compatibility challenges with certain hardware or software. In conclusion, SCADA is crucial for efficient industrial operations, but they come with certain complexities and costs.

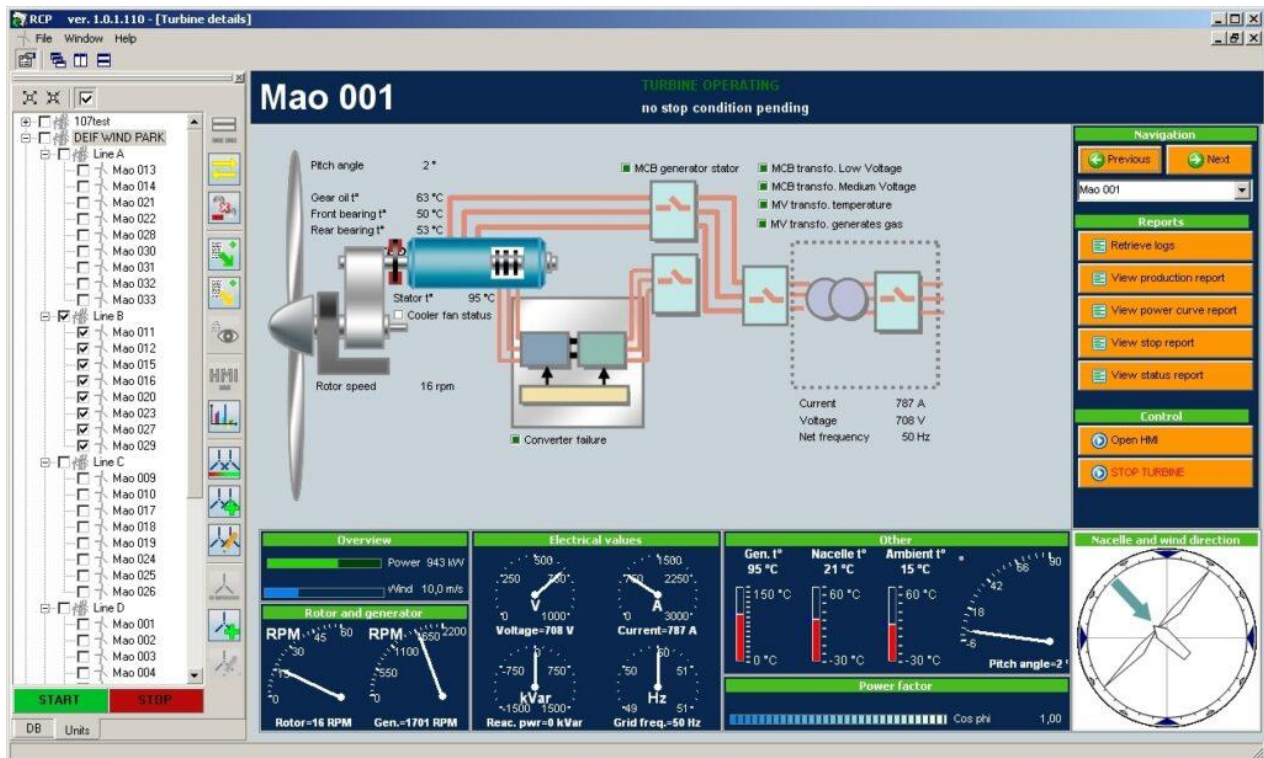


Figure 3. Enhanced Operational Visibility and Control on SCADA [13].

The other Industrial Control System is a Distributed Control System (DCS). DCS is an automated control system designed for large-scale manufacturing or processing plants, where control elements are spread across various locations. Unlike centralized systems, DCS operates through dedicated controllers for each process element, ensuring system continuity and redundancy in case of failures. It features strong communication protocols and high cybersecurity. Key components include engineering workstations for configuration, operator stations (HMIs) for monitoring, distributed controllers for localized control, and communication systems for linking devices. DCS architectures are defined by segmentation, advanced control integration, and a unified system. The system ensures reliability through redundancy, uses pre-configured function blocks for simplified programming, and integrates advanced HMIs for operator ease. Additionally, DCS platforms are scalable, with robust security features to maintain plant safety and accommodate evolving process needs.

Some of the products from major vendors are: ABB- Freelance 800F and 800 xA, Yokogawa- Centum CS 3000 and 1000, Honeywell-TDC 3000, Emerson- Delta V Digital Automation, Siemens- Simatic PCS 7 / TIA Portal / SPPA T3000, GE Vernova Mark Vie and Allen- Bradley- NetLinx are some of the products from major vendors [14]. DCS is mostly utilized in industries including petrochemical and refineries, chemical factories, car manufacturing, power plants, sewage and water treatment facilities, pharmaceutical manufacturing, food processing, and agriculture. A Distributed Control System (DCS) offers numerous advantages, including enhanced control through sophisticated algorithms like PID, scalability to manage larger processes, and accessibility via remote monitoring on PCs or mobile devices. It ensures safety with interlocks and alarms, minimizes downtime through redundancy, and supports extensive data collection and analysis. Additionally, DCS provides flexibility with easy programmability, seamless integration with other systems like PLCs and SCADA, and simplified maintenance through its modular design. It is also cost-effective compared to traditional systems. However, DCS has some disadvantages, such as high initial costs, complexity that requires specialized training, susceptibility to hardware failures, software issues, and cyber threats, limited data visualization capabilities, and challenges with remote access in certain configurations. This comparison highlights that DCS is designed for continuous, high-precision control, especially in industries like petrochemicals, whereas SCADA is more suited for monitoring and control of batch processes and wide-area networks.

2.3 OPC Unified Architecture (OPC UA)

OPC (Open Platform Communications) is an interoperability standard designed for reliable data exchange across different industries, particularly in industrial automation. Initially, OPC was based on Windows OS (known as OPC Classic) and became widely used across sectors like manufacturing, utilities, and oil & gas. It defines guidelines for communication between devices, including real-time data access, event monitoring, and historical

data. As technology advanced, new security and data modelling needs emerged, leading to the development of OPC UA (Unified Architecture). OPC UA is more scalable, flexible, and future-proof, addressing the challenges of modern service-oriented systems. The OPC Foundation oversees the development of these standards, and OPC UA has become the preferred platform for interoperability across industries. OPC uses a client/server model where the OPC Server converts PLC data into OPC protocol for access by other applications. The OPC Client allows applications to retrieve or control data from the OPC Server [15]. This system supports real-time data management and process control, requiring integration of both process control and information technologies. Figure 4 shows sample SCADA based on OPC server architecture. The OPC UA server generates the address space with nodes using the OPC UA information model and then associates the nodes with the variables in the PLC implementation. Finally, the variables and complex structures of the PLC implementation are made available to external OPC UA clients.

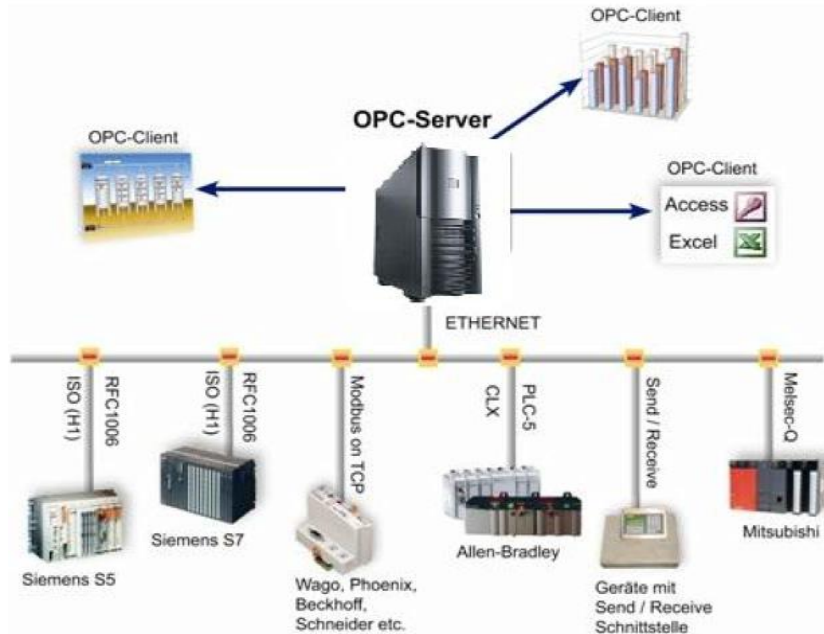


Figure 4. SCADA based on OPC server architecture [16].

An OPC Client (e.g., HMI or Historian) receives data from an OPC Server, which communicates with a PLC using a non-OPC protocol (e.g., Modbus). The OPC Server requests specific data from the PLC, translates it into OPC format, and sends it to the OPC Client [17]. The OPC Client does not need to know about the PLC's configuration, as long as the OPC Server is properly set up by the integrator to handle the PLC's specific protocol and data. Parts of the OPC UA requirements are required for IEC standardization. OPC UA is going to be recognized as an IEC 62541 standard. The automation sector has accepted OPC UA requirements as the norm. OPC UA is made up of distinct model layers with enhanced particulars for some regions. The many levels of information models that OPC UA specifies are shown in Figure 5.

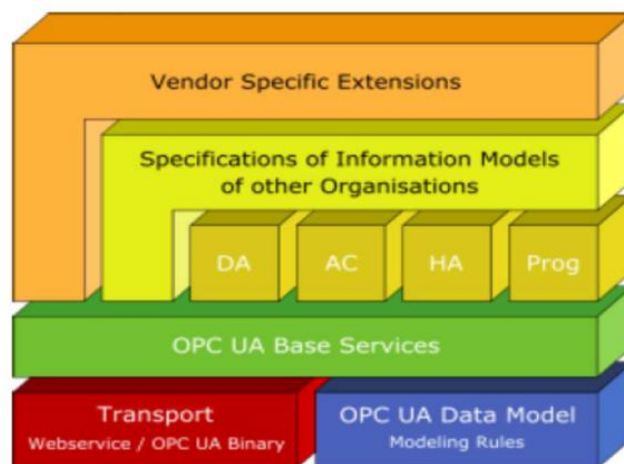


Figure 5. OPC UA layers [18].

The Data Access (DA) specification enables real-time access to data from devices like PLCs and HMIs, supporting reading, writing, and subscribing to updates. The Alarm & Conditions (AC) specification handles alarms, events, and system conditions in automation systems, offering features for acknowledgment, filtering, and monitoring. The Historical Access (HA) specification allows for the retrieval and analysis of historical data, with capabilities for database updates and server-side calculations. Lastly, the Programs (Prog) specification manages automation programs by providing lifecycle event notifications and status tracking. OPC UA is a communication protocol widely used across various industries such as automotive, oil and gas, energy, packaging, building automation, and healthcare. Its benefits include high interoperability, enabling devices from different manufacturers to communicate seamlessly through a range of protocols like TCP/IP, MQTT, and WebSockets. It also prioritizes security with encryption, authentication, and secure key management. The protocol is scalable, flexible, and can be used in everything from small, embedded devices to enterprise-level servers. Additionally, OPC UA supports real-time data exchange, making it ideal for industrial automation and time-sensitive applications [19]. Looking to the future, OPC UA holds the potential to drive universal industrial interoperability, enhance edge computing, and support emerging technologies like digital twins and autonomous systems, while improving cybersecurity and enabling IT/OT convergence. Through the unification of hardware, software, and technologies enabling smooth subsystem collaboration, control system integration improves performance in industrial plants. Data flow between system levels is optimized by using models like the automation pyramid and protocols like OPC. Different fieldbuses accommodate varying data requirements and rates as production systems get increasingly complicated. In order to enable both horizontal (from machine to machine) and vertical (from shop floor to enterprise) integration, system integrators play a critical role in connecting these layers. Thanks to innovations like PLCs and software-based HMIs, industrial integration has changed from discrete initiatives to standardized procedures since the 1970s. Cost effectiveness and the requirement for integrated, efficient production management are driving the market's continued expansion.

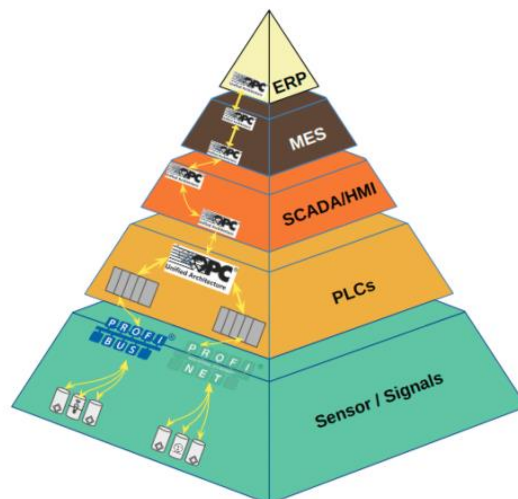


Figure 6. Automation Pyramid with OPC UA vertical and horizontal integration [20].

The manufacturing process is structured across different levels, starting from the field level, where sensors, actuators, and devices are located. At this level, digital connections and Ethernet (including industrial versions) enable communication, although older fieldbus protocols like Profibus and ModBus are still in use. PLC devices serve as both process controllers and gateways for higher-level communication, with OPC servers facilitating data exchange. At the SCADA level, data from the field is collected, transmitted, and processed for real-time analysis. SCADA uses OPC standards to enable interoperability across devices, improving vertical and horizontal integration. The distinction between SCADA and field-level devices has blurred, with modern PLCs and PACs offering greater functionality. Security is crucial, with firewalls and VPNs protecting against cyber threats. Enterprise-level systems, like MES and ERP, integrate production and business operations, automating tasks like production scheduling and maintenance. MES ensures real-time data flow for optimized decision-making, while ERP systems unify business processes like order processing and customer management. Integration between MES, ERP, and SCADA is achieved through OPC and B2MML, ensuring smooth data exchange across levels [21].

2.3.1 The Critical Role of Reporting in Business Management

Effective reporting plays a pivotal role in business success by transforming raw data into actionable insights that support informed decision-making. It enables organizations to track performance, evaluate strategies, and plan for the future by revealing key trends, patterns, and KPIs. Reports also foster communication and

transparency, keeping all stakeholders informed and building trust. They ensure accountability by providing a clear record of decisions and actions, while helping businesses comply with regulatory requirements. Moreover, reporting serves as a tool for discovering both risks and opportunities, enabling early intervention and resource optimization. In essence, reporting acts as a vital compass for businesses, guiding them towards their objectives while adapting to the evolving needs of the organization and its stakeholders.

2.3.2 National Load Dispatch Center (NLDC)

The National Load Dispatch Center (NLDC) is responsible for maintaining the real-time balance between electricity generation and consumption in Turkey. It oversees the operation of the 400 kV transmission system, ensuring the security, quality, and reliability of the national energy grid. Additionally, the NLDC manages the Balancing Power Market and Ancillary Services Market. Regional load dispatch centers focus on the operation and evaluation of 154 kV transmission systems, handling tasks such as electricity supply-demand balancing, emergency response, international interconnections, operational planning, and system security analyses. Key responsibilities also include short-term energy planning, load frequency control, and ensuring system stability through N-1 analysis [22].

2.3.3 OPC Server and Client Solutions

An OPC client application is a software program that connects to an OPC server to read and write real-time data from industrial automation devices and systems. Think of it as an interface that allows various software applications (like HMIs, SCADA, historians, and reporting tools) to communicate with different types of industrial hardware through a standardized protocol [23]. An OPC client application serves as a consumer of data from OPC servers, facilitating communication between different software systems in industrial automation. Its primary functions include connecting to OPC servers, which act as intermediaries between devices and the OPC standard; browsing available data points, or "tags," representing real-time values from devices such as temperature or motor speed; and reading data to display real-time process information. In some cases, OPC clients can also write data back to servers to control devices, like adjusting temperature or starting motors. Additionally, OPC clients can subscribe to specific data points to receive automatic notifications of changes, eliminating the need for continuous updates. The client also handles data quality and timestamps to ensure accurate monitoring and analysis [24].

Leading providers of OPC server and client solutions offer a range of products for industrial connectivity and automation, catering to various needs from simple diagnostics to complex systems. Notable providers include PTC (Kepware) with its KEPServerEX platform, MatrikonOPC (Honeywell) focusing on OPC UA and interoperability tools, and Software Toolbox offering TOP Server for bridging OPC client and server functions. Iconics (Mitsubishi Electric) integrates OPC into its automation software, while Advantech and Endress+Hauser focus on OPC servers for specific devices. Other key players include Siemens, OPC Labs, Takebishi (DeviceXPlorer), Moxa, CimQuest INGEAR, and OPCTechs, each providing specialized OPC solutions for industrial automation and system integration. When selecting an OPC server and client solution, several key factors must be considered to ensure compatibility and optimal performance. First, verify that the client can connect to the specific OPC server and supports the necessary industrial device protocols, such as Modbus or PROFINET. It's also important to determine whether OPC Classic (DA, HDA, A&E) or the more modern OPC UA meets with the needs, especially when factoring in security, platform independence, and information modelling. Ease of use and configuration are crucial for smooth setup and maintenance, so look for solutions with intuitive interfaces and clear documentation. Scalability and performance should be assessed to ensure the solution can handle the required data volume. Additionally, prioritize security features, particularly for OPC UA, ensuring robust authentication and encryption. Choosing a reliable vendor known for strong support and product stability is essential, and finally, comparing cost structures and licensing options will help ensure the solution fits with the budget.

Robosoft Control (Turkey) Solutions specializes in industrial automation and is chosen to develop an automated reporting system due to its expertise in products like the KEPWARE OPC Server. The company offers services including data acquisition from industrial systems, cloud-based monitoring, and reporting, as well as developing SCADA and MES applications. Serving industries like energy (hydro, wind, solar), manufacturing, and process automation, Robosoft integrates with ERP systems and partners with KEPWARE as a local OEM. As a Microsoft Solutions Partner, they also incorporate Microsoft technologies into their solutions, such as their OPC Client application, RBSReport, which logs signal values to MS SQL Server.

KEPServerEX is a top connectivity platform that provides a unified source of industrial automation data. It allows users to manage and control devices and software through an intuitive interface, using protocols like OPC, SNMP, ODBC, and web services to access raw data from OPC servers. Figure 7 provides a general overview of the KEPServerEX software interface, which enables designers to establish communication between different types of OPC platforms.

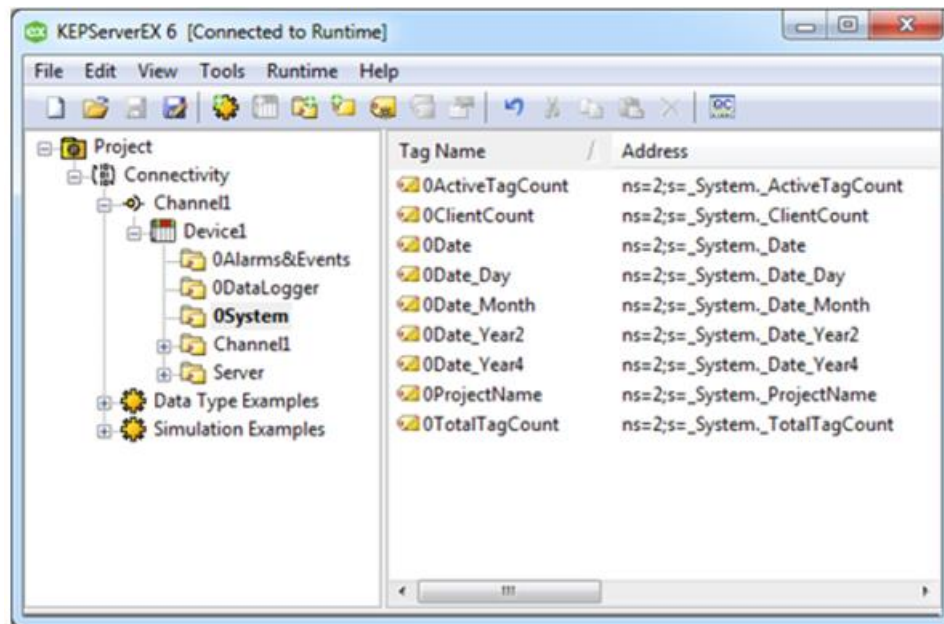


Figure 7. KEPServerEX software sample interface [25].

Microsoft SQL Server is a relational database management system (RDBMS) by Microsoft that stores and retrieves data in tables with relationships. It includes features like cloud support, business intelligence tools, scalability, security, and high availability, and integrates well with other Microsoft products. Raw data from an OPC server is stored here for report generation.

2.3.4 RBSReport Reporting Software

The basic software from the “RBSReport Reporting Software” used for this study can be summarised in 3 products as described below although there are some more products in the software:

RBS Configurator is the primary tool for configuring the reporting system. It allows users to set parameters like OPC server-client connections, user settings, database rules, tables, and table templates.

RBS Data Logger records data from OPC Servers based on time or events and stores it in tables created by RBS Report on MS SQL Server. The only requirement is an OPC Server, allowing any type of data to be stored on MS SQL Server.

RBS Excel Trend RBS Excel Trend enables users to generate reports and trend analyses using pre-configured Excel templates. It allows for querying columns and dates from an MS SQL Server database, with the option to view data on a dashboard and save results in CSV or Excel format.

3. Results and discussion

This study examines the use of OPC (Open Platform Communications) technology to automate report generation for the National Load Dispatch Center (NLDC), ensuring compliance with regulatory standards. It also focuses on managing "Coal and Fuel Consumption" data through the SCADA in a thermal power plant to monitor coal usage, stock levels, and supply chain operations. By implementing this automated reporting system, the plant has enhanced data accuracy, minimized human error, and improved efficiency. The system reduces risks such as data loss, security breaches, and compliance failures, while also saving time and optimizing productivity. OPC technology enables reliable, time-stamped reports that support better decision-making and regulatory adherence. The study further discusses the software tools, including PTC (Kepware) for communication between the client and various DCS/SCADA, and Microsoft SQL Server for structured data management and report generation.

The products of Robosoft Control (Turkey) are used in this solution as they provide essential software packages. RBS Configurator is used for configuration tool of the reporting system. All the parameters such as the, user tables, database rules, table templates, etc. are configured with the help of this application. Figure 8 provides an overview of the designed system, which enables designers to create, modify, and manage the types of reports required by users.

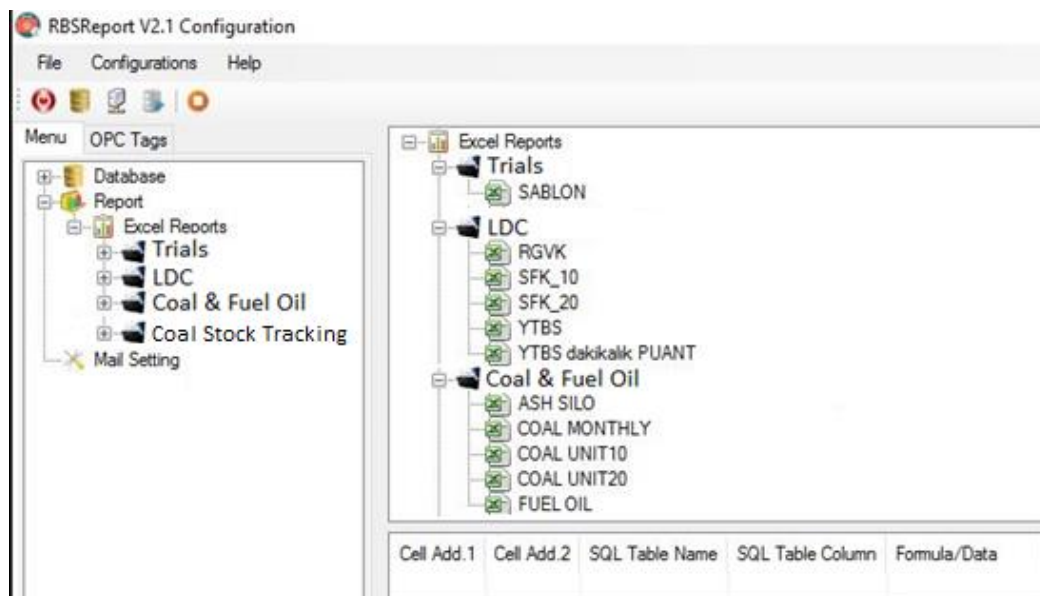


Figure 8. RBS Configurator screenshot.

RBS Data Logger is used to record data read from OPC Servers on time and event basis to tables created with RBS Report on MS SQL Server. RBS Excel Trend is used to display tables with the configured data for the selected timeframe from the MS SQL Server database. The tables can be viewed on its dashboard or exported as CSV or Excel files. Figure 9 provides an overview of the designed system, which allows users to select the type of report they require for any desired time interval.

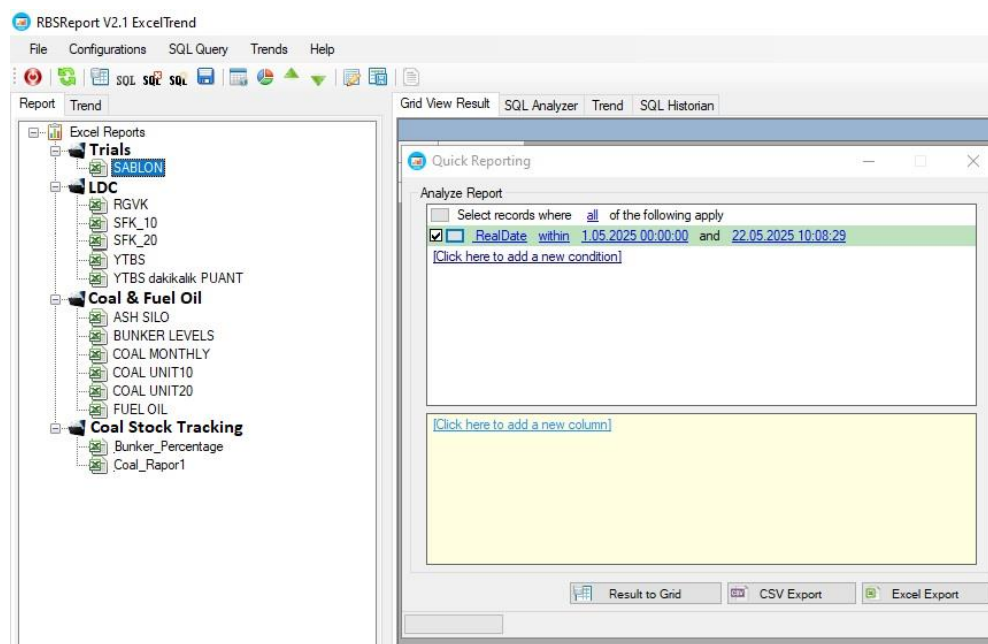


Figure 9. RBS Excel Trend screenshot.

All pertinent data is stored in a SQL database after the configurations are complete. It is always accessible, as demonstrated below by the sample outputs from the automated reporting system that was created. The power generation values are needed for NLDC. After implementation of the related signals taking from the DCS to the reporting system, it became easier to serve it clearly as seen on the Table 1.

Table 1. Sample RGVK report output from the automated reporting system for the selected period.

TARİH	SAAT	SIRA_NO	FRE_HZ	BRM_GUC_REF_DEG_MW	BRM_AKT_CIK_GUCU_BRUTMW	BRM_AKT_CIK_GUCU_NETMW	BRM_PFK_TPLM_NOM_GUCMW	BRM_SEK_MAK_MW	BRM_SEK_MIN_MW	BRM_PRI_MAKC_MW	BRM_PRI_MINC_MW	BRM_GNCL_KPR_MW/HZ	BRM_SF_K_REZ_MIK_MW	BRM_PFK_REZ_MIK_MW
15.03.2025	09:00:00	32401	50,013	577,998	576,579	541,218	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:01	32402	50,005	577,998	579,001	541,218	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:02	32403	49,997	577,998	579,001	541,218	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:03	32404	49,997	577,998	579,001	541,218	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:04	32405	50,001	577,998	579,001	541,218	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:05	32406	50,005	577,998	579,001	541,218	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:06	32407	49,997	577,998	579,001	541,218	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:07	32408	49,989	577,998	582,396	541,218	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:08	32409	49,989	577,998	579,347	542,288	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:09	32410	49,992	577,998	579,347	542,288	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:10	32411	49,992	577,998	581,603	542,288	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:11	32412	49,992	577,998	581,603	542,288	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:12	32413	49,989	577,998	581,603	542,288	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:13	32414	49,985	578,981	581,603	542,288	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:14	32415	49,985	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:15	32416	49,981	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:16	32417	49,977	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:17	32418	49,985	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:18	32419	49,989	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:19	32420	49,985	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:20	32421	49,977	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:21	32422	49,973	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:22	32423	49,977	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:23	32424	49,977	578,981	583,505	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:24	32425	49,973	578,981	584,629	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:25	32426	49,969	578,981	584,629	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:26	32427	49,972	578,981	585,691	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:27	32428	49,972	578,981	585,691	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:28	32429	49,974	578,981	585,691	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:29	32430	49,974	578,981	585,691	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:30	32431	49,973	578,981	585,691	543,125	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:31	32432	49,985	578,981	585,691	543,181	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:32	32433	49,985	578,981	585,691	543,181	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:33	32434	49,977	578,981	585,691	543,181	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:34	32435	49,973	578,981	585,691	543,181	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:35	32436	49,976	578,981	585,691	543,181	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:36	32437	49,980	578,981	585,691	543,181	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:37	32438	49,984	578,981	585,691	544,590	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:38	32439	49,984	578,981	585,691	544,590	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:39	32440	49,980	578,981	585,691	544,590	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000
15.03.2025	09:00:40	32441	49,972	578,981	585,691	544,590	654,000	630,000	530,000	680,000	480,000	250,000	50,000	50,000

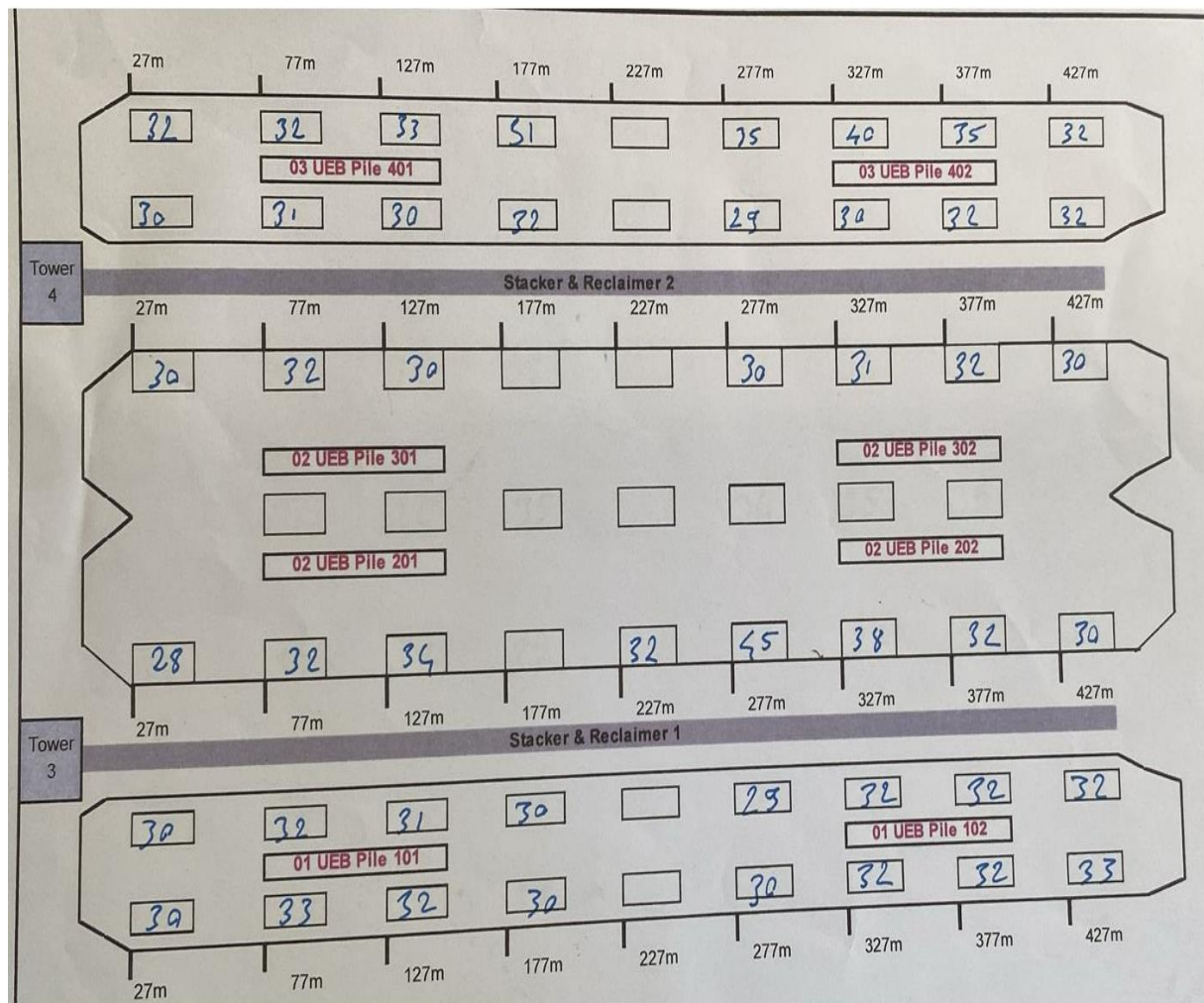
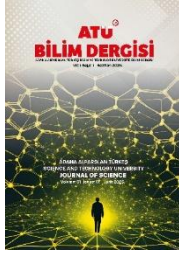


Figure 10. Manual data records for the Coal Stock Tracking from older time.

The coal stock tracking was done by the handwritten paper notes as seen on the Figure 10 which was having uncertainty and time dependency did not exist as seen Figure 10. However, after the implementation of the automated reporting system, the recorded values became more accurate and time dependent. As shown in Table 2, more detailed data, complete with time stamps, can be accessed and reviewed at any time, ensuring both reliability and real-time availability of information. Not only the coal but also the fuel oil consumption, stock values and other so much measurement had already implemented to the reporting system.

- [2] Laurinaho, R. A., Autiosalo, J., Nikander, A., Mattila, J., & Tammi, K. (2020). Data link for the creation of digital twins. *IEEE Access*, 8, 228675–228684.
- [3] Abdelsattar, A., Park, E. J., & Marzouk, A. (2022). An OPC UA client/gateway based digital twin architecture of a SCADA system with embedded system connections. In *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics (AIM)*, 798–803.
- [4] Caiza, G., & Sanz, R. (2024). An immersive digital twin applied to a manufacturing execution system for the monitoring and control of Industry 4.0 processes. *Applied Sciences*, 14(10), 4125.
- [5] Wang, D., Peng, D., & Huang, D. (2024). Application and prospects of large AI models in virtual power plants. *Electric Power Systems Research*, 222, 111403.
- [6] Xia, S. (2024). Implementation of real-time reporting for mobile network-based virtual power plant with OPC UA (Master's thesis, University of Helsinki).
- [7] Menezes, C., Cunha, H., Siqueira, G., Santos, M., França, B., & Lopes, Y. (2024). Metaverse framework for power systems: Proposal and case study. *Electric Power Systems Research*, 237, 111039.
- [8] Gupta, R., Pandey, G., & Pal, S. K. (2025). Automating government report generation: A generative AI approach for efficient data extraction, analysis, and visualization. *Digital Government: Research and Practice*, 6(1), 1–10.
- [9] Vagaš, M., Majerčák, O., Galajdová, A., Rákay, R., & Romancík, J. (2025). Data processing approach based on OPC UA architecture implementation and Bluebird platform. *IEEE Access*, 13, 1–15.
- [10] Lee, C., Kwon, H., & Lee, Y. I. (2025). OPC UA-based three-layer architecture for aggregated microgrids integrating edge cloud computing and IEC 62264. *Journal of Industrial Information Integration*, 48, Article 100965.
- [11] Pu, Y., & Li, G. (2003). Programmable logic controller (PLC) teaching practice. *J. Changsha Aviation Vocational Techn. College*, (1).
- [12] Alcaraz, C., & Lopez, J. (2010). A security analysis for wireless sensor mesh networks in highly critical systems. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C*, 40.
- [13] Savvycom Software Blog. (2025, June 23). SCADA software price. [Online]. Available: <https://savvycomsoftware.com/blog/scada-software-price/>
- [14] Electrical Technology. (2025, June 20). Distributed control system (DCS). [Online]. Available: <https://www.electricaltechnology.org/2016/08/distributed-control-system-dcs.html>
- [15] Liverpool Olympia. (2025, May 19). What is OPC server full form? [Online]. Available: <https://liverpoololympia.com/what-is-opc-server-full-form/>
- [16] Nicola, M., Nicola, C. I., Sacerdotianu, D., & Duță, M. (2017). SCADA systems architecture based on OPC servers and applications for industrial process control. In *Proc. Int. Conf. Hydraulics and Pneumatics – HERVEX*, Mar.
- [17] OPC Training Institute. (2025, May 19). OPC read and write PLC. [Online]. Available: <https://www.opcti.com/OPC-Read-and-Write-PLC.aspx>
- [18] Drahoš, P., Kučera, E., Haffner, O., & Klimo, I. (2018). Trends in industrial communication and OPC UA. In *Cybernetics & Informatics (K&I)*, 1–5.
- [19] Dewesoft Blog. (2025, May 19). What is OPC UA? [Online]. Available: <https://dewesoft.com/blog/what-is-opc-ua>
- [20] Liu, Z., & Bellot, P. (2020). A configuration tool for MQTT based OPC UA PubSub. In *Proc. RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies*, Oct. 14–15.
- [21] Bajer, M. (2008). Control systems integration using OPC standard. doi:10.13140/RG.2.2.29713.74085
- [22] TEİAŞ. (2025, May 15). Load dispatch control centers. [Online]. Available: <https://www.teias.gov.tr/en-US/load-dispatch-control-centers>
- [23] Computer Networks: 17th Conference (CN 2010), Ustron, Poland, Jun. 15–19, 2010, *Proc. CN 2010*.
- [24] OPC Training Institute. (2025, June 25). OPC dictionary. [Online]. Available: <https://www.opcti.com/dictionary.aspx>
- [25] PTC Kepware Support. (2025, June 25). OPC UA client address descriptions. [Online]. Available: <https://support.ptc.com/help/kepware/drivers/en/index.html#page/kepware/drivers/OPCUAClient/AddressDescriptions.html>



Ekolojik ve Endüstriyel Atıklardan Yalıtım Malzemesi Üretimi

Muharrem Eren¹ , Erdem Aliç² 

(Bu çalışma ULIBTK'25 kongresinde sunulmuştur)

Öz

¹Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi,
Elbistan Meslek Yüksekokulu, Motorlu
Araçlar ve Ulaştırma Bölümü, 46300,
Kahramanmaraş, Türkiye

ORCID¹: 0000-0002-7133-1881

²Kahramanmaraş Sütçü İmam
Üniversitesi, Andırın Meslek Yüksekokulu,
46400, Kahramanmaraş, Türkiye

ORCID²: 0000-0002-2852-0353

#Sorumlu Yazar/Corresponding
Author:

ealic@ksu.edu.tr

Türkiye’de; nüfusun artış hızı ve sanayinin gelişimi ile birlikte, enerji tüketimi ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bu tüketimin büyük bölümü, sanayi kullanımının yanı sıra, konutlarda gerçekleşmektedir. Teknolojinin gelişimi ile insanlığın konutlardaki konfor ihtiyacı da gün geçtikçe artış göstermiştir. Bu durum; sınırlı miktardaki enerjinin, konutlarda etkin olarak kullanılması gerekliliğini açıkça ortaya çıkarmıştır. Bu da yalıtım uygulamaları ile elde edilebilen enerji tasarrufunu, kaçınılmaz kılmaktadır. Dünyada da ısı yalıtım projeleri, gün geçtikçe önem kazanmıştır. Ülkemiz ’deki uygulamalarda; strafor, köpük vb. gibi çoğu petrol türevlerine dayalı çeşitli ısı yalıtım malzemeleri yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada; ısı yalıtımında ayçiçek sapı, mısır sapı gibi bazı ekolojik atıklar ve meşe mantarı, tekstil pamuğu gibi endüstriyel atıklar birlikte değerlendirilmiştir. Ayrıca; bu atıkların depolama zorluklarından dolayı ortaya çıkan, çevre sorunlarının da önüne geçilmiş olmuştur. Bu araştırma; Kahramanmaraş’ın ekolojik ve endüstriyel atıklarından yalıtım malzemesi üretimi amacı ile deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Ekolojik atıklar Afşin ve Elbistan’daki tarım alanlarından, endüstriyel atıklar ise Kahramanmaraş’taki tekstil fabrikalarından temin edilmiştir. Yalıtım malzemesi üretim prosesi atık malzemelerin kalıp içerisine yerleştirilmesi ve epoksi reçinenin üzerine püskürtülmesi ile preslenerek gerçekleştirilmiştir. Presleme işleminde yüksek ısı ve basınç altında birleştirme yöntemi kullanılmıştır. 25x140x160mm ölçülerindeki değişik türevlerde üretilen, saf ve kompozit plakaların her birinin ısı iletim katsayısı tespit edilmiştir. Bu değerler ise XPS, EPS, Gaz beton, Taş yünü gibi malzemelerin, ölçülen yalıtım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca; ısı dirençleri hesaplanarak, ısı yalıtımı sağlayıp sağlamadıkları gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ekolojik ve Endüstriyel atıklar; Geri dönüşüm; Isı yalıtım malzemesi; Yapılarda enerji tasarrufu

Production of Insulation Material From Ecological and Industrial Wastes

(This study was presented at ULIBTK'25 congress)

Abstract

In Turkey, with the rapid population growth and industrial development, energy consumption has reached significant levels. A large portion of this consumption occurs in residential buildings, as well as in industrial use. With the advancement of technology, humanity’s need for comfort in homes has also increased daily. This clearly highlights the need for efficient use of limited energy in homes. This makes the energy savings achieved through insulation applications inevitable. Thermal insulation projects have become increasingly important worldwide. Various thermal insulation materials, mostly petroleum-based, such as styrofoam, foam, and other materials, are widely preferred in applications in our country. In this study, ecological wastes such as sunflower stalks and corn stalks, along with industrial wastes such as oak cork and textile cotton, were utilized for thermal insulation. Furthermore, environmental problems arising from the storage difficulties associated with these wastes were prevented. This research was conducted experimentally for the production of insulation materials from ecological and industrial wastes in Kahramanmaraş. Ecological waste was sourced from agricultural lands in Afşin and Elbistan, while industrial waste was sourced from textile factories in Kahramanmaraş. The insulation material production process involved placing waste materials in molds, spraying epoxy resin onto them, and then pressing them. The pressing process employed high-heat and pressure bonding. The thermal conductivity of each of the pure and composite panels, produced in various sizes of 25x140x160mm, was determined. These values were compared with the measured insulation values of materials such as XPS, EPS, aerated concrete, and rock wool. Furthermore, their thermal resistance was calculated to determine whether they provided adequate thermal insulation.

Keywords: Ecological and Industrial wastes; Recycling; Thermal insulation material; Energy saving in building.

Geliş/Received: 16/10/2025

Kabul/Accepted: 3/12/2025

Yayınlanma/Published: 25/12/2025

Atıfta Bulunmak İçin/How to Cite: Eren M., Aliç E. “Ekolojik ve Endüstriyel Atıklardan Yalıtım Malzemesi Üretimi” Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilim Dergisi, **1** (2): 84-95 (2025).

1. Giriş/Introduction

Geleneksel yalıtım malzemeleri olan polistiren (EPS, XPS) ve cam yünü gibi ürünlerin üretimi sırasında genellikle petrol türevleri kullanılmaktadır. Bu tür yalıtım malzemeleri hem ham madde hem de üretim prosesi sebebiyle yüksek karbon ayak izine sahip olarak bilinmektedir[1]. Gelişen teknoloji ile birlikte doğal, çevreci ve geri dönüştürülmüş malzemeler birleştirilerek binaların dış cepheleri için yalıtım malzemeleri geliştirilebilmektedir[2-4]. Arslan ve Aktaş 2018'deki çalışmalarında yalıtım malzemesinin sahip olması gereken ısı ve akustik özellikleri, su buharı direnci, yangın direnci vb. özellikleri ele alarak geniş çaplı bir değerlendirme yapmışlardır. Bu çalışmalarında literatüre vurgu yaparak yeni nesil kompozit yalıtım malzemelerinin standartlarla belirlenen yalıtım özelliklerini sağlayabileceğini ifade etmişlerdir. Sonuç kısmında özellikle sürdürülebilir binalar ve sağlıklı yaşam alanlarının oluşturulması gerektiğini ifade etmişlerdir. Bunun için akustik konfor ve enerji verimliliği sağlayan, düşük ısı iletim katsayısına sahip yenilikçi ve bütüncül (ekonomik ve yerli) anlayış ile tasarlanıp üretilen, kolay uygulanabilir yalıtım malzemelerine gerek olduğunu ifade etmişlerdir[5]. Temiz ve Olgar 2017'deki çalışmalarında doğal ve yapay ürünlerin liflerini alarak ürettikleri panellerin yalıtım özelliklerini araştırmışlardır. Bunu için ayçiçek, mısır sapı, palmye yaprağı, mısır sapı ve tekstil malzemesi lifleri kullanmışlardır. Sonuç olarak bu malzemelerin ülkemizde yalıtım malzemesi olarak kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir [6]. Yaşar ve Altunok 2023'deki çalışmalarında tarım ve orman atıklarından bazı tohum ve lifli malzemeleri kullanarak organik izolasyon malzemesi üretmeyi amaçlamışlardır. Özellikle düşük yoğunlukta bir malzeme olmasını hedeflemişlerdir. Sonuç olarak çam kozalağı ve ayçiçeği sapından üretilen yalıtım plakalarının çatı altlarında, iç mekân duvar ve taban ara döşemelerinde ve prefabrik yapılarda ses ve ısı izolasyonunda kullanılabileceğini belirtmişlerdir[7]. Majumder vd. 2021'deki çalışmalarında, binaların çevresel etkilerini azaltmak, yapı malzemelerinin termal performansını iyileştirmek ve bu malzemelerin üretim süreçlerini iyileştirerek çevresel sürdürülebilirliği artırmak amacıyla yalıtım malzemesi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla İtalya'nın Sardunya adasına ait kireç macunu, opus signum bitkisi, geri dönüştürülmüş malzemeler ve ham kil ile doğal atık ürünleri ve normalde çöp sahalarına atılması planlanan tarımsal yan ürünleri içeren yalıtım malzemesi üretmişlerdir. Sonuç olarak ürettikleri yalıtım levhasının termal karakterizasyonunu incelemişler ve yalıtım malzemesi olarak kullanımını değerlendirmişlerdir[8]. Antolinc ve Filipič 2021'deki çalışmalarında endüstriyel dokunmamış tekstil atığından termal ve akustik levhalar üretimini ve kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ürettikleri levhaların termal iletkenlik katsayısının, binalarda termal yalıtım olarak kullanılan geleneksel malzemelerin termal iletkenlik değerlerine yakın olduğunu göstermişlerdir. Sonuç olarak, önerdikleri ısı yalıtımı levhasının bina inşaatı için yeterli ve sürdürülebilir bir çözüm olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır[9]. Abu-Jdayil vd. 2021' deki çalışmalarında palmye ağacı ve polilaktik asit karışımından oluşan kompozit çevreci bir yalıtım malzemesi hazırlamayı amaçlamışlardır. Bunu için farklı karışım oranlarında numuneler üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin; yoğunluk, su emilimi, kristalleşme, termal iletkenlik, termal difüzyivite, erime sıcaklığı ve mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak ürettikleri kompozit levhaların piyasada bulunan petrol bazlı malzemelerle benzer termo-fiziksel ve mekanik özellikler gösterdiğini ifade ederek, kullanımını tavsiye etmişlerdir[10]. Zhao X., vd. 2023' deki daha sürdürülebilir yalıtım malzemeleri üretmek amacıyla bir dizi araştırma gerçekleştirmişlerdir. Özellikle binalarda, soğuk zincir taşımacılığında, termal yalıtım ve gürültü azaltımı gereken yerlerde kullanılması hedefiyle hafif ve gözenekli yalıtım malzemesi üretimini amaçlamışlardır. Bunun için yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yaygın bolluğu, düşük maliyeti ve göreceli sürdürülebilirliği en yüksek malzemelerden biri olarak bilinen ahşabı seçmişlerdir. Bu aşamada doğal ahşabın gürültüyü azaltmada ve ısı kaybını önlemede geleneksel petrol ve mineral bazlı gözenekli yapılardan çok daha az etkili olduğunu bildikleri için ahşabın bu özelliklerini iyileştirecek yeni bir üretim yöntemi ortaya koymuşlardır. Doğal ahşaptan lignin ve hemiselülozların hızlı (~1 saat) yüksek sıcaklık işlemi ve ardından düşük maliyetli ortamda kurutma kullanılarak çıkarılmasıyla üretilen ölçeklenebilir, yüksek gözenekli bir ahşap yapı elde ederek çok iyi gürültü azaltma ve termal yalıtım yeteneklerine sahip bir ürün geliştirmişlerdir. Sonuç olarak bu yeni ahşap esaslı yalıtım malzemesinin sınırlı alana sahip termal yalıtım uygulamaları gerektiren buzdolapları, soğuk zincir taşımacılığı ve eski soğuk hava depoları için de kullanılabileceğini belirtmişlerdir[11]. Bourbia vd. 2023 yılındaki derleme çalışmalarında biyo-bazlı malzemelerin enerji verimliliğini artırma amacıyla bina dış cephe uygulamalarında kullanılmasının fosil yakıt bazlı yalıtım malzemelerine alternatif olarak umut vadeden çözümler getirdiğini ifade etmişlerdir. Biyo-bazlı malzemelerin yenilenebilir, düşük iç enerjili ve CO₂ nötr veya negatif olma avantajlarına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Literatür araştırması çalışmalarıyla, biyo-bazlı bazı malzemelerin higrotermal özellikleri ve termal enerji performansları hakkındaki teorik ve deneysel çalışmaların mevcut durumu hakkında geniş bir genel bakış açısı sunmuşlardır. Derlemelerinde özellikle kenevir, ahşap, palmye ağacı, mantar meşesi, halfa otu ve samanı araştırmışlardır. Sonuç olarak doğal ürünler kullanılarak daha çevre dostu binaların yapımı ve yeni sürdürülebilir yalıtım malzemelerinin geliştirilmesinin mümkün olduğunu belirtmişlerdir[12]. Yukarıdaki çalışmalar incelendiğinde biyolojik malzeme esaslı yalıtım malzemesi kullanımı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bunun için Ülkemiz coğrafyasında yer alan birçok doğal bitki, tarımsal atık, endüstriyel atık ve türevleri kullanımı yaygınlaştırılabilir. Bu açıdan yerel endüstriyel ve/veya tarımsal atıklardan elde edilen hem geri dönüştürülmüş hem de doğal malzemeler kullanılarak yalıtım malzemeleri üretilip binalarda kullanılabilir. Bu da binaların karbon emisyonunu azaltırken eko-sürdürülebilirliğini artırır. Bu çalışmada mantar meşesi

kabuğu, mısır sapı atığı, ayçiçek bitkisi atığı, işlenmiş pamuk atığı gibi ekolojik ve endüstriyel atıklar kullanılarak yenilikçi bir ısı yalıtım malzemesi üretimi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot/Material and Method

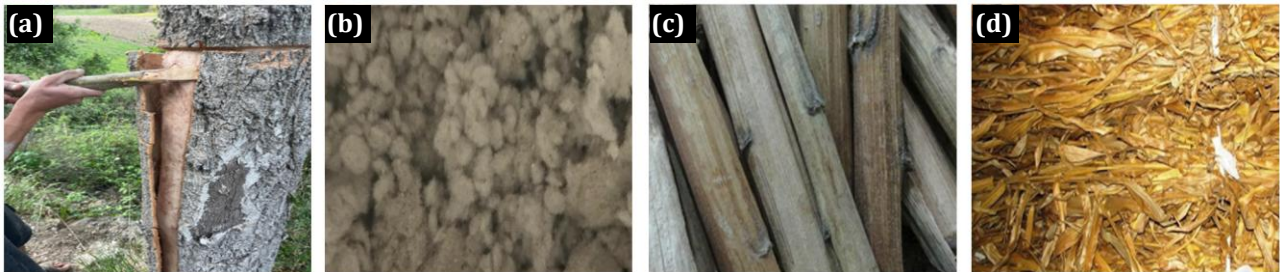
Türkiye'nin yılda tekstil atık miktarı Tablo 1'de ve tarımsal atık potansiyeli Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 1'de yıllık çöplüğe atılan tekstil atıklarının 149,482 ton, Tablo 2'de ise mısırın yıllık 6,84 milyon ton ve ayçiçeğini 4,4 milyon ton olduğu görülmektedir. Tablo 2 verileri Ünlü A. vd. 2023 yılındaki çalışmalarından hesaplanarak üretilmiştir[13]. Bu çalışmada; mantar meşesi kabuğu (Şekil 1.a) Andırın ilçesi orman alanlarından, pamuk atıkları (Şekil 1.b) Kahramanmaraş ili tekstil fabrikaları atık sahalarından, Ayçiçek sapı (Şekil 1.c) ve mısır sapları (Şekil 1.d) Elbistan İlçesi tarım alanlarından, temin edilmiştir.

Tablo 1. Endüstriyel katı atık miktarı ve bertaraf yöntemleri [14].

Sanayi Grubu	Tekstil Ürünleri İmalatı (Ton/Yıl)	Giyim Eşyası İmalatı (Ton/Yıl)
Toplam Bertaraf Edilen	314,020	82,441
Çöplüğe Atılan	149,482	35,416
Düzenli Depolama	110,672	39,733
Yakma Tesisi	29,014	1,187
Kompozit Tesisi	-	-
İşyeri Sahasında Depolama	17,007	1,240
Dolgu Malz. Olarak Kullanma	5,950	3,001
Gelişigüzel Atma	1,547	1,773
Göle, Nehir'e Atma	73	3
Diğer	276	88

Tablo 2. Türkiye'nin son dönem tarımsal atık potansiyeli[13].

Tarımsal Kalıntı	Tarımsal Atık Yıllık Üretim (Milyon Ton)	Enerji Potansiyeli (MTEP)
Buğday	20	8,095
Arpa	5,6	1,761
Mısır	6,84	3,39
Pamuk	2,74	0,639
Ayçiçeği	4,4	4,11
Şeker pancarı	0,756	0,01
Yulaf	0,208	0,009
Çavdar	0,256	0,096
Toplam	40,8	18,11



Şekil 1. Ekolojik ve endüstriyel atıklar (a) mantar meşesi kabuğu, (b) pamuk atıkları, (c) ayçiçek sapları, (d) mısır sapları.

Mantar meşesi; odun ham maddesinden ziyade biyolojisi itibarıyla oluşturduğu özel kabuk yapısıyla değer kazanmaktadır. 10-12 yılda bir soyulan kabuklardan çok farklı alanlarda faydalanma imkânı bulunmaktadır. Sadece Akdeniz havzasındaki doğal yayılışı iki milyon hektardan (ha) fazla olduğu değerlendirilmektedir. Yayılış

gösterdiği alanlar Akdeniz ikliminin etkisi altındadır (Pereira, 2007). Mantar meşesinin Andırın-Kadirli geçiş bölgesinde yetiştiği gözlenmiştir.

Tablo 3. Kahramanmaraş ilinin ilçeleri bazında yetiştirilen bazı tarla bitkilerinin kullanılabilir atık değerleri [15].

İlçeler	Bitkisel atıklar (ton/yıl)						
	Buğday	Arpa	Çavdar	Mısır	Pamuk	Ayçiçeği	Soya
Afşin	10840,70	3519,22	8,14	8105,33		874,38	
Andırın	3015,32	36,00		6265,25		566,18	26,10
Çağlayancerit	585,30	190,40		375,94			
Dulkadiroğlu	2441,85	212,40		20651,66	791,20	372,00	261,00
Ekinözü	894,73	612,00		13,73		150,29	
Elbistan	10322,37	3131,89		37126,85		4464,00	
Göksun	7404,14	1970,21	32,01	928,22		1512,80	
Nurhak	412,92	144,00					
Onikişubat	4251,08	288,00	7,55	853,49	215,00	49,60	78,30
Pazarcık	3646,05	1259,96		41934,29	1167,62		15,31
Türkoğlu	3062,08	66,92	9,03	30365,28	1126,60		60,90

Bu atıkların; hepsi bir arada veya birbirileri ile değişik türev ve miktarlarda karıştırılarak, epoksi (Tutkal) ile birleştirilmesi ve 20/30x140x160 mm plakalar halinde üretilmesi planlanmıştır. Bu sayede numune yalıtım levhaları üretilmiştir. Öncelikle büyük sap ve kabuklar Elbistan'ın sanayi imkânlarından yararlanılarak, Şekil 2.a'da görülen şerit testerede kesilerek Şekil 2.b'deki kaba taneler haline dönüştürülmüştür.



Şekil 2. Kaba ve ince tanelleme (a) şerit testere, (b) kaba taneler, (c) öğütme, (d) öğütülmüş ürün.

Homojen dağılıma yakın karışım elde etmek için ayçiçek sapları, mısır sapları ve meşe mantarı kabuğu 0,05-7,75 mm boyutlarında, Şekil 2.c'de görülen öğütme makinesinde 10 mm. süzgeç ile Şekil 2.c'deki gibi granül haline getirilmiştir. Büyük pamuk atıkları da makas ile kesilerek veya el ile koparma yöntemi ile ayrıştırılmıştır. Bağlayıcı epoksi (Tutkal), Mersin'deki sunta fabrikalarından temin edilmiş olup birleşmenin etkin olması ve homojen tutkal dağılımı için 1 kg' lık şişeden dökme yöntemi yerine spray püskürtücü kullanılarak pulverizasyon sağlanmıştır. İlk etapta her bir atıktan aynı tür saf karışımlar oluşturulmuştur. Her plaka için kullanılacak atık miktarı, hassas terazi ile ölçülmüştür. Şekil 5'deki ince taneli; mantar meşesi, ayçiçeği sapı, mısır sapı atıkları ile tekstil pamuk atıkları ayrı ayrı kurutularak nem oranı düşürüldükten sonra, Şekil 3'de gösterilen hidrolik presin kalıpları içerisinde epoksi püskürtülerek ısı ve basınç altında sıkıştırılmak suretiyle birleştirilmiştir. Pres makinesine ait kalıplarda 5-35 mm tabaka yüksekliğinde numuneler üretilebilmektedir. Prese ait kontrol panosundan sıcaklık ve zaman ayarı dijital olarak kontrol edilebilmektedir. Manometreden uygulanan basınç manuel olarak okunabilmektedir. Üretilen tüm numunelerin basınç ve sıcaklık değerleri takip edilmiştir.



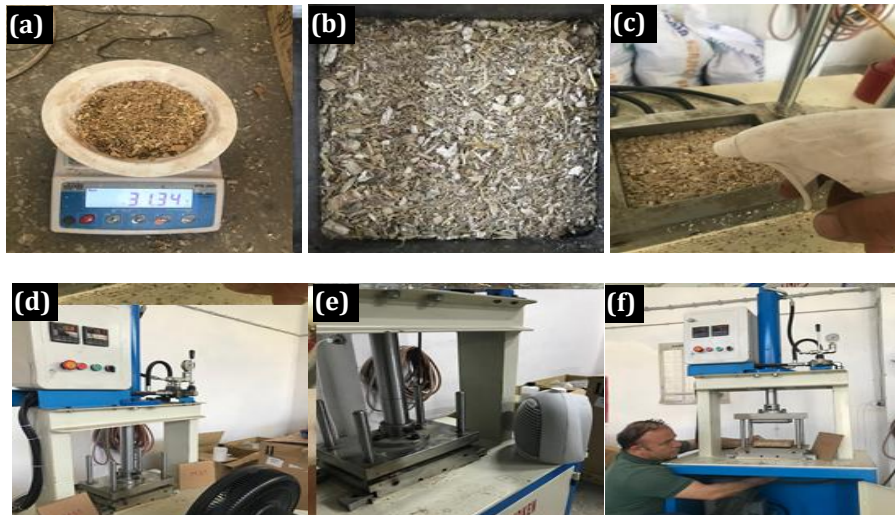
Şekil 3. Hidrolik pres ve ekipmanları.

1. Grup (Saf) numunelere ait kullanılan atık ve epoksi (Tutkal) miktarları Tablo 4'te görülmektedir. Burada uygulama basıncı 10 bar ve ort. maks. Sıcaklık 180°C olarak ayarlanmıştır.

Tablo 4. 1. Grup (saf) numune miktarları.

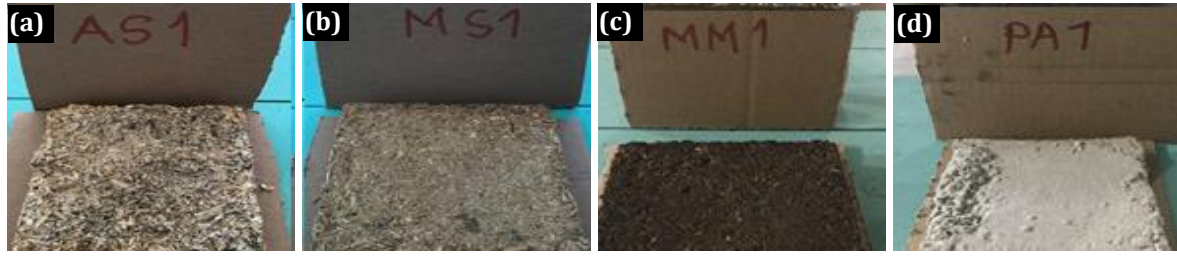
Numune		Atık Miktarı (gr)	Epoksi Miktarı (gr)
AS1	Ayçiçek sapı	124,50	59,43
MS1	Mısır Sapı	126,35	58,77
PA1	Pamuk Atıkları	102,00	24,84
MM1	Mantar Meşesi	263,00	37,00

Her bir numune için laboratuvar sıcaklığında hazırlanan aynı tür atık miktarları hassas terazide tartılarak (Şekil 4.a) kullanılmıştır. Hidrolik presin kalıbına dört bölmeli olarak yerleştirilmiştir (Şekil 4.b). Epoksi püskürtme (Şekil 4.c) ve 10 bar basınç uygulama işlemi ile sıkıştırılmıştır. Kalıp ısıtma sistemini destekleme için fanlı elektrik sobası kullanılmış (Şekil 4.d) ve 120 dk'da kalıp sıcaklığı 180°C'ye çıkarılmıştır. Akabinde kalıp soğutma işlemi vantilatörle de desteklenerek soğutulmuştur (Şekil 4.e). Kalıp sıcaklığı 150 dk.' da oda sıcaklığına düşürülerek, numuneler kalıptan çıkarılmıştır (Şekil 4.f).



Şekil 4. 1. Grup (saf) numune üretim süreçleri (a) hassas terazi, (b) kalıba yerleştirme, (c) epoksi püskürtme, (d) presleme, (e) ısıtma, (f) presten çıkarma.

Burada bazı numunelerin kalıptan çıkarılmasında zorluklarla karşılaşmıştır. Ancak kalıbın her numuneden sonra temizlenerek yağlanması ile sorun çözülmüştür. Üretimi yapılan 1. grup (saf) numuneler Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 1. Grup (saf) numuneler, (a) AS1, (b) MS1, (c) MM1, (d) PA1.

Hem üretim prosesini geliştirmek hem de yeni alternatif malzemeler üretmek için Tablo 4'teki bir plaka için kullanılan atık miktarları oranında 4'lü ve/veya 2'li karışımlar hazırlanmıştır. 2. Grup numunelere ise 1. Grup numune üretimi prosesine benzer şekilde üretim prosesi uygulanmış fakat altı bölmeli bir şekilde kalıba yerleştirilmiştir. 2. Grup kompozit tabakalı numunelere ait kullanılan atık ve epoksi (Tutkal) miktarları Tablo 5'te verilmiştir. Burada uygulama basıncı 10 bar ve ort. maks. sıcaklık 175°C'dir.

Tablo 5. 2. Grup (kompozit) numune miktarları.

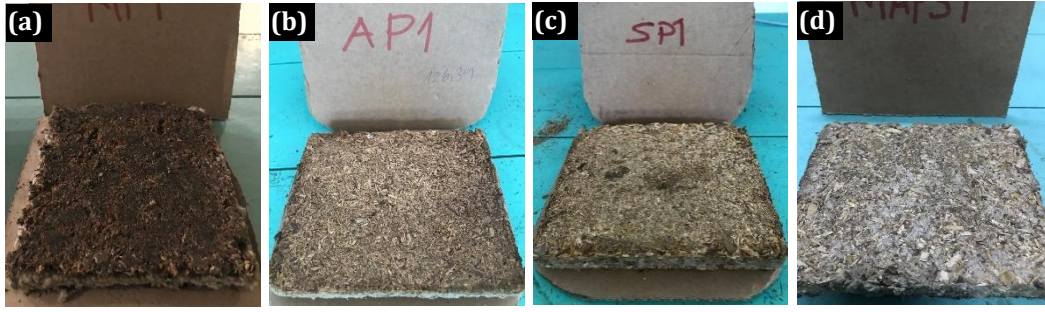
Numune	Atık Miktarı (gr)	Epoksi Miktarı (gr)
MP1	Mantar M.	176,00
	Pamuk A.	35,00
AP1	Ayçiçek S.	80,00
	Pamuk A.	35,00
SP1	Mısır S.	84,00
	Pamuk A.	34,00
MAPS1	Mantar M.	66,00
	Pamuk A.	25,00
	Mısır S.	32,00
	Ayçiçek S.	31,00

Şekil 6'da görüldüğü gibi 2. Grup numunelerden; MP1, AP1 ve SP1 plakaları orta tabakaya pamuk atıkları ve sıra ile mantar meşesi, ayçiçek sapları, mısır sapları altı üstü ikişer tabaka, toplam eşit yükseklikte (Yaklaşık 3 x 8 mm) üç tabakalı olacak şekilde üretilmiştir. Ancak, MAPS numunesi; mantar meşesi, ayçiçek sapları, mısır sapları ve pamuk atıkları el ile karıştırılmak suretiyle 3 kademede hidrolik pres kalıbına yerleştirilerek üretilmiştir.



Şekil 6. 2. Grup numune hazırlama (a) numune hazırlama, (b) numune karışımı, (c) kalıba yerleştirme, (d) presleme.

Bu numuneler için 1. Grup numunelere nazaran; sıkıştırma basıncı ve ısıtma soğutma zaman aralıklarında bir değişiklik, olmamakla birlikte ortalama maksimum sıcaklık 175°C olarak gözlenmiştir. Üretimi yapılan 2. grup kompozit tabakalı numuneler Şekil 7'de gösterilmiştir.



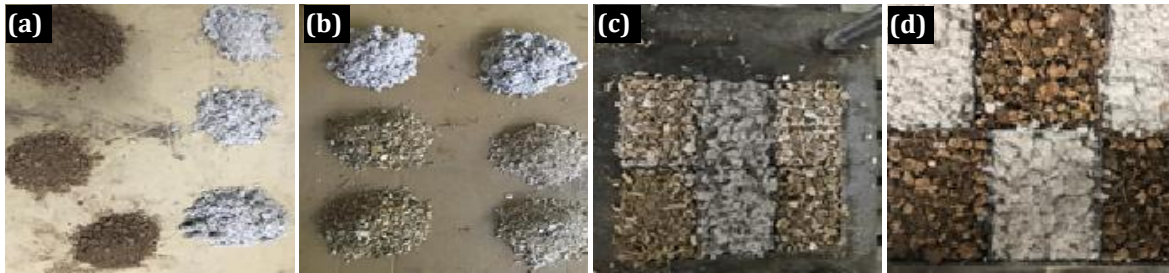
Şekil 7. 2. Grup tabakalı (kompozit) numuneler (a) MP1, (b) AP1, (c) SP1, (d) MAPS1.

Üretim prosesini geliştirmek ve yeni alternatif malzemeler keşfetmek için Tablo 5'teki bir plaka için kullanılan atık miktarları nispetinde farklı geometrik düzende 2'li karışımlar hazırlanarak, 2. Grup numune üretimi prosesinde olduğu gibi yalnız üç kademede kalıba yerleştirilerek üretilen yan yana tabakalı, 3. Grup numunelere ait kullanılan atık ve epoksi (Tutkal) miktarları Tablo 6'da gösterilmiştir. Literatürde epoksi tutkalların geniş bir ısı iletkenlik aralığı yer almaktadır [16]. En çok bilinen aralığı 0,17 ile 0,52 W/mK dir [17]. Korkmaz vd. 2017'deki çalışmalarında artan tutkal oranı ve pres basıncı ile ısı iletim katsayılarının genel olarak arttığını ifade etmişlerdir [18].

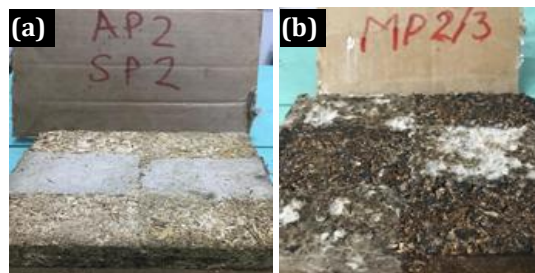
Tablo 6. 3. Grup (kompozit) numune miktarları.

Numune	Atık Miktarı (gr)	Epoksi (Tutkal) Miktarı (gr)
MP2/3	Mantar M.	132,00
	Pamuk A.	17,50
AP2/ SP2	Ayçiçek S.	45,00
	Mısır S.	41,50
	Pamuk A.	30,00

3. Grup numuneler için önceki numunelere nazaran; ısıtma soğutma zaman aralıklarında bir değişiklik olmamakla birlikte ortalama maksimum sıcaklık 170°C ve sıkıştırma basıncı 5 bar olarak gerçekleştirilmiştir. 3. Grup numune üretim prosesindeki farklı işlem basamakları Şekil 8'de ve üretilen plakalar Şekil 9'de gösterilmiştir.



Şekil 8. 3. Grup Numune Hazırlama, (a) Numune hazırlama 1, (b) Numune hazırlama 2, (c) Kalıplama 1, (d) Kalıplama 2.



Şekil 9. 3. Grup Numuneler (a) AP2 ve SP2, (b) MP2/3.



Şekil 10. Orta taneleme atıklar (a) süzgeç, (b) ayçiçeği, (c) mısır, (d) mantar meşesi.

Farklı granül büyüklüklerinde atıkların imalat davranışlarını görmek ve kullanılan atık miktarını azaltmak ve daha hafif alternatif plakalar üretmek için Şekil 10.a'da görülen 14 mm süzgeç ile ayçiçek sapları (Şekil 10.b) mısır sapları (Şekil 10.c) ve mantar meşesi kabuğu (Şekil 10.d) 2,50-12,50 mm. boyutlarında, öğütme makinesinde orta taneli granül haline getirilmiştir. Ancak, tekstil pamuk atıkları için bir değişiklik yapılmamıştır. Bu bağlamda; farklı alternatif yalıtım malzemeleri elde etmek için üretilecek 4. Grup orta taneli numunelere ait kullanılan atık ve epoksi (Tutkal) miktarları Tablo 7'de görülmektedir. Bu aşamada kalıpta ölçülen uygulama basıncı 2,5 bar ve ort. maks. sıcaklık 170°C olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 7. 4. Grup numune miktarları.

Numune	Atık Miktarı (gr)	Epoksi Miktarı (gr)
MA1/2	Mantar M.	81,00
	Ayçiçek S.	9,00
MAPS2	Mantar M.	15,00
	Ayçiçek S.	15,00
	Mısır S.	15,00
	Pamuk A.	15,00
		37,39

4. Grup numuneler için önceki numunelere nazaran; ısıtma soğutma zaman aralıklarında bir azalma gözlenmiştir. Burada ısıtma 120 dk ve soğutma 105 dk da gerçekleşmiştir. Ortalama maksimum sıcaklıkta da bir değişiklik olmamıştır. Ancak, sıkıştırma basıncı 2,5 bar olarak gerçekleşmiştir. 3. Grup numunelere göre kalıplara yerleştirme ve epoksi püskürtme şeklinde bir değişiklik yapılmamıştır. 4. Grup numune üretim sürecindeki farklı işlem basamakları; numune hazırlama (Şekil 11.a), kalıba yerleştirme (Şekil 11.b), basınç uygulama (Şekil 11.c) ve üretilen plakalar Şekil 12'de gösterilmiştir.

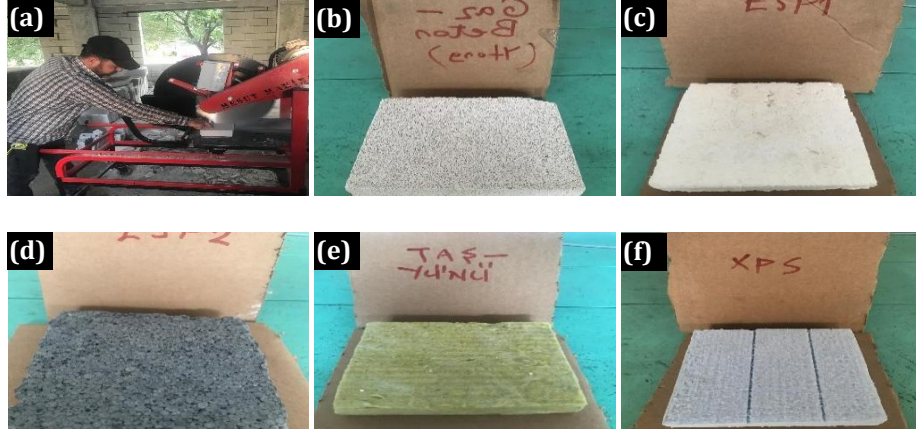


Şekil 11. 4. Grup numune hazırlama (a) numune hazırlama, (b) basınç uygulama, (c) kalıba yerleştirme.



Şekil 12. 4. Grup numuneler (a) MA1/2, (b) MAPS2.

Ekolojik ve endüstriyel atıklardan elde edilen bu yeni malzemelerin özelliklerini karşılaştırmak için hali hazırda Elbistan'da 06 Şubat 2023 depremi sonrası yerinde dönüşüm ve TOKİ'nin inşaatlarında kullanılmakta olan yalıtım malzemelerinden şahit numuneler alınmıştır. Şahit numune için kesme makinesi kullanılmıştır. Şekil 13.a'daki kesme makinesinde 30x140x160 mm ebatlarında kesilerek, Şekil 13.b-c-d-e-f'de görülen şahit numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 13. Şahit numuneler (a) numune alma, (b) gazbeton, (c) EPS1, (d) EPS2, (e) taş yünü, (f) XPS.

Bu çalışmada ısı iletim katsayısı tespiti Şekil 14.a ve b'de görülen, KYOTO KEM QTM 500 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz KSÜ ÜSKİM laboratuvarlarında bulunmaktadır. Cihaz, sıcak tel metodu kullanarak ölçüm yapmaktadır. Kızgın tel metodu bir ölçüm probunun iki numuneye bağlanmasıyla yapılan ölçüm metodu olmasına rağmen bu cihazın probu ölçümü tek numune üzerinden de gerçekleştirebilmektedir. Bu cihaz ASTM C 1113-90 standardına göre ölçüm yapmaktadır. Sıcak tel metodunda numunenin ısı iletim katsayısı Eş. 1 ile hesaplanmıştır. Burada “t” zaman (s), “T” sıcaklığı (K), “q” verilen ısı (W), ve “λ” ısı iletim katsayısı (W/mK) dir.

$$\lambda = q \cdot \ln(t_2/t_1) / 4\pi (T_2 - T_1) \quad (1)$$



Şekil 14. Deney esnası (a) ısı iletim probu (b) QTM 500 cihazı.

3. Bulgular ve Tartışma/Results and Discussion

Ekolojik ve endüstriyel atıklardan değişik karışım oranı, basınç ve sıcaklık şartlarında 4 grupta toplam 12 adet plaka levhaları şeklinde yalıtım levhası üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit, tabakalı ve sandviç plaka levhaları şeklinde, üretimi gerçekleştirilen yalıtım malzemelerinin boyutları 1/20 verniyer bölüntülü sürmeli kumpas ile numune ağırlıkları da hassas terazi ile ölçülmüştür. Bu ölçüm sonuçları Tablo 8'de gösterilmiştir.

Ayrıca; Elbistan'da yerinde dönüşüm ve TOKİ inşaatlarında kullanılan konvansiyonel yalıtım malzemelerine ait ölçüm sonuçları da Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 8. Üretilen panel numunelerin boyut ve ağırlıkları.

Üretilen Numune	Kalınlık (cm)	En (cm)	Boy (cm)	Ağırlık (gr)
AS1	2,5	14	16	121,74
MS1	2,5	14	16	132,74
MM1	2,5	14	16	247,81
AP1	2,5	14	16	126,39
PA	3	14	16	101,39
AP2/SP2	2,5	14	16	120,90
SP1	2,5	14	16	146,60
MP1	2,5	14	16	191,30
MP2/MP3	2,5	14	16	173,62
MAPS1	2,5	14	16	143,17
MAPS2	2	14	16	102,23
MA1/MA 2	2	14	16	76,77

Tablo 9. Şahit numunelerin boyut ve ağırlıkları.

Şahit Numune	Kalınlık (cm)	En (cm)	Boy (cm)	Ağırlık (gr)
Taşıünü	3	14	16	100,10
EPS1	3	14	16	9,64
EPS2	3	14	16	7,33
Ytong	3	14	16	308,39
XPS	3	14	16	17,54

Plakalar şeklinde üretilen yalıtım malzemelerinde; kullanılan ekolojik ve endüstriyel atıkların tamamının birbirleriyle ve epoksi ile çok uyum sağlayarak birleştiği görülmüştür. Proseste; 30 mm kalınlıkta numuneler planlanmış olup PA numunesi hariç diğerlerinin tamamında, bu kalınlıkta ürün elde edilememiştir. Ortalama 20-25mm arasında bir kalınlıkta plaka elde edilmiştir. Bu durumun taneciklerin presleme sonrası bir miktar genleşmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Ancak, hidrolik presin kalıp derinliği arttırılarak istenilen numune kalınlığına erişilmesinin mümkün olacağı düşünülmektedir. Numunelerin en ve boy oranlarında herhangi bir sapma olmamıştır. Deneysel incelemesi yapılan; ekolojik ve endüstriyel atıklar kullanılarak üretilmiş olan yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayılarının deney sonuçları derlenmiş ve Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. Ekolojik ve endüstriyel atıklardan üretilmiş yalıtım malzemesi numunelerinin deney sonuçları.

Üretilen Numuneler	Isı İletim Katsayısı (λ , W/mK)		
	I. Ölçüm	II. Ölçüm	III. Ölçüm
MAPS 1	0,0674	0,0517	0,0722
MP2 (PMP)	0,0577	0,0698	0,0658
MP3 (MPM)	0,0475	0,0510	0,0410
SP2	0,0697	0,0737	0,0768
AP2	0,0602	0,0641	0,0671
MM1	0,0707	0,0564	0,0801
MS1	0,0725	0,0773	0,0604
MP1	0,0794	0,1005	0,0866
AS1	0,0229	0,0647	0,0612
PA1	0,0413	0,0546	0,0528
SP1	0,0604	0,0560	0,0681
AP1	0,0488	0,0513	0,0548
MA1 (AMA)	0,0466	0,0581	0,0331
MA2 (MAM)	0,0875	0,0966	0,0899
MAPS-2	0,0417	0,0450	0,0441

Ayrıca; Elbistan'da yerinde dönüşüm ve TOKİ inşaatlarında kullanılan yalıtım malzemelerine (Şahit numuneler) ait ısı iletim ölçüm sonuçları da Tablo 11'de verilmiştir. MAPS2 numunesinde Tablo 10'da görüldüğü üzere yapılan 3 ölçüm sonucunda ortalama en düşük ısı iletim katsayısına sahiptir. MAPS2 numunesi ısı iletim katsayısı ortalama 0,0436 W/mK değerinde çıkmıştır. Ekolojik ve endüstriyel atıkların toplanarak yalıtım malzemesi üretilmesi ümit verici olarak değerlendirilmiştir. Bu atıkların depolanması veya farklı amaçla kullanılmasında ekstra maliyetler getirmektedir. Atıkların yalıtım malzemesine dönüştürülmesi birçok anlamda ülke ekonomisine kazanç sağlayabilir. Aynı zamanda Tablo 10'da olduğu gibi bazı tekil ölçüm sonuçları MP3 ve MA1 numunelerinin sırası ile ısı iletim katsayılarının 0,0410 ve 0,0331 W/mK değerinde çıkmıştır. Bu durumda oldukça sevindiricidir. Bu durum dikkate alındığında ve imalat sonuçları incelendiğinde, ekolojik ve endüstriyel atıkların tabakalı kompozit yalıtım malzemesi üretimine de uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 11. Şahit numuneler deney sonuçları.

Üretilen Şahit Numuneler	Isı İletim Katsayısı (λ , W/mK)		
	I. Ölçüm	II. Ölçüm	III. Ölçüm
Taşyünü	0,0197	0,0175	0,0175
ESP2	0,0297	0,0280	0,0266
EPS1	0,0251	0,0251	0,0257
Ytong	0,0197	0,0175	0,0175
XPS	0,0340	0,0330	0,0354

Tablo 10. ve Tablo 11. birlikte incelendiğinde; ısı iletkenlik katsayıları açısından değerlendirildiğinde, ekolojik ve endüstriyel atıklardan üretilen yalıtım malzemelerinin, hali hazırda inşaatlarda yaygın olarak kullanılan yalıtım malzemeleri ile yarışabilecek durumda olduğu düşünülmektedir. Özellikle bu malzemelerin tamamının ısı iletkenlik katsayısının gazbeton (Ytong) numunesinden düşük olduğu aşikârdır. AS1 numunesin 1. Ölçüm sonucunda elde edilen $\lambda = 0,0229$ W/mK değeri bu malzemelerin ısı yalıtımında kullanılmak üzere araştırılmasının gerekliliğini ortaya koymuştur. Ayrıca ISO standardına göre yapı dış kabuğunu mantolamak için kullanılan yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı (λ) 0,065 W/mK'den küçük olması gerekmektedir[19]. Bu çalışmadaki birçok numune bu değerden daha iyi sonuç vermiştir. Bunun yanı sıra elde edilen sonuçların bir karşılaştırmasını yapmak için literatür incelendiğinde yerel piyasada (U) $\leq 0,065$ W/m²K değerini sağlamayan yalıtım malzemelerinin de pazarlandığını ifade eden çalışmalar olduğu görülmüştür[20].

4. Sonuçlar/Conclusions

Yapılan çalışmada hem üretim süreci hem de ısı iletim katsayısı ölçme deneyi sonuçlarına göre; mantar meşesi kabuğu, ayçiçek ve mısır saplarının ve pamuk tekstil atıkları gibi ekolojik ve endüstriyel atıklardan, yalıtım malzemesinin plakalar şeklinde üretilebileceği ve üretilen bu malzemelerin ısı yalıtımında kullanılabileceği görülmüştür. Çalışmada kullanılan atıkların hem geri dönüşümü sağlanmış hem de ekonomiye kazandırılması gerçekleştirilmiştir. Özellikle menşei petrole dayalı EPS, XPS, Köpük vb. yalıtım malzemelerine alternatif olarak kullanılması ülke ekonomisi açısından da önem arz etmektedir. Ekolojik ve endüstriyel atıklarından üretilen yalıtım malzemelerinin Ülkemiz'in yıllık karbon tüketimini azaltarak katkı sağlayabileceği de değerlendirilmektedir. MAPS2, MA1 (AMA) vb. gibi yalıtım malzemesi üretimi için AR-GE çalışmalarına hız verilmesi gerektiği değerlendirilmiştir.

İleriki çalışmalarda; daha homojen bir yapı elde etmek için elek ile eleme işlemi yapılabilir. Malzeme ömrü açısından daha etkin kurutma süreci için etüv cihazında farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde kurutulan malzemenin spesifik özellikleri incelenebilir. Bunların yanı sıra üretimi yapılan yalıtım malzemesinin termal özelliği ve daha ekonomik olmasının yanı sıra; mekanik, akustik, nem tutma, ısı absorpsiyonu ve yanmazlık değerleri gibi faktörler üzerinde de çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Yazar Katkısı/ Authors' Contributions

ME: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazım- Orijinal taslak hazırlama, Araştırma. **EA:** Yazım- İnceleme ve Düzenleme, Doğrulama, Gözetim.

Etik Standartların Beyanı/ Declaration of Ethical Standards

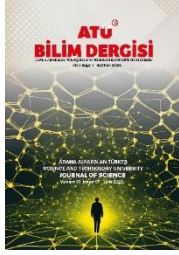
Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Çıkar Çatışması/ Conflict of Interest

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

Kaynaklar/References

- [1] Raja, P., Murugan, V., Ravichandran, S., Behera, L., Mensah, R.A., Mani, S., Kasi, A.K., Balasubramanian, K.B.N., Sas, G., Vahabi, H., Das, O., (2023). A Review of Sustainable Bio-Based Insulation Materials for Energy-Efficient Buildings, *Macromol. Mater. Eng.* 308, 1–11.
- [2] Kurnaz, M., Oktay, B.M., (2017). Ekolojik Malzemeler Kullanarak Üretilen Isı Yalıtım Levhalarının Özelliklerinin İncelenmesi, *Int. J. Multidiscip. Stud. Innov. Technol.* 1, 15–17.
- [3] İpekçi, C.A., Coşgun, N., Karadayı, T.T., (2017). İnşaat Sektöründe Geri Kazanılmış Malzeme Kullanımının Sürdürülebilirlik Açısından Önemi, *TÜBAV Bilim Derg.* 10, 43–50.
- [4] Üçgül, İ., Turak, B., (2015). Tekstil Katı Atıklarının Geri Dönüşümü Ve Yalıtım Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, *Acad. Platform-Journal Eng. Sci.* 3, 39-48.
- [5] Arslan, M.A., Aktaş, M., (2018). İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi, *J. Polytech.* 0900, 299–320.
- [6] Temiz, H., Olgar, K., (2017). Doğal ve Yapay Liflerden Üretilen Panellerin Yalıtım Özelliklerinin Araştırılması, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Derg.* 7, 608–618.
- [7] Yaşar, M., Altunok, M., (2023). Orman ve Tarım Atıklarından Sürdürülebilir Bitkisel Lifli Düşük Yoğunluklu Kompozit İzolasyon Levhası Üretimi The Production of Sustainable Low Density Composite Insulation Boards with Vegetable Fibre from Forestry and Agricultural Wastes, 35, 699–712.
- [8] Majumder, A., Canale, L., Mastino, C.C., Pacitto, A., Frattolillo, A., Dell'Isola, M., (2021). Thermal Characterization of Recycled Materials for Building Insulation, *Energies* 14, 3564.
- [9] Antolinc, D., Filipič, K.E., (2021). Recycling Of Nonwoven Polyethylene Terephthalate Textile Into Thermal And Acoustic Insulation For More Sustainable Buildings, *Polymers (Basel)*. 13 (18) 3090.
- [10] Abu-Jdayil, B., Barkhad, M.S., Mourad, A.H.I., Iqbal, M.Z., (2021). Date Palm Wood Waste-Based Composites For Green Thermal Insulation Boards, *J. Build. Eng.* 43, 103224.
- [11] Zhao, X., Liu, Y., Zhao, L., Yazdkhasti, A., Mao, Y., Siciliano, A.P., Dai, J., Jing, S., Xie, H.S., Li, Z., He, S., Clifford, B.C., Li, J., Chen, G.S., Wang, E.Q., Desjarlais, A., Saloni, D., Yu, M., Košny, J., Zhu, J.Y., Gong, A., Hu, L., (2023). A scalable high-porosity wood for sound absorption and thermal insulation, *Nat. Sustain.* 6, 306–315.
- [12] Bourbia, S., Kazeoui, H., Belarbi, R., (2023). A Review On Recent Research On Bio-Based Building Materials And Their Applications, *Mater. Renew. Sustain. Energy* 12, 117–139.
- [13] Ünlü, A., Arslan, Z.F., Arslan, R., Ceylan, F., (2023). Ülkesel Ve Bölgesel Ölçekte Türkiye'nin Bitkisel Atık Miktarları, *Düzce Üniversitesi Ziraat Fakültesi Derg.* 1, 26–37.
- [14] Dönmez, E.T., Türker, E., (2014). Tekstil Atıkları İçeren Yüzeylerin Sahip Olduğu Elektromanyetik Kalkanlama, Ses Ve İsi İzolasyonu Özellikleri İlgili Literatür İncelemesi, *Tekst. ve Mühendis* 24, 124–135.
- [15] Aybek, A., Üçok, S., Bilgili, M.E., İspir, M.A., (2015). Kahramanmaraş İlinde Bazı Tarımsal Atıkların Biyogaz Enerji Potansiyelinin Belirlenerek Sayısal Haritalarının Oluşturulması, *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Derg.* 29, 25-37.
- [16] Zhou, M.H., Yin, G.Z., González Prolongo, S., (2004). Review Of Thermal Conductivity In Epoxy Thermosets And Composites: Mechanisms, Parameters, And Filler Influences, *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 7, 295–308.
- [17] Epoxy Resin - Netzsch Analyzing & Testing, (2025). <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/polymers-netzsch-com/thermosets/ep-epoxy-resin> (accessed December 2, 2025).
- [18] Korkmaz, M., Yapıcı, F., Kılınç, İ., Taşdemir, N.Z., (2017). Üretim Faktörlerinin Yönlendirilmiş Yongalevhaların Isı İletkenlik Katsayısı Değeri Üzerine Etkilerinin Araştırılması, *İleri Teknol. Bilim. Derg.* 6, 932–939.
- [19] Kulaksızoğlu, Z., (2006). Isı Yalıtım Sektör Araştırması, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, Erişim Adres. <http://www.ito.org.tr/Itodayin/0016985.pdf> (Erişim Tarihi 07.11. 2017).
- [20] Karadayı, T.T., Yüksek, İ., (2016). Yapılarda Isı Yalıtım Malzemeleri Seçimi Üzerine Bir Araştırma, *Tesisat Derg.* 242, 90–102.



Bio-Heat Transfer in Cancer Treatment: A Mathematical Framework for Hyperthermia-Assisted Radiotherapy Using Monte Carlo Simulation

Tuka Fattal^{1#} , Birnur Bozdoğan² , Recep Yumrutaş³ 

(This study was presented at ULIBTK'25 congress)

Abstract

This study explores bio-heat transfer during radiotherapy combined with hyperthermia, with the goal of improving cancer treatment by maximizing tumor destruction while minimizing harm to surrounding healthy tissue. Understanding thermal dynamics during therapy allows clinicians to enhance treatment effectiveness, anticipate biological responses based on dose parameters, and reduce side effects. In this work, we focus on the synergistic use of hyperthermia and X-ray radiotherapy. During short recovery periods between hyperthermia pulses—when tissue responds to elevated temperatures (43 °C, 45 °C, 47 °C)—radiation is delivered. The central hypothesis is that heating tumor tissue increases its radiosensitivity, potentially shortening treatment time and improving outcomes. Evidence from current literature supports this synergy, showing that higher temperatures amplify cellular damage. To quantify this effect, we applied the Arrhenius damage model, which converts temperature and exposure duration into a single thermal damage parameter (Ω) representing irreversible tissue injury. Finally, we developed a mathematical framework to simulate this process, using Monte Carlo photon transport to generate spatial heat sources and solving Pennes' bio-heat equation to model heat transfer across layered biological tissue.

Keywords: Heat transfer; Pennes' bioheat equation; cancer treatment; radiotherapy; X-ray hyperthermia; Monte Carlo simulation.

^{1,2,3}Gaziantep University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 27310 Şehitkamil, Gaziantep, Türkiye

ORCID¹: 0009-0007-5413-6148

ORCID²: 0000-0003-0314-837X

ORCID³: 0000-0001-9006-198X

#Corresponding Author:
drtukafattal78@gmail.com

Kanser Tedavisinde Biyo-Isı Transferi: Monte Carlo Simülasyonu Kullanılarak Hipertermi Destekli Radyoterapi İçin Matematiksel Bir Çerçeve

(Bu çalışma ULIBTK'25 kongresinde sunulmuştur)

Öz

Bu çalışma, kanser hücrelerine yönelik radyasyon tedavisi (radyoterapi) sırasında hipertermi yoluyla gerçekleşen biyoyısı transferini özel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Bu inceleme, tedavi sonuçlarını optimize etmek, kanser hücrelerini yok etmek ve sağlıklı dokular üzerindeki yan etkileri (toksisiteyi) önlemek açısından önem taşımaktadır. Tedavi sırasında gerçekleşen ısı transferi sürecinin anlaşılması, hekimlerin tedavi etkilerini maksimize etmesine, uygulanan dozlara bağlı tepkileri öngörmesine ve yan etkileri en aza indirmesine yardımcı olabilir. X-ışını kullanan radyoterapi ile hiperterminin kombinasyonu, kanser hücrelerinin tedavisinde kullanılan yöntemler arasında özel olarak araştırılmıştır. Bu araştırma, her iki yöntemin avantajlarını bir araya getirmeyi ve bunlarla ilişkili istenmeyen yan etkileri azaltmayı hedeflemektedir. İki hipertermi darbesi arasındaki dinlenme süresi boyunca, biyolojik sistem uygulanan yüksek sıcaklıklara (43°C, 45°C, 47°C) karşı tepki vermeye çalışırken, radyoterapi dozu uygulanmaktadır. Ana fikir şudur: Kanser hücrelerinin ısıtılması, onları radyasyon tedavisine karşı daha hassas hale getirir; bu da tedavi süresini kısaltabilir, yan etkileri azaltabilir ve hayatta kalma oranlarını artırabilir. Yapılan literatür taramasına göre, kanser hücrelerinin artışı daha fazla doku hasarına yol açmaktadır. Bu bağlamda, Arrhenius modeli kullanılarak sıcaklık ve ısıya maruz kalma süresinin artmasının, kanser hücrelerine verilen hasarı artırdığı gösterilmiştir. Bu model, sıcaklık ve maruziyet süresi parametrelerini, geri dönüşü olmayan doku hasarını yansıtan tek bir parametreye (Ω) dönüştürmektedir. Son olarak, Pennes'in biyoyısı denklemini çözmek için Monte Carlo Simülasyonu kullanılarak radyoterapi tedavisine yönelik genel bir biyoyısı transferi matematiksel çerçevesi sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Isı transferi; Pennes'in biyoyısı denklemi; kanser tedavisi; radyoterapi; X-ışını hipertermisi; Monte Carlo simülasyonu.

Received: 27/10/2025

Accepted: 10/12/2025

Online Published: 25/12/2025

How to Cite: Fattal T., Bozdoğan B., Yumrutaş R. "Bio-Heat Transfer in Cancer Treatment: A Mathematical Framework for Hyperthermia-Assisted Radiotherapy Using Monte Carlo Simulation" Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University Journal of Science, 1 (2): 96-109 (2025).

1. Introduction

Radiation therapy is one of the most common cancer treatments. Its clinical use began in the early 20th century following the discoveries of X-rays by Roentgen (1895) and the Curie's work on radium in 1898. Radiotherapy can be delivered alone or combined with chemotherapy or surgery to improve cure rates. Precise dosing is critical: it must destroy the tumor while sparing nearby healthy tissues, which is the primary clinical challenge of radiotherapy. Including radiotherapy infrastructure in national cancer plans ensures both early detection and broad access to effective treatment. Careful prediction of the coagulation zone—the area of irreversible tissue damage—is essential to avoid unintended harm and allow normal, tissue recovery [1]. A well-designed treatment plan must balance full tumor ablation with minimizing toxicity to adjacent organs, nerves, and blood vessel. Hyperthermia as a cancer treatment dates back to ancient times but gained modern attention in the 19th century when William B. Coley induced fevers to shrink tumors. Typically, cancer cells are exposed to temperatures around 44–45 °C for about an hour. Elevated temperature disrupts cancer cell proteins, DNA repair, and tumor blood flow—affecting the tumor microenvironment, immunity, and vascularization—with minimal impact on normal tissues [2] [3]. Combining radiotherapy and hyperthermia (“thermoradiotherapy”) has been used since the 1970s and shows improved outcomes in advanced cancers (e.g., breast, cervical, head-and-neck, bladder, soft tissue sarcoma, melanoma) without increased serious side effects. Clinical trials confirm significantly higher complete response rates with thermoradiotherapy versus radiotherapy alone, and logistical studies show close timing between heat and radiation enhances efficacy while sparing healthy tissue [4] [5].

2. Literature Review

Recent research into the physiological mechanisms behind thermoradiotherapy (TRT) has made its synergy increasingly promising. However, several questions remain unresolved:

- What is the optimal hyperthermia temperature and duration to achieve maximal radiosensitization without triggering thermotolerance?
- How does hyperthermia impact DNA repair pathways in tumor versus healthy cells?[6]

Precision radiotherapy combined with nanoparticle-mediated hyperthermia shows great potential. Injected nanoparticles—such as gold, gadolinium, or magnetic particles—accumulate in tumors, enabling highly focused heating that intensifies DNA damage and boosts radiotherapy effectiveness [7]. Beyond TRT, hyperthermia plus chemotherapy has demonstrated improved long-term outcomes. For example, a JAMA Oncology trial (EORTC 62961-ESHO-95) reported an 11.4% gain in 5-year survival when regional hyperthermia was added to neoadjuvant chemotherapy for soft tissue sarcoma. The principle is simple but powerful: heat enhances blood flow and oxygenation, improving drug uptake in tumors without damaging healthy surrounding tissue [8] [9]. In Turkey, several clinical studies illustrate TRT's real-world impact:

- 2017, Yıldırım Beyazıt University (Ankara): Locoregional recurrent breast cancer treated with radiotherapy + hyperthermia achieved higher local control and low toxicity [10].
- 2023, Istanbul (ASCO abstract): Combining chemotherapy with radiofrequency hyperthermia (Oncothermia, 45 °C) in metastatic colorectal cancer produced a 96% objective response rate, with no unexpected toxicity [11]

Across Turkey, hyperthermia use—particularly in locally advanced or recurrent cancers (breast, cervical, lung, colorectal, rectal)—has grown steadily. Several major oncology centers now integrate it alongside radiotherapy, although literature is still heavily based on smaller trials and case reports [12]. Despite encouraging early results, TRT+HT remains understudied. Most available evidence stems from small-scale phase II trials or single-center studies. There is a pressing need for larger, well-controlled clinical trials to:

1. Pinpoint optimal HT dose, duration, and timing in relation to RT.
2. Validate nanoparticle and Oncothermia enhancements.
3. Expand TRT's adoption into standard cancer care protocols [13].

3. Methodology

In this study, we investigated a hybrid cancer treatment that combines laser-induced hyperthermia with X-ray radiotherapy, aiming to destroy cancer cells while minimizing damage to healthy tissues. To do this, we created a synthetic 3D lung-tumor model using advanced computational techniques and realistic treatment conditions.

- **Laser Hyperthermia Application:** We used an external laser to increase tumor temperature in distinct phases—43 °C, 45 °C, and 47 °C—mirroring established LITT (Laser-Induced Thermal Treatment) protocols [14].
- **Monte Carlo Heat Deposition (MCXLAB):** For each temperature stage, we mapped 3D energy deposition using MCXLAB, a GPU-accelerated Monte Carlo photon transport toolkit. The result was a detailed spatial heat-source term integrated into Pennes' bio-heat equation to simulate temperature evolution over time [15] [16]. Monte Carlo (MC) methods are a class of computational algorithms that rely on statistical

sampling to solve complex physical and mathematical problems. In radiation transport, MC simulates probabilistic interactions of photons as they traverse tissue, including scattering, absorption, and secondary particle generation, based on known cross-sections. This approach provides highly accurate dose distributions in heterogeneous and geometrically complex media, outperforming deterministic models. In this study, MC simulations were used to calculate spatial energy deposition during X-ray radiotherapy. The resulting dose map was converted into a volumetric heat source term for Pennes' bio-heat equation, enabling realistic modeling of thermal dynamics during combined hyperthermia and radiotherapy.

- Arrhenius Thermal Damage Assessment: We employed the Arrhenius model to estimate irreversible thermal damage caused by heating cancer cells [17].
- X-ray Dose & Radiobiological Effect (LQ model). After each hyperthermia pulse, we simulated X-ray dose distribution using Monte Carlo methods and evaluated cell survival using the Linear-Quadratic (LQ) model [18].
- Comparative Evaluation Across Temperatures: We compared thermal damage and radiation effectiveness at 43 °C, 45 °C, and 47 °C to determine which offered optimal tumor destruction with minimal harm to healthy tissue. To efficiently simulate heat transfer, we assumed a spherically symmetric tumor control volume with concentric healthy lung tissue layers.
- Radial Symmetry & Boundary Conditions:
 - Symmetry at the tumor core ($r = 0$).
 - Convective heat loss at the outer surface.
 - Blood perfusion included throughout the tissue [19]
- Bio-Heat Equation Formulation: We used Pennes' bio-heat model in spherical coordinates to predict transient temperature changes during and after heating [16].

Penn's bioheat equation was solved using temperatures in Celsius because it involves temperature differences (e.g., $T_a - T_{(r,T)}$), where adding 273.15 to both terms cancels out, making °C practical for interpretation. However, the Arrhenius thermal damage model requires absolute temperature in Kelvin because its exponential term depends on absolute energy states. To ensure consistency and accuracy, all temperature data used in the damage calculations was converted from Celsius to Kelvin before applying the Arrhenius model.

Figure 1 shows the idealized spherical control volume used to model heat transfer during hyperthermia treatment. At the center lies the tumor, surrounded by concentric layers of healthy lung tissue. This geometry enables the use of spherical coordinates (r, θ, ϕ), which naturally capture radial heat diffusion and laser energy deposition. A symmetry condition at the tumor core ($r = 0$) ensures no heat flux, while the outer boundary ($r = R$) applies a convective heat-loss condition to represent thermal exchange with surrounding tissue. Internal heat sources include metabolic activity, blood perfusion, and laser energy derived from Monte Carlo photon transport simulations. This configuration forms the basis for solving the time-dependent Pennes' bio-heat equation, allowing prediction of temperature rise and thermal damage across the tumor and adjacent tissue under controlled heating phases (43 °C, 45 °C, and 47 °C) [20]. We adopted 47 °C as the upper limit to distinguish hyperthermia from thermal ablative therapy. Temperatures above this threshold enter a zone where irreversible tissue damage and collateral thermal injury become significant, aligning with literature that defines hyperthermia as 39–45 °C and ablative therapy as ≥ 50 °C [21], [22]

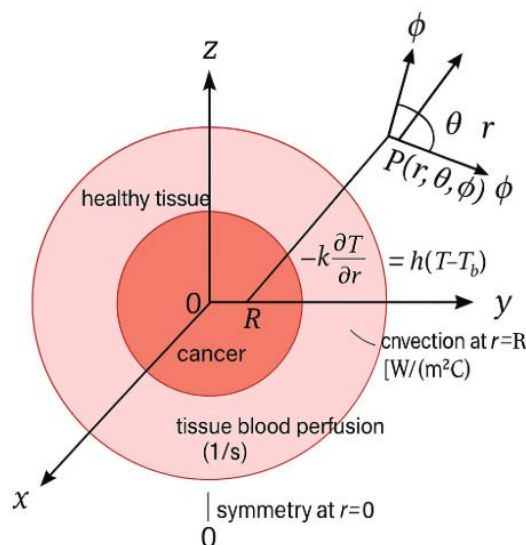


Figure 1. Spherical tumor-embedded control volume for bio-heat transfer analysis.

3.1 Initial Anatomical Model

To simulate heat transfer during hyperthermia, we constructed a radially symmetric anatomical model that represents a solid tumor embedded within healthy tissue. Figure 2, illustrates the voxel-based phantom, which provides an idealized yet practical framework for thermal analysis. Its spherical geometry enables the use of spherical coordinates (r, θ, ϕ) , perfectly suited for capturing radial heat diffusion and energy deposition. At the center lies the tumor region, while surrounding layers represent healthy tissue. This symmetry minimizes numerical artifacts and ensures smooth propagation of heat gradients from the core outward. The phantom's modular design also allows easy labeling of tissue layers—such as tumor, fat, muscle, and skin—supporting later stages of multi-layer thermal and radiative modeling [16].

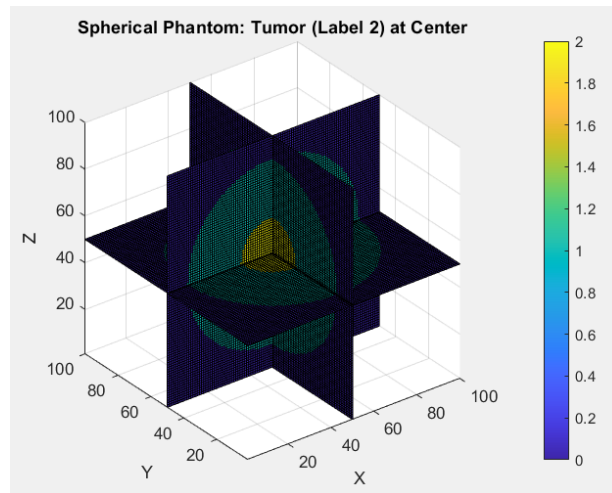


Figure 2. Voxelized 3D spherical phantom with central tumor (Label 2) and surrounding healthy tissue (Label 1).

3.2 Heating Phase 1: Heating Tumor Tissue to 43°C

3.2.1 Heating Tumor Tissue to 43°C

In the first hyperthermia stage, the tumor core was heated to 43 °C using an external laser source. To accurately model light propagation through tissue, we employed MCXLAB, a Monte Carlo-based simulation tool that calculates photon transport within the layered 3D anatomical phantom. The resulting fluence map was converted into a spatially varying heat source term, $Q_{laser}(r)$, which was then integrated into the time-dependent Pennes bio-heat equation expressed in spherical coordinates, as illustrated below [20]:

$$\rho c \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 K \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right) + \rho_b C_b \omega_b (T_a - T(r, t)) + Q_{met} + Q_{laser}(r)$$

This formulation accounts for radial heat conduction, perfusion loss, baseline metabolism Q_{met} and laser-induced heating [23]. This method discretizes the equation in both time and space to simulate the transient temperature distribution within tissue subjected to laser heating and perfusion. The finite difference scheme was applied as follows:

- Time derivative (forward difference):

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t}$$

- Spatial derivative in spherical form (central difference):

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \approx \frac{1}{r_i^2} \left[\frac{r_{i+0.5}^2 (T_{i+1}^n - T_i^n) - r_{i-0.5}^2 (T_i^n - T_{i-1}^n)}{\Delta r^2} \right]$$

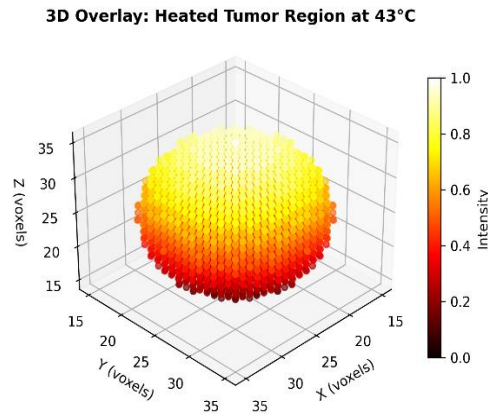


Figure 3. 3D overlay: heated tumor region at 43°C.

The equation was solved numerically over time to simulate the transient temperature response across the control volume. The simulation confirmed that the tumor core successfully reached 43 °C after approximately 900 seconds (15 minutes) of continuous laser exposure. Figure 3 shows a 3D overlay of the heated tumor region, highlighting the region that achieved the target temperature.

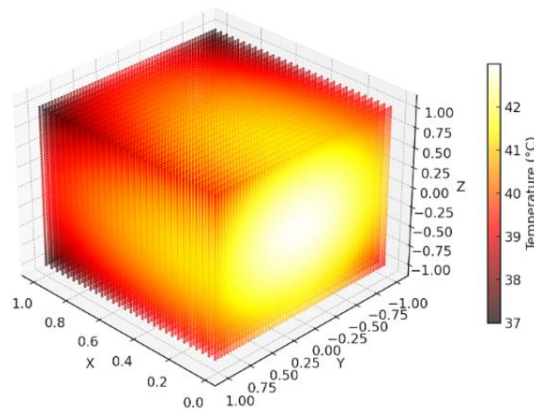


Figure 4. Cutaway view: heat distribution in tumor & surrounding tissues.

Figure 4 presents a 3D cutaway visualization of temperature distribution across the layered tissue model following laser-induced heating. The image highlights how heat radiates outward from the tumor core—the hottest region—through adjacent layers of muscle, fat, and skin. The thermal gradient, ranging from approximately 43 °C at the tumor center to ~37 °C near the outer boundary, reflects realistic heat diffusion governed by Pennes' bio-heat equation. This pattern demonstrates the combined effects of conduction and biological cooling mechanisms such as blood perfusion. The smooth, radially symmetric temperature profile confirms that the heating phase was accurately implemented and maintained within safe limits for surrounding healthy tissue.

3.2.2 Estimating Thermal Damage

To evaluate the biological impact of heating the tumor to 43 °C, the Arrhenius thermal damage model was employed. This model is widely accepted for quantifying irreversible molecular injury caused by temperature elevation in biological tissues. It estimates the damage index, $\Omega(t)$, which reflects the logarithmic ratio of healthy to surviving molecules over time, and is sensitive to both temperature and exposure duration. The model uses the following integral expression [24]:

$$\Omega(t) = \int_0^t A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT(\tau)}\right) d\tau$$

Where:

- $\Omega(t)$: Accumulated thermal damage index (unitless)
- A : Frequency factor (s^{-1}), representing molecular reaction rate
- E_a : Activation energy, specific to tissue type
- R : Universal gas constant.

- $T(\tau)$: Absolute temperature (in Kelvin) as a function of time
- Ω : Dimensionless damage index ($\Omega \geq 1$ means irreversible damage).

Using the temperature-time profiles obtained from solving the Pennes' bio-heat equation, the Arrhenius thermal damage integral was numerically evaluated across the tumor and surrounding tissues. The results, shown in Figure 5, indicate that thermal damage values reached $\Omega \approx 0.005$ in the tumor center, reflecting sub-lethal injury, consistent with the goal of sensitizing cancer cells to subsequent radiotherapy without inducing irreversible ablation. Peripheral layers exhibited even lower damage values, further confirming the spatial selectivity of laser-based hyperthermia.

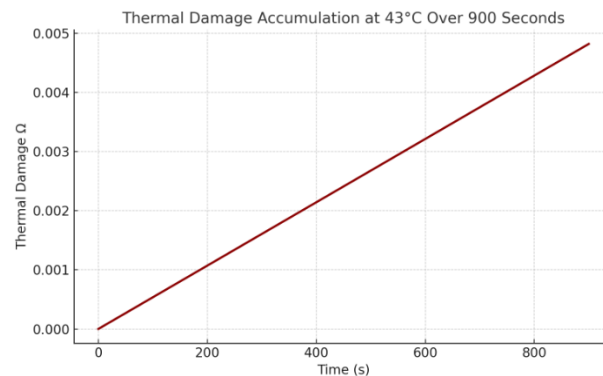


Figure 5. Thermal damage accumulation at 43°C over 900 seconds.

3.2.3 X-ray Application During Relaxation (Post-Heating Phase 1).

After raising the tumor temperature to 43 °C using laser-based hyperthermia, we delivered a targeted radiotherapy dose. A 6 MeV collimated X-ray beam was applied during the 5-minute thermal relaxation period—timed deliberately to take advantage of the radiosensitized state of tumor cells. This approach aims to maximize treatment effectiveness while minimizing exposure to healthy tissue. Photon transport and 3D dose distribution were modeled using Monte Carlo simulations (MCXLAB). As shown in Figure 6, the dose concentrated at the tumor core with a smooth Gaussian falloff, ensuring precise targeting and reduced peripheral impact.

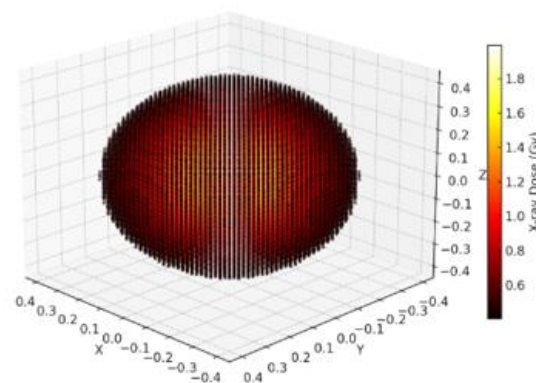


Figure 6. 3D spatial distribution of x-ray dose following laser-induced hyperthermia at 43 °C.

3.2.4 Combined Damage Assessment (Thermal + X-ray)

To quantify the combined effect of hyperthermia and radiotherapy, we computed the Effective Damage (ED)—the predicted fraction of cell death under both thermal and radiation stress. This metric integrates the Arrhenius thermal injury model with the Linear-Quadratic (LQ) radiobiological model, capturing their synergistic potential. Figure 7 illustrates the 3D rendering of cell death probability, where each voxel represents irreversible damage likelihood. The tumor core shows the highest ED values (≈ 0.9), confirming that sequential treatment significantly improves lethality compared to hyperthermia alone. Damage decreases toward the periphery, validating selective tumor targeting while sparing healthy tissue. These results reinforce the study's central

hypothesis: moderate hyperthermia (43 °C) enhances radiosensitivity, enabling better outcomes without increasing radiation dose or exceeding safe thermal limits.

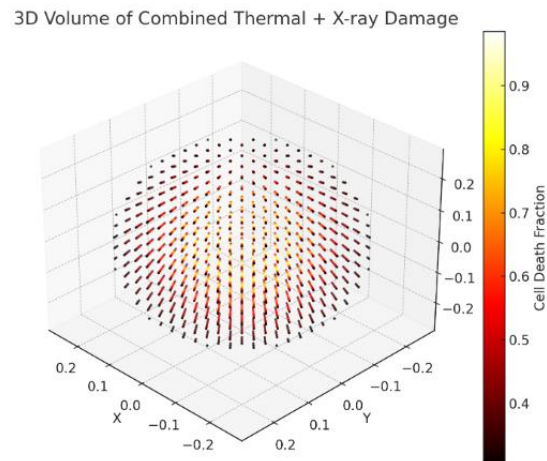


Figure 7. 3D visualization of effective cell death from combined hyperthermia and x-ray treatment.

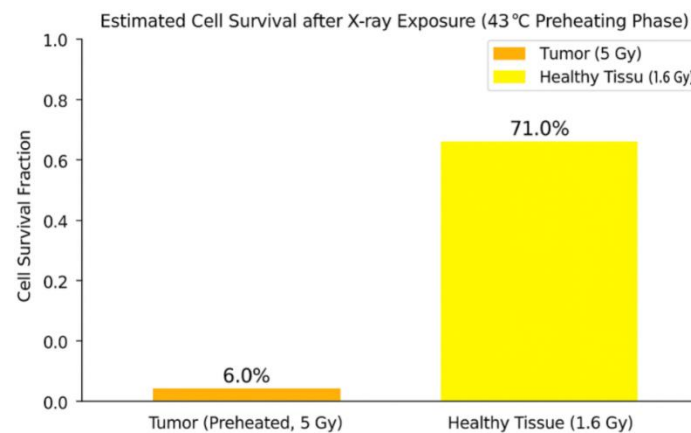


Figure 8. Cell survival comparison following 43 °C hyperthermia and radiotherapy (first treatment phase).

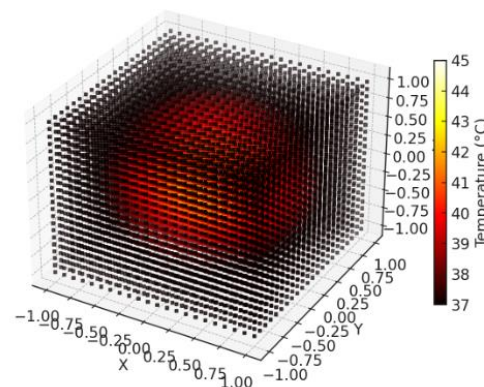
The survival analysis clearly demonstrates the selective effectiveness of the combined treatment. When the tumor was heated to 43 °C and then exposed to a 5 Gy X-ray dose, cell viability dropped dramatically—only about 6% of tumor cells survived. In contrast, healthy tissue, which received a much lower dose (≈ 1.6 Gy due to spatial attenuation), retained 71% survival, indicating that normal structures were largely preserved. These findings strongly support the concept that moderate hyperthermia enhances radiosensitivity, improving therapeutic outcomes without increasing radiation dose—a critical advantage in clinical practice where protecting healthy tissue is essential. Figure 8 illustrates the survival comparison between tumor and healthy cells.

3.3 Heating Phase 2: Heating Tumor Tissue to 45°C

3.3.1 Heating Tumor Tissue to 45°C

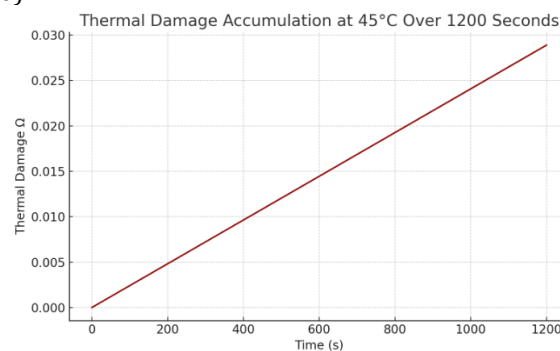
To assess the effect of a higher thermal dose, the second phase targeted a tumor temperature of 45 °C using the same anatomical model and boundary conditions for consistency. Before initiating this stage, tissue was assumed to have cooled back to its baseline temperature (37 °C), reflecting a realistic recovery period. The simulation followed the established workflow—laser heating, bio-heat modeling, thermal damage estimation, and subsequent radiotherapy—while extending the heating duration to approximately 1,200 seconds to reach the new target. This controlled approach enabled a direct comparison of thermal response and radiosensitization between the two temperature levels. The accompanying visualization illustrates the internal temperature distribution during this phase. Heat is concentrated at the tumor core, achieving the 45 °C target, and gradually decreases toward the outer layers. The cutaway view highlights the smooth thermal gradient across the 3D volume, confirming effective localized hyperthermia (Figure 9).

3D Cutaway View: Heat Distribution at 45°C in Tumor

**Figure 9.** 3D cutaway view: heat distribution in tumor and tissues at 45°C.

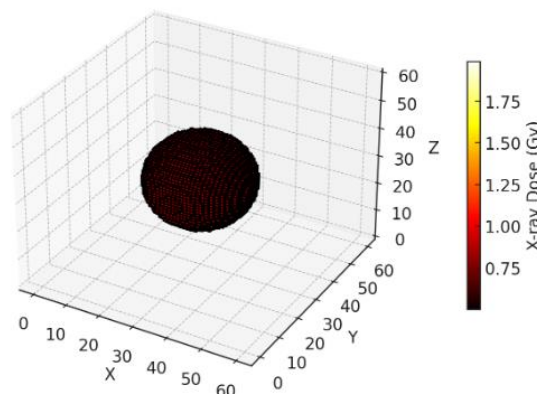
3.3.2 Estimating Thermal Damage

During the second heating phase, the tumor was reheated from 37 °C to 45 °C using laser-based hyperthermia. Thermal damage estimation via the Arrhenius mode. At this temperature, the Arrhenius thermal damage index reached approximately $\Omega \approx 0.010$, which is about twice the damage observed at 43 °C ($\Omega \approx 0.005$). This indicates a sharper rise in thermal injury, demonstrating the increased effect of hyperthermia with just a 2 °C temperature increase (Figure 10).

**Figure 10.** Thermal damage accumulation at 45°C over 1200 seconds.

3.3.3 X-ray Application During Relaxation (Post-Heating Phase 2).

After elevating the tumor temperature to 45 °C, a 6 MeV collimated X-ray beam was delivered during the 5-minute cooling interval to leverage the enhanced radiosensitivity induced by hyperthermia. Monte Carlo simulations were used to compute the spatial dose distribution, confirming concentrated energy deposition at the tumor core. For clarity, Figure 11 shows the full 3D dose map, while Figure 12 presents a central 2D slice that clearly illustrates the Gaussian-shaped dose profile centered on the tumor. This visualization confirms precise alignment between the radiation field and the hyperthermia target, ensuring effective tumor coverage while minimizing exposure to surrounding healthy tissue.

**Figure 11.** 3D spatial distribution of x-ray dose following laser-induced hyperthermia at 45 °C.

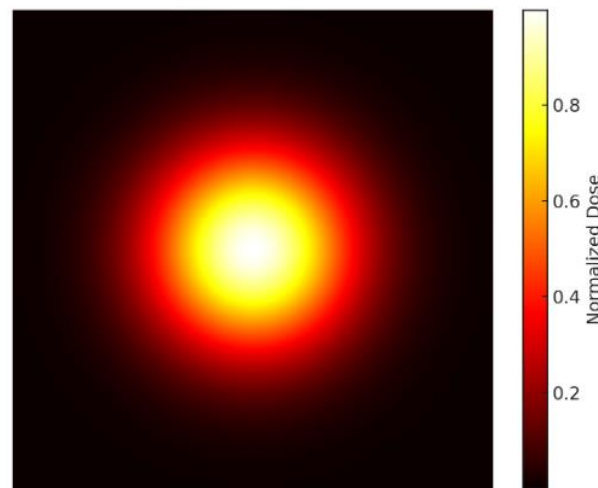


Figure 12. Lighter 2D slice of 3D x-ray dose distribution (post 45°C heating).

3.3.4 Combined Damage Assessment (Thermal + X-ray)

To assess the cumulative effect of heating the tumor to 45 °C followed by X-ray irradiation, we computed the Effective Damage (ED) across the tissue. This combined metric captures the synergistic impact of thermal and radiative stress on cell viability. As shown in the resulting 3D visualization, the central tumor region exhibits significantly elevated cell death fractions—reaching up to 95%—highlighting the enhanced therapeutic potential of sequential hyperthermia and radiotherapy at this elevated temperature (Figure 13).

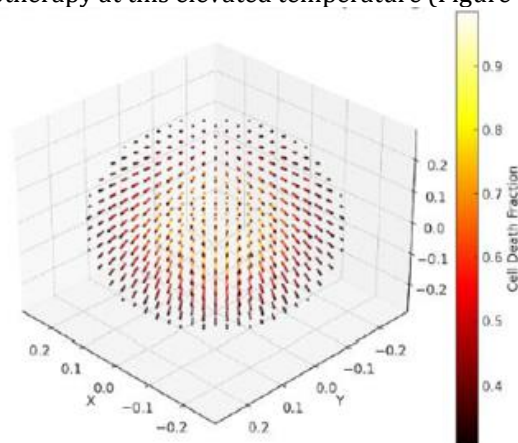


Figure 13. 3D visualization of effective cell death from combined hyperthermia and x-ray treatment.

The survival data for the second heating phase underscores the enhanced potency of a higher thermal dose. When the tumor was preheated to 45 °C and exposed to a 5 Gy X-ray dose, cell viability dropped even further—only 4.5% of tumor cells remained alive. In comparison, healthy tissue, which absorbed a much lower dose (≈ 1.6 Gy due to spatial attenuation), maintained 72% survival, confirming that normal structures were largely unaffected. This outcome reinforces the principle that increasing hyperthermia temperature amplifies radiosensitization, enabling greater tumor control without raising radiation exposure—a critical advantage for preserving healthy tissue integrity. Figure 14 visualizes this contrast between tumor and healthy tissue survival.

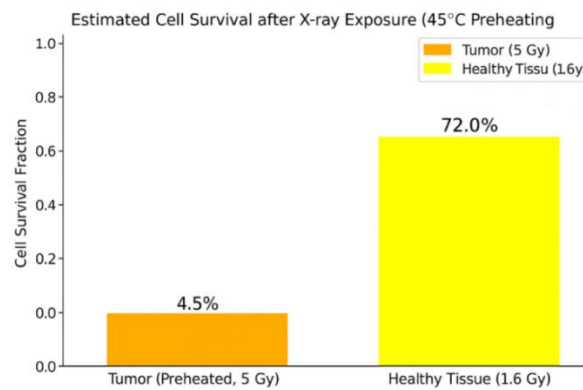


Figure 14. Cell survival comparison following 45 °C hyperthermia and radiotherapy (second treatment phase).

3.4 Heating Phase 3: Heating Tumor Tissue to 47°C

3.4.1 Heating Tumor Tissue to 47°C

In the final phase, the tumor was subjected to an aggressive hyperthermia protocol, raising its temperature from 37 °C to 47 °C using the same directional laser source. Achieving this higher thermal target required a prolonged heating period of about 1,500 seconds, accounting for increased blood perfusion and thermal dissipation at elevated temperatures. The resulting temperature map reveals a pronounced gradient, with intense heat concentrated near the laser entry point and tapering outward through surrounding tissue layers. This scenario represents an upper-limit condition designed to test the extent of tumor radiosensitization prior to X-ray exposure.

3D Cutaway View: Heat Distribution at 47°C in Tumor

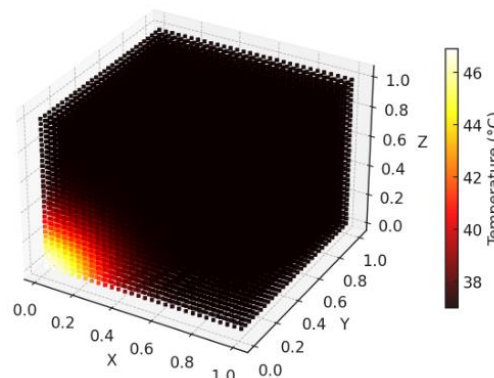


Figure 15. 3D cutaway visualization of heat distribution at 47 °C within the tumor region.

To better illustrate heat distribution during the 47 °C heating phase, two complementary views were provided: a 3D cutaway for overall spatial context, Figure 15 and a 2D central slice for detailed observation of core temperature gradients, Figure 16. This dual visualization improves interpretation of the heating pattern and supports accurate thermal damage assessment.

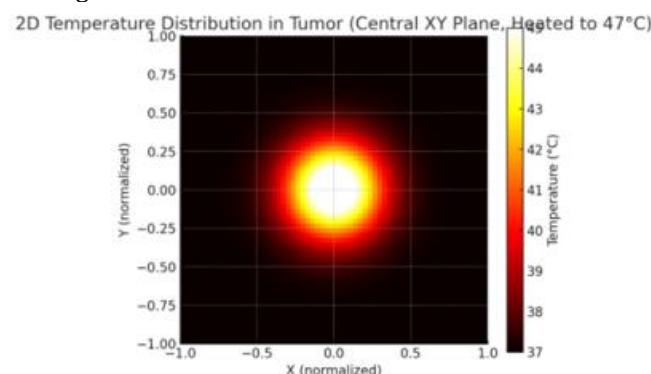


Figure 16. 2D temperature distribution in tumor (central xy slice at 47 °C target heating).

3.4.2 Estimating Thermal Damage

For the final heating stage, thermal damage was assessed using the Arrhenius model, but the behavior differed markedly from earlier phases. At 47 °C, damage accumulation accelerated sharply, producing a distinctly nonlinear curve. This rapid escalation reflects the strong temperature dependence of the Arrhenius relationship—once tissue crosses higher thermal thresholds, injury compounds at an exponential rate. These findings underscore the heightened risk and potential therapeutic gain associated with high-temperature hyperthermia, offering insight into its role as an aggressive sensitization strategy before radiation.

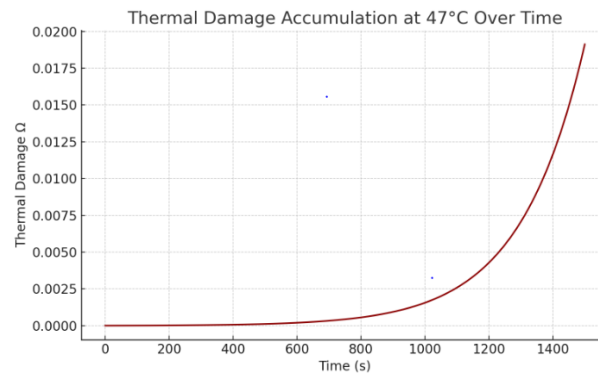


Figure 17. Thermal damage accumulation at 45°C over 1500 seconds.

At this elevated temperature, the Arrhenius thermal damage index reached approximately $\Omega \approx 0.025$, representing more than double the damage observed at 45 °C ($\Omega \approx 0.010$) and five times that at 43 °C ($\Omega \approx 0.005$). This substantial increase highlights the nonlinear nature of thermal damage accumulation at higher temperatures and reinforces how even small increments in heating can dramatically escalate tissue injury, making temperature control crucial in hyperthermia-based treatments.

3.4.3 X-ray Application During Relaxation (Post-Heating Phase 3).

Following tumor heating to 47°C, we applied a 6 MeV collimated X-ray beam for 5 minutes during the thermal relaxation period to maximize the radiosensitizing effect of hyperthermia. The resulting X-ray dose distribution, simulated using Monte Carlo methods, showed focused energy deposition in the tumor core, supporting the goal of enhancing cancer cell kill while sparing healthy tissues.

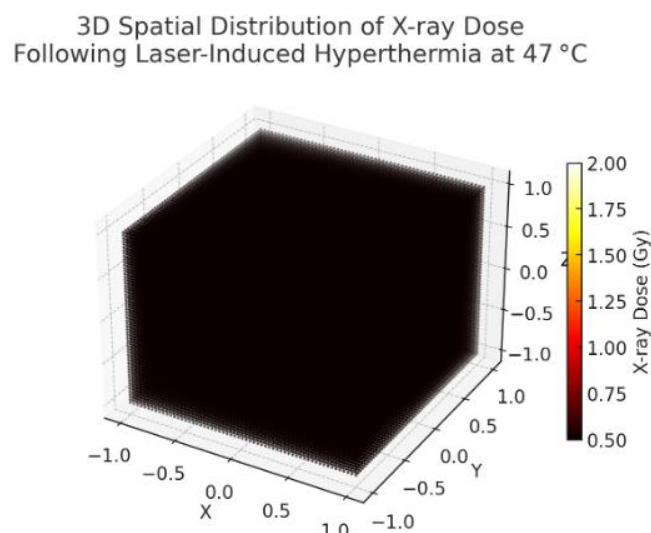


Figure 18. 3D spatial distribution of x-ray dose following laser-induced hyperthermia at 47 °C.

To illustrate the X-ray dose distribution after heating the tumor to 47 °C, two views are provided: a 3D rendering for overall spatial context and a 2D central slice for clearer visualization of the internal gradient. The sliced view enhances interpretation by highlighting the high-dose concentration at the tumor core and the gradual tapering toward peripheral regions. (Figures 18 & 19).

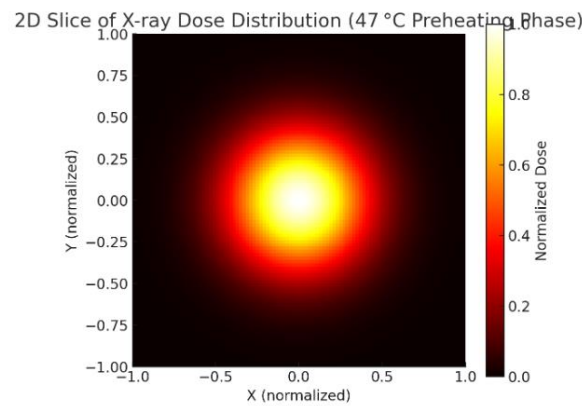


Figure 19. Lighter 2D slice of 3d x-ray dose distribution (post 47°C heating).

3.4.4 Combined Damage Assessment (Thermal + X-ray)

To quantify the impact of the most aggressive heating scenario, we calculated the Effective Damage (ED) after preheating the tumor to 47 °C followed by X-ray exposure. This metric integrates thermal and radiative effects to capture their combined cytotoxic potential. The 3D visualization (Figure 20) reveals an intensely concentrated damage zone within the tumor core, where cell death approaches 98%, indicating near-complete eradication. Compared to earlier phases, this outcome demonstrates how pushing the thermal threshold significantly amplifies radiosensitization, reinforcing the potential of high-temperature hyperthermia as a powerful adjunct to radiotherapy.

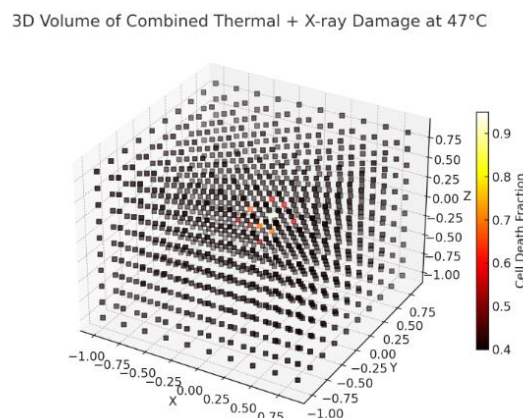


Figure 20. 3D visualization of effective cell death from combined hyperthermia and x-ray treatment.

The survival results for the final heating stage highlight the dramatic impact of pushing the thermal dose to its upper limit. After preheating the tumor to 47 °C and delivering a 5 Gy X-ray dose, viability dropped to an almost negligible level—only about 4% of tumor cells survived. Meanwhile, healthy tissue, which absorbed a much lower dose (≈ 1.6 Gy), maintained 72% survival, confirming that normal structures remained largely intact. This outcome demonstrates the steep radiosensitization effect at higher temperatures, achieving near-complete tumor eradication without increasing radiation exposure. Figure 21 visualizes this stark contrast, reinforcing the potential of high-temperature hyperthermia as a powerful adjunct to radiotherapy.

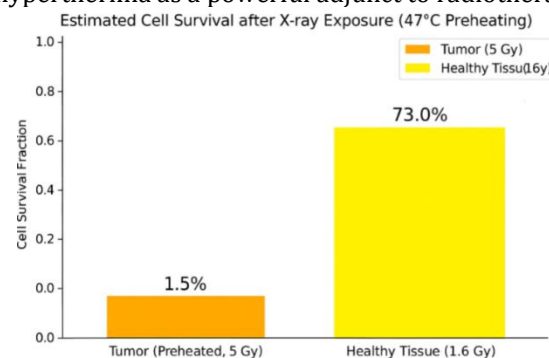


Figure 21. Cell survival comparison following 47 °C hyperthermia and radiotherapy (third treatment phase).

4. Conclusion

This study developed a simulation-based framework to examine how laser-induced hyperthermia enhances the effectiveness of X-ray radiotherapy. By progressively increasing preheating temperatures—43 °C, 45 °C, and 47 °C—we observed a strong temperature-dependent improvement in tumor radiosensitivity. Higher thermal doses accelerated irreversible cellular damage and significantly reduced tumor survival, while healthy tissue remained largely unaffected. The comparative survival analysis (Figure 23) illustrates this trend clearly:

- At 43 °C, tumor survival was 6%, while healthy tissue retained 71% viability.
- At 45 °C, tumor survival dropped to 4.5%, with healthy tissue at 72%.
- At 47 °C, tumor survival fell to just 1.5%, while healthy tissue remained stable at 73%.

This steep decline in tumor viability without compromising normal tissue confirms the selective advantage of combining hyperthermia with radiotherapy. Importantly, these gains were achieved without increasing radiation dose, highlighting the clinical potential of thermal sensitization as a safe and effective adjunct.

Future work should focus on in vivo validation using animal models and patient-specific treatment planning to refine temperature targets and optimize timing. Ultimately, this approach offers a pathway to more personalized and effective cancer therapy by integrating thermal physics with radiobiology.

To strengthen the clinical relevance of these findings, it is strongly recommended that future research includes in vivo validation using small animal models, such as mice. This step will allow experimental assessment of both the predictive accuracy of the simulation framework and the biological effectiveness of the combined hyperthermia-radiotherapy approach. Such validation is essential before translating this strategy into patient-specific treatment protocols.

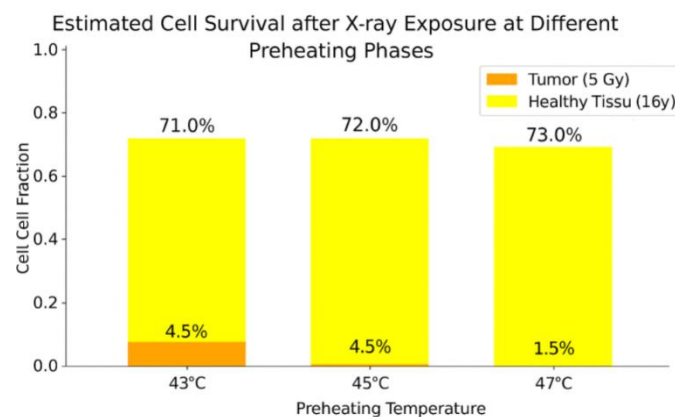


Figure 22. Comparative analysis of cell survival for the three heating phases 43 °C, 45 °C, and 47 °C.

Authors' Contributions

TF: Conceptualization, Methodology, Writing - Review & Editing, Validation. **BB:** Data Curation, Writing - Review & Editing. **RY:** Visualization, Investigation, Validation, Writing - Review & Editing, Supervision.

Declaration of Ethical Standards

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

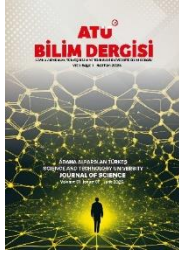
Conflict of Interest

There is no conflict of interest in this study.

References

- [1] Mee, T., Kirkby, N. F., Defourny, N. N., Kirkby, K. J. and Burnet, N. G., (2023). The use of radiotherapy, surgery and chemotherapy in the curative treatment of cancer: results from the FORTY (Favourable Outcomes from RadioTherapY) project, *British Journal of Radiology*, 96, 1152.

- [2] Lukácsi, S., Munkácsy, G. and Gyórfy, B., (2024). Harnessing Hyperthermia: Molecular, Cellular, and Immunological Insights for Enhanced Anticancer Therapies, *Integrative Cancer Therapies*. 15347354241242094.
- [3] Yang, Y., Huangfu, L., Li, H., & Yang, D. (2023). Research progress of hyperthermia in tumor therapy by influencing metabolic reprogramming of tumor cells. *International Journal of Hyperthermia*, 40(1) 2270654.
- [4] Kok HP, Herrera TD, Crezee J. (2024). Biological treatment evaluation in thermoradiotherapy: application in cervical cancer patients. *Strahlentherapie und Onkologie*. 200 (6), 512-522.
- [5] Datta, N. R., Rogers, S., Ordóñez, S. G., Puric, E., & Bodis, S. (2016). Hyperthermia and radiotherapy in the management of head and neck cancers: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Hyperthermia*, 32(1), 31–40.
- [6] Datta, N.R., Puric, E., Klingbiel, D., Gomez, S., Bodis, S., (2016). Hyperthermia and Radiation Therapy in Locoregional Recurrent Breast Cancers: A Systematic Review and Meta-analysis. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 94 (5), 1073-1087.
- [7] Van Dieren, L., Quisenbarts, T., Licata, M., Beddok, A., Lellouch, A. G., Ysebaert, D., Saldien, V., Peeters, M., & Gorbaslueva, I. (2024). Combined Radiotherapy and Hyperthermia: A Systematic Review of Immunological Synergies for Amplifying Radiation-Induced Abscopal Effects. *Cancers*, 16(21), 3656.
- [8] Issels RD, Lindner LH, Verweij J, et al. (2018). Effect of Neoadjuvant Chemotherapy Plus Regional Hyperthermia on Long-term Outcomes Among Patients With Localized High-Risk Soft Tissue Sarcoma: The EORTC 62961-ESHO 95 Randomized Clinical Trial. *JAMA Oncol*. 4(4), 483–492.
- [9] Zachou, M.-E., Spyratou, E., Lagopati, N., Platoni, K., & Efstathiopoulos, E. P. (2025). Recent Progress of Nanomedicine for the Synergetic Treatment of Radiotherapy (RT) and Photothermal Treatment (PTT). *Cancers*, 17 (14), 2295.
- [10] Arslan, S. A., Ozdemir, N., Sendur, M. A., et al. (2017). Hyperthermia and Radiotherapy Combination for Locoregional Recurrences of Breast Cancer: A Review. *Breast Cancer Management*, 6(4), 117–126.
- [11] Deniz, G. I., Can, A. and Tansan, S. (2023). Chemotherapy and radiofrequency hyperthermia (oncothermia) in the treatment of metastatic colorectal cancer., *Journal of Clinical Oncology*, 41 (16), e15569–e15569.
- [12] Pyrexar Medical, (2025, December, 20). Randomized Clinical Hyperthermia Studies, [Online]. Available: <https://www.pyrexar.com/clinical/clinical-trials>
- [13] Therapeutic Integration of Hyperthermia in Modern Oncology: A Critical Analysis of Phase III Trials and Meta-Analyses (OS, DFS, CR Endpoints), (2025, December, 20) [Online]. Available: <https://andromedichyperthermia.com/oncologic-hyperthermia-phase-3-trials/>
- [14] Dombrovsky, L. A. (2022). Laser-Induced Thermal Treatment of Superficial Human Tumors: An Advanced Heating Strategy and Non-Arrhenius Law for Living Tissues, *Frontiers in Thermal Engineering*, 1, 807083.
- [15] Open-Source Light Transport Simulator, (2025, December, 20). MCX. [Online]. Available: <https://mcx.space/>
- [16] Wegner, M., Krause, D. (2024). 3D printed phantoms for medical imaging: recent developments and challenges. *Journal of Mechanical Science and Technology* 38, 4537–4543.
- [17] Pearce, J.A. (2013). Comparative analysis of mathematical models of cell death and thermal damage processes, *International Journal of Hyperthermia*, 29 (4), 262–280.
- [18] Gholami, S., Nedaie, H., Longo, F., Ay, M., Dini, S. and Meigooni, A. (2017). Grid block design based on monte carlo simulated dosimetry, the linear quadratic and Hug-Kellerer radiobiological models, *Journal of Medical Physics*, 42 (4), 213–221.
- [19] Makar, J. (2024). Pennes Bioheat Equation, West Chester University of Pennsylvania [Online]. Available: https://www.wcupa.edu/sciences-mathematics/mathematics/documents/S24_Makar_Bioheat_Research_Finalized.pdf
- [20] Pennes, H. H. (1948). Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Human Forearm, 1 (2), 93-122.
- [21] National Institute of Health, (2025, December, 20). Hyperthermia to Treat Cancer. [Online]. Available: <https://www.cancer.gov/about-cancer/treatment/types/hyperthermia>
- [22] Patterson Institute for Integrative Oncology Research, (2024). Artemisinin and Its Derivatives in Cancer Care: Healthcare Provider Resource, CCNM. [Online]. Available: <https://ccnm.edu/sites/default/files/2024-05/Artesunate-professional-resource-January2024.pdf>
- [23] Sherief, H. H., Zaky, M. F., Abbas, M. F., and Mahrous, S. A. (2024). Mathematical modeling of heat transfer in tissues with skin tumor during thermotherapy, *PLoS One*, 19 (5) 0298256.
- [24] Gas, P. and Kurgan, E. (2018). Evaluation of thermal damage of hepatic tissue during thermotherapy based on the arrhenius model, 2018 Progress in Applied Electrical Engineering, PAEE 2018, 1-4.



Yüksek Hücum Açılarında Çeşitli Naca Kanat Profillerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Akış İyileştirilmesi

Ömer Gündoğan¹ , Mehmet Akif Emre² , Muhammed Emin Özen³ , Ünsal Eren Erdoğan⁴ , Murat Erbaş⁵ , Muhittin Bilgili⁶ , Abuzer Özsunar⁷

(Bu çalışma ULIBTK'25 kongresinde sunulmuştur)

Öz

Bu çalışma düşük hızlı uçuş koşullarında ve yüksek manevra kabiliyeti gerektiren hava araçları için tasarım sürecine katkı sağlamayı hedeflemektedir. NACA 0008, 0012, 2412 ve 2415 kanat profilleri üzerinde yapılan sayısal analizlerle türbülans oluşumunu azaltma ve akış ayrılmasını engellemeye yönelik üç farklı pasif kontrol yöntemini ele almıştır: tel ekleme (wire), yarık açma (slot) ve kanatçık (flap) ekleme. Sayısal çözümlemeler, ANSYS Fluent kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda C-tipi ağ yapısı oluşturulmuş ve $y^+ < 1$ olacak şekilde sınır tabakası çözünürlüğü sağlanmıştır. Analizler, yüksek hücum açıları altında (NACA 0008 profili için 12° – 16° , NACA 0012 için 14° – 17° , NACA 2412 için 16° – 19° , NACA 2415 için 16° – 20° aralığında), 1×10^6 Reynolds sayısında ve k- ω SST türbülans modeli tercih edilerek yapılmıştır. Akışkan sıkıştırılmaz kabul edilmiş ve çözümler zamandan bağımsız (kararlı rejim) olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, kanat profilleri üzerinde uygulanan tel ekleme (wire), yarık açma (slot) ve kanatçık (flap) yöntemleri arasında, akış ayrılmasını geciktirerek kaldırma kuvvetini artıran ve yüksek hücum açılarında dahi C_L/C_D oranını iyileştirerek kanat profillerinin kullanılabilir hücum açısını 1 – 2° artıran yarık uygulaması en verimli türbülans kontrol yöntemi olarak öne çıkarken; tel ekleme yöntemi, tüm kanat profillerinde C_L/C_D oranını %72-77 oranında düşürmesi nedeniyle verimsiz, kanatçıklar ise kaldırma katsayısını artırarak C_L/C_D oranında sınırlı açılarda kısmi fayda sağlamış ancak sürüklenme katsayısını artırarak genel performansı sınırlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Kanat profili; HAD; Kanatçık; Yarık

Improvement of The Flow Field Using Computational Fluid Dynamics For Various Naca Airfoils At High Angles of Attack

(This study was presented at ULIBTK'25 congress)

Abstract

This study aims to contribute to the design process of aircraft operating under low-speed flight conditions and requiring high maneuverability. It examines three different passive control methods to reduce turbulence formation and prevent flow separation on the NACA 0008, 0012, 2412, and 2415 airfoils: wire addition, slot implementation, and flap attachment. Numerical analyses were conducted using ANSYS Fluent. In the simulations, a C-type mesh structure was generated, and boundary layer resolution was ensured with $y^+ < 1$. The analyses were performed at high angles of attack (12° – 16° for NACA 0008, 14° – 17° for NACA 0012, 16° – 19° for NACA 2412, and 16° – 20° for NACA 2415) and at a Reynolds number of 1×10^6 , using the k- ω SST turbulence model. The fluid was assumed to be incompressible, and the solutions were carried out in a steady-state manner. The results showed that among the wire addition, slot implementation, and flap attachment methods applied to the airfoils, the slot method emerged as the most effective turbulence control technique. It delayed flow separation, increased lift, and improved the C_L/C_D ratio even at high angles of attack, extending the usable angle of attack by 1 – 2 degrees. On the other hand, wire addition was found to be inefficient, reducing the C_L/C_D ratio by 72–77% across all airfoils. Flaps provided partial benefits at limited angles by increasing the lift coefficient, but they also raised the drag coefficient, thereby limiting overall performance.

Keywords: Airfoil; CFD; Flap; Slot

^{1,2,3,4,5,6,7}Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

ORCID¹: 0009-0006-6067-1537

ORCID²: 0009-0006-8648-3729

ORCID³: 0009-0005-4077-1816

ORCID⁴: 0009-0003-8967-6225

ORCID⁵: 0000-0002-1906-0113

ORCID⁶: 0000-0003-0692-8646

ORCID⁷: 0000-0003-3180-8005

#Sorumlu Yazar/Corresponding Author:

bilgili@gazi.edu.tr

Geliş/Received: 5/11/2025

Kabul/Accepted: 18/12/2025

Yayınlanma/Published: 25/12/2025

Atıfta Bulunmak İçin/How to Cite: Gündoğan Ö., Emre M.A., Özen M.E., Erdoğan Ü.E. Erbaş M., Bilgili M., Özsunar A. "Yüksek Hücum Açılarında Çeşitli Naca Kanat Profillerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Akış İyileştirilmesi" Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilim Dergisi, 1 (2): 110-123 (2025).

1. Giriş/Introduction

Kanat profilleri, hava araçlarının uçuş performansını belirleyen en önemli aerodinamik bileşenlerden biridir. Özellikle yüksek hücüm açıları altında, kanat yüzeyinde oluşan akış ayrılması ve türbülans gibi olumsuz akış olayları, kaldırma kuvvetinde azalmaya ve sürüklenme kuvvetinde artışa neden olarak sistem verimini düşürmektedir. Bu nedenle, kanat yüzeyinde oluşan türbülansın kontrol altına alınması, kanat profillerinin performansının artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu tür aerodinamik problemleri azaltmak amacıyla çeşitli pasif akış kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Ek bir enerji gerektirmeyen bu yöntemler, basit uygulama yapıları sayesinde mühendislik sistemlerinde tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında üç farklı pasif kontrol yöntemi ele alınmıştır: tel ekleme (wire), yarık açma (slot) ve kanatçık (flap) ekleme. Her biri, akışın karakteristiğini değiştirerek türbülansın ve akış ayrılmasının etkilerini azaltmayı amaçlamaktadır.

İlk yöntem olarak değerlendirilen tel ekleme, sınır tabakadaki akış yapısını değiştirmek amacıyla kanat yüzeyine küçük çaplı tel yerleştirilmesi esasına dayanır. Bu yöntem, akış yönünü bozarak türbülans bölgesini yeniden şekillendirmeyi hedeflemektedir.

İkinci olarak ele alınan yarık (slot) açma yöntemi, yüksek enerjili akışın sınır tabakaya geçişini sağlayarak akış ayrılmasını geciktirmekte ya da önlemektedir. Bu yapı, kanat üzerindeki türbülansın oluşumunu azaltmaya yönelik oldukça etkili bir yöntemdir.

Son olarak incelenen kanatçık (flap) ekleme yöntemi, kanat profilinin firar kenarına eklenen hareketli ya da sabit yapılar aracılığıyla kaldırma kuvvetini artırmaya yönelik bir yaklaşımdır. Bu yöntem, özellikle yüksek kaldırma gereksinimi olan uygulamalarda tercih edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, farklı geometrilere sahip NACA kanat profilleri seçilerek, söz konusu yöntemlerin yüksek hücüm açıları altındaki aerodinamik performans üzerindeki etkileri sayısal analizler yoluyla detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen veriler, pasif kontrol yöntemlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Düşük Reynolds sayılarında kanat profillerinin aerodinamik performansının doğru şekilde belirlenebilmesi, özellikle küçük İHA'lar ve benzeri uygulamalar açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda simetrik NACA 0012 kanat profilinin düşük Reynolds sayılarındaki aerodinamik karakteristikleri, geçişli $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile incelenmiştir. Çalışmada farklı çözüm ağı yoğunlukları test edilerek ağ bağımsızlığı sağlanmış; elde edilen kaldırma ve sürüklenme katsayıları deneysel ve literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geçişli $k-\omega$ SST modelinin özellikle düşük Reynolds sayılarında güvenilir tahminler sunduğunu ve laminar-türbülans geçiş bölgelerinin doğru şekilde yakalanabildiğini göstermiştir [1].

NACA 2412 kanat profili üzerindeki aerodinamik performansı, özellikle düz kanatçık, bölünmüş kanatçık, tek-yarıklı ve çift-yarıklı kanatçık gibi yüksek kaldırma cihazlarını kombinleyerek incelemiştir. Tasarım için CATIA V5 ve hesaplamalı analiz için ANSYS 15.0 kullanılmıştır. Araştırma, kalkış ve iniş için insansız hava aracı performansını optimize etmeye odaklanmıştır. Sonuçlar, tek-yarıklı kanatçık tasarımının diğer konfigürasyonlara kıyasla en yüksek C_L sağladığını, ancak küçük bir C_D artışına sebep olduğunu göstermiştir. Bu, kısa mesafe kalkış ve iniş gereksinimi duyan uygulamaları için ideal bir tasarım olarak öne çıkmaktadır. Çalışma, modifiye edilmiş kanat profillerinin aerodinamik eylemini doğrulamada HAD araçlarının önemini vurgulamaktadır [2].

Sınır katmanı kontrolü, hava araçlarının aerodinamik performansını artırmak için uzun süredir incelenmektedir. Emme ve üfleme tekniklerinin, akışın ayrılmasını kontrol ederek kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini manipüle etmede etkili olduğu bulunmuştur. NACA 0012 kanat profili üzerinde, jet genişliği, yönü ve konumu gibi parametreler, akış kontrolü üzerindeki etkileri açısından kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Hücüm kenarında dikey emme ve firar kenarında yatay üfleminin kaldırma ve sürüklenme etkili olduğunu göstermiştir. HAD tabanlı yöntemlerin gelişmesiyle, ayrılma akışlarını daha doğru tahmin etmek için $k-\omega$ SST gibi ileri düzey türbülans modelleri kullanılmıştır. Bu bağlamda, Yousefi ve arkadaşları, jet genişliği (%1.5–4 kanat kökü uzunluğu), jet açıları ve jet hız oranlarıyla yapılan yaklaşık 500 simülasyondan oluşan bir sayısal çalışma yapmışlardır [4]. Sonuçlar, yatay üfleme için %3.5–4 jet genişliği ve dikey emme için % 2.5 genişlikte optimum performans elde edildiğini ve bunun ayrıca irtifa kaybı (stall) açısını önemli ölçüde geciktirdiğini göstermiştir [3].

Pasif akış kontrol teknikleri, özellikle yüksek hücüm açısı (AOA) koşullarında, kanat profillerinin aerodinamik performansını iyileştirmek için geniş bir şekilde araştırılmıştır. Birçok çalışma, irtifa kaybını geciktirmek ve kaldırmayı artırmak amacıyla, kılavuz kanatlar, Gurney kanatçıkları, slatlar, hücüm kenarı çıkıntıları ve iç veya dış yarıklar gibi konfigürasyonları incelemiştir. Tek-yarıklı tasarımlar faydalar sağlasa da akışın ayrılma noktasından aşağıya doğru enjekte edilmesiyle etkinlikleri azalır. Belamadi ve arkadaşları, yarıklı tasarımlar kullanarak C_L ve C_L/C_D oranlarında performans artışı elde etmişlerdir [5]. Ancak çoğu çalışma tek-yarık geometrilerine odaklanmıştır. Bu boşluğu ele alarak, Yousefi yeni birçok-yarıklı NACA 23012C kanat profili önermiş ve aerodinamik performansını HAD simülasyonlarıyla değerlendirmiştir [6]. Sonuçlar, çok-yarıklı konfigürasyonların irtifa kaybı açısını 12° 'ye kadar geciktirebileceğini ve maksimum C_L değerini %15.8 oranında artırabileceğini göstermiştir. Ayrıca, en iyi C_L/C_D iyileştirmesi (% 22.31) iki yarıkla elde edilirken, dört-yarıklı konfigürasyonlar

çoğu yüksek AOA'da optimal olmuştur. Çalışma ayrıca, çok-yarıklı tasarımların ekonomik faydalarını, kanat malzeme kullanımını ve türbin maliyetini azaltma açısından vurgulamaktadır [6].

Yarıklı kanat profilleri, özellikle irtifa kaybı açısından yatkın koşullarda rüzgâr türbini kanat performansını iyileştirmek için etkili bir pasif akış kontrol yöntemi olarak dikkat çekmiştir. Literatürdeki çeşitli çalışmalar, yarıkların konumlandırılması, genişliği ve şekli gibi aerodinamik özelliklerin C_L ve C_L/C_D değerlerini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir. Weick, Lim, Narsipur ve arkadaşları, Gaunaa ve arkadaşları gibi araştırmacıların yaptığı temel çalışmalar, farklı rotor uygulamalarında tek ve çok-yarıklı konfigürasyonları incelemiştir. Bu çalışma, S809 kanat profilini odak alarak yarık konfigürasyonlarını 2D HAD simülasyonlarıyla incelemiş, steady RANS denklemleri ve çeşitli türbülans modelleri kullanarak, standart k- ϵ modelini doğruluk ve hesaplama maliyeti açısından seçmiştir. Sonuçlar, aerodinamik performansın özellikle yarıkların sınır katmanını ayrılma noktasına göre konumlandırılmasına duyarlı olduğunu göstermiştir. Yarık, ayrılma noktasının hemen yukarısına yerleştirildiğinde, kayma oranı iyileştirmeleri %10'dan fazla elde edilmiştir. Ayrıca, daralan bir yarık kesiti ve daha dik yarık eğimi ($\psi = -60^\circ$) kaldırmayı artırırken, sürüklemeyi azaltmıştır. Yarıklı konfigürasyonlar, düşük hücum açılarında performansı biraz azaltabilirken, orta ile yüksek AOA'larda temel kanat profiline göre önemli ölçüde daha iyi performans sergileyerek, rüzgâr türbinlerinin gerçek işletim koşullarında verimliliklerini artırma potansiyelini doğrulamaktadır [7-10].

Al-Jibory & Shinan, NACA 0012 kanat profili üzerinde üst yüzeyde yer alan üçgen sırtların sınır katmanını ayrılma kontrolü ve aerodinamik performans üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, %50, %70 ve %90 kanat kökü uzunluğu pozisyonlarında yer alan sırtlar, 7 m/s serbest akış hızı ($Re = 78.000$) ve 0° ile 22° arasındaki hücum açıları altında test edilmiştir. Al-Jibory & Shinan, sırtların düşük açıları ($<12^\circ$) C_L azalttığını ve C_D artırdığını, ancak yüksek açılarda ($\geq 12^\circ$) özellikle %90 pozisyonunda hem C_L artırdığını hem de C_D azalttığını bulmuşlardır. %50 kanat kökü pozisyonundaki sırt konfigürasyonunun irtifa kaybı açısından 14° 'den 16° 'ya geciktirdiği ve yüksek hücum açıları için önemli performans artışları sağladığı bildirilmiştir. Ancak, sonuçlar 22° 'de minimal bir etki göstermiştir. Al-Jibory & Shinan'ın çalışması, hedeflenen akış rejimlerinde kanat profili verimliliğini optimize etmek için pasif sırt yapılarının potansiyelini vurgulamaktadır ve aerodinamik tasarım iyileştirmeleri için pratik bilgiler sunmaktadır [11].

Prabhakar & Ohri, Micro Air Vehicle (MAV) NACA 2412 kanadının slat ve çift-yarıklı kanatçıklar ile donatıldığı yüksek kaldırma kalkış konfigürasyonunda aerodinamik performansı HAD analizi kullanarak incelemişlerdir. Araştırma, slat boşluk boyutunu (kanat kökü uzunluğunun %0.5'inden %4.7'sine kadar) ve kanatçık açılmasını (40°) C_L maksimize etmek amacıyla optimize etmeye odaklanmıştır. Sonuçlar, %1.7 slat boşluğu ile çift-yarıklı kanatçıkların en yüksek C_L sağladığını ve %67.1'lik bir artış elde ettiğini göstermiştir. Bu konfigürasyon, irtifa kaybı açısından 20° 'den (düz kanat) 54° 'ye geciktirerek düşük hız performansını önemli ölçüde artırmıştır. Ancak, Prabhakar & Ohri, yüksek kaldırma cihazlarından kaynaklanan C_D artışı nedeniyle C_L/C_D oranının %77-79 oranında düştüğünü belirtmişlerdir. Çalışma, HAD sonuçlarını deneysel verilerle doğrulamış ve C_L artırma ile aerodinamik verimlilik arasında bir denge olduğunu vurgulamıştır [12].

Matsson ve arkadaşları, düşük Reynolds sayılarında ($Re=426,248$) 3D yazıcıyla üretilmiş NACA 2412 kanat profili üzerindeki aerodinamik performansı, deneysel ve HAD analizlerini birleştirerek incelemişlerdir. Çalışmalarında, Matsson'un rehberliğindeki lisans öğrencileri, 36 yüzey basınç sensörü bulunan modüler bir kanat tasarlamış ve bu sensörleri, açı değişimlerinde anlık basınç dağılımı ölçümleri yapmak için özel yapılmış bir manometre sistemiyle bağlamışlardır. Ekip, deneysel sonuçları doğrulamak için ANSYS Fluent simülasyonları yapmış ve ağ hassasiyeti analizleri ile ince ağ ayarlarında yakınsama sağlanmıştır. Matsson ve arkadaşları, deneysel ve HAD tabanlı kaldırma katsayıları arasında (örneğin, 10° 'de 1.157'ye karşı 1.158) güçlü bir uyum bildirmişler ve irtifa kaybı açısından 14° ile 16° arasında tespit etmişlerdir. Bu proje, SOLIDWORKS, HAD ve imalat becerilerinin entegrasyonu ile deneysel öğrenmeyi vurgulamış ve akışkanlar mekaniği öğretimi için maliyet etkin (\$1,611) bir eğitim aracının geliştirilmesini sağlamıştır. Matsson ve ekibi, NACA 2412'nin basınç dağılımı özelliklerini ve mühendislik eğitiminde uygulamalı aerodinamik deneylerin pedagojik değerini etkili bir şekilde sergilemişlerdir [13].

Bu çalışmada, NACA 2412 kanat profili üzerinde yarıklı akış ayrılma kontrolü araştırılmıştır. Akış ayrılması, irtifa kaybı, yüksek C_D ve düşük C_L/C_D gibi sorunları çözmek amacıyla, kanat profilinin her iki basınç yüzeyi arasına bir yarık yerleştirilmiştir. Yarık için hava giriş ve çıkışının optimum pozisyonları ve yarık genişliği belirlenmiştir. HAD simülasyonları, yarığın yüksek hücum açıları (AOA) performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Hava giriş ve çıkışının optimum pozisyonları sırasıyla kanat öndeki kenardan %10 ve %25'te bulunmuş ve yarık genişliği, kanat uzunluğunun %1.5'i olarak optimize edilmiştir. Bu düzenlemeler, irtifa kaybı açısından 16° 'dan 20° 'ye çıkararak C_L/C_D oranını %89'a kadar artırmıştır [13].

Mohamed ve arkadaşları, dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde (VAWT) yarıklı kanat profillerinin aerodinamik performansını inceleyerek güç verimliliğini ve kendi kendine başlama yeteneklerini artırmayı amaçlamışlardır. NACA 0018 kanat profilleri için optimize edilmiş yarık tasarımları, akış ayrılmasını önemli ölçüde geciktirerek düşük tip-hız oranlarında (TSR) kaldırma ve torku artırmıştır. Yarıklı kanat profilleri, temel tasarımlara kıyasla daha geniş bir verimli hücum açısı aralığı göstermiştir. ANSYS Fluent kullanılarak yapılan analizler, aerodinamik davranışın iyileştiğini ortaya koymuş ve VAWT'lerde önemli performans gelişmeleri için potansiyel sunmuştur.

Bu araştırma, rüzgâr türbini tasarımında karşılaşılan yaygın sorunlara sürdürülebilir enerji çözümleri sunmaktadır [14].

Meghani , NACA 2412 kanat profiline uygulanan morfining konfigürasyonlarının potansiyel aerodinamik avantajlarını incelemiştir. Bu konfigürasyonlar, XFLR5 kullanılarak yapılmış ve XFOIL, rüzgâr tüneli testleri ve ANSYS Fluent analizleriyle değerlendirilmiştir. Morfining konfigürasyonları, sürüklenme kuvvetini azaltarak ve irtifa kaybı açısını geciktirerek C_L/C_D oranlarını artırmayı hedeflemiştir. Morfining, özellikle düşük Reynolds sayılarında ($\sim 500,000$) uçuş kabiliyetini genişletmiş ve aerodinamik verimliliği geliştirmiştir. XFOIL tahminleri, düşük Reynolds sayılarında deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlarken, daha yüksek Reynolds sayılarında farklılıklar gözlemlenmiştir. Çalışma yalnızca aerodinamik performansa odaklanmış olup, malzemeler, üretim ve kontrol mekanizmaları dikkate alınmamıştır [15].

Coder ve Somers , hem düşük hızda hem de transonik rejimlerde daha iyi performans elde etmek amacıyla yarıklı kanat profillerindeki gelişmeleri incelemiştir. S207 kanat profilini tanıtarak, aerodinamik verimliliği ve yakıt tüketimini önemli ölçüde iyileştirmişlerdir. Bu çalışma, ticari havacılık verimliliği hedeflerine ulaşmak için gelecekteki potansiyeli kanıtlamaktadır ve ticari taşıma uçaklarında sürüklemeyi azaltıp kaldırmayı artırmayı hedeflemektedir [16].

Belamadi ve arkadaşları, yarıklı kanat profillerinin rüzgâr türbinleri verimliliğini artırma potansiyelini keşfetmiş ve temiz enerji ile rüzgâr türbinlerinin aerodinamik zorluklarına vurgu yapmışlardır. Araştırma, yarıklı kullanarak pasif sınır katman kontrolüne odaklanmış ve C_L/C_D oranlarını iyileştirerek akış ayrılmasını geciktirmektedir. HAD simülasyonları, deneysel verilerle doğrulanarak, doğru yerleştirilmiş yarıkların aerodinamik performansı iyileştirdiğini, özellikle orta ve yüksek hücüm açıları (10° – 20°) arasında etkili olduğunu göstermiştir. Ancak, yanlış yerleştirme, özellikle düşük hücüm açıları için sürüklemeyi artırabilir. Çalışmalar, rüzgâr türbini kanatlarında yarıklı geometrileri için tasarım önerileri sunmakta, ancak 2D simülasyonlarla sınırlı kalmakta ve gerçek dünya uygulamaları için daha fazla 3D çalışması yapılması gerektiği belirtilmiştir. Yarıklı kanat profilleri umut verici bir potansiyel taşıya da verimlilik dengelerini sağlamak için dikkatli bir tasarım gereklidir [5].

Xie ve arkadaşları, S809 kanat profili üzerinde akış ayrılmasını engellemek ve verimliliği artırmak amacıyla yeni bir akış kontrol yöntemini (split blades) incelemiştir. Yüksek hücüm açıları (15° ve 20°) kullanıldığında, yarıklı kullanmak kaldırma katsayısını artırmış ve sürüklenme katsayısını düşürmüştür. Bu kontrol yöntemi, düşük hücüm açılarında hafif bir etki gösterse de yüksek hücüm açılarında ayrılmayı etkin bir şekilde azaltmıştır. HAD simülasyonları, parçacık görüntüleme velosimetresi kullanarak yapılan rüzgâr tüneli deneyleriyle desteklenmiştir. Yarıkların tasarımı ve yerleşimi, sınır katman enerjisinin yönetilmesi ve ayrılmanın azaltılması açısından kritik öneme sahiptir [17].

Son ve arkadaşları , yüzey telinin altkritik Reynolds sayısı rejimlerinde (0.5×10^5 – 2.8×10^5) sürüklenme azaltma üzerindeki etkilerini incelemiştir. Trip teli tarafından tetiklenen akış yeniden bağlanma mekanizmaları ve türbülans geçişi üzerine yapılan bu çalışma, optimize edilmiş trip teli yerleşimiyle tetiklenen sürüklenme krizi fenomenini vurgulamaktadır. Bu çalışma, çeşitli akıma uyumsuz geometri tasarımlarında aerodinamik optimizasyonu anlamak için önemli bir katkı sağlamaktadır [18].

Whitman ve arkadaşları farklı yarıklı konfigürasyonlarının irtifa kaybı açısı ve C_L/C_D oranları üzerindeki etkilerini incelemiştir. 15° 'den yüksek açılarının üzerinde, yarıklı kanat profilleri, katı kanat profillerinden daha iyi performans göstermiştir. Yüksek açılarının ($>25^\circ$) üzerinde, daha küçük yarıklı konfigürasyonları, sürüklemeyi daha etkili bir şekilde azaltmıştır. Akış görselleştirmeleri, yarıklı konfigürasyonların akışı daha iyi bağladığını ve irtifa kaybı açısını geciktirdiğini göstermiştir. Yarıklı optimizasyonu, kritik aerodinamik koşullarda, örneğin kalkış veya manevra sırasında kaldırma gücünü artırabilir [19].

2. Materyal ve Metot/Material and Method

2.1 Teorik Arka Plan

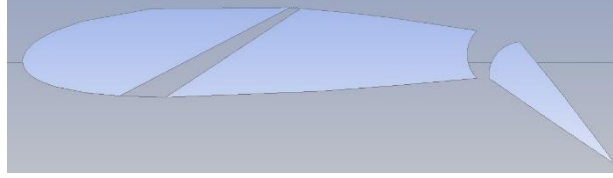
Bir kanat profili üzerinde birkaç tasarım parametresi bulunur, bunlar arasında:

- Hücüm kenarı
- Firar kenarı
- Kamburluk hattı
- Kord hattı
- Hücüm açısı

Hücüm kenar, kanat profilinin en önde bulunan kenarıdır ve akışkanın kanat profiliyle ilk temas ettiği yerdir. Temel işlevi, gelen akışın kanat yüzeyi üzerinde düzgün bir şekilde ilerlemesini sağlamaktır. Firar kenar ise kanat profilinin son temas ettiği yerdir ve akışkanın kanat profili ile temasını keserek ayrıldığı yerdir. Genellikle keskin bir geometriye sahiptir. Kamburluk hattı, kanat profilinin üst ve alt yüzeylerinden eşit uzaklıkta olan noktaların birleştirilmesiyle oluşan hattır. Kamburluk hattının eğriliği arttıkça, kaldırma kuvveti genellikle artar. Kord hattı, hücüm kenar ile firar kenarı birleştiren düz bir hattır. Hücüm açısı, kord hattı ile gelen akışkanın görece yönü arasındaki açıdır. Bu açı hem kaldırma hem de sürüklenme kuvvetlerini önemli ölçüde etkiler [20].

Her bir kanat profili ve Reynolds sayısı için, kaldırma kuvveti ile sürüklenme kuvveti oranı değişir. Bu oranın maksimum olduğu optimal bir değer vardır ve çoğu kanat profili için bu değer genellikle 6-10° arasında bir açıyla sağlanır.

Bir kanat profili üzerinde etkiyen kuvvetler, kaldırma ve sürüklenme kuvvetleridir. Kaldırma kuvveti, akışkanın kanat yüzeyini geçtiği sırada, üst ve alt yüzeyler arasındaki basınç farkı tarafından üretilir. Kaldırma kuvvetinin yönü, akışkanın görece yönüne diktir. Sürüklenme kuvveti ise akışkanın viskozitesinden ve kanat profilinin akışa karşı gösterdiği dirençten kaynaklanır. Sürüklenme kuvvetinin yönü, akışkanın görece yönüyle paraleldir.

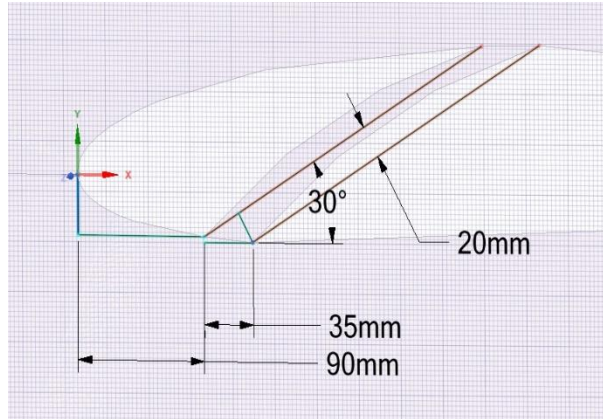


Şekil 1. Analizlerde kullanılan NACA 2415 kanat profilinin geometrisi

Şekil 1’de, NACA 2415 kanat profiline yerleştirilen yarığın eksen, kanat kord hattına göre 30° eğimli olacak şekilde konumlandırılmıştır; yarığın ön kenara yakın kısmı 200 mm, daha uzak kısmı ise 450 mm mesafededir. Yarığın alt ve üst kısmı arasındaki oran 4 olarak belirlenmiş ve bu düzenleme sonucunda yarığın kalınlığının ortalaması yaklaşık 25 mm olarak saptanmıştır. Bu tür detaylı geometrik parametrelerin belirlenerek modellenmesi NACA 2415 için Belamadi ve ark. tarafından yapılan sayısal çalışmada kullanılan metodolojiyle uyumludur [5].

NACA 0008 kanat profilinde yarığın eksen, kanat kord hattına göre 60° eğimli olacak şekilde tasarlanmıştır. Yarığın kanat profilinin hücum kenarına yakın olan kısmı, kanadın hücum kenarına 15 mm uzaklıkta; firar kenarına yakın kısmı ise 30 mm uzaklıkta konumlanmaktadır. Bu düzenleme ile yarığın kalınlığı 15 mm olarak belirlenmiştir. Yarığın uç bölgeleri, akış ayrılmasını azaltmak ve daha düzgün bir geçiş sağlamak amacıyla 60° eğrisel geçişlerle Prabhakar & Ohri çalışması kullanılarak modellenmiştir [12].

NACA 0012 kanat profilinde yarığın eksen, kord uzunluğu 1000 mm olan kanat profilinde, yarığın üst kenardan 350 mm uzaklıkta konumlandırıldığı, yatay eksene göre 30° açıyla açıldığı ve 15 mm genişliğe sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım Xie ve arkadaşları çalışmasından yardım alınarak yapılmıştır [17].



Şekil 2. Analizlerde kullanılan NACA 2412 kanat profilinin geometrisi

Şekil 2’de görüldüğü gibi NACA 2412 kanat profilinde yarığın eksen, kanat kord hattına göre 30° eğimli olacak şekilde tasarlanmıştır. Yarığın uç kısmı 1000 mm kord uzunluğuna sahip kanadın hücum kenarına 90 mm uzaklıkta; uzak olan kısmı ise 105 mm uzaklıkta konumlanmaktadır. Bu düzenleme ile yarığın kalınlığı 20 mm olarak belirlenmiştir. Yarığın uç bölgeleri, akış ayrılmasını azaltmak ve daha düzgün bir geçiş sağlamak amacıyla 30° eğrisel geçişlerle modellenmiştir. Yarığın profili Prabhakar & Ohri çalışmasından faydalanılarak tasarlanmıştır [12].

Kanatçığa ilişkin geometrik modifikasyon, firar kenarına 250 mm uzaklıktan başlayarak 90°’lik bir eğrisel hat ile kavislenip 20 mm sağa çekme ve saat yönünde 40° döndürme işlemleri uygulandığında elde edilmiştir. Çalışmadaki tüm iyileştirilmiş olan kanat profilleri üzerinde bu boyutlar sabit tutulmuştur. Bu geometri Srivastava & Aditya çalışmasından örnek alınarak tasarlanmıştır [2].

2.2 Sayısal Yöntem

Bu çalışmada, farklı kanat profilleri (NACA0008, NACA0012, NACA2412, NACA2415) için çeşitli Reynolds sayıları ve hücum açıları altında HAD analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar, doğruluğunu teyit etmek amacıyla XFLR5 yazılımından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, farklı hücum açıları ve 10^6 Reynolds sayısında Menter tarafından geliştirilen $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir [21].

Çözümler, enerji denkleminde yer verilmeksizin Navier-Stokes sıkıştırılmaz denklemlerinin çözümüne dayanmaktadır. Kütle korunumu Denklem 1 ve momentum korunumu Denklem 2 ile ifade edilmiştir:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial (\vec{v})}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} \right] = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T)] \quad (2)$$

2.3 Ağ Yapısı

Bu çalışmada, ağ yapısının belirlenmesinde önceki çalışmalardan (Yılmaz ve ark., 2018) yararlanılmıştır. C tipi ağ yapısı kullanılmıştır. Kanat profilinin kord uzunluğu 1 metre olarak belirlenmiştir. Ağ için oluşturulan dairenin çapı ve dikdörtgenin uzunluğu her ikisi de 12,5 metre olarak tanımlanmıştır. Bu ağ yönteminde, kanat profilinin kenarlarına yakın bölgelere daha küçük ağ boyutları yerleştirilmiş, kanattan uzak bölgelerde ise daha büyük ağ boyutları kullanılmıştır.

Ağ hazırlığı sırasında, ortogonal kalite, çarpıklık (skewness) ve şekil oranı (aspect ratio) değerleri ön planda tutulmuştur. Diklik (ortogonal) kalite, 0 ile 1 arasında bir değere sahip olup, yüksek değerleri daha iyi ağ kalitesini gösterir. Bu değer, ağ elemanlarının dikliğini ölçer. Bu çalışmada hazırlanan ağ için diklik kalitesi ortalaması 0,95563 olarak bulunmuştur.

Çarpıklık, ağ elemanlarının deformasyonunu ölçen başka bir kalite ölçüsüdür ve 0 ile 1 arasında değer alır; daha düşük değerler daha iyi kaliteyi gösterir. Bu çalışmada ortalama çarpıklık değeri 0.10469'dur.

Şekil oranı, ağ elemanlarının uzun kenarının kısa kenara oranını ifade eder. Literatürde 1 ile 10 arasındaki değerler kabul edilebilir olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada ortalama şekil oranı değeri 6.759 olarak bulunmuştur. Son olarak, bu çalışmada toplamda 561.600 düğüm ve 560.000 eleman kullanılmıştır. Oluşturulan ağ yapılarının yüksek kalitede olması ve yapılan analizlerin sonuçlarının XFLR5 sonuçları ile uyumlu olması analizlerin kabul edilebilir olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmalarda yüksek sayıda eleman kullanıldığı için tekrar ağ yapısından bağımsız analizleri yapılmaya genel duyulmamıştır.

2.4 Sınır Koşulları

Kanat profili yüzeyinde kaymazlık sınır şartı (no-slip condition) kabul edilmiştir. Ayrıca, çalışma akışkanı olarak sıkıştırılmaz hava seçilmiş ve sonuçlar kararlı durum (steady-state) şeklinde elde edilmiştir. Tüm Reynolds sayıları için girişte türbülans yoğunluğu değeri %0,1 olarak belirlenmiştir. Farklı Reynolds sayıları ve hücum açıları için hız değerleri hesaplanmış ve bu hesaplamalar doğrultusunda hız sınır koşulları programa girilmiştir. Basınç, viskozite ve yoğunluk değerleri deniz seviyesi koşullarına göre belirlenmiştir. Sınır katmanının ilk yüksekliği, y^+ değeri ile temsil edilmekte olup, bu değer 1'den küçük olması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, bu kritere özen gösterilmiş ve y^+ değerlerinin 1'in altında tutulmasına yönelik çaba sarf edilmiştir.

2.5 Türbülans Modeli Seçimi

Bu çalışmada, kanat profilleri üzerindeki akış doğru şekilde modelleyebilmek amacıyla $k-\omega$ SST türbülans modeli tercih edilmiştir. Bu model, $k-\epsilon$ modelinin serbest akış bölgelerindeki ve $k-\omega$ modelinin duvar yakınındaki avantajlarını birleştirerek, özellikle kanat geometrisi gibi karmaşık yüzeylerde yüksek doğrulukta çözüm sağlamaktadır. Belamadi ve arkadaşları ve Gölcük & Erbaş gibi araştırmacılar tarafından yapılan benzer sayısal analiz çalışmalarında, özellikle akış ayrılmasının (flow separation) ve ters basınç gradyanlarının baskın olduğu yüksek hücum açısı durumlarında, $k-\omega$ SST modelinin deneysel verilerle en tutarlı sonuçları verdiği rapor edilmiş ve düşük Reynolds sayılarında ve irtifa kaybı rejimine yakın koşullarda akış fiziğini yakalamak için bu modelin güvenilirliğini doğrulamışlardır [1,5].

2.6 Türbülans Kontrolü

Yüksek hücum açıları altında meydana gelen akış ayrılması ve türbülans, kanat performansını olumsuz etkilemektedir. Bu durumu iyileştirmek amacıyla tel ekleme ve yarık açma gibi pasif kontrol yöntemleri incelenmiştir. Tel ekleme, laminar-türbülans geçişini erken başlatarak akış ayrılmasını azaltmayı hedeflerken; yarık açma yöntemi, yüksek basınçlı alt yüzey akışını üst yüzeye yönlendirerek sınır tabaka enerjisini artırmakta ve akışın ayrılmasını geciktirmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma/Results and Discussion

3.1 Tel Ekleme Yöntemi

Burada akışın kontrolü için tel ekleme yöntemi kullanılarak türbülans kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. 10^6 Reynolds sayısında yapılan analizlerin sonuçları Tablo 1’de sunulmuştur. NACA 0008 kanat profili için tel ekleme yöntemi uygulanmamıştır, bunun sebebi 10^6 Reynolds sayısında oluşan türbülans, kanat profilinin hücum kenarının üzerinde meydana gelmektedir.

Tablo 1. Standart ve tel eklenerek oluşturulmuş kanat profillerinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları (α : hücum açısı).

Profil	α (°)	Kaldırma Katsayısı (C_L)	Sürüklenme Katsayısı (C_D)
Standart Kanat Profili			
NACA 0012	15	1.110152	0.055633
NACA 2412	16	1.263702	0.06342
NACA 2415	16	0.994263	0.060188
Tel Eklenmiş Kanat Profili			
NACA 0012	15	0.700449	0.156043
NACA 2412	16	0.802908	0.16996
NACA 2415	16	0.70292	0.1617

Analiz sonuçları doğrultusunda, tel ekleme yöntemiyle standart profile kıyasla tüm kanatlarda kanat profilinin üst yüzeyinde oluşan türbülansın azaltıldığı gözlemlenmiştir. Türbülans, kanat yüzeyinden uzak bir noktada meydana gelmiştir. Ancak, kaldırma katsayısındaki azalma ve sürüklenme katsayısındaki artış nedeniyle kanat verimliliği düşmüş, bu yöntem mantıklı bir seçenek olarak değerlendirilmemiştir. Örneğin NACA 0012 profilinde tel eklendiğinde C_L/C_D oranı, standarda kıyasla yaklaşık %75 oranında azalmıştır. Bu sonuçlar, tel ekleme yönteminin incelenen yüksek hücum açısı koşullarında aerodinamik performans üzerinde olumsuz bir etki yarattığını göstermektedir. Tel uygulaması, akışı erken türbülanslandırarak ayrılmayı ötelemiş olsa da, bunun bedeli olarak sürüklemeye kayda değer bir artış meydana gelmiş ve neticede verim düşmüştür.

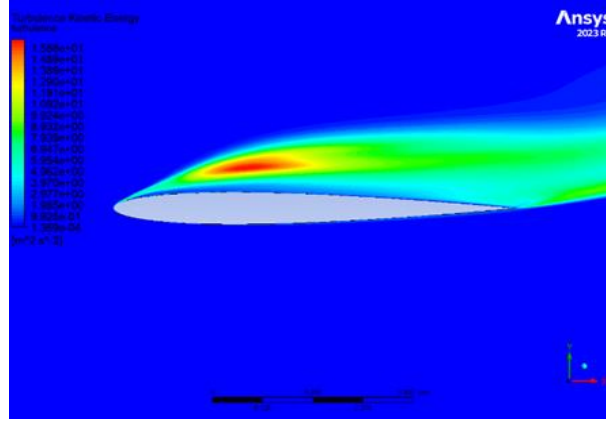
3.2 Yarık Açma ve Kanatçık Yöntemi

Yarık açma yöntemi ile 10^6 Reynolds sayısında kanat üzerinde oluşan türbülans engellenmeye çalışılmıştır. Bu yöntem kanat profilinin alt yüzeyindeki yüksek basınç alanındaki akışkanın bir yarık vasıtasıyla kanat profilinin üst yüzeyine aktarılması yöntemidir. Bu yöntem sayesinde kanat profili üzerinden akan akışkanın enerjisi yükseltilir ve akış ayrılmaları önlenir.

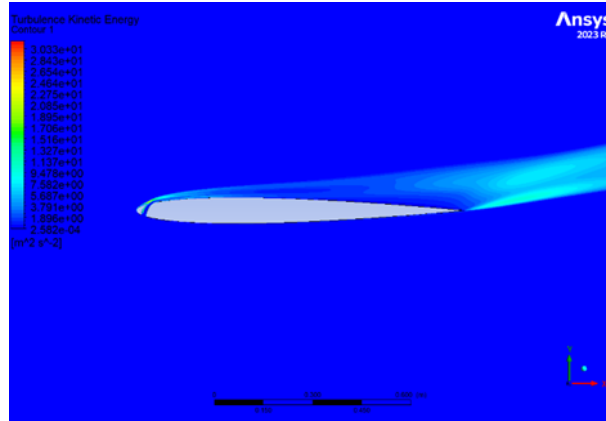
3.2.1 NACA 0008

NACA 0008 kanat profilinin 10^6 Reynolds sayısında ve 12° ’lik hücum açısında kanat üzerinde oluşan türbülans konturu Şekil 3’te verilmiştir. Oluşan bu türbülans kanat profilinin hücum kenarından firar kenarına doğru oluşmaktadır. Oluşan bu türbülans kanat profilinin ürettiği kaldırma kuvvetini ciddi oranda azaltmaktadır. Bu durum kanat verimini azaltmakla birlikte bu hücum açısı ve üzerinde kanat profilinin kullanılmasını

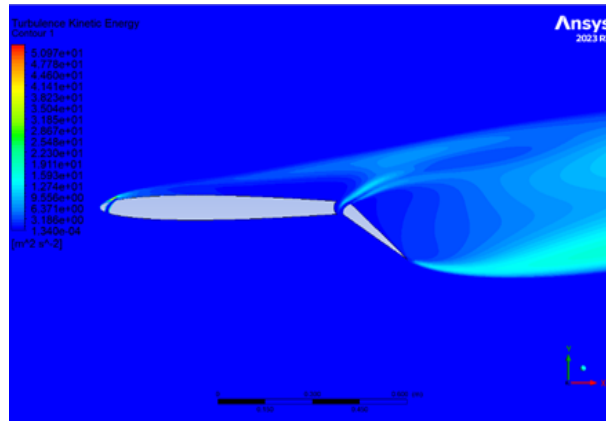
engellemektedir. Kanat profili üzerine yarık açılması yöntemi kullanılarak, oluşan türbülans engellenmeye çalışılmış ve kanat üzerinde akan akışkanın enerjisini korumaya çalışılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi açılmış olan yarık, kanat profili üzerinde türbülansın başladığı yerden oluşturulmuştur. Bu yöntem sayesinde kanat profilinin ürettiği kaldırma kuvveti 14° 'lik hücum açısına kadar artış sağlamıştır. Ayrıca kanadın C_L/C_D oranı yüksek bir artış sağlamıştır. Kanat üzerindeki türbülans problemi çözüldükten sonra, kanadın ürettiği kaldırma kuvvetini artırmak için kanadın firar kenarına yakın bölgeye kanatçık eklenmiştir. Şekil 5'te, bu kanatçık sayesinde kaldırma yüksek oranda artırıldığı görülmektedir. Ancak kaldırma kuvveti 12° 'den sonra düşüş yaşamıştır. Şekil 6'da, elde edilen veriler sonucunda en yüksek C_L/C_D oranı yarık açılmış 12° 'lik hücum açısındaki kanat profili tasarımında elde edildiği görülmektedir.



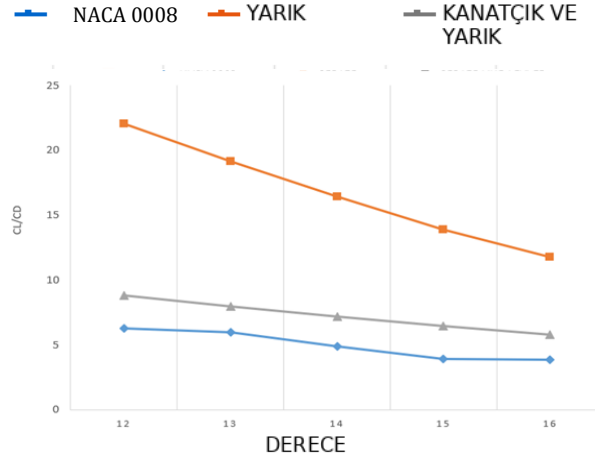
Şekil 3. NACA 0008 12 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 4. Yarıklı NACA 0008 12 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 5. Yarıklı ve kanatçıklı NACA 0008 12 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



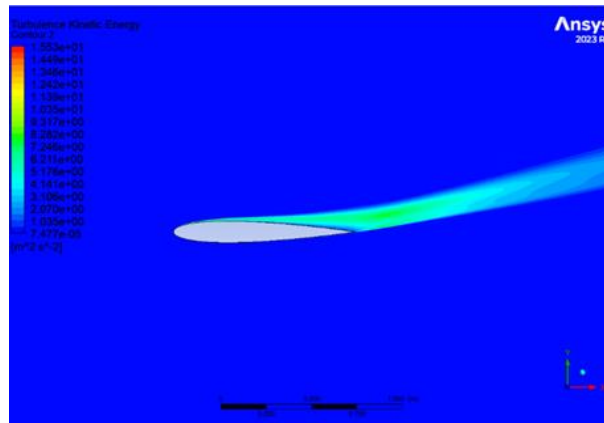
Şekil 6. NACA 0008 C_L/C_D grafikleri.

3.2.2 NACA 0012

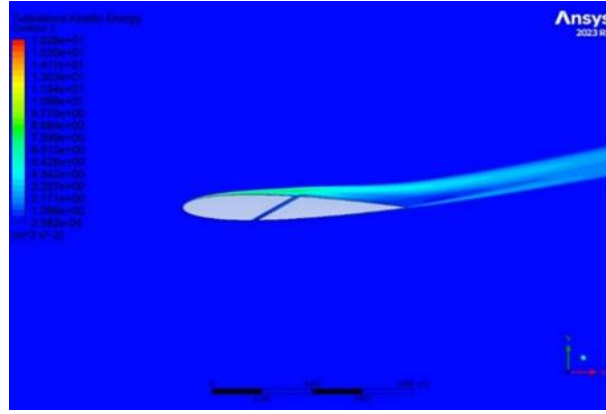
Şekil 7’de, NACA 0012 kanat profilinin 10^6 Reynolds sayısında ve 15° ’lik hücum açısında oluşan türbülans dağılımı gösterilmektedir. Gözlemler sonucunda, kanat profilinin hücum kenarına yakın bölgelerinde türbülans oluşumu meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu türbülans, akışın profilden ayrılmasına neden olmakta ve dolayısıyla, profilin 15° üzerindeki hücum açıları için etkin bir şekilde kullanılmasını engellemektedir.

Bu problemi gidermek amacıyla, kanat yüzeyine yarık açılması yöntemi uygulanmıştır. Şekil 8’de görüldüğü üzere, yarık uygulaması ile firar kenarında meydana gelen türbülans önemli ölçüde azaltılmış ve bu bölgedeki akış ayrılması başarılı bir şekilde önlenmiştir. Bu müdahale sonucunda, kanat profilinin kullanılabilir maksimum hücum açısı 16° ’ye kadar artırılmıştır. Ayrıca, sürükleme katsayısında belirgin bir azalma gözlemlenmiş ve buna bağlı olarak C_L/C_D oranı iyileştirilmiştir.

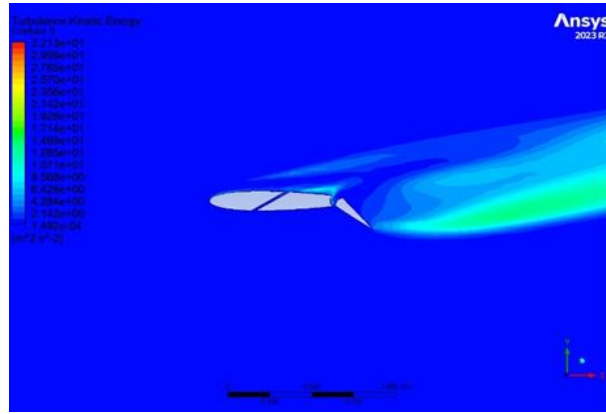
Bu aşamadan sonra, kaldırma kuvvetini daha da artırmak amacıyla kanat profilinin firar kenarına kanatçık entegre edilmiştir (Şekil 9). Yapılan bu iyileştirme, farklı hücum açıları için genel anlamda kaldırma kuvvetinde artış sağlamıştır. Ancak, 16° ’lik ve 17° ’lik hücum açılarına ulaşıldığında, yeniden türbülans oluşumu gözlemlenmiş ve bu durum, 15° ’de elde edilen kaldırma kuvvetine kıyasla düşüşe neden olmuştur. Bununla birlikte, kanatçık uygulaması sonucunda sürükleme katsayısında ciddi bir artış meydana gelmiş, bu da C_L/C_D oranında azalmaya sebep olmuştur (Şekil 10).



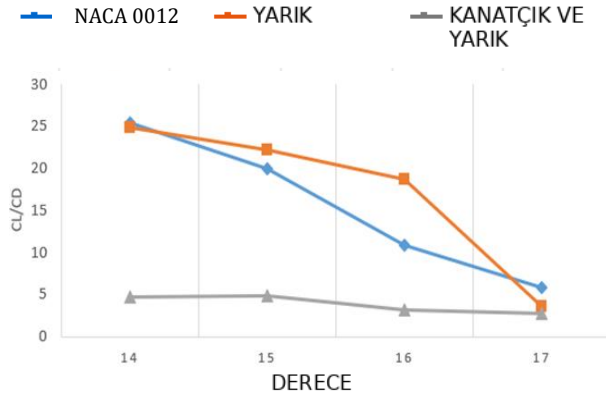
Şekil 7. NACA 0012 15 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 8. Yarıklı NACA 0012 15 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 9. Yarıklı ve kanatçıklı NACA 0012 15 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 10. NACA 0012 C_L/C_D grafikleri.

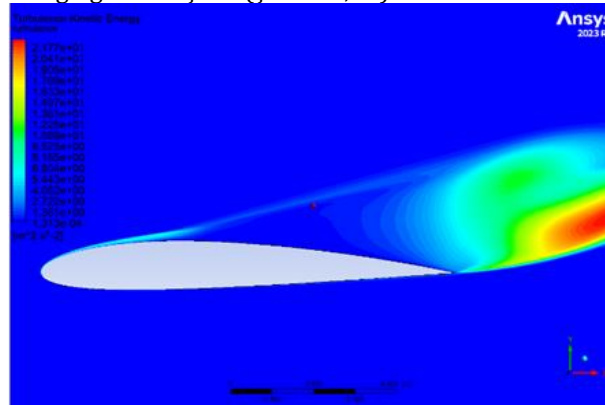
3.2.3 NACA 2412

Şekil 11'de, NACA 2412 kanat profilinin 10^6 Reynolds sayısında ve 17° 'lik hücüm açısında yüzey üzerinde oluşan türbülans konturu sunulmaktadır. Gözlemler, türbülansın profilin hücüm kenarına yakın bölgelerde oluştuğunu göstermektedir. Bu türbülansı engellemek ve türbülans kaynaklı akış ayrılmasını önlemek amacıyla, türbülansın başladığı bölgeye yarık uygulanmıştır. Yarık eklenmiş profilin türbülans konturu da Şekil 12'de gösterilmektedir. Yapılan bu müdahale ile söz konusu türbülans büyük ölçüde engellenmiş ve akışın kanat üzerinden düzenli bir şekilde devam etmesi sağlanmıştır.

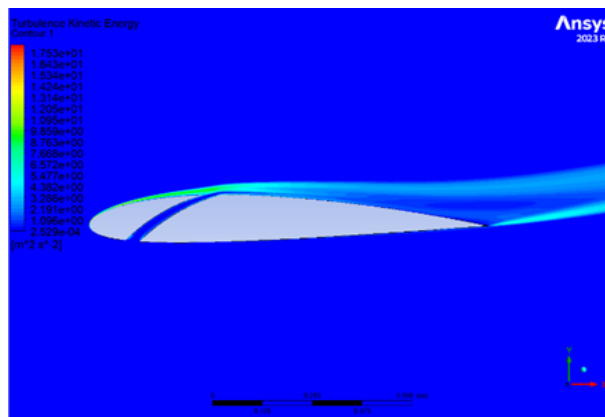
Yarık uygulaması sonucunda, kanat profilinin ürettiği kaldırma kuvvetinde artış gözlemlenmiş ve bu artış 18° 'lik hücüm açısına kadar sürmüştür. Bununla birlikte, sürüklenme katsayısında anlamlı bir azalma elde edilmiş ve genel olarak kanat profilinin aerodinamik verimliliği artmıştır.

Türbülans problemi giderildikten sonra, kaldırma kuvvetinde ilave bir artış sağlamak amacıyla kanat profilinin firar kenarına yakın bölgesine kanatçık eklenmiştir. Bu kanatçık, kaldırma kuvvetinde önemli bir artış

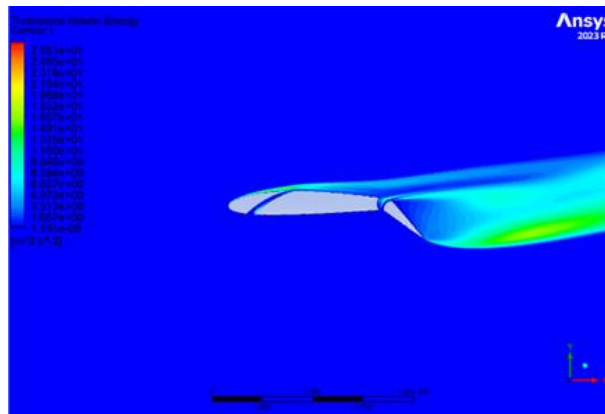
sağlamıştır. Ancak, kanatçık uygulaması sonucunda C_D değerinde artış meydana gelmiş ve bu durum C_L/C_D oranında bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. (Şekil 13,14)



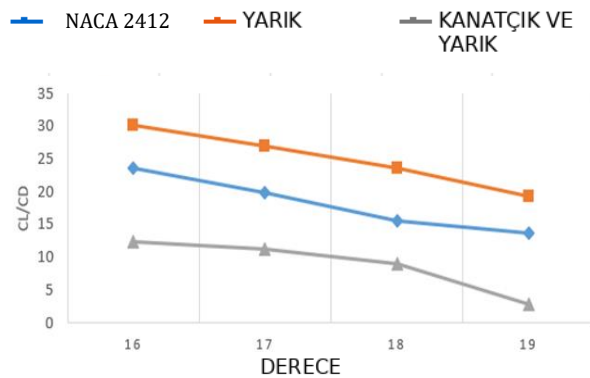
Şekil 11. NACA 2412 17 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 12. Yarıklı NACA 2412 17 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 13. Yarıklı ve kanatçıklı NACA 2412 17 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



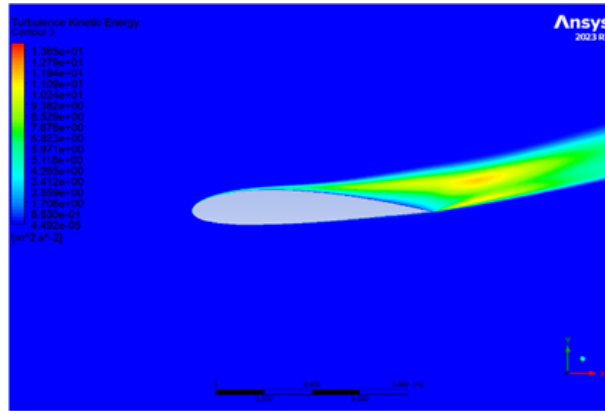
Şekil 14. NACA 2412 C_L/C_D grafikleri.

3.2.4 NACA 2415

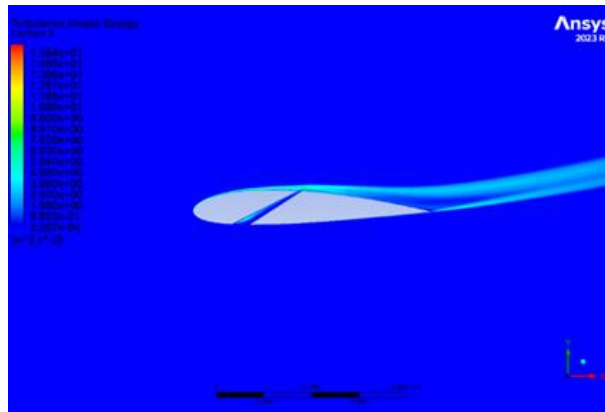
Şekil 15'te NACA 2415 kanat profilinin 10^6 Reynolds sayısında ve 17° 'lik hücum açısında elde edilen türbülans kinetik enerji konturu sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, kanat yüzeyinde meydana gelen türbülans oluşumu nedeniyle kaldırma kuvvetinde azalma başlamış ve akış, kanadın firar kenarında akış ayrılımlarına yol açmıştır. Bu aerodinamik olumsuzluğu gidermek amacıyla, türbülansın etkili olduğu bölgeye yarık uygulanmıştır.

Şekil 16'da yarık uygulaması sonucunda, firar kenarında oluşan türbülans önemli ölçüde azaltılmış ve akışın ayrılmadan yüzey boyunca ilerlemesi sağlandığı görülmüştür. Bu sayede, kanat profilinin kaldırma kuvvetinde artış sağlanmış ve bu artış 19° 'lik hücum açısına kadar korunmuştur. Ayrıca, her bir hücum açısı için C_L/C_D oranı artırılmıştır.

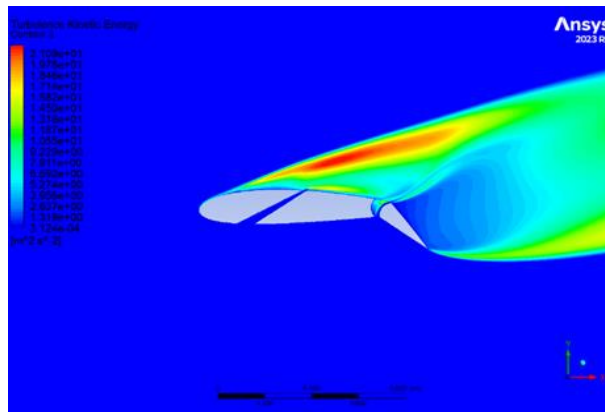
Kaldırma kuvvetini daha da yükseltmek amacıyla, kanat profilinin firar kenarına yakın bölgesine kanatçık eklenmiştir (Şekil 17). Ancak bu yöntem istenen performansı sağlayamamıştır. Kaldırma kuvvetinde artış yalnızca 17° 'lik hücum açısında gözlemlenmiş ve bu artış oldukça sınırlı düzeyde kalmıştır (Şekil 18).



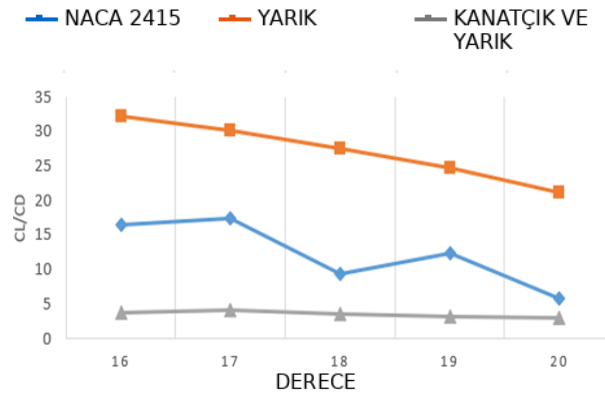
Şekil 15. NACA 2415 17 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 16. Yarıklı NACA 2415 17 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 17. Yarıklı ve kanatçıklı NACA 2415 17 derecede türbülans kinetik enerji konturu.



Şekil 18. NACA 2415 C_L/C_D grafikleri.

4. Sonuçlar/Conclusions

Bu çalışmada, 10^6 Reynolds sayısında çeşitli NACA kanat profillerinin aerodinamik performansı, tel ekleme, yarık ve kanatçık gibi türbülans kontrol yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

Tel ekleme yöntemi ise, türbülans bölgesini kanat yüzeyinden uzaklaştırma açısından potansiyel göstermiştir. Bununla birlikte, kaldırma katsayısındaki azalma ve sürüklenme katsayısındaki artış nedeniyle bu yöntem genel olarak verimsiz bulunmuştur. Bu sebeple, türbülansın doğrudan hücum kenarında meydana geldiği NACA 0008 gibi profillere tel ekleme yöntemi uygulanmamıştır.

Yarık uygulaması, akış ayrılmasını geciktirerek veya tamamen önleyerek kanat yüzeyindeki akış karakteristiklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu yöntem, kaldırma kuvvetinde anlamlı bir artış sağlamış ve özellikle yüksek hücum açıları altında C_L/C_D oranını belirgin şekilde yükseltmiştir. Çoğu durumda, kanat profillerinin kullanılabilir hücum açısı $1-2^\circ$ artırılmıştır ve bu durum profillerin operasyonel verimliliğini geliştirmiştir.

Kanatçık ve tel ekleme gibi diğer yöntemler ise belirli koşullarda kısmi faydalar sağlamış olsa da, beraberinde getirdikleri olumsuz etkiler nedeniyle genel aerodinamik verim açısından sınırlı kalmıştır. Özellikle tel ekleme yöntemi, tüm profillerde C_L/C_D oranını ciddi ölçüde düşürdüğü için yüksek hücum açısı uygulamalarında uygun bir kontrol yöntemi değildir. Kanatçık uygulaması ise kaldırma katsayısını yükseltmesine rağmen sürüklemeyi de artırdığından, toplam performans artışı bakımından beklentileri tam olarak karşılayamamıştır. Özellikle NACA 2415 profili için kanatçık uygulamasının etkisi sınırlı olmuş ve yalnızca belirli bir hücum açısında düşük seviyeli bir iyileşme sağlamıştır.

Sonuç olarak, türbülans kontrolü ve aerodinamik performans iyileştirmesi açısından en etkili yöntem yarık uygulaması olmuştur. Kanatçık ve tel gibi diğer yöntemler ise belirli koşullarda fayda sağlasa da beraberinde getirdikleri olumsuzluklar nedeniyle sınırlı uygulanabilirliğe sahiptir.

Yazar Katkısı/ Authors' Contributions

ÖG: Metodoloji, Yazılım, Doğrulama, Resmi analiz, Araştırma, Kaynaklar, Veri toplama, Yazma-Orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme. **MAE:** Metodoloji, Yazılım, Doğrulama, Resmi analiz, Araştırma, Kaynaklar, Veri toplama, Yazma-Orijinal taslak hazırlama. **MEÖ:** Kavramsallaştırma, Yazılım, Doğrulama, Resmi Analiz, Araştırma, Kaynaklar, Veri toplama, Yazma-Orijinal taslak hazırlama. **ÜEE:** Kavramsallaştırma, Yazılım, Doğrulama, Resmi Analiz, Araştırma, Kaynaklar, Veri toplama, Yazma-Orijinal taslak hazırlama. **ME:** Yazılım, Doğrulama, Resmi Analiz, Yazım-İnceleme ve Düzenleme. **MB:** Yazım-İnceleme ve Düzenleme, Gözetim. **AÖ:** Yazım-İnceleme ve Düzenleme, Proje yönetimi.

Etik Standartların Beyanı/ Declaration of Ethical Standards

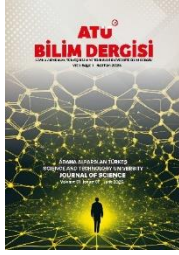
Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Çıkar Çatışması/ Conflict of Interest

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

Kaynaklar/References

- [1] Gölcük, A.İ., Erbaş, M. (2020). Düşük Reynolds sayılarında NACA 0012 kanat profilinin k- ω SST türbülans modeli kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile modellenmesi, 8.Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 9-11 Eylül 2020, THK Üniversitesi, Ankara.
- [2] Srivastava, S., Aditya, R. (2016). Aerodynamic performance analysis of NACA 2412 with different high-lift devices. *International Journal of Engineering Research*, 5(4).
- [3] Huang, L., Liu, Y., Liu, Q. (2004). Numerical study of blowing and suction control mechanism on NACA 0012 airfoil. *Journal of Aircraft*, 41(5).
- [4] Yousefi, K., Tofighian, H., Karimian, S. M. (2014). Numerical study of blowing and suction slot geometry optimization on NACA 0012 airfoil. *Journal of Aircraft*, 51(5).
- [5] Belamadi, R., Boudries, R., Mokhtari, M. (2016). Aerodynamic performance analysis of slotted airfoils for application to wind turbine blades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 151, 79-99.
- [6] Yousefi, K. (2014). Aerodynamic analysis of multi-slotted airfoils for wind turbine applications, Doktora Tezi, Tahran Üniversitesi.
- [7] Weick, F. E. (1933). Aircraft slot investigations (NACA Technical Report No. 421). National Advisory Committee for Aeronautics.
- [8] Lim, T. T. (2002). An experimental study of a slotted airfoil. *Experiments in Fluids*, 33(6).
- [9] Narsipur, S., Sharma, M., Kumar, R. (2012). CFD analysis of multi-slotted airfoils for wind turbines. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting.
- [10] Gaunaa, M., Enevoldsen, K., Hansen, M. O. L., Jensen, M. L. (2012). Application of a three-slot airfoil system to wind turbine blades. *Wind Energy*, 15(2).
- [11] Al-Jibory, H. H. K., Shinan, M. N. M. (2020). Numerical investigation of triangular bump effects on boundary layer separation control and aerodynamic performance of NACA 0012 airfoil. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 13(6).
- [12] Prabhakar, S., Ohri, J. (2013). CFD analysis of NACA 2412 airfoil with high-lift devices for MAV applications. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(12).
- [13] Matsson, J. E., Ljung, E. S., Gjerde, K. B. (2016). Experimental and CFD analysis of 3D printed NACA 2412 airfoil at low Reynolds number. *International Journal of Engineering Education*, 32(2).
- [14] Mohamed, M. H., Al-Hussaini, T. C., Gomaa, M. (2020). Aerodynamic performance enhancement of vertical axis wind turbines using slotted airfoils. *Energy Conversion and Management*, 214.
- [15] Meghani, S. (2019). Aerodynamic analysis of morphing configurations for NACA 2412 airfoil using XFLR5 and CFD. *Aerospace Science and Technology*, 95.
- [16] Coder, J. G., Somers, D. M. (2020). Design and experimental results for the S207 slotted natural-laminar-flow airfoil. *Journal of Aircraft*, 57(1).
- [17] Xie, Y., Sun, W., Wang, Y. (2013). Numerical investigation of split blades for flow separation control on S809 airfoil. *Renewable Energy*, 59.
- [18] Son, C. C., Lee, S. H., Kim, H. G. (2011). Drag reduction by surface trip wires at subcritical Reynolds numbers. *AIAA Journal*, 49(11).
- [19] Whitman, A. M., Gentry, G. L., Gentry, K. L. (2006). Aerodynamic effects of slot configurations on a generic airfoil. *Journal of Aircraft*, 43(3).
- [20] Yılmaz, A. E., Güneş, F., Özsunar, A. (2018). Kanat profili tasarım parametreleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(3).
- [21] Menter, F. R. (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.



Çimlenmenin Baklagillerin Fonksiyonel Özelliklerine Etkisi

Nejla Dağsuyu^{1,2} , Haşim Kelebek² 

Öz

Baklagiller, yüksek protein içerikleri, biyoaktif bileşenleri ve fonksiyonel özellikleri sayesinde sürdürülebilir beslenmenin önemli bir bileşenidir. Çimlenme, düşük maliyetli ve çevre dostu bir biyoproses olup, baklagillerde endojen enzimlerin aktivasyonunu tetikleyerek derin biyokimyasal ve fizyolojik değişimlere yol açmaktadır. Bu süreçte depo proteinlerinin hidroliziyle peptitler ve serbest aminoasitler oluşmakta, amilaz aktivitesiyle karbonhidratlar mobilize edilmekte ve fenolik bileşikler ile vitaminlerin biyosentezi artmaktadır. Dolayısıyla çimlenme, protein sindirilebilirliğini iyileştirmekte, aminoasit profillerini değiştirmekte, şeker kompozisyonunu düzenlemekte ve toplam fenolik madde ile antioksidan kapasiteyi artırmaktadır. Ayrıca, enzimatik esmerleşme ve pigment yeniden dağılımına bağlı olarak yapısal ve renk değişiklikleri de meydana gelmektedir. Bu derleme, çimlenmenin baklagillerin besinsel ve fonksiyonel kalitesi üzerindeki etkilerini güncel literatür ışığında kapsamlı biçimde değerlendirmekte; besin öğelerinin biyoyararlanımını artırma ve baklagil bazlı gıdaların sağlık destekleyici özelliklerini güçlendirme potansiyelini vurgulamaktadır. Çimlenmiş baklagiller, fonksiyonel gıda formülasyonları için değerli bir hammadde ve sürdürülebilir gıda sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Keywords: Aminoasit; Antioksidan kapasite; Baklagil; Çimlenme; Fenolik bileşikler; Fonksiyonel özellikler; Protein sindirilebilirliği

Effect of Germination on Functional Properties of Legumes

Abstract

Legumes are an essential component of sustainable diets due to their high protein content, bioactive compounds, and functional properties. Germination, a cost-effective and eco-friendly bioprocess, induces profound biochemical and physiological modifications in legumes by activating endogenous enzymes. These changes include the hydrolysis of storage proteins into peptides and free amino acids, the mobilization of carbohydrates through amylase activity, and the enhanced biosynthesis of phenolic compounds and vitamins. Consequently, germination improves protein digestibility, modifies amino acid profiles, alters sugar composition, and increases total phenolic content and antioxidant capacity. In addition, germination induces structural and colour changes related to enzymatic browning and pigment redistribution. This review consolidates current evidence on the influence of germination on the nutritional and functional quality of legumes, highlighting its potential to enhance bioavailability of nutrients and to increase the health-promoting properties of legume-based foods. Germinated legumes therefore represent valuable raw materials for the formulation of functional foods and for advancing sustainable food systems.

Keywords: Amino acids; Antioxidant capacity; Legumes; Germination; Phenolic compounds; Functional properties; Protein digestibility

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, 01250 Adana, Türkiye

ORCID¹: 0009-0001-6771-2075

²Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, 01250 Adana, Türkiye

ORCID²: 0000-0002-8419-3019

#Sorumlu Yazar/Corresponding

Author: hkelebek@atu.edu.tr

Geliş/Received: 8/09/2025

Kabul/Accepted: 17/11/2025

Yayınlanma/Published: 25/12/2025

Atıfta Bulunmak İçin/How to Cite: Dağsuyu N., Kelebek H. "Effect Of Germination on Functional Properties of Legumes" Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilim Dergisi 1 (2): 124-135 (2025).

1.Giriş/Introduction

Baklagiller, *Fabaceae* familyasına ait bitkilerdir. Bu bitkilerin yenilebilir kısımları, tohum içeren baklalarıdır. Familyada 18.000'den fazla tür bulunmasına rağmen, insan beslenmesinde kuru fasulye, mercimek, nohut, acı bakla ve mung fasulyesi gibi sınırlı sayıda baklagil kullanılmaktadır [1]. Baklagiller dengeli beslenmenin önemli bir parçasıdır. Protein, karbonhidrat, diyet lifi ve mikro besin açısından zengin bir kaynak olmasının yanı sıra; biyoaktif bileşenleri ve antioksidanları nedeniyle koruyucu beslenmedeki rolleri bilinmektedir [1]. İnsan beslenmesinin bir parçası olarak baklagillerin geçmişi MÖ 5500'e kadar uzanmakta olup, insanlar tarafından yetiştirilen ve tüketilen ilk bitkilerden biri oldukları düşünülmektedir [2]. Baklagillerde karbonhidratlar (%50-60), proteinler, çoklu doymamış yağ asitleri, mineraller, diyet lifleri ve vitaminler bol miktarda bulunmaktadır. En önemlisi, baklagiller doymuş yağ asitleri ve kolesterol içermemektedir [3]. Baklagiller, çevresel olarak sürdürülebilir bir şekilde üretilmekte ve bu nedenle hayvansal kaynaklara kıyasla ekonomik bir protein kaynağı oluşturmaktadır [4].

Baklagiller, sahip oldukları zengin besin profili ve biyoaktif bileşikler nedeniyle insan sağlığı açısından önemli işlevsel gıda gruplarından biri olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda yapılan çok sayıda çalışma, baklagillerin obezite, kanser, kardiyovasküler hastalıklar ve hormonal bozukluklar gibi kronik hastalıkların diyet temelli yönetiminde koruyucu bir rol üstlenebileceğini ortaya koymaktadır [5]. Nitekim, geniş ölçekli bir meta-analiz çalışması, hayvansal proteinlerin bitkisel proteinlerle ikame edilmesinin tüm nedenlere bağlı mortalite riskinde anlamlı bir azalma sağladığını göstermektedir. Günlük enerji alımının yalnızca %3'ünün bitkisel proteinlerden sağlanması dahi mortalite riskinde yaklaşık %5 oranında düşüş ile ilişkilendirilmiştir [6].

Benzer şekilde, 2021 yılında yayımlanan randomize kontrollü bir araştırmada, günlük 150 gram baklagil tüketiminin kan lipid profili, kan basıncı, inflamatuvar biyobelirteçler ve vücut kompozisyonu üzerinde kayda değer iyileşmeler sağladığı rapor edilmiştir [7]. Bu bulgular ışığında, hem sağlık hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından, hayvansal kaynaklı beslenme modellerinden bitkisel temelli diyetlere yönelim küresel ölçekte önerilmektedir [8].

Baklagiller, et bazlı proteinlere güçlü bir alternatif oluşturarak, tahıllardan sonra dünya genelinde en önemli temel gıda kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir [9]. Makro besin öğeleri bakımından zengin olmalarının yanı sıra, çeşitli biyoaktif bileşikler de içeren baklagillerin kardiyovasküler hastalıklar ve bazı kanser türlerinin riskini azalttığı bildirilmektedir [8,10]. Ayrıca, baklagillerin tahıllarla birlikte tüketilmesi durumunda, et ve süt ürünlerine dayalı diyetlerle karşılaştırılabilir düzeyde yüksek protein kalitesi sağlanabilmektedir [11].

Bununla birlikte, baklagillerin besinsel değerini sınırlandıran bazı antinutritif bileşikler de mevcuttur [12,13]. Bu bileşenlerin azaltılması veya tamamen elimine edilmesi için öne çıkan biyoteknolojik yöntemlerden biri çimlendirme işlemidir [14]. Çimlendirme, özel ekipman veya karmaşık teknolojiler gerektirmemesi ve çevre dostu bir biyolojik süreç olması nedeniyle sürdürülebilir bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir [15]. Çimlenme tohumun su alım kabiliyetine ve tohumun mikro yapısına bağlı olarak üç faza ayrılan karmaşık bir süreçtir. İlk faz imbibisyon aşamasıdır ve bu aşamada hızlı su alımı gerçekleşmektedir. İkinci faz hazırlık aşaması olup su alımı azalmaktadır. Üçüncü faz ise çimlenme aşaması olup çimlenmenin tamamlandığı fazdır ve su alımı bir kez daha artmaktadır [15]. Çimlenme sırasında endojen enzimlerin aktivasyonu tetiklenmekte, böylece karbonhidratlar ve proteinler gibi makromoleküller daha küçük yapılara parçalanarak biyoyararlanımı artan besin bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda, minerallerin daha biyoyararlanılabilir formlarının serbest bırakılması sayesinde besinsel değer yükselmekte, fizyokimyasal ve duyuşal özelliklerde anlamlı iyileşmeler sağlanmaktadır [16]. Çimlenme, tahılların biyoaktif bileşen içeriklerini, antioksidan kapasitelerini, işlevsel özelliklerini ve duyuşal niteliklerini iyileştiren, doğal ve sürdürülebilir bir biyoproses tekniği olarak öne çıkmaktadır. Bu biyolojik dönüşüm süreci sonucunda elde edilen ürünler, genellikle daha yüksek işlevsellik ve besinsel kaliteye sahip olmaktadır [17,18]. Ancak, çimlenmenin baklagillerdeki besin bileşimi ve içerikleri üzerindeki etkisi tek boyutlu değildir; ıslatma süresi, tane nemi, sıcaklık, çimlenme süresi ve kullanılan baklagil çeşidi gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir [19].

Son dönemde çimlendirilmiş baklagiller, içerdiği sağlık açısından yararlı bileşenler nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu eğilim, beslenmeyle ilişkili bulaşıcı olmayan hastalıkların artan yaygınlığı ve bu durumların yönetiminde beslenme stratejilerinin etkinliğiyle bağlantılıdır [20]. Çok sayıda çalışma, kısa süreli çimlendirilmiş baklagil ürününün gelişmiş işlevselliğini, çimlenme sırasında geliştirilen biyoaktif bileşiklerin artan varlığına bağlamıştır. Flavonoidler, fenolik bileşikler, toplam diyet lifi ve askorbik asit gibi bileşikler, antioksidan, antiinflamatuvar, hipoglisemik, kolesterol düşürücü ve antihipertansif etkiler de dahil olmak üzere çeşitli sağlık yararları ile ilişkili önemli antioksidan ve nutrasötik özellikler sergilemektedir [21-24].

Bu derlemenin temel amacı, çeşitli baklagil türlerinde çimlenme süreci ile ortaya çıkan fiziksel ve biyokimyasal değişimlere dair güncel bilgileri kapsamlı bir şekilde sunmaktır. Çimlenme sırasında meydana gelen yapısal ve metabolik dönüşümlerin; besinsel değer, biyoaktif bileşik profili, fonksiyonel özellikler ve potansiyel sağlık yararları üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Ayrıca, antinutritif bileşiklerin azaltılması, fenolik bileşikler ve diğer biyoaktif metabolitlerdeki artış, protein ve karbonhidratların sindirilebilirliğinin iyileşmesi gibi çimlenmenin öne çıkan katkıları derlenmiş ve sürdürülebilir beslenme açısından sunduğu fırsatlar da değerlendirilecektir. Literatürde çimlenmenin belirli baklagil türleri üzerindeki etkilerini tek boyutlu olarak inceleyen çok sayıda araştırma bulunmakla birlikte, bu çalışmaların çoğu yalnızca bir besin bileşeni (protein, fenolik madde veya şeker) ya da tek bir fonksiyonel özellik üzerine odaklanmıştır. Mevcut derleme ise, protein ve amino asit profili, toplam fenolik madde, antioksidan aktivite, renk parametreleri ve şeker kompozisyonu gibi çok sayıda değişkeni birlikte ele alarak; çimlenmenin baklagillerin fonksiyonel ve besinsel kalitesi üzerindeki çok boyutlu etkilerini güncel literatür ışığında sistematik biçimde ortaya koymaktadır. Bu yönüyle çalışma, literatürdeki belirli parametrelere odaklı, sınırlı kapsamlı derlemeler boşluğunu doldurmaktadır.

2. Baklagillerin çimlenmesi ile proteinde meydana gelen değişiklikler

Diyet proteinleri, insan beslenmesinde vazgeçilmez bir makro besin ögesi olup, temel biyolojik işlevlerinden biri doku oluşumunu desteklemektir. Bunun yanı sıra proteinler, vücut kompozisyonunu düzenlemenin yanı sıra tokluk hissi, bağışıklık sistemi fonksiyonları ve çeşitli metabolik yollar üzerinde de kritik roller üstlenmektedir [25]. Diyetle alınan proteinler; baklagiller, tahıllar ve yağlı tohumlar gibi bitkisel kaynakların yanı sıra, et, süt ve yumurta gibi hayvansal ürünlerden de elde edilmektedir. Ancak, protein kaynağının bitkisel ya da hayvansal oluşu, söz konusu proteinin beslenme ve sağlık yararlarını doğrudan etkilemektedir [26]. Et ve süt proteinleriyle karşılaştırıldığında, birçok bitkisel proteinin esansiyel amino asit profili genellikle daha düşük seviyelerde bulunmakta ve bu durum onların besin kalitesini sınırlandırabilmektedir [27].

Çimlenme, tohum proteinlerinin kısmi hidrolizini başlatarak, sindirilebilirliğin ve besin değerinin artmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, proteinlerin sindirilebilirlik derecesi yalnızca tohumda gerçekleşen biyokimyasal süreçlerden değil, aynı zamanda insan gastrointestinal sisteminde protein yapılarının bozunma düzeyinden de etkilenmektedir [15]. Çimlenmenin, proteazlar aracılığıyla karmaşık ve yüksek moleküler ağırlıklı polipeptitleri daha basit peptitlere ve serbest amino asitlere dönüştürdüğü, böylece besin kalitesini artırdığı ve belirli amino asitlerin biyoyararlanımını yükselttiği bildirilmektedir [28]. Çimlenme ile proteinde meydana gelen değişiklikler Tablo 1’de verilmiştir.

Nohutun (*Cicer arietinum* L.) çimlenme sürecinin kimyasal bileşim ve biyoaktif içerikler üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada [29], nohut taneleri 25 °C’de 0, 12, 24, 36 ve 48 saat süreyle karanlık koşullarda çimlendirilmiştir. Başlangıçta %18,48 olan protein içeriği, 24 saatlik çimlenme sonunda anlamlı şekilde ($p<0,05$) artarak %23,5’e yükselmiş, 48 saat sonunda ise %24,46 olarak ölçülmüştür. Bu artış, proteazların protein yapıları üzerindeki enzimatik etkisine bağlanmıştır [29]. Benzer şekilde, 6 gün süreyle gerçekleştirilen bir çalışmada, nohut, mercimek ve sarı bezelye unlarının fizikokimyasal bileşimlerindeki değişimler değerlendirilmiş ve tüm örneklerde protein içeriğinin çimlenme süresi boyunca istatistiksel olarak anlamlı şekilde ($p<0,05$) arttığı saptanmıştır [30]. Çalışmada çiğ baklagil unlarının protein içerikleri, 100 g bazında mercimek için 30,65 g, sarı bezelye için 25,83 g ve nohut için 24,36 g olarak belirlenmiş; 6 günün sonunda bu değerlerde sırasıyla 3,39 g/100 g, 2,95 g/100 g ve 2,81 g/100 g’lık artışlar gözlenmiştir. Ham protein içeriğindeki bu artış, çimlenme sürecinde tohumun enzim sentezine, diğer bileşenlerin parçalanmasına bağlı bileşimsel değişimlere ve yeni protein sentezine atfedilmiştir [31].

Çimlendirilmiş Bambara yer fıstığının (0, 24, 48 ve 72 saat) incelendiği bir çalışmada [32], başlangıçta 26,1 g/100 g olan protein içeriği, 72 saatlik çimlenme sonucunda 28,79 g/100 g’a yükselmiştir. Benzer şekilde, çiğ ve farklı sürelerde (24, 48 ve 72 saat) çimlendirilmiş güvercin bezelyesi unlarının karşılaştırıldığı çalışmada da, çimlenme süresine paralel olarak protein içeriğinde (22,71–26,72 g/100 g) artış kaydedilmiştir [21]. Protein düzeyindeki bu artış, çimlenme sırasında enzim proteinlerinin sentezlenmesine ve bunun sonucunda daha fazla amino asit oluşmasına bağlanmaktadır [33]. Ayrıca, bu süreçte depolama proteinlerinin proteazlar tarafından parçalanması ve bağlı oldukları matrislerden salınması da protein içeriğinin yükselmesine katkıda bulunmaktadır [30,34]. Bununla birlikte, söz konusu değişimlerin düzeyi baklagil türüne göre farklılık gösterebilmektedir [35].

Tablo 1. Çimlenme ile proteinde meydana gelen değişiklikler

Baklagil Türü	Çimlenme Koşulları	Başlangıç Protein İçeriği	Çimlenme Sonrası Protein İçeriği	Değişim (%)	Mekanizma ve Açıklama	Kaynak
Nohut (<i>Cicer arietinum</i> L.)	25°C, 0-48 saat, karanlık	%18,48	%24,46	+32,3	Proteaz aktivitesiyle depo proteinlerinin parçalanması, yeni protein sentezi; antinutritif faktörlerin azalması ile biyoyararlanım artışı	[29]
Nohut (<i>Cicer arietinum</i> L.)	25°C, 6 gün	24,36 g/100 g	27,75 g/100 g	+13,9	Çimlenme süresince enzim sentezi ve bileşimsel değişimler; globulin fraksiyonlarında artış	[30]
Sarı Bezelye (<i>Pisum sativum</i> L.)	25°C, 6 gün	25,83 g/100 g	28,01 g/100 g	+8,4	Proteolitik enzimlerin aktifleşmesi; matris bağlı proteinlerin serbestleşmesi	[30]
Mercimek (<i>Lens culinaris</i> Medik.)	25°C, 6 gün	30,65 g/100 g	33,60 g/100 g	+9,6	Depo proteinlerinin hidrolizi; albümin ve globulin fraksiyonlarında artış	[30]
Bambara Yer Fıstığı (<i>Vigna subterranea</i>)	0-72 saat, 25°C	26,1 g/100 g	28,79 g/100 g	+10,3	Proteaz aracılı hidroliz; antinutritif bileşiklerin azalması; amino asitlerin serbestleşmesi	[32]
Güvercin Bezelyesi (<i>Cajanus cajan</i>)	0-72 saat	22,71 g/100 g	26,72 g/100 g	+17,7	Çimlenmeye bağlı protein biyosentezi; proteolitik yıkım + yeni protein sentezi	[21]

3. Baklagillerin çimlenmesi ile renkte meydana gelen değişiklikler

Renk, 380–770 nanometre aralığındaki görünür ışık dalga boylarının retinaya ulaşmasıyla bireyde oluşan algısal bir deneyim olarak tanımlanabilir [36]. L* parametresi, bir yüzeyin parlaklık düzeyini yani açık ya da koyu oluşunu ifade ederken; +a* değeri kırmızılığı, -a* yeşilliği, +b* sarılığı ve -b* ise maviliği göstermektedir [37].

Yapılan bir çalışmada, çimlenme sürecinin Bambara yer fıstığının renk özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve L*, a* ve b* değerlerindeki değişimler değerlendirilmiştir [32]. Bulgular, çimlenmenin L* değerini anlamlı ölçüde azalttığını, buna karşın a* ve b* değerlerinde artışa yol açtığını göstermiştir. Çiğ Bambara yer fıstığının başlangıçta 80,53 olan L* değeri, 72 saatlik çimlenme sonucunda 69,16'ya düşerken; a* ve b* değerleri sırasıyla 0,49'dan 1,72'ye ve 5,11'den 9,07'ye yükselmiştir. 72 saatlik çimlenme, örnekler arasında düşük L* ve en yüksek a* ile b* değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir [32].

Çimlenmiş Bambara yer fıstığı un örneklerinde gözlenen L* değerindeki azalma ve buna bağlı olarak a* ve b* değerlerindeki artış, çimlenme sırasında pigmentle ilişkili bileşiklerin parçalanmasına, nişasta ve protein oluşumuna ve unun kurutulması sırasında bu iki bileşen arasında gerçekleşen Maillard reaksiyonuna bağlanmaktadır [38]. Benzer şekilde, çimlendirilmiş güvercin bezelyesi unlarında da L* değerinde bir azalma, a* ve b* değerlerinde ise artış gözlenmiştir [21]. Bu değişiklikler, çimlenme sırasında enzimatik hidrolizin artması nedeniyle çeşitli pigmentlerin (ör. uranidin ve flavonoidler) tohum kabuğundan endosperme geçişi ve sızmasından kaynaklanıyor olabilir [37].

Başka bir çalışmada, maş fasulyesinin 12, 24, 36, 48, 60 ve 72 saatlik çimlenmesi sonrasında elde edilen un örneklerinin renk özellikleri incelenmiş ve çimlenme süresinin L*, a* ve b* değerlerini etkilediği belirlenmiştir [37]. Bulgulara göre, maş fasulyesi ununun L* değeri azalmış, a* ve b* değerleri ise filizlenme süresi uzadıkça artış göstermiştir. Çimlenme sırasında polifenol oksidaz ve peroksidaz gibi doğal oksidatif enzimlerin aktive olması, enzim kaynaklı kahverengileşmeyi kolaylaştırmakta; bu durum parlaklıkta azalma ve sarılıkta artışa yol açmaktadır [39]. Renk değişimleri, protein içeriği, tohum kabuğu rengi, uranidin içeren pigmentler, kahverengi pigmentler ve flavonoidler gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir.

4. Baklagillerin çimlenmesi ile amino asit içeriğinde meydana gelen değişiklikler

Çimlenme sürecinde depo proteinleri, proteazların etkisiyle hidrolize uğrayarak serbest amino asitlere veya düşük moleküler ağırlıklı peptitlere parçalanmakta, bu da besinlerin biyoyararlanımını artırmaktadır. Genel olarak, çimlenmenin yenilebilir tohumlardaki amino asit içeriği üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu bildirilmektedir; ancak farklı baklagil türlerinde amino asitlerin değişim eğilimleri ve kapsamı önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir [40].

Çimlendirilmiş Bambara yer fıstığının (0, 24, 48 ve 72 saat) incelendiği bir çalışmada [32], arginin dışında tüm esansiyel ve esansiyel olmayan amino asitlerin miktarının arttığı saptanmıştır. Bu durum, çimlenme sırasında tanen, fitik asit ve tripsin inhibitörleri gibi antinutritif faktörlerin azalması ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmada amino asit miktarlarının çimlenme süresi boyunca doğrusal bir artış gösterdiği ve bu artışın, çimlenme sırasında oluşan küresel yapısal değişimlerin amino asitlerin erişilebilirliğini ve salınımını artırmasıyla bağlantılı olduğu belirtilmiştir [41].

Benzer şekilde, 24 saat süreyle çimlendirilen mung fasulyelerinde tüm amino asit içeriklerinin çimlenme süresinin artışıyla birlikte yükseldiği rapor edilmiştir [42]. Çimlenme dönemleri boyunca en yüksek seviyede bulunan amino asidin fenilalanin olduğu belirlenmiş ve bu durum, şikimat yolunun çimlenme sırasında aktifleşmesiyle fenilalanin sentezinin artmasına bağlanmıştır [43].

Güvercin bezelyesi örneğinde ise, çimlendirilmemiş halde toplam amino asit içeriği 102,36 µg/g kuru ağırlık iken, 72 saatlik çimlenme sonunda bu değer 268,43 µg/g'a ulaşarak yaklaşık 2,3 kat artış göstermiştir. Çalışmada tüm örneklerde en yüksek miktarda bulunan amino asidin arjinin olduğu, en büyük artışın ise histidinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, bazı amino asitlerde (aspartik asit, serin, prolin, lizin, lösin ve izolösin) belirgin bir değişim eğilimi gözlenmezken; glutamik asit, asparagin, treonin, glutamin, tirozin, alanin, arjinin ve triptofan düzeylerinde anlamlı artış, glisin ve fenilalanin miktarında ise azalma rapor edilmiştir [44].

Soya fasulyesinin 72 saatlik çimlendirilmesi sonucunda da benzer bir eğilim gözlenmiş; toplam amino asit içeriğinde artışın yanı sıra, treonin, aspartik asit ve glutamik asit seviyelerinin yükseldiği, prolin ve histidin miktarlarının ise azaldığı bildirilmiştir [45].

Genel olarak, çimlenme sırasında meydana gelen yapısal değişiklikler amino asit konsantrasyonlarındaki artışı açıklamaktadır [32,41]. Öte yandan, bazı amino asitlerin azalması, bu bileşiklerin çimlenme sürecinde yeni proteinlerin sentezinde kullanılmasından kaynaklanabileceği şeklinde yorumlanmaktadır [46]. Çimlenme ile baklagillerde amino asit profili değişimleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çimlenmede baklagillerin amino asit profili değişimleri

Baklagil (Tür/Latince)	Çimlenme Rejimi / Zaman Noktaları	Toplam AA Değişimi (nicel/nitel)	Esansiyel AA eğilimleri	Esansiyel olmayan AA eğilimleri (↑/↓/↔)	Baskın AA(lar) / En büyük artış	Mekanizma / Açıklama	Kaynaklar
Bambara yer fıstığı (<i>Vigna subterranea</i>)	0, 24, 48, 72 saat (sıcaklık/ışık: b.b.)	Genel artış; arginin hariç ↑ [32]	Lys↑, Leu↑, Ile↑, Thr↑, Val↑, Phe↑?, Met↑?, Trp↑ (çoğu ↑); Arg ↔/↓ [32]	Glu↑, Asp↑, Ala↑, Ser↑, Pro↑; Gly↑ [41]	— (b.b.)	Antinutritif faktörlerin (tanen, fitat, tripsin inhibitörleri) azalması; proteaz aracılı hidroliz; yapısal gevşeme [32,41]	[32], [41]
Mung fasulyesi (<i>Vigna radiata</i>)	≈24 saat (diğer koşullar: b.b.)	Tüm AA'larda ↑ [42]	Tüm esansiyeller ↑ [42]	Tümü ↑ [42]	Fenilalanin en yüksek (şikimat yolu aktivasyonu) [43]	Proteaz aktivasyonu; şikimat yolunun fenilalanin sentezini artırması [42,43]	[42], [43]
Güvercin bezelyesi (<i>Cajanus cajan</i>)	0–72 saat (sıcaklık/ışık: b.b.)	Toplam AA: 102,36 → 268,43 µg/g (≈2,3×) [44]	Arg↑ (en yüksek seviyede), His↑ (en fazla artış), Thr↑, Trp↑; Lys↔, Leu↔, Ile↔ [44]	Glu↑, Asn↑, Gln↑, Tyr↑, Ala↑; Gly↓; Asp↔, Ser↔, Pro↔ [44]	Baskın: Arjinin; En büyük artış: Histidin [44]	Depo proteinlerinin proteolitik hidrolizi; bağlı matristen salınma; yeni protein sentezi [44,46]	[44], [46]
Soya fasulyesi (<i>Glycine max</i>)	≈72 saat (diğer koşullar: b.b.)	Toplam AA ↑ [45]	Thr↑; His↓; (Lys/Leu/Ile/Val/Met/Phe/Trp: b.b.) [45]	Asp↑, Glu↑; Pro↓ [45]	— (b.b.)	Proteaz aracılı parçalanma; yapısal yeniden düzenlenme → biyoyararlanım ↑ [28,45]	[28], [45]

b.b.: belirtilmemiş/bulunamadı

5. Baklagillerin çimlenmesi ile toplam fenolik maddede değişiklikler

Gıdalardaki fitokimyasallar ve diğer biyoaktif bileşenler, insanlarda beslenmeyle ilişkili bulaşıcı olmayan hastalıkların iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar. Flavonoidler, fenolik bileşikler, toplam diyet lifi ve askorbik asit gibi bileşikler antioksidan, anti-inflamatuar, hipoglisemik, kolesterol düşürücü ve antihipertansif etkiler de dahil olmak üzere çeşitli sağlık yararlarıyla ilişkili önemli antioksidan ve nutrasötik özellikler sergilemektedir. Çimlendirilmiş baklagil unları, sağlığa yararlı bileşenleri nedeniyle özellikle son zamanlarda yaygın olarak kabul görmüştür [20].

Tablo 3. Çimlenme ile toplam fenolik maddede değişiklikler

Baklagil Türü	Çimlenme Koşulları	Başlangıç TPC*	Çimlenme Sonrası TPC*	Değişim (%)	Mekanizma ve Açıklama	Kaynak
Bambara Yer Fıstığı (<i>Vigna subterranea</i>)	0–72 saat, 25°C	1,15 mg TE/g	2,03 mg TE/g	+76,5	Fenilalanin amonyak liyaz (PAL) aktivasyonuna bağlı fenolik biyosentezi ↑	[32]
Maş Fasulyesi (<i>Vigna radiata</i>)	18–90 saat, 25±1°C	2,8 mg GAE/g	9,7 mg GAE/g	+246	Bağlı fenoliklerin serbestleşmesi, filizlenme sürecinde fenilpropanoid yolunun indüksiyonu	[48]
Yeşil Mercimek (<i>Lens culinaris</i>)	Çimlendirme + ısıtma (mikrodalga, fırın vb.)	48,19 mg/100 g	52,91 mg/100 g	+9,8	Çimlenme ve ısıtma işlem kombinasyonu ile fenolik serbestleşmesi	[49]
Soya Fasulyesi (<i>Glycine max</i>)	5 gün çimlendirme	0,23 mg GAE/g	0,44 mg GAE/g	+91,3	İzoflavon aglikonlarının (genistein, daidzein) artışı; bağlı formların hidrolizi	[50]
Maş Fasulyesi (<i>Vigna radiata</i>)	5 gün çimlendirme	0,10 mg GAE/g	0,65 mg GAE/g	+550	İlk günlerde hızlı PAL aktivitesi; lineer olmayan artış eğilimi	[50]

Çimlenme ile Bambara yer fıstığı unlarının fizikokimyasal özelliklerinin değişiminin incelendiği bir çalışmada [32] çimlenmenin toplam fenolik madde miktarını 1,15 mg TE/g seviyesinden 2,03 mg TE/g seviyesine artırdığı tespit edilmiştir. Toplam fenolik madde miktarındaki bu artış tohumun çimlenmesi sırasında fenolik bileşiklerin oluşumunu destekleyen fenilalanin amonyak liyazının aktivasyonuna bağlanabilir [47] (Tablo 3). Çimlenmiş maş fasulyelerinde (25 ± 1 °C'de 18, 36, 54, 72 ve 90 saat) toplam fenolik madde miktarının başlangıçta 2,8 mg GAE/g seviyesinden 9,7 mg GAE/g seviyesine arttığı bildirilmiştir [48]. Yeşil mercimek tohumlarının çiğ, çimlenmiş ve çimlenmiş tohumların çeşitli ısıtma işlemleri (mikrodalga fırında, konvansiyonel fırında, kızılötesi fırında ısıtılmış çimlendirilmiş tohum) sonucunda biyoaktif özellikleri incelenmiş ve toplam fenolik madde içerikleri 48,19 mg/100g (kontrol) ile 62,08 mg/100 g (mikrodalga fırın) arasında değiştiği ve çalışma sonucunda çimlenme ve

ısıtma işlemlerinin yeşil mercimek tohumlarının toplam fenolik madde içeriğini artırdığı bulunmuştur [49]. Soya fasulyesi ve maş fasulyesinin çimlenme ile fonksiyonel özelliklerindeki değişiminin incelendiği bir çalışmada [50] tohumlar 5 günlük çimlenmeye bırakılmıştır. Soya fasulyesi için maksimum artışın 4 günlük çimlenme ile ortaya çıktığı ve çimlenmeyen soya fasulyesine kıyasla yaklaşık %330'luk bir artış olduğu bulunmuştur. Çimlendirilmiş maş fasulyesinde en fazla artışın birinci gün çimlendirmede olduğu gösterilmiş ve çimlendirilmemiş maş fasulyesine kıyasla toplam fenolik madde değerlerinde yaklaşık %103,7'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir. İki tohum türünde de toplam fenolik madde artışının doğrusal olmadığı ancak çimlenme ile toplam fenolik madde miktarının artırdığı belirtilmiştir [50].

6. Baklagillerin çimlenmesi ile şeker içeriğindeki değişiklikler

Yapılan bir çalışmada çimlenmenin Avustralya tatlı acı baklasındaki karbonhidrat bileşimine (sükroz, fruktoz, glukoz) etkisi araştırılmış ve soya fasulyesi ile karşılaştırılmıştır [51]. Her iki türde de sükrozun en baskın şeker olduğu, bunu fruktoz ve glukozun izlediği belirlenmiştir. Çimlenmeden önce soya fasulyesinin sükroz içeriği (33 mg/g), acı baklaya (12 mg/g) kıyasla önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur. Çimlenmemiş acı baklada sükroz ve fruktoz düzeyleri sırasıyla 12 mg/g ve 0,1 mg/g iken, çimlenme sonrasında bu değerler önemli düzeyde artarak sırasıyla yaklaşık 35 mg/g ve 2,9 mg/g'a yükselmiştir. Sükrozdaki bu artış, α -galaktozidazlar maksimum aktivitelerine ulaştığında oligosakkaritlerin hızlı bir şekilde hidrolizlenmesinden kaynaklanmasına atfedilebilir [52]. Çimlenmenin, acı bakla içindeki sükroz ve fruktoz içeriğinde artışa neden olduğu bu durumun artan α -amilaz aktivitesiyle ilişkili olduğu bulunmuştur [51]. Çimlendirilmiş soya fasulyesindeki fruktoz (~4,2 mg/g) ve glikoz (~1 mg/g), çimlendirilmemiş soya fasulyesine kıyasla daha yüksek; sükroz seviyeleri ise benzer (~30 mg/g) tespit edilmiştir. Sakkarozun azalmasının olası bir açıklaması, ısıtma sırasında çözünebilir bileşenlerin sızması ve daha sonra çimlenme sırasında enerji kaynağı olarak kullanılabilir hale gelmesinden kaynaklanabilir [53].

Çiğ ve çimlendirilmiş bezelyelerin karşılaştırıldığı bir çalışmada [54] bezelyeler 3 gün ve 6 gün karanlıkta çimlenmeye bırakılmış; çimlenmenin α -galaktozid içeriğinde belirgin bir azalmaya ve sükroz, glikoz ve fruktozda önemli artışlara neden olduğu bulunmuştur. Çiğ bezelyede fruktoz ve glukoz tespit edilmezken sükroz içeriği 1,73 g/100 g kuru madde tespit edilmiştir. 6 günlük çimlenmenin sonunda fruktoz, glukoz ve sükroz sırasıyla 0,12-0,34- 3,05 g/100g kuru madde bulunmuştur [54]. Soya fasulyesinin 24 saatlik çimlendirilmesi sonunda fruktoz, glukoz ve sükroz içeriğinin azaldığı tespit edilmiş olup çiğ soya fasulyesinde en baskın şekerin sükroz olduğu çimlenme süresi ile sükroz içeriğinin de azaldığı bulunmuştur [55]. Tohum çimlenmesi sırasında gerekli enerjinin depolanmış karbonhidratlardan, sükroz ve oligosakkaritler gelmesi bu azalışın nedeni olarak düşünülmektedir [56].

7. Baklagillerin çimlenmesi ile antioksidan aktivitede meydana gelen değişiklikler

Çimlenme, proteaz, amilaz ve lipaz gibi endojen enzimleri aktive ederek ve serbest bırakarak tohumun uykuda kalma durumunu sonlandırır [57]. Çimlendirilmiş tahıllar ve baklagiller, antioksidan aktiviteleri nedeniyle insan sağlığını destekleyen polifenoller, gama-aminobütirik asit (GABA), flavonoidler ve tanenler gibi çeşitli biyoaktif bileşikler açısından zengindir [34]. Çiğ ve çimlendirilmiş güvercin bezelyelerinin antioksidan kapasiteleri DPPH analizi ile karşılaştırıldığında, çiğ örneklerin antioksidan kapasiteleri 102,3 mg TE/100 g kuru madde seviyesinden 72 saatin sonunda 129,0 mg TE/100 g kuru madde seviyesine bir artış göstermiştir [44] (Tablo 4.). Bu artış antioksidan bileşiklerin artan biyosentezini yansıtmaktadır ve artan antioksidan aktivite fenolik asit ve flavonoid içeriklerindeki artışa bağlanabilir. Biyoaktif bileşikler ile antioksidan kapasite arasında pozitif bir ilişki olduğu bilinmektedir [58].

Çiğ, çimlendirilmiş ve haşlanmış mercimek tohumlarının fizikokimyasal ve biyoaktif özelliklerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada [59] mercimek tohumlarının antioksidan aktivite değerleri 3,02 mg TE/kg (kontrol), 0,70 mg TE/kg (çimlendirilmiş) ile 3,35 mg TE/kg (haşlanmış) arasında tespit edilmiş olup en yüksek antioksidan aktiviteyi haşlanmış mercimek tohumlarının gösterdiği rapor edilmiştir. Çimlenmiş mercimek tohumlarının antioksidan aktivitesinin düşme nedenleri çimlenme sırasında biyoaktif bileşenlerin yapısının enzim aktivitesi ve uygulanan sıcaklık ile bozulmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca bir diğer neden olarak çimlenmiş ve haşlanmış örneklerin nem içeriğinin artmasının (yüksek su içeriği) bu örneklerde toplam fenol miktarının kontrol grubuna göre düşmesine bağlanmaktadır [59]. Çimlenme sırasında bağlı fenolik bileşiklerin serbest hale geldiği ve toplam fenolik içerikte artışa neden olduğu bilinmektedir [60]. Mercimek yüksek fenolik içeriğe sahip olduğundan antioksidan aktivitesi de yüksektir. Bu nedenle mercimek tohumlarının fenolik bileşeni ile antioksidan aktivite değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu bildirilmiştir [61].

Tablo 4. Çimlenme ile baklagillerde antioksidan aktivite değişimleri

Baklagil Türü	Çimlenme Koşulları	Başlangıç Aktivite	Çimlenme Sonrası Aktivite	Değişim (%)	Mekanizma ve Açıklama	Kaynak
Güvercin Bezelyesi (<i>Cajanus cajan</i>)	0-72 saat	102,3 mg TE/100 g (DPPH)	129,0 mg TE/100 g (DPPH)	+26,1	Fenolik asit ve flavonoid biyosentezinde artış; bağlı fenoliklerin serbestleşmesi → radikal süpürücü kapasite ↑	[44], [58]
Mercimek (<i>Lens culinaris</i>)	Çiğ, 72 saat çimlenme, haşlama	Kontrol: 3,02 mg TE/kg; Çimlenmiş: 0,70 mg TE/kg; Haşlanmış: 3,35 mg TE/kg	Çimlenme: - 76,8; Haşlama: +10,9 (kontrole göre)	Değişken	Çimlenmede bağlı fenoliklerin serbestleşmesine rağmen serbest radikal yakalama kapasitesinde düşüş; haşlama fenoliklerin stabilitesini artırarak aktiviteyi yükseltmiştir	[59], [61]

8. Sonuçlar/Conclusions

Bu derleme, baklagillerin çimlenme sürecinin besin bileşimi ve biyolojik aktiviteler üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. İnsanların dengeli beslenme konusundaki farkındalığının artmasıyla birlikte bitki bazlı gıda tüketimi önemli ölçüde artmaktadır. Bitkisel gıdalara artan talep, baklagillerin önemine dikkat çekmiştir. Baklagillerin çimlendirilmesi yapılarında önemli değişikliklere yol açarak baklagilleri besin açısından zengin hale getirir. Baklagillerin türüne bağlı olmakla birlikte çimlendirme ile protein miktarı artar, şeker kompozisyonları değişir, toplam fenolik madde artar ve buna bağlı antioksidan kapasiteleri de artarak çimlenmiş tohumları insanlar için daha sağlıklı bir seçenek haline getirir. Çok sayıda araştırma, çimlenmiş yenilebilir tohumların, özellikle bu ürünlerin istenen besinsel ve işlevsel özelliklerini iyileştirmek için çok çeşitli gıdalarla işlenmesinde başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Çimlenmiş baklagiller, besin alımını ve sağlığı artırabilecek fonksiyonel gıdalar olarak büyük bir potansiyel sunmaktadır. Gelecekte, çimlenme sürecinde rol oynayan biyoaktif bileşenler ve biyolojik aktiviteler üzerine yapılacak derinlemesine araştırmalar, çimlenmiş baklagil tohumlarının geliştirilmesi ve gıda endüstrisinde daha yaygın kullanımını destekleyecektir.

Fonlayan Kuruluş/ Funding Institution

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi Proje Numarası/ Grant No: 25103008.

Yazar Katkısı/ Authors' Contributions

ND: Kavramsallaştırma, Yazım- Orijinal taslak hazırlama, Araştırma. **HK:** Yazım- İnceleme ve Düzenleme, Doğrulama, Gözetim.

Etik Standartların Beyanı/ Declaration of Ethical Standards

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Çıkar Çatışması/ Conflict of Interest

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

Kaynaklar/References

- [1] del Socorro López-Cortez, M., Rosales-Martínez, P., Arellano-Cárdenas, S., & Cornejo-Mazón, M. (2016). Antioxidants properties and effect of processing methods on bioactive compounds of legumes. In *Grain legumes*. IntechOpen.
- [2] Kouris-Blazos, A., & Belski, R. (2016). Health benefits of legumes and pulses with a focus on Australian sweet lupins. *Asia Pacific journal of clinical nutrition*, 25(1), 1-17.
- [3] Röös, E., Carlsson, G., Ferawati, F., Hefni, M., Stephan, A., Tidåker, P., & Witthöft, C. (2020). Less meat, more legumes: prospects and challenges in the transition toward sustainable diets in Sweden. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 35(2), 192-205.
- [4] Uebersax, M. A., Cichy, K. A., Gomez, F. E., Porch, T. G., Heitholt, J., Osorno, J. M., ... & Bales, S. (2023). Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security—A review. *Legume science*, 5(1), e155.
- [5] Grdeń, P., & Jakubczyk, A. (2023). Health benefits of legume seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(11), 5213-5220.
- [6] Naghshi, S., Sadeghi, O., Willett, W. C., & Esmailzadeh, A. (2020). Dietary intake of total, animal, and plant proteins and risk of all cause, cardiovascular, and cancer mortality: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *Bmj*, 370.
- [7] Ferreira, H., Vasconcelos, M., Gil, A. M., & Pinto, E. (2021). Benefits of pulse consumption on metabolism and health: A systematic review of randomized controlled trials. *Critical reviews in food science and nutrition*, 61(1), 85-96.
- [8] Bera, I., O'Sullivan, M., Flynn, D., & Shields, D. C. (2023). Relationship between protein digestibility and the proteolysis of legume proteins during seed germination. *Molecules*, 28(7), 3204.
- [9] Jha, U. C., Nayyar, H., Parida, S. K., Deshmukh, R., von Wettberg, E. J., & Siddique, K. H. (2022). Ensuring global food security by improving protein content in major grain legumes using breeding and 'Omics' tools. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(14), 7710.
- [10] Maphosa, Y., & Jideani, V. A. (2017). The role of legumes in human nutrition. *Functional food-improve health through adequate food*, 1, 13.
- [11] Jukanti, A. K., Gaur, P. M., Gowda, C. L. L., & Chibbar, R. N. (2012). Nutritional quality and health benefits of chickpea (*Cicer arietinum* L.): a review. *British Journal of Nutrition*, 108(S1), S11-S26.
- [12] Rahate, K. A., Madhumita, M., & Prabhakar, P. K. (2021). Nutritional composition, anti-nutritional factors, pretreatments-cum-processing impact and food formulation potential of faba bean (*Vicia faba* L.): A comprehensive review. *Lwt*, 138, 110796.
- [13] Hefnawy, T. H. (2011). Effect of processing methods on nutritional composition and anti-nutritional factors in lentils (*Lens culinaris*). *Annals of Agricultural Sciences*, 56(2), 57-61.
- [14] Atudorei, D., Stroe, S. G., & Codină, G. G. (2021). Impact of germination on the microstructural and physicochemical properties of different legume types. *Plants*, 10(3), 592.
- [15] Ohanenye, I. C., Tsopmo, A., Ejike, C. E., & Udenigwe, C. C. (2020). Germination as a bioprocess for enhancing the quality and nutritional prospects of legume proteins. *Trends in Food Science & Technology*, 101, 213-222.
- [16] Ali, A. S., & Elozeiri, A. A. (2017). Metabolic processes during seed germination. *Advances in seed biology*, 2017, 141-166.
- [17] Gan, R. Y., Lui, W. Y., Wu, K., Chan, C. L., Dai, S. H., Sui, Z. Q., & Corke, H. (2017). Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: An updated review. *Trends in Food Science & Technology*, 59, 1-14.
- [18] Singh, A., & Sharma, S. (2017). Bioactive components and functional properties of biologically activated cereal grains: A bibliographic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(14), 3051-3071.
- [19] Paucar-Menacho, L. M., Berhow, M. A., Mandarino, J. M. G., Chang, Y. K., & De Mejia, E. G. (2010). Effect of time and temperature on bioactive compounds in germinated Brazilian soybean cultivar BRS 258. *Food research international*, 43(7), 1856-1865.
- [20] Onwuka, Q. I., Chinma, C. E., Ezeocha, V. C., Otegbayo, B., Oyeyinka, S. A., Adebo, J. A., ... & Adebo, O. A. (2024). Short-term germinated legume flours as functional ingredients in food products. *Journal of Food Science*, 89(10), 6070-6085.
- [21] Chinma, C. E., Abu, J. O., Adedeji, O. E., Aburime, L. C., Joseph, D. G., Agunloye, G. F., ... & Adebo, O. A. (2022). Nutritional composition, bioactivity, starch characteristics, thermal and microstructural properties of germinated pigeon pea flour. *Food Bioscience*, 49, 101900.

- [22] Lakshmipathy, K., Buvaneswaran, M., Rawson, A., & Chidanand, D. V. (2024). Effect of dehulling and germination on the functional properties of grass pea (*Lathyrus sativus*) flour. *Food Chemistry*, 449, 139265.
- [23] López-Martínez, L. X., Leyva-López, N., Gutiérrez-Grijalva, E. P., & Heredia, J. B. (2017). Effect of cooking and germination on bioactive compounds in pulses and their health benefits. *Journal of functional foods*, 38, 624-634.
- [24] Shohag, M. J. I., Wei, Y., & Yang, X. (2012). Changes of folate and other potential health-promoting phytochemicals in legume seeds as affected by germination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(36), 9137-9143.
- [25] Ferrari, L., Panaite, S. A., Bertazzo, A., & Visioli, F. (2022). Animal-and plant-based protein sources: a scoping review of human health outcomes and environmental impact. *Nutrients*, 14(23), 5115.
- [26] Bernstein, A. M., Pan, A., Rexrode, K. M., Stampfer, M., Hu, F. B., Mozaffarian, D., & Willett, W. C. (2012). Dietary protein sources and the risk of stroke in men and women. *Stroke*.
- [27] Gorissen, S. H., Crombag, J. J., Senden, J. M., Waterval, W. H., Bierau, J., Verdijk, L. B., & Van Loon, L. J. (2018). Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. *Amino acids*, 50(12), 1685-1695.
- [28] Najib, T., Heydari, M. M., Tu, K., Vu, M., & Meda, V. (2023). Protein structural changes in lentil flour during soaking/germination and thermal treatments: Indication of nutritional and functional properties. *Food Chemistry Advances*, 3, 100475.
- [29] Ferreira, C. D., Bubolz, V. K., da Silva, J., Dittgen, C. L., Ziegler, V., de Oliveira Raphaelli, C., & de Oliveira, M. (2019). Changes in the chemical composition and bioactive compounds of chickpea (*Cicer arietinum* L.) fortified by germination. *LWT*, 111, 363-369.
- [30] Xu, M., Jin, Z., Simsek, S., Hall, C., Rao, J., & Chen, B. (2019). Effect of germination on the chemical composition, thermal, pasting, and moisture sorption properties of flours from chickpea, lentil, and yellow pea. *Food chemistry*, 295, 579-587.
- [31] Fouad, A. A., & Rehab, F. M. (2015). Effect of germination time on proximate analysis, bioactive compounds and antioxidant activity of lentil (*Lens culinaris* Medik.) sprouts. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 14(3), 233-246.
- [32] Chinma, C. E., Abu, J. O., Asikwe, B. N., Sunday, T., & Adebo, O. A. (2021). Effect of germination on the physicochemical, nutritional, functional, thermal properties and in vitro digestibility of Bambara groundnut flours. *Lwt*, 140, 110749.
- [33] Setia, R., Dai, Z., Nickerson, M. T., Sopiwnyk, E., Malcolmson, L., & Ai, Y. (2019). Impacts of short-term germination on the chemical compositions, technological characteristics and nutritional quality of yellow pea and faba bean flours. *Food Research International*, 122, 263-272.
- [34] Gunathunga, C., Senanayake, S., Jayasinghe, M. A., Brennan, C. S., Truong, T., Marapana, U., & Chandrapala, J. (2024). Germination effects on nutritional quality: A comprehensive review of selected cereals and pulses changes. *Journal of Food Composition and Analysis*, 128, 106024.
- [35] Liu, S., Wang, W., Lu, H., Shu, Q., Zhang, Y., & Chen, Q. (2022). New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 123, 187-197.
- [36] Berns RS. (2000). *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*, 3rd edn. Wiley, NY
- [37] Liu, Y., Xu, M., Wu, H., Jing, L., Gong, B., Gou, M., ... & Li, W. (2018). The compositional, physicochemical and functional properties of germinated mung bean flour and its addition on quality of wheat flour noodle. *Journal of food science and technology*, 55(12), 5142-5152.
- [38] Tian, B., Xie, B., Shi, J., Wu, J., Cai, Y., Xu, T., ... & Deng, Q. (2010). Physicochemical changes of oat seeds during germination. *Food Chemistry*, 119(3), 1195-1200.
- [39] Palmiano, E. P., & Juliano, B. O. (1973). Changes in the activity of some hydrolases, peroxidase, and catalase in the rice seed during germination. *Plant Physiology*, 52(3), 274-277.
- [40] Rui, J., Ya-ting, L., Peng-ling, O., Man-tang, Y., Qi-lian, L., & Li-hua, S. (2018). Effects of germination on free amino acids and other nutrients in black barley. *Science and Technology of Food Industry*, 38-42.
- [41] Ma, Z., Boye, J. I., & Hu, X. (2017). In vitro digestibility, protein composition and techno-functional properties of Saskatchewan grown yellow field peas (*Pisum sativum* L.) as affected by processing. *Food Research International*, 92, 64-78.
- [42] Wongsiri, S., Ohshima, T., & Duangmal, K. (2015). Chemical composition, amino acid profile and antioxidant activities of germinated mung beans (*Vigna radiata*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1956-1964.
- [43] Randhir, R., Lin, Y. T., & Shetty, K. (2004). Stimulation of phenolics, antioxidant and antimicrobial activities in dark germinated mung bean sprouts in response to peptide and phytochemical elicitors. *Process Biochemistry*, 39(5), 637-646.

- [44] Papayrata, C., Saensouk, S., & Chumroenphat, T. (2024). Influence of germination time on free amino acids, phenolic compounds and γ -aminobutyric acid in pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Huth) seeds. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 52(3), 13674-13674.
- [45] Qi, Q., Zhang, G., Wang, W., Sadiq, F. A., Zhang, Y., Li, X., ... & Li, Y. (2022). Preparation and antioxidant properties of germinated soybean protein hydrolysates. *Frontiers in Nutrition*, 9, 866239.
- [46] Guo, N., Zhang, S., Gu, M., & Xu, G. (2021). Function, transport, and regulation of amino acids: What is missing in rice?. *The Crop Journal*, 9(3), 530-542.
- [47] Salawu, S. O., Bester, M. J., & Duodu, K. G. (2014). Phenolic composition and bioactive properties of cell wall preparations and whole grains of selected cereals and legumes. *Journal of Food Biochemistry*, 38(1), 62-72.
- [48] Ziegler, V., Muller, C. P., Mossmann, V., Dihel, G. W., Ferreira, C. D., Hoffmann, J. F., ... & Rossi, R. C. (2021). Fortification of bioactive components in mung bean grains through germination and evaluation of their cytotoxic activity in colorectal adenocarcinoma cells. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(6), 5211-5220.
- [49] Alkaltham, M. S., Salamatullah, A. M., Özcan, M. M., Uslu, N., & Hayat, K. (2020). The effects of germination and heating on bioactive properties, phenolic compounds and mineral contents of green gram seeds. *Lwt*, 134, 110106.
- [50] Huang, X., Cai, W., & Xu, B. (2014). Kinetic changes of nutrients and antioxidant capacities of germinated soybean (*Glycine max* L.) and mung bean (*Vigna radiata* L.) with germination time. *Food Chemistry*, 143, 268-276.
- [51] Kaczmarek, K. T., Chandra-Hioe, M. V., Zabaras, D., Frank, D., & Arcot, J. (2017). Effect of germination and fermentation on carbohydrate composition of Australian sweet lupin and soybean seeds and flours. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(46), 10064-10073.
- [52] Goyoaga, C., Burbano, C., Cuadrado, C., Romero, C., Guillamon, E., Varela, A., ... & Muzquiz, M. (2011). Content and distribution of protein, sugars and inositol phosphates during the germination and seedling growth of two cultivars of *Vicia faba*. *Journal of food composition and analysis*, 24(3), 391-397.
- [53] Trugo, L. C., Muzquiz, M., Pedrosa, M. M., Ayet, G., Burbano, C., Cuadrado, C., & Cavieles, E. (1999). Influence of malting on selected components of soya bean, black bean, chickpea and barley. *Food Chemistry*, 65(1), 85-90.
- [54] Urbano, G., López-Jurado, M., Ławomir Frejnagel, S., Gómez-Villalva, E., Porres, J. M., Frías, J., ... & Aranda, P. (2005). Nutritional assessment of raw and germinated pea (*Pisum sativum* L.) protein and carbohydrate by in vitro and in vivo techniques. *Nutrition*, 21(2), 230-239.
- [55] Kim, S. L., Lee, J. E., Kwon, Y. U., Kim, W. H., Jung, G. H., Kim, D. W., ... & Chung, I. M. (2013). Introduction and nutritional evaluation of germinated soy germ. *Food Chemistry*, 136(2), 491-500.
- [56] Peterbauer, T., & Richter, A. (2001). Biochemistry and physiology of raffinose family oligosaccharides and galactosyl cyclitols in seeds. *Seed Science Research*, 11(3), 185-197.
- [57] Guzmán-Ortiz, F. A., Castro-Rosas, J., Gómez-Aldapa, C. A., Mora-Escobedo, R., Rojas-León, A., Rodríguez-Marín, M. L., ... & Román-Gutiérrez, A. D. (2019). Enzyme activity during germination of different cereals: A review. *Food Reviews International*, 35(3), 177-200.
- [58] Fendri, L. B., Chaari, F., Kallel, F., Koubaa, M., Zouari-Ellouzi, S., Kacem, I., ... & Ghribi-Aydi, D. (2022). Antioxidant and antimicrobial activities of polyphenols extracted from pea and broad bean pods wastes. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(6), 4822-4832.
- [59] Alkaltham, M. S., Musa Özcan, M., Uslu, N., Salamatullah, A. M., & Hayat, K. (2022). Changes in antioxidant activity, phenolic compounds, fatty acids, and mineral contents of raw, germinated, and boiled lentil seeds. *Journal of Food Science*, 87(4), 1639-1649.
- [60] Tian, S., Nakamura, K., & Kayahara, H. (2004). Analysis of phenolic compounds in white rice, brown rice, and germinated brown rice. *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(15), 4808-4813.
- [61] Xu, B. J., & Chang, S. K. (2007). A comparative study on phenolic profiles and antioxidant activities of legumes as affected by extraction solvents. *Journal of food science*, 72(2), S159-S166.