



STM32F103C8 mikrodenetleyicisi temelli PLC tasarımı

Gamze Öztürk^{1*}, Murat Uzam¹

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi
03.08.2024
Kabul tarihi
16.09.2024
Yayın tarihi
31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

PLC
STM32
STM32CubeIDE
STM32F103C8 Mikrodenetleyici

ÖZET

Bu çalışmada STM32F103C8 mikrodenetleyici temelli bir PLC (programlanabilir lojik denetleyici) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu PLC'de STM32F103C8 mikrodenetleyicisi merkezi işlem birimi (CPU) olarak kullanılmış olup 8 dijital giriş ve 8 dijital çıkış mevcuttur. PLC yazılımı C dili kullanılarak STM32CubeIDE yazılım geliştirme ortamında oluşturulmuştur. STM32F103C8 mikrodenetleyicisi ile gerçekleştirilen bu PLC ile giriş/çıkış sayısı fazla olmayan endüstriyel otomasyon uygulamaları için ideal bir seçenek ortaya konulmuştur. Önerilen STM32F103C8 mikrodenetleyicisi tabanlı PLC tasarımıyla düşük maliyetli ve hızlı endüstriyel otomasyon uygulamaları için çok uygun bir çözüm elde edilmiştir.

PLC design based on STM32F103C8 microcontroller

ARTICLE INFO

Article history:

Received
03.08.2024
Accepted
16.09.2024
Published
31.12.2024

Keywords:

PLC
STM32
STM32CubeIDE
STM32F103C8 Microcontroller

ABSTRACT

In this study, a PLC (programmable logic controller) design based on STM32F103C8 microcontroller was carried out. In this PLC, STM32F103C8 microcontroller is used as the central processing unit (CPU) and it has 8 digital inputs and 8 digital outputs. PLC software was created in the STM32CubeIDE software development environment using C language. This PLC, implemented with the STM32F103C8 microcontroller, is an ideal option for industrial automation applications that do not have many inputs/outputs. An attractive solution for low-cost and fast industrial automation applications has been achieved with the proposed STM32F103C8 microcontroller-based PLC design.

1. GİRİŞ

Programlanabilir lojik denetleyiciler (Programmable Logic Controllers – PLC) mikroişlemci veya mikrodenetleyici temelli olarak üretilen otomasyon cihazlarıdır. PLC'ler 1970'lerin başından itibaren endüstride çok yaygın olarak kullanılmaktadır. PLC üreticileri değişik fonksiyonlara sahip, farklı hafıza kapasiteleri olan, birkaç giriş-çıkıştan binlerce giriş-çıkışa kadar değişik sayıda giriş-çıkışı bulunan, farklı büyüklüklerde pek çok PLC üretip kullanıma sunmaktadır. Otomasyon sistemlerinin en önemli parçası olan PLC'ler çoğunlukla yabancı üreticilerin ürünleri olmakla birlikte yerli üreticilerin piyasaya sunduğu PLC'ler de mevcuttur. PLC üreticileri doğal olarak üretmiş oldukları donanımı ve yazılımı koruma altına alarak özellikle yazılımın rakip firmaların eline geçmesine müsaade etmemektedirler. Dışa bağımlılığı azaltmak için Türkiye'deki yerli ve milli PLC üreticileri de

ORCID ID: Gamze Öztürk: 0009-0005-3898-8055; Murat Uzam: 0000-0001-9625-5523

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

Tel:+90 354 2421032

Fax: +90 354 242 10 56

E-mail: 91111722004@bozok.edu.tr

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: Öztürk, G., Uzam, M., "STM32F103C8 Mikrodenetleyicisi Temelli PLC Tasarımı", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 1-12, 2024.

alternatif PLC'leri üreterek kullanıcılara sunmaktadırlar. Bu kapsamda PLC teknolojisinin geliştirilmesi için yapılacak olan çalışmalar çok büyük önem arz etmektedir.

Literatürde akademik çalışmalar incelendiğinde, 2007 yılında PIC16F84 mikrodeneleyicisi temelli 8 dijital girişli/8 dijital çıkışlı ve 5 MHz frekansında çalışan bir PLC çalışması görülmektedir. Yapılan çalışmada 5V DC gerilimle çalışan 8 giriş 74LS165 paralelden seriye dönüşüm yapan bir shift register yardımıyla PIC16F84 tarafından okunmaktadır. 8 çıkış ise 12V DC gerilimle çalışan röleler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen PLC'nin yazılımında PLC'lerde kullanılmakta olan 'Boolean dili programlama' ya da komut listesi (statement list) olarak bilinen yöntemdekine benzer bir programlama ortamı oluşturulmuştur. Bunun için PIC assembly dili kullanılarak PLC komutları için makrolar yazılmıştır. Tasarlanan ve gerçekleştirilen PIC16F84 mikrodeneleyicisi temelli PLC'nin gerçek sistemlerin kontrolünde kullanılabilirliğinin test edilmesi amacıyla iki örnek sistem incelenmiştir. İki sistem için farklı çalışma senaryoları ele alınmış ve yazılan kontrol kodu sayesinde bu sistemlerin kontrolü başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen PLC yardımıyla küçük ölçekli otomasyon problemlerinin çözümü için çok ucuz bir ürün ortaya koyulmuştur [1]. 2008 yılında PIC16F877 Mikrodeneleyicisi temelli 7 dijital girişli/6 dijital çıkışlı bir PLC tasarlanmıştır. Merdiven (ladder) diyagramlarıyla yazılım geliştirebilecek gelişime açık bir bilgisayar yazılımı ve bu yazılımla gerçekleştirilen programları çalıştırabilecek üzerinde analog giriş-çıkışları, LCD paneli, tuş takımı, dijital girişleri ve röleli çıkışları olan bir PLC gerçekleştirilmiştir. Bu PLC'nin hem donanımı hem de yazılımı geliştirmeye açıktır [2]. 2008 yılında Atmega128 mikrodeneleyicisi tabanlı bir PLC tasarımı mevcuttur. Tasarlanan bu PLC için kontrol devrelerinin simülasyonunu yapabilen, hex kodlar üretebilen bir arayüz yazılımı geliştirilmiştir. Simülasyon programında kullanılan her bir nesne bir komut ile ifade edilmiştir. Derleyici her bir nesneye ait komutların hex kodlarını üretmektedir. Geliştirilen yorumlayıcı bu hex kodları tanıyarak mikrodeneleyiciye gerekli işlem komutlarını göndermektedir. Mevcut sistemin komut kümesi sınırlı olmasına karşın tasarlanan yazılım mimarisi komut kümesini geliştirmeye ve gelişmiş Atmega serisi mikrodeneleyicilerle kullanılmaya imkan tanımaktadır [3]. 2010 yılında PIC16F877 Mikrodeneleyicisi temelli başka bir 6 dijital girişli/5 dijital çıkışlı bir PLC tasarlanmıştır. Yapılan bu çalışmada PIC16F877 mikrodeneleyicisi kullanarak bir PLC tasarlanmıştır. Kullanılan PIC mikrodeneleyicisinde dijital portlarının yanında analog portları da kullanılmaktadır. Bu analog portları yardımı ile endüstriyel sistemlerde sıcaklık, basınç, hız, ivme, ağırlık v.s gibi sayısal değerlerin okunması ve bu değerlerin hesaplanarak dijital değerlere dönüştürülmesi mümkündür. Kullanılan PIC'in toplam 17 giriş-çıkış pini mevcuttur: 5V DC gerilim ile çalışan 6 dijital giriş, 5V DC ile çalışan 5 dijital röle çıkışı, 4 analog giriş. A/D dönüşümü için PIC16F877'nin ADC00, ADC01, ADRESH, ADRESL isimli dört tane kaydedicisi kullanılmaktadır. 2 PWM girişi, PWM sinyali üretmek için PIC16F877'nin CCP1CON, CCP2CON, T2CON, PR1, CCPR1L, CCPR2L isimli altı tane kaydedicisi kullanılmıştır. PIC 4 MHz çalışma frekansı ile işlem yapmaktadır. Hex kodlar üretebilen bir arayüz yazılımı geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen arayüz yazılımında merdiven (ladder diagram) diyagramı ve komut listesine (statement list) benzer bir programlama ortamı oluşturulmuştur [4]. 2011 yılında 16 bitlik bir PIC mikrodeneleyicisi ile 16 dijital girişli/16 dijital çıkışlı bir PLC tasarımı mevcuttur. 16 bitlik bir mikrodeneleyici kullanılarak program hafıza kapasitesi, çalışma hızı ve diğer donanım özellikleri, küçük kapasiteli 8 bitlik ve çok yüksek kapasiteli 32 bitlik PIC mikrodeneleyicilerine göre orta büyüklükte olan bir PLC'nin tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmayla donanım ve yazılım özellikleri olarak orta büyüklükteki endüstriyel çözümler için uygun bir endüstriyel kontrol aracı elde edilmiştir. Gerçekleştirilen PLC yazılımı PIC C dili ile MPLAB IDE yazılım geliştirme ortamı yardımıyla geliştirilmiştir [5]. 2013 yılında PIC16F877A mikrodeneleyici temelli 16 dijital girişli/16 dijital çıkışlı bir PLC tasarımı detaylı olarak açıklanmıştır. Bu PLC'nin çalışma frekansı 20 MHz'dir [6]. 2013'deki PLC donanım ve yazılım olarak geliştirilerek 2022 yılında sunulmuştur. Girişler kısmında 16 adet ayrık giriş (discrete inputs) düzenlenmiştir. Her bir ayrık girişten 5V DC ya da 24V DC giriş sinyallerini kabul edilebilmektedir. Harici giriş sinyalleri NPN tipi PC817 bir optik yalıtıcı (opto-coupler) kullanılarak PLC kartındaki diğer kısımlardan elektriksel olarak izole edilmiştir. Harici girişlerin kullanılmadığı uygulamalarda, girişlerin simülasyonunu yapabilmek için kart üzerinde her bir giriş için ani temaslı bir buton ve bir sürgülü anahtar mevcuttur. Her bir girişte, giriş sinyalinin aktif olması durumunu gösteren bir LED kullanılmıştır. Çıkışlar kısmında, 16 adet ayrık röle çıkışı (discrete relay outputs) düzenlenmiştir. Her röle 12V DC ile çalışmaktadır. Her biri 8 röleyi süren iki adet ULN2803A darlington transistör sürücü entegresi yardımıyla 16 röle çalıştırılmaktadır. Her rölede, C (common – ortak uç), NC (normally closed – normalde kapalı) ve NO (normally open – normalde açık) olmak üzere üç bağlantı ucu olan SPDT (single pole double throw – tek grup iki konumlu) kontaklar mevcuttur. Devrede, her bir rölenin çalışmakta olduğunu gösteren bir LED mevcuttur. Röleleri sürmek için 220V AC/12V DC 3A adaptör kullanılır. PIC16F877A'nın, 16 adet ayrık röle çıkışı sürmek için kullanılan 16 çıkışlarıyla röle sürücü devresini elektriksel olarak izole etmek için PC817 optik izolatörler kullanılmıştır. PIC PLC'ye direk olarak program yükleme işlemi yapmak için MPLAB X IDE tarafından desteklenen bir programlayıcıyla gerçekleştirilmiştir. PIC16F877A mikrodeneleyicisi 20 MHz'te çalıştırılmaktadır. Bu çalışma frekansı, zaman gecikmesi fonksiyonlarındaki hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu sebeple, farklı çalışma frekanslarında bu projede tanımlı olan zaman gecikmeleri geçerli olmayacaktır [7]. Gerçekleştirilen STM32F103C8 mikrodeneleyicisi temelli PLC tasarımı ise yerli ve milli PLC geliştirilmesi çalışmalarına katkı yapılması hedeflenmiştir. STM32F103C8 mikrodeneleyicisi kullanarak özellikle küçük çaplı uygulamalar için hem

yeterince hızlı hem de düşük maliyetli bir PLC tasarlanmıştır. Bu PLC'nin merkezi işlem birimi (CPU) olarak STMMicroelectronics firması tarafından üretilen 72 MHz clock frekansında çalışan STM32F103C8 (32-bit ARM Cortex-M3) mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. PLC'nin 8 dijital girişi ve 8 dijital çıkışı bulunmaktadır. Bu sayede özellikle zaman-kritik sistemler için kullanılması söz konusu olabilecek bir PLC altyapısı oluşturulması mümkün olmuştur. Bu tasarımın geliştirilmesiyle de hem çok hızlı hem de geniş işlem gücü ve çevresel uyumluluğu sayesinde düşük maliyetli olarak çok uygun bir PLC elde edilmiştir. Tasarlanan PLC'nin temel işlevlerini gerçekleştirmek için gerekli olan giriş/çıkış bağlantıları, STM32F103C8 mikrodenetleyicisi üzerindeki GPIO pinleri kullanılarak sağlanır. Bu, harici bileşenlere olan ihtiyacı azaltır ve tasarımı daha ekonomik hale getirir. Ayrıca, STM32F103 mikrodenetleyicilerinin geniş bir programlama diline sahip olması PLC yazılımını hızlı ve pratik bir şekilde geliştirmeyi mümkün kılar. Tasarlanan PLC STM32CubeIDE bütünlük geliştirme ortamı kullanılarak kolayca kodlanabilmektedir. Bu da projenin daha da erişilebilir olmasını sağlamıştır.

1.1. Makale İçeriği

Bu çalışma oluşturulurken STM32F103XX mikrodenetleyicileri ve kullanılan mikrodenetleyiciye ait temel bilgilerden ele alınarak tasarlanan PLC donanımı detaylı olarak incelenerek gerçekleştirilen PLC'ye ait temel yazılım bileşenleri vurgulanmıştır. PLC yazılım kısmında yer alan sırasıyla kontak ve röle temelli fonksiyonlar detaylı, sayıcı fonksiyonları, zamanlayıcı fonksiyonları, karşılaştırma fonksiyonları ve aritmetik fonksiyonlar, lojik ve kaydırma fonksiyonları örneklerle birlikte incelenmektedir. Son olarak elde edilen sonuçlar vurgulanmıştır.

1.2. Semboller, Birimler ve Kısaltmalar

Programlanabilir Lojik Denetleyici (Programmable Logic Controller-PLC, STM32F103C8 mikrodenetleyici, PLC Donanımı, Dijital Girişler, Dijital Çıkışlar, İleri Sayıcı (Up Counter-CTU), Geri Sayıcı (Down Counter-CTD), İleri/Geri Sayıcı (Up/Down Counter-CTUD), Düz Zaman Rölesi (On Delay Timer-TON), Ters Zaman Rölesi (Off Delay Timer-TOF), Karşılaştırma Fonksiyonları, Aritmetik Fonksiyonları, Lojik ve Kaydırma Fonksiyonları.

2. MATERYAL ve METOT

Gerçekleştirilen çalışmada PLC donanım ve yazılım tasarımlarını için bir bilgisayar kullanılmıştır. STM32F103C8 Mikrodenetleyicisi temelli geliştirme kartının bir protoboard üzerine yerleştirilmesi ve gerekli bağlantıların kablolar kullanılarak gerçekleştirilmesi sonrasında elde edilen PLC donanımı oluşturulmuştur. Bağlantıların yapılabilmesi için STM32F103C8 mikrodenetleyicisinin kullanım kılavuzlarından yararlanılarak fiziksel giriş/çıkışlar kullanılmıştır. Laboratuvar ortamlarında güç kaynaklarından faydalanılarak bilgisayarda yazılımlar STM32CubeIDE geliştirme programına yazılıp testler ve simülasyonlar yapılmıştır. Buna ek olarak proje kapsamında ihtiyaç duyulan ekranda bir monitör ihtiyacı karşılamak için Putty programı yardımıyla RS 232 USB-TTL dönüştürücü modülü kullanılmıştır. Gerçekleştirilen PLC'de C dili kullanılarak tasarım sağlanmış olup kullanılan STM32CubeIDE programında aşağıda belirtilen özellikler yer almaktadır:

Başlık dosyaları (#include "main.h", #include "definitions.h", #include <stdarg.h> gibi programın başlangıcında yer almaktadır ve bu dosyalar, standart giriş/çıkış işlevlerini ve diğer önemli fonksiyonları içerir.

C programlarının ana başlangıç noktası main() fonksiyonudur. Bu fonksiyon, programın çalışmasını başlatır ve diğer fonksiyonları çağırabilir. Gerçekleştirilen projede main() fonksiyonu şu şekilde başlar:

```
int main(void)
{
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();
    MX_TIM1_Init();
    USART2_setup();
    // Programda kod burada yazılmıştır.
}
```

Program içinde kullanılacak olan değişkenler tanımlanır.

Her satırın sonuna mutlaka ';' işareti getirilmelidir.

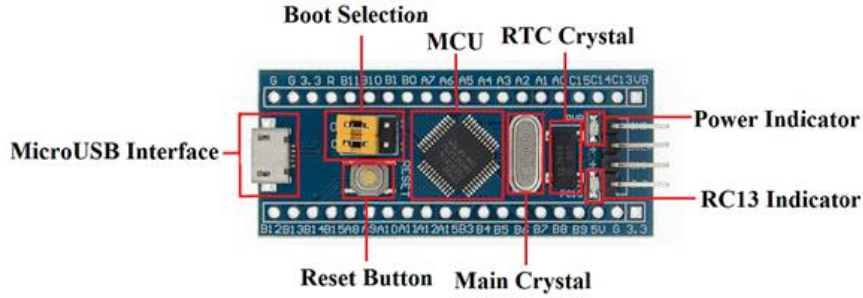
Her bloğun ve fonksiyonun başlangıcı ve bitişi sırasıyla '{' ve '}' sembolleri ile ifade edilir.

Açıklama operatörü '/*, */' sembolleri ile ifade edilir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında seçilen STM32F103C8 mikrodenetleyicinin yapısı ve bu çalışma kapsamında kullanılan bazı özellikleri incelenmektedir. STM32F103XX mikrodenetleyicileri orta yoğunluklu performans hattı ailesi olarak bilinir. 72 MHz frekansında çalışan yüksek performanslı Arm® Cortex®-M3 32-bit RISC çekirdeği, yüksek hızlı gömülü bellekleri içerir.

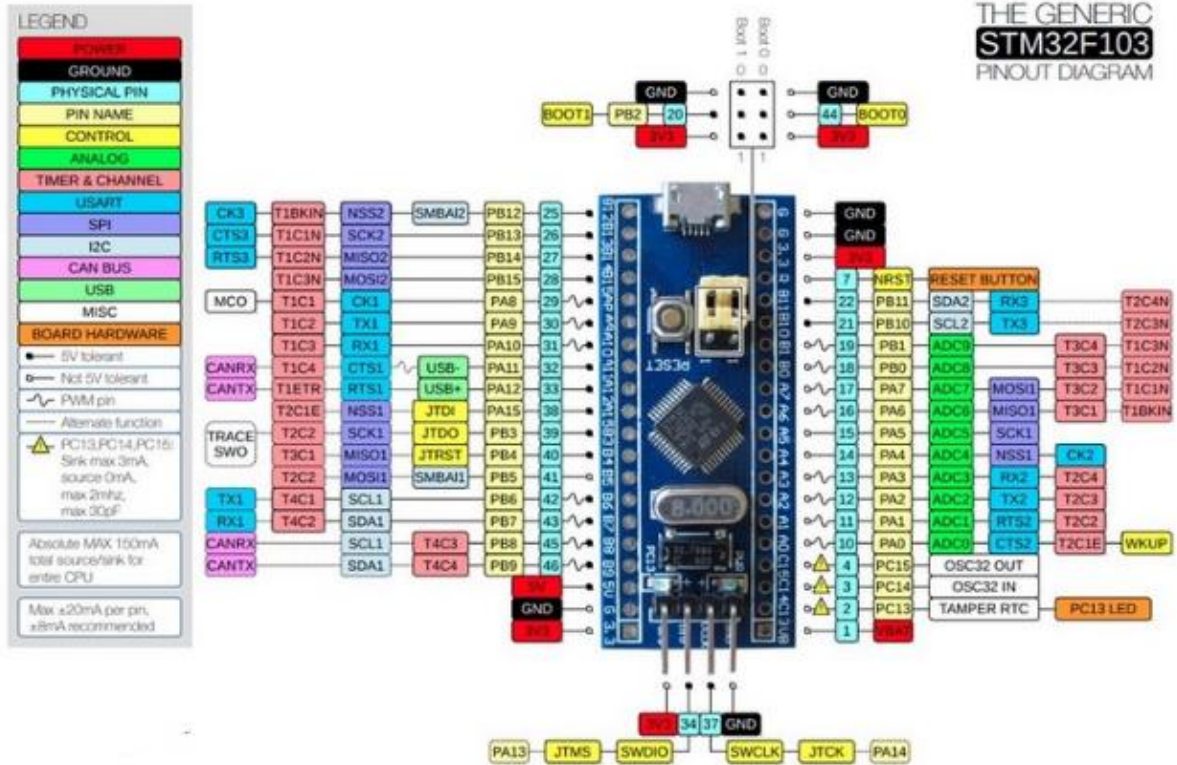
Bu çalışmada merkezi işlem birimi olarak Şekil 1’de üstten görünümü verilmiş olan STM32F103C8T6 mikrodenetleyicisi temelli blue pill isimli kart kullanılmıştır. Bu kartın en belirgin özelliklerinden birisi çok güçlü bir Arduino Nano alternatifi olmasıdır. Bu mikrodenetleyici kartının üzerinde MicroUSB Interface, Boot Selection, MCU, RTC kristal, Power Indicator, RC13 Indikator, Main kristal ve reset butonu yer almaktadır.



Şekil 1. STM32F103C8T6 mikrodenetleyicisi temelli blue pill kartının üstten görünüşü

STM32F103C8 mikrodenetleyicileri; Motor sürücülerinde, Uygulama kontrollerinde, Tıbbi el ekipmanlarında, PC ve oyun çevre birimlerinde, GPS platformları, Endüstriyel uygulamalar, PLC’ler, İnvörtörler, Yazıcılar ve tarayıcılar, Alarm sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır [8].

Şekil 2’de STM32F103C8 mikrodenetleyicisi temelli blue pill kartının pin diyagramı görülmektedir [9].



Şekil 2. STM32F103C8 mikrodenetleyicisi temelli blue pill kartının pin diyagramı

STMicroelectronics tarafından üretilen bir ARM Cortex-M3 tabanlı STM32F103C8 mikrodenetleyicide Şekil 2’de görülen pin diyagramı, bu mikrodenetleyicinin tüm pinlerinin işlevlerini ve konumlarını gösterir. Aşağıda, STM32F103C8’in pin diyagramının genel bir açıklamasına yer verilmiştir.

Pin Kategorileri:

1. Güç Pinleri:

VDD: 3.3V DC güç kaynağı pini.

VSS: Toprak (GND) pini.

VBAT: Yedek batarya bağlantısı için pin (RTC için).

2. Genel Amaçlı Giriş/Çıkış Pinleri (GPIO):

PAx, PBx, PCx, PDx, PEy: A, B, C, D, ve E portlarındaki pinler. Bu pinler dijital giriş veya çıkış olarak kullanılabilir.

3. Kanal ve Çarpın Pinleri:

ADC: Analog-dijital çevirici pinleri (örneğin, PA0, PA1).

DAC: Dijital-analog çevirici pinleri (DAC çıkışları).

4. Seri İletişim Pinleri:

USART: Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter pinleri (TX, RX).

SPI: Serial Peripheral Interface pinleri (SCK, MOSI, MISO).

I2C: Inter-Integrated Circuit pinleri (SDA, SCL).

5. Zamanlayıcı ve PWM Pinleri:

TIM: Çeşitli zamanlayıcılar için pinler. PWM çıkışları ve zamanlayıcı girişleri için kullanılır.

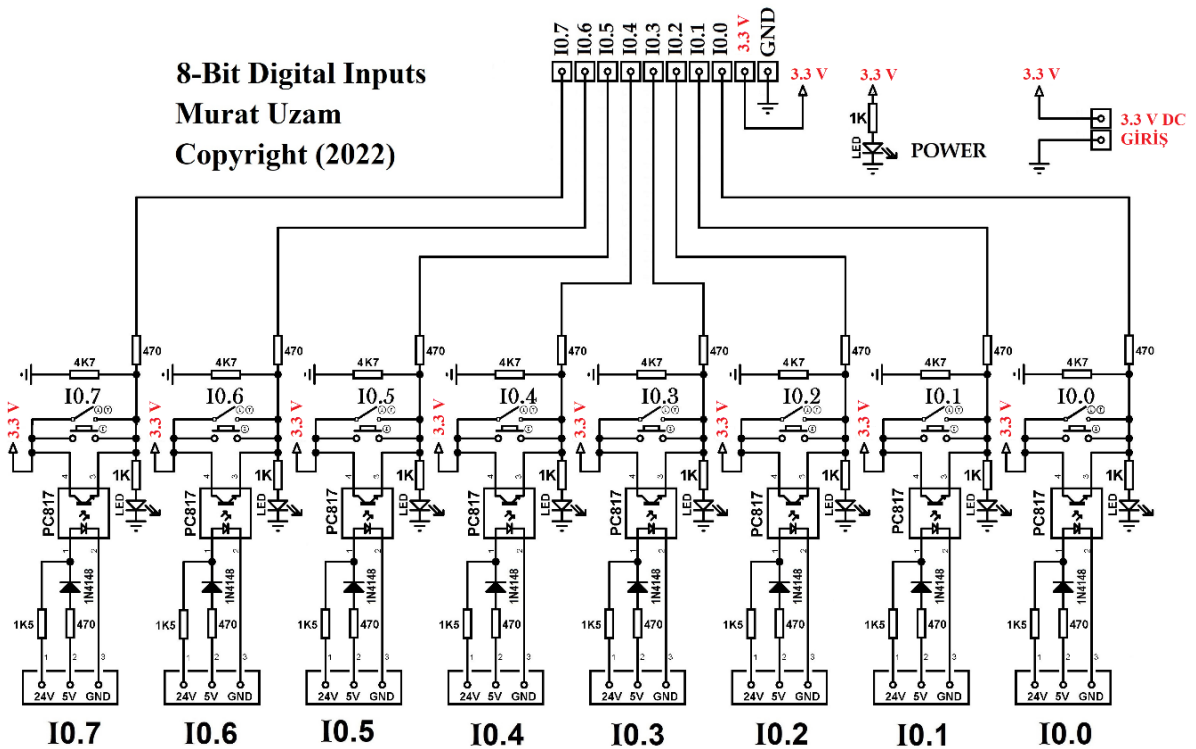
6. Diğer Fonksiyon Pinleri:

BOOT0/BOOT1: Başlangıç konfigürasyonu için pinler.

NRST: Dış reset pini.

3.1. Tasarlanan PLC'nin Donanımı

Bu proje kapsamında kullanılan 8 bit dijital PLC girişlerinin şeması Şekil 3'te görülmektedir. Bu şemaya uygun olarak gerçekleştirilmiş olan 8 bit dijital PLC giriş kartının üstten görünüşü de Şekil 4'te mevcuttur. PLC girişleri I0.7, I0.6, I0.5, I0.4, I0.3, I0.2, I0.1 ve I0.0 olarak isimlendirilmiştir. Bu dijital girişler için STM32F103C8 mikrodenetleyicisinin PB4, PB3, PA15, PA6, PA11, PA10, PA9, PA8 isimli pinleri kullanılmıştır. Her bir ayrı girişten 5V DC ya da 24V DC giriş sinyallerini kabul edilebilmektedir. Harici giriş sinyalleri NPN tipi PC817 optik yalıtıcı (opto-coupler) kullanılarak PLC kartındaki diğer kısımlardan elektriksel olarak izole edilmiştir. Harici girişlerin kullanılmadığı uygulamalarda, girişlerin simülasyonunu yapabilmek için kart üzerinde her bir giriş için ani temaslı bir buton ve bir sürgülü anahtar mevcuttur. Her bir girişte, giriş sinyalinin aktif olması durumunu gösteren bir LED kullanılmıştır.

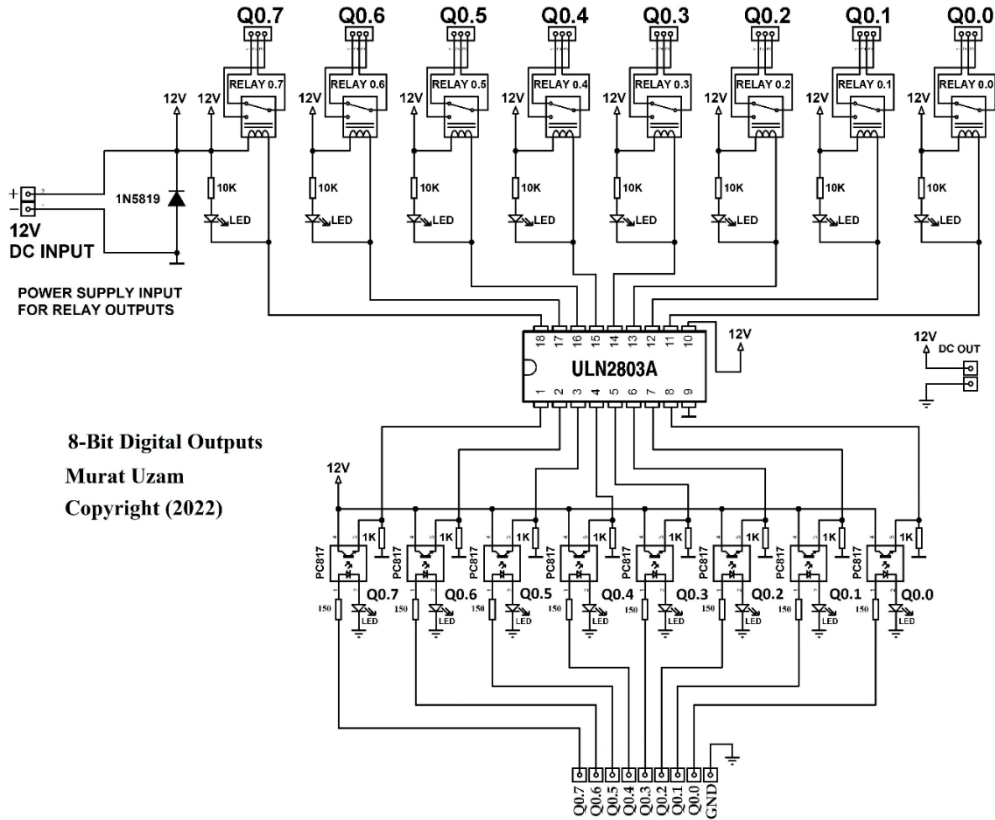


Şekil 3. 8 bit dijital PLC girişlerinin şeması

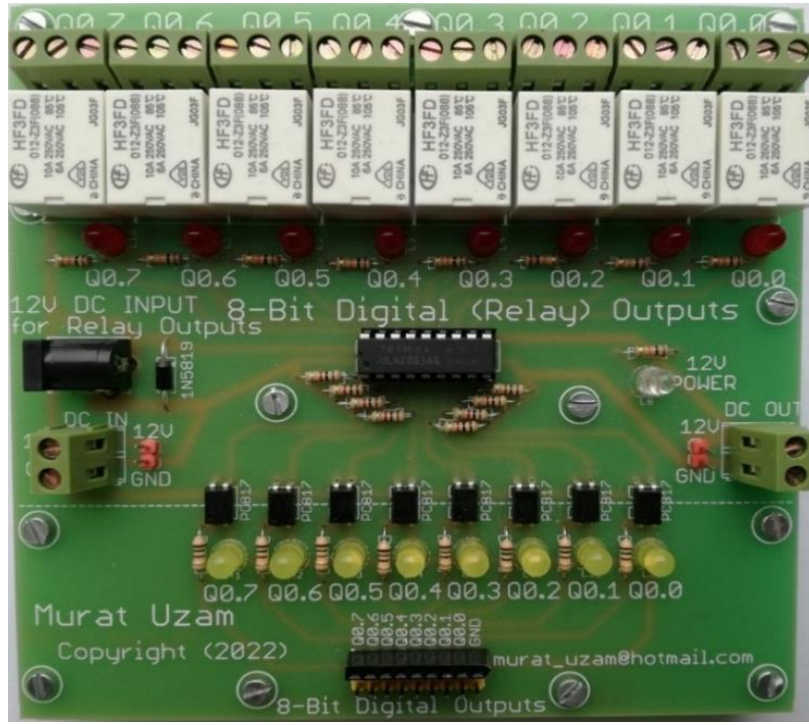


Şekil 4. 8 bit dijital PLC giriş kartının üstten görünüşü

Bu proje kapsamında kullanılan 8 bit dijital PLC çıkışlarının şeması Şekil 5’de görülmektedir. Bu şemaya uygun olarak gerçekleştirilmiş olan 8 bit dijital PLC çıkış kartının üstten görünüşü de Şekil 6’da mevcuttur. PLC çıkışları Q0.7, Q0.6, Q0.5, Q0.4, Q0.3, Q0.2, Q0.1 ve Q0.0 olarak isimlendirilmiş ve 8 adet ayrıklı röle çıkışı düzenlenmiştir. Bu röleleri sürmek için STM32F103C8 mikrodnetleyicisinin PA4, PA5, PA6, PA7, PB0, PB1, PB10, PB11 isimli pinleri kullanılmıştır. Her röle 12V DC ile çalışmaktadır. Bu 8 röle bir tane ULN2803A darlington transistör sürücü entegresi yardımıyla sürülmektedir. STM32F103C8 mikrodnetleyicisi ile ULN2803A darlington transistör sürücü entegrelerini elektriksel olarak izole etmek için 8 tane NPN tipi PC817 optik yalıtıcı (opto-coupler) kullanılmıştır. Böylece röleleri sürmek için kullanılan 12V DC gerilim de STM32F103C8 mikrodnetleyicisinden elektriksel olarak izole edilmiştir. Her rölede, C (common – ortak uç), NC (normally closed – normalde kapalı) ve NO (normally open – normalde açık) olmak üzere üç bağlantı ucu olan SPDT (single pole double throw – tek grup iki konumlu) kontaklar mevcuttur. Devrede, her bir rölenin çalışmakta olduğunu gösteren bir LED mevcuttur. Ayrıca röleleri sürmek için kullanılan 12V DC gerilim kullanılmadan da çıkışların lojik durumlarını gözlemleyebilmek için her bir çıkış pinine bir LED bağlanmıştır.

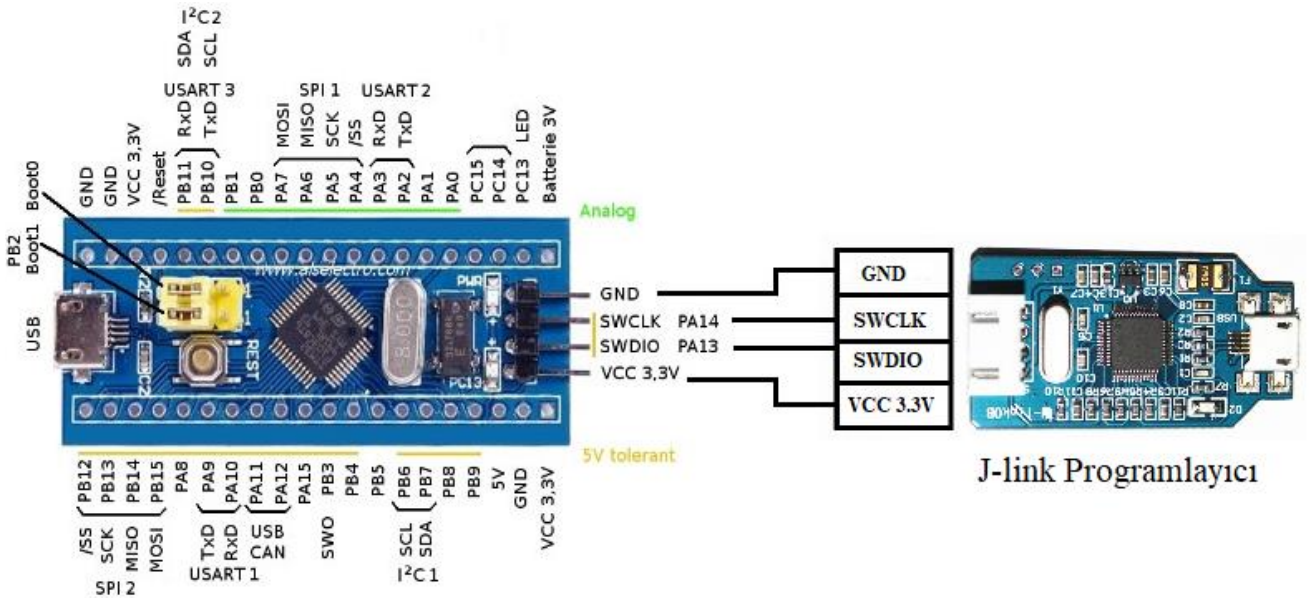


Şekil 5. 8 bit dijital PLC çıkışlarının şeması



Şekil 6. 8 bit dijital PLC çıkış kartının üstten görünüşü

Kullanılan STM32F103C8 mikrodenetleyicisine kullanıcı programının yüklemesi için J-Link olarak bilinen bir programlayıcı kullanılmıştır. Bu programlayıcı bir STMicroelectronics STM32 mikrodenetleyicisine bir kullanıcı programını yüklemek ve hata ayıklamak için kullanılan bir donanımdır. Gerçekleştirilen PLC projesi kapsamında STM32F103C8 mikrodenetleyici ile birlikte kullanılmıştır. Şekil 7’de STM32F103C8 mikrodenetleyicisinin J-link programlayıcı donanımına bağlantısı görülmektedir. Bu sayede J-link, bir USB arayüzü aracılığıyla bilgisayara bağlanılıp ve bir yazılım geliştirme ortamı (IDE) veya hata ayıklayıcı yazılım aracılığıyla kullanabilmektedir.



Şekil 7. STM32F103C8 mikrodenetleyicisinin J-link programlayıcı donanımına bağlanması

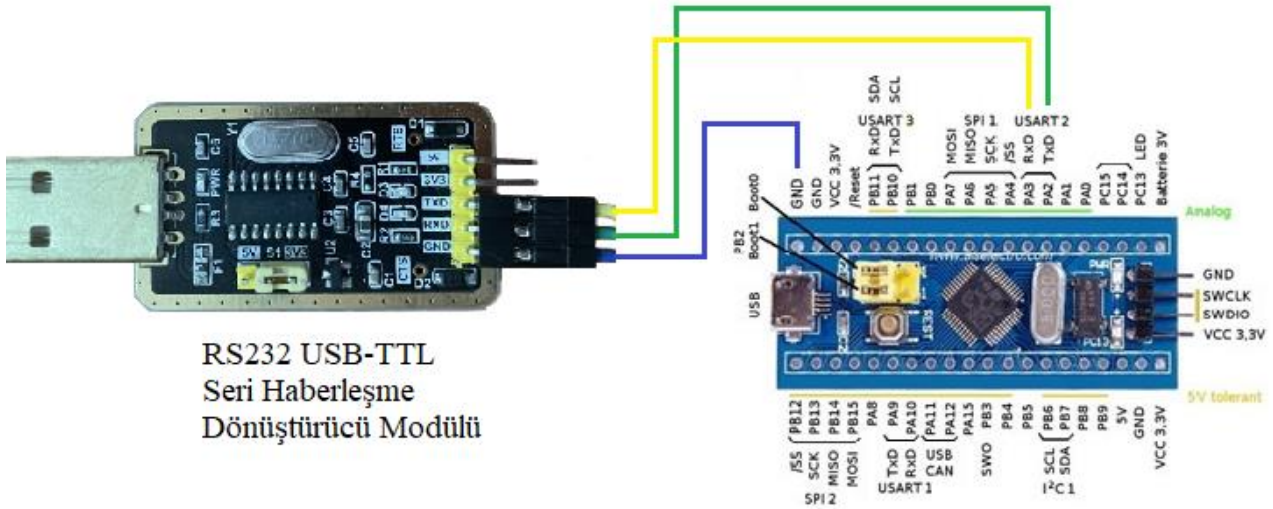
STM32F103C8 mikrodenetleyicisinin J-link donanımını STM32CubeIDE programında çalıştırmak için şu adımlar izlenmiştir: Öncelikle J-link donanımı STM32F103C8 mikrodenetleyicisine Şekil 7’de görülen dört bağlantı kablosu ile bağlanmıştır. Sonrasında STM32 için tercih edilen STM32CubeIDE tümleşik geliştirme programının kurulumu yapılmış ve STM32CubeIDE, kod yazma, derleme, hata ayıklama ve J-link aracılığıyla programlama işlemlerinde kullanılmıştır. STM32CubeIDE geliştirme ortamının J-link ile iletişim kurabilmesi için gerekli olan J-Link sürücülerini ve yazılımı proje kapsamında kullanılan bilgisayara yüklenmiştir.

Şekil 8’de sunulan RS232 USB-TTL seri haberleşme dönüştürücü modülü gerçekleştirilen proje kapsamında bilgisayarda bir monitör ekranı oluşturup özellikle matematik, lojik ve kaydırma fonksiyonlarıyla ilgili işlem sonuçlarının gözlemlenebilmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu seri haberleşme dönüştürücü modülü, bilgisayarlar veya diğer USB destekli cihazlar ile seri haberleşme protokollerini kullanarak iletişim kurmaya yarayan bir donanım modülüdür. Bu modüller genellikle UART Universal Asynchronous Receiver/Transmitter olarak da adlandırılır. Bu modüller genellikle seri haberleşme hızı, veri biti, dur biti ve parite gibi iletişim parametrelerini ayarlamak için yazılım veya donanım düğmeleri sağlayan küçük cihazlardır. Bu tür modüller, genellikle mikrodenetleyiciler, Arduino ve diğer gömülü sistemlerle iletişim kurmak için ve hata ayıklama, veri alışverişi ve diğer seri haberleşme uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Aynı zamanda bu dönüştürücü modülü sensörler, ekranlar, motor sürücüler gibi çeşitli elektronik bileşenlerle haberleşme işleminde de kullanılır.



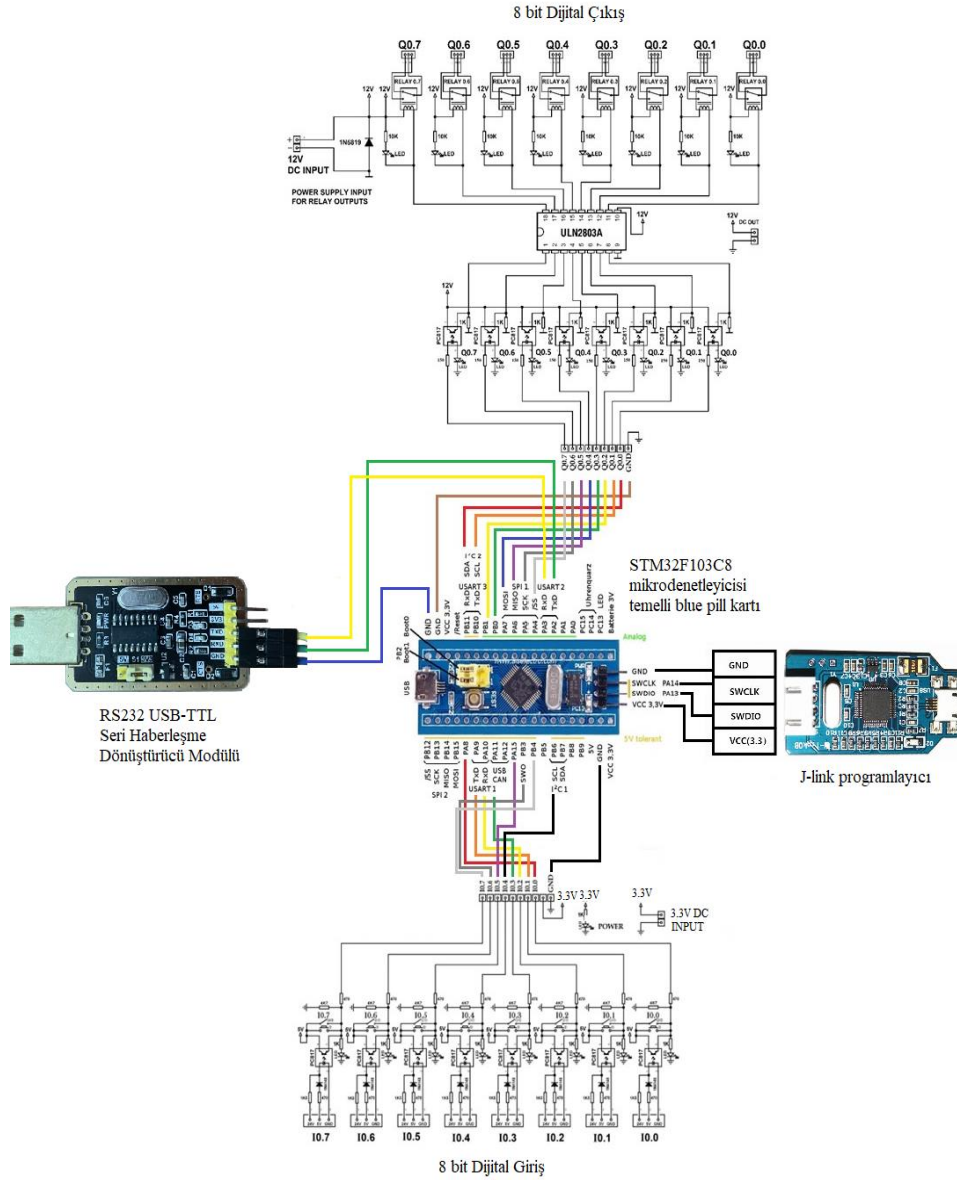
Şekil 8. RS232 USB-TTL seri haberleşme dönüştürücü modülünün üstten görünüşü

RS232 USB-TTL seri haberleşme dönüştürücü modülü STM32F103C8 mikrodenetleyici kartına bağlanmıştır ve STM32F103C8 mikrodenetleyici kartının haberleşme pinleri PA2 ve PA3 pinleri olarak belirlenmiştir. Bu durum Şekil 9’da ifade edilmiştir.



Şekil 9. RS232 USB-TTL seri haberleşme dönüştürücü modülünün mikrodenetleyiciye bağlanması

Sonuç olarak çalışma kapsamında STM32F103C8 mikrodenetleyici kullanılarak tasarlanan PLC’ye ait donanım şeması Şekil 10’da görülmektedir.



Şekil 10. Tasarlanan PLC'ye ait donanım şeması

Donanımı gerçekleştirilen PLC'de STM32F103C8 mikrodeneleyicisi merkezi işlem birimi (CPU) olarak kullanılmış olup 8 dijital giriş ve 8 dijital çıkış mevcuttur. Tasarlanan PLC'de yazılım dili olarak C dili kullanılmıştır ve STM32CubeIDE yazılım geliştirme ortamında oluşturulmuştur. Bahsedilen bu programda yapılan projenin ana programı Şekil 11'de görülmektedir.

```
#include "main.h"
#include "definitions.h"
int main(void)
{
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();
    MX_TIM1_Init();
    USART2_setup();

    while (1)
    {
        TIMER = TIMER_Val;

        //----- Timerlar için kullanılan referans zamanlama sinyalleri:
        re_T10ms = re_RTS(T_10ms, 61);
        re_T100ms = re_RTS(T_100ms, 62);
        re_T1s = re_RTS(T_1s, 63);

        get_inputs();

        //----- Kullanıcı Programı Burada Başlar-----
        //----- Kullanıcı Programı Burada Biter-----
        send_outputs();
    }
}
```

Şekil 11. Ana Program

STM32F103C8 mikrodenetleyicisi ile gerçekleştirilen bu PLC ile giriş/çıkış sayısı fazla olmayan endüstriyel otomasyon uygulamaları için ideal bir seçenek ortaya konulmuştur. Önerilen STM32F103C8 mikrodenetleyicisi tabanlı PLC tasarımıyla düşük maliyetli ve hızlı endüstriyel otomasyon uygulamaları için cazip bir çözüm elde edilmiştir.

Tasarımı gerçekleştirilen bu PLC’de:

Kontak ve Role Temelli Fonksiyonlar: Boole (ikili-binary) değişkenleri üzerinde işlem yapmak amacıyla kullanılmıştır. Şekil 12.de bu fonksiyona ait STMCubeIDE Programında C kodu, doğruluk tablosu, Merdiven diyagramı ve şematik sembolüyle birlikte aktarılmıştır. Örneğe göre: **ld** fonksiyonu bir merdiven diyagramındaki en soldaki normalde açık kontak olarak işlem yapar. Bilgiyi ‘in’ girişinden alır ve TEMP üzerinden dışarı aktarır. Eğer gelen bilgi 0 ise, çıkış (TEMP) 0 olur. Gelen bilgi 1 ise, çıkış (TEMP) 1 olur [7].

STMCubeIDE Programındaki C Kodu	Doğruluk Tablosu	Merdiven Diyagramı Sembolü / Şematik Sembol								
<pre>ld void ld(_Bool in){ if (in==0) TEMP=0; else TEMP=1; }</pre>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>IN</th> <th>OUT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>in</td> <td>TEMP</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	IN	OUT	in	TEMP	0	0	1	1	
IN	OUT									
in	TEMP									
0	0									
1	1									

Şekil 12. ld Fonksiyonu

Sayıcı Fonksiyonları: PLC’de sayıcılar, dahili veya harici olayların veya sinyallerin, yukarı ya da aşağıya doğru sayılmasını sağlayan fonksiyonlardır. PLC’lerde genel olarak üç temel sayma fonksiyonu kullanılmaktadır: İleri Sayıcı (Up Counter-CTU), Geri Sayıcı (Down Counter-CTD), İleri/Geri Sayıcı (Up/Down Counter-CTUD). Bu fonksiyonlar sayıcı içeriğini arttıran veya azaltan ve içerik belli bir değere ulaştığında sayıcı durum kaydedicisine veriyi ileterek çalışmaktadır [7].

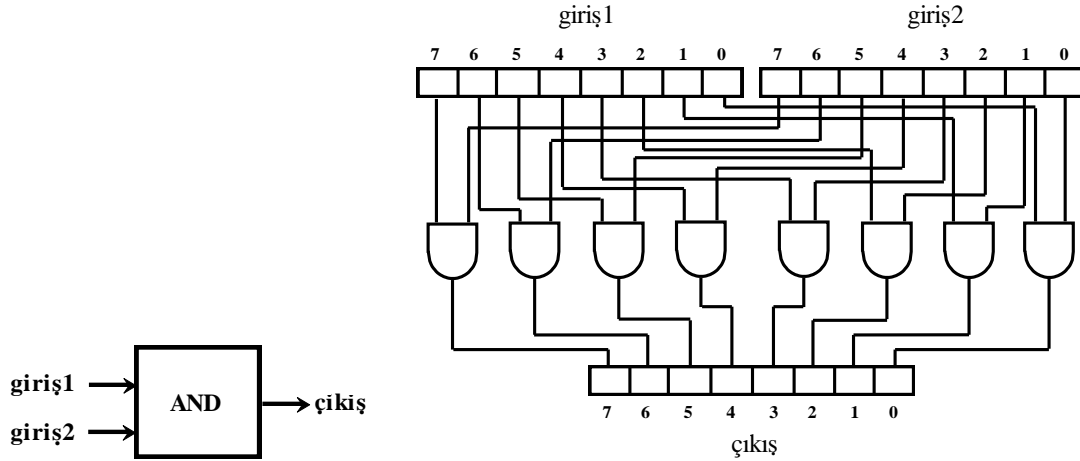
Zamanlayıcı Fonksiyonları: Programlama dillerinde belirli bir işlemin belirli bir süre sonra veya belirli aralıklarla otomatik olarak çalışmasını sağlayan özel fonksiyonlardır. Bu tür fonksiyonlar genellikle zamanlanmış görevlerin gerçekleştirilmesinde, periyodik işlemlerde veya belirli bir süre içinde bir işlemin tamamlanması gerektiği durumlarda kullanılır. Bu fonksiyonlar, programların otomatik olarak belirli bir zaman dilimi sonunda bir işlem gerçekleştirmesini veya belirli bir süre boyunca belirli bir işlemi tekrarlamasını sağlar. Gerçekleştirilen bu çalışmada gecikmenin yapısına bağlı olarak düz zaman rölesi (On Delay Timer - TON) ve ters zaman rölesi (OFF Delay Timer - TOF) olmak üzere iki zamanlayıcı fonksiyonu gerçekleştirilmiştir. Bu iki fonksiyonda gerekli olan referans zaman sinyallerinin elde edilmesi için, mikrodenetleyicinin 32 bitlik Timer1 dâhili zamanlayıcı modülü kullanılmıştır [7].

Karşılaştırma Fonksiyonları: PLC programlarında sıklıkla sayısal değerlerin karşılaştırılması gerekir. Bu fonksiyonda sayı1 ve sayı2 isimli iki giriş karşılaştırılacak iki sayısal değeri ifade etmektedir. Karşılaştırma işleminin sonucuna göre Boole-çıkış-değeri işlem sonucu doğruysa 1, yanlıssa 0 olur [7].

Aritmetik Fonksiyonları: PLC’lerde sayısal veriler üzerinde matematiksel işlemler yapmak için kullanılan fonksiyonlardır. Bunlar genellikle PLC programlama yazılımı tarafından sağlanan özel fonksiyon blokları veya komutlar olarak temsil edilir. Aritmetik fonksiyonlar genellikle toplama, çıkarma, çarpma, bölme gibi temel aritmetik işlemleri gerçekleştirirler. Bu işlemler hem değişik veri tiplerinde tanımlanan iki değişkenin içeriğine veya bir değişkenle bir sabit sayıya uygulanabilir. Bu tür işlemler, bir veya birden fazla değeri alarak bir işlem gerçekleştirir ve sonucu hesaplar. Hesaplanan sonucu daha sonra hafızaya kaydeder. Bu bölümde bu proje kapsamında aritmetik fonksiyonları gerçekleştirmek için altı tane fonksiyon tanımlanmıştır. Bunların dört tanesi ADD (addition - toplama), SUB (subtraction - çıkartma), MUL (multiplication - çarpma) ve DIV (division - bölme) fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonların yetkileme girişi EN (TEMP) aktif olduğunda giriş değişkenlerinden gelen verilerle işlem yapar ve sonucu çıkış değişkenine kaydeder [5]. Bu fonksiyonlarda iki giriş değişkeni olan “in1” ve “in2” ile bir çıkış değişkeni OUT (TEMP_REG) mevcuttur. Diğer iki tanesi ise INC (increment - bir arttırma) ve DEC (decrement - bir azaltma) fonksiyonlarıdır. INC ve DEC fonksiyonlarında bir giriş değişkeni olan “in” ve bir çıkış değişkeni OUT (TEMP_REG) mevcuttur. Bu bölümde incelenen aritmetik işlemler giriş ve çıkış verilerinin unsigned int veri tipinde olması durumu için tanımlanmıştır. Benzer aritmetik işlemler diğer veri tipleri için de tanımlanabilir [7].

Lojik ve Kaydırma Fonksiyonları: Bir lojik fonksiyon AND, OR, NAND, NOR, exclusive-OR (XOR) ve exclusive-NOR (XNOR) lojik işlemlerini iki giriş değişkenine (kaydediciye) ve NOT (değil) lojik işlemini sadece bir giriş değişkenine (kaydediciye) uygular ve bulunan sonucu çıkış değişkenine (kaydediciye) depolar. Örneğin Şekil 13.(a)’da görülen AND lojik

fonksiyonu giriş1 ve giriş2 olarak isimlendirilmiş kaynaklardan aldığı iki veri girişini lojik AND işlemine tabi tutup sonucu çıkış değişkenine kaydeder. Örnek olarak AND fonksiyonunun 8 bitlik değişkenlere uygulanması Şekil 13.(b)'de görüldüğü gibi gerçekleştirilir [7].



Şekil 13. a) AND fonksiyonu b) AND fonksiyonunun 8 bitlik değişkenlere uygulanması

4. SONUÇLAR

PLC'ler günümüzde endüstriyel otomasyon sistemlerinde çok yaygın olarak kullanılan kontrol cihazlarıdır. Pek çok yerli ve yabancı PLC üreticisi değişik kapasiteye ve hıza sahip PLC'leri farklı ihtiyaçları karşılamak üzere üretmektedir. PLC'lerin tasarımı konusunda daha önce yapılmış olan çalışmalar ve benzer şekilde konuyla ilgili Türkçe ve İngilizce yazılmış kitaplar da mevcuttur. Daha önce PLC'lerle ilgili yapılan çalışmalarda PIC16F84 mikrodenetleyicisi temelli 8 dijital girişli/8 dijital çıkışlı ve 5 MHz frekansında çalışan bir PLC tasarımı, Atmega128 mikrodenetleyicisi tabanlı bir PLC tasarımı, PIC16F877 Mikrodenetleyicisi temelli başka bir 6 dijital girişli/5 dijital çıkışlı bir PLC tasarımı, 16 bitlik bir PIC mikrodenetleyicisi ile 16 dijital girişli/16 dijital çıkışlı bir PLC tasarımı, PIC16F877A mikrodenetleyici temelli 16 dijital girişli/16 dijital çıkışlı bir PLC tasarımı ile ilgili çalışmalarına ulaşılmıştır. Yapılan bu çalışmaların, 2024 yılında ulaşılan yaklaşık maliyet fiyatları Tablo 1'de sunulmuştur. Sunulan bu fiyatlar Türkiye güncel kuru 1 Dolar=34,06 TL; 1 Euro=37,57 TL fiyatlarıyla karşılaştırılarak aktarılmıştır [10].

Tablo 1. PLC tasarımları ve yaklaşık maliyetleri

Plc Tasarımları	Mikrodenetleyici Maliyeti	Diğer Donanım Maliyeti
PIC16F84 mikrodenetleyicisi temelli 8 Girişli/8 Çıkışlı PLC [1]	6-7,3 Dolar / 204,36-248,64 TL	78,36 Dolar /2.669,11 TL
Atmega128 mikrodenetleyicisi tabanlı bir PLC [3]	6-15 Dolar / 204,36-510,9 TL	84,21 Dolar/2868,37 TL
PIC16F877 Mikrodenetleyicisi temelli 7 Girişli/6 Çıkışlı PLC [2]	7,4-12 Dolar/252,04-408,72 TL	86,61 Dolar/2950 TL
PIC16F877 Mikrodenetleyicisi temelli 6 Girişli/5 Çıkışlı PLC [4]	7,4-12 Dolar/252,04-408,72 TL	79,40 Dolar/2.704,3 TL
16 Bitlik bir PIC mikrodenetleyicisi ile 16 Girişli/16 Çıkışlı PLC [5]	PIC24FJ128GA010 5-6,5 Dolar / 170,3-221,39 TL	PIC24F/24H: 330,38 Dolar / 11.252,74 TL PLC G/Ç Kartı: 131,78 Dolar/4.488,62 TL
PIC16F877A mikrodenetleyici temelli 16 Girişli/16 Çıkışlı PLC [6], [7]	6,8-8,5 Dolar / 231,6-289,5 TL	103,62 Dolar/3.529,26 TL

Bazı PLC markalarının ise 2024 yılında yaklaşık maliyet fiyatları Tablo 2'de sunulmuştur. Sunulan bu fiyatlar Türkiye güncel kuru 1 Dolar=34,06 TL; 1 Euro=37,57 TL fiyatlarıyla karşılaştırılarak aktarılmıştır [11].

Tablo 2. PLC modelleri ve maliyetleri

Marka	Model	Maliyet
Schneider Electric	TM200C16R Schneider 9 Giriş; 7 Çıkış; IP20	247.84 Euro / 9.311,35 TL
Panasonic	AFPORC32CP Panasonic 16 Giriş; 16 Çıkış; FP0R	285.71 Euro / 10.734,12 TL
Schneider	TM221M16T Schneider 8 Giriş; 8 Çıkış; 24V DC	289.82 Euro / 10.888,54 TL
Omron	CP1L-L14DT1-D Omron 8 Giriş; 6 Çıkış PNP 24V DC Modbus Ethernetli PLC	404.54 Euro / 15.198,57 TL

Gerçekleştirilen STM32F103C8 Mikrodenetleyicisi temelli PLC'nin maliyeti mikrodenetleyici kartı için 106,48 TL deney kartı için 2.596,04 TL olmuştur. Bu kapsamda özellikle küçük çaplı uygulamalar için hem hızlı hem de çok düşük maliyetli bir PLC tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Bu projede STMicroelectronics tarafından üretilen 32-bitlik STM32F103C8 (ARM Cortex-M3) mikrodenetleyicisi kullanılarak 72 MHz gibi yüksek bir hızda çalışan 8 dijital girişli/8 dijital çıkışlı bir PLC tasarımı gerçekleştirilmiştir. Böylelikle zaman-kritik sistemler için kullanılması söz konusu olabilecek bir PLC altyapısı ortaya konulmuştur. Bu tasarımın geliştirilmesiyle hem çok hızlı hem de geniş işlem gücü ve çevresel uyumluluğu sayesinde düşük maliyetli ve aynı zamanda yerli ve milli bir PLC tasarımı oluşturulmuştur. Uygulamada, PLC'nin temel işlevlerini gerçekleştirmek için gerekli olan I/O bağlantıları, STM32F103C8 mikrodenetleyici üzerindeki GPIO pinleri kullanılarak sağlanmıştır. Bu, harici bileşenlere olan ihtiyacı azaltıp tasarımı daha ekonomik hale getirmiştir. Yapılan çalışma STM32CubeIDE arayüz programı gibi popüler bütünleşik geliştirme ortamı üzerinde C dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu da projenin daha da erişilebilir olmasını sağlamaktadır. Yapılan çalışmayla STM32F103C8 Mikrodenetleyicisi Temelli PLC Tasarımı yerli ve milli PLC olarak geliştirilmiştir.

ETİK

“Bu makalenin yayımlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.”

KAYNAKLAR

- [1] Ş. Kitiş, "PIC16F84 mikrodenetleyicisi ile bir programlanabilir lojik denetleyici tasarımı ve uygulaması", Yüksek lisans tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2007.
- [2] H. O. Erkol, "Mikrodenetleyici tabanlı PLC donanımı ve yazılımının gerçekleştirilmesi", Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2008.
- [3] V. Tongur, "Atmega128 tabanlı PLC tasarımı", Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008.
- [4] Ö. F. Rafat, "PIC16F877 mikrodenetleyicisi ile bir PLC tasarımı", Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010.
- [5] A. Harmanda, "16 bitlik bir PIC mikrodenetleyicisi ile bir programlanabilir lojik denetleyici tasarımı ve uygulaması", Yüksek lisans tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2011.
- [6] M. Uzam, PIC16F877A temelli PLC, Birsen Yayınevi, 2013, p. 322 sayfa.
- [7] M. Uzam, PIC16F877A temelli PLC sürüm 2.0, Kodlab Yayınevi, 2022, p. 688 sayfa.
- [8] Diyot.net, <https://diyot.net/stm32f103/>. [Erişim Tarihi: 01 Temmuz 2024].
- [9] STM32F103 pinout diagram, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Stm32f103_pinout_diagram.png. [Erişim Tarihi: 31 Mayıs 2024].
- [10] digikey.com, <https://www.digikey.com/en/products/filter/microcontrollers/685?s=N4IgtTCBcDaIAoEkDCYAsAxAUgRjADgHEBBABmxJAF0BfIA>. [Erişim Tarihi: 10 09 2024].
- [11] tme.eu, <https://www.tme.eu/tr/tr/>. [Erişim Tarihi: 10 09 2024].



EEG sinyallerinden majör depresif bozukluğun yapay zekâ uygulamaları ile tespiti üzerine bir inceleme

Derya ÖZCAN^{1*}, Esmâ UZUNHİSARCIKLİ²

¹ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi
22.07.2024
Kabul tarihi
01.10.2024
Yayın tarihi
31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Majör Depresif Bozukluk
Elektroensefalografi
Yapay Zekâ
Sinyal İşleme

ÖZET

Majör depresyon yaygın görülen bir ruh sağlığı bozukluğudur ve son yıllarda depresyonla mücadele önemli bir küresel sorun haline gelmiştir. Uzman, hastalık teşhisini psikometrik anketler ve kişiyle yaptığı görüşmeler neticesinde yapmaktadır. Fakat depresyon belirtilerinin somut olmaması, hastanın söylemleri ve tanımlanamayan semptomlar teşhis doğruluğunu ciddi derecede etkilemektedir. Bu durum uzmanın tecrübesini daha önemli kalmaktadır. Objektif bir yöntemin geliştirilmesi erken ve doğru bir teşhis için uzmana yardımcı olmak ve tedavi sürecine de olumlu katkıda bulunmak açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada Elektroensefalografi sinyallerinin kullanılarak Majör Depresif Bozukluk tanısında Yapay Zekâ uygulamalarına ve diğer yöntemlere dayalı ayrıntılı literatür taraması verilmiştir. Yapılan bu inceleme sonucunda sinyal işleme ve öznel çıkarımında kullanılan yöntemler, uygulanan sınıflandırıcılar karşılaştırmalı bir tablo halinde verilmiştir. Ayrıca incelenen çalışmalardan yola çıkarak ileriye yönelik yapılacak çalışmalarla ilgili veri seti ve kullanılacak yöntemler hakkında ayrıntılı bilgilere yer verilmiş, daha yüksek doğruluk oranının elde edilmesi ve literatüre olumlu katkı sağlanması amaçlanmıştır.

EEG signaling of major depressive disorder a review on detection with artificial intelligence applications

ARTICLE INFO

Article history:

Received
22.07.2024
Accepted
01.10.2024
Published
31.12.2024

Keywords:

Major Depressive Disorder Electroencephalography
Artificial Intelligence
Signal Processing

ABSTRACT

Major depression is a common mental health disorder, and in recent years, combating depression has become a significant global issue. Experts diagnose the condition through psychometric questionnaires and interviews with patients. However, the lack of concrete symptoms, along with the patients' descriptions and undefined symptoms, severely impacts the accuracy of the diagnosis. This situation underscores the importance of the expert's experience. Developing an objective method is crucial for aiding experts in making early and accurate diagnoses, as well as positively contributing to the treatment process. This study presents a detailed literature review of artificial intelligence applications and other methods for diagnosing Major Depressive Disorder using Electroencephalography signals. The analysis includes a comparative table of the methods used in signal processing and feature extraction, as well as the classifiers applied. Additionally, based on the studies reviewed, detailed information is provided regarding datasets and methods for future research, aiming to achieve higher accuracy rates and make a positive contribution to the literature.

ORCID ID: Derya ÖZCAN: 0009-0008-1679-2977

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye
E-mail: 4012230088@erciyes.edu.tr

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: Özcan, D ve Uzunhisarıklı, E "EEG sinyallerinden majör depresif bozukluğun yapay zekâ uygulamaları ile tespiti üzerine bir inceleme" Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 13-21, 2024.

1. GİRİŞ

Beyin, vücudu ve zihinsel fonksiyonları düzenleyen ve denetleyen karmaşık bir kontrol merkezidir. Aynı zamanda beyin; düşünme, mantık yürütme, sonuç çıkarma, duygusal tepkiler verme, bilişsel işlevler, dikkat, algı, hafıza ve öğrenme gibi çok çeşitli işlevleri yönetir [1]. Beyin içindeki sinir hücreleri, bu işlevlerin yerine getirilmesinden sorumludur. Bu sinir hücreleri, bilgi akışını birbirlerine sağlar ve sinir iletimi sonucunda beynin içinde biyoelektrik aktivite oluşturur. Sinir hücresi yani nöron; dentritler, hücre gövdesi (soma) ve akson olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Uç düğümler ise aksonun sonunda bulunan küçük yumrulardır. Bu uç düğümler ile bağlantı yapılacak dendritler arasında sinaps adı verilen boşluklar bulunur. Sinyalin iletimi, uç düğümlerinden sinapsa nörotransmitter adı verilen kimyasal bileşiklerin salınmasıyla gerçekleşir. Nörotransmitterler, mesaj taşımak için özel olarak üretilmiş kimyasal yapılardır [2].

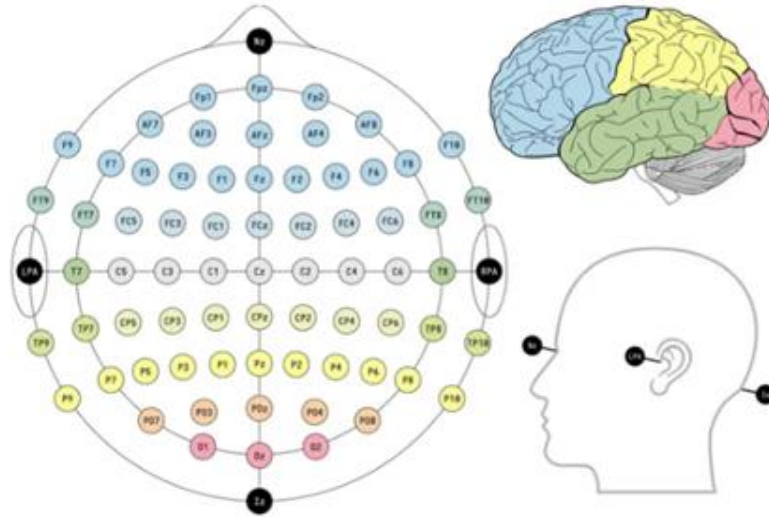
Beyin yapısını ve işlevlerini incelemek için birçok farklı teknik mevcuttur. Bu teknikler yapısal ve fonksiyonel görüntüleme olarak iki ana kategoriye ayrılır. Elektroensefalografi (EEG) bir fonksiyonel görüntüleme çeşididir. EEG, beyindeki elektriksel aktivitenin non-invaziv bir şekilde incelenmesi için kullanılan elektrofizyolojik izleme yöntemidir [3]. Bu yöntem beynin yapısal özelliklerinden çok ölçüm sırasındaki fonksiyonel durumunu göstermektedir. Beynin elektriksel aktivitesinin gözlemlenmesi ve araştırılmasında kullanılan EEG ile uyku bozuklukları, nörolojik hastalıklar ve zihinsel sağlık sorunları gibi çeşitli patolojilerin teşhisini desteklemek mümkün olabilmektedir. EEG, klinik araştırmalarda ve nörobilim çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [4].

1.1. Elektroensefalografi (EEG)

EEG beynin elektriksel aktivitesinin kayıdır. 1924 yılında Alman nörolog Hans Berger EEG alanına önemli katkılarda bulunmuştur. Beyin elektrik aktivitesini insanın saç derisi üzerinden ölçmek için sıradan radyo ekipmanını kullanmıştır. Berger, beyinde üretilen zayıf elektrik akımlarının kafatası açılmadan kaydedebileceğini göstermiştir. Bu aktiviteyi bir kâğıt şeridi üzerine grafiksel olarak göstermiştir. Böylece birçok modern EEG uygulamasının temellerini atmıştır ve "elektroensefalogram" terimini ilk kez insanlardaki beyin elektrik potansiyellerini tanımlamak için kullanmıştır [5].

EEG cihazı elektrotlardan, iletken jelinden, amplifikatörlerden ve Analog-Dijital dönüştürücüden oluşur. Elektrotlar, beyin derisinin yüzeyinden gelen elektriksel aktiviteyi iletmek için kullanılır ve aktif elektrot, referans elektrot ve toprak elektrot olarak adlandırılan üç elektrot grubundan oluşur. EEG işareti, aktif elektrot ile referans elektrot arasındaki potansiyel farkı ölçerek kaydedilir. Toprak elektrot, referans elektrot ile aynı seviyede tutularak aktif elektrot ile referans elektrot arasındaki gerilim farkını ölçer. EEG ölçümü, bu minimum konfigürasyon kullanılarak gerçekleştirilir [6].






EEG ölçümü, uluslararası düzeyde kabul görmüş 10-20 elektrot konum sistemi kullanılarak yapılmaktadır. Bu yöntem standartlaştırılmış tekrarlanabilirliği sağlamak amacıyla geliştirilmiştir [7]. Bu sistemde "10" ve "20", bitişik elektrotlar arasındaki gerçek mesafelerin, kafatasının toplam ön-arka veya sağ-sol mesafesinin %10 veya %20'si olduğu gerçeğini ifade eder [8].



Şekil 1. 10-20 Uluslararası Elektrot Yerleşim Sistemi [9]

EEG sinyallerinin genliği tepeden tepeye 1–100 μ V ve frekans bandı ise 0.5- 100 Hz (ancak genellikle ilgilenilen alan 30 Hz'in altındadır) aralıklarındadır. EEG sinyalleri durağan olmayan sinyaller olup genlik, faz ve frekans bakımından zaman içerisinde değişmektedir [10]. Tablo 1'de EEG sinyallerinin alt bantlarına ait özellikler verilmiştir.

Tablo 1. EEG sinyal alt bantları

Dalga Tipi	Frekans Aralığı (Hz)	Gözlemlenen Durumlar	Sinyal Örneği
Delta	0.5-4	Derin uyku	
Teta	4-8	REM uykusu	
Alfa	8-13	Gözler kapalı dinlenme	
Beta	13-30	Zihinsel aktivite	
Gama	>30	Tüm beyin aktivitesi	

1.2. Majör Depresif Bozukluk (MDB)

Majör depresif bozukluk (MDB), depresyonun en yaygın ve belirgin türlerinden biridir. Majör depresyon, beynin normal işlevlerinde bozulmalar ve düşünce, davranış ve bedensel işlevlerde önemli değişikliklerin gözlemlendiği bir psikiyatrik bozukluktur [11]. Dünya genelinde yaklaşık 280 milyon insan depresyonla mücadele etmektedir. Bu rakam yaklaşık olarak dünya nüfusunun %3.8'ine karşılık gelir. Her yıl 700.000'den fazla insan intihar nedeniyle yaşamını yitirmektedir. İntihar, 15-29 yaş aralığındaki insanlar için ölümün dördüncü en yaygın nedenidir. Bu istatistikler depresyonun dünya genelinde ciddi bir halk sağlığı sorunu olduğunu göstermektedir [12]. MDB tanılı hastalar olumsuz olaylara karşı abartılı tepkiler verebilir ancak MDB sadece duygusal belirtilerle sınırlı kalmaz. Bilişsel işlev bozukluğu MDB tanısı için önemli ana kriterlerden biridir. Bilişsel işlevler; psikomotor hız, dikkat, bellek, yürütücü işlevler gibi konuları kapsamaktadır [13]. Sinir bilimi, psikoloji ve bilişsel bilim alanlarında yapılan araştırmalar EEG kullanarak psikolojik aktivitelerin ve bilişsel davranışların ölçülebileceğini göstermiştir. Bu nedenle bilişsel işlev bozukluğu, uykusuzluk, uyku bozukluğu gibi hastalık semptomlarının; psikoz, anksiyete ve depresyon gibi zihinsel bozuklukların teşhisinde objektif bir fizyolojik yöntem olarak EEG kullanılmaktadır [14].

1.3. MDB ve EEG İlişkisi

MDB hastalığının tespiti, uzman ile kişinin yüz yüze görüşmesi ve psikometrik anketler gibi subjektif yöntemlerle mümkündür. Hastalar kişilik yapısına bağlı olarak depresyonu farklı şekilde ifade edebilmektedir. Bazıları daha çok ruhsal şikayetler ile bazıları ise fiziksel şikayetlerle uzmana başvurmaktadır. Ancak hastalık belirtilerinin çoğunlukla soyut olması doğru teşhisin konulmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle başvuru uzmanının yetkinliğinin ve belirtilerin doğru analiz edilmesinin önemi daha da artmaktadır [15]. Bilişsel işlev bozukluğu MDB tanısı için önemli ana kriterlerden biridir. Bilişsel işlevler çoğunlukla beyinde frontal lob ve prefrontal korteks ile ilişkilidir ve dikkat, algı, bellek gibi temel fonksiyonlarla bağlantı kurar. Beynin bilişsel işlev ile ilgili bu alanları MDB tanılı hastalarda etkilenmektedir [16]. Zihinsel işlevlerdeki herhangi bir bozulma beyin biyoelektriksel aktivitesini etkiler ve bu durum EEG ile alınan sinyallerde gözlemlenebilir. Literatürdeki EEG sinyallerine dayalı depresyon tespiti çalışmalarında hastaların sağlıklı bireylerden elektrofizyolojik açıdan farklı olduğu sonuçları elde edilmiştir [17]. Bu sebeplerden dolayı tanıya yönelik mevcut yöntemlere ek objektif ve yaygın bir teşhis yöntemi ihtiyacı fark edilmektedir. EEG verileri ile depresyonun tespit edilmesi, erken ve doğru teşhis ile tedavi sürecine olumlu katkı sağlayarak uzmana yardımcı olmak açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan literatür taramasında elde edilen bulgulara ait tablo aşağıda verilmiştir:

Tablo 2. Literatürdeki çalışmalar

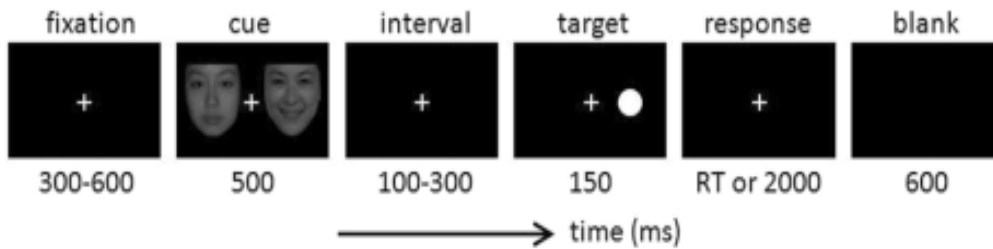
Çalışma	Yıl	Veri Seti ve Yöntemler	Sınıflandırıcı	Doğruluk / Sonuç
Knott ve ark. [18]	2001	<ul style="list-style-type: none"> 23 normal ve 70 depresif erkek birey Güç, Frekans, Asimetri ve Koherans 	İstatistiksel Analiz	%91,3
Hinrikus ve ark. [19]	2009	<ul style="list-style-type: none"> 18 normal ve 18 depresif birey SASI, Inter-Hemisferik Asimetri ve Koherans 	İstatistiksel Analiz	SASI, depresif ve kontrol gruplarını açıkça ayırmaktadır. (p<0,005)
Puthankattil ve ark. [20]	2012	<ul style="list-style-type: none"> 15 normal ve 15 depresif birey Relative Wavelet Energy Entropi 	YSA	%98,11
Hosseinfard ve ark. [21]	2013	<ul style="list-style-type: none"> 45 normal ve 45 depresif birey Lineer olmayan öznelikler Öznelik seçimi 	LR	%90
Faust ve ark. [22]	2014	<ul style="list-style-type: none"> 15 normal ve 15 depresif birey Wavelet Packet Decomposition Entropi 	PNN	%99,5
Acharya ve ark. [23]	2015	<ul style="list-style-type: none"> 15 normal ve 15 depresif birey Lineer olmayan öznelikler Öznelik seçimi 	SVM	%98
Li ve ark. [24]	2016	<ul style="list-style-type: none"> 10 normal ve 10 depresif birey Lineer ve lineer olmayan öznelikler Öznelik seçimi 	SVM	Duygusal: %91,70 Nötr: %96
Mohan ve ark. [25]	2016	<ul style="list-style-type: none"> 53 normal ve 63 depresif birey Fast Fourier Transform 	YSA	%90
Liao ve ark. [26]	2017	<ul style="list-style-type: none"> 12 normal ve 12 depresif birey Principal Component Analysis 	SVM	%81,23
Mümtaz ve ark. [27]	2017	<ul style="list-style-type: none"> 30 normal ve 33 depresif birey Asimetri 	SVM	%98,4
Acharya ve ark. [28]	2018	<ul style="list-style-type: none"> 15 normal ve 15 depresif birey 13 Katmanlı CNN 	CNN	Sağ: %95,96 Sol: %93,54
Mahato ve ark. [29]	2018	<ul style="list-style-type: none"> 30 normal ve 30 depresif birey Bant geçiren filtre Independent Component Analysis 	SVM	%88,33
Cai ve ark. [30]	2018	<ul style="list-style-type: none"> 121 normal ve 92 depresif birey Finite Impulse Response 	KNN	%79,27
Ay ve ark. [31]	2019	<ul style="list-style-type: none"> 15 normal ve 15 depresif birey End-to-end 	CNN-LSTM	Sağ: %99,12 Sol: %97,66
Duan ve ark. [32]	2020	<ul style="list-style-type: none"> 16 normal ve 16 depresif birey Finite Impulse Response Independent Component Analysis 	CNN	%94,13
Saeedi ve ark. [33]	2020	<ul style="list-style-type: none"> 30 normal ve 34 depresif birey Bant Geçiren Filtre ve Wavelet 	EKNN	%98,44

İzci ve ark. [34]	2021	<ul style="list-style-type: none"> 16 normal ve 16 depresif birey Bant Geçiren ve Çentik Filtre 	Torbalama	%89,5
Raghavendra ve ark. [35]	2021	<ul style="list-style-type: none"> 15 normal ve 15 depresif birey Continuous Wavelet Transform 	Optimize edilebilir SVM	Sağ: %99,33 Sol: %99,13
Sun ve ark. [36]	2022	<ul style="list-style-type: none"> 30 normal ve 34 depresif birey Bant Geçiren ve Çentik Filtre 	CN-GCN	%99,29
Zhu ve ark. [37]	2022	<ul style="list-style-type: none"> 28 normal ve 27 depresif birey Finite Impulse Response 	GCN	%96,50
Chen ve ark. [38]	2023	<ul style="list-style-type: none"> 30 normal ve 34 depresif birey Bant Geçiren Filtre ve ICA 	LG-GCN	%99,30
Zhang ve ark. [39]	2023	<ul style="list-style-type: none"> 29 normal ve 24 depresif birey Bant Geçiren Filtre Ayrık Dalgacık Dönüşümü 	CNN	%95,87

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Veri Seti

Yapılması hedeflenen çalışmada Çin/Gansu’da bulunan Lanzhou Üniversitesi İkinci Hastanesi’nde yapılan bir deney ile açık erişime sunulan; MDB hastalarına ve sağlıklı bireylere ait görsel uyaranlar sonucunda elde edilen EEG sinyallerini içeren veri seti kullanılacaktır. Bu katılımcılara, depresyon tanısı almış 24 ayakta tedavi hastası (13 erkek ve 11 kadın; 16-56 yaş arası) ve 29 sağlıklı kontrol (20 erkek ve 9 kadın; 18-55 yaş arası) dahil edilmiştir. Veri setinde 53 katılımcının EEG sinyalleri hem dinlenme halinde hem de nokta prob görevlerini yaparken kaydedilmiştir. İki durumda da katılımcılardan başları da dahil olmak üzere bedensel hareket ve gereksiz göz hareketleri yapmadan uyanık ve hareketsiz kalmaları istenmiştir. Dinlenme durumunda 5 dakika gözler kapalıyken EEG verisi kaydedilmiştir. Nokta prob görevinde ise katılımcılar 17 inçlik, 1280x1024 çözünürlük ve 60 Hz yenileme hızına sahip monitörün önüne 60 cm mesafede oturtulmuştur. Deney başladığında katılımcılardan tüm dikkatlerini duygusal-nötr yüz çiftlerine odaklamaları istenmiştir. Nokta görüldüğünde ise tepki kutusundaki düğmeye mümkün olduğunca hızlı ve doğru bir şekilde basmaları istenmiştir. Görev üç bloktan (korku-nötr, üzgün-nötr ve mutlu-nötr) oluşmaktadır. Her blokta 160 deneme bulunmaktadır. Her denemenin başlangıcında merkezi ekranda 300 ms sabit beyaz bir artı işareti belirmiştir. Daha sonra artı işareti ekranda merkezi olarak gösterilmiştir. Duygusal-nötr yüz uyaran çifti (çiftler rastgele bir sıraya göre düzenlenmiştir) 500 ms boyunca bir ipucu olarak ekranda gösterilmiştir. 100-300 ms’lik kısa bir aradan sonra nokta prob 150 ms boyunca sabit artı işaretinin sol veya sağ konumunda rastgele bir hedef olarak görünmüştür. Eş zamanlı olarak katılımcılardan ‘nokta’nın uzaysal konumunu belirleyerek tepki kutusu üzerindeki ‘1’ veya ‘4’ düğmesine mümkün olduğunca hızlı basmaları istenmiştir. Nokta sabit artı işaretinin solunda ise katılımcı ‘1’ tuşuna; sağında ise katılımcı ‘4’ tuşuna basmalıdır. Katılımcıların yanıtını almak için 2000 ms’lik otomatik aralık kullanılmıştır. Aksi halde katılımcılar bir sonraki denemeye yönlendirilmiş ve ardından 600 ms boyunca siyah bir ekran gösterilmiştir. İşlem bir blok tamamlanana kadar kademeli olarak devam etmiştir. Her blok tüm görev bitene kadar çalıştırılmış ve görevin tamamı yaklaşık 25 dakikada bitirilmiştir. Nokta prob görevinin deney sıralaması Şekil 2’de gösterilmiştir [40].



Şekil 2. Nokta Prob Görevi Deney Sıralaması

2.2. Sinyal Ön İşleme

Sayısal sinyal işleme, bir sinyalin frekans spektrumunda belirli frekanslarda hedeflenen işlemleri gerçekleştirerek istenen özelliklere sahip sonuçlar elde etmeyi amaçlar. Sonlu dürtü yanıtı filtreler (FIR), dijital sinyal işleme için kullanılan bir filtreleme tekniğidir ve sinyalleri işlemek için uygulanır. Bağımsız Bileşen Analizi (BBA), çok değişkenli istatistiksel bir yöntem olup EEG sinyallerinin ön işleme aşamalarından biridir. BBA, EEG sinyallerini bileşenlerine ayırıştırarak karmaşık bileşenleri birbirinden bağımsız hale getirir [41].

2.3. Öznitelik Çıkarımı ve Seçimi

Öznitelik çıkarma, veri boyutunu azaltmak için kullanılan bir tekniktir. Bu süreç, makine öğrenmesi modelinin eğitim sürecinde kaynakları daha verimli kullanarak modelin performansını artırabilir. Makine öğrenmesi uygulamalarında, kullanılacak özneliklerin çıkarılması ve seçilmesi modelin sınıflandırma başarısını büyük ölçüde etkiler.

Bir sinyal genellikle çeşitli frekans bileşenlerinin toplamından oluşur. Bu bileşenler farklı frekanslara sahip olabilir ve her birinin gücü değişiklik gösterebilir. EEG analizlerinde kullanılan Shannon entropisi, sinyalde gözlemlenen genlik değerlerinin olasılık dağılımına dayanarak EEG'nin gelecekteki genlik değerlerinin tahmin edilebilirliğini ölçer. Hjorth parametreleri, bir sinyalin istatistiksel özelliklerini zaman ekseninde gösterir ve sinyallerin aktivite, hareketlilik ve karmaşıklık özelliklerini incelemeye olanak tanır. Fraktal boyut analizi, EEG analizi de dahil olmak üzere biyomedikal sinyal işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, sinyalin zaman alanındaki karmaşıklığının doğrusal olmayan bir ölçüsü olarak tanımlanır.

Öznitelik seçimi aşamasında sınıflandırma sürecinin karmaşıklığını azaltmak için tüm verilerin temsili bir alt kümesi seçilir ve bu sayede sınıflandırma süreci geliştirilebilir. Ki-kare testi, literatürde yaygın olarak kullanılan öznitelik seçme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, ayrıklaştırılan değişkenlerdeki ki-kare değerleri hesaplanır ve en yüksek değerlere sahip olanlar seçilerek özellik seçimi gerçekleştirilir [42].

2.4. Sınıflandırma

Sınıflandırma, insan beynindeki karar verme süreçlerinin makine dilindeki karşılığıdır. Klasik sınıflandırıcılar, istatistiksel ve matematiksel özellikleri kullanarak bir modele bağlı olarak karşılık gelen sınıf etiketlerini belirlerler.

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beynindeki nöronlara benzer şekilde çalışan birimlerden oluşur. YSA; genellikle giriş katmanı, gizli katman(lar) ve çıkış katmanı gibi ardışık katmanlardan meydana gelir. Her katmandaki nöronlar, bir önceki katmandaki nöronlarla bağlantılıdır. Giriş katmanına verilen veriler gizli katmanlarda işlenir ve sonuç çıkış katmanında elde edilir. Bu, modelin tahmin ettiği değer veya sınıflandırmadır. Bu süreçte, her katmandaki birimlerin ağırlıkları öğrenme algoritmaları ile ayarlanır ve böylece ağ eğitilmiş olur. Sonuç olarak YSA, verileri işlerken öğrenme ve genelleme yeteneği kazanarak çeşitli görevleri yerine getirme kapasitesine sahip hale gelir [43].

Destek Vektör Makineleri (SVM), veri kümesini farklı çekirdek fonksiyonları kullanarak hiper düzlemler aracılığıyla bölen bir yöntemdir. Verinin özelliklerine bağlı olarak uygun çekirdek fonksiyonları seçilebilir. SVM, farklı veri gruplarını ayıran sınıf sınırlarını oluşturur. Bu sınıf sınırları sınıfa ait tüm verileri kapsayan ve mümkün olduğunca uzak noktalardan geçen hiper düzlemlerle belirlenir. Bu düzlemler sayesinde yeni verilerin hangi sınıf sınırları içinde yer aldığı belirlenir ve bu verilere sınıf etiketleri atanır. Bu işlemden sonra sınıf sınırları yeniden düzenlenir. SVM, düzenleme parametresi adı verilen bir parametre kullanarak oluşturulan sınıf sınırlarında etkili bir genelleştirme sağlar. Bu sayede SVM, aşırı öğrenmeye ve veriye özgü model oluşumuna karşı dirençli olup yüksek genelleştirme yeteneğine sahiptir [44].

Rastgele Orman (RO), özneliklerin rastgele seçildiği bir makine öğrenmesi topluluk yöntemidir. Bu yöntem hızlı, hassas ve gürültüye dayanıklı bir sınıflandırma sağlar. Bir Karar Ağacı oluşturulurken özneliklerin bir alt kümesi rastgele seçilir ve her ağaç bağımsız olarak bir sınıflandırma tahmininde bulunarak ilgili sınıf için oy verir. Birkaç Karar Ağacının kullanımı tek bir Karar Ağacının çıktısına göre daha az gürültü ve aykırı değerlere karşı daha az duyarlıdır, bu da küçük veri setlerinden kaynaklanan değişkenliği azaltır ve tahminlerin güvenilirliğini artırır. Bu nedenle, tıbbi veri setleri için RO tercih edilen bir yöntemdir [45].

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Modelin sınıflandırma performansını değerlendirmek için kullanılan ölçütler, karmaşıklık matrisinden elde edilir. Bu matris, sınıflandırılan verilerin doğru veya yanlış olarak hangi sınıfa atandığını göstererek modelin başarısını değerlendirir. Sınıflandırıcı belirli tekniklerle test edildikten sonra karmaşıklık matrisi kullanılarak modelin performansını ölçmek için çeşitli önemli parametreler hesaplanır.

Doğruluk, sınıflandırıcının her iki sınıf için de doğru tahmin ettiği örnek sayısının toplam örnek sayısına oranıdır.

Duyarlılık (hassasiyet), sınıflandırıcının 1 numaralı sınıfı doğru tahmin ettiği örnek sayısının gerçek 1 numaralı sınıfa ait olan toplam örnek sayısına oranıdır.

Özgüllük, sınıflandırıcının 0 numaralı sınıfı doğru tahmin ettiği örnek sayısının gerçek 0 numaralı sınıfa ait olan toplam örnek sayısına oranıdır.

Kesinlik (pozitif kestirim doğruluğu), sınıflandırıcının 1 numaralı sınıfı doğru tahmin ettiği örnek sayısının 1 numaralı sınıf olarak tahmin edilen toplam örnek sayısına oranıdır [46].

4. SONUÇLAR

Literatürde incelenen çalışmalar neticesinde Tablo 2’de yer alan doğruluk oranları bize elde edilen sonuçların anlamlı olduğunu göstermektedir. Hangi öznelikler kullanıldığında ve hangi sınıflandırıcı yöntemleri uygulandığında daha başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda doğruluk oranlarını artıracak sınıflandırma yöntemleri kullanılarak hazır veri seti ile bir çalışma yapılması planlanmaktadır. Kullanılacak veri setindeki ham EEG sinyallerine ön işleme, öznelik çıkarımı, öznelik seçimi ve sınıflandırma olarak sinyal işleme prosedürleri uygulanacaktır. Ön işleme aşamasında FIR filtre ve ICA uygulanacaktır. Öznelik çıkarımı aşamasında her EEG sinyali için frekans özellikleri, entropi, kompleksite, fraktal boyut ve Hjort parametreleri öznelik olarak belirlenecektir. Ki-kare yöntemi kullanarak sınıflandırma aşamasında kullanılacak öznelik seçiminin yapılması planlanmaktadır. Üç farklı sınıflandırma algoritması kullanılacaktır: YSA, SVM ve RF. Bu sınıflandırıcılara ait doğruluk, kesinlik ve hassasiyet parametreleri kıyaslanacaktır. Sonuç olarak elde edilen en yüksek performansa sahip yöntem belirlenecektir.

53 katılımcının EEG sinyallerinin analiz edilmesi planlanan bu çalışmada kullanılacak yöntemlerle doğruluk, kesinlik ve hassasiyet parametrelerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca EEG sinyallerine uygulanacak sinyal işleme adımları ve yapay zekâ teknikleri açısından da literatüre katkı sağlanacaktır.

YAZAR KATKILARI

1. yazar %70, 2. yazar %30

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmada herhangi bir kurum, kuruluş, kişiler ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK

Bu makalenin yayınlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] E. Keleş ve E. Kol, «An Overview of the Brain Imaging Techniques from the,» *Elementary Education Online*, cilt 14, no. 1, p. 349- 363, 2015.
- [2] P. A. Young, P. H. Young ve D. L. Tolbert, *Basic Clinical Neuroscience*, Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
- [3] N. V. Thakor ve S. Tong, «Advances in Quantitative Electroencephalogram Analysis Methods,» *Annual Review of Biomedical Engineering*, no. 6, pp. 453-495, 2004.
- [4] «Mayfield Brain & Spine,» [Çevrimiçi]. Available: <https://mayfieldclinic.com/pe-anatbrain.htm>. [Erişildi: Temmuz 2024].
- [5] M. Teplan, «Fundamentals Of Eeg Measurement,» *Measurement in Biomedicine*, cilt 2, no. 2, 2002.
- [6] J. S. Kumar ve P. Bhuvaneshwari, «Analysis of Electroencephalography (EEG) Signals and Its Categorization–A Study,» *Procedia Engineering*, no. 38, pp. 2525-2536, 2012.
- [7] P. L. Nunez ve R. Srinivasan, «Electroencephalogram,» 2007. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.scholarpedia.org/article/Electroencephalogram>. [Erişildi: Eylül 2024].
- [8] M. Khazi, A. Kumar ve V. M J, «Analysis of EEG Using 10:20 Electrode System,» *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, cilt 2, no. 1, 2012.
- [9] D. Silverman, «The Rationale and History of the 10-20 System of the International Federation,» *American Journal of EEG Technology*, cilt 1, no. 3, pp. 17-22, 2015.
- [10] D. L. Schomer ve F. H. Lopes da Silva, *Niedermeyer's Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*, Lippincott Williams & Wilkins, 2011.
- [11] L. Heimer, *The Human Brain and Spinal Cord: Functional Neuroanatomy and Dissection Guide*, Springer Science & Business Media, 2012.

- [12] W. H. Organization, «World Health Organization,» 31 Mart 2023. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/depression>. [Erişildi: Eylül 2024].
- [13] P. Gorwood, E. Corruble ve B. Falissard, «Toxic Effects of Depression on Brain Function: Impairment of Delayed Recall and the Cumulative Length of Depressive Disorder in a Large Sample of Depressed Outpatients,» *American Journal of Psychiatry*, cilt 6, no. 165, 2008.
- [14] S. Salık, Soner Çakmak ve Şükrü Uğuz, «Tedavi almamış major depresyon hastalarında erken dönemde bilişsel işlevler,» *Klinik Psikiyatri Dergisi*, no. 22, pp. 408-415, 2019.
- [15] P. A. Young, Paul Henry Young ve D. L. Tolbert, *Basic Clinical Neuroscience*, Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
- [16] M. D. Lezak, *Neuropsychological Assessment*, Oxford University Press, 2004.
- [17] E. Mtui, G. Gruener ve P. Dockery, *Fitzgerald's Clinical Neuroanatomy and Neuroscience E-Book*, Elsevier Health Sciences, 2020.
- [18] V. Knott, C. Mahoney, S. Kennedy ve K. Evans, «EEG power, frequency, asymmetry and coherence in male depression,» *Psychiatry Research: Neuroimaging Section*, no. 106, pp. 123-140, 2001.
- [19] H. Hinrikus, A. Suhhova ve M. Bachmann, «Electroencephalographic spectral asymmetry index for detection of depression,» *Med Biol Eng Comput*, no. 47, pp. 1291-1299, 2009.
- [20] S. D. Puthankattil ve P. K. Joseph, «Classification Of Eeg Signals In Normal And Depression Conditions By Ann Using Rwe And Signal Entropy,» *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, cilt 12, no. 4, 2012.
- [21] B. Hosseinifard, M. H. Moradi ve R. Rostami, «Classifying depression patients and normal subjects using machine learning techniques and nonlinear features from EEG signal,» *computer methods and programs in biomedicine*, no. 109, pp. 339-345, 2013.
- [22] O. Faust, P. C. Alvin Ang ve S. D. Puthankattil, «Depression Diagnosis Support System Based On Eeg Signal Entropies,» *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, cilt 3, no. 14, 2014.
- [23] U. R. Acharya, V. K. Sudarshan ve H. Adeli, «Computer-Aided Diagnosis of Depression Using EEG Signals,» *European Neurology*, no. 73, 2015.
- [24] X. Li, B. Hu, S. Sun ve H. Cai, «EEG-based mild depressive detection using feature selection methods and classifiers,» *computer methods and programs in biomedicine*, no. 136, pp. 151-161, 2016.
- [25] Y. Mohan, S. S. Chee ve D. K. Pei Xin, «Artificial Neural Network for Classification of Depressive and Normal in EEG,» %1 içinde *2016 IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences*, 2016.
- [26] S.-C. Liao, C.-T. Wu ve H.-C. Huang, «Major Depression Detection from EEG Signals Using Kernel Eigen-Filter-Bank Common Spatial Patterns,» *Sensors*, no. 17, 2017.
- [27] W. Mumtaz, L. Xia ve S. S. Azhar Ali, «Electroencephalogram (EEG)-based computer-aided technique to diagnose major depressive disorder (MDD),» *Biomedical Signal Processing and Control*, no. 31, pp. 108-115, 2017.
- [28] U. R. Acharya, S. Lih Oh ve Y. Hagiwara, «Automated EEG-based screening of depression using deep convolutional neural network,» *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, no. 161, pp. 103-113, 2018.
- [29] S. Mahato ve S. Paul, «Classification of Depression Patients and Normal Subjects Based on Electroencephalogram (EEG) Signal Using Alpha Power and Theta Asymmetry,» *Journal of Medical Systems*, cilt 28, no. 44, 2020.
- [30] H. Cai, J. Han ve Y. Chen, «A Pervasive Approach to EEG-Based Depression Detection,» *Hindawi Complexity*, 2018.
- [31] B. Ay, O. Yildirim ve M. Talo, «Automated Depression Detection Using Deep Representation and Sequence Learning with EEG Signals,» *Journal of Medical Systems*, cilt 43, no. 205, 2019.
- [32] L. Duan, H. Duan ve Y. Qiao, «Machine Learning Approaches for MDD Detection and Emotion Decoding Using EEG Signals,» *Frontiers in Human Neuroscience*, cilt 284, no. 14, 2020.
- [33] M. Saeedi, A. Saeedi ve A. Maghsoud, «Major depressive disorder assessment via enhanced k-nearest neighbor method and EEG signals,» *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, no. 43, pp. 1007-1018, 2020.
- [34] E. İzci, . M. A. Özdemir ve A. Akan, «Majör Depresif Bozukluğun Tespiti için EEG ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Bir Yöntem,» *ResearchGate*, 2021.
- [35] U. Raghavendra, A. Gudigar ve Y. Chakole, «Automated detection and screening of depression using continuous wavelet transform with electroencephalogram signals,» *Wiley Expert Systems*, pp. 1-20, 2021.
- [36] X. Sun, Chao Ma ve P. Chen, «A Novel Complex Network-Based Graph Convolutional Network in Major Depressive Disorder Detection,» *Ieee Transactions On Instrumentation And Measurement*, no. 71, 2022.
- [37] J. Zhu, C. Jiang ve J. Chen, «EEG based depression recognition using improved graph convolutional neural network,» *Computers in Biology and Medicine*, no. 148, 2022.
- [38] Y. Chen, X. Hu ve L. Xia, «A Local-Global Graph Convolutional Network for Depression Recognition using EEG Signals,» *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, cilt 7, no. 14, 2023.
- [39] B. Zhang, D. Wei ve G. Yan, «Spatial–Temporal EEG Fusion Based on Neural Network for Major Depressive Disorder Detection,» *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, 2023.

- [40] HanshuCai, Z. Yuan, Y. Gao ve S. Sun, «A multi-modal open dataset for mental-disorder analysis,» *Scientific Data* /, cilt 9, no. 178, 2022.
- [41] F. Cong, T. Ristaniemi ve H. Lyytinen, *Advanced Signal Processing On Brain Event-related Potentials: Filtering Erps In Time, Frequency And Space Domains Sequentially And Simultaneously*, World Scientific, 2015.
- [42] F. Çifçi, C. Kaleli ve S. Günel, «Öznitelik Seçme ve Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Eğitim Performansının Tahmin Edilmesi,» *Anadolu Journal of Educational Sciences International*, cilt 8, no. 2, pp. 419-440, 2018.
- [43] S. B. Maind ve P. Wankar, «Research Paper on Basic of Artificial Neural Network,» *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, cilt 1, no. 2, 2014.
- [44] S. Gunn, *Support Vector Machines, Image Speech and Intelligent Systems Group*, 1997.
- [45] V. Podgorelec, P. Kokol ve B. Stiglic, «Decision Trees: An Overview and Their Use in Medicine,» *Journal of Medical Systems*, no. 26, pp. 445-463, 2002.
- [46] A.-M. Šimundić, «Measures of Diagnostic Accuracy: Basic Definitions,» *Ejyfcc*, cilt 19, no. 4, pp. 203-211, 2009.



Sürekli mıknatıslı senkron motorların kontrol tekniklerinin incelenmesi ve sürücü tasarımı

İbrahim Özdin^{1,2*}, Nurettin Üstkoyuncu³

¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim dalı, Kayseri, Türkiye

² Envest Enerji ve Su Teknolojileri Ltd. Şti., Erciyes Teknopark, Kayseri, Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Kayseri, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

17.07.2024

Kabul tarihi

01.10.2024

Yayın tarihi

31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

SMSM,

AYK,

MOSFET,

SiC,

IPM

ÖZET

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) yüksek güç yoğunlukları, enerji verimlilikleri ve düşük bakım gereksinimleri sayesinde endüstriyel otomasyon sistemleri ve elektrikli araçlar gibi çok farklı alanlarda kendilerine kullanım alanı bulmaktadır. Bu çalışmada, ilgili motorların kontrolünde kullanılmakta olan yöntemler karşılaştırılmış ve alan yönlendirmeli kontrol (AYK) başta olmak üzere bu yöntemlerin kullanılabilceği bir sürücü devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen sürücü devresinde Silisyum Karbür (SiC: Silicon Carbide) tabanlı Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör (MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) Akıllı Güç Modülü (IPM: Intelligent Power Module) kullanılarak yüksek verimli ve birçok avantajı üzerinde barındıran bir yapı elde edilmiştir.

Investigation of control techniques for permanent magnet synchronous motors and a driver design

ARTICLE INFO

Article history:

Received

17.07.2024

Accepted

01.10.2024

Published

31.12.2024

Keywords:

SMSM,

AYK,

MOSFET,

SiC,

IPM

ABSTRACT

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are used in many fields such as industrial automation systems and electric vehicles due to their high power densities, energy efficiencies, and low maintenance requirements. In this study, various methods used in the control of PMSMs have been compared and a driver circuit design has been realized to apply these control techniques, especially the Field Oriented Control (FOC). The designed driver circuit utilizes Silicon Carbide (SiC) Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) based Intelligent Power Modules (IPMs) to achieve a high-efficiency structure with many advantages.

1. GİRİŞ

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) günümüzde elektrikli ev cihazlarından endüstriyel uygulamalara ve elektrikli araçlara kadar çok farklı alanlarda kullanılmakta ve diğer elektrik motorlarına çok iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. SMSM'ler hızlı dinamik tepkileri, istikrarlı çalışmaları, yüksek verimlilikleri ve kompakt boyutlarıyla önem kazanmaktadır [1].

ORCID ID: İbrahim Özdin: 0009-0007-9045-5859; Nurettin Üstkoyuncu: 0000-0001-9054-8851

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı, Kayseri, TÜRKİYE

Tel: +90 352 224 01 80

E-mail: ibrahimozdin@gmail.com

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: Özdin İ., Üstkoyuncu N., "Sürekli mıknatıslı senkron motorların kontrol tekniklerinin incelenmesi ve sürücü tasarımı", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 22-32, 2024.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlara ait bileşenlerin tasarımı, motorun verimliliğini, moment üretimini ve hız kontrol yeteneklerini önemli ölçüde etkilemektedir [2]. Dolayısıyla bu amaçla literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda SMSM'lerin işletim özelliklerini geliştirmek için tasarım ve optimizasyonun önemi vurgulanmaktadır [3]. Bununla birlikte bazı çalışmalarda sürekli mıknatıslı yapılarının motor performansı üzerindeki etkisi araştırılmış ve optimum verimlilik ile moment özelliklerine ulaşmada mıknatıslı konfigürasyonunun öneminin altı çizilmiştir [4, 5]. Aynı zamanda elektromanyetik alan simülasyonu ve modellemesindeki gelişmelerin SMSM tasarımlarının analizini ve iyileştirilmesini kolaylaştırdığını vurgulayan çalışmalar da literatürde yer almaktadır [6].

Simülasyon çalışmaları beraberinde yapılan tasarımsal değişiklikler ile elde edilen iyileştirmelerin yanında, ilgili motorların kontrolü hususunda da literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalarda genel olarak motorun verimli ve etkili bir şekilde kontrol edilebilmesi için geliştirilen skaler ve özellikle de vektörel kontrol yöntemlerine sıklıkla rastlanılmaktadır [7-11].

SMSM'lerde V/F kontrolünün uygulanması, salınım tepkilerini azaltmayı ve değişen hız referansları ile yük momenti koşulları altında senkronizasyonu korumayı, böylece güvenilir ve verimli motor performansı sağlamayı amaçlamaktadır [7]. Ayrıca, V/F kontrol teknolojisindeki gelişmeler, motor verimliliğini ve tepki sürelerini optimize eden sağlam kontrol algoritmalarının geliştirilmesini de sağlamıştır [8].

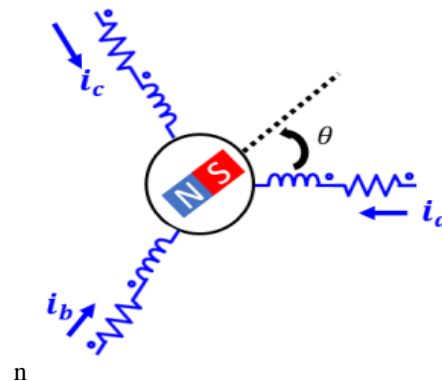
Skaler kontrol beraberinde alternatif akım motorlarının momentini ve akısını bağımsız olarak düzenlemek, verimliliği ve dinamik yanıtı artırmak için vektör kontrol teknikleri geliştirilmiştir [9-11]. Bu kontrol teknikleri arasında en yaygın olarak kullanılan Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK, FOC: Field Oriented Control). Alan yönlendirmeli kontrol, alternatif akım motorlarında moment ve akı bileşenlerinin kontrolünün ayrıştırılmasını içermekte ve optimum motor çalışması için bu parametrelerin bağımsız olarak düzenlenmesine olanak sağlamaktadır. Alan yönlendirmeli kontrol, stator tarafından üretilen manyetik alanı rotor akısı ile hizalayarak verimli moment üretimi ve hassas hız kontrolü sağlamaktadır [9]. Bu kontrol stratejisinin hızlı tepki süreleri ve yüksek verimlilik sunduğu literatürde çokça gösterilmiş olup bu durum, AYK'yi Doğrudan Moment Kontrol (DMK) yöntemi ile birlikte sıklıkla tercih edilen birer seçenek haline getirmektedir [9, 10]. Kontrol yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar dışında sürücü sistemlerde yer alan diğer elemanların da incelendiği çalışmalar ve ortaya konan ticari ürünler de bulunmaktadır. Sonuç olarak bir bütün olarak düşünüldüğünde, temel amacın düşük maliyetli ve yüksek verimli motor ile sürücülerin geliştirilmesi olduğu söylenebilir. Dolayısıyla bu makalede hem SMSM'lerin kontrolünde kullanılan yöntemler avantaj ve dezavantajları ile karşılaştırılmış hem de ilgili motorların sürücülerinde yeni nesil güç elektroniği elemanları kullanımının beraberinde getirdiği avantajlar sunulmuştur.

Bu çalışmada, öncelikle SMSM'lerin kontrolünde kullanılmakta olan kontrol tekniklerinin incelenebilmesi için SMSM'lerin matematiksel modeli üzerinde durulacak ve devamında ise ilgili kontrol tekniklerinin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılacaktır. Ardından ise bu kontrol teknikleri ile kullanılacak Silisyum Karbür (SiC: Silicon Carbide) tabanlı Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör (MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) Akıllı Güç Modülü (IPM: Intelligent Power Module) ile tasarımı gerçekleştirilen güç devresi avantajları ile birlikte sunulacaktır.

2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR

2.1 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Matematiksel Modeli

Dengede olan üç fazlı bir SMSM'nin kavramsal diyagramı Şekil 1'de verilmiştir [12].



Şekil 1. Dengeli Üç Fazlı SMSM'nin Kavramsal Diyagramı [12]

Burada faz gerilimleri sırası ile Eşitlik 1, 2 ve 3 ile verilebilmektedir.

$$V_a = R \cdot i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (1)$$

$$V_b = R \cdot i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (2)$$

$$V_c = R \cdot i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (3)$$

Bu eşitliklerde

$$\lambda_a = L \cdot \frac{di_a}{dt} + \phi \cdot \cos(\theta) \quad (4)$$

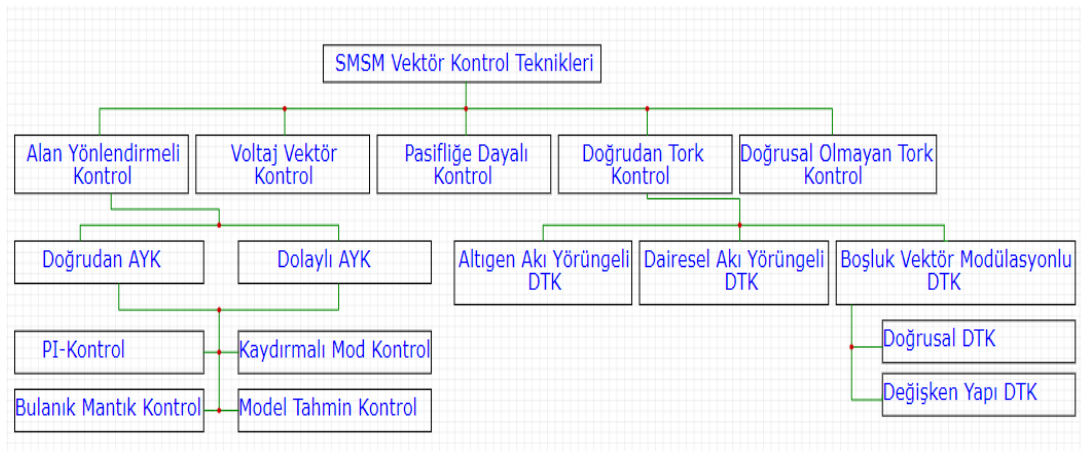
$$\lambda_b = L \cdot \frac{di_b}{dt} + \phi \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (5)$$

$$\lambda_c = L \cdot \frac{di_c}{dt} + \phi \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (6)$$

olarak tanımlanmakta olup. i_a , i_b ve i_c faz akımlarını göstermektedir [12].

2.2 Sürekli Miknatıslı Senkron Motorların Kontrol Yöntemleri

Sürekli miknatıslı senkron motorlardan en iyi şekilde performans alabilmek için çeşitli vektör kontrol teknikleri geliştirilmiştir. Bu kontrol teknikleri genel olarak Şekil 2’de gösterilmiştir [13]. Her bir kontrol tekniğinin kendi avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Uygulama gereksinimlerine ve sistem koşullarına bağlı olarak uygun kontrol tekniği seçilmelidir. SMSM’ler için kullanılmakta olan bazı kontrol yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 1’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. SMSM Vektör Kontrol Teknikleri [13]

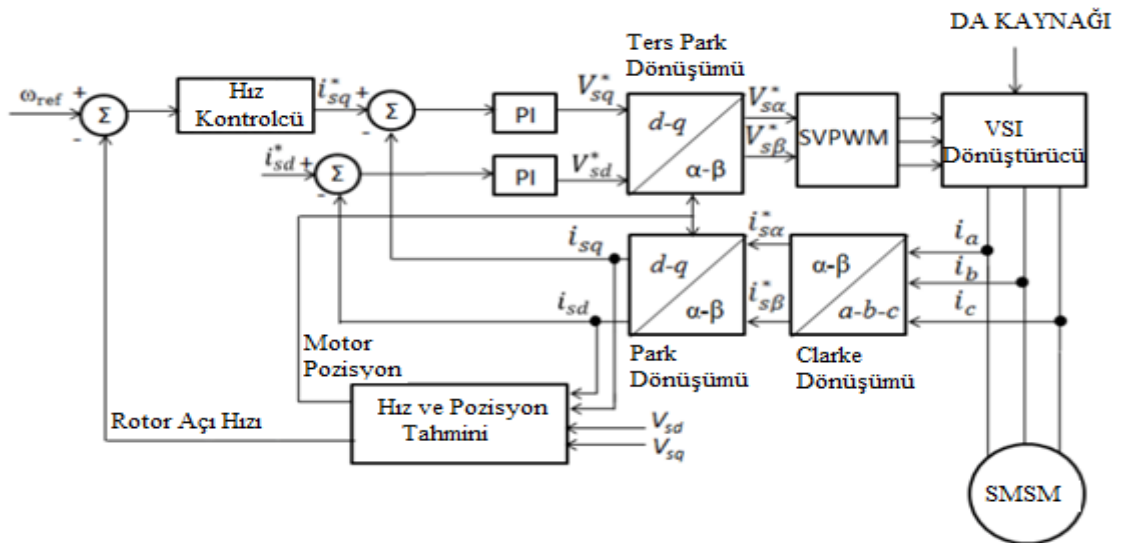
Tablo 1. Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırması

Kontrol Tekniği	Avantajlar	Dezavantajlar
V/F	<ul style="list-style-type: none"> Basitlik Düşük Maliyet Kolay Uygulama 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük Dinamik Performans Sınırlı Hız Aralığı Hassasiyet Eksikliği
Doğrudan Moment (Tork) Kontrol (DMK)	<ul style="list-style-type: none"> Hızlı Dinamik Yanıt Yüksek Moment Doğruluğu Basit Yapı Düşük Hesaplama Yüğü 	<ul style="list-style-type: none"> Harmonik Bozulma Akı Dalgalanmaları Hassas Ölçümler Gerekli
Model Tahmin Kontrol (MTK)	<ul style="list-style-type: none"> Optimum Performans Kısıtları Dahil Etme Yeteneği Hızlı Dinamik Yanıt Esneklik 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Hesaplama Maliyeti Model Doğruluğu Uygulama Karmaşıklığı
Adaptif Kontrol	<ul style="list-style-type: none"> Parametre Belirsizliđi Karşıısında Dayanıklılık Geniş Uygulama Alanı Gerçek Zamanlı Ayarlamalar 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Hesaplama Maliyeti Uygulama Karmaşıklığı Stabilite Sorunları
Nonlinear Kontrol	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Hassasiyet ve Dinamik Performans Geniş Çalışma Aralığında Dayanıklılık Enerji Verimliliği 	<ul style="list-style-type: none"> Matematiksel Karmaşıklık Hesaplama Yüğü Model Doğruluğu Sensör Gereksinimi
Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK)	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Performans Enerji Verimliliği Geniş Hız Aralığı Gelişmiş Moment Kontrolü 	<ul style="list-style-type: none"> Karmaşıklık Maliyet Hassasiyet

Herbir kontrol tekniğinin kendine göre avantaj ve dezavantajlarının bulunduğu Tablo 1’den açıkça görölmektedir. Buna karşın yapılan ve ortaya konan çalışmaların AYK ve DMK üzerinde yoğunlaştığı görölmektedir [13]. Bunun en önemli nedenleri arasında DMK’nın basit yapısı ve düşük hesaplama gereksinimlerine karşın iyi bir şekilde moment kontrolünü sağlaması, AYK’nın ise nispeten daha karmaşık yapısına ve yavaş dinamik cevabına karşın daha gelişmiş ve hassas moment kontrolü ile sağladığı yüksek performans gösterilebilir.

2.3 Alan Yönlendirmeli Kontrol

SMSM’ların kontrolünde kullanılan en önemli yöntemlerden birisi alan yönlendirmeli kontroldür. Bu kontrol tekniği, motorun stator akımlarını birbirine dik iki eksen olan d-ekseni ve q-eksenine çeviren Park Dönüşümüne dayanır. Literatürde uygulanmış olan bir AYK blok diyagramı Şekil 3’te verilmiştir [14].



Şekil 3. Alan Yönlendirmeli Kontrol Blok Diyagramı [14]

AYK yöntemi, stator akımlarının iki dik bileşene ayrılmasını gerektirir. Bu ayrım, sırasıyla Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilir. Clarke Dönüşümü, üç fazlı sistemdeki akımları iki fazlı bir sistemde α - β bileşenlerine dönüştürürken Park Dönüşümü, bu bileşenleri d-q referans çerçevesine taşıyarak kontrol edilebilir hale getirmektedir.

Clarke Dönüşümünün temel amacı, AYK algoritmasında kolaylık sağlamak ve motor kontrol sistemlerinde kullanılan matematiksel işlemleri basitleştirmektir. Bu dönüşüm, Eşitlik 7 ve 8’de verildiği üzere üç fazlı bir sistemdeki akımları (i_a , i_b ve i_c) kullanarak, bu akımları iki eksen üzerinde temsil eden i_α ve i_β akımlarının elde edilmesini sağlamaktadır.

$$i_\alpha = \frac{2}{3} \cdot i_a - \frac{1}{3} \cdot (i_b - i_c) \quad (7)$$

$$i_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (i_b - i_c) \quad (8)$$

Sistem üç fazlı dengede ise;

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (9)$$

olduğundan bu koşul altında Clarke Dönüşümüne ait eşitlikler, Eşitlik 10 ve 11 ile verildiği gibi yazılabilir:

$$i_\alpha = i_a \quad (10)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a + 2 \cdot i_b) \quad (11)$$

Park Dönüşümü ise bu α - β bileşenlerini d-q eksenine bileşenlerine dönüştürür ki bu, motorun manyetik alanına göre hizalanmış bir referans çerçevesidir. Park Dönüşümüne ait temel eşitlikler Eşitlik 12, 13, 14 ve 15’te verilmiştir.

$$i_d = i_\alpha \cdot \cos(\theta) + i_\beta \cdot \sin(\theta) \quad (12)$$

$$i_q = i_\beta \cdot \cos(\theta) - i_\alpha \cdot \sin(\theta) \quad (13)$$

$$V_d = i_d \cdot R + L_d \frac{di_d}{dt} - i_q \cdot \omega \cdot L_q \quad (14)$$

$$V_q = i_q \cdot R + L_q \frac{di_q}{dt} + i_d \cdot \omega \cdot L_d + \omega \cdot \phi_a \quad (15)$$

Burada

$$\phi_a = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \phi \quad (16)$$

şeklinde ifade edilebilir ve eşitliklerde yer alan i_d ve i_q sırasıyla d ve q eksenlerine ait akım bileşenleri olup, θ rotor akısı açısal pozisyonudur.

Park dönüşümü, AYK algoritmasının merkezi bir bileşenidir ve motorun torkunu ve akısını ayrı ayrı kontrol etmeyi mümkün kılar. Motorun manyetik akısının kontrolünü d-ekseni akımı olan i_d gerçekleştirirken, q-ekseni akımı olan i_q , tork üretiminden sorumludur.

Ters Park Dönüşümü, d-q döner referans çerçevesindeki sinyalleri α - β durağan referans çerçevesine geri dönüştürürken Ters Clarke Dönüşümü ise α - β çerçevesindeki akımları üç fazlı akımlara dönüştürmektedir.

3. MOSFET YARIİLETKEN TEKNOLOJİLERİ

Elektronik devrelerde kullanılan yarıiletken malzemeler, cihazların performansı, verimliliği ve güvenilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Silikon (Si), SiC ve Galyum Nitrit (GaN), yarıiletken elemanlar için en yaygın kullanılan malzemeler arasındadır. Bu yarıiletken malzemelerin teknolojik ve performans değerlendirmeleri sırasıyla Tablo 2 ve 3'te verilmiştir [15].

Tablo 2. Yarıiletken Malzemelerin Teknolojik Açıdan Değerlendirmesi

Teknoloji	Teknoloji Özellikleri	Faydaları
Si	<ul style="list-style-type: none"> En iyi RDS(on)/Paket Oranı Yenilikçi Paket Konseptleri Düşük Anahtarlama Kayıpları (Eoss) ve Kapı Yüğü (Qg) 	<ul style="list-style-type: none"> Çoğu Verimlilik Gereksinimi için En İyi Fiyat/Performans Oranı Pazardaki En Büyük MOSFET Portföyü Olgun ve Stabil Yapı
SiC	<ul style="list-style-type: none"> Düşük Geri Dönüş Toparlama (Qrr) ile Hızlı Gövde Diyotu Üstün Kapı-Oksit Güvenilirliği Mükemmel Termal, Çıg ve Kısa Devre Yeteneği Standart Sürücülerle Çalışabilme 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek Performans ve Kullanım Kolaylığı Yüksek Sıcaklık ve Zorlu Ortam Koşullarında Yüksek Sağlamlık, Daha Küçük Eleman Boyutu
GaN	<ul style="list-style-type: none"> Sıfır Geri Dönüş Toparlama (Qrr) Hızlı Gövde Diyotu En İyi FOM (Figures-of-Merit) Hızlı Anahtarlama 	<ul style="list-style-type: none"> En Yüksek Verimlilik ve Güç Yoğunluğu En Yüksek Anahtarlama Frekansları Kolay Sistem Entegrasyonu

Tablo 3. Yarıiletken Malzemelerin Performans Açısından Değerlendirmesi

Özellik	Yarıiletken Malzeme		
	Si	SiC	GaN
Verimlilik	İyi	Çok İyi	Çok İyi
Frekans	İyi	Çok İyi	Çok İyi
Güç Yoğunluğu	İyi	Çok İyi	Çok İyi
Maksimum Güç Yoğunluğu	Orta	İyi	Çok İyi
Sağlamlık	İyi	Çok İyi	Orta
Sıcaklık Dayanımı	İyi	Çok İyi	İyi
Çift Yönlü Topoloji Uyumluluğu	Orta	Çok İyi	Çok İyi
Kullanım Kolaylığı	İyi	Çok İyi	İyi
Fiyat/Performans	Çok İyi	Orta	Orta
Portföy Çeşitliliği	Çok İyi	Orta	Orta

4. SÜRÜCÜ TASARIMI

Bu çalışmada, SMSM'ler için kullanılacak bir sürücü tasarımı ele alınmıştır. Tasarım gerçekleştirilirken Infineon Technologies firmasının geliştirmiş olduğu EVAL-M1-IM828-A sürücü geliştirme kiti temel alınmış ve kontrolcü birimi olarak da ilgili firmanın geliştirmiş olduğu EVAL-M1-101T motor kontrol işlemci ünitesi kullanılmıştır. Kontrol komutlarının iletilmesi ve kritik durum değişkenlerinin izlenmesi amacıyla, Nextion firması tarafından üretilmiş olan programlanabilir dokunmatik ekran, sürücü sistemine entegre edilmiştir. Dokunmatik ekrana ait görsel Şekil 4'te sunulmuştur.



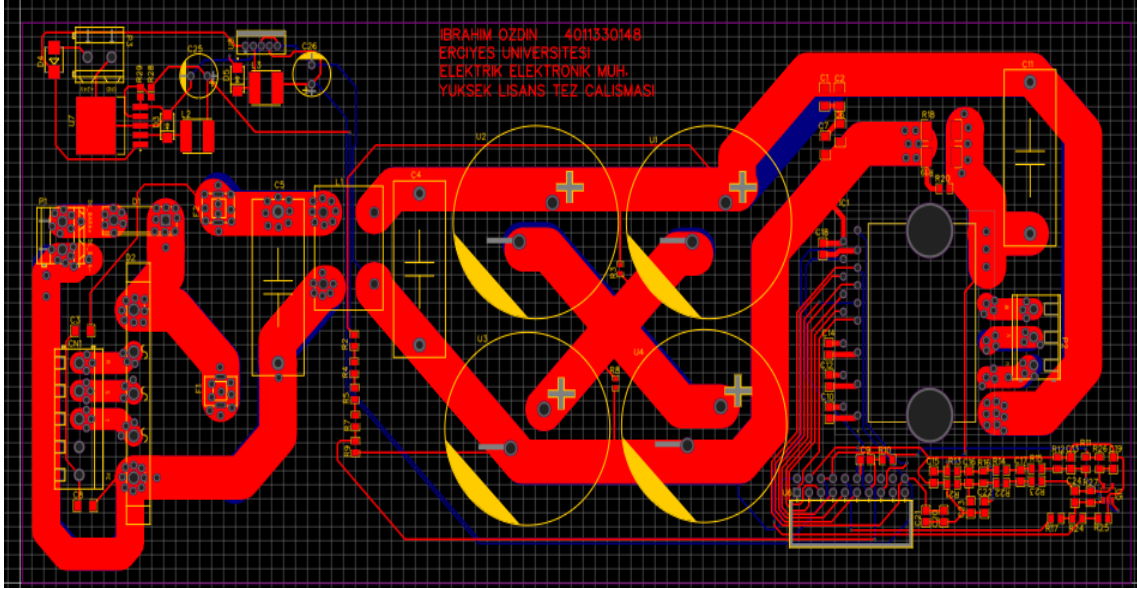
Şekil 4. Dokunmatik Motor Kontrol ve İzleme Ekranı Görşeli

Yazılımı gerçekleştirilen ekran üzerinden sistemi kontrol etme ve izleme süreci RS232 haberleşme protokolü kullanılarak motor kontrol işlemci birimi ile ekran tarafından sağlanmaktadır. Bunun yanında sürücüye ait güç ünitesi tasarımı öncesinde ilk deneysel çalışmalar firmanın kendi tasarımları olan modüller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te ilgili düzeneğe ait bir görüntü verilmiştir.

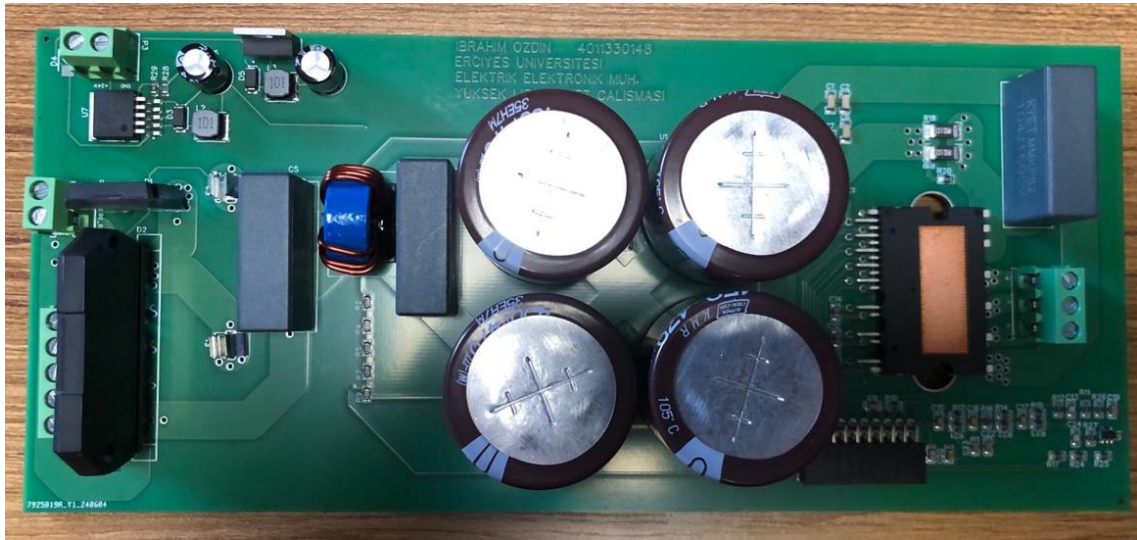


Şekil 5. Deney Düzeneği

Tasarımı gerçekleştirilen güç ünitesinde IM828-XCC SiC IPM temel alınmakta olup bu sayede 8 kW nominal çıkış gücüne sahip bir sürücü sistemi elde edilmiştir. Devrenin beslemesi, endüstri standartlarına uygun olarak 380 V Alternatif Akım (AA) gerilim ile sağlanmakta ve bu gerilim, bir doğrultucu devresi aracılığıyla Doğru Akım (DA) link voltajına dönüştürülmektedir. Bunun yanı sıra harici bir DA bara beslemesine de sistemde yer verilmiştir. Oluşturulan DA bara voltajı, empedans karakteristiklerine uygun olarak seçilmiş bobinler ve kapasitörler kullanılarak elektromanyetik girişim filtreleme işleminden geçirilmiş ve böylece gürültüsüz bir DA bara voltajı elde edilmiştir. Sürücüde kullanılan kontrolcü birimi ve IPM, bu DA bara voltajından türetilen ve regüle edilen 15V DA yardımcı beslemesi ile çalışmaktadır. Kontrol biriminin yazılım geliştirmesinde, üretici firmanın sunmuş olduğu MCE Designer yazılımından faydalanılmıştır. Şekil 6 ve 7'de sırasıyla tasarımı yapılan güç sisteminin baskı devre kartı (PCB: Printed Circuit Board) çizimine ait görüntü ve devrenin gerçekleştirilmiş hali verilmiştir.



Şek il 6. Tasarımı Gerçekleştirilen Güç Birimine Ait PCB Çizim Görüntüsü



Şek il 7. Tasarımı Gerçekleştirilen Elektronik Kart

Tasarımı gerçekleştirilen devrede temel alınan IM828-XCC SiC MOSFET IPM'in avantajlarını daha net bir şekilde gösterebilmek adına üretici firmanın kendi simülasyon araçları kullanılarak ilgili SiC IPM'in diğer yarıiletken alternatifleri olabilecek IGBT ve FREDFET sürücü entegreleri ile verimlilik ve sıcaklık karşılaştırmaları yapılmıştır [16]. Şekil 8'de söz konusu IPM modüllerin test koşullarına ait değerler, Şekil 9'da ise bu değerlere göre uygulanan akım ve gerilim dalga şekilleri gösterilmiştir. Bu şartlar altında modül verimlilikleri, modül çıkış güçleri ve modül sıcaklıkları ise tablo halinde Şekil 10'da gösterilmiştir.

System Frequency: Hz

Switching Frequency: kHz

Modulation Scheme: ▼

DC Bus Voltage: V

Output Voltage by: ▼

Modulation Index:

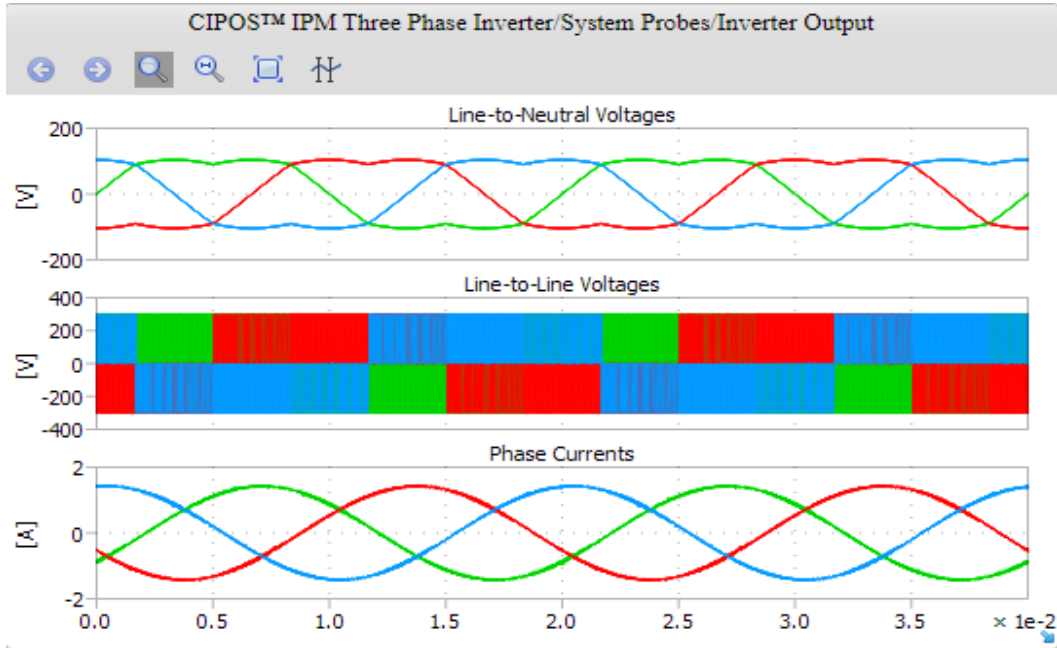
Phase Current: Arms

Power Factor:

Ambient Temperature: °C

Rth (Case to Ambient): °C/W

Şekil 8. Test Değerleri



Şekil 9. Test Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri

Inverter Losses					
	Partnumber	P_{loss}	η	P_{out}	$T_{c,avg}$
All Switches	IMI111T-046H	4.81 W			
	IMM101T-056M	4.56 W			
	IRSM807-105MH	4.33 W			
	IM241-L6xxB	3.72 W			
	IKCM15L60GD	3.63 W			
	IKCM30F60GA	6.21 W			
	IM535-U6D	3.20 W			
	IM818-LCC	5.28 W			
	IM828-XCC	1.96 W			
All Diodes	IMI111T-046H	1.49 W			
	IMM101T-056M	0.70 W			
	IRSM807-105MH	1.67 W			
	IM241-L6xxB	1.34 W			
	IKCM15L60GD	0.89 W			
	IKCM30F60GA	1.49 W			
	IM535-U6D	1.10 W			
	IM818-LCC	2.19 W			
	IM828-XCC	0.70 W			
Inverter	IMI111T-046H	6.31 W	96.90 %	203.4 W	56.52 °C
	IMM101T-056M	5.26 W	97.41 %	203.4 W	51.30 °C
	IRSM807-105MH	6.00 W	97.05 %	203.4 W	55.00 °C
	IM241-L6xxB	5.06 W	97.51 %	203.4 W	50.30 °C
	IKCM15L60GD	4.52 W	97.78 %	203.4 W	47.61 °C
	IKCM30F60GA	7.70 W	96.22 %	203.4 W	63.48 °C
	IM535-U6D	4.30 W	97.89 %	203.4 W	46.48 °C
	IM818-LCC	7.47 W	96.33 %	203.4 W	62.34 °C
	IM828-XCC	2.66 W	98.69 %	203.4 W	38.31 °C

Şekil 10. Test Koşullarında Modül Verimlilikleri, Güç Çıktıları ve Sıcaklıkları

Elde edilen değerler, tasarımı yapılan güç biriminde temel alınan yeni nesil SiC MOSFET tabanlı IPM'in ciddi avantajlar sunduğunu göstermektedir. Aynı zamanda gerek SiC gerekse de GaN tabanlı yarıiletken güç elektroniği anahtarlama elemanlarının elektrikli araçlardan tüketici elektroniği ürünlerine kadar çok geniş bir yelpazede kullanımının giderek yaygınlaştığı görülmektedir. Klasik Si yarıiletken elemanlara göre daha düşük boyutlarda üretilebilen, daha düşük kayıplarla çalışabilen ve daha yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilme özelliğine sahip olan bu elemanların kullanımının gelecekte hızlanarak artacağını söylemek hiç de yanlış olmayacaktır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sürekli mıknatıslı senkron motorların kontrol yöntemleri ile motor sürücülerinde kullanılan yarıiletken teknolojileri karşılaştırılmış ve ciddi avantajlara sahip olan SiC MOSFET IPM tabanlı bir sürücü sistemi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda motor sürücü kontrolünün kolay bir şekilde yapılabilmesi ve motor durumunun rahat bir şekilde izlenebilmesi için kullanıcı dostu bir dokunmatik ekran sisteme entegre edilerek yazılımı geliştirilmiştir. İlgili sürücü ünitesine bağlı kontrol biriminin yazılımının revizyonu ile farklı elektrik motorlarının çeşitli yöntemlerle kontrol edilebilmesi de mümkün olabilecektir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından FYL-2023-12383 kodlu proje ile desteklenmiştir.

YAZAR KATKILARI

Tüm yazarlar eşit oranda katkı sağlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK

Bu makalenin yayınlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] W. Lin, "Design and analysis of marine permanent magnet synchronous motor based on motor-cad," *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2631, no. 1, p. 012008, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2631/1/012008.
- [2] M. Rahman and P. Zhou, "Analysis of brushless permanent magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 2, pp. 256-267, 1996, doi: 10.1109/41.491349.
- [3] Y. Liu, "Torque response performance analysis of pmsm dtc," *International Journal of Mathematics and Statistics*, vol. 2, no. 2, 2023, doi: 10.53555/eijms.v2i2.3.
- [4] T. Thuy, "Effect of permanent magnet structure on working characteristics of lspmsm 3000 rpm," *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, vol. 1275, no. 1, p. 012049, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1275/1/012049.
- [5] N. Anh, T. Le, and X. Ngo, "Effect of permanent magnet structure on the performance of lspmsm with a power of 22 kw and 3000 rpm," *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, vol. 1111, no. 1, p. 012047, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1111/1/012047.
- [6] Q. Liu, T. Jing, Y. Chunhuizi, T. Liu, W. Quanxian, and X. Yu, "Research on electromagnetic field simulation of permanent magnet synchronous motor," *Journal of Software Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 99-108, 2015, doi: 10.3923/jse.2016.99.108.
- [7] G. Andreescu, C. Coman, A. Moldovan, and I. Boldea, "Stable v/f control system with unity power factor for pmsm drives," 2012, doi: 10.1109/optim.2012.6231937.
- [8] K. Lee and Y. Han, "Mtpa control strategy based on signal injection for v/f scalar-controlled surface permanent magnet synchronous machine drives," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 96036-96044, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2997087.
- [9] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 5, pp. 820-827, 1986, doi: 10.1109/tia.1986.4504799.
- [10] L. Zhong, M. Rahman, W. Hu, and K. Lim, "Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 528-536, 1997, doi: 10.1109/63.575680.
- [11] X. Xin-hua, X. Yan, and K. Zhang, "A novel servo motor vector technique for the control of industrial robots," *International Journal of Simulation Systems Science & Technology*, 2019, doi: 10.5013/ijssst.a.19.05.08.
- [12] S. Yıldırım, "A high power factor flux-weakening strategy for PMSMS without electrolytic capacitors," *Master of Science Thesis*, 2020.
- [13] V. M. Bida, D. V. Samokhvalov, and F. S. Al-Mahturi, "PMSM vector control techniques—A survey," in *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2018, pp. 577-581, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317170.
- [14] H. Aygün, M. Gökdag, M. Aktas, and M. Cernat, "A novel sensorless field oriented controller for Permanent Magnet Synchronous Motors," in *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2014, pp. 715-720, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864674.
- [15] Infineon, <https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/wide-bandgap-semiconductors-sic-gan/#!?fileId=5546d462636cc8fb0163fe86543408b0>, [erişim tarihi: 01.07.2024].
- [16] IMP Motor, <https://plex.infineon.com/plexim/ipmmotor.html>, [erişim tarihi: 01.07.2024].



Comparative analysis of machine learning algorithms for schizophrenia detection

Halil İbrahim COŞAR¹*, Muhammet Emin ŞAHİN²

¹Yozgat Bozok University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Yozgat, Türkiye

²Yozgat Bozok University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Computer Engineering, Yozgat, Türkiye

ARTICLE INFO

Article history:

Received
01.10.2024
Accepted
31.10.2024
Published
31.12.2024

Keywords:

EEG
Machine Learning
Classification
Schizophrenia

ABSTRACT

As mental and neurological disorders continue to rise globally, research utilizing artificial intelligence to analyse and classify differences in EEG signals is growing rapidly. This study utilises six machine learning algorithms for detecting schizophrenia (SZ) using multichannel EEG signals. In the initial phase of this study, pre-processing is carried out, followed by the application of 13 distinct feature extraction techniques. The extracted features are subsequently classified using various machine learning algorithms, leading to classification accuracies up to 1.00 in four algorithms including Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machines (SVM) and Gradient Boosting. In addition, 5-fold cross-validation is applied to increase the reliability of the study. The findings indicate that the study achieved remarkable success and demonstrates the potential for effectively detecting schizophrenia using EEG signals.

Şizofreni tespiti için makine öğrenmesi algoritmalarının karşılaştırmalı analizi

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi
01.10.2024
Kabul tarihi
31.10.2024
Yayın tarihi
31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

EEG
Makine Öğrenmesi
Sınıflandırma
Şizofreni

ÖZET

Zihinsel ve nörolojik bozukluklar küresel olarak artmaya devam ederken, EEG sinyallerindeki farklılıkları analiz etmek ve sınıflandırmak için yapay zekadan yararlanan araştırmalar hızla artmaktadır. Bu çalışmada, çok kanallı EEG sinyallerini kullanarak şizofreniyi (SZ) tespit etmek için altı farklı makine öğrenimi algoritması kullanılmaktadır. Bu çalışmanın ilk aşamasında, ön işleme gerçekleştirilmekte ve ardından 13 farklı özellik çıkarma tekniği uygulanmaktadır. Çıkarılan özellikler daha sonra çeşitli makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak sınıflandırılmış ve Karar Ağacı, Rastgele Orman, Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Gradyan Güçlendirme olmak üzere dört algorithmada 1.00'e varan sınıflandırma doğrulukları elde edilmiştir. Ayrıca, çalışmanın güvenilirliğini artırmak için 5 kat çapraz doğrulama uygulanmıştır. Bulgular, çalışmanın kayda değer bir başarı elde ettiğini ve EEG sinyallerini kullanarak şizofreniyi etkili bir şekilde tespit etme potansiyelini ortaya koyduğunu göstermektedir.

1. INTRODUCTION

Schizophrenia (SZ) is a chronic and severe mental disorder that affects how a person thinks, feels, and behaves. Characterized by symptoms such as hallucinations, delusions, and cognitive impairments, it poses significant challenges for diagnosis and treatment[1]. According to the World Health Organization (WHO), schizophrenia is a serious condition that affects over 21 million people globally[2]. However, the WHO has also indicated that schizophrenia is treatable, and early or post-diagnosis interventions can help determine its severity and stage. Identifying and treating schizophrenia is crucial, as it significantly disrupts thinking,

ORCID ID: Halil İbrahim Coşar: 0000-0001-8064-2385; Muhammet Emin Şahin:0000-0001-7729-990X

*Corresponding author: Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yozgat
Tel:+90 354 2421001.
Fax: +90 354 2421005.
E-mail:halil.cosar@bozok.edu.tr

To cite this article: Coşar H.İ., Şahin M.E., "Comparative analysis of machine learning algorithms for schizophrenia detection", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 33-41, 2024.

memory, perception, and various daily activities. Traditional diagnostic methods rely heavily on clinical interviews and symptom assessments, which can be subjective and time-consuming. In recent years, there has been a growing interest in leveraging technological advancements to improve the accuracy and efficiency of schizophrenia diagnosis.

One promising approach involves the use of electroencephalography (EEG) signals. EEG is a non-invasive method that records electrical activity of the brain, providing real-time insights into neural function. It has been widely used in the study of various neurological and psychiatric disorders. The complexity and high-dimensional nature of EEG data, however, present substantial challenges for traditional analytical techniques[3].

This is where deep learning comes into play. Deep learning, a subset of machine learning, employs neural networks with multiple layers to automatically learn and extract features from complex datasets. It has demonstrated remarkable success in fields such as image and speech recognition, natural language processing, and biomedical signal analysis. Applying deep learning to EEG data for the detection of schizophrenia holds great promise, potentially leading to more accurate, objective, and rapid diagnostic tools[4].

1.1. Related Work

One of the studies which focuses on detection of SZ employed a hybrid framework that integrated brain effective connectivity images derived from EEG signals with pre-trained CNN-LSTM models to differentiate schizophrenia (SZ) patients from healthy controls. Utilizing Transfer Entropy (TE) to estimate directed causalities in brain information flow from EEG signals, the study achieved an accuracy of 99.90% with the EfficientNetB0-LSTM model, outperforming previous SZ detection studies. TE effective connectivity images revealed differences in information flow between SZ patients and healthy individuals, with SZ patients showing lower information flow values across most brain channels compared to healthy subjects. These findings suggest that SZ patients have reduced TE (information flow) in various brain channels, indicating potential differences in brain functionality between SZ patients and normal individuals. Overall, the hybrid model excelled in analyzing brain function and detecting SZ patients, demonstrating its effectiveness in distinguishing SZ patients from healthy controls based on EEG signals[5].

A research study introduces the use of Multivariate Empirical Mode Decomposition (MEMD) for detecting Schizophrenia (SZ) from multichannel EEG signals, coupled with entropy measures computed from the Intrinsic Mode Function (IMF) domain. Five entropy measures—Approximate entropy, Sample entropy, Permutation entropy, Spectral entropy, and SVD spectral bands of EEG—were derived from the IMF signal, revealing significant differences between SZ and normal subjects ($p < 0.01$). Advanced machine learning classifiers, including Naive Bayes, Linear Discriminant Analysis, Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbour, Random Forest, and Gradient Boosting Machine, were trained on the feature matrix obtained from these entropy measures. Among these, the SVM with a Radial Basis Function (SVM-RBF) kernel showed robust classification performance, achieving an overall accuracy of 93% and an F1-score of 93.04% using 95 features. Furthermore, the study reported a detection accuracy of 90.66% for SVM when utilizing a reduced feature set of 20 features, demonstrating the method's effectiveness even with a minimal number of features for SZ detection. This research outperformed some related studies in SZ detection accuracy and underscored the potential of calculating entropy measures from the IMF domain, highlighting the capability of MEMD in managing multichannel EEG for SZ detection[6].

The study developed an Automated Diagnostic Tool (ADT) that utilizes nonlinear feature extraction from EEG signals, t-test based feature selection, and validation across various classifiers. The SVM with Radial-Basis-Function (SVM-RBF) classifier achieved the highest accuracy of 92.91%, outperforming other classifiers used in the research. The SVM-RBF classifier exhibited superior performance with an average accuracy of 92.91% in distinguishing normal EEG patterns from those of individuals with schizophrenia, highlighting its effectiveness in classifying the two groups. The findings suggest that the proposed technique efficiently differentiates between normal EEG patterns and those associated with schizophrenia, demonstrating the potential for automated schizophrenia detection using nonlinear signal processing methods. Future research directions include exploring the use of CNN deep learning models in combination with cloud computing for more effective schizophrenia diagnosis, aiming to streamline the feature extraction and selection process to enhance diagnostic accuracy[7].

The paper reported experimental results evaluating a local descriptors-based approach for detecting schizophrenia (SZ) using EEG signals, achieving high classification accuracy on two datasets: 92.85% on Dataset-1 and 99.36% on Dataset-2. The methodology involved representing EEG signals using the histogram of local variance (HLV) and symmetrically weighted-local binary patterns (SLBP) for feature extraction. A correlation-based feature selection algorithm was then applied, followed by classification using an

AdaBoost classifier. The results demonstrated that features extracted from EEG channels in the temporal lobe were particularly effective in capturing regional variations in EEG signals for SZ detection[8].

In other paper a method is proposed for detecting schizophrenia (Sz) by analysing multi-channel electroencephalogram (EEG) signals. The proposed approach uses multivariate iterative filtering (MIF) to decompose multi-channel EEG data into multivariate intrinsic mode functions (MIMFs). These IMFs are grouped based on their mean frequency to separate EEG rhythms (delta, theta, alpha, beta, gamma) from the signals. Features, such as Hjorth parameters, are then extracted from these EEG rhythms. The extracted features are ranked using a student t-test, and the 30 most discriminative features are selected for classification. Different classifiers, including K-nearest neighbours (K-NN), linear discriminant analysis (LDA), and support vector machine (SVM) with various kernels, are used to classify Sz and healthy EEG patterns. The method is applied to 19-channel EEG signals recorded from 14 paranoid Sz patients and 14 healthy subjects. The highest accuracy achieved is 98.9% using the SVM (Cubic) classifier, with sensitivity, specificity, positive predictive value (PPV), and area under the ROC curve (AUC) of 99.0%, 98.8%, 98.4%, and 0.999, respectively. The proposed MIF approach is computationally more efficient than other multivariate signal decomposition algorithms. This paper presents an efficient framework for decomposing multivariate signals and accurately detecting Sz[9].

Study of Sahu et al. the proposed network utilizes depth-wise separable convolution and attention networks at both high and low levels to combine features from 2-D scalogram images obtained through continuous wavelet transform. Depth-wise separable convolutions contribute to creating a lightweight framework, while attention techniques focus on significant features and eliminate unnecessary computations by filtering out irrelevant features. The proposed method achieves an average classification accuracy of 99% on the IBIB-PAN dataset and 95% on the EEG data from the basic sensory task in the SZ dataset. Additionally, statistical hypothesis testing using Wilcoxon's Rank-Sum test confirms the model's performance, demonstrating that SCZ-SCAN is statistically more efficient than nine state-of-the-art methods. Experimental results indicate that PSFAN outperforms 11 contemporary methods, highlighting its effectiveness for medical industrial applications[4].

Another paper introduced a novel framework for automatic schizophrenia detection by extracting graphical features from EEG signals. This approach achieved high classification accuracy using both KNN and GRNN classifiers. Noise cancellation of EEG channels was performed using the MSPCA method, followed by the application of the PSD technique to plot EEG signals in Cartesian space. Fifteen graphical features were extracted to quantify the chaotic behavior of PSD. Among these features, the SDHC feature exhibited the highest AUC value for detecting schizophrenia using a KNN classifier. The Cz channel showed the highest classification accuracy, suggesting its potential as a biomarker for diagnosing the disorder. The study achieved an average classification accuracy of 94.80%, a sensitivity of 94.30%, and a specificity of 95.20% using the KNN classifier with City-block distance, demonstrating the effectiveness of the proposed framework for automatic schizophrenia diagnosis [10].

In the study of Prabhakar It is aimed to classify schizophrenia EEG signals using optimization algorithms and feature extraction techniques such as PLS Nonlinear Regression, EM-PCA, and Isomap. Four optimization algorithms were utilized: Flower Pollination, Eagle Strategy, Backtracking Search, and Group Search Optimization. The findings showed high classification accuracy for both normal and schizophrenia cases, with up to 98.77% accuracy achieved through specific combinations of features and classifiers. Additionally, the Naive Bayesian Classifier was optimized using the bag-of-token model, enhancing the classification process for schizophrenia cases. Overall, the research highlighted the effectiveness of nature-inspired optimization algorithms in accurately classifying schizophrenia EEG signals, presenting a promising approach for future studies in this field [11].

Shoeibi et al. introduced intelligent deep learning methods for the automatic diagnosis of schizophrenia using EEG signals, achieving a high accuracy of 99.25% with the CNN-LSTM model. Various conventional machine learning methods were compared with deep learning models, including LSTMs, 1D-CNNs, and 1D-CNN-LSTMs, for schizophrenia diagnosis. The CNN-LSTM architecture, utilizing a ReLU activation function and z-score combined normalization, outperformed other models, demonstrating superior performance. A k-fold cross-validation method with $k = 5$ was used for all simulations, ensuring the robustness and reliability of the results[12].

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Dataset

For this study, a publicly available dataset is utilized from the Institute of Psychiatry and Neurology in Warsaw Poland [13]. The dataset includes EEG recordings from 14 patients (seven males with a mean age of 27.9 ± 3.3 years, and seven females with a mean

age of 28.3 ± 4.1 years) diagnosed with paranoid schizophrenia according to the ICD-10 criteria. The control group comprises EEG recordings from 14 healthy individuals (seven males with a mean age of 26.8 ± 2.9 years, and seven females with a mean age of 28.7 ± 3.4 years). EEG data were collected for 15 minutes using 19 channels, with electrode placement following the 10-20 international system. The specific positions recorded were Fp1, Fp2, F7, F3, F4, F8, T3, C3, C2, C4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2, and FCz (reference electrode), with a sampling rate of 250 Hz [14].

2.2. Pre-processing

Preprocessing transforms raw data into a suitable format to improve analysis and usability. The first step involves applying a filter to eliminate electrical noise from the raw EEG signals[4]. In this study, the datasets used have already undergone filtering to eliminate electrical noise. Therefore, the filtering step is omitted in this analysis. Normalization was performed using the StandardScaler method, which adjusts the data to have a mean of 0 and a standard deviation of 1. This process is crucial for machine learning models, as features with varying scales can otherwise negatively impact model performance. Principal Component Analysis (PCA) then applied to the data in order to reduce the size. This step helps to process the data and achieve faster results as well as eliminating meaningless and unnecessary data.

2.3. Feature Extraction

EEG signals are unstable and fluctuate unpredictably depending on brain activity. It is well known that pathological brain conditions result in a different level of randomness in EEG signals compared to those of healthy individuals[6]. In the literature different feature extraction methods are used for EEG signal classification. In this study, different feature extraction techniques were tested and the methods that gave promising results are listed as follows: Percentile, mean absolute, singular value decomposition, mean, standard deviation, variance, median, minimum, maximum, sum, kurtosis, skewness and slope sign change. Violin plots giving the intensity distribution of the features used in this study for each class are given in Figure 1.

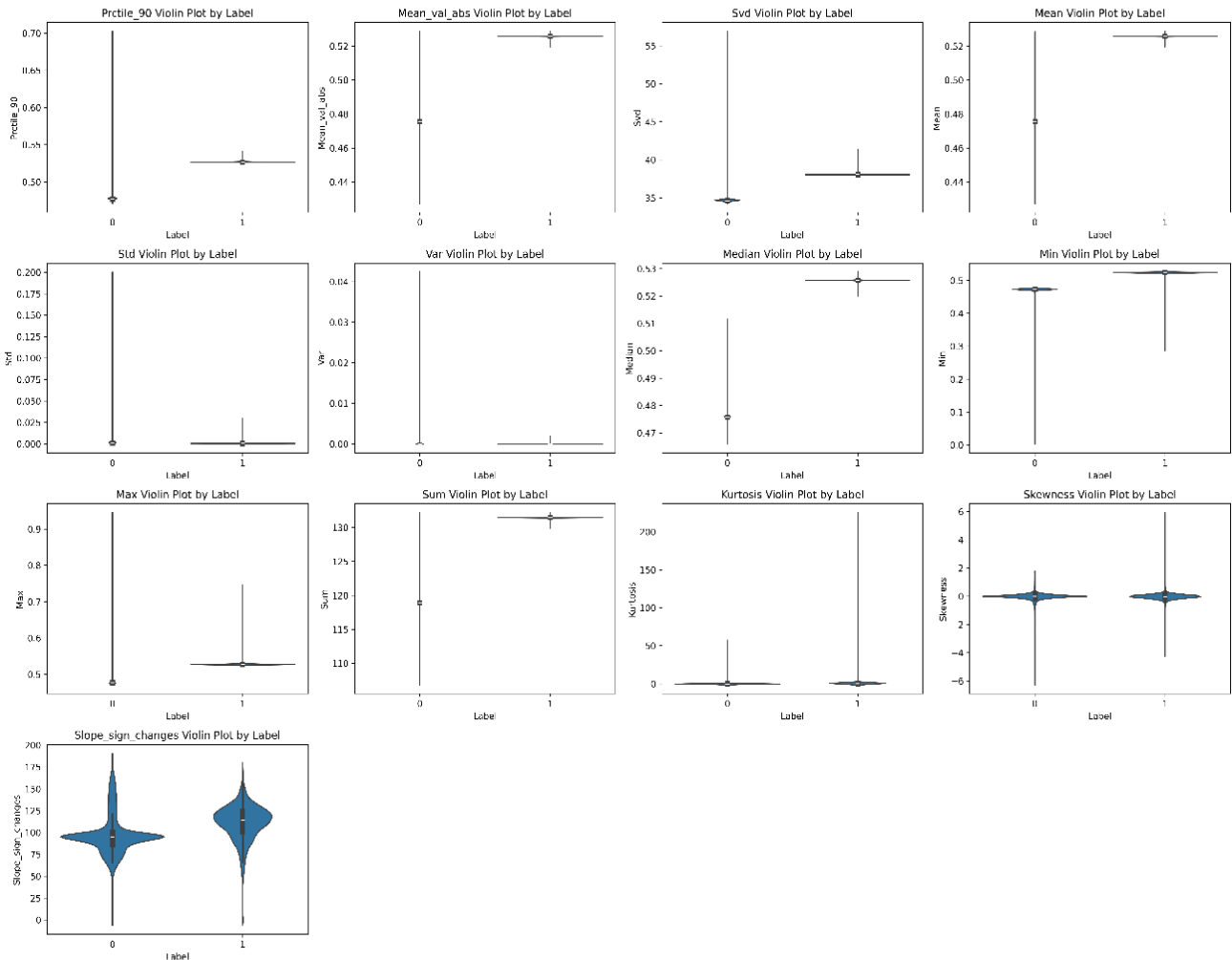


Figure 1. Violin plots of used features.

2.4. Classification

In the classification process, six distinct classification algorithms were employed to ensure a comprehensive evaluation of model performance. These methods include logistic regression, decision tree, random forest, k-nearest neighbors (kNN), support vector machine (SVM), and gradient boosting. Each algorithm offers unique advantages: logistic regression provides interpretability, decision trees offer simplicity, random forests enhance robustness through ensemble learning, kNN is effective in instance-based learning, SVM excels in handling high-dimensional spaces, and gradient boosting combines multiple weak learners for high predictive accuracy. This diversity of models allows for a thorough comparison and optimization of classification performance.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, SZ and healthy subject EEG signal classification is performed using machine learning algorithms, following the preprocessing and feature extraction steps described earlier. During the feature extraction step, first the relationship between features is analysed by using correlation matrix. Correlation is frequently employed to assess whether a cause-and-effect relationship exists between two variables, with values ranging from -1 to 1. In the heatmap shown in Figure 2, the relationships between the features and the classification label are depicted. The correlation matrix in the image visualizes the relationships between different features in the dataset, as well as their correlation with the classification label. The color scale on the right shows how correlation values range from -0.2 (blue, indicating a negative correlation) to 1.0 (red, indicating a strong positive correlation). Many of the features, such as Prctile_90, Mean_val_abs, Svd, Mean, Median, Min, Max, and Sum, exhibit very high positive correlations (close to 1.0) with each other, suggesting strong linear relationships between these variables. Features like Std, Var, and Slope_sign_changes have weaker correlations with some other features but are generally well correlated with most variables. Interestingly, Skewness shows a very low or even negative correlation with the majority of the other features, indicating that it might capture a different aspect of the data. The Label column shows the correlation of the features with the classification label. Many features, such as Prctile_90, Mean_val_abs, and Svd, show a high positive correlation (~0.31), indicating that these variables are positively associated with the classification task and might be key contributors to the prediction process. In summary, this matrix highlights the interdependencies between features and their significance to the classification label, where several features show strong positive correlations, potentially indicating their importance in the model's performance.

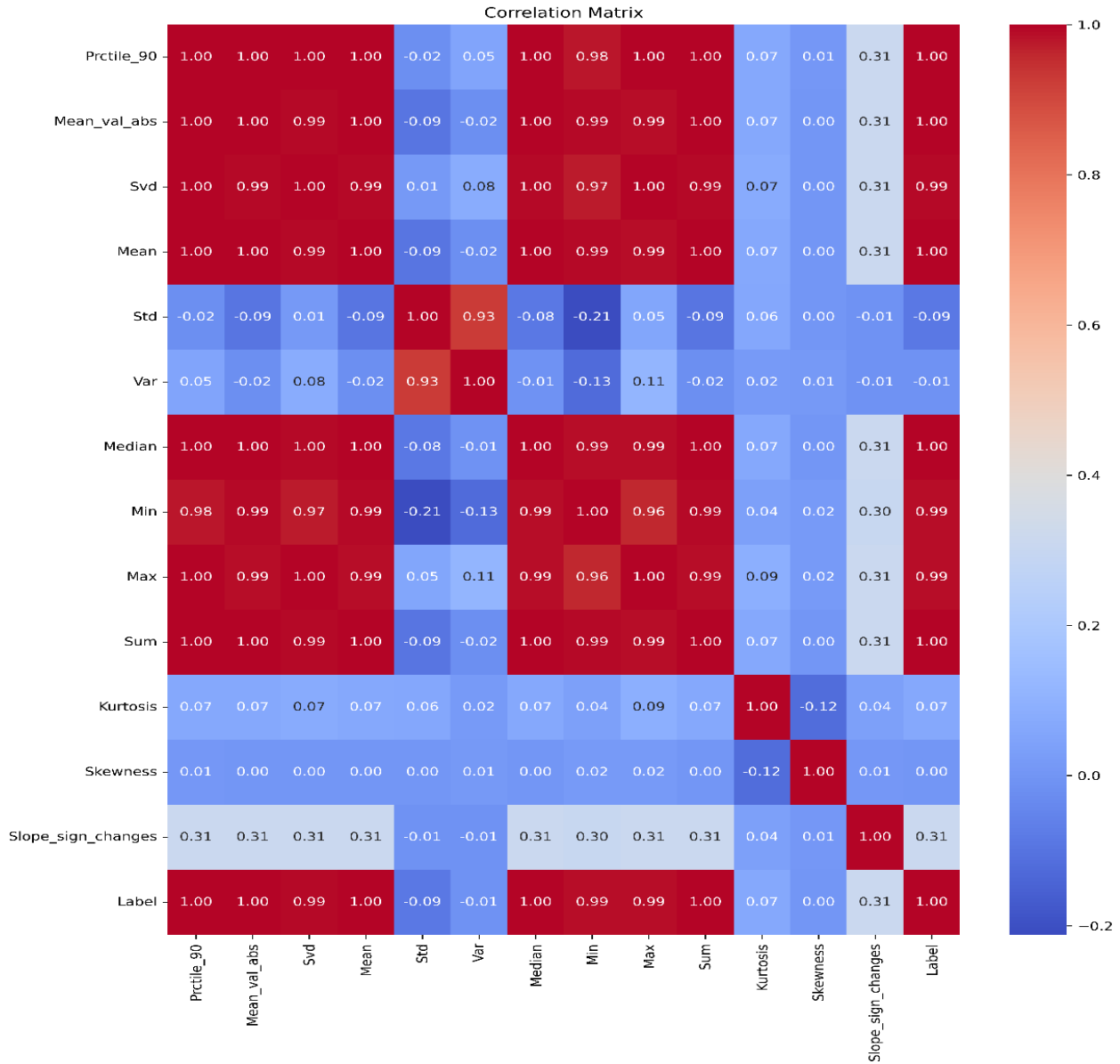


Figure 2. Features correlation matrix.

After the selection of the features, classification was performed as the final step. Table 1. presents the mean accuracy and standard deviation for used machine learning algorithms utilised in the classification task. Logistic regression achieved a mean accuracy of 0.9999 with a standard deviation of 0.0001, indicating high accuracy and minimal variability. Both the decision tree and random forest models reached a perfect mean accuracy of 1.0000, with a standard deviation of 0.0001, reflecting consistent performance across all evaluations. K-nearest neighbors (KNN) recorded a mean accuracy of 0.9999, demonstrating near-perfect performance with little variation. The support vector machine (SVM) and gradient boosting models both achieved a perfect accuracy of 1.0000, with a standard deviation of 0.0001, indicating robust and stable results. Overall, the algorithms displayed exceptionally high accuracy and consistency in the classification task, with very little variation between trials.

Table 1. Accuracy results for used algorithms.

Algorithms	Mean Accuracy	Standard Deviation
Logistic Regression	0.9999	0.0001
Decision Tree	1.0000	0.0001
Random Forest	1.0000	0.0001
KNN	0.9999	0.0001
SVM	1.0000	0.0001
Gradient Boosting	1.0000	0.0001

Table 2. presents the performance metrics (precision, recall, and F1-score) for the best classification algorithms, evaluated for two classes (schizophrenics and healthy subjects), along with overall accuracy and averages. The models achieve perfect classification performance across all metrics for both classes, with an accuracy of 100%.

Table 2. The best classification results.

	Precision	Recall	F1-score	Support
0	1.00	1.00	1.00	3170
1	1.00	1.00	1.00	2603
accuracy			1.00	5773
macro avg	1.00	1.00	1.00	5773
weighted avg	1.00	1.00	1.00	5773

Figure 3. shows the ROC curve and confusion matrix for the best classification algorithms. As it can be seen from the figure, the models demonstrate impeccable classification performance across all metrics for both classes, achieving an accuracy of 100%.

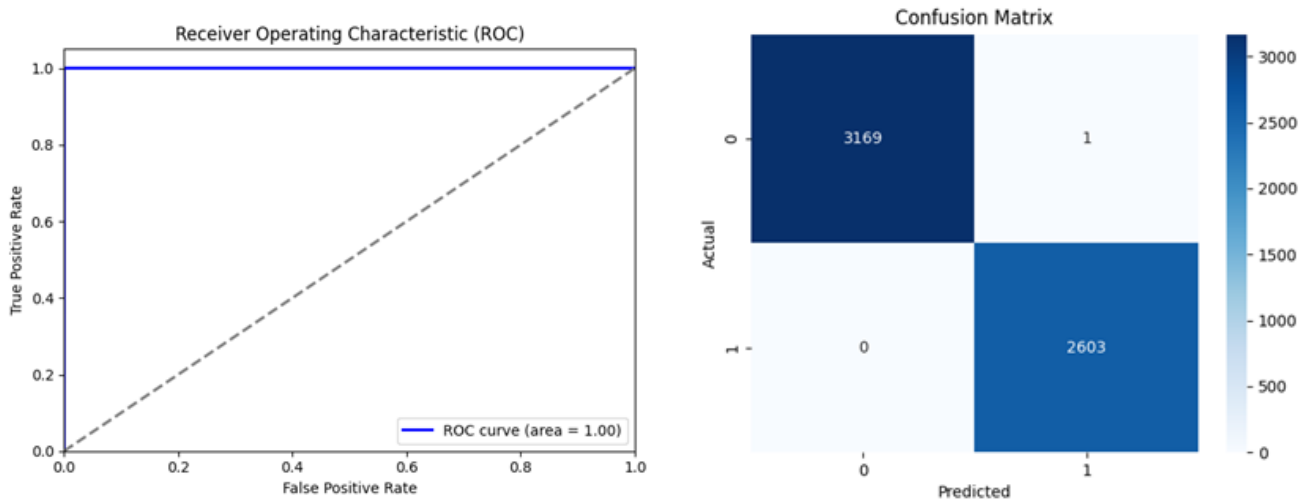


Figure 3. ROC curve and confusion matrix for best result.

The ROC curve and confusion matrix provide strong evidence that the model achieved excellent performance. The ROC curve, with an area under the curve (AUC) of 1.00, indicates perfect classification, demonstrating the model's ability to distinguish between positive and negative classes across all thresholds. Similarly, the confusion matrix shows that out of 5773 total samples, 3169 true negatives (TN) and 2603 true positives (TP) were correctly classified, with only one false positive (FP) and no false negatives (FN). This near-perfect performance highlights the model's effectiveness in accurately identifying both classes, a critical aspect in schizophrenia detection. Overfitting is typically characterized by a model performing well on training data but poorly on unseen data, which is not the case here, as both the ROC curve and confusion matrix reflect consistent and robust generalization. Moreover, the use of 5-fold cross-validation further reinforces the model's reliability by ensuring stable performance across multiple data splits. Together, these results confirm that the model generalizes well and achieves outstanding classification performance without any indication of overfitting.

The model comparison graph shows the accuracy distribution for six machine learning algorithms using 5-fold cross-validation. K-Nearest Neighbors (kNN) and Logistic Regression exhibit the lowest performance, with their accuracy distributions falling below those of the other models. The presence of a wider spread in kNN's results suggests greater variability across the folds, indicating that its performance may be less stable or sensitive to specific data splits. In comparison, Decision Tree, Random Forest, SVM, and Gradient Boosting achieve higher and more consistent accuracies, with most folds clustering around nearly perfect scores (close to 1.00). The absence of significant outliers in these models highlights their robustness and consistent generalization. The overall results suggest that tree-based models (Decision Tree, Random Forest, and Gradient Boosting) and SVM perform more effectively in this classification task, likely due to their ability to capture complex patterns in the EEG data.

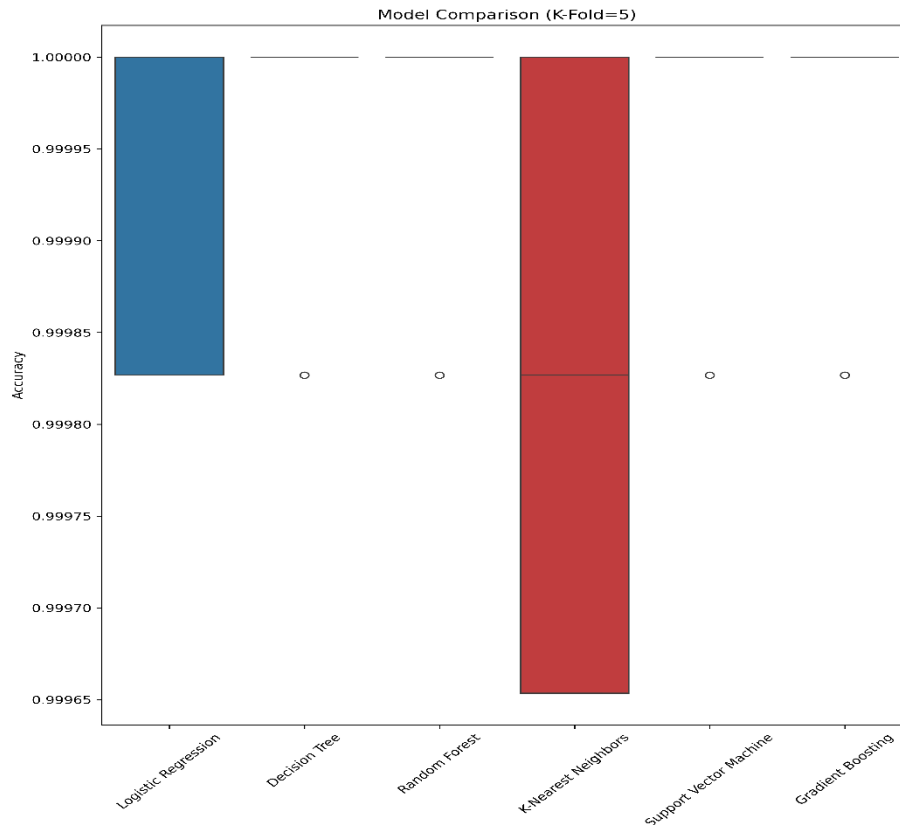


Figure 4. K-fold cross validation result.

4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

This study applied six different machine learning algorithms for detecting schizophrenia (SZ) using multichannel EEG signals. The pre-processing of EEG data was followed by the implementation of 13 distinct feature extraction techniques, with the extracted features classified using various algorithms. Four of these algorithms—Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machines (SVM), and Gradient Boosting—achieved classification accuracies of up to 1.00. Additionally, 5-fold cross-validation was employed to enhance the reliability of the results. The findings highlight the effectiveness of the proposed framework, demonstrating its potential for accurately detecting schizophrenia through EEG signals. Future research could explore the integration of more advanced deep learning techniques, such as convolutional neural networks (CNNs) or recurrent neural networks (RNNs), for further improvement of classification accuracy. Additionally, expanding the dataset to include more diverse EEG recordings or investigating the use of transfer learning could enhance the model's generalizability. Incorporating real-time analysis of EEG signals for schizophrenia detection and extending the approach to other mental disorders are also promising directions for future work.

5. LIMITATIONS

Despite the promising results, this study has several potential limitations. First, the quality and size of the dataset could impact the generalizability of the findings. A small or imbalanced dataset might lead to biased model performance, while EEG signals are prone to noise and artifacts (e.g., muscle movements or eye blinks), which can affect feature extraction and classification reliability. Additionally, the study heavily relies on 13 feature extraction techniques, making it challenging to determine which features contribute most to detecting schizophrenia, and the use of complex models may limit interpretability. While 5-fold cross-validation enhances reliability, more robust techniques like stratified or nested cross-validation could further validate the results. Furthermore, the absence of external validation with independent datasets may limit the generalizability of the models to unseen data. Including deep learning approaches like CNNs or RNNs could provide additional insights, given their strength in time-series analysis. Lastly, translating these findings to real-world clinical settings remains challenging, as variations in EEG recording conditions and patient diversity may affect model performance, and computationally intensive algorithms may face limitations when deployed on portable or embedded devices. These limitations suggest avenues for future work and refinement to improve the robustness and applicability of the study's findings.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally at every stage of the article.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest.

ETHICS

There is no ethical problem in the publication of this article.

REFERENCES

- [1] A. P. A.-T. revision and undefined 2000, "Diagnostic and statistical manual of mental disorders," *cir.nii.ac.jp*, Accessed: Jun. 10, 2024. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573950399819987840>
- [2] WHO, "Schizophrenia." Accessed: Jun. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/schizophrenia>
- [3] A. Craik, Y. He, and J. L. Contreras-Vidal, "Deep learning for electroencephalogram (EEG) classification tasks: A review," *Journal of Neural Engineering*. 2019. doi: 10.1088/1741-2552/ab0ab5.
- [4] G. Sahu, M. Karnati, A. Gupta, and A. Seal, "SCZ-SCAN: An automated Schizophrenia detection system from electroencephalogram signals," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 86, p. 105206, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.BSPC.2023.105206.
- [5] S. Bagherzadeh, M. S. Shahabi, and A. Shalhaf, "Detection of schizophrenia using hybrid of deep learning and brain effective connectivity image from electroencephalogram signal," *Comput. Biol. Med.*, vol. 146, p. 105570, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.COMPBIOMED.2022.105570.
- [6] P. T. Krishnan, A. N. Joseph Raj, P. Balasubramanian, and Y. Chen, "Schizophrenia detection using Multivariate Empirical Mode Decomposition and entropy measures from multichannel EEG signal," *Biocybern. Biomed. Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. 1124–1139, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.BBE.2020.05.008.
- [7] V. Jahmunah *et al.*, "Automated detection of schizophrenia using nonlinear signal processing methods," *Artif. Intell. Med.*, vol. 100, p. 101698, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.ARTMED.2019.07.006.
- [8] T. S. Kumar, K. N. V. P. S. Rajesh, S. Maheswari, V. Kanhangad, and U. R. Acharya, "Automated Schizophrenia detection using local descriptors with EEG signals," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 117, p. 105602, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2022.105602.
- [9] K. Das and R. B. Pachori, "Schizophrenia detection technique using multivariate iterative filtering and multichannel EEG signals," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 67, p. 102525, May 2021, doi: 10.1016/J.BSPC.2021.102525.
- [10] H. Akbari, S. Ghofrani, P. Zakalvand, and M. Tariq Sadiq, "Schizophrenia recognition based on the phase space dynamic of EEG signals and graphical features," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 69, p. 102917, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.BSPC.2021.102917.
- [11] S. K. Prabhakar, H. Rajaguru, and S. W. Lee, "A Framework for Schizophrenia EEG Signal Classification with Nature Inspired Optimization Algorithms," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 39875–39897, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975848.
- [12] A. Shoeibi *et al.*, "Automatic Diagnosis of Schizophrenia in EEG Signals Using CNN-LSTM Models," *Front. Neuroinform.*, vol. 15, p. 777977, Nov. 2021, doi: 10.3389/FNINF.2021.777977/BIBTEX.
- [13] E. Olejarczyk and W. Jernajczyk, "EEG in schizophrenia." RepOD, 2017, doi: 10.18150/REPOD.0107441.
- [14] E. Olejarczyk and W. Jernajczyk, "Graph-based analysis of brain connectivity in schizophrenia," *PLoS One*, vol. 12, no. 11, p. e0188629, Nov. 2017, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0188629.



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Araştırma Makalesi/Research Article

Dünya dışı ortamlarda madencilik yapma olasılıkları: Ay ve Mars örneği

Hüseyin SENDİR¹, *, Zahraa Khalid MOHAMMED ALI²

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

02.10.2024

Kabul tarihi

23.10.2024

Yayın tarihi

31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Madencilik

Ay

Mars

Krater

Uzay

Ö Z E T

Uzay madenciliği, dünya dışı materyallere erişimi kolaylaştırarak Dünya'nın sınırlı doğal kaynaklarına olan bağımlılığı azaltabilecek umut verici bir alan olarak ortaya çıkmaktadır. Ay ve Mars gibi göksel gezegenlerden elde edilebilecek kaynaklar, uzun vadede sürdürülebilir ekonomik büyümeyi kolaylaştırabilir ve insanlığın gelecekteki enerji ve hammadde gereksinimlerini karşılayabilir. Ay'daki su buzu astronotların yaşam desteği ve uzay yolculuğu için yakıt üretilmesinde bir kaynak olarak kullanılabilir. Helyum-3, gelecekteki füzyon enerjisi reaktörleri için olası bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Demir, magnezyum ve alüminyum gibi metaller Mars'ta inşaat ve imalat uygulamaları için hayati kaynaklar olarak hizmet edebilir. Bununla birlikte, uzay madenciliği şu anda çok sayıda engelle karşılaşmaktadır. Bu engellerin başında bu faaliyetlerin yüksek maliyetleri gelmektedir. Madencilik ekipmanlarının Dünya'dan Ay'a ya da Mars'a taşınmasının maliyeti oldukça yüksektir. Dahası, bu gök cisimlerinin zorlu ortamı (aşırı sıcaklık değişimleri, düşük yerçekimi, radyasyon) madencilik yöntem ve ekipmanlarını ciddi şekilde zorlamaktadır. Dünya'daki madencilik tekniklerinin bu koşullara uyarlanması için önemli ölçüde yenilik yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte, teknolojik ilerlemeler (robotik, yapay zekâ ve 3D baskı gibi) bu sorunların zaman içinde aşılabileceğini göstermektedir. Uzay madenciliği sektörü, yalnızca Dünya'nın kaynak sorunlarını çözmekle kalmayıp, aynı zamanda uzay ekonomisinin temel taşlarından biri haline gelebilecektir.

Mining possibilities in extraterrestrial environments: The case of the Moon and Mars

ARTICLE INFO

Article history:

Received

02.10.2024

Accepted

23.10.2024

Published

31.12.2024

Keywords:

Mining

Moon

Mars

Crater

Space

ABSTRACT

Space mining is developing as a viable domain that may diminish reliance on Earth's finite natural resources by enabling access to extraterrestrial elements. Resources from celestial bodies like the Moon and Mars could promote sustainable economic development over the long run and fulfil humanity's future energy and raw material needs. Water ice on the Moon may serve as a resource for fuel to sustain astronaut life support and facilitate space travel. Helium-3 is regarded as a potential energy source for forthcoming fusion energy reactors. Metals such iron, magnesium, and aluminium may function as essential materials for construction and manufacturing purposes on Mars. Nevertheless, space mining presently has many challenges. The primary impediment is the elevated expense of these operations. The expense of transferring mining apparatus from Earth to the Moon or Mars is significantly elevated. Furthermore, the inhospitable conditions of these celestial bodies (extreme temperature fluctuations, reduced gravity, radiation) significantly impede mining techniques and apparatus. Substantial innovation is necessary to modify terrestrial mining techniques for these conditions. Nevertheless, technical advancements, like robotics, artificial intelligence, and 3D printing, indicate that these challenges can be surmounted over time. The space mining business will address Earth's resource challenges while simultaneously benefiting space exploration.

ORCID ID: Yazar1: <https://orcid.org/0000-0001-7252-7117>, Yazar1: <https://orcid.org/0009-0002-6748-7661>

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

Tel:+90 505 7564393.

Fax: +90 222 2393613

E-mail:hsendir@ogu.edu.tr

1. GİRİŞ

Dünyadaki doğal kaynaklar sınırlı olup artan nüfus ve tüketim ile hızla tükenmektedir. Bu durum, gelecekte kritik hammaddelerin kıtlığına ve fiyat artışlarına yol açabilir. Bu nedenle, alternatif kaynaklara olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Ay ve Mars, dünyaya yakın konumları ve zengin mineral kaynakları ile uzay madenciliği için ideal adaylardır. Ay'da su buzu, helyum-3, nadir toprak elementleri ve metaller gibi değerli kaynaklar bulunurken, Mars'da da su buzu, demir, magnezyum, alüminyum ve diğer metaller mevcuttur. Uzaydan elde edilen bu kaynaklar, Dünya'daki kaynak açığını kapatabilir ve yeni teknolojik gelişmelere katkıda bulunabilir.

Bu çalışmada, Ay ve Mars'ta madencilik yapmanın olasılığını ve potansiyelini ortaya koyarken aynı zamanda Ay ve Mars'ın jeolojik yapısını, mineral kaynaklarını ve bu kaynakları çıkartmak ve kullanmak için kullanılan teknolojileri, bu teknolojiler kullanıldığında karşımıza çıkacak zorluklar incelenmiştir. Bunun yanı sıra uzay madenciliğinin ekonomik analizine de değinilerek, uzay madenciliğinin Dünya ekonomisine ve uzay araştırmalarına katkısı da değerlendirilmiştir.

2. AY'DA MADENCİLİK

Ay'ın jeolojik özellikleri karmaşık ve gezegenin tarihi boyunca meydana gelen birçok farklı jeolojik olaya işaret etmektedir. Ay'ın jeolojisini anlamak, güneş sistemimizin ve içindeki gezegenlerin oluşumu ve evrimi hakkında bilgi edinmemize yardımcı olabilecektir. Ay yüzeyini şekillendiren üç ana jeolojik süreç; çarpmalar, volkanizma ve tektonik faaliyetlerdir. Ayın hem görünen yüzü hem de arka yüzü, Güneş Sistemi'ndeki bilinen en büyük çarpma yapısı olan Ay yüzeyindeki Güney Kutbu-Aitken Havzası dahil olmak üzere büyük çarpma havzalarını barındırmaktadır. Ay yüzeyinde bulunan bu havza, Güney Kutbu'ndan uzak güney enlemlerine kadar uzanmaktadır [1].

Ay, çeşitli büyüklüklerde asteroit ve kuyruklu yıldız gibi cisimlerin çarpmalarına maruz kalmıştır. Bu çarpışmaların hızları bazı durumlarda 30 km/sn'yi geçmektedir. Bu olaylar, çapları mikrometrelerden 2500 km'ye kadar değişen çarpma kraterleri oluşturmuştur [1,2]. Bir kraterin şekli (morfolojisi) üç faktöre bağlıdır:

1. Belirli kraterin büyüklüğü.
2. Yüzeyin reolojik özellikleri (akma davranışı).
3. Aşınma ve bozunma süreçleri.

Yüksek çözünürlüklü ay keşif yörünge aracı kamerası, Ay'ın 100 m/piksel ölçeğinde küresel olarak görüntülenmesini sağlayan bir cihazdır. Bu kamera, 50 km'lik bir yörüngeden 57 km'lik bir alanda yedi renk bandı (321, 360, 415, 566, 604, 643 ve 689 nm) ve monokrom modda 105 km'lik bir alan yakalayan bir push-frame kameradır. Bu kamera yardımıyla elde edilen görüntüler, farklı aydınlatma koşulları altında küresel haritalar oluşturmak için mozaiklenmekte ve bu sayede daha önce görülmemiş bir ayrıntı seviyesinde ay kraterlerinin incelenmesi sağlanmaktadır [3]. Yatay ve düşeyde 0,5 m/pixel çözünürlükte elde edilen bu görüntülerden yola çıkarak, çarpma kraterlerinin morfolojisi hakkında bilgiler elde edilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde çarpma enerjisinin artması ve buna bağlı olarak krater boyutlarının büyümesiyle kraterlerin morfolojilerinin de karmaşıklaştığı belirlenmiştir [3]. Karmaşık kraterler aşağıdaki özelliklerle tanımlanmaktadır:

1. Düz tabanlar ve basit kraterlere kıyasla daha düşük derinlik ve çapa sahiptir [3].
2. Duvar terasları.
3. Merkezi yükseltiler.
4. İyi gelişmiş sürekli ve süreksiz ejecta (fırlatma materyali).
5. Krater içerisinde biriken ve dışarı püskürtülen katılaşmış çarpma eriyiği (Şekil 1).

Bilinen en küçük krater formları, Ay kaya örneklerinde bulunan mikrokraterlerdir. Line ve Taruntius H kraterleri basit, kâse şeklindeki krater tipine örnektir [1,3]. Euler, Tycho ve Gassendi kraterleri ise karmaşık krater tipini temsil etmektedir. Schrödinger Ori-entale ise çok halka içeren çanak yapısı sergilemektedir. Oriental kraterinin halka çapı 930 km' dir. [1,3].

Basit kraterlere benzer şekilde, karmaşık kraterler de krater kenarlarının kısmen aşınmasına ve daha sonraki bazaltik lav malzemesi birikintileriyle kısmen veya tamamen dolmasına neden olan yüzey yenileme süreçlerine maruz kalmıştır [1,2,4,5].

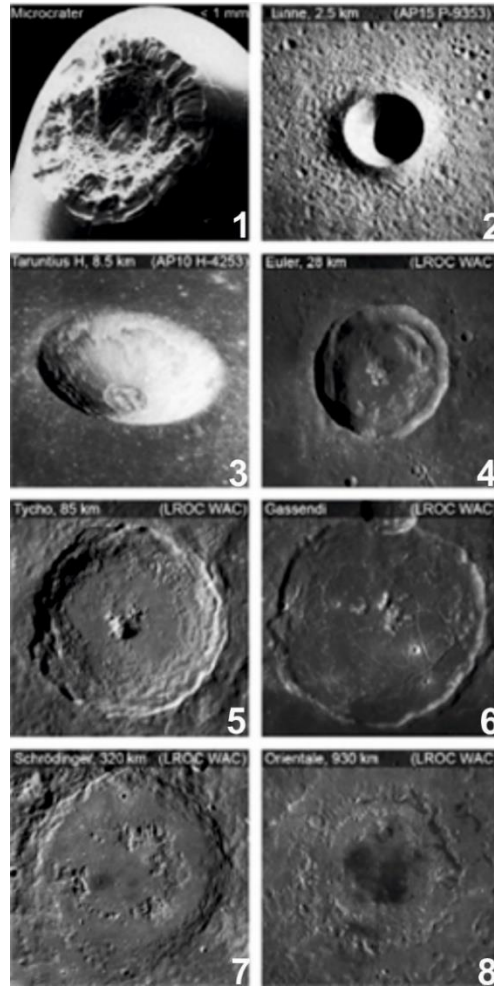
Bir milyar yıldan daha genç olan kraterler genellikle parlak, radyal ejecta ışınlarını korumaktadır. Bu ışınlar, büyük kraterlerde (çapı onlarca kilometre) Ay yüzeyinde birkaç yüz kilometreye kadar uzanmaktadır. Çok halkalı kraterler, Ay yüzeyindeki en eski arazi şekillerini temsil etmektedir ve Ay tarihinin ilk 800 milyon yılında meydana gelen büyük çarpma olayları ile oluşmuştur. Dünya'nın

aksine, Ay levha hareketlerinden yoksundur ve bu sayede erken dönem volkanik geçmişine ait kanıtlar korunmuştur. Ay'daki bazaltlar, Ay'ın görünen yüzünde yoğun olup, çoğunlukla alçakta bulunan krater havzası dolgusunun iç kısmında bulunmakta ve toplam ay yüzeyinin %17'sini kaplamakta, bu da ay kabuk hacminin %1'ine denk gelmektedir [1,2,6,7]. Ay denizlerindeki volkanik kökenli jeomorfoloji lav akıntıları, kıvrımlı vadiler, volkanik kubbeler ve konileri, piroklastik birikintileri içermektedir.

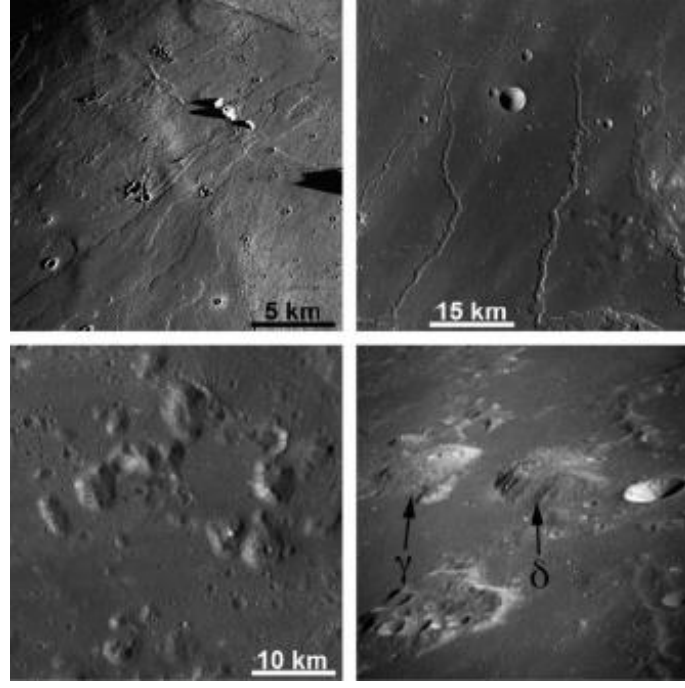
Düşük viskoziteli, yüksek sıcaklıklı bazaltik lavlar, topografik olarak alçakta bulunan krater havzası iç kısımlarında püskürmüş ve geniş alanları yeniden şekillendirmiştir. Bu oluşumlar Ay'ın görünen yüzünün yaklaşık %30'unu kaplamaktadır (Şekil 2).

U ve Th gibi radyoaktif elementlerin neden olduğu ısınma, 60-500 kilometre derinliklerde ultramafik manto maddesinin kısmi erimelerine yol açarak bazaltik bileşimli magma üretmiştir. Devasa havza oluşturan çarpmalar, görünen yüzünde, düşük yoğunluklu üst kabuk malzemelerini sıyrarak, yoğun bazaltik magmaların yüzeye yükselmesine izin vermiştir [1,8].

Yüksek çözünürlüklü kamera görüntüleri sayesinde, deniz yüzeylerindeki bazalt katmanları detaylı bir şekilde incelenebilmektedir. Birçok deniz bölgesinde, yüzeyde 100-150 metre çaplarında çukur veya delikler tespit edilmiştir [1,9,10].

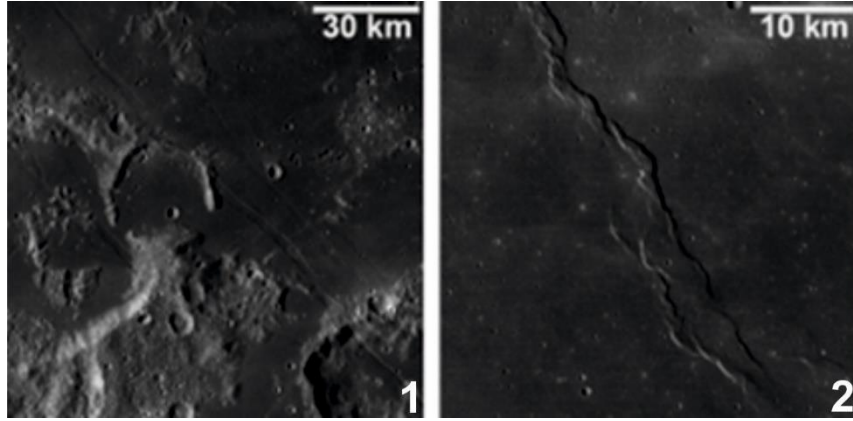


Şekil 1. Farklı ölçeklerde Ay kraterleri: 1. Microcrater, 2. Linne, 3. Tarantius, 4. Euler, 5. Tycho, 6. Gassendi, 7. Schrödinger, 8. Orientale [1]



Şekil 2. Apollo 15 metrik kamera ile Ay'dan alınan volkanik izler [1]

Ay'ın tektonik özellikleri hem çarpma olaylarına hem de volkanizmaya bağlıdır ve fay, graben, dayk ve kırışık sırtlar gibi genişleme ve sıkışma özellikleriyle kendini göstermektedir (Şekil 3).



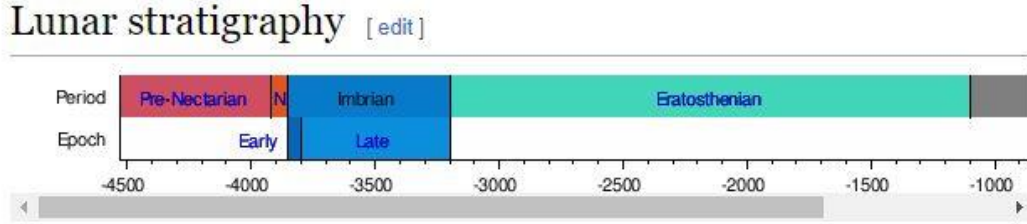
Şekil 3. Ay'daki tektonik yapılar: 1. Genişleme grabeni yapısı, 2. Sırt yapısı [1].

Yeryüzü ile karşılaştırıldığında Ay'da tektonik gerilmelerden kaynaklanan arazi şekilleri daha az yaygındır. Ay, hareketsiz örtülü gezegensel bir cisim olarak adlandırılmaktadır [1,2,11,12]. Bu hareketsiz örtü, büyük ölçekli bir magmanın katılaşmasıyla Ay tarihine göre erken dönemde oluşan düşük yoğunluğa sahip bir kabuktan ibarettir. Ay, iç ısısının çoğunu, hareketsiz konveksiyon akımlarıyla birlikte kaybetmiştir [1,12]. Ay'daki tektonik özellikler çoğunlukla; çarpma kaynaklı gerilmeye ve çarpma havzaları içindeki bazaltik malzemelerin yükünden kaynaklanan gerilmeye bağlanmaktadır [1,2].

Güneş-Ay kütle çekim etkileşiminin yarattığı gelgit etkileri, Apollo sismometreleri tarafından kaydedilen günümüz Ay depremlerinin ana kaynağını oluşturmaktadır. Gelgit gerilmesinden kaynaklanan deformasyon, Ay Dünya'ya daha yakinken, daha yoğun olmuştur. Ay yüzeyinde haritalanan çizgisel yapıların uzamsal dağılımı hem yakın hem de uzak yüzlerde benzerdir ve gelgit kuvvetlerinin neden olduğu çöküntü kaynaklı bir oluşumu desteklememektedir [1,13].

Yapılan bir çalışmada Ay ortamında 400 yılda yalnızca bir kez 4,5' ten büyük sığ bir depremin olabileceği tahmin edilmiştir. Ay'da oluşan depremlerin çoğu, termal döngülerin neden olduğu büzülmenin oluşturduğu çatlama, yeraltı magmalarında patlama veya 20-70 km/s hıza ulaşabilen meteorit etkilerinden kaynaklanmaktadır [14,15].

Yapılan çalışmalar sonucunda Ay'ın stratigrafik olarak beş döneme ayrıldığı belirlenmiştir. Bu dönemler sırasıyla; Pre-Nectarian (4.1-3.9) milyar yıl, Nectarian (3.9-3.8) milyar yıl, Imbrian (3.8-3.1) milyar yıl, Eratosthenian (3.1-1.0) milyar yıl, Copernican (1.0-günümüz) şeklindedir [1,6,16]. Imbrian dönemi, erken ve geç Imbrian olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu ayırım, erken Imbrian döneminin sonunda oluşan Oreintale Havzası'nın oluşumuna dayanmaktadır. Oreintale olayının tarihini kesin olarak belirleyen kaya örnekleri olmadığı için, bu ayırım stratigrafik olarak ve krater sıklığına göre yapılmaktadır. Bununla birlikte, belirli bir kaya örneğine kesin bir yaş atamada tek bir çözüm olmadığı için, bu dönemlerin ve çağların sınırları araştırmacılar arasında farklılık göstermekte, her bir kaya örneğinden farklı yaş dağılımları elde edilmektedir [1,6,16]. Bazı araştırmacılar, havza oluşturan bir olayı kaya örneğinde temsil edilen en genç yaş ile ilişkilendirmeyi tercih ederken, diğerleri ise havza oluşma yaşı olarak "tepe noktasını" (en sık görülen yaş) tercih etmektedirler [1,17]. Imberian Havzası ve ona dayanan zaman sınırlarının oldukça değişken olduğunu savunan araştırmacılar, Nectaris Havzası'nın muhtemelen örneklerle tarihlendirilmediğini öne sürmektedir [1,18] (Şekil 4).

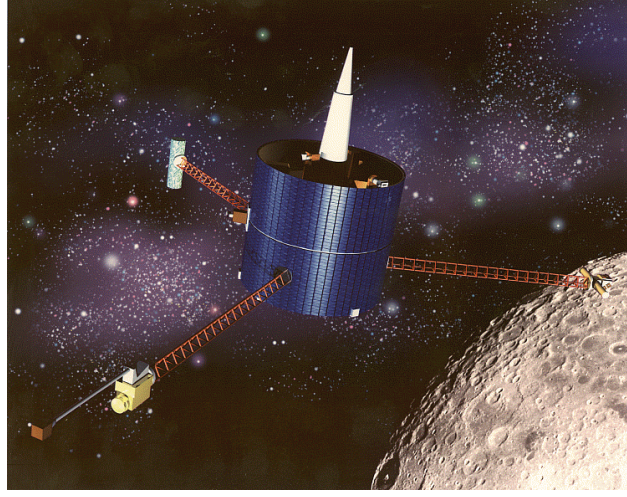


Şekil 4. Ay stratigrafisi [19]

Uzay şirketleri, kaynak çıkarma, işleme, ticari ürünlere dönüştürme ve bu ürünleri uzayda, Dünyada ve hatta daha ötelede dağıtmak için Ay ve asteroid madenciliği lokasyonları kurmak ve işletmek için aktif olarak çalışmaktadır. 45 yıl önce, Apollo insanlı Ay görevleri Dünya'ya kaya ve regolit (Ay toprağı) getirmiştir. Yapılan çalışmalar ve analizler, Ay'ın değerli mineraller ve kaynaklar içerdiğini ortaya koymuştur. Bu mineraller büyük ölçüde milyarlarca yıl boyunca gerçekleşen meteor ve asteroid çarpmalarının sonucu oluşan mineral açısından zengin regolit'i oluşturmuştur. Benzer şekilde Dünya'da da milyarlarca yıl boyunca, özellikle Güneş sisteminin oluşumunun erken dönemlerinde bu tür çarpışmalar yaşanmıştır. Ancak Dünya'da rüzgar, su ve bitki örtüsü bu çarpışmaların çoğunun izlerini silmiştir. Ay'da ise aşınma yalnızca sonraki çarpışmalar ve Güneş rüzgarı ile gerçekleşmektedir [20]. Ay'ın hem insanlı hem de insansız görevlerinden elde edilen sonuçlar, Ay'da Helyum-3, nadir toprak elementleri, platin ve diğer değerli metaller gibi birçok kaynağın varlığını göstermektedir. Bu kaynaklara ek olarak, su buzu da bulunmaktadır. Kısa ve orta vadede, en umut verici kaynaklar, yakıt olarak kullanılacak hidrojen ve oksijen için gerekli olan (buz) kaynaklarıdır. Ay'ın dünyaya göre düşük yerçekimi ve Dünya ile Ay arasındaki çeşitli yörüngelerde ve ötesinde yaşam destek sistemleri için su ve oksijen açısından yeni ekonomik fırsatlar yaratmaktadır [20].

Uzay'da, yakıt olarak kullanılacak hidrojen ve oksijen ihtiyacı halihazırda mevcuttur. Planlanan hem insanlı hem de insansız görevlerin sayısı, potansiyel ihtiyacın tahmin edilmesine izin vermektedir. NASA ve uluslararası ortakların Mars'a ve ötesine yolculukları sırasında, yakıt ikmal noktalarında araçların yakıtlanması uygulanabilir ve sürdürülebilir bir keşif programı oluşturmada çok önemli olacaktır [20].

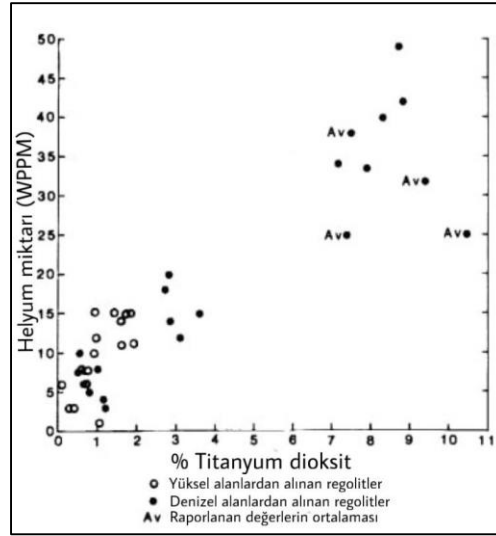
Ay'da buz varlığını tahmin etmek için birkaç keşif görevi gerçekleştirilmiştir. Bunlardan en önemlileri Celestine ve Lunar Prospector görevleridir. 25 Ocak 1994'te fırlatılan Celestine aracının görevi, askeri uydular ve balistik füzeler için geliştirilen yeni kızılötesi sensörleri, jiroskop lazerlerini, fiber optik sistemlerini ve yüksek kapasiteli katı hal hafızasını test etmek olarak planlanmıştır. Araç, Lazer radar (LIDAR) ve ultraviyole, görünür ve kızılötesi ışıkta çalışan dört kamera ile günde 25.000 görüntü olmak üzere toplamda bir milyondan fazla görüntü elde etmiştir. Bu görüntüler birleştirilerek kutup bölgeleri için 40 metreye düşen çözünürlükle 100 ila 200 metre arasında değişen bir çözünürlüğe sahip eksiksiz bir Ay atlası oluşturulmuştur. Celestine'in verilerine göre, 2 buz içeren regolit, Ay'daki Kuzey Kutbu'na doğru 530 km, Güney Kutbu'na doğru ise 6360 km uzanmaktadır [21]. Ay'daki keşifler, 1998 yılında Lunar Prospector aracının fırlatılmasıyla devam etmiştir (Şekil 5). Bu aracın gönderdiği verilere göre Ay'daki su kaynağının tahmini olarak 300 milyon ton olduğu düşünülmektedir ki bu rakam daha önce düşünülen miktarın yaklaşık 100 katıdır. Madencilik ve yakıt üretim tesislerine yatırım yapmadan önce buzun varlığını doğrulamak ve madencilik ve geri kazanım teknolojilerini test etmek gerekmektedir [21].



Şekil 5. Ay Araştırmacısı [22].

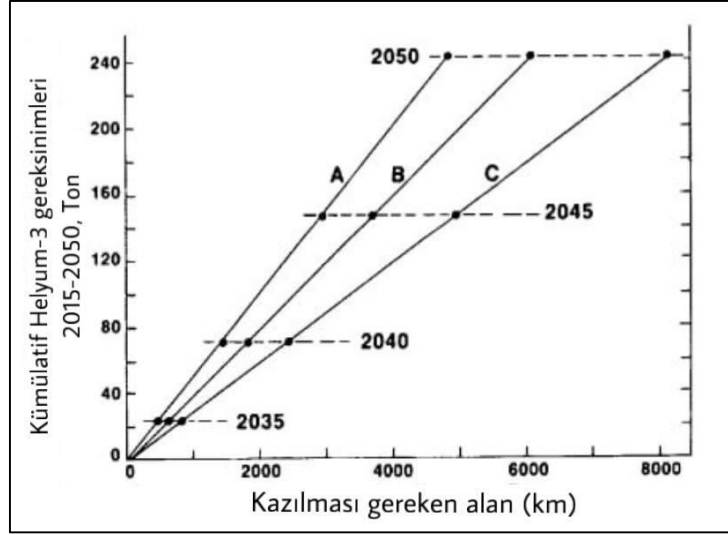
Ay'dan alınan regolitlerin içerisindeki helyum (He) miktarı ve titanyum dioksit (TiO_2) miktarı incelenmiştir ve grafikleri çizilmiştir [23] (Şekil 6). İncelemeler sonucunda regolitlerin içerdiği element miktarının değişiklik gösterdiği gözlenmiştir.

Yüksek alanlardan alınan regolitlerin hem helyum hem de titanyum dioksit içerikleri düşük olduğu saptanmıştır. Deniz alanlarından alınan regolitler ise iki gruba ayrılmıştır: Birinci grup regolitlerin hem helyum hem de titanyum dioksit açısından zengin oldukları, ikinci gruptakilerin ise her iki element bakımından fakir olduğu belirlenmiştir. Birinci gruptakilerin volkanik patlamalar sonucu oluşan bazaltik kayalardan türediği, He ve TiO_2 bakımından zengin magmanın bu patlamalarla yüzeye çıkarak regoliti oluşturduğu saptanmıştır. Araştırmacılar, İkinci gruptakilerin ise daha eski ve aşınmış bazaltik kayalardan türediğini, bu aşınmanın, He ve TiO_2 'nin kaybolmasına neden olduğunu belirlemişlerdir [23].



Şekil 6. Ay'da helyum ve titanyum dioksit dağılımı [23].

Wisconsin Üniversitesi araştırma grubu, 2015-2050 yılları arasında gerekli Helyum-3 miktarını karşılamak için bir madencilik senaryosu öngörmüştür [23]. Bu senaryoda; 3 metre kazma derinliği, ortalama 30 ppm He-3 içeriği ve %100 He-3 geri kazanımı varsayılmıştır (Şekil 7). A çizgisi, bu varsayımlara göre He-3 ihtiyacını karşılamak için kazılması gerek alanın (kilometrekare) cinsinden zaman içerisindeki değişimini gösterdiğini, B çizgisinin ise, kazma ve işleme sırasında geri kazanım oranı %80 olduğunda kazılması gereken alanı temsil ettiğini belirlemişlerdir. Daha gerçekçi olduğu düşünülen %60 geri kazanım oranı için gerekli alan ise C çizgisi ile gösterilmiştir. Eğer geri kazanım oranı %10 olursa, 2030 yılına kadar 123 km², 2050 yılına kadar ise yıllık 20.000 kg He-3 üretimi sağlanacak toplam 8110 km² alan kazılması gerekecektir. Bu senaryoda 2050 yılından sonra her yıl yaklaşık 665 km² alanın kazılması gerekecektir. Bu veriler, He-3 ihtiyacını karşılamak için geniş alanlarının kazılmasının zorunlu olduğunu göstermektedir [23].



Şekil 7. (2015-2050) yılları arasındaki Helyum-3 miktarını karşılanması grafiği [23].

Ay'da He ve TiO_2 'nin yanı sıra birçok başka madenler de bulunmaktadır. Bunlar:

Metaller: Demir (Fe), Magnezyum (Mg), Alüminyum (Al), Kalsiyum (Ca), Sodyum (Na), Potasyum (K).

Oksitler: Silisyum dioksit (SiO_2), Alüminyum dioksit (AlO_2), Demir oksit (FeO), Magnezyum oksit, (MgO), Kalsiyum Oksit (CaO).

Nadir Toprak Elementleri (NTE): Samaryum (Sm), Neodimyum (Nd), Seryum (Ce).

Mineraller: Plajiyoklaz, Piroksen, Olivin, İlmenit, Apatit şeklinde sıralanabilir [24].

2.1. Ay'da Madencilik Yapmanın Zorlukları

Ay'da madencilik yapmak, Dünya'dan madencilik yapmaktan çok daha zorlayıcı ve karmaşık bir süreçtir. Bunun başlıca nedenleri şunlardır:

1) Uzaklık ve Zorlu Çevre: Ay, Dünyadan 384.400 kilometre uzaklıktadır. Bu durum, madencilik ekipmanlarının ve personelinin taşınmasını ve iletişim kurulmasını zorlaştırmaktadır. Ay'da atmosfer ve sıvı su bulunmamaktadır. Gündüzleri aşırı sıcaklıklar, geceleri ise aşırı soğuklar hakimdir. Bu durum, madencilik faaliyetleri için özel olarak tasarlanmış ekipmanlar ve barınma tesisleri gerektirmektedir. Aynı zamanda, Ay'da radyasyon seviyesi Dünya'dakinden çok daha yüksek olduğundan, madencilerin sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır [25].

2) Jeolojik Zorluklar: Ay toprağı (regolit), Dünyadaki topraktan çok daha ince ve tozlu olduğundan geleneksel madencilik ekipmanlarının ve tekniklerinin kullanılması zordur. Öte yandan Ay'daki mineraller, Dünya'daki minerallerden daha farklı dağılım gösterdiklerinden, değerli madenlerin bulunmasını ve çıkarılması daha zordur [25].

3) Teknolojik Zorluklar: Ay'da madencilik yapmak için yeni ve özel teknolojiler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu teknolojiler, zorlu çevre koşullarına dayanıklı olmalı ve uzaktan kumanda ile çalıştırılabilir. Aynı zamanda, Ay'dan çıkarılan madenlerin Dünya'ya taşınması için de yeni ve güvenilir taşıma yöntemleri geliştirilmesi gerekmektedir [25].

4) Ekonomik Zorluklar: Ay'da madencilik yapmak, Dünya'da madencilik yapmaktan çok daha pahalıdır. Yüksek taşıma ve altyapı maliyetleri, madencilik faaliyetlerinin karlılığını düşürmektedir. Aynı zamanda, çıkarılacak madenlerin pazarlanması da bir sorundur. Bu madenlerin Dünya'da kullanılacak ticari bir değeri olması gerekmektedir [25].

5) Yasal ve Etik Zorluklar: Ay'ın mülkiyeti ve kaynaklarının kullanımı ile ilgili uluslararası bir anlaşma bulunmamaktadır. Bu durum, madencilik faaliyetlerinin yasal çerçevesini belirsizleştirmektedir. Ay'da madencilik yapmanın çevresel ve etik etkileri de tartışılmaktadır [25].

Sonuç olarak, Ay'da madencilik yapmak birçok zorluk ve risk içeren bir girişimdir. Bu zorlukların üstesinden gelinmesi için önemli bir teknolojik ve ekonomik yatırım gerekmektedir. Ayrıca, Ay'ın mülkiyeti ve kaynaklarının kullanımı ile ilgili yasal ve etik çerçeve de netleştirilmelidir [25].

3. MARS'TA MADENCİLİK

Mars'ın jeolojisi, Dünya'dan birçok benzerlik ve farklılık göstermektedir. Her iki gezegen de katmanlı bir yapıya sahip olsalar da Mars'ın kabuğu Dünya'dakinden daha incedir. Mars'ın jeolojik geçmişi de Dünya'ninkine benzer şekilde volkanik aktivite, tektonik hareketler ve meteor çarpışmaları ile şekillenmiştir [26]. Genel olarak Mars'taki kraterlere baktığımızda, güneş sistemindeki diğer gezegenlere kıyasla oldukça zengin olduğu göze çarpmaktadır. Tahminlere göre, çapı bir kilometreyi aşan 43,000'den fazla krater Mars yüzeyini kaplamaktadır. Bu kraterler, Mars'ın jeolojik geçmişi hakkında bilgi edinmek için önemli bir kaynak oluşturmaktadır [26].

Bilim insanları, kraterlerin boyutlarını, şekillerini ve kompozisyonlarını inceleyerek Mars'a çarpan göktaşlarının ve kuyruklu yıldızların boyutlarını, hızlarını ve yörüngelerini tahmin edebilmektedirler [26].

Mars'taki en büyük kraterlerden bazıları şunlardır (Şekil 8):

1.Utopia Krateri: 3,300 kilometre çapa sahip bu krater, Mars ve Güneş Sisteminde bulunan en büyük çarpışma krateridir.

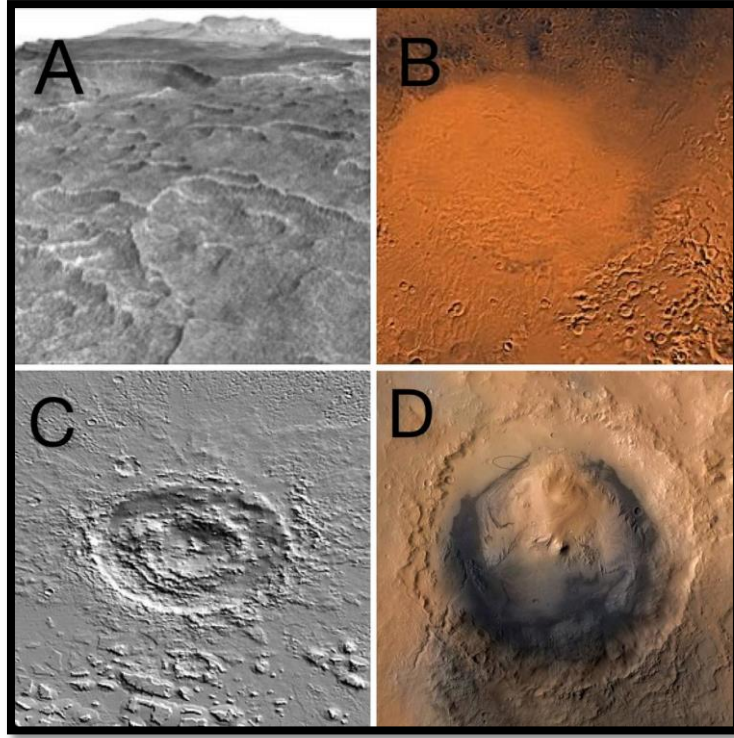
2.Hellas Krateri: 2,300 kilometre genişliğinde ve sekiz kilometre derinliğinde olan bu dev krater, yaklaşık 4,1-3,8 milyar yıl önce büyük bir asteroidin Mars yüzeyine çarpışmasıyla oluştuğu düşünülmektedir.

3.Agyra Krateri: 1,700 kilometre genişliğinde ve 5 kilometre derinlikte Güneş Sistemi'nin erken dönemlerinde büyük bombardıman sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

4.Gale Krateri: 154 kilometre genişliğinde ve beş kilometre derinliğinde olan bu kraterin muhtemelen kuru bir göl olduğu, yaklaşık 3.8-3.5 milyar yıl önce oluştuğu tahmin edilmektedir (science.nasa.gov).

Yoğun kraterler, büyük ihtimalle gezegenin en eski yüzeylerini oluşturmaktadır. İlk bakışta bu arazi, Ay'ın yüksek kesimlerindeki kraterlere benzese de daha yakından incelendiğinde, Mars'ın yüksek kesimlerindeki kraterlerin, Ay'dakilerden çok daha farklı ve karmaşık olduğu anlaşılmaktadır [22]. Marine 6 ve 7 görevlerinde görev alan araştırmacılar, kraterlerin hem morfolojisi hem de sayısı açısından iki moda sahip olduğunu tespit etmişlerdir [27,28]. Beş kilometreden büyük kraterlerin nispeten düşük kenarlara sahip ve sığ olma eğiliminde olduğunu, daha küçük kraterlerin ise genellikle çanak şeklinde olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 9).

2021 yılında Mars'ın kraterleri hakkında yapılan araştırmalara göre, Mars yüzeyindeki kraterler 1. Ejekta örtülerinin sürekli olduğu ve kıvrımlı uçlara sahip olanlar [29,30,31], 2. Ana krater çarpışmasına bağlı oluşanlar (LERS), 3. Düşük boyutlu katmanlı ejekta (LARLE)' lar olarak sınıflandırılmışlardır. LERS kraterleri ayrıca standart sınıflamaya göre, tek (SLERS), çift (DLERS) ve çoklu ejekta katmanı (MLERS) olmak üzere alt sınıflara ayrılmıştır [29,30].



Şekil 8. Mars'ta bulunan büyük kraterler: A) Utopia Krateri. B) Hella Krateri. C) Agyra Krateri. D) Gale Krateri [22]

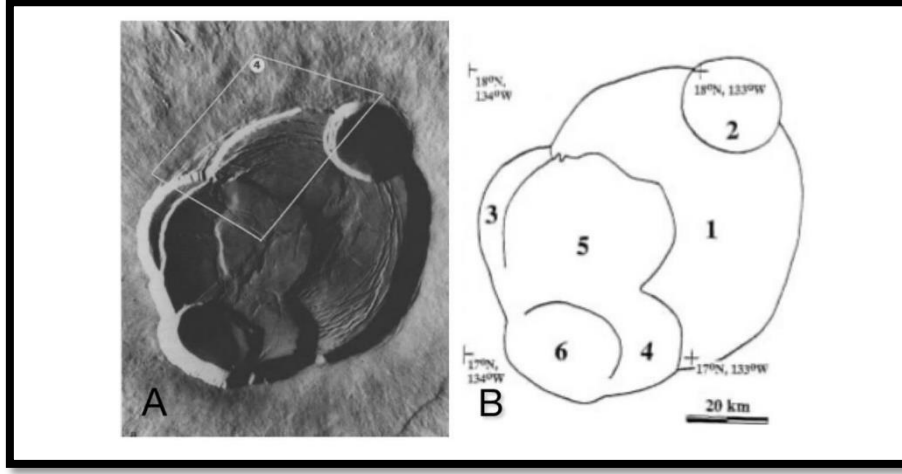


Şekil 9. Mars yüzeyindeki eski kraterler [27]

Mars'ın gelişiminde volkanik aktivitenin önemli bir rol oynadığı biliniyorsa da bu aktivite zaman ve mekânsal olarak düzensiz bir şekilde gerçekleşmiştir. Volkanik faaliyetin izleri neredeyse gezegenin tamamında görülse de bu volkanik yapıların üzerinde bulunan kraterlerin boyut ve sıklık dağılımı farklı bölgelerde önemli ölçüde değişmektedir. Bu da volkanizmanın zamana yayılışının eşit olmadığını düşündürmektedir [32,33,34,35,36,37,38].

Mars'taki çok genç yüzeyler sadece Tharsis ve Elysium olmak üzere iki büyük volkanik bölgede görülmektedir. Bu durum, zaman geçtikçe volkanik aktivitenin bu iki bölgede yaygınlaştığını göstermektedir. Bu bölgeler, sayısız genç lav akıntısının ortaya çıktığı çok sayıda volkanik baca içermektedir. Bu durum özellikle Mars'ın geçmişinin sonlarında viskozitesi düşük volkanizmanın baskın olduğunu göstermektedir [5,32,39].

Mars'ta Tharsis bölgesinde bulunan Olympus Mons, Güneş Sisteminde bulunan en büyük volkanik yapıdır. Bu yanardağın taban çapı 600 kilometreden fazla olup, çevresindeki ovalardan 26 kilometreden yükseğe çıkmaktadır. Bazı yerlerde yüksekliği altı kilometreyi aşan bir eğime sahiptir [40,41]. 80x65 kilometre çapındaki yapı içerisinde, yanardağın geçmişte birçok çökme olayı geçirdiğini gösteren altı adet iç içe krater bulunmaktadır [40,41] (Şekil 10).



Şekil 10. A) Olympus Mons'un zirve kalderası. Altı iç içe geçmiş krater ve belirgin kırışık sırtlar ve grabenler bulunmaktadır. B) Mougini-Mark tarafından tasarlanmış kroki harita. 1 en eski ve 6 en genç [40]

Olympus Mons'un tabanını çevreleyen belirgin dik yamaç, belki de en şaşırtıcı özelliğidir. Çünkü yer üstü karasal volkanlarda buna benzer bir yapı görülmemektedir. Ancak yamaç, su altındaki volkanik yapılara benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik;

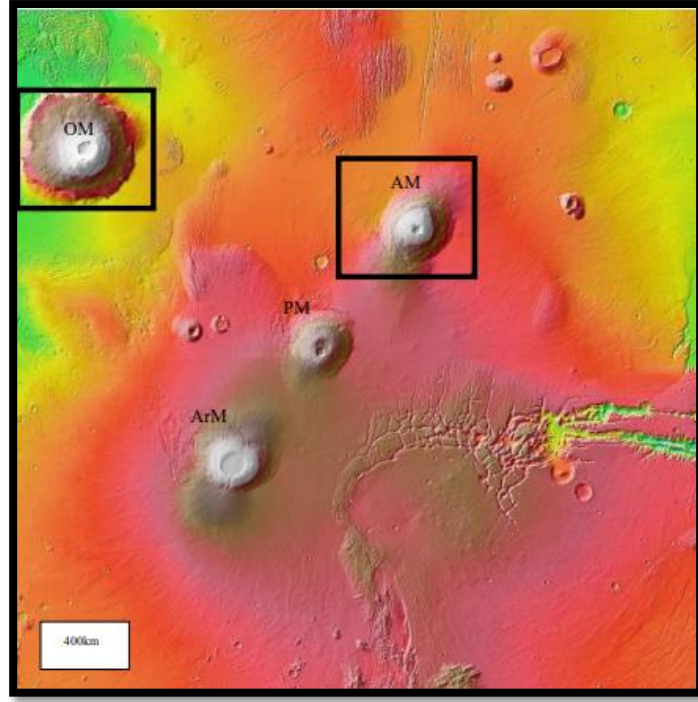
1. Püskürmeler başladığında Olympus Mons civarında buzun var olduğunu,
2. Havalandırma deliği veya deliklerin sonunda buzun üstünde yüzeye çıktığını ve
3. Devasa yerüstü kalkanının buzul ile sınırlı platformun üzerine yerleştirildiğini düşündürmektedir.

Volkanik yamaçın üzerinden aşağı doğru akan lav akıntıları, Olympus Mons'un buzulların çekildiğinden çok daha sonra büyümeye devam ettiğini göstermektedir. Bu akıntılar, yamaçın kalkanın (Olympus Mons) son dönem büyümesi sırasında var olduğunu ve sadece volkan sonrası bir aşınma ürünü olmadığını kanıtlamaktadır. İzlanda'da da benzer bir durum görülür [42].

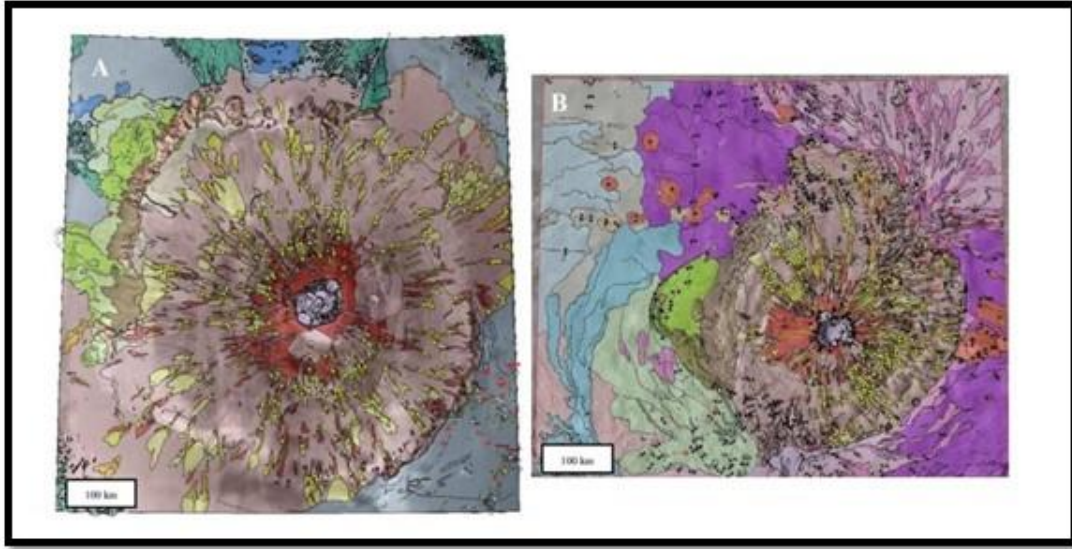
Olympus Mons'un etrafındaki çukurlukta bulunan lav ovaları, tipik olarak düşük eğimli olup ($<0,5^\circ$) ve onlarca-yüzlerce kilometre uzunluğunda kıvrımlı, birbirine paralel sayısız lav akıntısıyla karakterize edilmektedir. Bu akıntılar, havzanın güneydoğu ve güneyinde belirgindir (Şekil 11).

2019 yılında MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) kullanarak, Mars'ın Tharsis bölgesinde bulunan Olympus Mons (OM) ve Arscaeus Mons (AM) isimli iki büyük yanardağ yakın zamanda 1:1.000.000 ölçekli yüksek çözünürlüklü haritalanmıştır (Şekil 12). Olympus ve Arscaeus Mons yanlarında daha eski akışları kesen yan kanal akışları ile karakterize edilmektedir. Bu durum, lavın akışkanlığının (viskozitesi) azaldığını göstermektedir. Ayrıca, her iki yanardağ, ani bir eğim değişikliği ile yelpaze biçimli akışlardır [43].

Olympus Mons ve Arscaeus Mons volkanlarında, daha az viskoz lav akıntılarının yerini daha viskoz akıntılara bıraktığını gösteren ilginç bir durum söz konusudur. Bu durum, yan kanal akıntılarının daha eski yan sırt akıntılarını örtmesiyle anlaşılmaktadır. Bu akışkanlık değişiminin kanıtı, her iki volkanın yamaçlarında bulunan lav fanlarıdır. Bu yapılar, eğimin aniden değiştiği yerlerde tüp beslemeli akıntılar veya püskürtme noktalarının lavı delta biçiminde dışarı atmasıyla oluşan yelpaze benzeri yapılardır. Genellikle yan basamaklarda (volkan tabanına doğru eğimde ani kırılmalar) bulunan bu yapılar, hafif dışbükey bir topografik profile sahiptir [43].



Şekil 11. MOLA fotoğrafı, Olympus Mons ve Ascaeus Mons yanardağları [43]



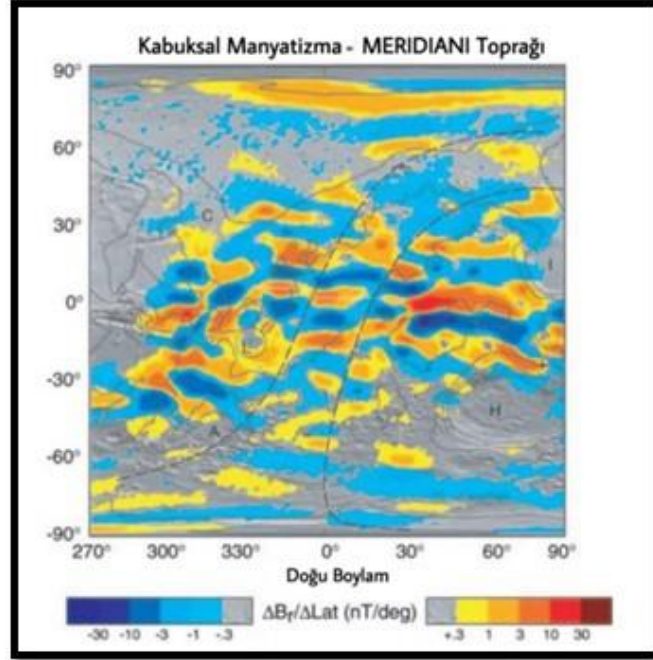
Şekil 12. A) 1:1M ölçekli Olympus Mons yanardağı. B) 1:1M Ascaeus Mons yanardağı. Yeşil nokta ise hava kanallarıdır [43]

Mars'ın volkanik aktivitesindeki patlama sayısının zamanla azalmasının, gezegenin atmosferi üzerinde doğrudan bir etkisi olmuştur [32,44]. Volkanik gazların atmosfere salınımının azalması, küresel ölçekte iklimi etkilemiştir. Yüzey basıncı ve sıcaklık, Amazonian döneminde önemli ölçüde düşmüştür. Şu anki iklim, Mars yüzeyinde sıvı suyun varlığına izin vermemektedir. Fakat jeolojik ve mineralojik kanıtlar, Mars'ın Noachian döneminde çok daha nemli olduğuna işaret etmektedir [32,45]. Bu dönemde nemli iklimin nasıl oluştuğu hala tartışılmaktadır [32,46]. Ancak patlayıcı volkanizmadan kaynaklanan gaz salınımının bu konuda anahtar faktör olduğu konusunda bilim insanları hemfikirdir. Dolayısıyla, patlayıcı volkanizmanın azalması, Mars'ın tüm evrimini etkilemiştir [32].

Mars, orta büyüklükteki karasal gezegenler arasında geçmişi boyunca tektonik ve genel jeolojik aktiviteyi sürdürmüş ve bu sürecin izlerini yüzeydeki kayalar ve arazilerde muhafaza etmiştir [47]. Mars yüzeyinin yaklaşık %25'i, çapı yaklaşık 8.000 km ve yüksekliği 11 km olan dairesel bir kabarıklık tarafından kaplanmıştır. Tharsis bölgesi, muhteşem radyal kırık ve grabenlerden oluşan bir sistemdir. Bu radyal fay sistemi, en uç noktaları 10.000 km uzaklıkta olan kuzeydoğu ve güneybatı uzantılarında belirgindir [48].

Mars'ın tektonik tarihini araştıran bilim adamları beş aşama belirlemişlerdir: 1. Aşama, Noachian döneminde gerçekleşen tektonizmadır. Bu dönemde, Tharsis yükseltisinin yüksek kesimlerinde genişleyen faylanmalar ve çok sayıda radyal dayk kaynaklı hendek oluşumu gözlemlenmiştir. 2. Aşama, Geç Neochian ve Erken Hesperian döneminde genişleme tektoniği şeklinde olsa da bu aktivite büyük ölçüde Valles Marineris kanyonları ve Tharsis'in doğusuyla güneyiyle sınırlı kalmıştır. Hesperian döneminin 3. aşamasında Tharsis'in batısında dayk kaynaklı graben oluşumu devam etmiştir. 4. ve 5. aşama gerilme tektoniği ise ağırlıklı olarak Tharsis Montes ve yükselti üzerindeki diğer volkanik yapılarda gerçekleşmiştir. Tharsis'in batısında ise bu dönemde nispeten daha az aktivite gözlenmiştir [49].

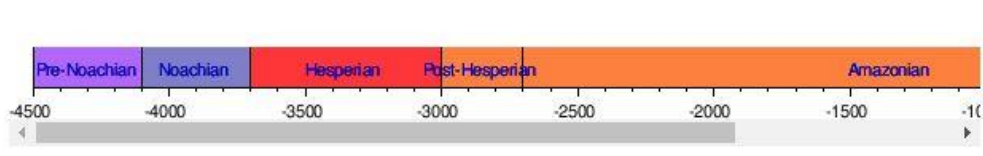
Daha önce görüntü veya topoğrafyada görülmemiş başka bir fay tipi, Meridiani'de manyetik konturların incelenmesiyle tespit edilmiştir (Şekil 13). Haritada kesikli iki çizgi, manyetik alan modelinin kaymış gibi görüldüğü iki fayın konumunu göstermektedir. Bu çizgiler, ortak bir dönüş eksenini boyunca bir yarıçap vektörünün dönüşü ile çizilmiştir. Bu dönüş eksenini, Hellas Havzasının hemen kuzeyinde 23°S ve 80,5°E konumlandırılmış bir kutup (artı işareti ile işaretlenmiş) tarafından tanımlanmıştır. Manyetik iz, haritanın yaklaşık 15°N ve 30°S arasında uzanan, iki kesikli çizgi arasında değişen polariteye sahip bir dizi doğu-batı eğilimli özellik gösterdiği 0° enlem ve 0° boylam civarında iyi korunmuştur. Fayların yakınında, 15°N ile 30°S enlem arasında geniş bir yerkaşığı kesiminde tutarlı fakat kusurlu bir desen devam etmektedir. Önerilen iki paralel büyük fayın arası yaklaşık 1.400 km'dir ve benzer bir manyetik alan deseni, doğu fayının her iki tarafında 2.700 km boyunca izlenebilmektedir [50].



Şekil 13. Meridiani'nin Manyetik Alan Haritası [50]

Mars'ın stratigrafisi, gezegenin oluşumundan günümüze kadar uzanan jeolojik olayların bir kaydını sunmakta ve bize Mars'ın geçmişindeki iklim, tektonik ve su aktivitesi hakkında bilgi vermektedir [22].

Mars'ın jeolojik tarihi Noachian, Hesperian ve Amazonian olmak üzere üç ana döneme ayrılmıştır: Bu dönemler, jeolojik aktivitedeki değişikliklere ve yüzey şekillerindeki değişikliklere dayanarak tanımlanmıştır [51] (Şekil 14).

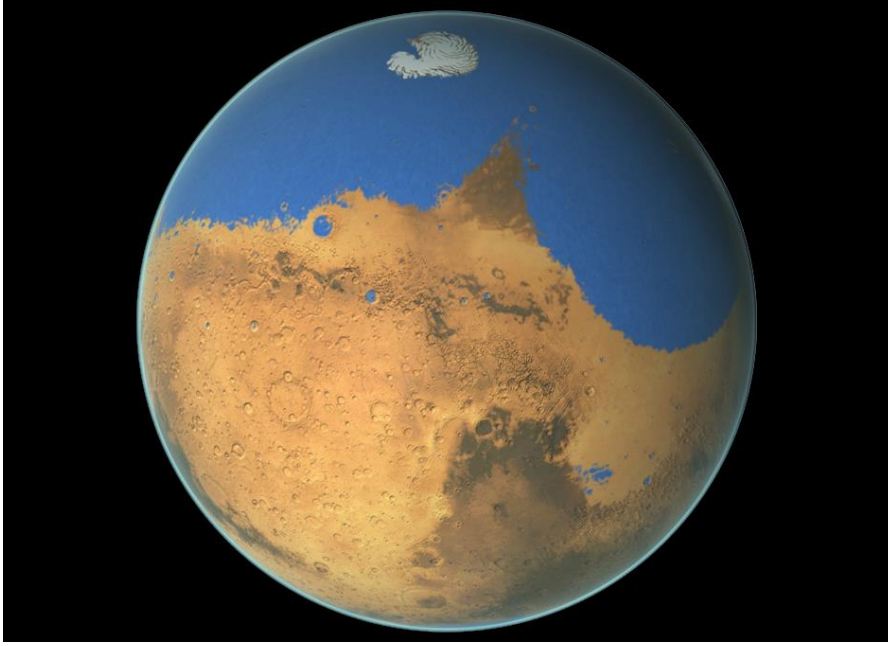


Şekil 14. Mars stratigrafisi [51]

1. Neochian Dönemi (4,5 milyar yıl önce- 3,5 milyar yıl önce): Bu dönem, Mars'ın oluşumundan sonraki ilk jeolojik dönemdir. Gezegen yüzeyinin büyük volkanik patlamalar ve meteor çarpmaları ile şekillendiği, Mars'ın aktif bir plaka tektoniğine sahip olduğu

ve bu plakaların hareketinin jeolojik aktiviteye katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Neochian Dönemi'nden Mars'a ait çok az jeolojik kayıt kalmıştır. Bu durum, bu dönemin jeolojisini tam olarak anlamak için zorluklar teşkil etmektedir [22].

2.Hesperian Dönemi (3,5 milyar yıl önce- 1 milyar yıl önce): Mars'ın jeolojik tarihinde büyük değişimlerin gerçekleştiği bir dönemdir. Bu dönemde, Mars'ın manyetik alanının zayıflaması ve atmosferinin büyük bir kısmının uzaya kaybolması gerçekleşmiştir. Bu durum, Mars'ın yüzeyinin radyasyona ve güneş rüzgarına daha fazla maruz kalmasına neden olmuştur. Hesperian Dönemi'nde Mars'ta suyun varlığına dair güçlü kanıtlar bulunmaktadır. Bu dönemde, Mars'ın yüzeyini büyük su kütlelerinin kapladığı ve akarsuların aktığı düşünülmektedir. Hesperian Dönemi'ne ait jeolojik kayıtlar, Neochian Dönemi'ne nazaran daha fazladır. Bu durum, bu dönemin jeolojisini daha iyi anlamamızı sağlamıştır (Şekil 15) [22].



Şekil 15. Hesperian Döneminde Mars'ın Şekli [52]

3.Amazonian Dönem (1 milyar yıl önce- günümüz): Mars'ın jeolojik tarihindeki en son dönemdir. Bu dönemde, Mars'ın jeolojik aktivitesi önemli ölçüde azalmıştır. Volkanik patlamalar ve meteor çarpmaları nadir hale gelmiş, Mars'ta suyun varlığına dair kanıtlar azalmıştır. Bu durum, Mars'ın yüzeyinin kuruduğunu ve soğuduğunu göstermektedir. Amazonian Dönemi'ne ait jeolojik kayıtlar, Neochian ve Hesperian Dönemleri'ne nazaran çok daha fazladır. Bu durum, bu dönemin jeolojisini en iyi anladığımız dönem olmasını sağlamıştır [22].

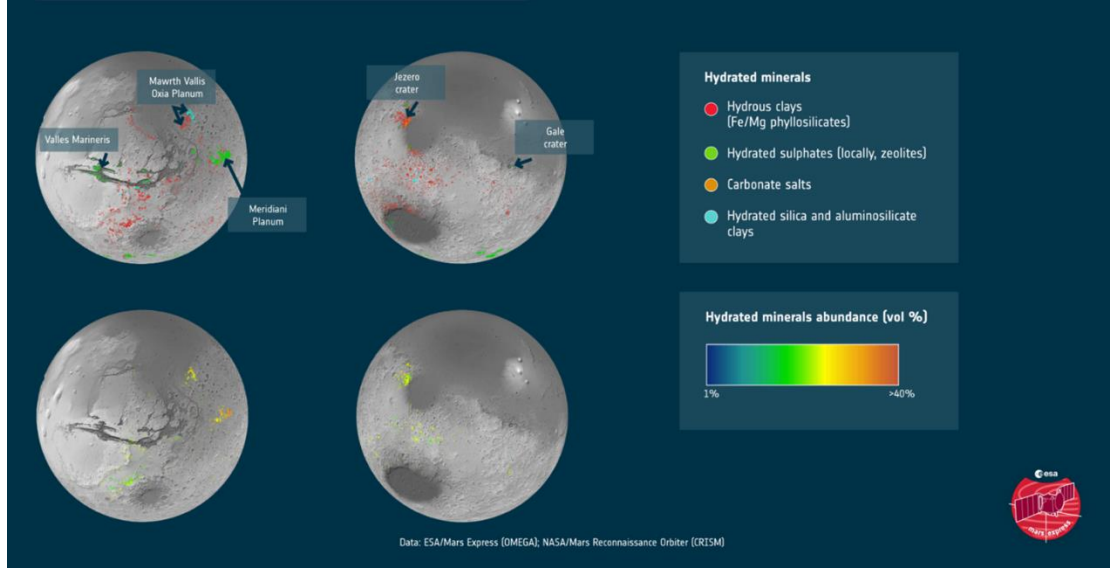
Mars, Dünya'ya en çok benzeyen gezegenlerden biri olarak kabul edilmekte ve bu nedenle uzun zamandır insanlığın ilgisini çekmektedir. Mars'ın jeolojik geçmişi ve mevcut durumu, gezegende çeşitli madenlerin bulunma potansiyeli olduğunu göstermektedir. Bu madenler, uzay araştırmaları ve potansiyel Mars yerleşimleri için önemli kaynaklar sağlayabilir. Mars'ta gelecekteki keşiflerin maliyetini düşürmek için Mars kaynaklarını kullanma girişimleri, "Yerinde Kaynak Kullanımı" veya kısaca İSKU olarak adlandırılmaktadır. Düşük Dünya yörüngesine bir kilogram malzemeyi göndermenin maliyeti 4.000 dolar iken, aynı malzemeyi Mars'a göndermek çok daha pahalıdır. Bu yüzden Mars kaynaklarını yerinde kullanmak kritik bir önem arz etmektedir [22].

Araştırmacılar, Mars yüzeyinden mineral toplama yöntemleri üzerinde çalışmaktadır. Bu mineraller, Mars'ta yaşayanları zararlı güneş radyasyonundan, aşırı soğuk gece sıcaklıklarından ve göktaş bombardımanından koruyacak barınak altyapısı oluşturmada kullanılacaktır. Bu yenilikçi fikirler arasında Mars killerinden tuğla ve seramik üretimi, kuvars ve demir içermeyen opal kayaçlarından cam ve fiberglas elde edilmesi, perkloratlardan antifriz yapılması yer almaktadır [52].

Su buzu, içme suyu sağlamanın yanı sıra elektroliz ile elde edilen hidrojeni de sağlayabilir. Bu hidrojen, atmosferdeki CO₂ ile birleştirilerek yakıt veya 3 boyutlu yazıcılar için plastik haline getirilerek ekipman ve yedek parça üretiminde kullanılabilir. Kil hidratlar hem yakıt hem de su temin edebilir. Evaporit yataklarından elde edilen magnezyum, hidrojeni depolamak için magnezyum hidrid oluşturmada kullanılabilir. Zeolitler, pillerde enerji depolama ve Mars atmosferinden su çekmek için kullanılabilir. Nikel-demir göktaşlarından elde edilen nikel, metan ve etan yakıtlarının üretiminde katalizör olarak kullanılabilirken, cevherler ekipman

yapmak için metal haline getirilebilir. Nadir toprak elementleri (NTE) ise elektronik ve motorlar için magnetlerin yanı sıra ekranlarda ve LED ışıklarında fosfor olarak kullanılabilir. Nadir toprak elementlerinden toryum genellikle nükleer enerji kaynaklarını beslemek için kullanılabilir.[52].

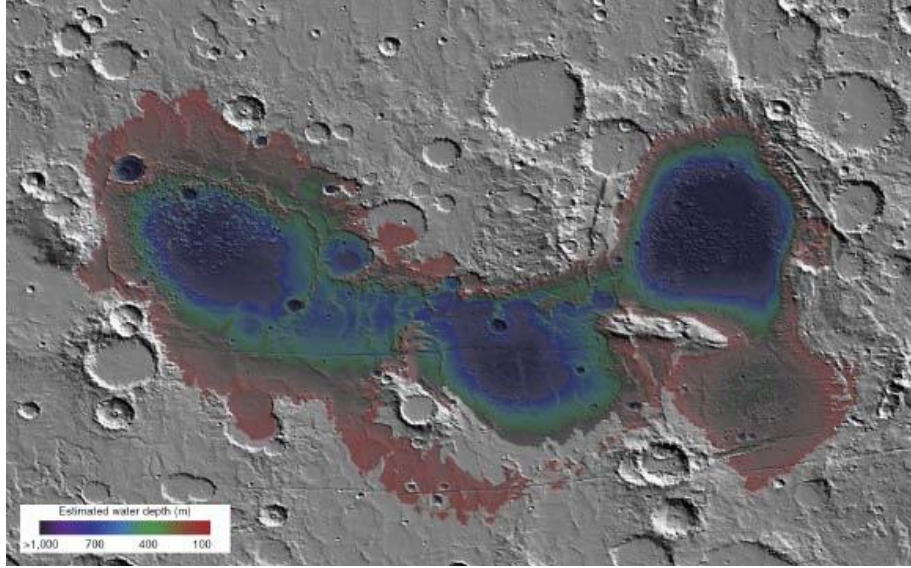
Mars'ta yerinde kaynakların keşfi devam ediyor olsa da potansiyel yaşam alanlarını bu kaynaklara yakın mesafelerde bulma görevi emekleme aşamasındadır. Kızıl Gezegen'in yüzey alanının Dünya'nın kara alanına neredeyse eşit olduğu düşünüldüğünde, gezici araçlar kullanarak bu kaynakları aramak bir samanlıkta iğne aramaya benzemektedir. Buna karşılık, Mars yörüngesinden yapılan uzaktan algılama, yüzeye ayak basmadan bu kaynakları bulmanın uygun maliyetli bir yoludur. Yörünge spektrometreleri Mars yüzeyinde 40'tan fazla mineral tespit etmiştir. Geçtiğimiz on yılda, NASA MRO CRISM görüntüleme spektrometresi, gelecekteki Mars keşifleri ve nihai olarak kolonileştirme için gerekli olan mineral yataklarının haritasını çıkarmak için kullanılacak gezegen çapında bir VSWIR-MIR (0,4 ila 4 μm) hiper spektral veri seti oluşturmuştur. Bu benzersiz veri seti, NASA Planetary Data System üzerinden erişilebilir olup, değişken spektral çözünürlüğe sahip 554 kanala kadar 17 x 17 m piksellik uzamsal çözünürlüğü kapsamaktadır. MRO CTX, Mars Express HRSC ve MRO HiRISE araçlarından elde edilen mevcut geniş bantlı görünür görüntü verileri, sırasıyla 6, 2 ve 0,5 m/piksele kadar uzamsal bağlam sağlayabilir. Bu veri setlerinin tümü, gelecekteki insan keşifleri ve Mars'ta nihai olarak kolonileştirme için gerekli altyapıyı inşa etmek için ihtiyaç duyulan mineral kaynaklarını bulmak için elverişlidir [52]. Mars keşif görevlerinden elde edilen veriler kullanılarak, Mars'taki hidratlı mineral yataklarının ilk detaylı küresel haritası oluşturulmuştur (Şekil 16). Çoğunlukla killer ve tuzlardan oluşan bu mineraller gezegenin farklı bölgelerindeki su geçmişi hakkında bilgi vermektedir. Killerin büyük bölümü Mars'ın erken nemli döneminde oluşmuşken, halen görülebilen tuzların çoğu suyun yavaş yavaş kuruması ile birlikte oluşmuştur [52].



Şekil 16. Mars'ta Bulunan Hidratlı Minerallerin Haritası [52]

Eridania havzasına ait (Güney Mars) harita Şekil 17'de verilmiştir. Haritada gösterilen devasa eski deniz tabanı hidrotermal birikintileri olasılık dahilindedir. Eğer bu doğrulanırsa, 3,7 milyar yıl önce var olan derin, uzun ömürlü bir deniz ve derin deniz hidrotermal ortamının kanıtı olacaktır. NASA'nın 2001 Mars Odyssey uzay aracı ve Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) Mars Express uzay aracından yapılan gözlemler, ekvator bölgesinde Mars regolitinin şu anki su içeriğinin ağırlıkça %2-15 oranında olduğunu ortaya koymuştur. Bu yeni keşif, sıvı suyun Mars üzerinde uzun ve önemli bir etkiye sahip olduğunu düşündürmektedir [52].

İlginç bir şekilde, Mars'ın her tarafına yayılmış çok sayıda evaporit (klorür tuzları) tespit edilmiştir. Bu evaporitler, Noachian dönemi arazilerinde, özellikle güney yüksek düzlüklerinde kil içeren malzemeyi örten fillosilikatların birikmesinden sonra oluşmuştur. Bu evaporitler, alkali ortamdan asidik ortamlara kadar değişen kimyasal ortamlarda yerinde oluşmuş olabilir. Oluşumları, tuzlu sudan nehir vadilerine kadar çeşitli jeolojik ortamlarda gerçekleşebilir ve buharlaşmaya bağlı olarak buz/kar erimesi, yağış ve/veya yeraltı suyu yükselişi nedeniyle oluşan sınırlı miktarda sıvı suyu gerektirmektedir. Klorürler, Mars'taki stratigrafik sütunda genellikle en üstteki mineralleri oluşturmakta ve nadiren aşınma ve bozunma izlerini göstermektedir. Böylesi klorür bakımından zengin üst tabakanın, Mars'taki biyoimzaların korunmasına yardımcı olması mümkün olabilir [53].



Şekil 17. Mars'ta Bulunan Eridania Havzası [52]

4. SONUÇLAR

Ay ve Mars, uzay madenciliği için önemli potansiyele sahip gök cisimleridir. Ay'da su buzu, helyum-3, nadir toprak elementleri ve metaller gibi değerli kaynaklar bulunurken, Mars'ta su buzu, demir, magnezyum, alüminyum ve diğer metaller mevcuttur. Bu kaynaklar, gelecekteki uzay araştırmaları ve potansiyel Mars yerleşimleri için önemli kaynaklar sağlayabilir.

Ay ve Mars'ın jeolojik yapısı, madencilik faaliyetlerini etkileyebilir. Ay'ın jeolojisi karmaşık ve çeşitlidir, çarpma kraterleri, volkanizma ve tektonik süreçler Ay'ın yüzeyini şekillendirmiştir. Mars ise Dünya'ya en çok benzeyen gezegenlerden biri olarak kabul edilmekte ve jeolojik geçmişi madenlerin bulunma potansiyelini göstermektedir.

Uzay madenciliği, Ay ve Mars gibi gök cisimlerinden kaynak çıkarma, işleme ve ticari ürünlere dönüştürme süreçlerini içermektedir. Bu süreçler, uzayda, Dünya'da ve hatta daha uzak noktalarda kaynakların dağıtımını sağlamaktadır. Ay ve Mars'taki madencilik potansiyeli, gelecekteki uzay keşifleri ve insanlı uzay seyahatleri için önemli bir rol oynayabilir.

Ay ve Mars'ta madencilik yapmanın zorlukları arasında teknolojik engeller, uzay ortamının zorlu koşulları ve kaynakların çıkarılması ve işlenmesi için gereken yüksek maliyetler bulunmaktadır. Ancak, bu zorluklar, gelecekteki teknolojik gelişmeler ve uzay endüstrisinin ilerlemesiyle aşılabilecek potansiyele sahiptir.

Sonuç olarak, Ay ve Mars gibi gök cisimlerindeki madencilik potansiyeli, uzay keşifleri ve insanlı uzay seyahatleri için önemli bir kaynak olabilir. Gelecekteki çalışmalar ve yatırımlar, Ay ve Mars'taki kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayarak uzay madenciliğinin gelişimine katkıda bulunabilir.

TEŞEKKÜR

Makale incelemesindeki değerli yorum ve yönlendirmelerinden dolayı tüm hakem hocalarımıza teşekkürü borç biliriz.

YAZAR KATKILARI

Bu araştırma, yazarlarımızdan, Yazar 2 tarafından hazırlanan Lisans Bitirme Tezinin verilerinin bir kısmının kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar makale hazırlanmasındaki tüm aşamalarda ortak katkı sağlamışlardır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK

Bu makalenin yayınlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] K. Krohn, R. Jaumann, K. Otto, T. Hoogenboom, R. Wagner, D.L. Buczkowski, B. Garry, D.A. Williams, R.A. Yingst, J. Scully, M.C. De Sanctis, T. Kneissl, N. Schmedemann, E. Kersten, K. Stephan, K.D. Matz, C.M. Pieters, F. Preusker, T. Roatsch, P. Schenk, C.T. Russell and C.A. Raymond, "Mass Movement on Vesta at Steep Scarps and Crater Rims", *Icarus*, vol.244, pp. 120-132, Dec.2014, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.013>.
- [2] H. Hiesinger and J.W. Head, "New Views of Lunar Geoscience: An Introduction and Overview", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol.60, no.1, pp. 1-81, Jan.2006, <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.60.1>.
- [3] E.J. Speyerer, M.S. Robinson, B.W. Denevi, and LROC Science Team, "Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Global Morphological Map of the Moon", 42nd Annual Lunar and Planetary Science Conference, 2011, no.1608.
- [4] H.J. Melosh, "Impact Cratering. A Geologic Process", *Oxford Monographs on Geology and Geophysics Series no.11*. ix+245, Oxford: Clarendon Press, 1989.
- [5] E. Hauber and R. Wagner, "Planetary Geology: Craters and Chronology, Volcanism, Tectonics", *Solar System, Springer Materials*, 2009, Doi: 10.1007/978-3-540-88055-4_20.
- [6] D.E. Wilhelms, J.F. McCauley and N.J. Trask, "The Geologic History of the Moon", *USGS Publications*, s.1348, pp. 302, 1987.
- [7] J.W. Head and L. Wilson, "Lunar Mare Volcanism: Stratigraphy, Eruption Conditions and the Evolution of Secondary Crusts", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.56-6, pp.2155-2175, Jun 1992, [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90183](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90183).
- [8] M.A. Wieczorek, M.T.Zuber and R.J. Phillips, "The Role of Magma Buoyancy on the Eruption of Lunar Basalts", *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier, v.185-1-2, pp. 71-83, Feb. 2001, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00355-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00355-1).
- [9] J.Haruyama, T.Matsunaga, M.Ohtake, T.Morata, C.Honda, Y.Yokota, M.Torii, Y.Ogawa and the LISM Working Group, "Global Lunar-Surface Mapping Experiment Using the Lunar Imager/Spectrometer on SELENE", *Earth Planets Space*, v.60, pp.243-255, 2008, <https://doi.org/10.1186/BF03352788>.
- [10] M.S.Robinson, E.J.Speyerer, A.Boyd, D.Waller, R.V. Wagner and K.N Burns, "Exploring the Moon with the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera", *ISPRS*, pp. 501-504, Aug 2012.
- [11] S.C. Solomon and J.W. Head, "Vertical Movement in Mare Basins: Relation to Mare Emplacement, Basin Tectonics and Lunar Thermal History", *JGR Solid Earth*, v.84-B4, pp. 1667-1682, Apr 1979, <https://doi.org/10.1029/JB084iB04p01667>.
- [12] T. Spohn, W. Konrad, D. Breuer and R. Ziethe, "The Longevity of Lunar Volcanism: Implications of Thermal Evolution Calculations with 2D and 3D Mantle Convection Models", v.149-1, pp. 54-65, Jan 2001, <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6514>.
- [13] N.L Chabot and M.J. Drake, "Crystallisation of Magmatic Iron Meteorites: The Effects of Phosphorus and Liquid Immiscibility", *Meteoritics&Planetary Science*, vol 35-4, pp. 807-816, Jul. 2000, <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01464.x>.
- [14] Aksoy, Ü., "Dünya, Mars ve Ay'da Yerel Kaynaklar ile Üretilen Betonlardan Yapılmış Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemi Tasarlanması ve Karşılaştırılmaları", *Doktora Tezi*, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2022.
- [15] J. Oberst and Y. Nakamura, "A Seismic Risk for the Lunar Base", *Second Conference Lunar Bases Sp Act 21st Century*, v.231-3, 1992.
- [16] D. Stöffler and G. Ryder, "Stratigraphy and Isotope Ages of Lunar Geologic Units: Chronological Standard for the Inner Solar System", *Springer Space Sciences Series of ISSI*, v.12, pp. 9-54, 2001.
- [17] G. Neukum, B.A. Ivanov and W.K. Hartmann, "Cratering Records in the Solar System in Relation to the Lunar Reference System", *Springer Space Sciences Series of ISSI*, v.12, pp. 55-86, 2001.
- [18] M.D. Norman, "The Lunar Cataclysm: Reality or "Mythconception"?", *Elements*, v.5-1, pp. 23-28, 2009, <https://doi.org/10.2113/gselements.5.1.23>.
- [19] "Ay Stratigrafisi", https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_geologic_timescale. [Erişim Tarihi: 01.10.2024].
- [20] D.A. Peacock, "Mining on the Moon; Yes, It's Going to Happen", *Mining Engineering Magazine*, pp. 23-31, Jan, 2017.
- [21] A. Sammariva, L. Gori, B. Chizzolini and M. Pianorsi, "The Economics of Moon Mining", *Acta Astronautica*, v.170, pp. 712-718, May 2020, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.042>.
- [22] "Ay Araştırmacı", <https://science.nasa.gov/mission/lunar-prospecter>. [Erişim Tarihi: 01.10.2024].
- [23] E.N. Cameron, "Helium Mining on the Moon: Site Selection and Evaluation", *2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities*, pp. 189-197, 1992.
- [24] G. Heiken, D. Vaniman and B.M. French, "Lunar Sourcebook", *Cambridge University Press*, 1991.

- [25] I.A. Crawford, M. Anand, S. Barber, A. Cowley, S. Crites, W. Fa, J. Flahaut, L.R. Gaddis, B. Greenhagen, J. Haruyama, D. Hurley, C.L. McLeod, A. Morse, C.R. Neal, H. Sargeant, E.S. Nash, R. Tartese, "Lunar Resources", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v.89-1, pp. 829-868, Dec. 2023, <https://doi.org/10.2138/rmg.2023.89.19>.
- [26] A.J. Waajen, R. Prescott and C.S. Cockell, "Meteorites: Beneficial or Toxic for Life on Early Earth? Growth of an Anaerobic Microbial Community on a Carbonaceous Chondrite", *Microbiology Society*, v.4-5, May 2022, <https://doi.org/10.1099/acmi.ac2021.po0128>.
- [27] M.H. Carr, "Formation of Martian Flood Features by Release of Water from Confined Aquifers", *JGR Solid Earth*, v.84-B6, pp.2995-3007, June, 1979, <https://doi.org/10.1029/JB084iB06p02995>.
- [28] R.B. Leighton, N.H. Horowitz, B.C. Murray, R.P. Sharp, A.H. Herriman, A.T. Young, B.A. Smith, M.E. Davies and C.B. Leovy, "Mariner 6 and 7 Television Pictures: Preliminary Analysis", *Science*, v.166-3901, pp. 49-67, Oct. 1969, DOI: 10.1126/science.166.3901.49.
- [29] A. Lagain, G.K. Benedix, K. Servis, D. Baratoux, L.S. Doucet, A. Rajsic, H.A.R. Devillepoix, P.A. Bland, M.C. Towner, E.K. Sansom, K. Miljkovic, "The Tharsis Mantle Source of Depleted Shergottites Revealed by 90 Million Impact Craters", *Nature Communications*, v.12-6352, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26648-3>.
- [30] N. G. Barlow, J.M. Boyce, F.M. Costard, R.A. Craddock, J.B. Garvin, S.E.H. Sakimoto, R.O. Kuzmin, D.J. Roddy, L.A. Soderblom, "Standardizing the Nomenclature of Martian Impact Crater Ejecta Morphologies", v.105-E11, pp. 26733-26738, Nov. 2000, <https://doi.org/10.1029/2000JE001258>.
- [31] F.M. Costard, "The Spatial Distribution of Volatiles in the Martian Hydrolithosphere", *Earth, Moon and Planets*, v.45, pp.265-290, 1989.
- [32] P. Broz, O. Kyyza, L. Wilson, S.J. Conway, E. Hauber, A. Mazzini, J. Raack, M.R. Balme, M.E. Sylvest and M.R. Patel, "Experimental Evidence for Lava-Like Mud Flows Under Martian Surface Conditions", v.13 pp. 403-407, June, 2020.
- [33] A.S. McEwen, M.C. Malin, M.H. Carr and W.K. Hartmann, "Voluminous Volcanism on Early Mars Revealed in Valles Marineris", *Nature*, v. 397, pp. 584-586, Feb. 1999.
- [34] G.J. Leonard and K.L. Tanaka, "Geologic Map of the Hellas Region of Mars", *Mars Geologic Map of the Hellas Region-2*, USGS, PP. 1-10, 2001.
- [35] S.C. Mest and D.A. Crown, "Geology of the Reull Vallis Region, Mars", *Icarus*, vol.153, pp. 89-110, Sep.2001, <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6655>.
- [36] S.C. Werner, B.A. Ivanov and G. Neukum, "Theoretical Analysis of Secondary Cratering on Mars and an Image-Based Study on the Cerberus Plains", *Icarus*, vol.200, pp.406-417, Apr. 2009, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.10.011>.
- [37] D.A. Crown and R. Greeley, "Geologic Map of the MTM-30262 and -30267 Quadrangles, Hadriaca Patera Region of Mars", USGS, Jan. 2007, Doi: 10.3133/sim2936.
- [38] S.J. Robbins and B.M. Hynek, "Secondary Crater Fields from 24 Large Primary Craters on Mars: Insights into Nearby Secondary Crater Production", *Journal of Geophysical Research Planets*, v.116-E10, Oct. 2011, <https://doi.org/10.1029/2011JE003820>.
- [39] J. Vaucher, D. Baratoux, M.J. Toplis, P. Pinet, N. Mangold and K. Kurita, "The Morphologies of Volcanic Landforms at Central Elysium Planitia: Evidence for Recent and Fluid Lavas on Mars", *Icarus*, vol.200-1, pp.39-51, Marh 2009, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.11.005>.
- [40] P.J. Mougini-Mark and M.S. Robinson, "Evolution of the Olympus Mons Caldera, Mars", *Bulletin of Volcanology*, v.54, pp. 347-360, July 1992.
- [41] S.S.C. Wu, P.A. Garcia, R. Jordan, F.J. Schafer and B.A. Skiff, "Topography of the Shield Volcano, Olympus Mons on Mars", *Nature*, v.309, pp. 432-435, May 1984.
- [42] C.A. Hodges and H.J. Moore, "The Subglacial Birth of Olympus Mons and Its Aureoles", *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, v. 84-B14, PP. 8061-8074, Dec. 1979, <https://doi.org/10.1029/JB084iB14p08061>.
- [43] K.J. Mohr, D.A. Williams, W.B. Garry and J.E. Bleacher, "Preliminary Volcanic Feature Analysis of Olympus Mons and Ascraeus Mons, Mars", *ADS*, June 2018.
- [44] C.O. Lee, B.M. Jakosky, J.G. Luhmann, D.A. Brain, M.L. Mays, D.M. Hassler, M. Holmström, D.E. Larson, D.L. Mitchell, C. Mazelle, J.S. Halekas, "Observations and Impacts of the 10 September 2017 Solar Events at Mars: An Overview and Synthesis of the Initial Results", *Geophysical Research Letters*, v.45-17, pp. 8871-8885, Sep. 2018, <https://doi.org/10.1029/2018GL079162>.
- [45] E.S. Kite, "Geologic Constraints on Early Mars Climate", *Space Science Reviews*, v.215-10, pp. 24-47, Jan. 2019.
- [46] R.D. Wordsworth, "The Climate of Early Mars", *Annual Reviews*, v.44, pp. 381-408, June 2016, <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012355>.
- [47] M.P. Golombek, "Mars Tectonics", *Planetary Tectonics*, Cambridge University Press, pp. 183-232, 2010.

- [48] D.U. Wise, M.P. Golombek, G.E. McGill, "Tharsis Province of Mars: Geologic Sequence, Geometry and a Deformation Mechanism", *Icarus*, vol.38-3, pp.456-472, June 1979, [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(79\)90200-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(79)90200-8).
- [49] S.M. Wisemann, R.E. Arvidson, J.C. Andrews-Hanna, R.N. Clark, N.L. Lanza, D.D. Marais, G.A. Marzo, R.V. Morris, S.L. Murchie, H.E. Newsom, E.Z. Noe Dobrea, A.M. Ollila, F. Poulet, T.L. Roush, F.P. Seelos, G.A. Swayze, "Phyllosilicate and Sulfate-Hematite Deposits within Miyamoto Crater in Southern Sinus Meridiani, Mars", *Geophysical Research Letters*, v.35-19, Oct. 2008, <https://doi.org/10.1029/2008GL035363>.
- [50] J.E.P. Connerney, M.H. Acuna, N.F. Ness, G. Kletetschka, D.L. Mitchell, R.P. Lin and H. Reme, "Tectonic Implications of Mars Crustal Magnetism", *Earth, Atmospheric and Planetary Sciences*, v.102-42, pp. 14970-14975, Oct. 2005, <https://doi.org/10.1073/pnas.0507469102>.
- [51] "Mars Stratigtafisi", https://en.wikipedia.org/wiki/Amazonian_Mars. [Erişim Tarihi: 01.10.2024].
- [52] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Mars>. [Erişim Tarihi: 01.10.2024].
- [53] T. Fornaro, A. Boosman, J.R. Brucato, I.L. Kate, S. Siljeström, G. Poggiali, A. Steele, R.M. Hazen, "UV Irradiation of Biomarkers Adsorbed on Minerals Under Martian-Like Conditions: Hints for Life Detection on Mars", *Icarus*, vol.313 pp.38-60, Oct. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.05.001>.



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Araştırma Makalesi/Research Article

Genleştirilmiş perlit katkılı EPDM kompozitlerin reolojik, termal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Ali ÖTELEŞ^{1,*}, İlker KÖPRÜ², Salih Hakan YETGİN³

¹ Seçil Kauçuk San. ve Tic. Ltd. Şti. Tarsus, Mersin, Türkiye

² Seçil Kauçuk San. ve Tic. Ltd. Şti. Tarsus, Mersin, Türkiye

³ Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Mersin, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

27.09.2024

Kabul tarihi

01.11.2024

Yayın tarihi

31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

EPDM

Genleştirilmiş perlit

Alev direnci

Reoloji

Mekanik özellikler

ÖZET

Bu çalışmada, genleştirilmiş perlit (GP) ilavesinin etilen-propilen-dien-kauçuk (EPDM) kompozitlerin reolojik, mekanik ve yanıcılık özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 11.5, 24.5 ve 55 phr oranında inorganik dolgu içeren EPDM kompozitler üretilmiştir. Laboratuvar tipi banbury kullanılarak hamur haline getirilen EPDM kompozitler preste vulkanize edilmiş ve test plakaları üretilmiştir. EPDM/GP kompozitlerin reolojik özellikleri, pres öncesi reometre (MDR) testi kullanılarak araştırılmıştır. Genleştirilmiş perlit eklenmiş EPDM kompozitlerin alev geciktirici özellikleri UL-94-HB testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, genleştirilmiş perlitin artmasıyla minimum (ML) ve maksimum tork (MH) değerleri artmıştır. 55phr genleştirilmiş perlitin eklenmesiyle EPDM'nin sertlik değeri 58'den 67 Shore A'ya çıkmıştır. Çekme dayanımı ve kopma uzaması azalırken, kalıcı deformasyon ve aşınma artmıştır. EPDM kauçuğa eklenen farklı miktarlarda genleştirilmiş perlit yanma hızını azaltırken, en düşük yanma hızı EPDM//55GP kompozitinde elde edilmiştir. Analizler sonucunda, genleştirilmiş perlit dolgu maddesinin EPDM kauçuğun mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ancak alev direncini artırdığı gözlenmiştir.

Investigation of rheological, thermal and mechanical properties of expanded perlite filled EPDM composites

ARTICLE INFO

Article history:

Received

27.09.2024

Accepted

01.11.2024

Published

31.12.2024

Keywords:

EPDM

Expanded perlite

Flame retardant

Rheology

Mechanical properties

ABSTRACT

In this study, the effect of expanded perlite filler on the rheological, mechanical and flame retardant properties of Ethylene Propylene Diene Rubber (EPDM) composites was examined. EPDM composites containing from 11.5, 24.5 and 55 phr of the inorganic filler were produced. EPDM rubbers were turned into pulp using laboratory type Banbury. Test plates were produced after the press and vulcanization process. The rheological characteristics of EPDM/GP composites were investigated using the pre-press rheometer (MDR) test. The flame-retardant qualities of expanded perlite filled EPDM composites were assessed using the UL-94-HB test. As a result of the study, minimum (ML) and maximum torque (MH) values increased with the increase in expanded perlite. With the addition of expanded perlite at 55phr, the hardness value of EPDM improved from 58 to 67 Shore A. Tensile strength and elongation at break decreased, while permanent deformation and abrasive wear increased. While different amounts of expanded perlite added to EPDM rubber reduced the burning rate, the lowest burning rate was obtained in EPDM//55GP composites. As a result of the analysis, it was observed that the expanded perlite filler did not have a significant effect on the mechanical properties but increased the flame resistance of EPDM rubber.

ORCID ID: Yazar1: 0009-0002-2140-0292; Yazar2: 0000-0002-0038-0635; Yazar3: 0000-0002-6068-9204

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Seçil Kauçuk San. ve Tic. Ltd. Şti. Tarsus, Mersin, Türkiye

E-mail: alio@seciltr.com

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: Öteleş A, Köprü İ, Yetgin S.H., "Genleştirilmiş perlit katkılı EPDM kompozitlerin reolojik, termal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 60-67, 2024, doi: 10.70700/bjea.1557252.

1. GİRİŞ

Malzeme türü ve çapraz bağ yoğunluğuna bağlı olarak özellikleri ayarlanabilen kauçuk esaslı malzemeler, elastikiyet, hafiflik, iyi tokluk ve termal direnç gibi özellikleri nedeniyle uçak, denizcilik ve inşaat endüstrileri gibi birçok sektörde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Kauçuk ürünlerin performansının artırılması için farklı özelliklere sahip dolgu malzemelerinin bileşime dahil edilmesi yıllar boyunca araştırılmıştır. Kauçuk esaslı ürünlerin işlenmesi veya üretilmesi tek başına maliyetli ve zorlu olabilmektedir. Özellikle maliyet tasarrufu ve kauçuk esaslı ürünlerin özelliklerinin iyileştirilmesi için en yaygın yöntemlerden birisi çeşitli dolgu malzemelerinin kauçuk ürünlere ilave edilmesidir. Farklı tür ve özelliklere sahip dolgu malzemesinin seçimi ve optimize edilmesi araştırmacıların her zaman ilgi odağında olmuştur [1-3]. Kauçuk sektöründe karbon siyahı, kauçuğun mekanik özelliklerini, aşınma direncini, yaşlanma direncini ve iletkenlik özelliklerini geliştirmekle birlikte kauçuğun maliyetini ve ağırlığını azalttığı için en çok tercih edilen dolgu malzemesidir. Karbon siyahına alternatif olarak silika, kaolin, kalsiyum karbonat gibi inorganik mineral dolgu malzemeleri de kauçuk malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için tercih edilmektedir. Karbon ayak izine katkıda bulunan ağır hidrokarbonların kısmen yakılmasından dolayı karbon siyahı kullanımı yerine silika bileşikleri yeşil kauçuk ürünler elde etmek için tercih edilmektedir. Ancak, silikanın da üretiminin yüksek maliyetli olması ve tehlikeli atık su içermesi dezavantajları arasında yer almaktadır [3]. Sonuç olarak, kauçuk endüstrisi için alternatif ve sürdürülebilir dolgu maddeleri bulma konusunda devam eden bir ilgi ve araştırma söz konusudur.

Perlit minerali, kauçuk kompozitlerin üretiminde umut vadeden bir dolgu maddesi olma potansiyeline sahiptir. Perlit, volkanik patlamaların soğumasıyla oluşan, renkleri griden siyaha kadar değişen magmatik bir kayadır [4-7]. Perlit minerali, yapısında SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O ve H_2O bileşimlerinin yanında kökenine bağlı olarak az miktarda TiO_2 , CaO , MgO ve Fe_2O_3 bileşimlerini de içermektedir [5, 7]. Perlit, 800 ile 1100 °C [6] arasındaki sıcaklıklarda termal işleme tabi tutulduğunda, su molekülleri buharlaşmaktadır. Sonuç olarak, oluşan buhar perlit parçacıklarını genişleterek hacmini orijinal boyutunun yaklaşık 20 katına kadar artırmaktadır. Genleştirilmiş perlit partikülleri kimyasal olarak inerttir, düşük ısı iletkenliğine sahiptir ve çeşitli boyutlarda gözeneklere sahip küresel bir cam duvara sahiptir [8]. Geniş özgül yüzey alanı ve düşük yoğunluğu nedeniyle genleştirilmiş perlit, çoğunlukla yalıtım malzemesi olarak, alçıpan veya hafif beton gibi inşaatta kullanılan elemanların üretiminde katkı maddesi olarak, tarım ve bahçecilikte toprak iyileştirici olarak ve düşük yoğunluklu polimer kompozitler için alev geciktirici ve dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır [9-12].

EPDM kauçuğu ve hava şartlarına karşı dirençli, yağlara ve hidrokarbon esaslı solventlere dayanıklı, yüksek dolgu ve yağ alabilme özelliği ile statik ve dinamik şartlarda özelliklerini koruması nedeniyle otomotiv sektörü başta olmak üzere yapı sektörü, beyaz eşya sektörü ve enerji sektörlerinde geniş kullanım alanına sahiptir. EPDM kauçuğu yüksek sıcaklıklarda dayanım özelliklerini muhafaza etmesi nedeniyle sızdırmazlık istenilen yerlerde de kullanım alanına sahiptir. Ancak EPDM kauçuğunu bu avantajlarının yanında en önemli dezavantajı son derece yanıcı bir kauçuk olmasıdır [13-14]. Literatürde perlit ve genleştirilmiş perlit katkılı polimer ve kauçukların yanmazlık direncini artırmak için çalışmalar bulunmaktadır. Çavdaroglu ve arkadaşları [3] genleştirilmiş perlitin (e-perlit) EPDM kauçuk kompozitler için sürdürülebilir ve uygun maliyetli bir dolgu maddesi olarak kullanımını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, e-perlitin yaşlanma direncini ve termal kararlılığı önemli ölçüde iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Pinto ve arkadaşları [15], havacılık yalıtım malzemelerinde termal bariyer olarak perlit ilaveli polibütadien kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Edres ve arkadaşları [16] genleştirilmiş perlit (EP) ve endüstriyel polimer bütadien kauçuğu (BR) kullanılarak ürettikleri kompozitlerin yapı ve morfoloji özelliklerini incelemişlerdir. Atagür ve arkadaşları [17] perlit dolgulu yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kompozitlerin viskoelastik, eğilme ve kristalografik özellikleri ile termal kararlılığı ve termal iletkenliği özelliklerini incelemişlerdir. Oliveira ve arkadaşları [10] polistren (PS)/Perlit bazlı kompozitleri, çift vidalı bir ekstrüderde eriyik karıştırma yoluyla %10 ve %20 ağırlık oranında perlit ilave ederek hazırlamışlardır. Kompozitlerin morfolojik, termal, mekanik ve reolojik özelliklerine perlit ilavesinin etkisi değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ise EPDM kauçuğunun yanma direncini artırmak için farklı oranlarda (11.5, 24.5 ve 55 phr) genleştirilmiş perlit ilave edilmiş EPDM kompozitlerin reolojik, mekanik ve yanmazlık özelliklerine genleştirilmiş perlitin etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla EPDM/genleştirilmiş perlit kompozitlere reoloji ve viskozite testleri yanında çekme testi, kalıcı deformasyon testi, aşınma testi ve elektrik direnci testleri yapılmıştır. EPDM/genleştirilmiş perlit kompozitlerin yanma hızı oranı ise UL-94 yatay yanma testi ile belirlenmiştir.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Kullanılan malzemeler

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak ticari bir EPDM kauçuğu, vulkanizasyon işlemi için ise yine ticari olarak piyasada kullanılan kükürt kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak ise Genper Genleştirilmiş Perlit San. Tic. Ltd. Şti. (Kütahya, Türkiye) firmasından Perfil P2 (PA150-9) kodlu 90-110 kg/m³ yoğunluğa sahip beyaz renkli genleştirilmiş perlit kullanılmıştır. Üretici firma verilerine

göre geliştirilmiş perlite ait kimyasal bileşim Tablo 1’de verilmiştir. EPDM ve EPDM/GP kompozitlerin üretiminde kullanılan oranlar ise phr cinsinden Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Üretici firma verilerine göre geliştirilmiş perlit kimyasal bileşimi

Bileşen	Oran,%
SiO ₂	71-74
Al ₂ O ₃	12-14
Na ₂ O	3-4
MgO	0.1-0.2
CaO	0.8-1
TiO ₂	0.09-0.12
K ₂ O	5-6
Fe ₂ O ₃	0.5-1

Tablo 2. EPDM/GP kompozitlerin formülasyonu

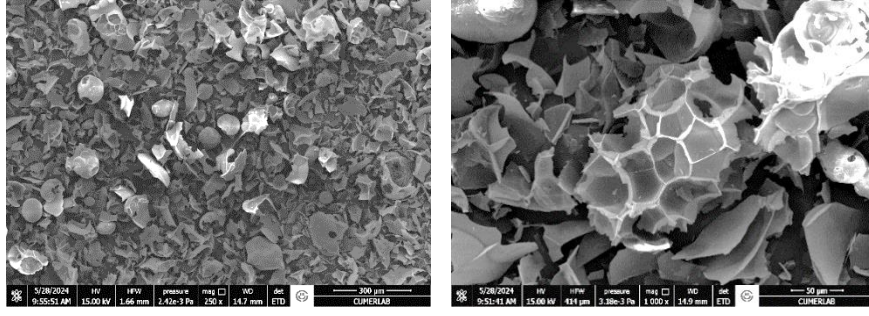
	EPDM	11.5GP	24.5GP	55GP
EPDM	100	100	100	100
Karbon siyahı	50	50	50	50
Beyaz dolgu	20	20	20	20
Yağ	40	40	40	40
Çinko oksit	4	4	4	4
Stearik asit	2	2	2	2
Sülfür	1	1	1	1
MBT	0.5	0.5	0.5	0.5
TMTD	1	1	1	1
Genleştirilmiş Perlit (GP)	0	11.5	24.5	55

2.2. Üretim aşamaları ve karakterizasyon

Genleştirilmiş perlit ilaveli EDPM kompozitleri 1.5 lt’lik laboratuvar tipi mini banbury ile hamur haline getirilmiştir. Üretilen numunelerin rheometre testleri, Seçil Kauçuk A.Ş. firmasında bulunan Alpha MDR 2000 marka rheometre cihazında ASTM D 5289 standardına uygun olarak yapılmıştır. Test 200 °C ve 5 dakikada yapılmıştır. Hamur ürünlerden preste 180 °C ve 20 dakika boyunca vulkanize edilerek test plakaları elde edilmiştir. Çekme testleri, ASTM D638 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Testler, Zwick marka Z020 model bir çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerinde en az 5 test yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Çekme testleri 200 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Kalıcı deformasyon testleri 100 °C’de 22 saat ve %25 oranında sıkıştırma ile DIN 53517 standardına göre yapılmıştır. Sertlik testleri DIN 53505 standardına uygun olarak yapılmış sertlikler Shore A cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde her bir test numunesi üzerinden 10’ar adet sertlik ölçümü yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Yatay yanmazlık testleri, UL94 standardına göre Fire Testing Technology-FTT-01 test cihazında gerçekleştirilmiştir. İletkenlik testi, TS EN 60335-1 (DIN ISO 4649:2014-03) standardına uygun olarak 2000 mV ve 60 s’de yapılmıştır. Genleştirilmiş perlitin morfolojisi JEOL JSM 6060 (Tekser Endüstriyel Ekipmanlar A.Ş., Türkiye) taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Şekil 1’de çeşitli büyütme oranlarında (x250 ve x1000) geliştirilmiş perlitin yapısını gösteren SEM resimleri verilmiştir. Görüldüğü gibi geliştirilmiş perlitin düzensiz kenar yapısı ile 3 boyutlu yapılar sergileyen pul şeklinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, geliştirilmiş perlit parçacıklarının yüzeylerinde açık gözeneklerinde olduğu gözlenmiştir. Bu gözlemler, Çavdaroglu [3] ile Szadkowski [11] ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda SEM görüntüleri ile uyumaktadır.

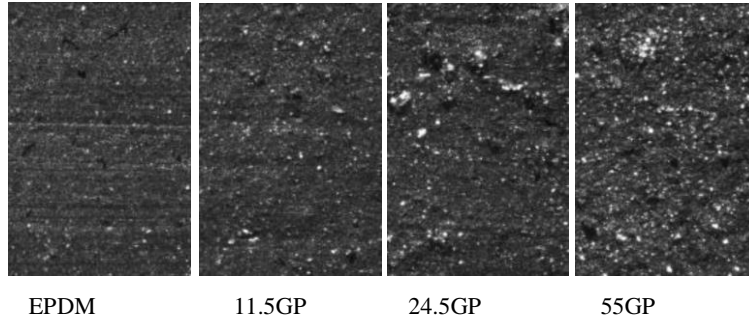


Şekil 1. Çalışmada kullanılan genişletilmiş perlitin SEM resimleri

Şekil 2 ve Tablo 3'te ise EPDM kauçuğu ile farklı oranlarda GP ilaveli EPDM kompozitlerin dispersiyon testi sonucu elde edilen dispersiyon görüntüleri ve sonuçları verilmiştir. Tablo 3'te gösterildiği gibi EPDM ve EPDM/GP kompozitlerin yapısında bulunan dolgu malzemelerinin %85-89 oranlarında yapıda dağıldığı belirlenmiştir. Dağılan dolgu malzemelerinin ortalama boyutunun 3.34 ile 3.93 μm arasında, beyaz alanın ise %10-14 arasında olduğu belirlenmiştir. Beyaz alan, dağılım oranı ve ortalama dolgu boyutu değerlendirildiğinde en iyi sonuç 11.5GP ilaveli EPDM kompozitinde elde edilmiştir.

Tablo 3. Dispersiyon test sonuçları

	X	Y	Z	Beyaz alan, %	Dağılım oranı, %	Ortalama dolgu boyutu, [μm]
EPDM	1.09	9.61	68.29	11.10	88.90	3.34
11.5GP	1.12	9.01	69.03	10.84	89.16	3.53
24.5GP	1.10	8.36	66.98	11.56	88.44	3.75
55GP	1.00	7.00	57.97	14.71	85.29	3.93



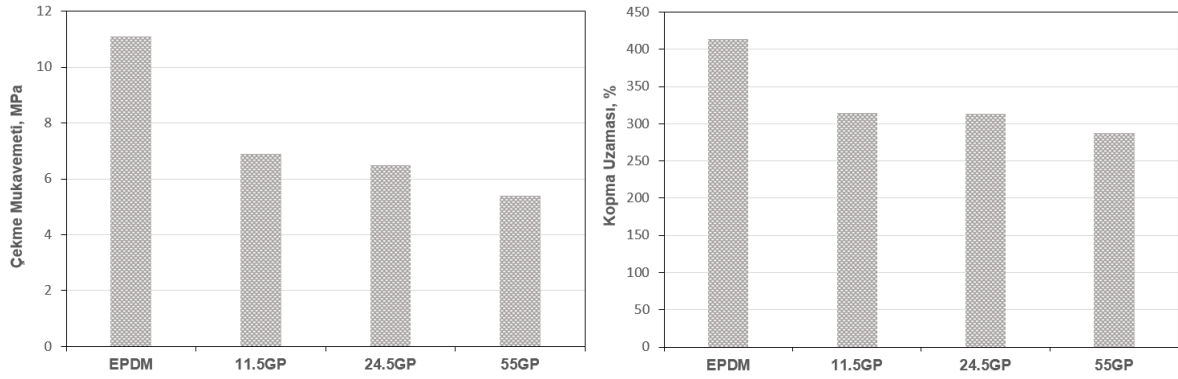
Şekil 2. Dispersiyon görüntüleri

EPDM kauçuğuna ilave edilen GP'nin minimum tork (ML), maksimum tork (MH), tork artış oranı (MH-ML), hamur pişme zamanı (scorch time, t_{s2}) ve hamurun maksimum pişmeye ulaştığı zamanı (t_{90}) gösteren reoloji sonuçları ile yoğunluk ve sertlik sonuçlarına etkisi Tablo 4'te verilmiştir. EPDM kauçuğuna ilave edilen GP miktarına bağlı olarak EPDM kompozitlerin reolojik özelliklerinin etkilendiği gözlenmiştir. Farklı oranlarda ilave edilen GP, ML değerini artırmıştır. Dolgu formunda deforme olmayan katı fazın eklenmesi MH değerini de önemli oranda artırmıştır. 55GP kompoziti, en yüksek rijitliğe sahip olması nedeniyle ML ve MH değerlerinde en yüksek artışı göstermiştir. GP ilaveli EPDM kompozitler için reometre testleri sırasında tork artış oranı ($\Delta M = MH - ML$, kürlenme işlemi sırasında elde edilen vulkanizasyon seviyesini yansıtır [3]), GP miktarının artması ile artmıştır. En yüksek tork artış oranı 55GP ilaveli EPDM kompozitinde elde edilmiştir. Bu etki genellikle sert dolgu parçacıkları içeren kauçuk bileşiklerinde gözlenmektedir [3]. GP ilaveli EPDM kompozitlerin reometrik tork kazanımındaki artış, vulkanizatların çapraz bağlama yoğunluğunun arttığını gösterebilir [11-12]. Elastomerin içerisine sert bir katı fazın ilave edilmesiyle oluşan hidrodinamik etki de önemli bir etkendir; bu da malzemelerin güçlendirilmesine neden olabilmektedir [11-12]. t_{s2} zamanının 11.5GP değerine kadar arttığı daha sonraki GP ilavelerinde ise azaldığı, t_{90} değerlerinin ise GP ilavesi ile birlikte önemli oranda azaldığı gözlenmiştir. EPDM kauçuğunun 1.08 g/cm^3 olan yoğunluğu GP ilavesi ile 1.18 g/cm^3 elde edilmiştir. EPDM kauçuğun 58 Shore A olan sertlik değeri 11.5GP kompozitinde 60 Shore A, 24.5GP kompozitinde 63 Shore A ve 55GP kompozitinde 67 Shore A elde edilmiştir. Kürlenme oranı endeksi (CRI), kürlenme oranını değerlendirmek için bir ölçüt sağlamaktadır. Daha yüksek CRI değerleri daha hızlı oranları gösterirken, daha düşük CRI değerleri daha yavaş oranları göstermektedir. Tablo 4'te verilen veriler EPDM kompozitlerdeki GP oranının daha yüksek olmasının daha yüksek CRI değerlerine yol açtığını göstermektedir. CRI'da gözlemlenen artış, GP kürlenme sürecini hızlandırabileceğini göstermektedir. Bu hızlanmanın, GP içerisindeki metal oksitler ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bunlar, kauçuk bileşiğindeki çapraz bağlama reaksiyonunu teşvik ederek ve daha hızlı kürlenmeye yol açarak kürlenme ajanları veya katalizörler olarak işlev görebilir [3].

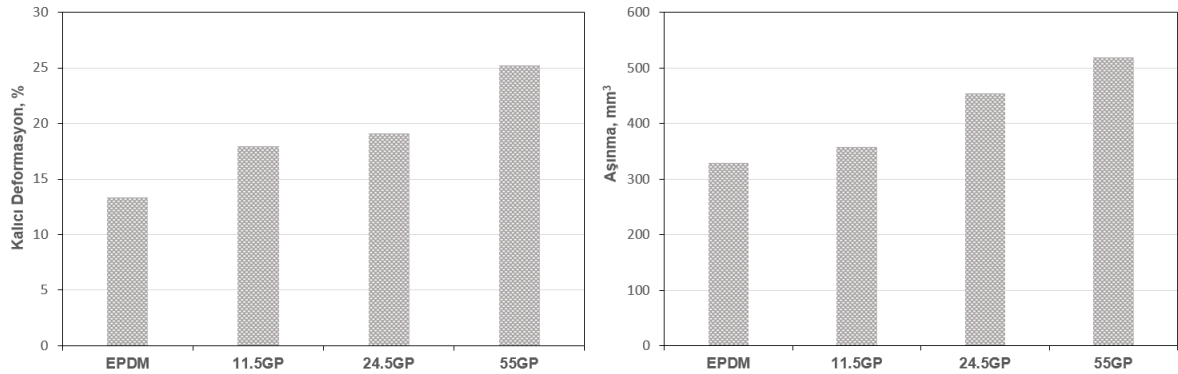
Tablo 4. Reolojik ve fiziksel test sonuçları

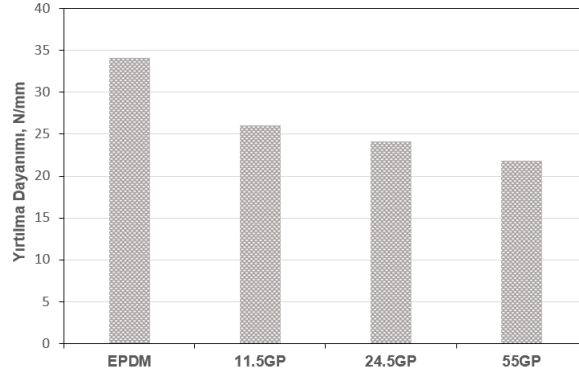
	EPDM	11.5GP	24.5GP	55GP
ML (dNm)	1.0	1.1	1.22	1.38
MH (dNm)	12.27	12.79	13.28	13.68
$\Delta M = MH - ML$	11.27	11.69	12.06	12.3
ts ₂ (min)	0.39	0.41	0.39	0.38
t ₉₀ (min)	1.27	1.25	1.20	1.19
Yoğunluk (g/cm ³)	1.08	1.11	1.13	1.18
Sertlik (Shore A)	58	60	63	67
CRI	113.63	119.04	123.45	123.45
Mooney viskozite (MU)	65.3	67.9	70.5	74.8

Şekil 3 a ve b'de GP ilaveli EPDM kompozitlerin çekme mukavemeti ve kopma uzaması grafikleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi EPDM kauçuğuna ilave edilen GP ve artan GP oranı ile çekme mukavemeti ve kopma uzaması azalmıştır. Literatüre göre [18], bir polimer matrise inorganik dolgu maddesi eklenmesinin kompozit modülünde bir artışa neden olması beklenmektedir. Bunun nedeni, inorganik dolgu maddesinin polimerden önemli ölçüde daha yüksek rijitliğe sahip olmasıdır. Ayrıca, literatür [4, 18], dolgu maddesi ile polimerik matris arasındaki zayıf arayüz bağının, kompozitlerin çekme dayanımının azalmasını neden olduğunu belirtmektedir. EPDM ve EPDM/GP kompozitlerin kopma uzaması sonuçları değerlendirildiğinde, EPDM/GP kompozitlerinde sünektan gevrek davranışa geçiş gözlenmiştir. İlave edilen GP, matriste gerilim yığılmaları oluşturup matrisin erken kırılmasına ve kopma uzamasının azalmasına sebep olmuştur. Maslowski ve arkadaşları [12] ise kopma uzamasındaki azalmayı artan çapraz bağ yoğunluğuna bağlamışlardır. EPDM kauçuğuna ilave edilen yüksek miktardaki GP, kompozit içerisinde daha büyük kümeler halinde toplanmaya yol açmış ve gerilim konsantrasyon bölgeleri malzemenin erken tahrip olmasına neden olmuştur. EPDM kauçuğuna göre 11.5GP, 24.5GP ve 55GP kompozitlerin kopma uzaması değerlerindeki azalma ise sırasıyla %24.15, %24.39 ve %30.67 oranlarında elde edilmiştir.

**Şekil 3.** a) Çekme mukavemeti, b) kopma uzaması sonuçları

Şekil 4 a, b ve c'de ise sırasıyla farklı oranlarda GP ilave edilerek üretilen EPDM kompozitlere ait kalıcı deformasyon, abrasif aşınma ve yırtılma dayanımlarındaki değişimler verilmiştir. Kalıcı deformasyon sonuçları kauçuk ürünlerin sızdırmazlık özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. GP ilavesi ile EPDM kompozitlerin kalıcı deformasyon değerleri dolayısıyla sızdırmazlık özellikleri gelişmiştir. EPDM kauçuğu ile karşılaştırıldığında 55GP kompozitin kalıcı deformasyon oranı %88.7 oranında artmıştır. Daha düşük aşınma kaybı daha iyi aşınma direncini göstermektedir. Aşınma direncini belirlemek için kauçuk bileşiği örneğinin aşınma testinden sonraki yoğunluk değeri ve ağırlık kaybı hesaplanmıştır.

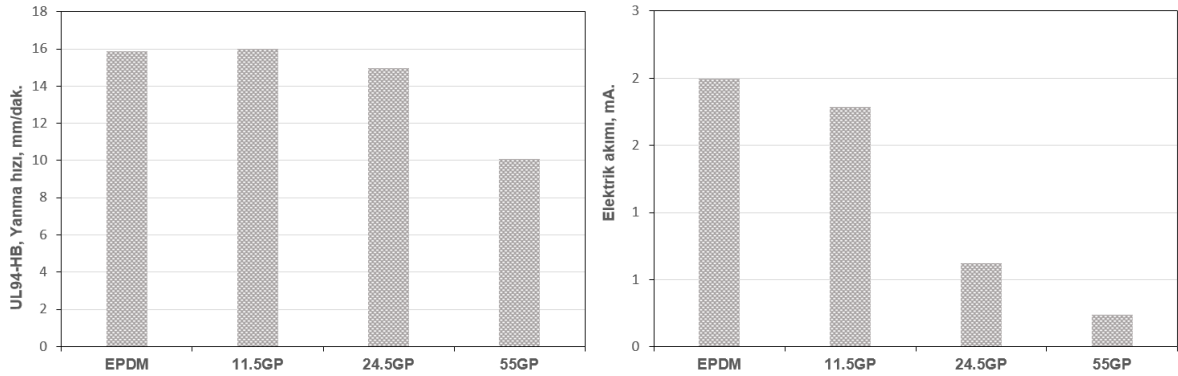




Şekil 4. a) Kalıcı deformasyon, b) abrasif aşınma, c) yırtılma dayanımı sonuçları

Abrasif aşınma deneyi sonuçları değerlendirildiğinde (Şekil 5-b) ise en düşük aşınma miktarı EPDM kauçuğunda elde edilmiştir. EPDM/GP kompozitlerin aşınma değerleri önemli oranda artmış ve daha yüksek hacim kaybına neden olmuştur. Bu artış, 11.5GP, 24.5GP ve 55GP kompozitleri için sırasıyla %8.48, %37.5 ve %57.57 oranlarında elde edilmiştir. Kauçuğun yırtılma dayanımı veya yırtılma direnci, bir test numunesini gerilme yönüne dik bir yönde yırtmak için gereken maksimum kuvvet olarak tanımlanmaktadır. EPDM kauçuğuna ilave edilen GP ve artan GP miktarı ile yırtılma dayanımının azaldığı gözlenmiştir. EPDM kauçuğu ile karşılaştırıldığında 11.5GP, 24.5GP ve 55GP kompozitlerin yırtılma dayanımları %23.7, %29.4 ve %35.9 oranlarında azalmıştır.

Şekil 5 a ve b'de EPDM ve EPDM/GP kompozitlerin elektrik akımı ve UL-94-HB yanma hızı sonuçları verilmiştir. Şekil 5 a'daki elektrik akımı değerleri incelendiğinde EPDM kauçuğunun 1.999 mA olan elektrik akımı değeri GP ilavesi ile 0.024-1.789 mA aralığına kadar azalmıştır. EPDM kauçuğuna ilave edilen 11.5 phr oranındaki GP elektrik iletkenliğini %10.5 oranında, 24.5 phr oranında ilave edilen GP elektrik iletkenliğini %68.7 oranında ve 55 phr oranında ilave edilen GP elektrik iletkenliğini %87.9 oranında azaltmıştır. Şekil 5 b'de ise UL-94-HB yanmazlık testi sonucu elde edilen yanma hızı değerleri verilmiştir. EPDM kauçuğuna ilave edilen farklı oranlarda GP yanma hızını azaltırken en düşük yanma hızı EPDM/55GP kompozitinde elde edilmiştir. EPDM kauçuğu ile karşılaştırıldığında ise EPDM/55GP kompozitin yanmazlık direnci %36.4 oranında artmıştır. GP yapısındaki yüksek silis oranı yamıcılık özelliğini azaltırken gözenekli yapı yanıcı gazları tutmada etkili olmaktadır. Bu durum malzemenin yanma direncini artırmaktadır.



Şekil 5. a) Elektrik akımı, b) UL-94-HB yanma hızı sonuçları

4. SONUÇLAR

EPDM ve EPDM/GP kompozitlerin özelliklerinin incelendiği çalışma sonucunda;

GP miktarına bağlı olarak ML ve MH değerleri artmıştır. EPDM/55GP kompozitin sertlik değeri 67 Shore A elde edilmiştir. EPDM kauçuğu ile karşılaştırıldığında, çekme mukavemeti EPDM/55P kompoziti için %51.9 oranında azalmıştır. EPDM kauçuğunun kopma uzaması değerleri GP ilavesi ile azalmıştır. GP miktarına bağlı olarak kalıcı deformasyon ve abrasif aşınma miktarı artmıştır. EPDM kauçuğunun 1.999 mA olan elektrik akımı değeri GP ilavesi ile 0.024-1.789 mA aralığında elde edilmiştir. EPDM kauçuğuna ilave edilen farklı oranlarda GP yanma hızını azaltırken en düşük yanma hızı EPDM/55GP kompozitinde elde edilmiştir. Analizler sonucunda, GP dolgu maddesinin EPDM kauçuğun mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ancak alev direncini %30.4 oranında artırdığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, perlitin EPDM kompozitler için umut vadeden bir yeşil dolgu maddesi olduğunu göstermektedir. Kauçuk sektöründe perlit dolgu maddesinin kullanımı, savunma, inşaat, yalıtım, paketleme ve otomotiv endüstrilerinde termal kararlılık davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir.

YAZAR KATKILARI

Yazar 1: Literatür taraması/makale fikrinin/makale içeriğinin belirlenmesi

Yazar 2: Makale fikrinin oluşturulması/yöntemin planlanması/makalenin içeriğinin belirlenmesi ve makale yazımı/inceleme

Yazar 3: Makalenin içeriğinin belirlenmesi ve makale yazımı/inceleme

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu makalede çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK

Bu makalenin yayınlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] J. Y. Cheong, J. Ahn, M. Seo, and Y. S. Nam, "Flame-retardant, flexible vermiculite-polymer hybrid film," RSC Advances, vol. 5, pp. 61768–61774, 2015, <https://doi.org/10.1039/C5RA08382F>
- [2] M. S. Cetin, O. Toprakci, O. S. Taskin, A. Aksu, and H. A. K. Toprakci, "Expanded vermiculite-filled flexible polymer composites," Journal of Elastomers & Plastics, vol. 54, no. 1, pp. 145-168, 2022, <https://doi.org/10.1177/00952443211029038>.
- [3] C. Çavdaroglu, U. Olgun, and E. Altuncu, "Use of expanded perlite as green filler for the preparation of EPDM-perlite rubber composites with improved thermal stability and insulation properties," Polymer Composites, pp. 1-19, 2024, <https://doi.org/10.1002/pc.28665>
- [4] M. Raji, S. Nekhlaoui, I. E. E. A. E. Hassani, E. M. Essassi, H. Essabir, D. Rodrigue, R. Bouhfid, and A. E. K. Qaiss, "Utilization of volcanic amorphous aluminosilicate rocks (perlite) as alternative materials in lightweight composites," Composites Part B, vol. 165, pp. 47–54, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.098>
- [5] M. Irani, M. Amjadi, and M. A. Mousavian, "Comparative study of lead sorption onto natural perlite, dolomite and diatomite," Chem. Eng. J. Vol. 178, pp. 317–323, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.011>
- [6] Q. Jing, L. Fang, H. Liu, and P. Liu, "Preparation of surface-vitrified micron spher using perlite from Xinyang," China. Appl. Clay Sci. Vol. 53, no. 4, pp. 745–748, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.07.005>
- [7] S. Kabra, S. Katara, and A. Rani, "Characterization and Study of Turkish Perlite," Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. Vol. 2, no. 9, pp. 4319–4326, 2013.
- [8] O. Aksoy, E. A. Seydibeyoglu, M. Mocan, M. Sutcu, N. Ozveren-Ucar, and M. Seydibeyoglu, "Characterization of Perlite Powders from Izmir, Türkiye Region," Physicochem. Probl. Miner. Process., vol. 58, no. 6, 155277. 2022, DOI: <https://doi.org/10.37190/ppmp/155277>
- [9] O. Sengul, S. Azızı, F. Karaosmanoglu, M. A. Tasdemir, "Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete," Energy Build., vol. 43, no. 2-3, pp. 671–676, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>
- [10] A. G. de Oliveira, J. C. Jandorno Jr, E. B. D. da Rocha, A. M. F. de Sousa, and A. L. N. da Silva, "Evaluation of expanded perlite behavior in PS/Perlite composites," Applied Clay Science, vol. 181, 105223, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105223>
- [11] B. Szadkowski, A. Marzec, P. Rybinski, and M. Zaborski, "Characterization of Ethylene-propylene Composites Filled with Perlite and Vermiculite Minerals: Mechanical, Barrier, and Flammability Properties," Materials, vol. 13, no. 5, pp. 585, 2020, doi:10.3390/ma13030585
- [12] M. Masłowski, J. Miedzianowska, and K. Strzelec, "Hybrid Straw/Perlite Reinforced Natural Rubber Biocomposites," J Bionic Eng, vol. 16, pp. 1127–1142, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1007/s42235-019-0124-2>
- [13] Z. Wang, X. Zhang, C. Bao, Q. Wang, Y. Qin, and X. Tian, "The Synergistic Effect of Aluminum Hypophosphide and Nanosilica on Flame-Retarded Ethylene-Propylene-Diene Monomer Rubber," J. Appl. Polym. Sci., vol. 124, pp. 3487–3493, 2012, Doi 10.1002/app.35460.
- [14] J. Wang, L. Xue, B. Zhao, G. Lin, X. Jin, D. Liu, H. Zhu, J. Yang, and K. Shang, "Flame Retardancy, Fire Behavior, and Flame Retardant Mechanism of Intumescent Flame Retardant EPDM Containing Ammonium Polyphosphate/Pentaerythritol and Expandable Graphite," Mater, vol. 12, no. 4, pp. 4035, 2019. doi:10.3390/ma12244035.

- [15] J.R.A. Pinto, N.B. Sanches, M.F. Diniz, R.S. Santos, J.I.S. De Oliveira, and R.D.C.L. Dutra, "Expanded Perlite/Cork Fillers Applied to Aerospace Insulation Material," *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 90, pp. 3197–3206, 2018. Doi: 10.1590/0001-3765201820170964
- [16] N. Edres, I. Buniyat-zadeh, S.M. Turp, M. Soylak, S. Aliyeva, N. Binnetova, N. Guliyeva, S. Mammadyarova, and R. Alosmanov, "Structural Characterization of Composites Based on Butadiene Rubber and Expanded Perlite," *J. Compos. Sci.* vol. 7, pp. 487, 2023. <https://doi.org/10.3390/jcs7120487>
- [17] M. Atagür, M. Sarikanat, T. Uysalman, O. Polat, I.Y. Elbeyli, Y. Seki, and K. Sever, "Mechanical, thermal, and viscoelastic investigations on expanded perlite–filled high-density polyethylene composite," *Journal of Elastomers & Plastics*, vol. 50, no. 8, pp. 747-761, 2018. Doi: 10.1177/0095244318765045
- [18] S.Y. Fu, X. Q. Feng, B. Lauke, and Y.W. Mai, "Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites," *Composites Part B*, vol. 39, no. 6, pp. 933–961, 2008.



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Araştırma Makalesi/Research Article

Classification of Alzheimer's disease with EffcientNet B3

Ruken Tekin^{1*}, Tuğba Özge Onur²

¹ Zonguldak Bülent Ecevit University, Dept. of Electrical-Electronics Engineering, 67100 Zonguldak, Türkiye

² Zonguldak Bülent Ecevit University, Dept. of Electrical-Electronics Engineering, 67100 Zonguldak, Türkiye

ARTICLE INFO

Article History:

Received
27.09.2024
Accepted
31.10.2024
Published
31.12.2024

Keywords:

Alzheimer's disease
Machine learning
EffcientNet B3
Gray Level Co-Occurrence Matrix
Image segmentation

ABSTRACT

Alzheimer's disease (AD) is a condition that manifests as a loss of consciousness and cognitive dysfunction, eventually leaving the individual incapable of performing basic functions. The process culminates in death. The brain anomalies caused by the disease can be monitored using magnetic resonance imaging (MRI). This study aims to assist in the clinical diagnosis of AD and proposes a hybrid model to classify the stages of the disease. The magnetic resonance (MR) images used in the study were obtained from the Kaggle database and categorized into four classes: non-demented, very mild dementia, mild dementia, and moderate dementia. Background removal was applied to the images, followed by segmentation using the k-means clustering method. By combining EffcientNet B3 and the Gray Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) feature extractor, this hybrid model was trained to perform the classification task. The model was trained five times, and experimental results were recorded. During training, the batch size was set to 18, the number of epochs to 20, and the learning rate to 0.0001. Experimental results showed an average training accuracy of 99.99% and a testing accuracy of 99.67%. Additional performance metrics, such as precision, recall, and F1-score, were also reported.

Alzheimer hastalığının EffcientNet B3 ile sınıflandırılması

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi
27.09.2024
Kabul tarihi
31.10.2024
Yayın tarihi
31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Alzheimer Hastalığı
Makine öğrenimi
EffcientNet B3
Gray Level Co-Occurrence Matrix
Görüntü segmentasyonu

ÖZET

Alzheimer Hastalığı (AH), bilinç kaybı ve bilişsel işlev bozukluğu olarak ortaya çıkan ve sonunda bireyi temel işlevleri yerine getiremez hale getiren bir durumdur. Süreç ölümle sonuçlanır. Hastalığın neden olduğu beyin anomalileri manyetik rezonans görüntüleme (MRI) kullanılarak izlenebilir. Bu çalışma, AH' nin klinik teşhisine yardımcı olmayı amaçlamakta ve hastalığın evrelerini sınıflandırmak için hibrit bir model önermektedir. Çalışmada kullanılan manyetik rezonans (MR) görüntüleri Kaggle veri tabanından elde edilmiş ve dört sınıfa ayrılmıştır: demans olmayan, çok hafif demans, hafif demans ve orta derecede demans. Görüntülere arka plan kaldırma işlemi uygulanmış ardından k-means kümeleme yöntemi kullanılarak görüntüleri segmentasyon işlemi uygulanmıştır. EffcientNet B3 ve Gri Seviye Eş Oluşum Matrisi (GLCM) özellik çıkarıcısını birleştiren bu hibrit model, sınıflandırma görevini yerine getirmek üzere eğitilmiştir. Model beş kez eğitilmiş ve deneysel sonuçlar kaydedilmiştir. Eğitim sırasında yığın boyutu 18, epok sayısı 20 ve öğrenme oranı 0.0001 olarak ayarlanmıştır. Deneysel sonuçların ortalamasına göre eğitim doğruluğu %99,99, test doğruluğu ise %99,67 olarak elde edilmiştir. Kesinlik, geri çağırma ve F1-skoru gibi ek performans ölçümleri de rapor edilmiştir.

ORCID ID: Ruken Tekin: 0000-0003-4732-7580; Tuğba Özge Onur: 0000-0002-8736-2615

*Corresponding author(s): Zonguldak Bülent Ecevit University, Dept. of Electrical-Electronics Engineering, 67100 Zonguldak, Türkiye.
E-mail add: tekinruken9@gmail.com

To cite this article: Tekin, R., Onur, T.Ö., "Classification of Alzheimer's disease with EffcientNet B3", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 68-77, 2024.

1. INTRODUCTION

Nowadays, predictions about diseases can be made using computer-aided decision support systems [1]. Analyzing and classifying diseases with computational methods, such as image processing and machine learning applied to medical images, is a frequently studied topic in the literature [2]. Medical images can also be utilized for predicting Alzheimer's disease (AD). AD is a neurodegenerative condition that begins with mild memory loss and progresses to cognitive dysfunction, psychiatric and behavioral disorders, and disruption of daily activities [3]. In the later stages of the disease, individuals lose bodily functions, and death is expected to occur within 3 to 9 years from the date of diagnosis, depending on the rate of disease progression [4]. As with any disease, early diagnosis of AD is crucial for delaying progression and alleviating symptoms.

Magnetic resonance imaging (MRI), positron emission tomography (PET), and cerebrospinal fluid (CSF) analysis are used in clinical settings to diagnose Alzheimer's disease [5]. Research on the diagnostic prediction of AD using MRI data and machine learning techniques is extensive. For example, Sisodi and colleagues [6] classified MRI data using ResNet50, VGG19, Xception, DenseNet201, and EfficientNetB7 methods to detect various stages of AD. The validation accuracies for the DenseNet201, ResNet50, VGG19, Xception, and EfficientNetB7 models were recorded as 96.59%, 93.52%, 95.08%, 89.77%, and 83.20%, respectively. Sanjay et al. [7] used a combined DenseNet and MobileNet structure to classify MRI scans, achieving 98.87% accuracy, 98.95% precision, and 98.99% recall. Sharen et al. [8] applied a transfer learning model with the EfficientNetB7 architecture to classify the Kaggle brain MRI dataset, which includes four classes: mild dementia, moderate dementia, no dementia, and very mild dementia. Their proposed model achieved improved accuracy and F1 scores of 89.7% and 0.91%, respectively. Sethi et al. [9] obtained an accuracy level of 91.36% and an AUC of 83% using the EfficientNet model to classify AD and Cognitive Normal (CN) based on MRI scans. Mujahid et al. [10] proposed EfficientNet-B2 and VGG-16 for early-stage diagnosis of AD in MRI datasets, achieving 97.35% accuracy and 99.64% AUC for multi-class datasets and 97.09% accuracy and 99.59% AUC for binary-class datasets. Pranata et al. [11] designed a method using the MRI-based EfficientNet architecture and a Convolutional Neural Network (CNN). They reported the highest values as follows: accuracy 0.97, precision 0.97, recall 0.97, F1-score 0.97, and loss 0.1104.

This study aims to contribute to the early diagnosis of AD. MR images of Alzheimer's patients are enhanced with image processing techniques and classified with the EfficientNet B3 model. To improve the classification performance, the EfficientNet B3 model is combined with GLCM, a feature extraction method. The study has yielded significant results for the classification problem.

2. MATERIALS and METHOD

The methodology of the study is illustrated in the diagram provided in Figure 1.

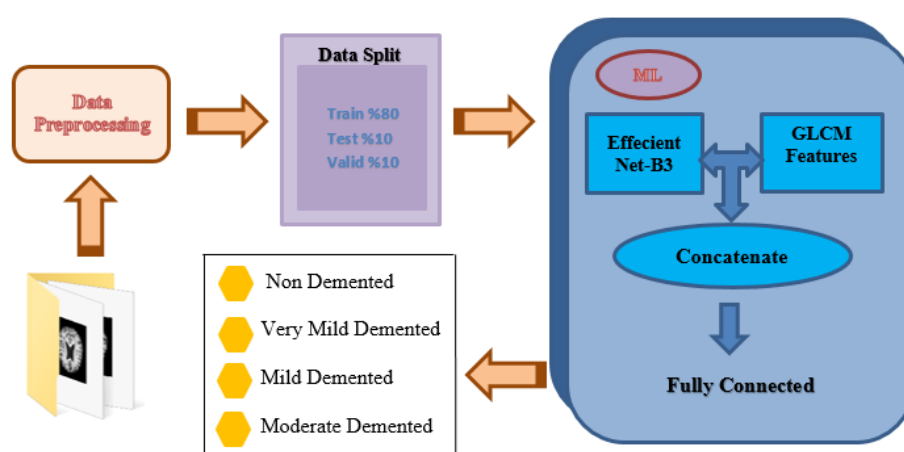


Figure 1. Proposed model general representation

2.1. Data

In this study, a four-class dataset from Kaggle was used [12]. The dataset contains augmented MR images of four classes: mild dementia, moderate dementia, non-demented, and very mild dementia. Table 1 displays the number of images for each class in the dataset.

Table 1. Alzheimer's Disease dataset

Mild Dementia	Moderate Dementia	Very Mild Dementia	Non-Demented
8960	6464	9600	8960

2.2. Data Preprocessing

Background removal and k-means segmentation methods were applied to the images for classification.

- *Remove Images Backgrounds*

In this study, edge detection and contour detection methods were used to separate images from their backgrounds. The images were converted to grayscale, and Canny edge detection was applied. This method identifies object boundaries by detecting pixels that fall within a specific threshold as edges. The pixels forming these boundaries were then identified using the contour detection function, and a mask was created. To smooth the edges, a Gaussian filter was applied to the mask [13]. Figure 2 shows the original image and the background image for the moderate demented class.

Converting the image to greyscale results in an image with the greyscale value of each pixel, calculated by Equation 1. Here the variables x and y represent the horizontal (width) and vertical (height) positions of the pixel in the image. The Canny edge detection method uses gradient calculations to identify edges in an image. The mathematical formula of the gradient calculation is expressed in Equation 2. The mathematical equivalent of the Gaussian filter used to smooth edges is shown in Equation 3 [14].

$$I(x, y) \quad (1)$$

$$G(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 - y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

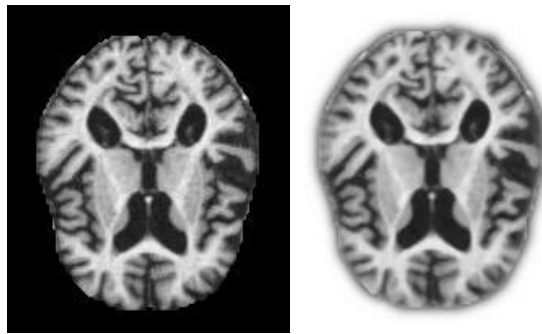


Figure 2. The original image and the image with the background removed

- **K-Means Segmentation**

The K-means clustering algorithm, an image processing technique, is based on the similarities between pixels. This algorithm assigns each pixel to one cluster, and as a result, the similarities within clusters are expected to be higher than those between clusters. The number of clusters, determined externally, is initially assigned randomly to the cluster centers. All pixels are then assigned to the cluster with the closest features, and the cluster centers are recalculated. This process of assigning pixels to clusters continues until the cluster centers no longer need to be reassigned [15].

In Figure 3, the original image, the image with the background removed for the moderate demented class, and the images segmented using the K-means clustering method are shown.

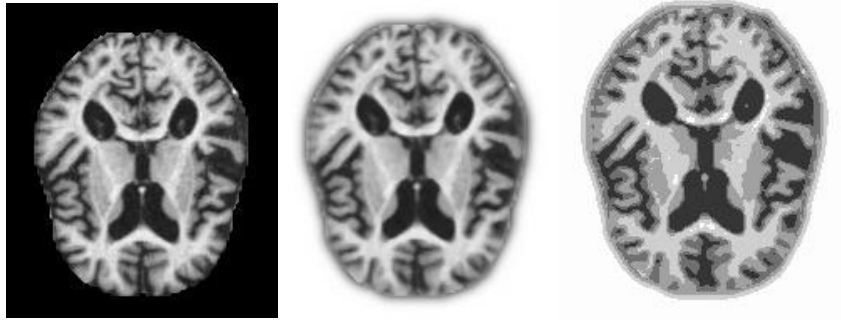


Figure 3. Original image, image with background removed, and segmented image

2.3. Classification Method

For the pre-processed images, 25 features were extracted using the gray level co-occurrence matrix, and these features were integrated into the EfficientNetB3 model for classification.

- *Gray Level Co-Occurrence Matrix*

The Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) is a statistical technique used for processing remote sensing data in texture analysis. It extracts spatial features from grayscale images by analyzing the relationship between the luminance values of a central pixel and its neighboring pixels, as defined by a kernel or window size. This relationship is represented in the form of a matrix, which records the frequency of ordered pairs of pixel values occurring together in a specified direction. This method enables GLCM to generate various sets of texture information depending on the grayscale, kernel size, and direction.

In this study, the features considered are contrast, homogeneity, dissimilarity, energy, and correlation [16]. Contrast refers to the difference between the highest and lowest pixel values in the image. Homogeneity, also known as the inverse difference moment, measures uniformity in an image, with larger values indicating smaller differences in grey tones between pairs of elements. Dissimilarity is a linear measure of local variations in the image. Energy is calculated as the square root of the angular second moment, representing the textural uniformity. Correlation measures the linear dependencies between the grey tones of an image [17].

Each of the textural features is calculated using Equations (4) to (8) [18]:

$$CONTRAST = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i - j)^2 \quad (4)$$

$$HOMOGENEITY = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{P(i, j)}{1 + (i - j)^2} \quad (5)$$

$$DIFFERENCE = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(x, y) |i - j| \quad (6)$$

$$ENERGY = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(i, j)^2} \quad (7)$$

$$CORRELATION = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sqrt{(\sigma_i)(\sigma_j)}} \quad (8)$$

In the mathematical expressions, N represents the number of gray levels, and $P(i,j)$ is the normalized value of the sum of the grayscale at position i and j within the kernel, which equals 1. For each image, a total of 25 features were generated for each texture feature, using distances of 1, 3, and 5 pixels, and at angles of 0 degrees (horizontal), 45 degrees (diagonal), and 90 degrees.

- *EfficientNet-B3*

Tan and Le proposed seven models, EfficientNetB0 to EfficientNetB7, which they referred to as EfficientNet CNN models. These models aim to achieve better classification accuracy with fewer parameters [19]. The methods scale the width, depth, and resolution dimensions proportionally using predefined coefficients [20].

The EfficientNet-B3 model automatically scales depth and width based on the resolution of the input image. With more filters per layer and higher spatial resolution, the model can capture finer details in the input images. The architecture includes convolutional layers, batch normalization layers, and ReLU activation functions. Feature maps are computed using depthwise convolutions, which reduce the number of parameters by performing one convolution per channel. The model consists of 26 convolution blocks, each followed by a convolution layer activated by batch normalization. Mobile Inverted Bottleneck Convolution is used as an inverted residual block, consisting of a convolution layer, a depthwise convolution, and another convolution layer, with skip connections at both the beginning and end. Finally, the dimensions are reduced by global average pooling [21].

2.4. Evaluation

EfficientNet B3 belonging to the EfficientNet model family was used in this study. The model is loaded with weights previously learnt by training on the ImageNet dataset. EfficientNet B3 is designed to process three-channel (RGB) images. The images used in this study are grey-scale (single channel) images, which were converted into three channels (124x124x3) by using a Lambda layer to adapt to the model.

A Multilayer Perceptron (MLP) model was designed to process the 25-dimensional inputs obtained by feature extraction methods. This model contains two dense layers: The first layer consists of 8 neurons and the second layer consists of 4 neurons and both layers use the ReLU activation function. The outputs of the MLP and EfficientNet B3 models are combined in a concatenate layer to allow the model to handle various features.

The concatenated inputs are passed through a dense layer with a ReLU activation function. Finally, a 4 neuron output layer with softmax activation function is added to perform the classification process.

Recall precision, accuracy, F1 score and recall metrics are used to measure the performance of the proposed hybrid model.

Accuracy (Acc) is one of the mainly applied metrics in such domain. This metric calculates the number of true predictions that the model was able to detect. It is calculated by dividing the sum of true negatives and true positives by the Acc is calculated by Equation (6). Acc expresses the ratio of the ratio of the number of people that can be properly predicted and categorised. The term Sensitivity (Sens) denotes the proportion of correctly identified patients in the overall number of patients and is calculated by Equation (7). The term Specificity (Spec) denotes the proportion of correctly identified healthy individuals relative to the total number of individuals without any health issues, computed as outlined in Equation (8). Precision, recall, and F1-score are measures that analyse the performance of classification models. The areas where the model makes correct predictions are expressed as True Positive (TP) and True Negative (TN). The areas where the model makes incorrect predictions are False Positive (FP) and False Negative (FN). Precision indicates the accuracy of Positive class predictions, calculated as the ratio of True Positives to all Positive predictions. Recall (Rec) is a metric that shows how much of what is expected to be positively predicted is positively predicted. The F1 Score represents the harmonic mean of Precision and Recall. Metrics are calculated using Equation (9) to (14):

$$Acc = \frac{TN + TP}{TN + TP + FN + FP} \quad (9)$$

$$Sens = \frac{TP}{TP + FN} * 100 \quad (10)$$

$$Spec = \frac{TN}{TN + FP} * 100 \quad (11)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (12)$$

$$Rec = \frac{TP}{TP + FN} \quad (13)$$

$$F_1 = 2 * \frac{Precision * Rec}{Precision + Rec} \quad (14)$$

The data set is divided into 80% training, 10% validation and 10% test data. The model was trained in TPU environment with the hyperparameter values specified in Table 2.

Table 2. Hyperparameters of the proposed model

Hyperparameter	Value
Input Shape	(124, 124, 3)
Optimizer	Adam
Loss	Categorical Crossentropy
Metrics	Accuracy
Learning Rate	0.0001
Epoch	20
Batch Size	18

3. RESULTS

This study, which aims to assist in the diagnosis of Alzheimer's disease, has achieved significant success in the classification task. In this section, we describe the experimental results. The hybrid model used to classify the stages of Alzheimer's disease was trained five times, and the results were recorded. As shown in Table 3, the model was trained with a batch size of 18, for 20 epochs, and a learning rate of 0.0001.

When training the model, the data is processed in parts. Backpropagation updates the weights based on the performance of each part. This process is repeated in each training step to calculate the appropriate weight values for the model. Each of these steps is called an epoch. Batch size refers to the number of data points the model processes simultaneously. In this study, various combinations of epoch and batch size parameters were tested, and the highest-performing values were selected. To ensure the model converged to a stable and optimum result, the initial learning rate was set as low as 0.0001. If no improvement occurred for 2 consecutive epochs during training, the learning rate was reduced by a factor of 0.1.

Two methods were applied to avoid overfitting in the model: data augmentation and the early stopping function. The data used in the study is an augmented version of the AD dataset. Since the raw version of the dataset contains unbalanced class distributions and an insufficient number of samples, which may cause the model to overfit, using a larger, augmented dataset is more logical. Additionally, early stopping was employed as another method. In this approach, the validation accuracy and validation loss values obtained at the end of each epoch are analyzed, and training is halted based on the model's validation Performance [22]. Table 3 presents the test accuracy values obtained during training.

Table 3. Results of the model

Number of experiment	Train Accuracy	Test Accuracy
1	%100	%99.60
2	%99.99	%99.80
3	%99.99	%99.68
4	%100	%99.59
5	%100	%99.70

The mean values of the experimental results were calculated as 99.99% for training accuracy and 99.67% for test accuracy. The precision, recall, and F1-score results obtained from the experiments are shown in Table 4.

Table 4. Precision, recall and F1-score results of the model

Disease		Precision	Recall	F1- Score
Non-Demented	1	1.00	1.00	1.00
	2	1.00	1.00	1.00
	3	1.00	1.00	1.00
	4	1.00	1.00	1.00
	5	1.00	1.00	1.00
Very Mild Dementia	1	1.00	1.00	1.00
	2	1.00	1.00	1.00
	3	1.00	1.00	1.00
	4	1.00	1.00	1.00
	5	1.00	1.00	1.00
Mild Dementia	1	1.00	0.99	0.99
	2	1.00	1.00	1.00
	3	1.00	1.00	1.00
	4	1.00	0.99	1.00
	5	1.00	0.99	0.99
Moderate Dementia	1	0.99	1.00	0.99
	2	1.00	1.00	1.00
	3	0.99	1.00	0.99
	4	0.99	0.99	0.99
	5	0.99	0.99	0.99

Based on the results obtained from the experiments, it can be concluded that the proposed model yields consistent results on the test data and is successful.

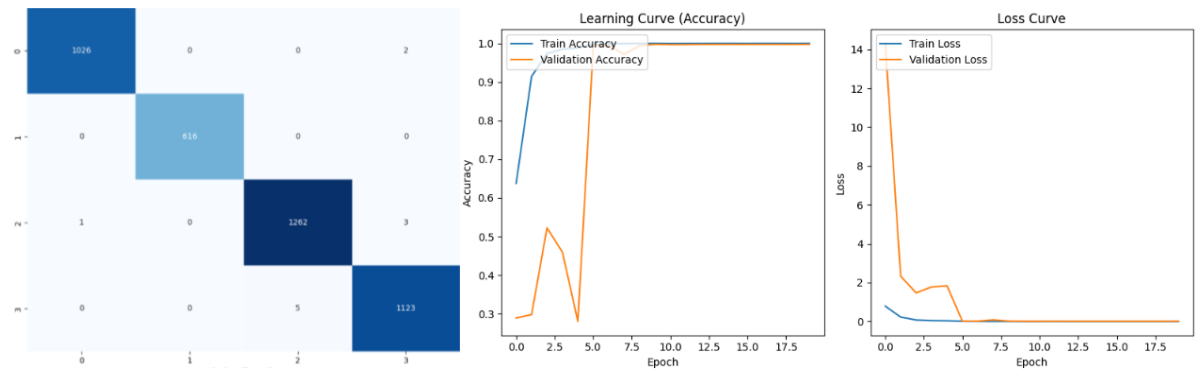


Figure 4. Confusion matrix, learning curve and loss curve of Experiment 1

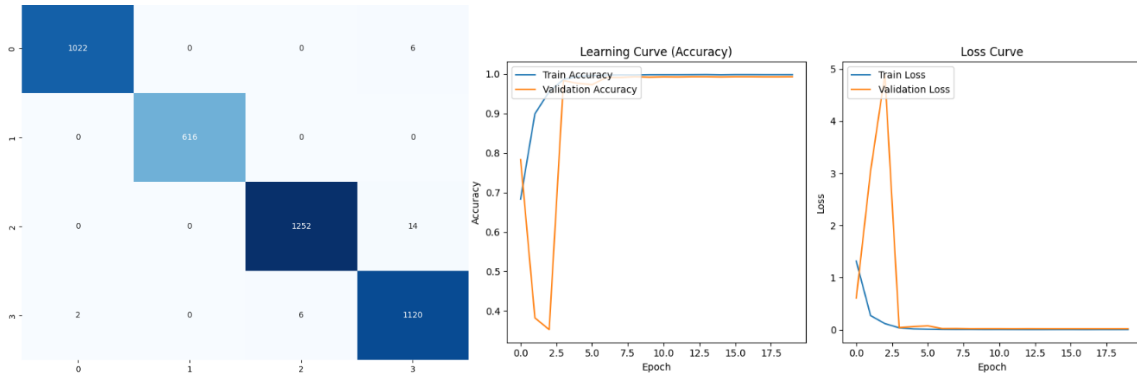


Figure 5. Confusion matrix, learning curve and loss curve of Experiment 2

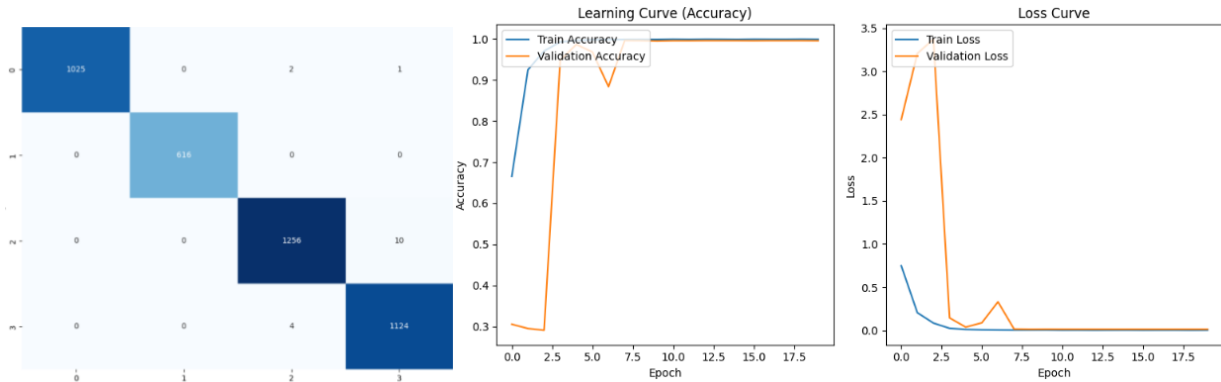


Figure 6. Confusion matrix, learning curve and loss curve of Experiment 3

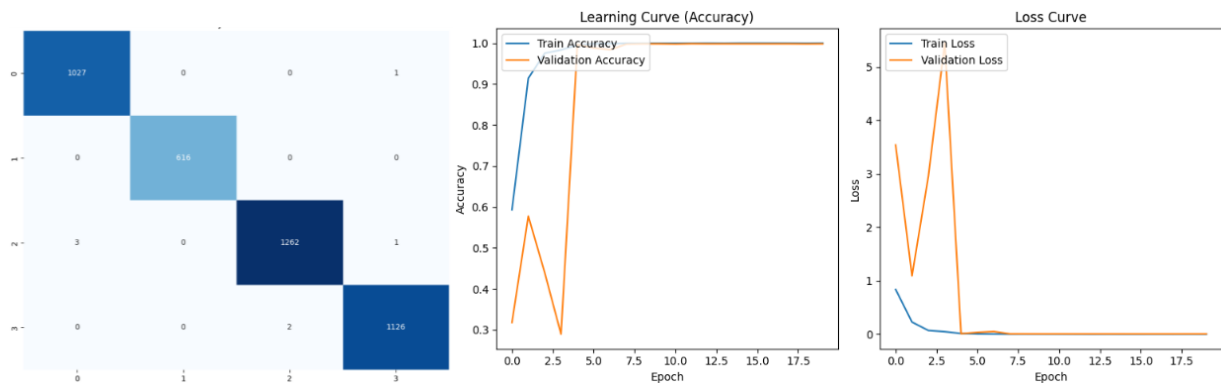


Figure 7. Confusion matrix, learning curve and loss curve of Experiment 4

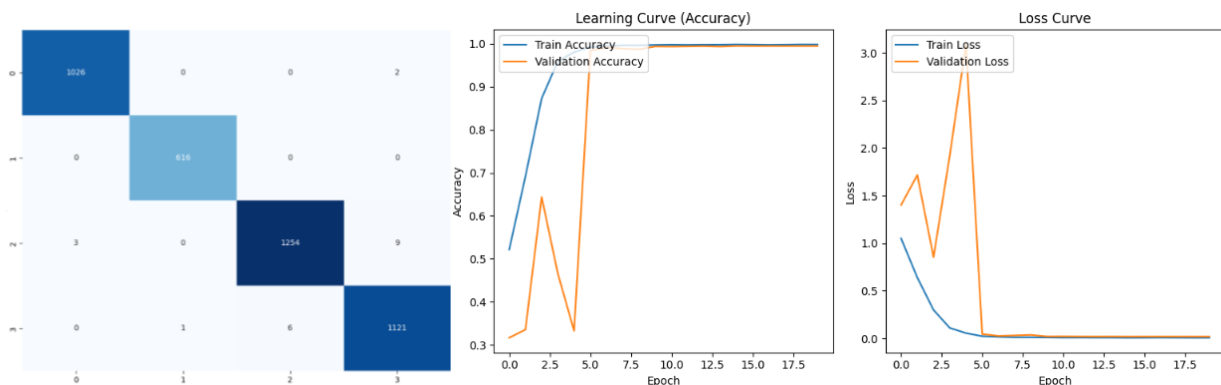


Figure 8. Confusion matrix, learning curve and loss curve of Experiment 5

The confusion matrices, as well as the learning and loss curves from the experiments, are shown in Figures 4-8. In the confusion matrices, the class labels are as follows: 0 - Non-Demented, 1 - Very Mild Demented, 2 - Mild Demented, and 3 - Moderate Demented. In the matrices, the horizontal axis represents the predicted labels, and the vertical axis represents the true labels. The model's classification performance can be evaluated by examining these confusion matrices. The curves illustrate the behavior of the validation and training data during model training.

4. DISCUSSION

Table 5 can be used to compare the performance of the proposed work with similar studies in the literature. The studies listed in the table share two common aspects with the proposed work: the classification of AD stages and the use of MR images. Additionally, these studies employed the EfficientNet method, which is also utilized in this study. An analysis of the table indicates that this study has achieved greater success compared to the other studies.

Table 5. Performance analysis of this model compared to other models

Method	Year	Dataset	Accuracy (%)
EfficientNetB7[6]	2023	Alzheimer's Disease Dataset(ND,VMD, MD, MOD)- MRI	83.20
Merged DenseNet and MobileNet [7]	2023	MRI Neuroimaging Data (EMCI, LMCI, AD, MCI, & NC)-MRI	98.87
EfficientNetB7[8]	2022	Alzheimer's Disease Dataset(ND,VMD, MD, MOD)- MRI	89.70
EfficientNet AD diagnostic (ENetAD) [9]	2022	ADNI Dataset (CN, AD)-MRI	91.36
EfficientNet-B2 and VGG-16[10]	2023	Alzheimer's Disease Dataset(ND,VMD, MD, MOD)- MRI	97.35
CNN model with Efficient-Net [11]	2023	Alzheimer's Disease Dataset(ND,VMD, MD, MOD)- MRI	97.00
This Study	2024	Augmented Alzheimer's Disease Dataset(ND,VMD, MD, MOD)- MRI	99.67

In our study, neurological images of the disease underwent a comprehensive image processing workflow. The studies referenced in Table 5 did not employ extensive image processing techniques. Image processing plays a crucial role in our study, with its primary objective being to enhance the images and highlight disease-specific features. The number of images, or dataset size, is beneficial during the training phase, as it allows the model to be trained under varying conditions to produce robust results. In our study, approximately 34,000 images were used, which is a larger dataset than those in other studies.

The textural features of the images were extracted and integrated into the EfficientNet B3 model. This approach combined the features extracted by the EfficientNet B3 model for classification with the textural features extracted using the GLCM. As a result, classification was performed using a richer set of features. Compared to other studies, our model has a more complex architecture. Our study demonstrated superior performance compared to other models in terms of accuracy, and it outperformed other variations of the EfficientNet family.

5. CONCLUSION

Early diagnosis of diseases is crucial for the timely initiation of treatment. Early diagnosis of AD is particularly valuable, as it enables treatments that can slow the progression of the disease or stabilize its condition. In this study, we proposed a model for the early diagnosis of Alzheimer's disease. We combined pre-processed MRI images with a machine learning algorithm and a GLCM feature extractor for classification. This study demonstrates the effectiveness of the proposed hybrid model in classifying the stages of Alzheimer's disease.

Across five different experiments, the model achieved an average training accuracy of 99.99% and a testing accuracy of 99.67%, demonstrating its generalizability across different data sets. The model's performance in classifying different stages of AD was validated using metrics such as precision, recall, and F1 score, and the results for each class were reported. In the Non-Demented and Very Mild Demented classes, precision, recall, and F1 score values were recorded as 1.00. For the Mild and Moderate Demented classes, values ranged between 0.99 and 1.00.

Strategies such as data augmentation and early stopping, used to prevent overfitting, played a critical role in ensuring the stability of the model. In all five experiments, the training and loss curves indicate that the model effectively fits the validation data while avoiding overfitting.

Overall, the model is a reliable and effective tool for the early diagnosis and classification of AD, providing a consistent and accurate approach that can assist in clinical diagnoses. Future improvements to this study may include incorporating additional feature extractors, applying various image processing techniques, and utilizing a larger dataset.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ruken Tekin and Tuğba Özge Onur, conceptualization, validation, visualization. Ruken Tekin, software, investigation, resources, writing-original draft preparation. Tuğba Özge Onur, supervision, methodology, formal analysis, data curation, writing-review and editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no competing interests.

ETHICS

There is no ethical problem in the publication of this article.

REFERENCES

- [1] M. Ü. Öziç and S. Özşen, "Üç Boyutlu T1 Ağırlıklı Manyetik Rezonans Görüntülerinde Ön İşleme Yöntemleri," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 19, pp. 227-240, 2020.
- [2] E. Gülay and S. İçer, "Evaluation of Lung Size in Patients with Pneumonia and Healthy Individuals", *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, no. özel sayı, pp. 304-309, 2020.
- [3] A. Burns and S. Iliffe, "Alzheimer's disease", *British Medical Journal*, Vol.6, No.8, pp. 338, b158, 2014.
- [4] K. Keskin and F. Tokat, "ALZHEİMER VE FİZİKSEL AKTİVİTE", *Fiziksel Aktivite ve Sağlık*, pp. 285-293, 2023.
- [5] S. Pala, "Alzheimer hastalığının erken teşhisi için biyobelirteçlere dayalı stratejik yol haritası derleme çeviri çalışması", *Tıbbi Politika Yazısı*, 2021.
- [6] P. S. Sisodia, G. K. Ameta, Y. Kumar et al. "A Review of Deep Transfer Learning Approaches for Class-Wise Prediction of Alzheimer's Disease Using MRI Images", *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, pp. 2409–2429, 2023.
- [7] V. Sanjay and P. Swarnalatha, "A Concatenated Deep Feature Extraction Architecture For Multi-Class Alzheimer Disease Prediction", *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 33, pp. 102-121, 2023.
- [8] H. Sharen, B. Dhanush et al., "Efficient Diagnosis of Alzheimer's Disease Using EfficientNet in Neuroimaging", *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 914, 2022.
- [9] M. Sethi, S. Ahuja, et al., "An Intelligent Framework for Alzheimer's disease Classification Using EfficientNet Transfer Learning Model," *2022 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, pp. 1-4, 2022
- [10] M. Mujahid, A. Rehman, et al., "An Efficient Ensemble Approach for Alzheimer's Disease Detection Using an Adaptive Synthetic Technique and Deep Learning", *Diagnostics*, vol. 13, no. 15: 2489.
- [11] Y. F. Pranata, R. Magdalena and N. K. C Pratiwi, "Optimizer analysis on efficient-net architecture for Alzheimer's classification based on magnetic resonance imaging (MRI)", *The 3rd International Conference on Engineering Technology and Innovative Researches*, vol. 2482, Issue 1, 2023.
- [12] Uraninjo., Augmented Alzheimer MRI Dataset, Kaggle, 2022. [Date of access: June, 2024]. Available online <https://www.kaggle.com/datasets/uraninjo/augmented-alzheimer-mri-dataset>.
- [13] Gaussian Smoothing, School of Informatics, University of Edinburgh, [Online]. Available: <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm>. [Date of access: Aug. 15, 2024]
- [14] J. Wang and J. Chen, "Subpixel edge detection algorithm based on improved Gaussian fitting and Canny operator", *Academic Journal of Computing & Information Science*, vol. 5, Issue 7: 33-39, 2022.
- [15] K. Ramesh et al., "A Review of Medical Image Segmentation Algorithms", *EAI Endorsed Trans Perv Health Tech*, vol. 7, no. 27, p. e6, 2021.
- [16] M. Tuceryan and A. K. Jain, "Texture Analysis", *Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision*, pp. 207-248, 1998.
- [17] N. Iqbal, R. Mumtaz, et al., "Gray level co-occurrence matrix (GLCM) texture based crop classification using low altitude remote sensing platforms", *PeerJ. Computer science*, 7, e536, 2021.
- [18] GLCM Equations (2011) GLCM Equations Gray Level Co-occurrence Matrix equations. 2011. [19 July 2024]
- [19] S. Abd El-Ghany, M. Elmogy, and A. A. Abd El-Aziz, "Computer-Aided Diagnosis System for Blood Diseases Using EfficientNet-B3 Based on a Dynamic Learning Algorithm" *Diagnostics* vol.13, no. 3: 404, 2023.
- [20] A. Nafea, et al., "A Deep Learning Algorithm for Lung Cancer Detection Using EfficientNet-B3", *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, vol. 2, no.4, pp. 68-76, 2023.
- [21] A. Batool and Y. Byun, "Lightweight EfficientNetB3 Model Based on Depthwise Separable Convolutions for Enhancing Classification of Leukemia White Blood Cell Images", *IEEE Access*. vol. 11, pp. 37203-37215, 2023.
- [22] X. Ying, "An Overview of Overfitting and its Solutions", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1168, Issue 2, pp. 022022, 2019.



Simulation of infant suction vacuum pressure using WGAN

Fatih Furkan ARSLAN¹ *, Önder DİNCEL¹

¹ Yozgat Bozok University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Yozgat, Türkiye

ARTICLE INFO

Article history:

Received

08.11.2024

Accepted

18.11.2024

Published

31.12.2024

Keywords:

Infant Sucking Vacuum

WGAN

Simulation

Sucking Physiology

ABSTRACT

In this study, it is aimed to simulate infant suction vacuums by replicating infant suction vacuum pressures with the Wasserstein Generative Adversarial Network (WGAN) model. To understand the physiology of infants' feeding behaviour, it is very important to understand the physiology of sucking. One of the most important elements of feeding physiology is the infant suction vacuum. In this context, the infant suction vacuum pressure produced by the WGAN model was successfully simulated. Data preprocessing and hyperparameter optimization were performed to ensure the most accurate simulation of the WGAN model used in the study. As a result, the low RMSE and high R2 value between the real data and the generated data show that the model works successfully. This method is promising in terms of better understanding the sucking behaviour of infants and contributing to solving problems in the field of infant feeding. In the future, infant sucking simulation will be more successful if the model is supported with larger data and other elements of infant sucking physiology such as swallowing and respiration are considered. This kind of simulation will pave the way for new applications in the fields of infant feeding and breastfeeding.

WGAN ile bebek emme vakum basıncının simülasyonu

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

08.11.2024

Kabul tarihi

18.11.2024

Yayın tarihi

31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Bebek Emme Vakumu

WGAN

Benzetim

Emme Fizyolojisi

ÖZET

Bu çalışmada, bebeklerin emme vakum basınçlarının Wasserstein Generative Adversarial Network (WGAN) modeli ile çoğaltılarak bebek emme vakumlarının benzetiminin yapılması amaçlanmıştır. Bebeklerin beslenme davranışlarını fizyolojisini anlamak için emme fizyolojisini kavramak oldukça önemlidir. Beslenme fizyolojisinin en önemli unsurlarından bir tanesi bebek emme vakumudur. Bu bağlamda, WGAN modelinin ile üretilen bebek emme vakum basıncı başarıyla taklit edilmiştir. Çalışmada kullanılan WGAN modelinin en doğru benzetimi yapabilmesi için veri ön işleme yapılmış ve hiperparametre optimizasyonu yapılmıştır. Sonuç olarak, gerçek verilerle üretilen veriler arasındaki düşük RMSE ve yüksek R2 değeri modelin başarılı çalıştığını göstermektedir. Bu yöntem ile bebeklerin emme davranışlarının daha iyi anlaşılması ve bebek beslenmesi alanındaki sorunların çözülmesine katkı sağlaması açısından umut vadetmektedir. Gelecekte, modelin daha geniş verilerle desteklenmesi ve bebek emme fizyolojisinin diğer unsurları olan yutma ve solunum gibi unsurlarında ele alınmasıyla bebek emme benzetim daha başarılı bir şekilde yapılabilecektir. Bu tür bir benzetim ile bebek beslenmesi ve anne sütü sağımı alanlarında yeni uygulamalara zemin hazırlayacaktır.

1. INTRODUCTION

The feeding behaviour exhibited by infants constitutes a multifaceted activity that needs various aspects of physiologic functions, such as sucking, swallowing, and breathing, to be harmonized [1]. In this regard, a better understanding of the stretch and patterns of infant sucking behaviour is critical in the identification and management of feeding problems and also in the designing of appropriate feeding dynamics [2]. This subject has been the focus of several previous works. For instance, one such study analysed the suction pressure, milk expression, and the period of lactation deprivation in infants [3]. Similar to this study, the pattern of

ORCID ID: Fatih Furkan ARSLAN: 0000-0001-7887-7951, Önder DİNCEL: 0000-0002-5373-8338

*Corresponding author: Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yozgat

Phone: +90 354 2421001.

Fax: +90 354 2421005.

E-mail: f.furkan.arslan@yobu.edu.tr

To cite this article: Arslan F.F., Dincel Ö., "Simulation of infant suction vacuum pressure using WGAN", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 78-86, 2024.

tongue movement during sucking was assessed using an ultrasound, and it was correlated to the flow of milk and the pressure inside the mouth [4]. Similarly, this study emphasizes the importance of coordination of sucking, swallowing and breathing during the breastfeeding process and argues for more research by pointing out the gaps in existing research and the limitations of clinical management strategies. It also provides an important source of information for care providers by describing the sucking and breathing abilities of infants[5]. Another study analysed normal feeder sucking behaviour in detail, demonstrating how sucking frequency, pressure and consumption rate vary according to the age of the infants. Thanks to the objective measurement devices used in the study, the data obtained provide a basis for the clinical evaluation of abnormal sucking behaviour in preterm infants and other infants at risk of neuromuscular disorders or swallowing difficulties[6]. Newborn sucking patterns have been studied using various techniques using devices that allow for the analysis of sucking in terms of complete and partial closure of the suction system [7]. Another study seeks to analyse and detail the sucking dynamics in preterm breastfeeding infants through the use of advanced techniques, including synchronized ultrasound imaging and intra-oral vacuum measurements. This method aims to offer a more comprehensive understanding of the sucking patterns in preterm infants, and it shows how they may differ from those of term infants[8].

With the objective of ascertaining feeding abilities and evaluating infant health, new devices have been designed to assess non-nutritive sucking by measuring intra-oral and lip expression pressures of infants [9]. Likewise, the sucking-feeding coupling of the infant’s non-nutritive sucking response has also been done using specific described devices, which take into account the supply of nutrients as per the performance of the components [9][10]. Similarly, another article introduces a non-nutritive suckling (NNS) system that measures intraoral vacuum profiles in real time in newborns, providing an analysis of objective sucking characteristics. By presenting quantitative data of sucking behaviors, the study provides a framework for future research that will contribute to the assessment of oromotor dysfunctions[11]. Ultrasound imaging was also employed to assess the dynamics of sucking of infants during breastfeeding, showing the presence of nutrition and non-nutrition sucking [12]. In another study, he developed an innovative tool that simulates breastfeeding mechanics in a laboratory setting, providing reliable data and contributing to the understanding of breastfeeding dynamics with measurements consistent with clinical data. This study has elucidated breastfeeding biomechanics with advanced measurement techniques and laid the foundation for the development of future breastfeeding devices[13].

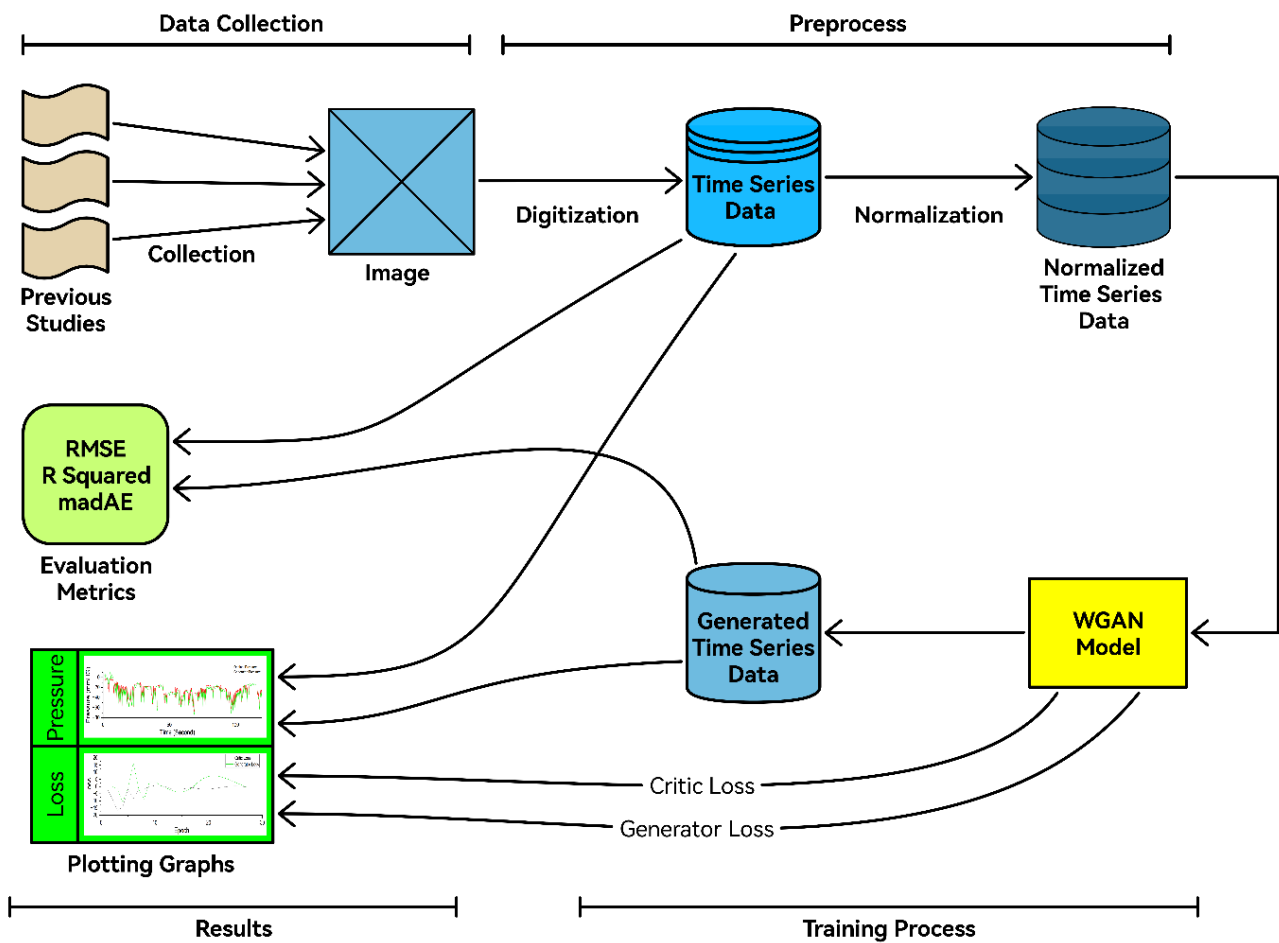


Figure 1. Flow chart of the process.

Our goal is to make the mechanical baby sucking simulation mentioned above with artificial intelligence a more natural and realistic milking process for the mother. To achieve this a novel approach to mimicking the suction derived from an infant's mouth using a Wasserstein Generative Adversarial Network (WGAN). In generative modelling techniques, the WGAN is viewed as a sophisticated one since it can comprehend and internalize the data characteristics of suction vacuum pressure samples obtained from infants. In contrast to traditional GAN frameworks, the WGAN paradigm incorporates the Wasserstein distance as a cost, allowing for more consistent output and broader usability [14][15].

To this end, the accrual of data on infant suction vacuum pressure from existing literature and data washing will be discussed first. Next, we present the WGAN model and its implementation, the training process, and the model evaluation metrics. Eventually, the findings of the simulation are presented along with the generated suction vacuum pressure data, the performance of the model with regard to generated data and actual data, and the trends of generator and critic loss over the training iterations, as illustrated in Figure (3). The flowchart of the whole process is given in Figure (1).

2. MATERIALS and METHODS

2.1. Data Collection and Preprocessing

This study utilized data stemming from the lactational practice of nutritional sucking. This included time series data on the suction vacuum pressure of babies during suckling. The data is a mean vacuum pressure plot concerning time for six mother-infant pairs [7]. The following measures were taken during data processing;

- OpenCV transforms the image from a graphics form to a greyscale [16].
- The plot data points are then extracted from the greyscale image after binarization is performed using a threshold value [16].
- The subsequent step involves digitizing the obtained data points to numerically represent the suction vacuum pressure and the related time intervals.
- In addition, the data is further adjusted for use in the WGAN training purpose.

2.2. WGAN

According to [17], two neural networks make up Generative Adversarial Networks (GANs) – Generator (G) and Discriminator (D). The generator, G, accepts an input of random noise, which enables it to learn the features of actual data samples. Conversely, the discriminator, D, takes as an input a mixture of actual data as well as generated data and attempts to tell the difference between the two and to indicate what data is actual and what is generated out of G. The loss functions that enable G and D to operate within the framework of GANs are given in the Equation (1) below:

$$\begin{cases} Loss_G = E_{z \sim P_z} [D(G(z))] \\ Loss_D = -E_{x \sim P_x} [D(x)] + E_{z \sim P_z} [D(G(z))] \end{cases} \quad (1)$$

In this setting, it is the case that $Loss_G$ and $Loss_D$ refer to the loss function in turns for the Generator and the Discriminator, respectively. The purpose of the generator is to generate samples $G(z)$ that when z is in the latent space, closely approximates the image data x . On the contrary, the task of the discriminator is to tell the difference between the actual data x and the generated image data $G(z)$.

In the case of WGAN, the similarity between two distributions is quantified using the concept of Wasserstein distance. According to [15], in contrast with Jensen-Shannon and Kullback-Leibler divergence measurements, the Wasserstein distance has a continuous and valuable gradient. This property helps to alleviate the mode collapse problem that is usually associated with GAN training relying on JS divergence. The Wasserstein distance is represented in the Equation (2) below:

$$W(P_x, P_z) = \sup_{L \leq 1} (E_{x \sim P_x} [D(x)] - E_{z \sim P_z} [D(G(z))]) \quad (2)$$

In this context, the notation $W(P_x, P_z)$ is reserved for the Wasserstein distance between two probability distributions. The first distribution P_x refers to the true data distribution while the second distribution P_z denotes the distribution of the data generated in the model. The constant L (where $L \leq 1$) acts as a bound on the difference in expectation that can be achieved under the 1-Lipschitz assumption to guarantee safe gradient optimization in the network.

2.3. Model Components

Two networks make up the WGAN model, which competes in two components – the generator and the critic:

The Generator tries to produce samples that correspond closely with the actual ones from a given random vector. During training, the generator, which is built as a stack of fully connected layers, receives not only a latent vector (random noise) but also an extra Gaussian-distributed noise, as temporal information. As a result, the model is capable of generating data samples that are reasonably and temporally dynamic in nature, changing with time. The first layer inputs the latent dimension. The following layers consist of 512, 1024, and 2048 neurons, thus endowing the model with the ability to comprehend and produce intricate patterns. The last layer presents the sequence length as an output, the same as the arrangement of the target data. Each layer uses the Leaky ReLU activation function [18], which assists in avoiding information loss in negative ranges, leading to a more realistic distribution. The output layer employs Tanh [19] which constricts the output values to the range of $[-1, 1]$. Furthermore, the layers employ dropout regularization to mitigate overfitting, with a dropout rate corresponding to the fixed value named dropout rate, enhancing generalization and performance [20].

The Critic is a model that is capable of telling the difference between actual data and fake data. In contrast to a Discriminator in the classical sense, the function of the loss for the Critic is more straightforward and, therefore, leads to more equal and stable training of the model. The Critic network includes four layers of fully connected networks: the first one has 1024 neurons, the second 512, the third 256, and the last one produces a single scalar output with one neuron. Input data is sequential. Therefore, input tensors are unrolled in a manner of a view, preferably before the Critic. The first three layers are composed of ReLU activation [21] and a wok returns a single scalar. ReLU function is utilized due to its positive range linearity, which minimizes information loss and fastens training. As illustrated in Figure (2), the model architecture is presented in detail.

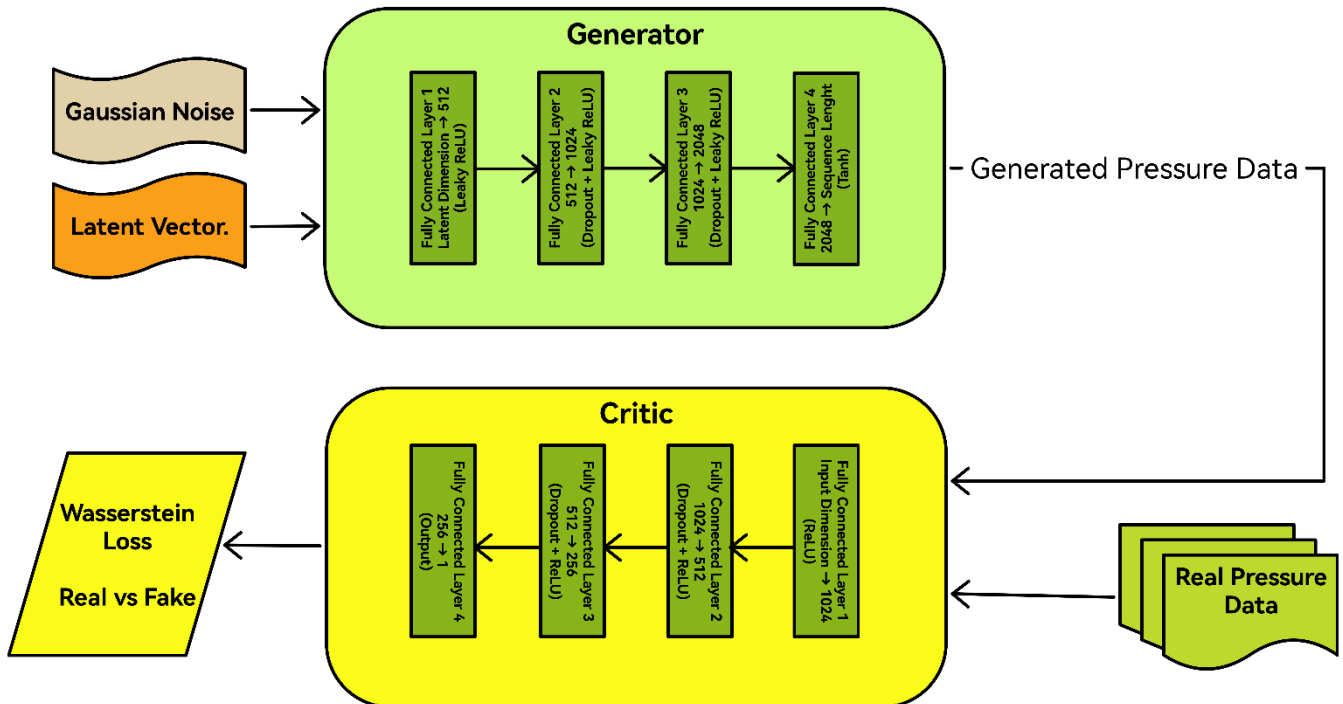


Figure 2. Block diagram of the model.

2.4. Training Process and Hyperparameters

The process of training the WGAN model was methodically structured so that learning could proceed in a stable manner, and the quality of the generated data was good. By emphasizing the adjustment of hyperparameters and the use of special training regimes, the model managed to perform well and precisely reproduced realistic patterns of baby-sucking vacuum.

The design of the model and the settings of the hyperparameters were customized to suit the baby-sucking vacuum data. Some of the primary hyperparameters were as follows:

- **Latent Dimension:** The latent dimension, which is fixed at 200, indicates the length of the noise vector fed into the Generator. This dimension was chosen in order to strike a balance on the degree of complexity required to model variations in the data while ensuring the computational costs are kept at a reasonable level.
- **Sequence Length:** Set to 992, the sequence length is half the length of the complete data set. This technique helps the model's ability to create plausible incomplete sequences, which, when put together, form a coherent whole of sucking vacuum data.
- **Batch Size:** The batch size of 128 was employed as it enhances the stability of the gradients and helps in faster convergence. The application of multiple samples at once allowed for effective parameter updates.
- **Critic Training Frequency:** The Critic was subjected to 10 training sessions for every Generator update, which was more effective in learning the nuanced textures of the real and fake samples. This update frequency allows for better feedback from the generator and, therefore, improves the quality and convincement of the generated data.
- **Weight Clipping:** A clipping threshold of 0.01 was imposed on the weights of the Critic, which is useful in restraining the excessive growth of weights as well as stabilizing the Wasserstein loss, which is important for training purposes.
- **Weight Decay:** Given a value of 0.0001, weight decay is one of the techniques used to prevent overfitting by discouraging large weights in the Generator and Critic networks, thereby encouraging less complex and more general learning.
- **Patience for Early Stopping:** We found it suitable to apply a patience setting of 15 epochs in early stopping in order to cease the training whenever no improvement was recorded in the loss of the Generator in order to prevent overfitting.
- **Rate of Dropout:** In both models, a dropout rate of 0.3 was used, reducing overfitting through random shutdown of a certain percentage of neurons during each training step.
- **MSE Threshold:** An MSE threshold of 25 was established as the acceptable level for the fidelity of generated data. Training would be stopped if this level was achieved or surpassed. They were indicating that the model was able to reproduce the real data closely.

To enhance both the efficiency and stability of the training, early stopping and an adaptive learning rate scheduler were also incorporated into the training regime. Early stopping was applied, considering there is no improvement in the Generator's loss for 15 epochs, thus minimizing the unnecessary computational burden and overfitting windows. Furthermore, since the performance was observed to have plateaued, the learning rate was tailored down by a ReduceLROnPlateau. In cases of aggressive training, when performance did not improve, the learning rate was decreased by a factor of 0.5. This ensured that the model avoided retraining in the local minima, enabling optimally updating parameters during the model's convergence.

The training regime was implemented to provide progressive and focused updates to both the generator and the critic. The Critic received ten updates for each update of the Generator, allowing enough training to learn the difference between actual samples and generated samples. In every Practicum update, real and generated samples were tested and paired to measure the Wasserstein loss metric, corresponding to the difference between actual and generated samples in mean scores the Practicum gave. This way, the Critic learned to approximate the Wasserstein distance between two distributions, producing better gradients for optimizing the generator.

The generator was then updated by decreasing the Critic's score for the artificial samples. This enhanced the Generator's ability to produce realistic-looking data by shrinking the Wasserstein distance between the actual images and their generated counterparts. This sort of feedback loop enabled the model to create more and more realistic pictures over time.

2.5. Evaluation Metrics

The Critic and Generator losses were supervised throughout the training process. These losses also illuminated the convergence and balance of the model. Moreover, extreme differences between the Critique and Generator losses were considered signs of instability,

and thus, such parameters and training strategies were adjusted accordingly, as depicted in Figure (4). Furthermore, evaluation of the quality of data generated through the network against the original data also took place at the end of every epoch, focusing on metrics such as the mean squared error (MSE), the coefficient of determination (R^2), and mean absolute deviation (madAE). The value of MSE, which was set at the threshold of 25, was considered the target objective. When this cue was reached, training was stopped, and indicating that the model had produced realistic data. Through this approach and with the appropriate selection of the hyperparameters, the WGAN model was able to create realistic sequential data relevant to the simulation of baby-sucking pressure patterns.

3. RESULTS and DISCUSSION

Figure (3) shows the infant sucking vacuum pressure data in both raw and filtered forms for a duration of 120 seconds. The red line illustrates the original pressure data, while the data after filtering is presented as a green line. A close observation of the image shows that the filtered line is very close to the initial one while preserving the significant shifts and minimizing the noise; thus, it proves the adequacy of the filtering method employed.

Throughout the period, the pressure exhibits oscillation-like behavior, with sharp increases and decreases in values, typical of an infant sucking. This compatibility of the initial pressure vacuum signal with the filtered one illustrates the efficiency of the filtered data in replicating the pressure vacuum profile. Such precision is essential in ensuring that accurate models are developed as well as analyzing infant sucking patterns, which is one of the objectives of this research concerning the representation of data.

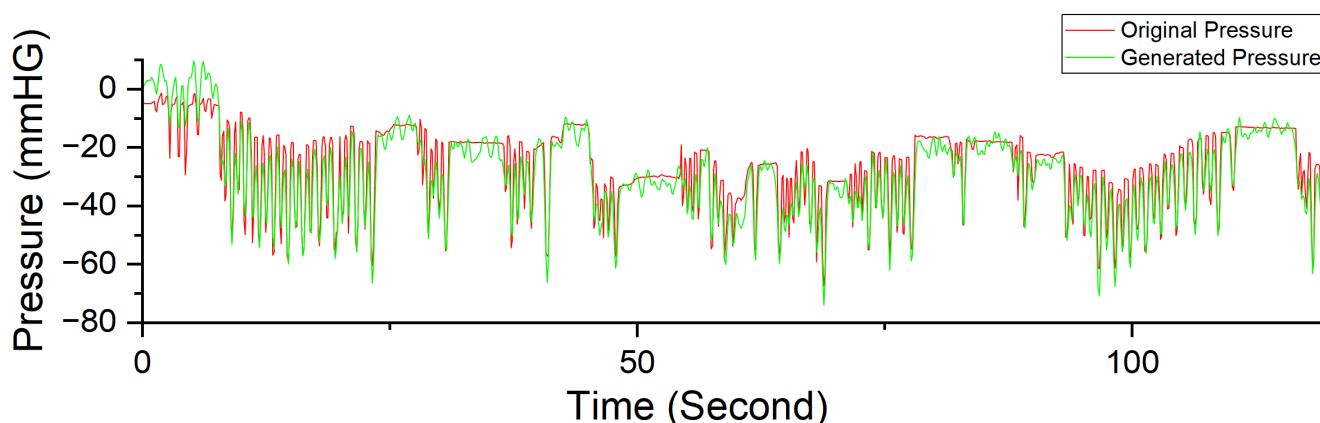


Figure 3. Original and generated sucking vacuum pressure.

Figure (4) presents the losses for both the generator and the critic throughout 30 epochs. In this context, the generator loss is illustrated with a green line, while the critical loss is shown in gray. In the first few epochs, both losses are exceptionally high and vary greatly, suggesting that the model is still in the process of ‘fine-tuning’ itself to the data.

With increased training, these fluctuations also decrease, and the losses begin to steady out, indicating that the training is reaching its airport. The trends of the loss curve for the generator in the later epochs show relatively smoother trends than in the earlier cycles, meaning that the device is progressively learning how to generate target data. On the other hand, the losses of the critic show the same trend; hence, the output of his network is adequate enough for the generator. This relationship between the generator and the critic plays a vital role in the WGAN replicating the infant-sucking vacuum pattern.

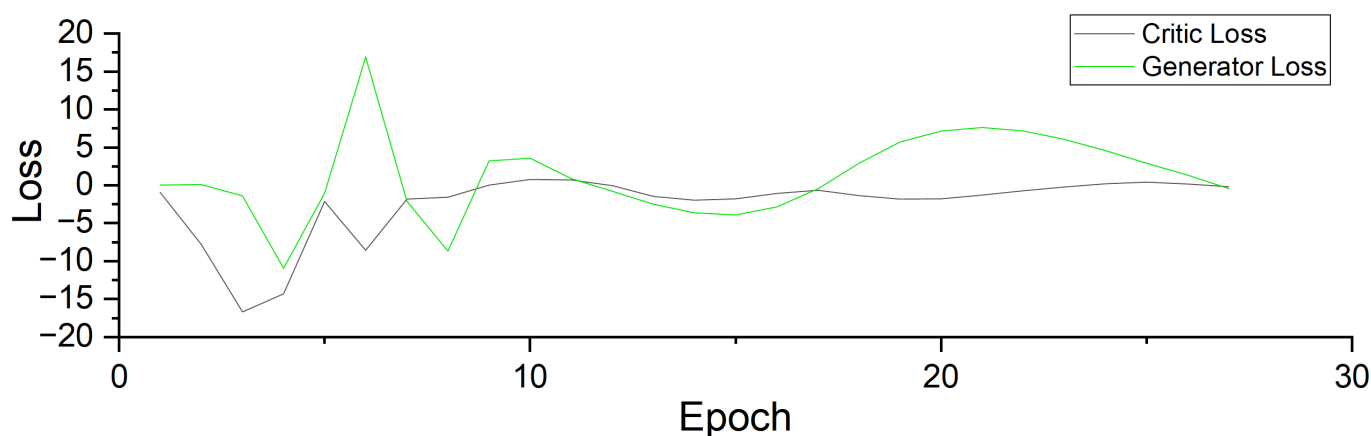


Figure 4. Generated and critic loss per epoch.

The evaluation metrics for the model's performance in simulating infant sucking vacuum pressure are illustrated in Table 1:

- Root Mean Squared Error (RMSE): 4.86. This is the model's mean square error for pressure values. The low MSE suggests that the model accurately captures the pressure variations without significant error.
- R – Squared Score (R^2): 0.93, which implies that the application of the model accounts for 93% of the variability in the data. This very high value of R^2 indicates that the predicted values from the model are closely aligned with the observed values from the experiment.
- Mean Absolute Deviation of Absolute Error (madAE):3.92, which provides an average absolute error deviation close to 4. This low madAE value is advantageous because it shows how close the model's predictions are to the actual values, proving its credibility.

Based on these parameters, the model delivers high accuracy in reproducing beating patterns of specific vacuum pressures relevant to infant-sucking simulations.

Table 1. Performance Metrics

RMSE	R^2	madAE
4.86	0.93	3.92

4. CONCLUSIONS

In this research, we illustrated how a Wasserstein Generative Adversarial Network (WGAN) was successfully employed in synthesizing infant suction vacuum pressure, a multi-dimensional complex behaviour associated with an infant's feeding ability. The WGAN paradigm provides a novel means of creating consistent time series data on the weights of physiologically relevant images by searching for the rhythm and oscillations seen during the pressure changes in sucking. The beauty of this model is not just limited to how well the real data features are reproduced but also includes the ability to create realistic-looking samples of the infant sucking that is evidenced by low MSE and high R^2 values.

In this case, the main benefit of using the WGAN model comes from the fact that it does not suffer from the weaknesses of ordinary GANs, especially mode collapse, because of employing the Wasserstein metric as a loss. This is very important for generating physiological data as there is a lot of variation that should be preserved within each generated sequence. The stable and consistent performance of the model is evidenced by the convergence behaviours of the generator and critic loss trends, which suggests that training was successful and there was meaningful interaction between the generator and critic networks. Therefore, the WGAN model is useful for appropriately simulating physiology processes that change over time, such as the infant sucking vacuum pressure.

The ability of the model to produce pressure data corresponding to infant feeding could offer considerable advantages in clinical and developmental studies. This method, for example, could be useful in designing devices for non-invasive observation of a subject's feeding activity and diagnosing abnormalities in this activity. As the model continues to be perfected, this data could

become the gold standard for what normal sucking looks like versus deviations from this normality, which is helpful in diagnosing feeding problems and is useful for clinicians.

Even so, it is important to highlight some areas for improvement in this research. The corpus of data employed for the model's training had a relatively low sample size, which may affect the ability to generalize the findings to a bigger sample of infants. Furthermore, the model considers only the suction pressure and neglects to assess vital parameters of feeding behaviour, such as swallowing or breathing, which all take place during the process of feeding. Future work seeking to build on this analysis should focus on improving the model by enriching its database and using different types of data.

To sum up, the current research highlights the efficacy of WGAN in creating artificial time-sequenced data for various physiological simulations focusing on infant feeding. This method provides a basis for reliable and cost-effective modelling of vacuum suction pressure, which positively impacts neonatal healthcare by introducing new ways of understanding and treating infant-feeding dynamics. In the long run, such a WGAN model could embody significant advancements in the knowledge of heightened interest in the feeding capabilities of infants and the improvement of the health systems for children.

LIMITATION

The availability of infant suction data for this study is perhaps the most limiting factor. This is primarily because the process of feeding a mother and her child is highly sensitive therefore data collecting becomes difficult. In addition to this, the field has little interest in the past research, which means there are fewer datasets that have been made available to the public or recorded scientifically. Generalizability of the findings is hindered by insufficient data and present simulation has limited realism. To overcome this problem, it will be necessary for the current research to find new, and responsible ways of gathering fuller information on how infants feed, possibly by observing but not disturbing those being studied.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally at every stage of the article.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest.

ETHICS

There is no ethical problem in the publication of this article.

ACKNOWLEDGMENT

A significant part of this paper includes the Master Thesis data of Fatih Furkan ARSLAN.

REFERENCES

- [1] M. Martell, G. Martínez, M. González, and J. L. D. Rosselló, "Suction patterns in preterm infants," *J Perinat Med*, vol. 21, no. 5, pp. 363–369, 1993, doi: <https://doi.org/10.1515/jpme.1993.21.5.363>.
- [2] A. M. Cannon, V. S. Sakalidis, C. T. Lai, S. L. Perrella, and D. T. Geddes, "Vacuum characteristics of the sucking cycle and relationships with milk removal from the breast in term infants," *Early Hum Dev*, vol. 96, pp. 1–6, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2016.02.003>.
- [3] C. Prieto, H. Cardenas, A. Salvatierra, C. Boza, C. Montes, and H. Croxatto, "Sucking pressure and its relationship to milk transfer during breastfeeding in humans," *Bioscientífica Ltd*, vol. 108, no. 1, pp. 69–74, Nov. 1996, doi: <https://doi.org/10.1530/jrf.0.1080069>.
- [4] D. T. Geddes, J. C. Kent, L. R. Mitoulas, and P. E. Hartmann, "Tongue movement and intra-oral vacuum in breastfeeding infants," *Early Hum Dev*, vol. 84, no. 7, pp. 471–477, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2007.12.008>.
- [5] D. T. Geddes and V. S. Sakalidis, "Breastfeeding: how do they do it? Infant sucking, swallowing and breathing," *Infant*, vol. 11, no. 5, pp. 146–150, 2015.
- [6] J. S. McGowan, R. R. Marsh, S. M. Fowler, S. E. Levy, and V. A. Stallings, "DEVELOPMENTAL PATTERNS OF NORMAL NUTRITIVE SUCKING IN INFANTS," *Dev Med Child Neurol*, vol. 33, no. 10, pp. 891–897, 1991, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1991.tb14798.x>.

- [7] L. Chen, R. F. Lucas, and B. Feng, "A Novel System to Measure Infants' Nutritive Sucking During Breastfeeding: the Breastfeeding Diagnostic Device (BDD)," *IEEE J Transl Eng Health Med*, vol. 6, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1109/JTEHM.2018.2838139.
- [8] D. T. Geddes, K. Chooi, K. Nancarrow, A. R. Hepworth, H. Gardner, and K. Simmer, "Characterisation of sucking dynamics of breastfeeding preterm infants: a cross sectional study," *BMC Pregnancy Childbirth*, vol. 17, no. 1, Nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.1186/s12884-017-1574-3>.
- [9] S. Akbarzadeh *et al.*, "Evaluation of Apgar Scores and Non-Nutritive Sucking Skills in Infants Using a Novel Sensitized Non-Nutritive Sucking System," *2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, pp. 4282–4285, 2020, doi: 10.1109/EMBC44109.2020.9176146.
- [10] A. J. Sameroff, "An apparatus for recording sucking and controlling feeding in the first days of life," *Psychon Sci*, vol. 2, no. 1, pp. 355–356, 1965.
- [11] P. Truong, E. Walsh, V. P. Scott, T. Coleman, G. Tilwawala, and J. Friend, "Non-Nutritive Suckling System for Real-Time Characterization of Intraoral Vacuum Profile in Full Term Neonates," *IEEE J Transl Eng Health Med*, vol. 11, pp. 107–115, 2023, doi: 10.1109/JTEHM.2022.3231788.
- [12] V. S. Sakalidis *et al.*, "Ultrasound Imaging of Infant Sucking Dynamics during the Establishment of Lactation," *Journal of Human Lactation*, vol. 29, no. 2, pp. 205–213, 2013, doi: 10.1177/0890334412452933.
- [13] L. Jiang and F. Hassanipour, "Bio-Inspired Breastfeeding Simulator (BIBS): A Tool for Studying the Infant Feeding Mechanism," *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 67, no. 11, pp. 3242–3252, 2020, doi: 10.1109/TBME.2020.2980545.
- [14] I. Gulrajani, F. Ahmed, M. Arjovsky, V. Dumoulin, and A. C. Courville, "Improved Training of Wasserstein GANs," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, I. Guyon, U. Von Luxburg, S. Bengio, H. Wallach, R. Fergus, S. Vishwanathan, and R. Garnett, Eds., Curran Associates, Inc., 2017. [Online]. Available: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/892c3b1c6dcd52936e27cbd0ff683d6-Paper.pdf
- [15] M. Arjovsky, S. Chintala, and L. Bottou, "Wasserstein Generative Adversarial Networks," in *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, D. Precup and Y. W. Teh, Eds., in Proceedings of Machine Learning Research, vol. 70. PMLR, Nov. 2017, pp. 214–223. [Online]. Available: <https://proceedings.mlr.press/v70/arjovsky17a.html>
- [16] S. Brahmbhatt, *Practical OpenCV*, no. 2. Apress, 2013.
- [17] I. Goodfellow *et al.*, "Generative adversarial networks," *Commun ACM*, vol. 63, no. 11, pp. 139–144, 2020.
- [18] J. Xu, Z. Li, B. Du, M. Zhang, and J. Liu, "Reluplex made more practical: Leaky ReLU," in *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2020, pp. 1–7. doi: 10.1109/ISCC50000.2020.9219587.
- [19] M. M. Lau and K. Hann Lim, "Review of Adaptive Activation Function in Deep Neural Network," in *2018 IEEE-EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES)*, 2018, pp. 686–690. doi: 10.1109/IECBES.2018.8626714.
- [20] P. Baldi and P. J. Sadowski, "Understanding Dropout," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, C. J. Burges, L. Bottou, M. Welling, Z. Ghahramani, and K. Q. Weinberger, Eds., Curran Associates, Inc., 2013. [Online]. Available: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2013/file/71f6278d140af599e06ad9bf1ba03cb0-Paper.pdf
- [21] A. D. Rasamoelina, F. Adjailia, and P. Sinčák, "A Review of Activation Function for Artificial Neural Network," in *2020 IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMi)*, 2020, pp. 281–286. doi: 10.1109/SAMI48414.2020.9108717.



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: XXXX-XXXX

Araştırma Makalesi/Research Article

Yozgat ili topoğrafik ıslaklık indeksinin (TWI) coğrafi bilgi sistemleri ile belirlenmesi

Ömer Faruk KARACA¹

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

Kabul tarihi

Yayın tarihi

Anahtar Kelimeler:

CBS
DEM
TWI
Topoğrafik
Yozgat

ÖZET

Topoğrafik ıslaklık indeksi (TWI), topoğrafik anlamda suya doymun alanların mekânsal dağılımlarının ve boyutlarının ifade edilmesi amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek TWI, belirli bir alanda daha fazla nemin olduğunu ve su hareketinin aşağı doğru eğilimini, dolayısıyla taşkın olaylarına daha yatkın olduğunu gösterir. Bu çalışmada amaç, son zamanlarda yaygın olarak kullanılan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile bölge TWI haritasının oluşturulmasıdır. Bu amaçla SRTM DEM adresinden elde edilen 30 m çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli ile suya doymun olan veya sulu alanlarının mekânsal dağılımları belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçta, topoğrafyanın zemin nemliliği üzerindeki ve eğimin hidrolojik süreçler üzerindeki etkisini ortaya konulmuştur. Çalışma alanı eğim değerleri 0-70°, yükselti ise 580 - 2360 m arasında değişiklik göstermektedir. Eğim açısından bakıldığında, en fazla eğim yüzdesi (%50.74) 0°-5° değere sahip yerlerde olduğu belirlenmiştir. Buna bağlı olarak eğim derecesi arttıkça kapladığı alan yüzdesinde de azalış olduğu tespit edilmiştir. Bakı değerlerinde ise Güneydoğu, güney ve güneybatı yönleri toplam arazinin yaklaşık %41.38; kuzey, kuzeydoğu ve kuzeybatı yönleri %29.77'lik kısmını kapsamaktadır. Akış birikimine göre, en yüksek değer ve alanın güney (%16.66) yönünde olduğu belirlenmiştir. En az yer kaplayan yön ise %8.99 ile kuzeydoğu yönü olmuştur. Değerlerin büyük bir çoğunluğu %10-16 arasında değişiklik göstermektedir. TWI haritasına göre kurun alanlarda toplamda en yüksek değere 1084.31 km² ile Merkez ilçede, en düşük değere 58,84 km² ile Yenifakılı ilçesinde rastlanmıştır. Islak alanın toplamda en fazla 1128.65 km² ile Boğazlıyan ilçesinde, en düşük ise 144.29 km² ile Çandır ilçesinde olduğu belirlenmiştir.

Determination of topographic wetness index (TWI) of Yozgat province using geographic information systems

ARTICLE INFO

Article history:

Received

Accepted

Published

Keywords:

GIS
DEM
TWI
Topographic
Yozgat

ABSTRACT

The topographic wetness index (TWI) is widely used to express the spatial distribution and dimensions of water-saturated areas in the topographic sense. A high TWI indicates that there is more moisture in a certain area and that water movement tends downward, thus being more prone to flood events. The aim of this study is to create a regional TWI map with Geographic Information Systems (GIS), which has been widely used recently. For this purpose, the spatial distribution of water-saturated or irrigated areas was tried to be determined with the digital elevation model with 30 m resolution obtained from SRTM DEM address. As a result, the effect of topography on soil moisture and slope on hydrological processes was revealed. The slope values of the study area vary between 0°-70° and the elevation between 580 - 2360 m. When examined in terms of slope, it was determined that the highest slope percentage (50.74%) was in places with 0°-5° values. Accordingly, it was determined that as the slope degree increased, the percentage of the area it covered decreased. In terms of aspect values, the southeast, south and southwest directions cover approximately 41.38% of the total land; the north, northeast and northwest directions cover 29.77%. According to flow accumulation, the highest value and area was determined to be in the south (16.66%) direction. The direction covering the least area was the northeast direction with 8.99%. The majority of the values vary between 10-16%. According to the TWI map, the highest value in total dry area was found in the Central District with 1084.31 km², and the lowest value was found in the Yenifakılı District with 58.84 km². It was determined that the total wet area was the highest in Boğazlıyan district with 1128.65 km², and the lowest in Çandır district with 144.29 km².

ORCID ID: Yazarl: 0000-0002-6302-9738

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): ¹Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye
Tel:+90 542 844 01 04.
Fax: +90 0 354 242 10 94 7 4456.
E-mail: omerf.karaca@yobu.edu.tr

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: Karaca, Ö.F., "Yozgat ili topoğrafik ıslaklık indeksinin (TWI) coğrafi bilgi sistemleri ile belirlenmesi". Bozok Journal of Engineering and Architecture 2024; 3 (2), 87-98

1. GİRİŞ

Topoğrafik ıslaklık indeksi (TWI), bileşik topoğrafik indeksi (CTI) olarak da bilinir, sabit durum ıslaklık indeksidir. İlk defa [1] tarafından ortaya atılmıştır. Topoğrafik anlamda suya doygun alanların mekânsal dağılımlarının ve boyutlarının ifade edilmesi amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [2,3,4]. Arazinin eğimi ve akış birikimi kullanılarak hesaplanır ve çoğunlukla arazinin yüksek veya düşük toprak nem içeriğine sahip alanlarını belirlemede kullanılmaktadır. Topoğrafyanın zemin nemliliği üzerindeki ve eğimin hidrolojik süreçler üzerindeki etkisini ortaya koyar. Aynı zamanda bu etki akış halinde olan suyun yerelde ne kadar yer değiştirdiğini ifade etmesinin yanı sıra kaynak alanlarda gömlenen suyun ve karın topoğrafik koşullara bağlı gelişiminin de ifadesidir. TWI, hassas tarımla doğrudan ilgili birçok çalışmada önemli bir parametre olarak ele alınmıştır [5,6].

Toprak nemi boşluktaki suyu basıncına neden olur ve özellikle şev kırılmasını kontrol eden toprak direncini düşürür [7]. Belirli bir havza açısından TWI, belirli bir noktada biriken su eğilimini açıklar ve yerel eğimde yerçekimi kuvvetlerinin su hareketi üzerindeki etkisini de göstermektedir [8]. Elde edilen yüksek TWI değerleri, topoğrafyaya da bağlı olacak şekilde genellikle yüksek toprak neminin olduğu alanları ifade etmektedir [9].

TWI değerleri düşük olan yerlerde geçirgenlik düşük, yüksek olan yerlerde ise geçirgenlik de yüksektir. Düşük TWI değeri, su birikiminin daha az değişimini ve daha yüksek su hareketini gösterir. Yüksek TWI değerleri ile taşkın olayları arasında güçlü bir korelasyon bulunmaktadır. TWI arttıkça belirli bir alandaki nem miktarı da artar ve su hareketi yerçekimi etkisiyle aşağı doğru hareket etmeye başlar. Bu durum, o bölgenin sahip olduğu yüksek doygunluk seviyesi nedeniyle taşkın olaylarına da daha yatkın olduğunu göstermektedir [10].

Bu yaklaşımda homojen ve izotrop bir ortam ile tek tip zemin koşulu varsayımlarını dikkate alınarak aşağıda verilen Denklem 1 ile ifade edilmiştir.

$$TWI = \ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

Burada;

A_s = Kullanılan harita biriminin alanı (m^2m^{-1})

β = Yamaç Eğimi ($^\circ$)

TWI değerleri heyelan oluşumunu da etkilemektedir [5,11,12]. Yüzeysel akışa bağlı olarak topoğrafyanın ne derece ıslak olduğunu ifade eden bağıl topoğrafik ıslaklık indeksi arazinin nemli, kuru ve ıslak olup olmadığı konusunda bilgilendirmektedir. Arazide ıslaklık durumu arttığı özellikle yamaçlarda, eğer diğer durumlar da uygunsa, toprak kayması daha hızlı ve kolay olmaktadır [13].

TWI, özellikle hidrolojik süreçlerdeki topoğrafik kontrolü ölçmek için kullanılan bir ölçüttür [14]. Hem eğimin hem de akış yönüne dik birim genişlik başına katkıda bulunan alanın bir fonksiyonudur. İndeks, yamaç katenaları için tasarlanmıştır. Düz alanlardaki birikim sayıları çok büyük olacağından, TWI ilgili bir değişken olmayacaktır. İndeks, ufuk derinliği, silt yüzdesi, organik madde içeriği ve fosfor gibi çeşitli toprak nitelikleriyle yüksek oranda ilişkilidir [15]. Bu indeksi hesaplama yöntemleri, öncelikle yamaç yukarı katkıda bulunan alanın hesaplanma biçiminde farklılık göstermektedir.

TWI kavramı, zamanla değişme olasılığı daha yüksek olan oldukça tanımsız akış yönleri nedeniyle düz alanlarda daha az uygundur. Sayısal yükseklik modeline (DEM) ek olarak meteorolojik ve hidrolojik verilerin mevcut olduğu durumlarda, daha dinamik bir yaklaşım yararlı olabilmektedir. Dikey DEM hassasiyeti ve doğruluğuna ek olarak, TWI'nin DEM hücre boyutu, akış yönü algoritması, eğim algoritması ve ilgili toprak özelliklerinin dahil edilmesi gibi birçok başka faktöre duyarlı olduğunu göstermektedir [14,16].

TWI'nin doğruluğu, herhangi bir hidrolojik modelde olduğu gibi, yüzey topoğrafyasına da bağlıdır. Yüksek mekansal çözünürlüğe sahip bir DEM'in varlığı, kentsel bir havza için ayrıntılı bir mekansal hidrolojik modelin daha doğru bir şekilde uygulanmasını sağlar. Bu nedenle, uygun bir TWI geliştirmek ve taşkın eğilimli (ıslak) bir alanın sınırlarını belirlemek için hidrolojik olarak sağlam bir DEM'e ihtiyaç vardır [8].

LANDSAT TM; LANDSAT ETM +; AVHRR; MODIS ve ASTER gibi uyduların her biri çok sayıda dijital ürün sunmakta ve elektromanyetik spektrumun belirli bir dalga boyunda radyan enerjisi tespit etmektedir [31]. Farklı çözünürlüklere sahip DEM'ler ile oluşturulan TWI yardımıyla su baskını süreçlerinin daha iyi bir doğrulukla simüle edilebilmektedir [17]. DEM verileri hidrolojik çalışmalarda; su akış yönlerinin belirlenmesi, drenaj ağlarının çıkartılması, havza ve alt havza sınırlarının belirlenmesi, havza karakteristik özelliklerinin belirlenmesi, sediment taşınımına yönelik araştırmalar, topoğrafik nemlilik indeksi vb. birçok çalışmada etkin bir biçimde kullanılabilir. DEM'in çözünürlüğü arttıkça elde edilebilecek sonuçlar da daha başarılı olacaktır.

TWI, belirli bir noktaya doğru akan suyun bir ölçüsü olarak eğim yukarı alanını, yeraltı yanal geçirgenliğinin bir ölçüsü olan yerel eğime ilişkilendirir [1]. TWI kavramı birçok popüler hidrolojik modele [18,19] ve kirlilik risk endekslerine [20,21,22,23] entegre edilmiştir.

TWI çoğunlukla hidrolojik süreçler üzerindeki mekansal ölçekli etkileri incelemek ve jeo-kimyasal modelleme için hidrolojik akış yollarını belirlemek, ayrıca yıllık net birincil üretim, bitki örtüsü desenleri ve orman alanı kalitesi gibi biyolojik süreçleri karakterize etmek için kullanılmıştır. Çiftçilere drenaj, sulama, ürün seçimi ve koruma yönetimi uygulamalarını optimize etmeleri için değerli bilgiler sağlayabilir ve bu da tarımsal üretkenliği ve sürdürülebilirliği iyileştirmeye yardımcı olabilmektedir.

Drenaj yönetimi açısından TWI, çiftçilerin tarlalarının su basmasına eğilimli olan alanlarını belirlemelerine yardımcı olabilir; bu da ürün veriminin azalmasına veya hatta ürün başarısızlığına yol açabilir. Çiftçiler tarlalarının farklı kısımlarındaki toprağın ıslaklığını anlayarak, drenaj ağları oluşturmak veya suyu hassas alanlardan uzağa yönlendiren kanallar oluşturmak gibi drenaj yönetimi uygulamaları hakkında kararlar alabilirler.

Sulama yönetimi açısından TWI, tarlanın sulamaya daha fazla veya daha az ihtiyaç duyma olasılığı olan alanlarını belirlemek için de kullanılabilir. Çiftçiler, sulama işlemini düşük TWI değerlerine sahip alanlara odaklayarak su kullanım verimliliğini optimize edebilir ve aşırı sulama riskini azaltabilirler.

Ürün seçimi açısından TWI, çiftçilerin tarlalarının farklı kısımları için en uygun ürünleri seçmelerine yardımcı olabilir. Islak topraklara dayanıklı ürünler yüksek TWI değerlerine sahip alanlar için daha uygun olabilirken, iyi drene edilmiş toprak gerektiren ürünler düşük TWI değerlerine sahip alanlar için daha uygun olabilir.

Koruma yönetimi açısından TWI, erozyona veya tortulaşmaya eğilimli arazi alanlarını belirlemek için de kullanılabilir. Çiftçiler, örtü bitkileri veya azaltılmış toprak işleme gibi koruma uygulamalarına odaklanarak, toprak verimliliğini korumaya ve yakındaki su yollarına besin akışını azaltmaya yardımcı olabilir.

Bu çalışmada amaç, son zamanlarda yaygın olarak kullanılan CBS ile bölge TWI haritasının oluşturulmasıdır. Bu amaçla SRTM DEM adresinden elde edilen 30 m çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli ile suya doygun olan veya sulu alanlarının mekânsal dağılımları belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçta, topoğrafyanın zemin nemliliği üzerindeki ve eğimin hidrolojik süreçler üzerindeki etkisini ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Materyal

2.1.1. Çalışma alanı

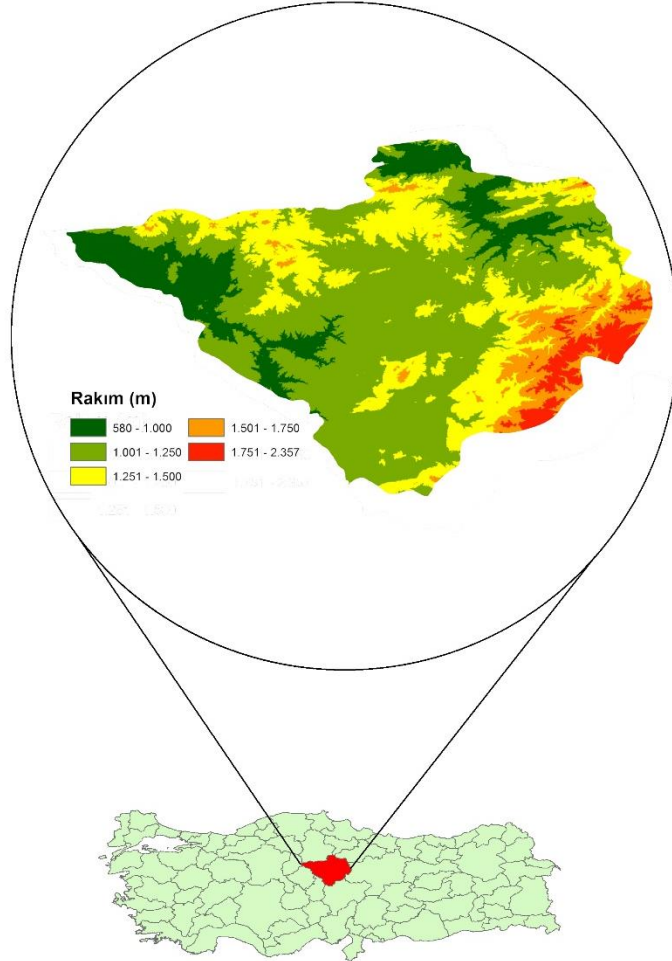
Yozgat ili, Orta Anadolu Bölgesi'nin Orta Kızılırmak bölümünde Bozok Platosu üzerinde yer almaktadır. Yozgat, doğuda Çorum, Amasya, Tokat, Sivas, güneyde Kayseri, Nevşehir, batıda Kırşehir ve Kırıkkale illeriyle çevrilidir. Türkiye'nin merkezinde bulunan bir ildir. İlin denizden yüksekliği 1300 m olup, iz düşüm alanı 13.690 km² ve toplam alanı ise 14037 km²'dir. Toprak genişliği açısından 81 il arasında 15. Sırada yer almaktadır.

İklimsel olarak kışlar daha soğuk ve sert geçmesine karşın yazları kurak ve daha sıcaktır. İle ait uzun yıllar iklim değerleri tablo 1'de verilmiştir. En sıcak aylar Temmuz ve Ağustos'tur. Sert iklim koşulları, Yeşilirmak havzasına giren Çekerek Vadisi'nde biraz yumuşamakta, az da olsa Karadeniz ardi ikliminin etkileri görülmektedir [24]. İlin büyük bir kısmı (%51.4) platolarla kaplıdır. Dağlar yeryüzü şekillerinin %37.7'sini oluşturur. İl yüzölçümünün %10.9'unu kaplayan ovalar, genellikle, Yeşilirmak Havzası'na giren Çekerek Vadisi'nde toplanmıştır. İlde hububat ekiminin yanı sıra nadas uygulamasının yerine nohut ve mercimek ekimi yapılabilmektedir. Hayvancılığın geliştirilmesi için yem bitkileri tarımına ve çayır-mera kültürüne önem verilmektedir.

Türkiye ölçeğinde Yozgat ili yeşil mercimek üretiminde 1. sırada, şekerpancarı üretiminde 2. sırada ve buğday üretiminde 5. Sırada yer almaktadır. Toplam alanın yaklaşık %42 kadarı tarla arazisi, %1 kadarı ise bağ-bahçe arazisi olarak kullanılmaktadır. Patates ve soğan gibi ürünlerin yanında elma, armut, ayva, üzüm, kayısı ve zerdali gibi meyve türleri de yetiştirilmektedir.

Tablo 1. Yozgat ili uzun yıllar ortalama iklim değerleri [25]

YOZGAT	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm Periyodu (1929-2023)													
Ort. Sıc. (°C)	-1.7	-0.6	3	8.5	13.1	16.7	19.6	19.8	15.9	10.8	5.1	0.7	9.2
Ort. Maks. Sıc. (°C)	2.2	3.7	8.1	14	18.9	22.7	26	26.5	22.7	17	10.4	4.6	14.7
Ort. Min. Sıc. (°C)	-5.3	-4.6	-1.5	3.2	7.4	10.5	12.9	13.1	9.5	5.4	0.7	-2.6	4.1
Ort. Güneş. (saat)	3	4.1	5.1	6.3	7.9	9.7	10.8	10.5	8.8	6.5	4.7	3	6.7
Ort. Yağışlı Gün Sayısı	13.51	12.7	13.5	12.81	13.46	9.24	2.99	2.3	3.87	7.19	8.91	13.29	113.8
Aylık Top. Yağış Ort.(mm)	68	59.5	69.4	58.3	66	45.9	12.5	11.2	18.1	33.2	54	75.3	571.4
Ölçüm Periyodu (1929-2023)													
Maks. Sıc. (°C)	15.4	18.5	25	29.5	31.4	33.4	38.8	37.4	35.4	30.1	22.9	18.2	38.8
Min. Sıc. (°C)	-23.7	-24.4	-20.6	-12.6	-3	-0.4	3	3.7	-2.4	-6.8	-18.5	-20.2	-24.4

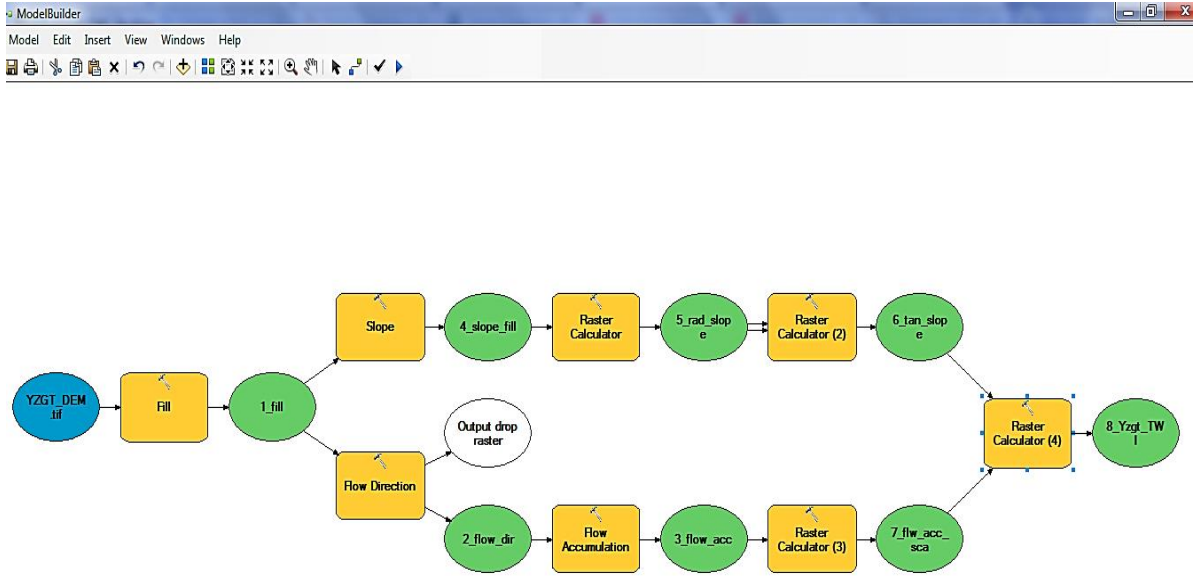
**Şekil 1.** Çalışma alanı lokasyon haritası

2.2. Yöntem

2.2.1. Topoğrafik haritalar

İl sınırını belirleyen .shp uzantılı sayısal haritalar, Harita Genel Komutanlığı (HGK) adresinden temin edilmiştir [26]. Dem verileri ise, Shuttle Radar Topoğrafya Misyonu (SRTM) DEM adresinden elde edildi. SRTM, yükseklik haritalarının en kapsamlılarından biridir, NASA'nın SRTM, Dünya yüzeyinin çoğunlukla %80'ini kaplar ve küresel çözünürlüğü 30 m'dir [27] [28].

İlk olarak elde edilen DEM haritasının boşluk kısımlarının doldurulması, akış yönü ve akış birikim parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ArcGIS programında Spatial Analyst - Hydrology sekmesinden gerekli komutlar kullanılmıştır. Gerekli eğim haritaları DEM haritasından Spatial Analyst - Surface içerisindeki slope komutunun kullanılması ile elde edilmiştir. Eğim haritaları yüzdeler olarak değil de derece cinsinden oluşturulmuştur. Diğer hesaplamalar ise yine Spatial Analyst içerisindeki map algebra komutunun kullanılması ile elde edilmiştir. Kullanılan tüm parametreler model builder aracı ile oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan işlem sırası Şekil 2'de verilmiştir.

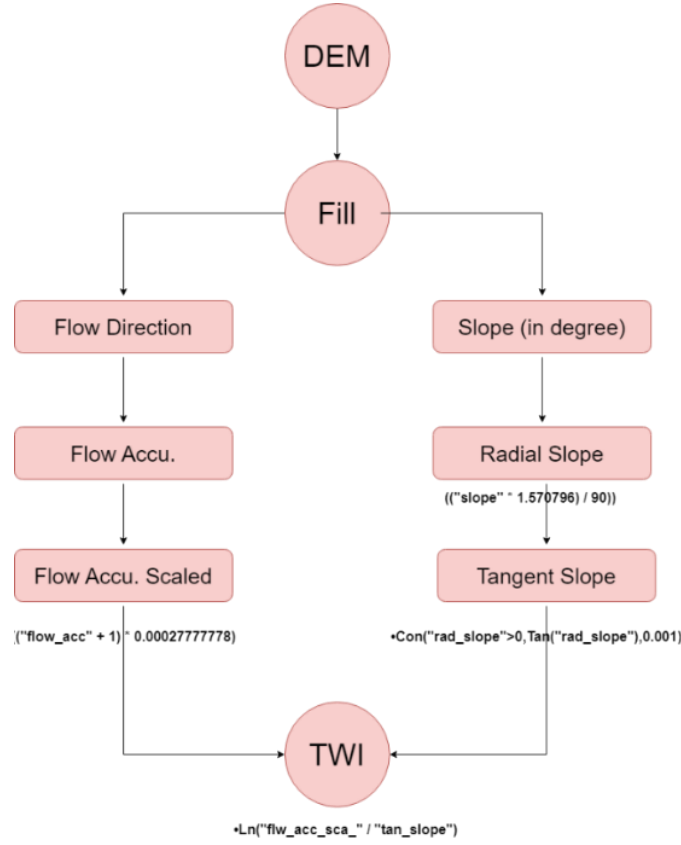


Şekil 2. Model builder içerisinde oluşturulmuş işlem sırası

Son olarak elde edilen TWI haritası alt sınıflara bölünerek, en yüksek ve en düşük ıslaklık içeriğine sahip alanlar Yozgat ili düzeyinde belirlenmeye çalışılmıştır.

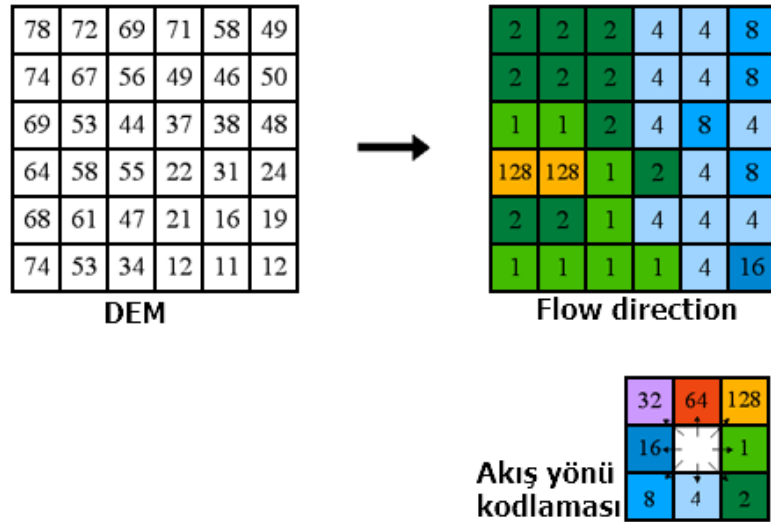
2.2.2. Topoğrafik ıslaklık indeksi (TWI)

SRTM DEM 30 m çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modelinin ArcGIS yazılımında işlenmesinde boş alanların doldurulması amacıyla fill; akış yönü tespitinde flow direction; akış bitikiminde flow accumulation; eğim, radyan ve tanjantı tespitinde slope komutları ile elde edilen diğer haritalarında kendi aralarında sayısal işlemlerinde ise map algebra komutları kullanılmıştır. Tüm bu işlemleri gösterir formül ve akış şeması ise Şekil 3'te verilmiştir.



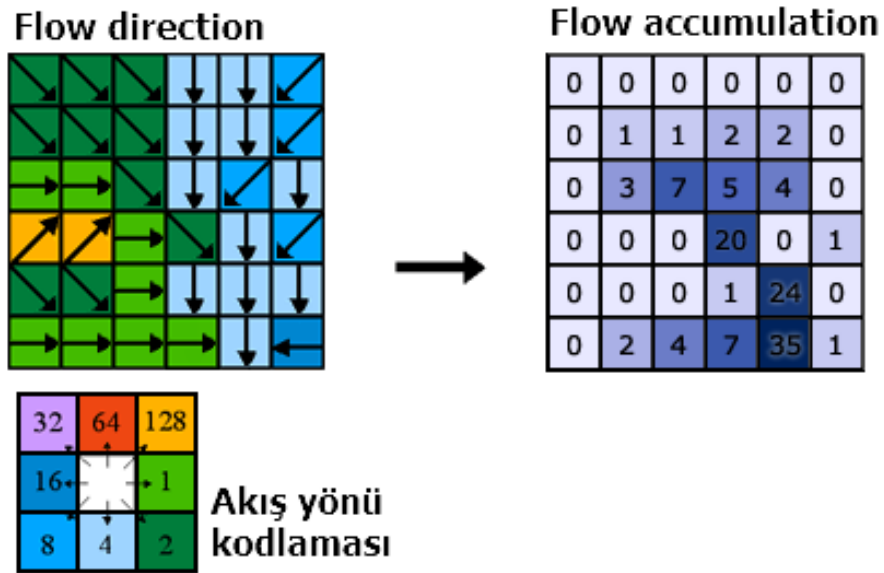
Şekil 3. TWI eldesinde kullanılan formül akış şeması

Akış yönü aracı, DEM verisinde her bir hücrenin (pixel) hangi komşu hücreye doğru en dik eğime sahip olacağını hesaplamaktadır. DEM verisindeki herhangi bir noktaya düşen yağmur damlasının hangi yöne doğru akışa geçeceğini belirlemektedir. Daha sonra belirlenen yönler göre her bir piksel'e o yöne ait bir kod atamaktadır. Verideki pikselde akış yönüne göre hücrelere atanan değerler ise sırasıyla: Doğu = 1, Güneydoğu = 2, Güney = 4, Güneybatı = 8, Batı = 16, Kuzeybatı = 32, Kuzey = 64, Kuzeydoğu = 128'dir [29] (Şekil 4).



Şekil 4. Akış yönüne göre hücrelere atanan değerlerin gösterimi

Akış birikimi aracı, her bir hücrenin akış yönüne göre gerçekleştirdiği hesaplama sonucunda, çalışma sahasındaki yüksek alanlara tekabül eden raster hücrelerine düşük değer, akışın birikeceği çukur alanları ifade eden raster hücrelerine ise yüksek değer vererek, drenaj ağını oluşturmaktadır [29] (Şekil 5).

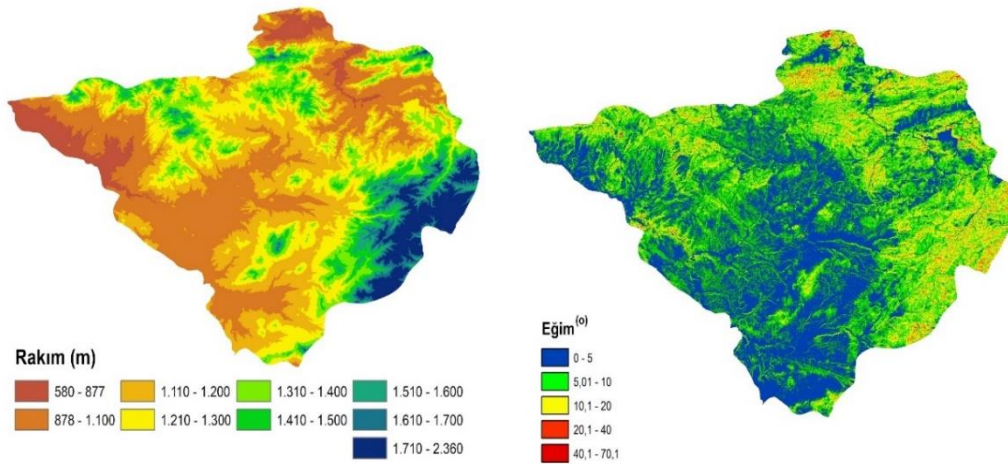


Şekil 5. Akış yönünden oluşturulan akış birikim grafiği gösterim

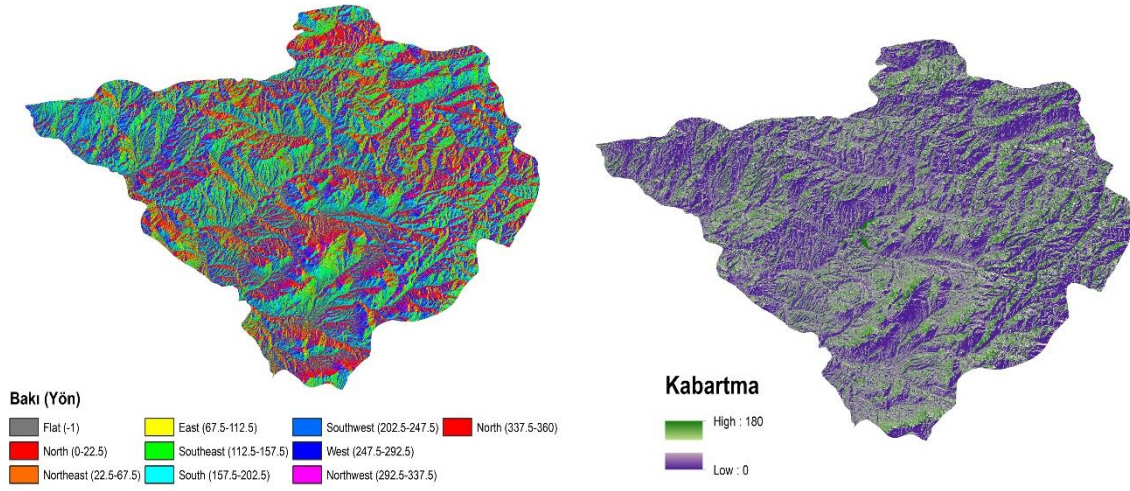
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Topoğrafik Haritalar

SRTM DEM uydusundan elde edilen DEM haritasından eğim haritası türetilmiştir. Elde edilen DEM ve eğim haritaları Şekil 6, bakı ve kabartma haritaları ise Şekil 7’de verilmiştir. Haritaların çözümlenmesi ve sayısallaştırılması ile elde edilen sınıf ve yüzde değerleri ise Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 6’da görüldüğü üzere il genelinde yükseklik değerleri 580 - 2380 m arasında değişiklik göstermektedir. Eğim değerleri ise 0° - 70.1° arasında değişiklik göstermektedir.



Şekil 6. Yozgat ili DEM ve eğim haritaları



Şekil 7. Yozgat ili bakı ve kabartma haritaları

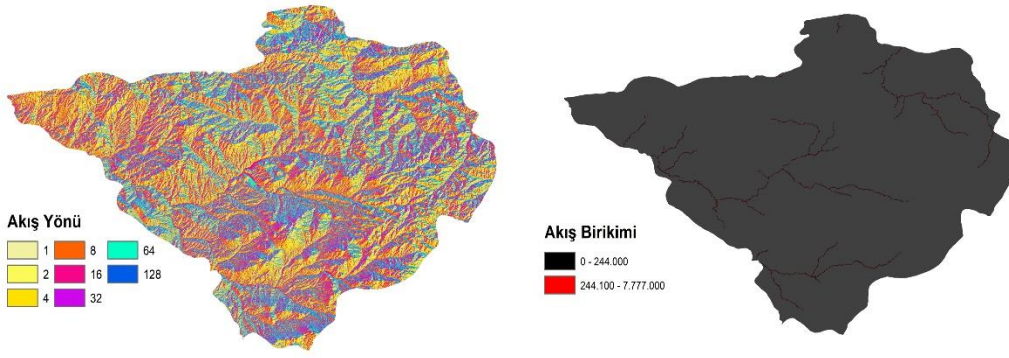
Tablo 2’de görüldüğü üzere il genelinde kapladığı alan açısından 1101 - 1200 m yükseltiye sahip yerler toplam alanın %22.91’lik, 1601-1700 m yükseltiye sahip alanlar ise toplam alanın %2.60’lık bir kısmını kaplamaktadır. İl genelinde 878 - 1400 m yükseltiye sahip bölgeler toplam alanın yaklaşık %69.26’sını oluşturmaktadır. Eğim açısından bakıldığında, en fazla eğim yüzdesinin (%50.74) 0° - 5° değere sahip yerlerde olduğu belirlenmiştir. Buna bağlı olarak eğim derecesi arttıkça kapladığı alan yüzdesinde de azalış olduğu tespit edilmiştir. Eğimi 20° - 68.3° olan alanlar ise toplam alanın yaklaşık %2.14’lük gibi çok küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Bakı değerlerinde Güneydoğu, güney ve güneybatı yönleri toplam arazinin yaklaşık %41.38; kuzey, kuzeydoğu ve kuzeybatı yönleri %29.77’lik kısmını kapsamaktadır. Bu durumda ilin güney yön eğiliminin diğer yönlere göre daha fazla olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 2. Yozgat ili DEM, eğim ve bakı haritalarının kapladığı alan ve yüzde değerleri

DEM		Eğim		Bakı		Yön
Aralık	Yüzdesi	Aralık	Yüzdesi	Aralık	Yüzdesi	
0-576	5.52	0-5	50.74	-1	1.88	Düz
577-877	8.76	5.01-10	28.80	0-22.5	6.03	Kuzey
878-1100	17.34	10.01-15	13.10	22.5-67.5	10.05	Kuzeydoğu
1101-1200	22.91	15.01-20	5.22	67.5-112.5	8.82	Doğu
1201-1300	18.32	20.01-25	1.56	112.5-157.5	12.62	Güneydoğu
1301-1400	10.69	25.01-30	0.36	157.5-202.5	15.81	Güney
1401-1500	5.78	30.01-35	0.09	202.5-247.5	12.95	Güneybatı
1501-1600	3.23	35.01-40	0.05	247.5-292.5	11.21	Batı
1601-1700	2.60	40.01-45	0.04	292.5-337.5	13.69	Kuzeybatı
1701-2360	4.85	45.01-68.3	0.04	337.5-360	6.93	Kuzey

3.2. Topoğrafik Islaklık İndeksi (TWI)

SRTM DEM 30 m çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modelinin ArcGIS yazılımında Şekil 5’te verilen akış şemasının uygulanması ile elde edilen akış yönü ve akış birikimi sonuçları Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 9’da ise DEM haritasından oluşturulan eğim derece haritası ile bu eğimden türetilen radyan ve tanjant eğim haritaları verilmiştir.

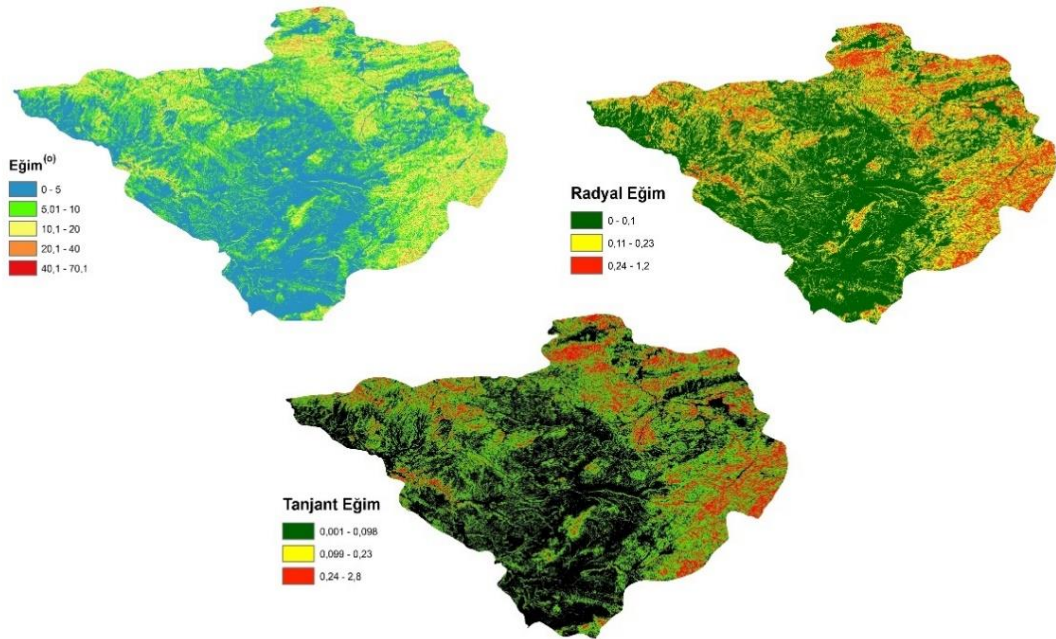


Şekil 8. DEM'den türetilen akış yönü ve akış birikimi haritası

Akış birikiminde sayısal değere sahip pixel'lerin sayısallaştırılması sonucu elde edilen nehir çizgileri aynı zamanda sahaya ait drenaj ağını da temsil etmektedir. Buradan çalışma alanında suyun birikebileceği yerler de kolaylıkla tahmin edilebilmektedir. Akış yönü haritasının sayısallaştırılması sonucu elde edilen yönler ve yüzde değerleri ise Tablo 3'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi, akışlarda en yüksek değer ve alanın güney (%16.66) yönünde olduğu belirlenmiştir. En az yer kaplayan yön ise %8.99 ile kuzeydoğu yönü olmuştur. Değerlerin büyük bir çoğunluğu %10-16 arasında değişiklik göstermektedir.

Tablo 3. Akış yönü haritasında pixel hücrelerde akış yönüne göre hücrelere atana değerler

Değeri	Yönler	Alan (km ²)	Yüzde
1	Doğu	1294.63	9.46
2	Güneydoğu	1501.50	10.97
4	Güney	2281.26	16.66
8	Güneybatı	1650.09	12.05
16	Batı	2011.23	14.69
32	Kuzeybatı	1654.85	12.09
64	Kuzey	2065.99	15.09
128	Kuzeydoğu	1230.45	8.99

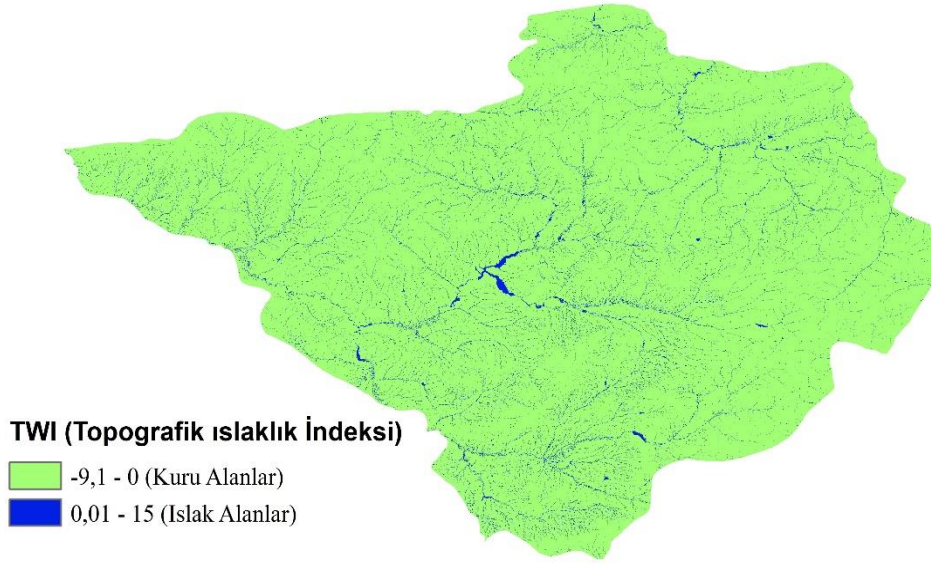


Şekil 9. DEM'den türetilen Yozgat ili eğim, radyal eğim ve tanjant eğim haritaları

Tablo 4'te ise DEM verisinden türetilmiş TWI haritası yardımıyla ilçelere göre elde edilen ıslak ve kuru alan miktarları verilmiştir. Elde edilen TWI haritası ise Şekil 10'da verilmiştir. Toplamda en yüksek kuru alan değeri Merkez ilçede 1084.31 km² olarak tespit edilmiştir. En düşük kuru alanın, 58.84 km² ile Yenifakılı ilçesinde olduğu belirlenmiştir. ıslak alana toplamda en fazla 1128.65 km² ile Boğazlıyan ilçesinde, en düşük değere ise 144.29 km² ile Çandır ilçesinde rastlanmıştır.

Tablo 4. İlçelere göre ıslak ve kuru alan miktarları

İlçe Adı	Toplam Alan (km ²)	
	Kuru Bölge	Islak Bölge
Akdağmadeni	1038.609	771.324
Aydıncık	168.902	169.098
Boğazlıyan	386.348	1128.652
Çandır	60.712	144.288
Çayıralan	565.722	429.278
Çekerek	410.654	379.346
Kadıışehri	287.040	184.960
Merkez	1084.314	939.686
Saraykent	167.270	151.730
Sarıkaya	417.459	600.541
Sorgun	1053.812	714.188
Şefaati	409.794	472.206
Yenifakılı	58.840	331.160
Yerköy	644.469	519.531

**Şekil 10.** Yozgat ili TWI değişim haritası

4. SONUÇLAR

CBS yardımıyla Yozgat ili STRM DEM 30 m çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli ile suya doymun olan veya nemli alanlarının mekânsal dağılımlarının belirlenmesi bünyesinde TWI haritasının oluşturulması amaçlanan bu çalışma sonucunda, il genelinde yükseklik değerlerinin 580 - 2380 m arasında, eğim değerlerinde 0°-70.1° arasında değiştiği tespit edilmiştir.

İl genelinde 878 - 1400 m yükseltiye sahip bölgeler toplam alanın yaklaşık %69.26'sını oluşturmaktadır. Eğim açısından bakıldığında, en fazla eğim yüzdesinin (%50.74) 0°-5° değere sahip yerlerde olduğu belirlenmiştir. Buna bağlı olarak eğim derecesi arttıkça kapladığı alan yüzdesinde de azalış olduğu tespit edilmiştir. Eğimi 20° - 68.3° olan alanlar ise toplam alanın yaklaşık %2.14'lük gibi çok küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Bakı değerlerinde Güneydoğu, güney ve güneybatı yönleri toplam arazinin yaklaşık %41.38; kuzey, kuzeydoğu ve kuzeybatı yönleri %29.77'lik kısmını kapsamaktadır. Bu durumda ilin güney yön eğiliminin diğer yönlere göre daha fazla olduğu söylenebilmektedir.

Akış birikiminde en az yer kaplayan yön ise %8.99 ile kuzeydoğu yönü olmuştur. Değerlerin büyük bir çoğunluğu %10-16 arasında değişiklik göstermektedir. Toplamda en yüksek kuru alan değeri Merkez ilçede 1084.31 km² olarak tespit edilmiştir. En düşük kuru alanın, 58.84 km² ile Yenifakılı ilçesinde olduğu belirlenmiştir. Islak alana toplamda en fazla 1128.65 km² ile Boğazlıyan ilçesinde, en düşük değere ise 144.29 km² ile Çandır ilçesinde rastlanmıştır.

YAZAR KATKILARI

Ömer Faruk KARACA1: %100

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK

Bu makalenin yayınlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] K. Beven and M. J. Kirkby, "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology", *Hydrological Science Bulletin*, vol. 24, no. 1, p. 43–69, 1979.
- [2] V. Karakaş, "Karabük Bölgesinin FR ve AHP Yöntemleri Kullanılarak CBS Tabanlı Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi", Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, 2018.
- [3] E. O'Loughlin, "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis," *Water Resources Research*, vol. 22, pp. 794-804, 1986.
- [4] R. Barling, I. Moore and R. Grayson, "A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content," *Water Resources Research*, vol. 30, pp. 1029-1044, 1994.
- [5] H. A. Nefeslioğlu, T. Y. Duman and S. Durmaz, "Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey)," *Geomorphology*, vol. 94, no. 3-4, pp. 401-418, 2008.
- [6] C. Gökçeoğlu, H. Sönmez, H. Nefeslioğlu, T. Duman and T. Can, "Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide susceptibility map of its close vicinity," *Engineering Geology*, vol. 81, no. 65-83, 2005.
- [7] S. Alqadhi, J. Mallick, S. Talukdar, A. A. Bindajam, N. Van Hong and T. Saha, "Selecting optimal conditioning parameters for landslide susceptibility: experimental research on Aqabat Al-Sulbat, Saudi Arabia," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 3, pp. 3743-3762, 2022.
- [8] S. Pourali, C. Arrowsmith, N. Chrisman, A. Matkan and D. Mitchell, "Topography Wetness Index Application in Flood-Risk-Based Land Use Planning," *Appl. Spatial Analysis*, vol. 9, pp. 39-54, 2016.
- [9] I. Moore, R. Grayson and A. Ladson, "Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications," *Hydrological Processes*, vol. 5, pp. 3-30, 1991.
- [10] S. Ghosh, S. Soumik and B. Biswajit, "Flood Susceptibility Zonation Using Advanced Ensemble Machine Learning Models within Himalayan Foreland Basin," *Natural Hazards Research*, vol. 2, no. 4, pp. 363-374, 2022.
- [11] C. Conoscenti, C. Di Maggio and E. Rotiglian O, "GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy)," *Geomorphology*, vol. 94, pp. 325- 339, 2008.
- [12] E. Özşahin, "Tekirdağ İlinde Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Analitik Hiyerarşi Süreci kullanarak heyelan duyarlılık analizi," *Humanitas-Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 3, pp. 167-186, 2014.
- [13] Ş. Tağıl, "Kazdağı Milli Parkı'nda arazi örtüsü organizasyonunu kontrol eden jeomorfometrik faktörler: Bir CBS yaklaşımı," *Coğrafi Bilimler Dergisi*, vol. 4, no. 2, pp. 37-47, 2006.
- [14] R. Sørensen, U. Zinko and J. Seibert, "On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 10, no. 1, p. 101–112, 2006.
- [15] I. Moore, P. Gessler and G. Nielson, "Soil Attribute Prediction using Terrain Analysis," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 57, pp. 443-452, 1993.
- [16] A. Güntner, J. Seibert and S. Uhlenbrook, "Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices," *Water Resour. Res.*, vol. 40, 2004.
- [17] D. Wolock and G. McCabe, "Differences in topographic characteristics computed from 100- and 1000-m resolution digitalelevation model data," *Hydrological Processes*, vol. 14, pp. 987-1002, 2000.

- [18] E. M. Schneiderman, T. S. Steenhuis, D. J. Thongs, Z. M. Easton, M. S. Zion, A. L. Neal, G. F. Mendoza and M. T. and Walter, "Incorporating variable source area hydrology into a curve number-based watershed model," *Hydrological Process*, vol. 3430, p. 3420–3430, 2007.
- [19] Z. Easton, D. Fuka, M. Walter, D. Cowan, E. M. Schneiderman and T. Steenhuis, "Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas," *Journal of Hydrology*, vol. 348, pp. 279-291, 2008.
- [20] L.J. Agnew, S. Lyon, P. Gérard-Marchant, V. B. Collins, A. J. Lembo, T. S. Steenhuis ve M. T. and Walter, "Identifying hydrologically sensitive areas: bridging the gap between science and application," *J. Environ. Management*, vol. 78, pp. 63-76, 2006.
- [21] S. M. Reaney, S. N. Lane, A. L. Heathwaite and L. Dugdale, "Risk-based modelling of diffuse land use impacts from rural landscapes upon salmonid fry abundance," *Ecol. Modell*, vol. 222, p. 1016–1029, 2011.
- [22] R. Marjerison, H. Dahlke, Z. Easton, S. Seifert ve M. and Walter, "A Phosphorus Index transport factor based on variable source area hydrology for New York State," *J. Soil Water Conserv.*, vol. 66, pp. 149-157, 2011.
- [23] B. Buchanan, Variable source area hydrology, artificial drainage and non-point source pollution in northeastern U.S. agricultural landscapes, Ph.D. thesis, Department of Natural Resources, Cornell University, Ithaca, New York, 2013.
- [24] Yozgat, "Yozgat Valiliği - Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Müdürlüğü.", <https://yozgat.csb.gov.tr/ilimiz-cografyasi-i-2341>. [Erişim tarihi: 24-Ekim-2024].
- [25] MGM, "Meteoroloji Genel Müdürlüğü.", <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=YOZGAT>. [Erişim Tarihi: 25-Ekim-2024].
- [26] HGK, "Harita Genel Komutanlığı.", <https://www.harita.gov.tr/index>. [Erişim Tarihi: 21-Ekim-2024].
- [27] M. Werner, "Shuttle Radar Topography Mission. Mission overview," *Journal of Telecommunication*, vol. 55, pp. 75-79, 2001.
- [28] T. Farr, P. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank and D. Alsdorf, "The Shuttle Radar Topography Mission. Rev.," *Geophys*, vol. 45, 2007.
- [29] ESRI, "ESRI Türkiye - DEM Verilerini Kullanarak Drenaj Ağı Çıkarmak.", <https://blog.esri.com.tr/dem-verilerini-kullanarak-drenaj-agi-cikarmak/>. [Erişim Tarihi: 23-Ekim-2024].
- [30] J. Wilson and J. Gallant, *Terrain Analyses: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [31] B. N. Saka ve İ. Atmaca, "Uzaktan Algılama Yöntemleri ile Kentsel Yüzey Sıcaklıklarının Haritalanması, Yozgat Kenti Örneği," *Bozok Journal of Engineering and Architecture (BJEA)*, cilt 2, sayı 2, s. 38-43, 2023.



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Araştırma Makalesi/Research Article

Deep learning-based brain tumor segmentation: A comparison of U-Net and SegNet algorithms

Talip ÇAY¹

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

ARTICLE INFO

Article history:

Received
08.11.2024
Accepted
25.11.2024
Published
31.12.2024

Keywords:

Machine Learning
Deep Learning
Segmentation
Image Processing

ABSTRACT

Brain tumors are among the diseases that pose a serious health concern worldwide and can lead to fatal outcomes if left untreated. The segmentation of brain tumors is a critical step for the accurate diagnosis of the disease and effective management of the treatment process. This study was conducted to examine the success rates of deep learning-based U-Net and SegNet algorithms in brain tumor segmentation. MRI brain images and black and white masks belonging to these images were used in the study. Image processing techniques, including histogram equalization, edge detection, noise reduction, contrast enhancement, and Gaussian blurring, were applied. These techniques have highlighted tumor boundaries, defined edges more precisely, smoothed images, and emphasized the difference between tumors and healthy tissues; thus, they have contributed to improving the quality of MR images and achieving more accurate results in the segmentation process. As a result of the segmentation operations performed with U-Net and SegNet algorithms, the U-Net algorithm achieved an accuracy rate of 96%, while the SegNet algorithm's accuracy rate was measured at 94%. The study determined that the U-Net algorithm provided a higher success rate and was more effective in brain tumor segmentation. In particular, the contribution of image processing steps to segmentation success was observed.

Derin öğrenme tabanlı beyin tümörü segmentasyonu: U-Net ve SegNet algoritmalarının karşılaştırılması

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi
08.11.2024
Kabul tarihi
25.11.2024
Yayın tarihi
31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Makine Öğrenmesi
Derin Öğrenme
Segmentasyon
Görüntü İşleme

ÖZET

Beyin tümörleri, dünya genelinde ciddi bir sağlık sorunu oluşturan ve tedavi edilmediği takdirde ölümcül sonuçlara yol açabilen hastalıklar arasında yer almaktadır. Beyin tümörlerinin segmentasyonu hastalığın doğru teşhisi ve tedavi sürecinin başarılı bir şekilde yönetilmesi için kritik bir adımdır. Bu çalışma görüntü işleme yöntemleri ve derin öğrenme tabanlı U-Net, SegNet algoritmalarının beyin tümörü segmentasyonundaki başarı oranlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada MR beyin görüntüleri ve bu görüntülere ait siyah-beyaz maskeler kullanılmıştır. Görüntü işleme teknikleri olarak histogram eşitleme, kenar bulma, gürültü azaltma, kontrast iyileştirme ve Gaussian bulanıklaştırma yöntemleri uygulanmıştır. Bu teknikler tümör sınırlarını belirginleştirip, kenarları daha hassas bir şekilde tanımlayarak görüntüleri pürüzsüzleştirmiş ve tümör ile sağlıklı dokular arasındaki farkı vurgulamıştır; böylece MR görüntülerinin kalitesini artırarak segmentasyon işleminde daha doğru sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamıştır. U-Net ve SegNet algoritmaları ile yapılan segmentasyon işlemleri sonucunda U-Net algoritması %96 doğruluk oranına ulaşırken SegNet algoritmasının doğruluk oranı %94 olarak ölçülmüştür. Çalışmada U-Net algoritmasının daha yüksek bir başarı oranı sunduğu ve beyin tümörü segmentasyonunda daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, görüntü işleme adımlarının segmentasyon başarısına katkısı gözlemlenmiştir.

ORCID ID: Yazar1: 0000-0002-5490-1651

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Yozgat Bozok University

Tel:+90 505 961 5095

Fax: +90 354 242 1068

E-mail:talip.cay@bozok.edu.tr

1. INTRODUCTION

Brain tumors are a life-threatening health issue with high mortality rates worldwide. Early diagnosis of brain tumors plays a significant role in planning the treatment process and prolonging patients' lives [1]. However, accurately diagnosing brain tumors and determining their size is a complex process. Traditional medical imaging methods offer limited accuracy in this process, whereas with the increasing use of artificial intelligence and deep learning techniques in the medical field, more accurate and faster diagnostic methods have been developed. In particular, deep learning-based segmentation algorithms like U-Net and SegNet are frequently preferred in medical image processing and show promise in the process of determining tumor boundaries in brain MRI images.

The aim of this study is to compare the success rates of the U-Net and SegNet algorithms in brain tumor segmentation and to demonstrate the potential for their use in clinical applications. In this study, 3064 MRI images and their corresponding black-and-white masks were used, with various image processing techniques applied before the segmentation process. Histogram equalization enhances the contrast in the image, allowing for a clearer definition of tumor boundaries, while edge detection algorithms enable more precise identification of the tumor and surrounding tissue boundaries. The noise reduction method eliminates artifacts in the image, improving the accuracy of the segmentation process. Additional techniques such as contrast enhancement and Gaussian blurring improve image quality, positively impacting the performance of the algorithms. [2]. After the application of these methods, segmentation was performed using the U-Net and SegNet algorithms, and the performance of these two algorithms was evaluated using metrics such as accuracy, precision, and F1 score.

The results of the study reveal that the U-Net algorithm demonstrates higher performance with an accuracy rate of 96%, making it a more effective method for brain tumor segmentation. The study aims to guide future research and contribute to the development of automatic segmentation systems that can be used in the diagnosis of brain tumors.

1.1. Related Work and Motivation

Brain tumor segmentation and classification have become significant research topics in the field of medical imaging. In the literature, various deep learning methods and architectures have been developed and applied for the accurate and effective segmentation of brain tumors. Some studies in this area include:

Magadza et al. used deep learning architectures such as U-Net and multi-stage CNNs for brain tumor segmentation. The study highlights two-way data flow and multi-stage segmentation approaches for the automatic segmentation of tumor regions from MRI images. These methods combine local and global image information to enhance accuracy and have been successfully tested on large datasets. [3].

Biratu et al. examined regional growth, shallow machine learning, and deep learning methods for brain tumor segmentation and classification. The study evaluates automatic segmentation and classification techniques using MRI images, focusing on the strengths and weaknesses of different approaches. Additionally, it highlights commonly used metrics for measuring segmentation performance and models that have been successfully tested on the datasets used. [4].

Liu et al. examined the development of deep learning methods for brain tumor segmentation, focusing on various architectural designs, data imbalance, and multi-modality integration. The study evaluates the impact of different deep learning models on accuracy. Methods developed using multi-data flow and customized loss functions to improve segmentation accuracy are emphasized. [5].

Rehman et al. proposed a model called BU-Net, which enhances the U-Net architecture for brain tumor segmentation. BU-Net aims to acquire broader contextual information through the addition of "residual extended skip (RES)" and "wide context (WC)" modules to the U-Net structure. The model considers the scale variations of tumor regions with the RES module, which transfers low-level features to intermediate levels and expands the receptive field. BU-Net has demonstrated superior performance compared to existing methods, achieving high Dice scores for tumor core, whole tumor, and enhanced core subregions in the BraTS2017 and BraTS2018 datasets. [6].

Ottom et al. developed a deep learning-based model called Znet for brain tumor segmentation using 2D MRI images. Znet aims to achieve more accurate segmentation with a small amount of data by utilizing "skip-connection" and "encoder-decoder" architectures to expand the data. The model achieved a 96% training Dice score and a 92% test Dice score on low-grade glioma data. It also demonstrated high performance in other metrics, such as pixel accuracy and F1 score. Znet stands out as a generalized solution that can be applied to different pathologies and imaging modalities. [7].

Khan et al. proposed a method that combines K-means clustering and deep learning for brain tumor classification. In the study, the K-means algorithm was initially used for segmentation of brain tumors from MRI images, followed by classification of the tumors as benign or malignant using the VGG19 model. To improve classification performance, the size of the training data was increased through synthetic data augmentation. This method was tested on the BraTS 2015 dataset and demonstrated higher accuracy compared to existing techniques. [8].

These studies highlight the success of deep learning-based methods aimed at improving the accuracy of brain tumor segmentation. Brain tumor segmentation is often a complex process that requires the accurate detection and separation of tumor regions. Although various deep learning models and architectures have addressed this problem, the existing methods in the literature still have some limitations. For example, some models do not yield effective results on certain datasets or tumor types, while others face challenges such as data imbalance and high computational costs.

Additionally, most existing methods fail to make sufficient adaptations to improve the precision of tumor segmentation. Characteristics of tumors, such as their varying contrast, shape, and size in images, are significant factors affecting the performance of the algorithms used. Therefore, more advanced and customized models are required for the accurate classification and segmentation of tumors.

In this context, this study aims to compare the success rates of the U-Net and SegNet algorithms in brain tumor segmentation, focusing on their unique architectures and practical applications in medical imaging. U-Net, known for its encoder-decoder structure, is specifically designed to achieve high segmentation accuracy in biomedical images. In contrast, SegNet provides faster and more efficient results by processing lower-resolution data. By comparing the performance of these models, this study seeks to identify the more effective method for brain tumor segmentation and explore potential improvements for developing more advanced segmentation techniques, such as hybrid models or combined algorithmic approaches.

The findings of this research aim to address the existing challenges in brain tumor segmentation, providing valuable insights for clinical applications and research advancements. Improving accuracy and efficiency in segmentation is vital for early diagnosis and effective treatment, making the development of robust models a priority in this field.

2. MATERIAL and METHODS

In this study, the performances of deep learning-based U-Net and SegNet algorithms for automatic brain tumor segmentation were compared. Segmentation of brain tumors is crucial in the medical diagnostic process, as it allows for the precise determination of tumor boundaries and sizes. In this study, 3064 magnetic resonance (MR) brain images and corresponding black-and-white tumor masks were used. To precisely delineate tumor regions, image processing techniques were applied prior to the segmentation process to enhance the quality of the MR images and ensure more efficient performance of the segmentation algorithms. The steps of the study are detailed below:

2.1. Dataset

The dataset consists of a total of 3064 MR images, covering various types of brain tumors. These images exhibit diversity in terms of tumor position, size, and shape. Corresponding black-and-white masks are available for each MR image in the study. These masks were used to label the tumor regions. Before processing each image in the dataset, standard preprocessing steps were applied. These steps ensure data cleaning and prepare the data for subsequent processing.

2.2. Image Processing Techniques

To improve the accuracy of segmentation, image processing steps were used to optimize the quality of the MR images. The applied image processing techniques are as follows:

2.2.1. Histogram Equalization

Histogram equalization has balanced the contrast levels in the image, making the tumor area more distinct from the surrounding tissue. This step aims to make the details in low-contrast regions more clearly visible [9]. The formulas below illustrate the histogram equalization formulas. Formula 1 represents histogram calculation, formula 2 represents cumulative distribution function, formula 3 represents equalized values, and formula 4 represents the creation of the new image. Figure 3 depicts the histogram equalized CT images and graphs [10].

$$p_r(r) = \frac{n_r}{mn} \tag{1}$$

$$s_k = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) \tag{2}$$

$$s_k = \text{round}(L - 1) \times s_k \tag{3}$$

$$I(x, y) = s_{I(x,y)} \tag{4}$$

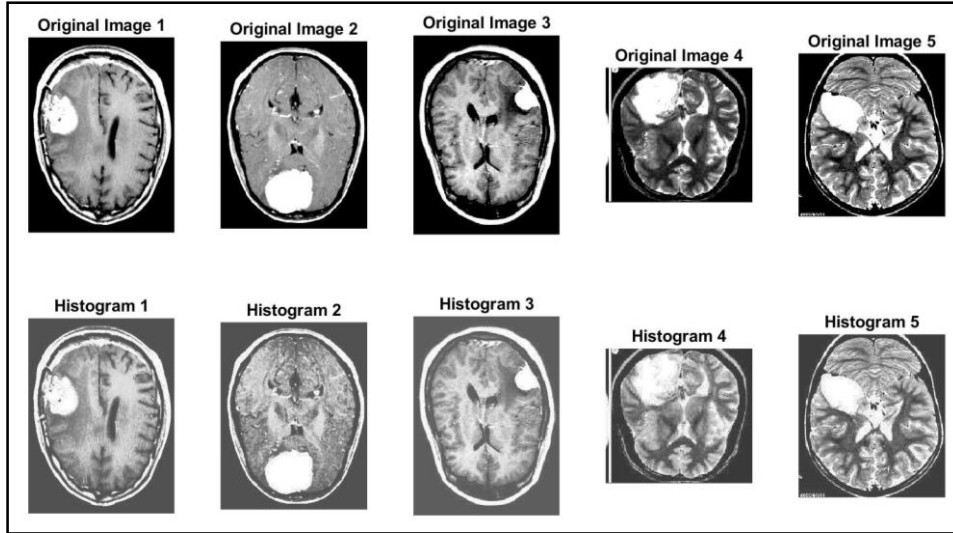


Figure 1. Histogram equalization

2.2.2. Noise Reduction

MR images often contain various artifacts and noise. Since these noises can negatively affect segmentation accuracy, a noise reduction filter was applied. In this study, the Gaussian filter was specifically preferred, allowing unnecessary noise to be filtered out and ensuring that the images became smoother.

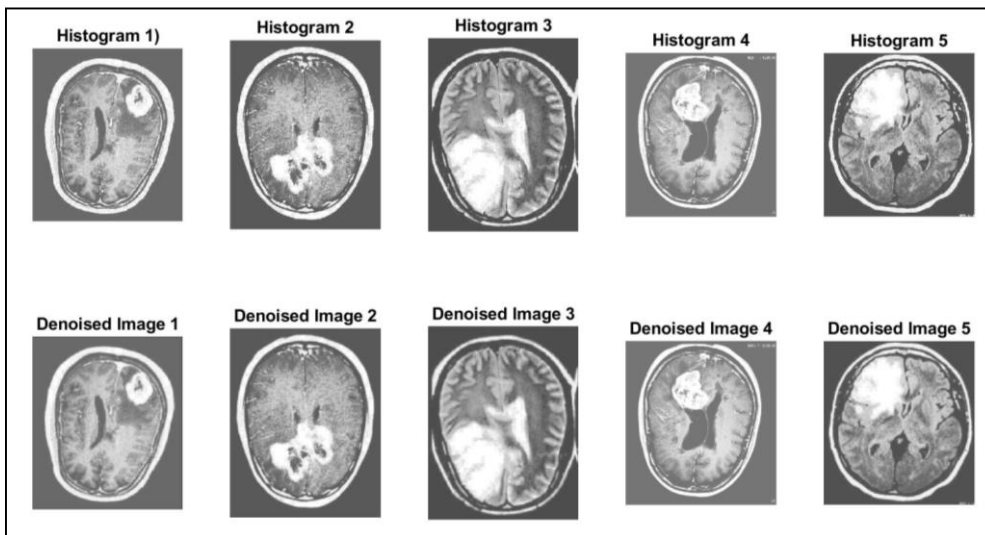


Figure 2. Noise reduction

2.2.3. Contrast Enhancement

Increasing the contrast in an image is important to facilitate the separation of the tumor from the surrounding tissues [11]. Therefore, the contrast of the image was enhanced to make the difference between the tumor region and healthy tissue more prominent. Here, r represents the original pixel value, and s represents the new pixel value.

$$s = \frac{(r - r_{min})}{(r_{max} - r_{min})} \times (s_{max} - s_{min}) + s_{min} \quad (5)$$

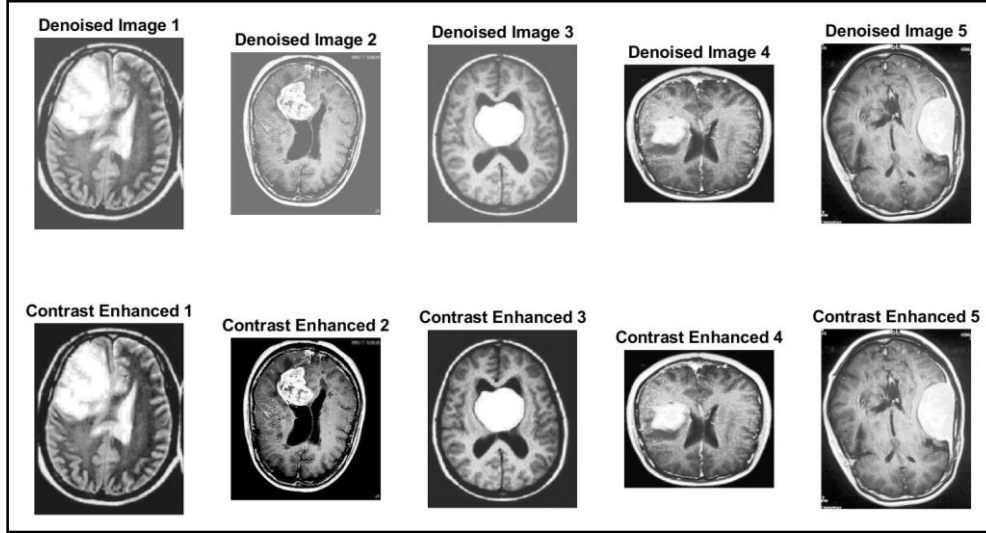


Figure 3. Contrast enhancement

2.2.4. Gaussian Blur

The Gaussian blur filter was used to smooth the boundaries identified by the edge detection algorithm. This process contributed to the segmentation by softening the sharp edges in the image. Here, $G(x, y)$ represents the pixel weight.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

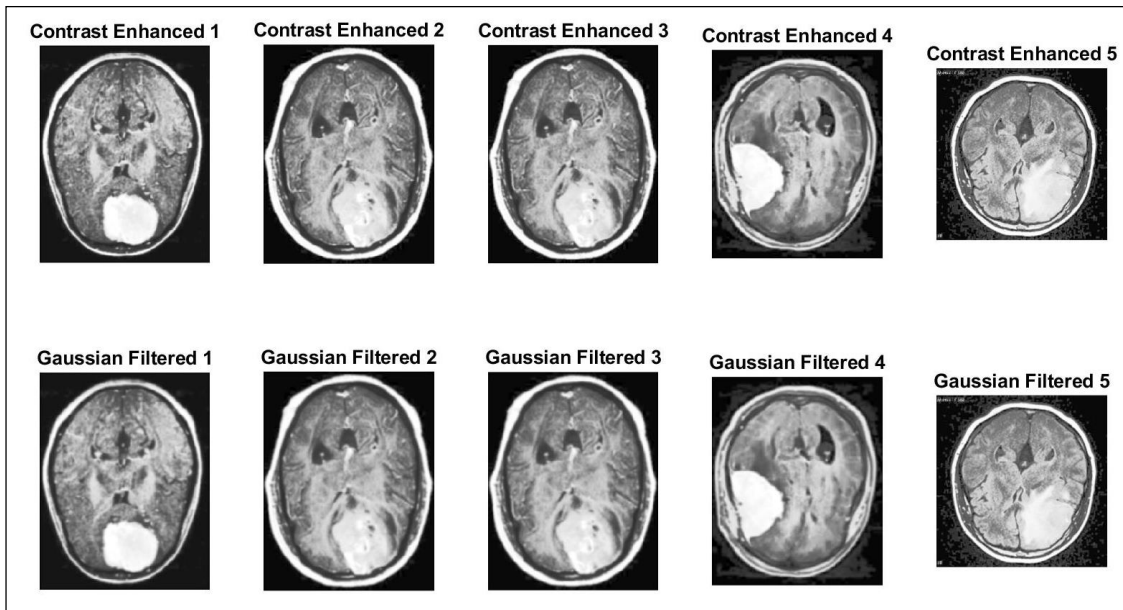


Figure 4. Gaussian filtered

2.3. Deep Learning Models

After the image processing steps, the segmentation of the MR images was performed using the U-Net and SegNet algorithms. U-Net and SegNet are deep learning-based architectures that are widely used in medical image segmentation, particularly for tasks such as this one..

2.3.1. U-Net

U-Net is a deep learning model, particularly used in medical image segmentation. It was developed by Ronneberger and his team in 2015. The model gets its name from its "U"-shaped symmetric structure and is a fully convolutional network (FCN). U-Net is widely used in fields such as medical imaging, biomedical analysis, and cell segmentation due to its ability to perform segmentation with high accuracy, even with low-resolution images. The U-Net model consists of two main parts: the encoder and the decoder. The encoder progressively reduces the input image into a smaller, more information-dense form, while the decoder uses this information to reconstruct the output image to its original resolution. Convolutional layers and transitions are used in both parts of the model. [12].

The encoder stage behaves like a classic CNN (Convolutional Neural Network), learning the features of the image in progressively smaller sizes and at higher levels of abstraction. Features are extracted through convolution and max-pooling operations. Each convolutional layer defines different aspects of the image. During this stage, while the image size is reduced, the number of features increases. When the encoder stage is complete, the model obtains a low-resolution image with rich feature information. The decoder stage aims to reconstruct the image reduced in the encoder back to its original resolution. In this stage, resizing operations called "up-sampling" are performed. This process allows the image to be enlarged back to its original size.

Additionally, the information from each layer of the encoder stage is combined with corresponding layers in the decoder stage through skip connections. This merging allows the recovery of details lost during the encoder stage and improves the segmentation accuracy of the model. One of the key features of U-Net is these connections, which establish direct links between layers at the same level in the encoder and decoder stages. These skips help recover fine details that could be lost during segmentation. Thanks to skip connections, the model achieves highly accurate segmentation results and works efficiently even with small-sized datasets.

The U-Net model has been successfully applied in areas such as brain tumor, lung lesions, retinal blood vessels, and cell segmentation. Especially in medical applications, accurately delineating the region where the tumor is located is of critical importance in disease diagnosis and treatment processes.

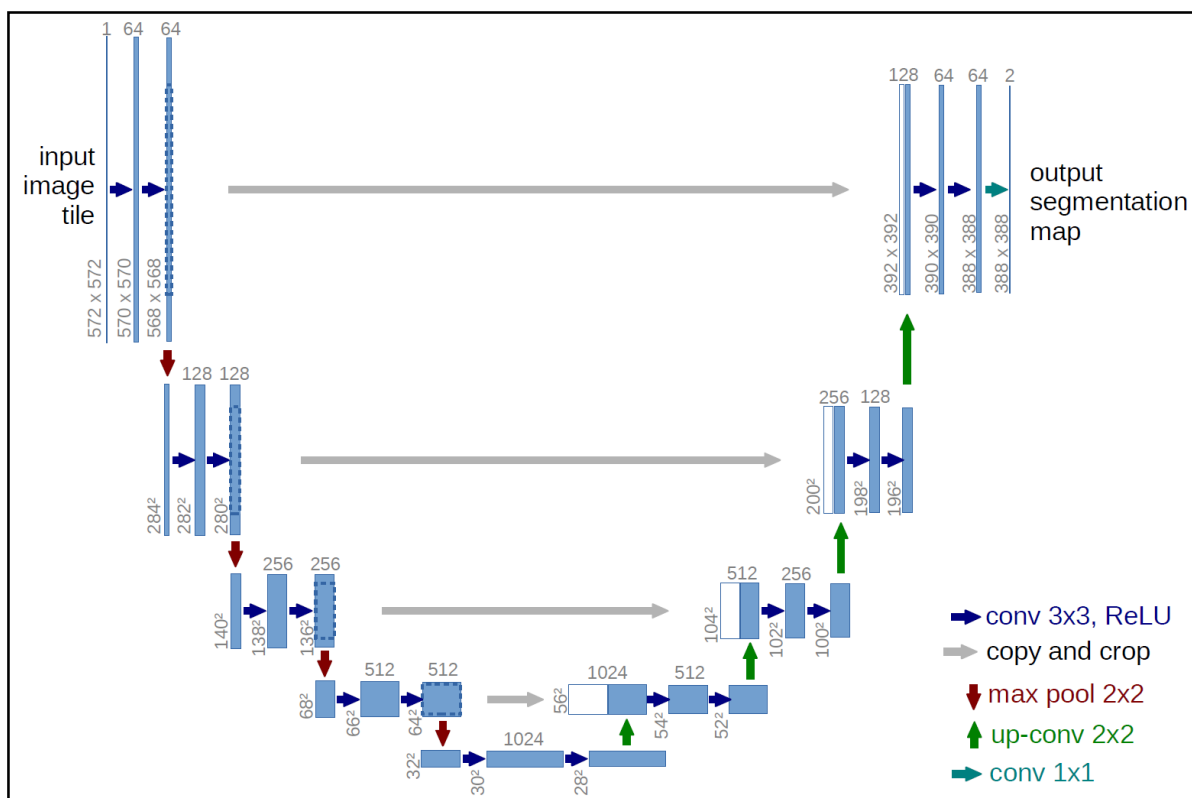


Figure 5. U-Net architecture [12]

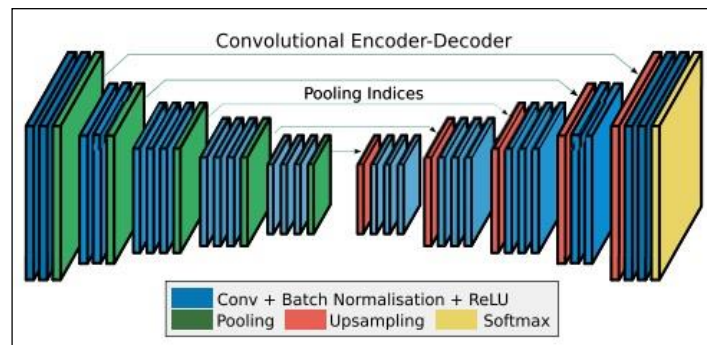
2.3.2. SegNet

SegNet is a deep learning model used for image segmentation. It was developed by Badrinarayanan and his team in 2015. SegNet is specifically designed for semantic segmentation and assigns each pixel in the image to a specific class. This model is often preferred in segmentation applications that require large-scale and detailed analysis, such as cityscape images. SegNet is particularly used in applications like object detection, medical imaging, and environmental mapping.

SegNet is fundamentally built on an encoder-decoder architecture. While similar to U-Net, it has certain differences. Notably, the use of encoding-decoding phases and the "max pooling" index are distinctive features of SegNet. [13]. The encoder phase uses convolution and max-pooling operations to extract features from the input image. In SegNet's encoder phase, the image size is reduced while the number of features is increased during each pooling operation. For each max-pooling layer, the pixel that gives the maximum value is recorded, and this information is stored using a method called "index pooling." These stored max-pooling indices are then kept for use in the decoder phase. This approach reduces detail loss and enables more accurate segmentation. The decoder phase uses the features obtained in the encoder phase to resize the image and bring it back to its original resolution. Unlike U-Net, in SegNet the "upsampling" operation in the decoder phase is performed using max-pooling indices.

These indices contain information obtained from the max-pooling operations in the encoder phase. Thus, during the upsampling process, the stored max-pooling indices are used to increase accuracy and minimize detail loss. The decoder phase finally ends with a "softmax" layer, which assigns each pixel to a specific class. This way, the model's output image has each pixel assigned to a class. One of SegNet's most notable features is its use of max-pooling indices during the upsampling process. The direct use of pooling indices from the encoder phase in the decoder phase reduces computational cost and provides more efficient segmentation. The use of these indices reduces unnecessary connection layers, accelerating the model's learning process.

SegNet, its customizable structure and detail-sensitive architecture, is preferred for tasks that require high accuracy. It particularly provides successful results in segmentation, such as distinguishing objects like roads, vehicles, and buildings in urban road images.

**Figure 6.** SegNet architecture [13]

2.3.3. Training Process and Hyper Parameters

The dataset is split into 80% training and 20% testing data to be used during the training and testing phases of the segmentation algorithms. This ratio provides an adequate amount of data to evaluate the model's overall performance. During the training process, the model learns the necessary parameters to differentiate between tumor and healthy tissue regions in the dataset. After the training phase, the model's accuracy is calculated on the test data to assess its performance..

During model training, two epochs were used to achieve high accuracy in a short period. The number of epochs was optimized to prevent overfitting. During this process, hyperparameters such as learning rate and optimizer were adjusted to improve the model's performance. Adam optimizer was preferred for both U-Net and SegNet models, as it provides a fast and efficient learning process and increases the model's accuracy. The learning rate is a parameter that affects the segmentation accuracy by allowing the model to learn faster or slower.

2.3.4. Performance Evaluation Metrics

In scientific research, metrics used to evaluate the effectiveness of proposed systems are of great importance, especially in classification problems, and these metrics can be easily calculated from the confusion matrix. In the confusion matrix, the cases where the algorithm made correct predictions are represented by true positive (TP) and true negative (TN) cells, while incorrect predictions are represented by false negative (FN) and false positive (FP) cells. In reality, cases that are positive but predicted as

negative by the model are classified as false negative (FN), while cases predicted as positive but actually negative are recorded as false positive (FP). This structure allows for the analysis of the model's performance and errors, so areas for improvement can be identified. [14].

Table 1. The confusion matrix

Output Class	Target Class	
	0	1
	True Negative (TN)	False Negative (FN)
False Positive (FP)	True Positive (TP)	

Classification accuracy is a commonly used metric to evaluate the effectiveness of classification algorithms and is calculated as the ratio of correct predictions to the total number of predictions. Although accuracy is a simple evaluation criterion, other metrics such as specificity, sensitivity, precision and F-score are also used to evaluate algorithm performance in more detail. These additional metrics allow for a more comprehensive analysis of the model's success in different aspects. Specificity expresses the proportion of negative examples that are correctly predicted by the classifier, while sensitivity measures the proportion of positive examples that are correctly predicted. Precision indicates the proportion of correctly classified true positive examples within the total positive examples. The F-score is defined as the harmonic mean of precision and recall values. These metrics are calculated using specific formulas and play an important role in performance evaluations. This allows for a more comprehensive understanding of the reliability and accuracy of classification systems. Below are the formulas for performance metrics such as accuracy, specificity, sensitivity, precision, and F-score. [15].

$$accuracy = \frac{tp + tn}{tp + tn + fp + fn} \quad (6)$$

$$specificity = \frac{tn}{tn + fp} \quad (7)$$

$$sensitivity = \frac{tp}{tp + fn} \quad (8)$$

$$precision = \frac{tp}{tp + fp} \quad (9)$$

$$f - score = \frac{(precision) \times (sensitivity)}{(precision) + (sensitivity)} \quad (10)$$

These metrics evaluate the accuracy of the segmentation process in detail, determining which model achieves higher success. As a result of the experiments, it was found that the U-Net model has a higher accuracy rate compared to SegNet and, therefore, is a more suitable option for brain tumor segmentation.

2.3.5. Visualization and Results Analysis

After the segmentation process, the results of both models were visualized. Visual analysis is crucial for evaluating the segmentation quality and the accuracy of the masks. As a result, it was observed that the U-Net model detected tumor regions more clearly and created more accurate masks. This study demonstrates that the U-Net algorithm is more effective in automatic brain tumor segmentation and could be a suitable candidate for clinical applications. Success rates are shown in Table 2. Prediction results are visualized in Figure 7.

Table 2. Success rates

	Accuracy	Specificity	Sensitivity	Precision	F-Score	Avg.
U-Net	0.9644	0.9562	0.9716	0.9663	0.9617	0.9664
SegNet	0.9456	0.9506	0.9608	0.9507	0.9403	0.9496

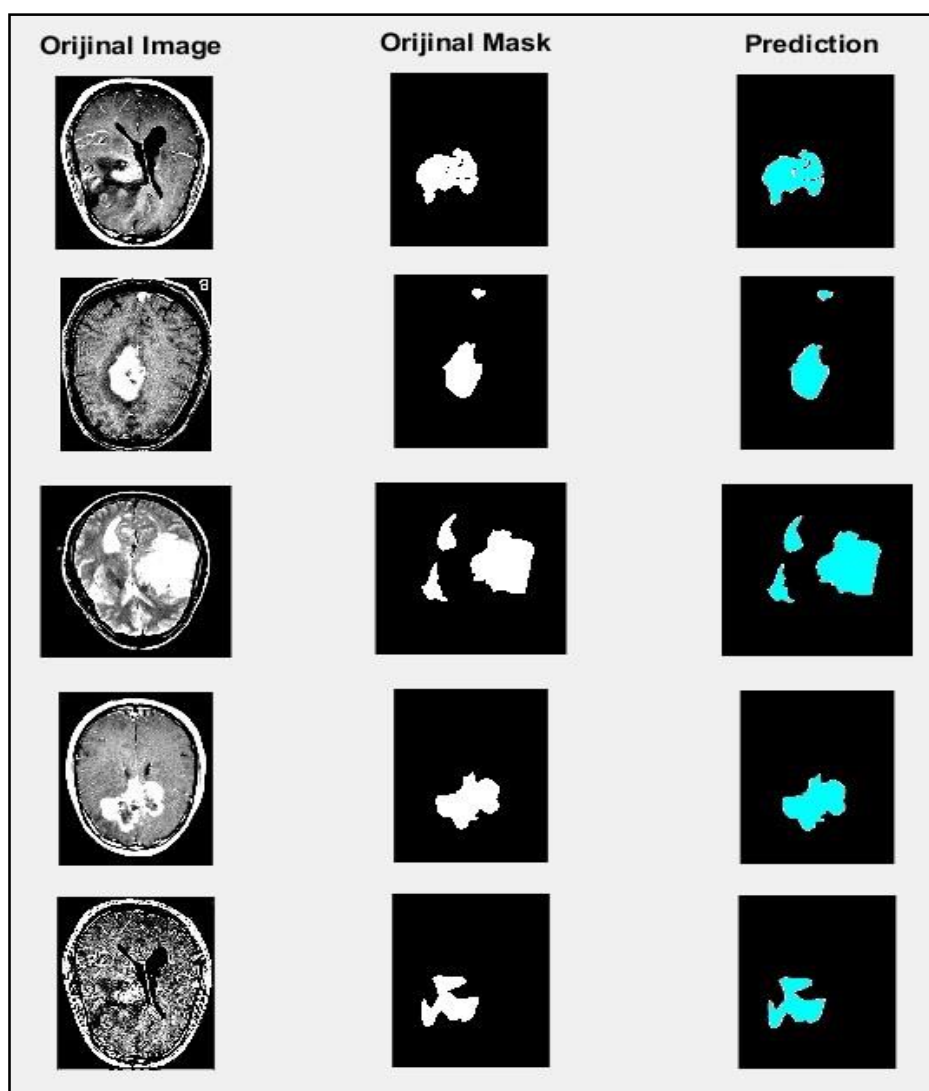


Figure 7. Results

3. CONCLUSION and EVALUATION

In this study, the performances of the U-Net and SegNet algorithms for automatic brain tumor segmentation were compared, and the segmentation successes of both models were evaluated in detail. The applied deep learning methods were combined with pre-processing techniques performed on MRI images, aiming to enhance segmentation accuracy. The obtained results reveal the effectiveness of the algorithms and the quality of the segmentation process. The U-Net model achieved a high segmentation success rate of 96%, indicating its effectiveness in delineating the boundaries between tumor and healthy tissue. The SegNet model achieved an accuracy of 94%. The segmentation successes of both models are quite satisfactory when compared to the results obtained in similar studies in the literature.

Visual analyses were performed by examining the segmentation results of both models. It was observed that the U-Net model delineated tumor areas more clearly and the details of the masks were more pronounced. SegNet, on the other hand, provided results with limited accuracy in some cases. In the images, the segmentation results obtained with U-Net showed more distinct tumor boundaries and a greater overlap between the mask and the original image.

It was determined that the learning process of both models was effective with 1000 epochs during the training process. While the model was trained with 80% of the data, 20% of the test data was used to evaluate the overall performance of the model. U-Net and SegNet were optimized with the specified hyperparameters, and both models achieved sufficient learning capacity. At the end of the training process, both models resulted in high segmentation accuracy.

The findings of this study demonstrate the effectiveness of deep learning-based approaches in brain tumor segmentation and provide important results for clinical applications. The high accuracy rate of the U-Net model offers a promising foundation for the development of automatic segmentation systems in the field of medical imaging. Specifically, the U-Net model's ability to precisely delineate tumor regions has the potential to be an important support tool for surgeons and radiologists. This helps in the decision-making processes for determining the size and location of tumors.

The results of this study provide new directions for future research. The application of different deep learning architectures, in addition to U-Net and SegNet, can contribute to improving segmentation quality. Moreover, increasing the diversity of the dataset and testing on more images will enhance the generalizability. Future work aims to further improve segmentation performance through the integration of different model combinations and techniques such as transfer learning.

In conclusion, the findings obtained in this study highlight the effectiveness of deep learning methods in brain tumor segmentation, and the high accuracy achieved by the U-Net model shows that it can be an important resource in medical applications. U-Net's high segmentation performance is among the leading methods for medical imaging applications, emphasizing the need for continued research in this field.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest between any institutions, organizations, individuals, and authors in this study.

ETHIC

If your article is outside the scope of ethics, "There are no ethical issues regarding the publication of this article." The data used in our study is publicly available and is not subject to data privacy. (Cheng, Jun (2017). brain tumor dataset. figshare. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1512427.v5>)

REFERENCES

- [1] S. Rasheed, K. Rehman, and M. S. H. Akash, "An insight into the risk factors of brain tumors and their therapeutic interventions," *Biomed. Pharmacother.*, vol. 143, p. 112119, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.BIOPHA.2021.112119.
- [2] E. Radhi and M. K. Systems, "Breast Tumor Detection Via Active Contour Technique.," *J. Intell. Eng. 2021, Undefined*, vol. 14, no. 4, pp. 561–570, 2021, Accessed: Nov. 07, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Mohammed-Kamil-8/publication/353169254_Breast_Tumor_Detection_Via_Active_Contour_Technique/links/60eb554030e8e50c01fb41b1/Breast-Tumor-Detection-Via-Active-Contour-Technique.pdf
- [3] T. Magadza and S. Viriri, "Deep Learning for Brain Tumor Segmentation: A Survey of State-of-the-Art," *J. Imaging*, vol. 7, no. 2, p. 19, Jan. 2021, doi: 10.3390/JIMAGING7020019.
- [4] E. S. Biratu, F. Schwenker, Y. M. Ayano, and T. G. Debelee, "A Survey of Brain Tumor Segmentation and Classification Algorithms," *J. Imaging*, vol. 7, no. 9, p. 179, Sep. 2021, doi: 10.3390/JIMAGING7090179.
- [5] Z. Liu, L. Tong, U. Chen, Z. Jiang, F. Zhou, Q. Zhang, X. Zhang, Y. Jin and H. Zhou, "Deep learning based brain tumor segmentation: a survey," *Complex Intell. Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 1001–1026, Feb. 2023, doi: 10.1007/S40747-022-00815-5/TABLES/5.
- [6] M. U. Rehman, S. Cho, J. H. Kim and K. T. Chong, "BU-Net: Brain Tumor Segmentation Using Modified U-Net Architecture," *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2203, Dec. 2020, doi: 10.3390/ELECTRONICS9122203.
- [7] M. A. Ottom, H. A. Rahman, and I. D. Dinov, "Znet: Deep Learning Approach for 2D MRI Brain Tumor Segmentation," *IEEE J. Transl. Eng. Heal. Med.*, vol. 10, 2022, doi: 10.1109/JTEHM.2022.3176737.
- [8] A. R. Khan, S. Khan, M. Harouni, R. Abbasi, S. Iqbal and Z. Mehmood, "Brain tumor segmentation using K-means clustering and deep learning with synthetic data augmentation for classification," *Microsc. Res. Tech.*, vol. 84, no. 7, pp. 1389–1399, Jul. 2021, doi: 10.1002/JEMT.23694.
- [9] R. Naseem, Z. A. Khan, N. Satpute, A. Beghdadi, F. A. Cheikh and J. Olivares, "Cross-Modality Guided Contrast Enhancement for Improved Liver Tumor Image Segmentation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 118154–118167, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107473.
- [10] K. G. Dhal, A. Das, S. Ray, J. Gálvez and S. Das, "Histogram Equalization Variants as Optimization Problems: A Review," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 1471–1496, May 2021, doi: 10.1007/S11831-020-09425-1/TABLES/17.
- [11] A. Lasocki and F. Gaillard, "Non-Contrast-Enhancing Tumor: A New Frontier in Glioblastoma Research," *Am.*

- J. Neuroradiol.*, vol. 40, no. 5, pp. 758–765, May 2019, doi: 10.3174/AJNR.A6025.
- [12] O. Ronneberger, P. Fischer and T. Brox, “U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 9351, pp. 234–241, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
- [13] V. Badrinarayanan, A. Kendall and R. Cipolla, “SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 12, pp. 2481–2495, Dec. 2017, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2644615.
- [14] M. S. Aslanpour, S. S. Gill and A. N. Toosi, “Performance evaluation metrics for cloud, fog and edge computing: A review, taxonomy, benchmarks and standards for future research,” *Internet of Things*, vol. 12, p. 100273, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.IOT.2020.100273.
- [15] C. J. Needham and R. D. Boyle, “Performance Evaluation Metrics and Statistics for Positional Tracker Evaluation,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 2626, pp. 278–289, 2003, doi: 10.1007/3-540-36592-3_27.



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Research Article

Heat transfer in two-zone thick-walled pipes with axial varying periodic temperature boundary condition

Ali ATEŞ^{1*}

¹ Sinop University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Sinop, Türkiye

ARTICLE INFO

Article History:

Received

15.11.2024

Accepted

10.12.2024

Published

31.12.2024

Keywords:

Transient conjugate heat transfer
Axially periodic temperature
Thick walled pipes
Heat transfer to upstream region

ABSTRACT

The conjugate heat transfer in thick-walled pipes is investigated by also considering axial heat conduction. The problem considers a two-zone infinite pipe. There is a constant outer wall temperature boundary condition in the upstream region of the pipe. In the downstream region, the outer wall temperature is assumed to vary periodically in the axial direction spatially. This problem, where the flow is assumed to be laminar, is solved numerically by the finite difference method. The effects of the basic parameters of wall thickness ratio, Peclet number, wall-fluid thermal conductivity coefficient ratio and wall-fluid thermal diffusivity coefficient ratio on the interface heat flux are investigated. The effects of the axial dimensionless frequency on the results are also taken into account in the studies. The results obtained are highly dependent on the parametric values. It is observed that the wall thickness ratio is more effective than the other parametric values. In addition, it can be said that the pipe wall and fluid axial conduction cause heat transfer to upstream region at a non-negligible scale.

Eksenel yönde periyodik olarak değişen sıcaklık sınır şartıyla iki bölgeli kalın cidarlı borularda ısı transferi

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

15.11.2024

Kabul tarihi

10.12.2024

Yayın tarihi

31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Geçici rejim birleşik ısı transferi
Eksenel periyodik sıcaklık
Kalın cidarlı borular
Üst akış bölgesine ısı geçişi

ÖZET

Kalın cidarlı borularda birleşik ısı transferi, eksenel ısı iletimi de dikkate alınarak incelenmiştir. Problem iki bölgeli sonsuz bir boruyu ele almaktadır. Borunun üst akış bölgesinde sabit dış duvar sıcaklığı sınır şartı varsayılmıştır. Alt akış bölgesinde dış duvar sıcaklığının eksenel yönde mekânsal olarak periyodik bir şekilde değiştiği kabul edilmiştir. Akışın laminar kabul edildiği bu problem sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Cidar kalınlık oranı, Peclet sayısı, duvar-akışkan ısı iletkenlik katsayı oranı ve duvar-akışkan ısı yayılım katsayı oranı temel parametrelerinin arayüz ısı akısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada eksenel boyutsuz frekansın sonuçlar üzerindeki etkileri ayrıca dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar büyük ölçüde parametrik değerlere bağlıdır. Özellikle cidar kalınlık oranının diğer parametrik değerlere nazaran daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca boru cidarı ve akışkan eksenel iletiminin üst akış bölgesine ihmal edilemeyecek ölçekte ısı transferine neden olduğu söylenebilir.

ORCID ID: 0000-0002-5506-8200

*Corresponding author: Sinop University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Sinop, Türkiye.

Tel: +90 555 4551559.

E-mail: aates@sinop.edu.tr

To cite this article: Ateş A., "Heat transfer in two-zone thick-walled pipes with axial varying periodic temperature boundary condition", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 110-124, 2024.

1. INTRODUCTION

The periodic spatial variation of the outer surface temperature in pipes along the axial direction is different from the time-dependent periodic temperature variation boundary condition. Some examples related to this topic include oil or natural gas pipelines beneath wavy sea beds, heat exchangers in machines operating with the Stirling engine cycle, and cooling systems of nuclear reactors. Meanwhile, the analysis of transient conjugate heat transfer is also important for heat exchangers under conditions such as startup, shutdown, or changes in operating conditions. Transient heat transfer in pipes and channels with laminar flow has been investigated by some researchers. In most of the studies addressed, thin-walled pipes or channels were assumed where the conduction through the wall was neglected and the conditions on the outer surface were assumed to be directly applicable at the wall-fluid interface. However, in conjugate problems, since the boundary conditions at the interface are not known beforehand, energy equations must be solved simultaneously for both the wall and the fluid side, taking into account the temperature at the interface, the interfacial heat flux, and the continuity of the flow.

The problem of conjugate heat transfer in transient regimes has been examined in many studies [1, 2, 3] under conditions of sudden and periodic changes in boundary or inlet conditions, and some numerical solutions have been developed [4, 5].

Barletta et al. [6], investigated heat transfer between pipes used in offshore oil transportation and the environment. Conti et al. [7], examined the conjugate heat transfer problem in micro-channels for cases where the heat flux changes periodically and suddenly over time. [8], studied transient conjugate heat transfer under boundary conditions where the outer surface temperature of thick-walled pipes changes periodically over time.

Patankar et al. [9] found a method that obtains universal results in the fully developed region of periodic flows. Quaresma and Cotta [10] carried out an analytical study in which they obtained the temperature distribution and Nusselt Numbers in the thermal entrance region of pipes with variable wall heat flux in the axial direction. Barletta and Zanchini [11] conducted another study for hydrodynamically developed laminar flow through a thin-walled pipe where the ambient temperature varies periodically. Atmaca et al. [12] investigated the heat transfer in a thick-walled pipe partially heated circumferentially. Zniber et al. [13] carried out a study in which the temperature distribution and Nusselt numbers for periodically varying sinusoidal heat transfer boundary condition in Magneto-Hydrodynamic laminar flow were obtained using linear operators technique. Darici et al. [14] investigated the transient conjugate heat transfer for laminar flow developing simultaneously in a thick-walled semi-infinite pipe. Aydin and Avci [5,15] investigated the transient conjugate heat transfer in micro channels and channels with a periodically changing outer surface temperature boundary condition in the axial direction. Similar issues under different boundary conditions were also investigated by Zhu et al. [16].

In this study, transient conjugate heat transfer in a two-zone infinite pipe with a periodically changing outer surface temperature boundary condition in the axial direction depending on the position was investigated. In order to see the effects of axial conduction on both the pipe wall and fluid side, low Pe number flows in thick-walled pipes were emphasized.

2. MATERIALS and METHODS

2.1 Problem Definition

In this study, the transient conjugate heat transfer problem in a thick-walled pipe with laminar flow and thermal development region has been investigated. The effects of fluid axial conduction on heat transfer with two-dimensional conduction in the wall for flows with low Peclet numbers have been examined under a periodically varying surface temperature boundary condition. The schematic diagram of the problem and the coordinate system are shown in Figure 1.

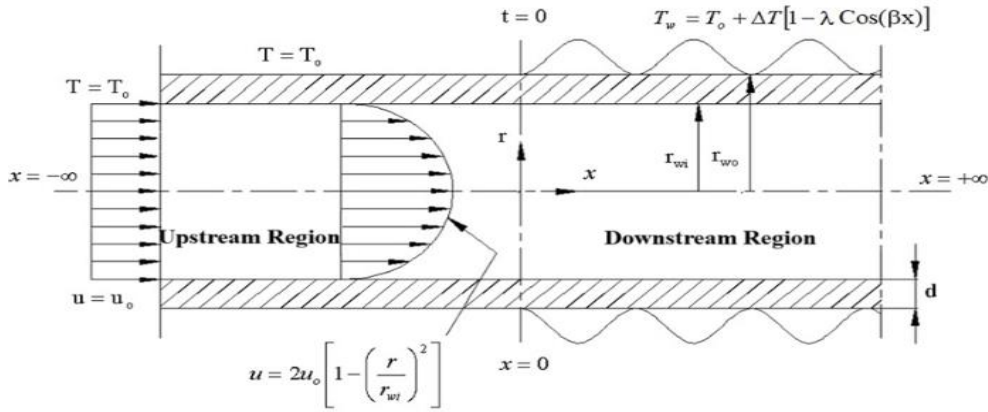


Figure 1. Coordinate system and diagram of the problem

As illustrated in the figure, the flow is considered as a two-region system, with the pipe being of infinite length in both directions. Far from upstream region ($x = -\infty$), the fluid temperature is maintained at a constant uniform temperature, T_0 . At position $x=0$ and at the beginning of time ($t=0$) downstream region of the pipe is exposed to the periodically varying the outdoor temperature, $T_w = T_0 + \Delta T [1 - \lambda \text{Cos}(\beta x)]$. All fluid and wall properties, density are assumed to be constant, and viscous dissipation is neglected. The flow is considered to be hydrodynamically developed, with the velocity distribution being independent of the temperature distribution.

2.2 Theoretical Fundamentals

In most fluid flow problems, the energy, continuity, and Navier-Stokes equations are solved together, simultaneously. Similar terms appearing in these equations must ensure consistency when substituted into the other equations. However, nonlinear terms in these differential equations significantly complicate the solution, sometimes rendering it impossible. Therefore, it becomes necessary to make assumptions that simplify complex expressions.

On the other hand, working with dimensionless forms of equations provides significant advantages in solving many problems. Converting differential equations to dimensionless form does not linearize a nonlinear equation. However, dimensional analysis is an ideal method for simplifying a complex equation with numerous variable expressions and parameters into a more manageable form. This approach also makes interpretations clearer.

Dimensionless parameters:

Dimensionless temperature; (for both wall and fluid)

$$T^* = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} = \frac{T - T_0}{T_w - T_0} \quad (1)$$

Axial coordinate;

$$x^* = \frac{x}{r_{wi} Pe} \equiv \frac{2}{Gz} \quad (2)$$

Radial coordinate;

$$r^* = \frac{r}{r_{wi}} \quad (3)$$

wall thickness;

$$d^* = \frac{d}{r_{wi}} \tag{4}$$

thermal conductivity coefficient ratio;

$$k_{wf} = \frac{k_w}{k_f} \tag{5}$$

thermal diffusivity coefficient ratio;

$$\alpha_{wf} = \frac{\alpha_w}{\alpha_f} \tag{6}$$

Dimensionless time;

$$t^* = \frac{t \alpha_f}{r_{wi}^2} \equiv Fo \tag{7}$$

Peclet number;

$$Pe = Re.Pr = \frac{2u_0 r_{wi} \rho_f c_f}{k_f} \tag{8}$$

and dimensionless frequency;

$$F = Pe\beta r_{wi} \tag{9}$$

The dimensionless energy differential equation for the wall side is:

$$\frac{1}{\alpha_{wf}} \frac{\partial T_w^*}{\partial t^*} = \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial T_w^*}{\partial r^*} \right) + \frac{1}{Pe^2} \frac{\partial^2 T_w^*}{\partial x^{*2}} \tag{10}$$

Fluid side dimensionless energy differential equation is;

$$\frac{\partial T_f^*}{\partial t^*} + (1-r^{*2}) \frac{\partial T_f^*}{\partial x^*} = \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial T_f^*}{\partial r^*} \right) + \frac{1}{Pe^2} \frac{\partial^2 T_f^*}{\partial x^{*2}} \tag{11}$$

Nondimensionalization of wall side initial and boundary conditions;

$$\text{For } t^* = 0, \quad T_w^* = 0 \tag{12}$$

$$\text{For } x^* = -\infty, \quad T_w^* = 0 \tag{13}$$

$$\text{For } x^* = +\infty, \quad \frac{\partial T_w^*}{\partial x^*} = \lambda F \text{Sin}(F x^*) \tag{14}$$

$$r^* = 1+d^* \text{ ve } x^* < 0 \text{ için } T_w^* = 0 \tag{15}$$

For $r^* = 1 + d^*$ and $x^* \geq 0$, $T_w^* = [1 - \lambda \text{Cos}(F x^*)]$ (16)

For $r^* = 1$, $T_w^* = T_f^*$ and also $\frac{\partial T_w^*}{\partial r^*} = \frac{1}{k_{wf}} \frac{\partial T_f^*}{\partial r^*}$ (17)

Nondimensionalization of initial and boundary conditions for the fluid side;

For $t^* = 0$, $T_f^* = 0$ (18)

For $x^* = -\infty$, $T_f^* = 0$ (19)

For $x^* = +\infty$, $\frac{\partial T_f^*}{\partial x^*} = \lambda F \text{Sin}(F x^*)$ (20)

For $r^* = 1$, $T_w^* = T_f^*$ and also $\frac{\partial T_f^*}{\partial r^*} = k_{wf} \frac{\partial T_w^*}{\partial r^*}$ (21)

for $r^* = 0$ (on the pipe axis) $\frac{\partial T_f^*}{\partial r^*} = 0$ (22)

The bulk temperature and heat flux at the interface can be expressed in dimensionless form as follows [1].

$$T_b^* = 4 \int_0^1 r^* (1 - r^{*2}) T_f^* dr^* \tag{23}$$

$$q_{wi}^* = \frac{q_{wi}}{k_f (T_1 - T_0) / r_{wi}} \tag{24}$$

if defined as,

$$q_{wi}^* = - \left(\frac{\partial T_f^*}{\partial r^*} \right)_{r^*=1} \tag{25}$$

is obtained.

2.2 Numerical Solution

2.2.1 Discretization

To solve the problem using the finite difference method, the differential equations' initial and boundary conditions must be discretized. Discretization means that differential equations are expressed algebraically, in other words, solved numerically. In the equations, time-dependent terms are discretized using the fully implicit method, while the convection terms are discretized using the central difference method. Discretization has been carried out around the P point in a two-dimensional node system using Patankar's control volume approach [17].

For the wall side, discretization is performed for the control volume around the P point;

$$\frac{r_p^*}{\alpha_{wf}} (T_p^* - T_p^{0*}) \frac{\Delta x^* \Delta r^*}{\Delta t^*} = \left[r_n^* \frac{T_n^* - T_p^*}{(\delta r^*)_n} - r_s^* \frac{(T_p^* - T_s^*)}{(\delta r^*)_s} \right] \Delta x^* + \frac{r_p^*}{Pe^2} \left[\frac{T_E^* - T_p^*}{(\delta x^*)_e} - \frac{T_p^* - T_W^*}{(\delta x^*)_w} \right] \Delta r^* \tag{26}$$

is obtained. This equation can be compactly represented in computer notation as follows [18]:

$$a_p T_p^* = a_E T_E^* + a_w T_w^* + a_N T_N^* + a_S T_S^* + a_p^0 T_p^{0*} + c \tag{27}$$

$$a_E = \frac{r_p^* \Delta r^*}{Pe^2 (\delta x^*)_e} \tag{28}$$

$$a_w = \frac{r_p^* \Delta r^*}{Pe^2 (\delta r^*)_w} \tag{29}$$

$$a_N = \frac{r_n^* \Delta x^*}{(\delta r^*)_n} = \left[\frac{r_p^*}{(\delta r^*)_n} + 0.5 \right] \Delta x^* \tag{30}$$

$$a_S = \frac{r_s^* \Delta x^*}{(\delta r^*)_s} = \left[\frac{r_p^*}{(\delta r^*)_s} - 0.5 \right] \Delta x^* \tag{31}$$

$$a_p^0 = \frac{r_p^* \Delta x^* \Delta r^*}{\alpha_w \Delta t^*} \tag{32}$$

$$b=0 \quad \text{and} \tag{33}$$

$$c=0 \tag{34}$$

$$a_p = a_E + a_w + a_N + a_S + a_p^0 + b \tag{35}$$

The fluid side differential equation can be discretized around point P as;

$$r_p^* (T_p^* - T_p^{0*}) \frac{\Delta x^* \Delta r^*}{\Delta t^*} + (r_p^* - r_p^{s3}) \left\{ \left[T_p^* + \frac{T_p^* - T_E^*}{\exp[Pe^2(1-r_p^{s2})(\delta x^*)_e] - 1} \right] - \left[T_w^* + \frac{T_w^* - T_p^*}{\exp[Pe^2(1-r_p^{s2})(\delta x^*)_w] - 1} \right] \right\} \Delta r^* = \left[\frac{r_n^* (T_N^* - T_p^*)}{(\delta r^*)_n} - \frac{r_s^* (T_p^* - T_S^*)}{(\delta r^*)_s} \right] \Delta x^* \tag{36}$$

When this equation is written in compact form and the coefficients are determined,

$$a_p T_p^* = a_E T_E^* + a_w T_w^* + a_N T_N^* + a_S T_S^* + a_p^0 T_p^{0*} + c \tag{37}$$

$$a_E = \frac{(r_p^* - r_p^{s3})}{\exp[Pe^2(1-r_p^{s2})(\delta x^*)_e] - 1} \Delta r^* \tag{38}$$

$$a_w = (r_p^* - r_p^{s3}) \left\{ \frac{\exp[Pe^2(1-r_p^{s2})(\delta x^*)_w]}{\exp[Pe^2(1-r_p^{s2})(\delta x^*)_w] - 1} \right\} \Delta r^* \tag{39}$$

$$a_N = \frac{r_n^* \Delta x^*}{(\delta r^*)_n} = \left[\frac{r_p^*}{(\delta r^*)_n} + 0.5 \right] \Delta x^* \tag{40}$$

$$a_S = \frac{r_s^* \Delta x^*}{(\delta r^*)_s} = \left[\frac{r_p^*}{(\delta r^*)_s} - 0.5 \right] \Delta x^* \tag{41}$$

$$a_p^0 = \frac{r_p^* \Delta x^* \Delta r^*}{\Delta t^*} \tag{42}$$

$$b=0 \quad \text{and} \tag{43}$$

$$c=0 \tag{44}$$

$$a_p = a_E + a_w + a_N + a_S + a_p^0 + b \tag{45}$$

is obtained.

Similar coefficients are determined for the initial and boundary conditions and written in their places in the equations.

2.2.2 Solution

The temperature distribution was determined and solved by the Gauss-Seidel iteration method using discretized equations. As a result of the precise and long experiments, 24 nodes were placed in the calculation region in the radial direction, 8 on the wall side and 16 on the fluid side. Similarly, it was found sufficient to place a total of 208 nodes in the axial direction for the upstream and downstream regions. The initial value of the axial step length was taken as 0.04. The initial value of the time step was taken as 0.005 and increased by 0.005 in each iteration step.

The convergence limit in the solutions was taken as 10^{-7} and the experiments in a time period were continued until the largest remaining mismatch in the control volume energy equations for all points fell below this value. When the total number of experiments for a time period fell below 2, the system was considered to have reached the steady state and the experiments were terminated.

3. RESULTS and DISCUSSION

In this numerical study, four dimensionless parameters have been considered. These parameters are: wall thickness ratio d^* , Peclet Number Pe , wall-fluid thermal conductivity ratio k_{wf} , and wall-fluid thermal diffusivity ratio α_{wf} . The average values of these parameters and their different combinations have been analyzed in relation to the dimensionless frequency F . Initially, results are presented for an F value corresponding to a full period (for $F=6.3$), and later for larger F values. In selecting the average parametric values, conditions that could significantly reflect scenarios encountered in practical engineering applications have been considered. Given the wall thicknesses that might be encountered in microtubes, this study specifically selected large values for wall thicknesses. A graph including different wall thicknesses has also been provided.

In similar studies of this type, results are typically examined in terms of the local Nusselt number. However, in conjugate heat transfer problems, due to the high number of unknowns in the Nusselt number formulation, it is not very suitable to present results based on the Nu number [19, 20]. Therefore, in this study, results are generally presented in relation to the heat flux at the interface q_{wi} , which provides more illuminating insights. Additionally, some results have been presented in terms of the interface temperature and the fluid bulk temperature. Presenting the results in this way is an accepted convention in the literature [3, 14, 18].

Figure 2 shows the variation of the interface heat flux in the axial direction at different time intervals for a combination of average parameter values such as $Pe=4$, $d^*=0.6$, $k_{wf}=1$ and $\alpha_{wf}=0.1$. Here, $F = 6.3$ has been selected to be close to a full period value. Figures 3, 4, and 5 provide the variation graphs of the outer surface, interface, and fluid bulk temperatures with respect to the axial position for the same values. The curves for this specific dimensionless frequency are provided primarily to allow comparison with other figures.

Figure 2 shows that at the beginning of time, the interface heat flux values oscillate entirely within the positive region. The wave amplitude is small because the sinusoidal temperature variation at the outer surface has only just begun to show its effect. As time progresses, both the sinusoidal wave height increases and the interface heat flux values alternate between the positive and negative regions. In other words, local axial heat transfer occurs in the reverse direction from the tube to the fluid and from the fluid to the tube. At the onset of the event, the sudden change in the outer surface temperature causes a sharp increase in heat transfer values, which then stabilizes into a steady state.

Figure 3 is provided to illustrate the alternating variation of the outer surface temperature over a full period.

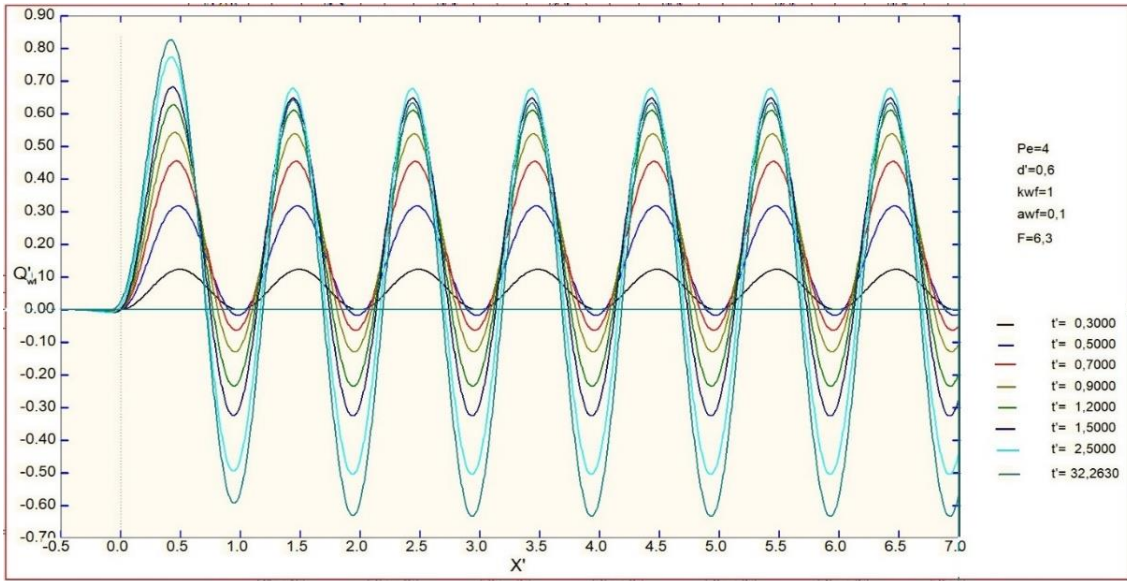


Figure 2. Transient axial distribution of interfacial heat flux (F=6.3)

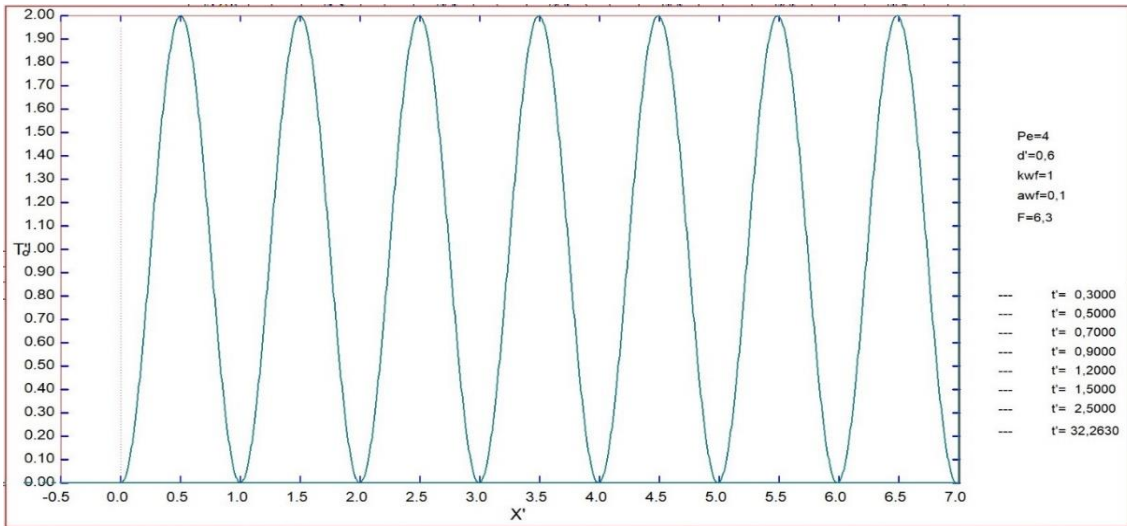


Figure 3. Transient axial distribution of outer surface temperature (F=6.3)

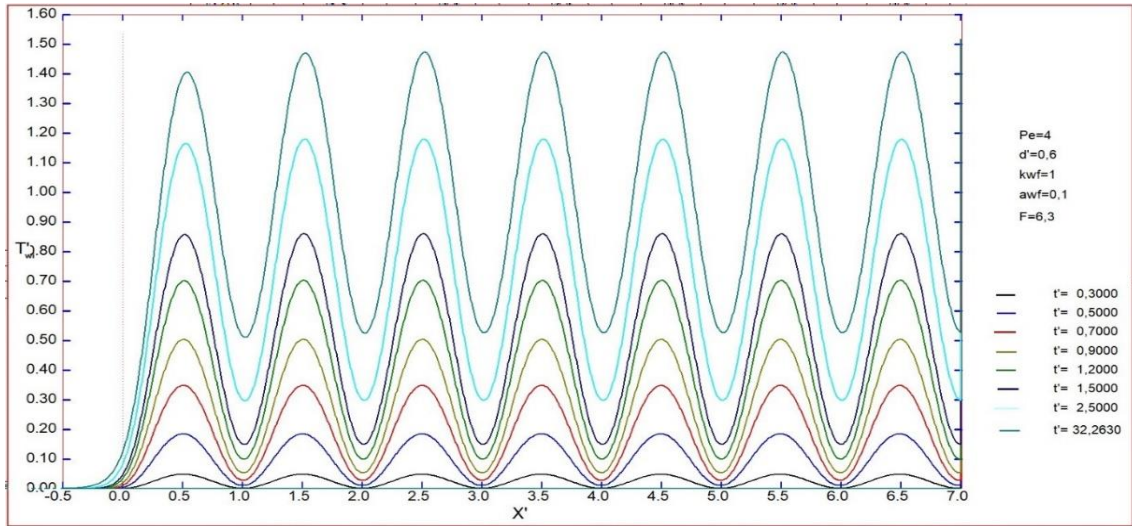


Figure 4. Transient axial distribution of interface temperature ($F=6.3$)

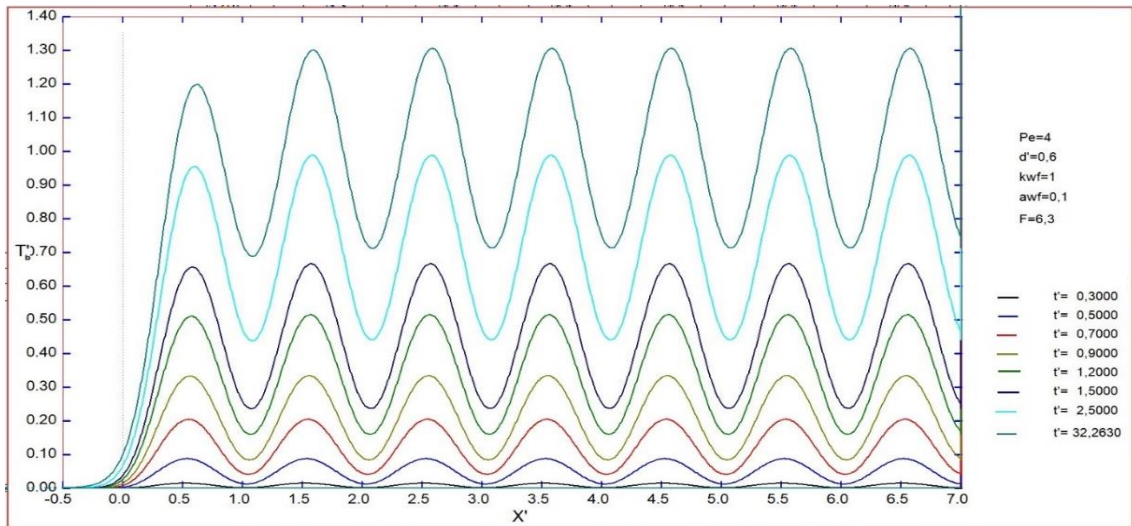


Figure 5. Transient axial distribution of bulk temperature ($F=6.3$)

Figure 4 is a good indicator of how the interface temperature evolves over time in relation to the outer surface temperature. In the steady state, although the peak temperature at the beginning of the axial position is slightly lower, it reaches a stable peak value at later positions before entering a downward trend. This is because the temperature will stabilize both over time and with progressing position.

A similar situation is observed in the bulk temperature curve in Figure 5. At the initial position, the peak value is lower, but at later positions, it remains at a stable peak in the steady state. However, these peak values are lower than the peak values of the interface temperature.

A common feature across all figures from Figure 2 to Figure 10 is that the time to reach the steady state is the same. The average parametric values, including the Peclet number, wall thickness ratio, thermal conductivity ratio, and thermal diffusivity ratio, are consistent in these figures. Therefore, the change in frequency does not affect the time to reach the steady state.

In Figure 6, the interface heat flux curves for a dimensionless frequency value of 150 are shown. These curves indicate that just before the beginning of downstream region, moving to the left from $x'=0$, there is a negative heat flux, meaning heat is transferred from the fluid to the tube. This suggests that at the beginning of downstream region, heating affects upstream region, resulting in a heat flux towards upstream region. At low Peclet numbers and high wall thickness values, heat transfer values to upstream region, or backward heat transfer, are higher [1, 2, 14]. At low Peclet numbers, axial heat conduction within the fluid is significant, which leads to pre-heating of the fluid and an increase in temperature to values higher than the initial temperature T_0 . As a result, heat is transferred from the fluid to the tube. Similarly, a thicker tube wall causes backward heat flux due to the effect of wall axial conduction. This also causes the temperature to rise to values higher than T_0 and results in reverse heat flux.

Another notable aspect in Figure 6 is the sudden increase in the interface heat flux values at the beginning of downstream region. At the early stage of the event, the temperature difference is larger, leading to rapid heat transfer. Consequently, the heat flux initially increases. However, as one progresses in the axial direction, the fluctuations in the interface heat flux stabilize into a steady state. The difference between Figure 4 and Figure 7 is quite evident. As the frequency increases, the oscillations in the interface temperature curves become quicker and the wavelengths shorter. This is expected because with higher frequency, the temperature starts rising again before dropping to lower values, making the periodic oscillation process faster. Therefore, the sinusoidal temperature wave has a shorter amplitude.

The same observations can be applied to Figure 9. In Figure 9, the wave amplitude is much shorter because the influence of the outer surface temperature lasts longer, even though the axial distance remains the same. The more pronounced effects of Figures 7 and 8 are seen in Figures 9 and 10. In these two figures, the dimensionless frequency value is quite high, and the temperature curves are almost straight lines. As such, Figures 9 and 10 are in significant agreement with the results from the study by Ates et al. [2].

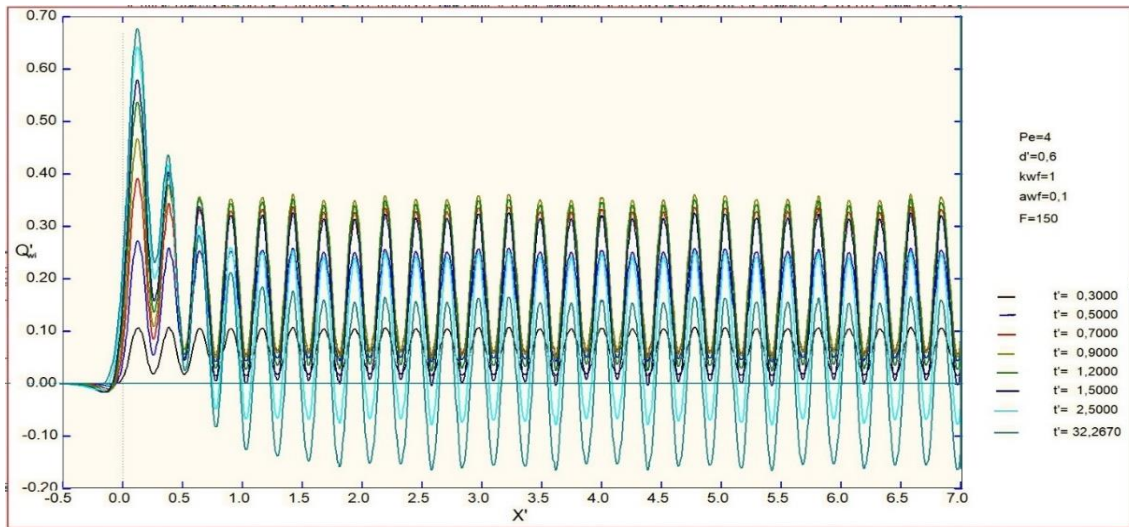


Figure 6. Transient axial distribution of interfacial heat flux (F=150)

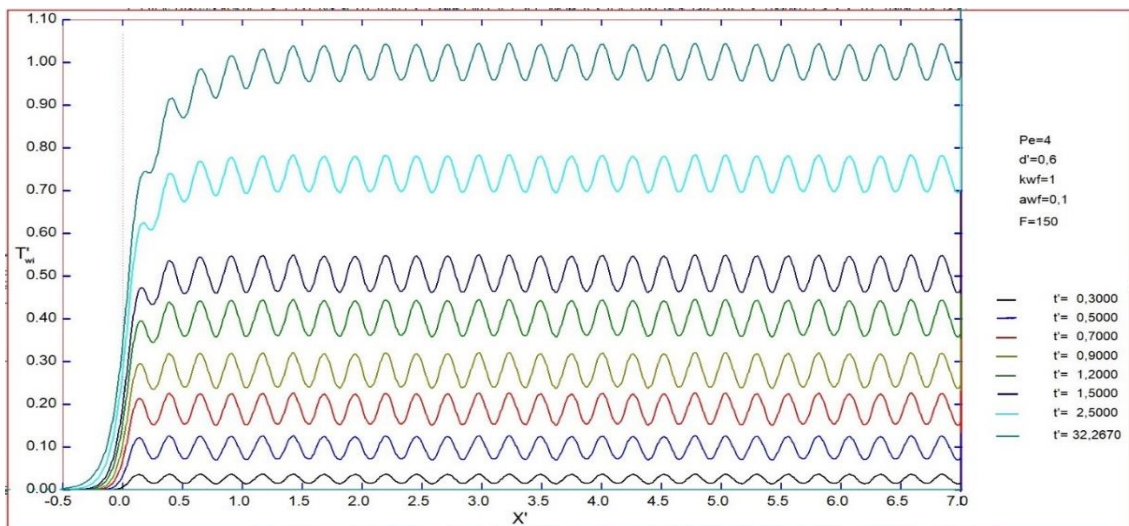


Figure 7. Transient axial distribution of interface temperature (F=150)

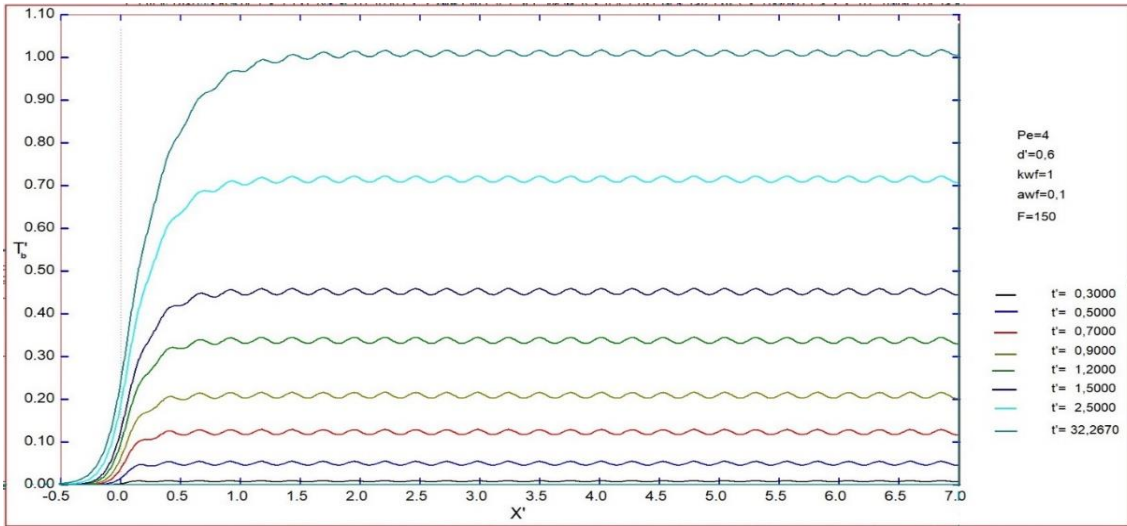


Figure 8. Transient axial distribution of bulk temperature (F=150)

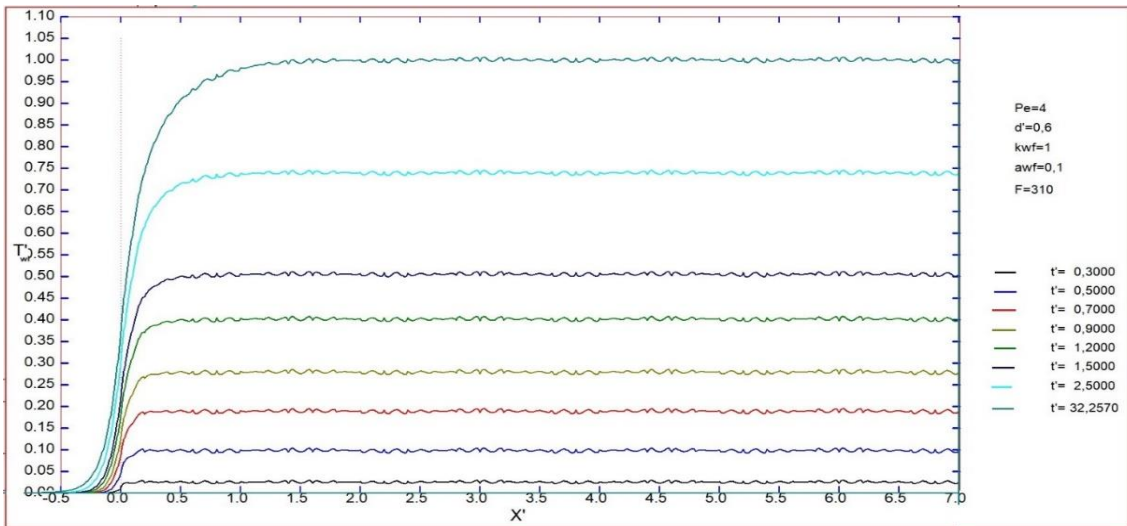


Figure 9. Transient axial distribution of interface temperature (F=310)

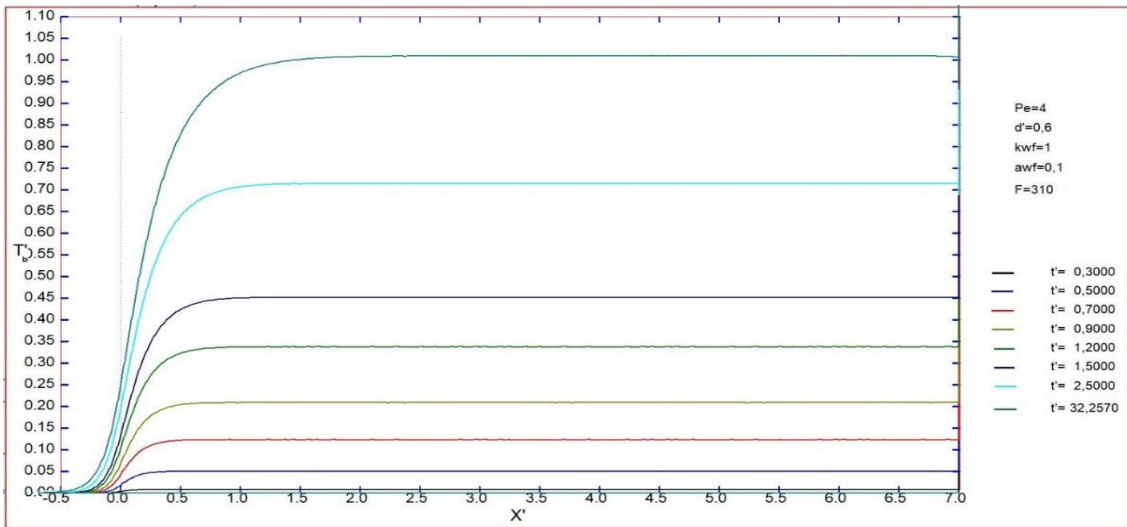


Figure 10. Transient axial distribution of bulk temperature (F=310)

Figure 11 shows the effect of wall thickness ratio on the interface heat flux. Here, the wall thickness ratios are selected to be quite large. In microtubes, the wall thickness is generally very high relative to the tube diameter, resulting in a large ratio of wall thickness to the inner radius. Therefore, wall thickness ratios are chosen to be large to resemble applications in microtubes. What stands out in the figure is the significant level of heat transfer from downstream region to upstream region at the beginning. For small wall thickness ratios, there is initially negative heat transfer, meaning from the fluid to the wall. For large wall thickness ratios, positive but more extensive and further backward heat transfer is observed. Although a peak in heat flux is visible at the entrance due to the high ΔT temperature difference at the beginning of downstream region, the heat flux values in the positive and negative regions equalize in the steady state. Thus, the total heat transfer from the wall becomes zero.

Figure 12 shows the effect of wall thickness ratio on the interface heat flux at high frequency values. For $x'=0$, the left and right sides show some minor differences, but similar observations to those in the previous figure can be made. What is striking here is the difference between small and large wall thickness ratios. For small wall thickness ratios, heat transfer occurs in a sinusoidal form, while for large wall thickness ratios, the wave amplitude decreases rapidly and eventually becomes zero after a certain value (e.g., $d'=1.5$ and $d'=2$). In other words, no heat transfer occurs into or out of the surface.

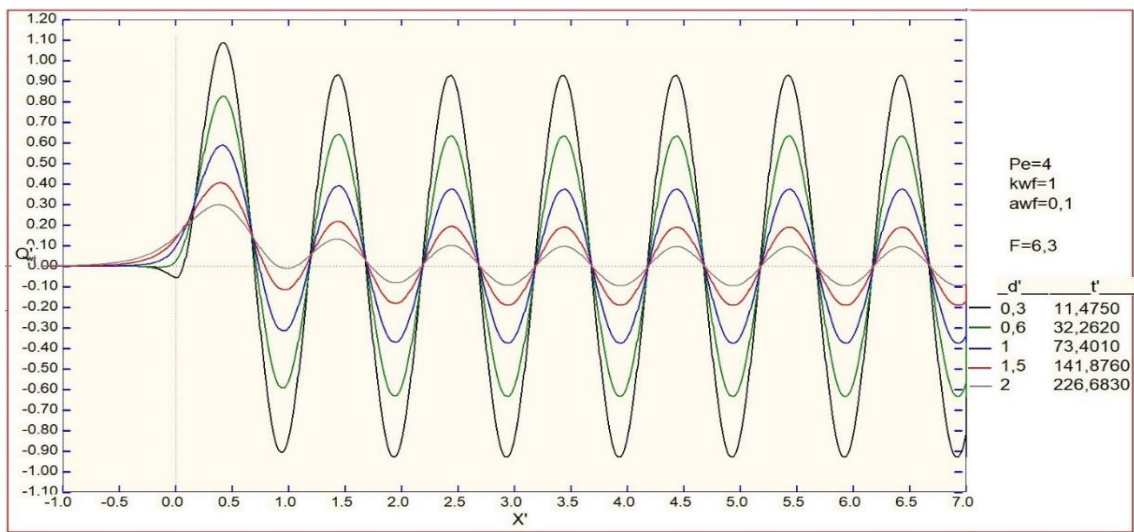


Figure 11. Change of interface heat flux with wall thickness ratio (for F=6,3)

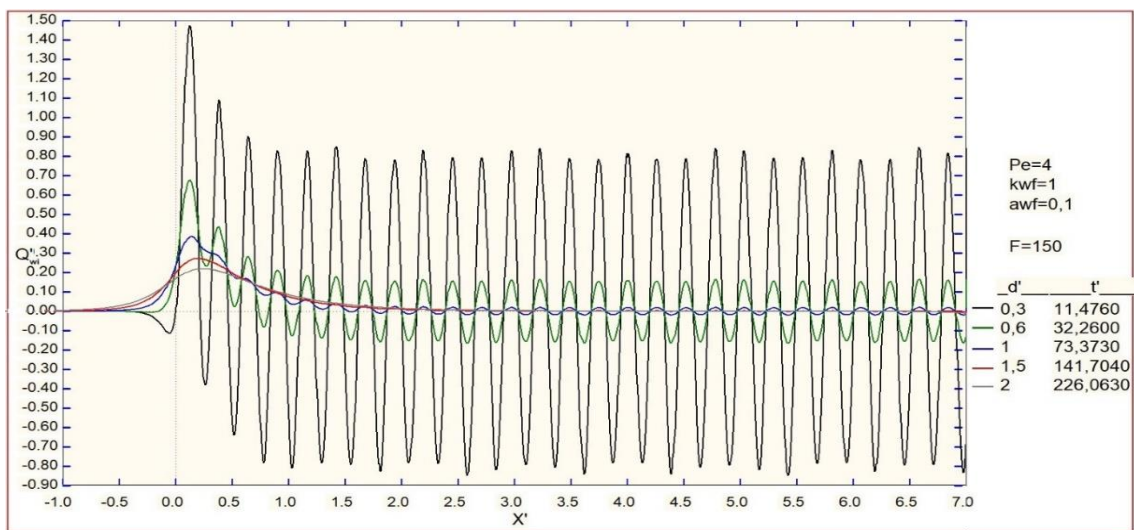


Figure 12. Change of interface heat flux with wall thickness ratio (for F=150)

4. CONCLUSION

The transient regime of conjugate heat transfer in the thermal entrance region of a thick-walled, infinitely long pipe with laminar flow has been examined, taking into account the axial conduction in the fluid. The pipe has been divided into two regions: upstream region and downstream region. While the outer surface of upstream region is maintained at a constant temperature, downstream region is exposed to a periodically varying temperature effect in the axial direction from its beginning. The problem was solved numerically using the finite difference method. The effects of four independent parameters were investigated in the problem. These parameters are: the wall thickness ratio d' , the wall-fluid thermal conductivity ratio k_{wf} , the wall-fluid thermal diffusivity ratio α_{wf} and the Peclet number. The problem was solved for different values of the dimensionless frequency F of the periodic temperature variation. The obtained results can be summarized as follows:

- 1. Axial Conduction and Pre-heating:** Due to axial conduction on both the wall and fluid sides, a significant amount of heat is transferred to upstream region. This reverse heat diffusion increases the temperature in the heated lower flow region and results in pre-heating of the unheated upper flow region. This pre-heating effect is more pronounced for $F > 6$.
- 2. Reverse Heat Transfer:** The tendencies for interface and bulk temperatures to spread towards $x' < 0$, i.e., towards upstream region, are less when F is small and become greater as F increases. For example, the heat transfer to the $x < 0$ region is more pronounced in Figure 6 than in Figure 2. However, beyond a certain value of F , this spreading remains constant.
- 3. Periodic Variation:** The interface heat transfer varies periodically in response to changes in the outer wall temperature. The amplitudes of these variations are strongly dependent on parameter values and frequency. However, the average is generally zero.
- 4. Effect of Parameters:** The effects of conjugate heat transfer and fluid axial conduction increase as the pipe wall thickness ratio (d') increases and as k_{wf} , α_{wf} and the Peclet number decrease. Beyond certain values, the effects of these parameters and frequency become negligible. Parameter values also affect the thermal development length and the time to reach a steady state. As the wall thickness ratio increases, the time to reach a steady state significantly lengthens.
- 5. Fully Developed Region:** In the fully developed and steady-state regions, the average interface temperature is 1.0, while the average bulk temperature is slightly lower. The average of the interface heat flux and, therefore, the net heat transfer from the pipe wall to the fluid is zero in the fully developed and steady state. This results in pre-heating of the fluid before this region. The amount of preheating and the length of penetration increase over time and go backwards.

The graphs and results obtained from this study can be reproduced by applying different values of various parameters such as the Peclet number, the thermal conductivity ratio, and the thermal diffusivity ratio. Additionally, working with different values of the dimensionless frequency F will lead to interesting results. Developing a new mathematical model and formulation for nanofluids and compressible flows could further elevate the study to a different level.

REFERENCES

- [1] S. Bilir, and A. Ates, "Transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with convective boundary conditions." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(14): 2701–2709, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00032-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00032-2)
- [2] A. Ates, S. Darici, and S. Bilir, "Unsteady conjugated heat transfer in thick walled pipes involving two-dimensional wall and axial fluid conduction with uniform heat flux boundary condition", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(23–24): 5058–5064, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.059>
- [3] A. Ateş, "Transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with axially periodic surface temperature in downstream region", *Sādhanā*, 44, 82, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12046-019-1079-z>
- [4] A. Barletta, E. Rossi di Schio, "Effects of viscous dissipation on laminar forced convection with axially periodic wall heat flux", *Heat and Mass Transfer*, 35: 9–16, 1999. <https://doi.org/10.1007/s002310050292>
- [5] O. Aydın, and M. Avcı, "Laminar forced convective slip flow in a microduct with a sinusoidally varying heat flux in axial direction", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89:606–612, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.056>
- [6] A. Barletta, E. Rossi di Schio, G. Comini, and P. D'Agaro, "Wall coupling effect in channel forced convection with streamwise periodic boundary heat flux variation", *International Journal of Thermal Science*, 48: 699–707, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.06.003>

- [7] A. Conti, G. Lorenzini, and Y. Jaluria, “Transient conjugate heat transfer in straight microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55: 7532–7543, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.046>
- [8] A. H. Altun, S. Bilir, and A. Ates, “Transient conjugated heat transfer in thermally developing laminar flow in thick walled pipes and minipipes with time periodically varying wall temperature boundary condition”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92: 643–657, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.011>.
- [9] S. V. Patankar, C. H. Liu, and E. M. Sparrow, “The periodic thermally developed regime in ducts with streamwise periodic wall temperature or heat flux”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21: 557–565, 1978, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(78\)90052-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(78)90052-2).
- [10] J. N. N. Quaresma, and R. M. Cotta, “Exact solutions for thermally developing tube flow with variable wall heat flux”, *International Communication Heat and Mass Transfer*, 21(5): 729–742, 1994, [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0735-1933(94)90074-4)
- [11] A. Barletta, and E. Zanchini, “Laminar forced convection with sinusoidal wall heat flux distribution: axially periodic regime”, *Heat & Mass Transfer*, 31: 41–48, 1995, <https://doi.org/10.1007/BF02537420>.
- [12] U. Atmaca, S. Bilir, and A. Ates, “Effects of wall conjugation and fluid axial conduction in circumferentially partly heated pipes and minipipes”, *Heat Transfer Research*, 48(16): 1433–1458, 2017, <https://doi.org/10.1615/heattransres.2017017830>
- [13] K. Zniber, A. Oubarra, and J. Lahjomri, “Analytical solution to the problem of heat transfer in an MHD flow inside a channel with prescribed sinusoidal wall heat flux”, *Energy Conversation Management*, 46: 1147–1163, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.06.023>
- [14] S. Darici, S. Bilir, and A. Ates, “Transient conjugated heat transfer for simultaneously developing laminar flow in thick walled pipes and minipipes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84: 1040–1048, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.049>
- [15] O. Aydin, M. Avci, T. Bali & M. E. Arıcı, “Conjugate heat transfer in a duct with an axially varying heat flux”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 76: 385–392, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.062>.
- [16] X. W. Zhu, Y. H. Fu, and J. Q. Zhao, “A novel wavy-tape insert configuration for pipe heat transfer augmentation”, *Energy Conversatiton Management*, 127: 140–148, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.006>
- [17] S. V. Patankar, Chapter 4 “Numerical heat transfer and fluid flow”, In: W J Minkowycz and A M Sparrow (eds), Newyork: Hemisphere Publishing Corporation, McGraw-Hill Book Company, pp. 44–47, 1980.
- [18] A. Ates, “Transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with convective boundary conditions”. Ph.D. Thesis. Selcuk University, Konya, Turkey, 1998.
- [19] M. Faghri, and E. M. Sparrow, “Forced convection in a horizontal pipe subjected to nonlinear external natural convection and to external radiation”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23(6): 861–872, 1980, [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90041-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90041-1).
- [20] D. J. Schutte, M. M. Rahman and A. Faghri, “Transient conjugate heat transfer in a thick walled pipe with developing laminar flow. Numer”, *Heat Transf. Part A Applications*, 21: 163–186, 1992, <https://doi.org/10.1080/10407789108944871>

List of symbols

a	constant of discretization equation
c_p	specific heat at constant pressure, (kJ/kgK)
d	thickness of the pipe wall, (m)
F	dimensionless frequency
Fo	Fourier number
Gz	Graetz number
k	thermal conductivity, (W/mK)
P	order of computational method
Pe	Peclet number
q	heat flux, (W/m ² K)
r	radial coordinate, (m)
Re	Reynolds number
t	time, (s)
T	temperature, (K)
To	initial temperature of the system, (K)
u	axial velocity, (m/s)
x	axial coordinate, (m)

Greek symbols

α	thermal diffusivity, (m ² /s)
β	frequency, (Hz)
dr	radial position difference
dx	axial position difference
Δr	radial step size, (m)
Δt	time step increment, (s)
ΔT	amplitude of periodic temperature variation, (K)
Δx	axial step size, (m)
λ	Wavelength (m)

Subscripts

b	bulk
c	coarse
f	fluid
i	inner wall
i, j	at nodal point i, j

m mean
max maximum
o outer wall
w wall
wf ratio of wall to fluid
wi wall to fluid interface

Superscripts

* dimensionless quantity
0 at previous time step



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Araştırma Makalesi/Research Article

Radyoizotop termoelektrik jeneratörlerin (RTG) risk analizi: Uzay görevleri için enerji güvenliği

Ozan ÖZTÜRK¹

¹ Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Dalaman Sivil Havacılık Yüksekokulu, Muğla, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

28.10.2024

Kabul tarihi

10.12.2024

Yayın tarihi

31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör

(RTG)

Uzay Görevleri

Risk Yönetimi

Enerji Güvenliği

ÖZET

Uzay sondaları ve uzay araçları günümüz araştırmalarında en çok dikkat çeken konular arasındadır. Uzay sondalarının görev süresinin uzunluğu bu tükenmeyen dikkatin odağındadır. Bu akademik çalışma, Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin (RTG) uzay görevlerindeki kullanımını incelerken, bu teknolojinin getirdiği avantajları ve potansiyel riskleri ele alır. RTG'ler, güneş enerjisinin ulaşamadığı uzak uzay bölgelerinde güvenilir ve uzun ömürlü enerji sağlama yeteneği nedeniyle değerlidir. Ancak, radyoaktif maddelerle çalışmanın doğası gereği, bu teknoloji ciddi riskler taşır. Bunlar arasında radyoaktif yayılım, atık yönetimi, ısı transfer problemleri ve elektriksel arızalar bulunur. Makale, bu riskleri yönetmek için güçlendirilmiş kaplamalar, sıkı güvenlik protokolleri, düzenli bakım ve eğitim gibi çeşitli önlemlerin alınmasının önemini vurgular. Ayrıca, risk matrisi kullanılarak risklerin önceliklendirilmesi ve yönetim stratejilerinin belirlenmesi sağlanır. Bu stratejik yaklaşım, RTG teknolojisini daha güvenli ve etkili hale getirmeyi amaçlar.

Risk analysis of radioisotope thermoelectric generators (RTG): Energy security for space missions

ARTICLE INFO

Article history:

Received

28.10.2024

Accepted

10.12.2024

Published

31.12.2021

Keywords:

Radioisotope Thermoelectric

Generator (RTG)

Space Missions

Risk Management

Energy Security

ABSTRACT

Space probes and spacecraft are among the most important topics in today's research. The length of the mission of space probes is at the center of this unending attention. This academic study examines the use of Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs) in space missions, addressing the advantages and potential risks associated with this technology. RTGs are valued for their ability to provide reliable and long-lasting energy in remote regions of space where solar energy cannot reach. However, due to the nature of working with radioactive materials, this technology carries serious risks. These include radioactive emissions, waste management, heat transfer problems and electrical failures. The paper emphasizes the importance of taking various measures to manage these risks, such as reinforced coatings, strict safety protocols, regular maintenance and training. Furthermore, a risk matrix is used to prioritize risks and identify management strategies. This strategic approach aims to make RTG technology safer and more effective.

1. GİRİŞ

Uzay görevleri çeşitli amaçlar için gerçekleştirilmektedir. Bu görevler, dört ana kategoride toplanabilir, bunlar; keşif, bilimsel araştırma, iletişim ve navigasyon görevleri ile savunma ve güvenlik görevleridir [1]. Keşif görevlerinin temel amacı, güneş sistemi içindeki gezegenler, uydular ve diğer gök cisimleri üzerinde bilimsel deneyler yaparak, gezegenlerin yaşanabilirliğini ve dünya dışı yaşamı keşfetme potansiyelini artırmaktır [2,3]. Bunun yanı sıra, uzay turizmi, tüketicilere benzersiz deneyimler sunarak popülaritesini artıran bir alan haline gelmiştir [4].

ORCID ID: Ozan Öztürk: 0000-0002-4959-6808

***Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s):** Ozan Öztürk, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Gövde Motor Bakım, MUĞLA

Tel: +90 554 70960

E-mail: ozturkozan@mu.edu.tr

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: O. Öztürk, "Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin (RTG) Risk Analizi: Uzay Görevleri için Enerji Güvenliği", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 125-135, Dec. 2024.

Uydular ya da uzay sondaları onlarca yıllarca süren görevlere çıkmaktadırlar. Uzun vadeli uzay misyonları, özellikle enerji kaynaklarının seçiminde titiz bir planlama gerektirir [5]. Güneş ışığının ulaşmadığı bölgelerde uzay görevleri imkânsız hale gelir [6]. Uzun süreler icra edilecek bu görevlerde uzay araçları enerji kaynağı olarak Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler (RTG) terci ederler. Bu noktada, RTG'ler, uzay araştırmalarında enerji sağlama konusunda üstün bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [7].

Uzay seyahatlerinde RTG tercih edilmesinin başlıca sebepleri arasında uzun ömürlü ve güvenilir enerji sağlaması yer alır. RTG'ler, radyoaktif izotopların bozunması sırasında açığa çıkan ısıyı elektrik enerjisine çevirir ve bu sayede yıllarca kesintisiz enerji sağlar. Özellikle derin uzay görevlerinde güneş enerjisinin yetersiz olduğu ya da kullanılmadığı durumlarda RTG'ler ideal bir enerji kaynağıdır [8]. RTG, Voyager 1 ve 2 gibi derin uzay görevlerinde büyük bir avantaj sağlamışlardır [9]. Ayrıca, RTG'ler bakım gerektirmeyen yapıları ve hareketli parçalara sahip olmamaları sayesinde zorlu ortamlarda dahi güvenilir bir enerji kaynağı sunar. Bu özellik, tamir imkânı olmayan uzak bölgelerdeki uzun süreli görevler için çok önemlidir [1]. Sonuç olarak, RTG'ler güneş enerjisine bağımlı olmadan uzun süreli enerji sağlayabildikleri ve güvenilir oldukları için uzay görevlerinde tercih edilmektedir [7]. Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler ile alakalı yapılan literatür Çalışmaları Özeti olarak aşağıda tablo halinde verilmiştir. Bu çalışmalar;

Tablo 1. Literatür Taraması (Yazar Tarafından Oluşturulmuştur)

Çalışma	Referans	Bulgular
Uzay Keşif Görevleri	[2]	Uzay görevleri gezegenlerin yaşanabilirliğini ve dünya dışı yaşamın potansiyelini anlamayı amaçlamaktadır.
Uzay Görevlerinin Geleceği	[3]	Bilimsel deneyler ve uzay keşifleri güneş sisteminin evrimi ve gezegenlerin keşfine odaklanmaktadır.
Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler	[6]	Radyoaktif izotopların bozunması sonucu açığa çıkan ısının elektrik enerjisine dönüştürülmesi; askeri, endüstriyel ve tıbbi alanlarda kullanımı.
Voyager Misyonları ve RTG Kullanımı	[9]	Voyager misyonları RTG teknolojisi sayesinde 40 yılı aşkın süredir veri göndermeye devam etmektedir.
Alternatif Radyoizotoplar	[10]	238Pu yerine kullanılacak alternatif izotopların uygunluğu ve radyasyon emisyonlarının azaltılması üzerine araştırmalar yapılmıştır.
MMRTG Programı	[11]	Mars ve diğer gezegenlerin keşfi için geliştirilen MMRTG'ler, uzun ömürlü ve güvenilir enerji sağlamaktadır.
RTG Teknolojisinin Tarihçesi	[1]	RTG'lerin Apollo, Viking ve Curiosity misyonlarında uzun ömürlü ve güvenilir enerji kaynağı olarak başarıyla kullanıldığı belirtilmiştir.
Termoelektrik Jeneratörlerin Verimliliği	[12]	Termoelektrik jeneratörlerin genellikle %10'dan daha az verimle çalıştığı ifade edilmiştir.
Termoelektrik Jeneratörlerin Maliyetleri	[13]	Yüksek inşaat maliyetlerinin düşük işletme maliyetleriyle dengelendiği belirtilmiştir.
Gelişmiş Radyoizotop Güç Sistemleri	[14]	Geliştirilen radyoizotop güç sistemlerinin, yüksek özgül güç sağlamayı hedeflediği belirtilmiştir.

Bu makalenin amacı, Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin uzay görevlerinde kullanımını, sağladığı avantajları ve karşılaşılan riskleri detaylıca incelemektir. Makale, RTG'lerin tarihsel gelişimini, kullanım alanlarını ve çevresel güvenlik risklerini ele alarak, bu alandaki mevcut düzenlemeleri ve en iyi uygulamaları değerlendirir. RTG'lerin doğru ve güvenli kullanımı, uzay araştırmalarının başarısı ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.

2. Temel Kavramlar

2.1. RTG ve Tarihsel Kullanımı

RTG, radyoaktif izotopların doğal bozunması sonucu açığa çıkan ısıyı elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır [5]. Bu dönüşüm, termoelektrik etki ile gerçekleştirilir; bu etki, ısı farkını doğrudan elektrik voltajına çevirir. RTG teknolojisi, 1950'lerin sonlarına dek uzanmakta ve ilk kullanımı 1961 yılında Transit 4A uydusu için gerçekleştirilmiştir. Bu teknoloji, Apollo, Viking ve Voyager gibi önemli uzay misyonlarında kritik roller oynamış, özellikle Voyager misyonları için sağladığı uzun süreli enerji, bu araçların

günümüze kadar bilgi göndermesini mümkün kılmıştır (NASA, 2013). RTG'ler, güneş ışığından bağımsız olarak çalışabilirler, bu da onları özellikle uzak gezegenler ve güneş sistemimizin dış bölgeleri gibi güneş enerjisinin yetersiz olduğu yerlerde ideal kılar [1].

Önemli RTG Uygulamaları:

- 1961: İlk RTG, Transit 4A uydusunda kullanılarak uzaya fırlatıldı.
- 1969: Apollo 12 misyonunda Ay'a inen ilk insanlı uzay aracı RTG kullandı.
- 1975: Viking 1 ve 2 misyonları, Mars yüzeyinde RTG teknolojisi ile enerji sağladı.
- 1977: Voyager 1 ve 2 misyonları, Jüpiter ve Satürn'e uzun süreli görevler için gönderildi.
- 1988: ABD'de Plütonyum-238 (Pu-238) üretimi askıya alındı.
- 1997: Cassini-Huygens misyonu, Satürn'e yönelik görevinde RTG kullandı.
- 2004: MMRTG programı geliştirildi.
- 2008: Alternatif radyoizotopların RTG'ler için uygunluğu incelendi.
- 2012: Curiosity aracı Mars'a indi ve RTG ile güçlendirildi [1,9,10,11].

RTG'lerin uzay görevlerinde tercih edilme nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Uzun Ömürlü ve Güvenilir Enerji Sağlama [5,7]
2. Güneş Işığına Bağımlı Olmamak [8]
3. Bakım Gerektirmeyen Yapıları [1]
4. Voyager Misyonları Gibi Uzun Süreli Kullanım Deneyimleri [9]

Uzay Görevlerinde RTG Kullanımının Avantajları, Dezavantajları ve Potansiyel Riskleri bulunmaktadır. RTG Teknolojisinin Avantajları ve Dezavantajları;

RTG'lerin avantajları arasında uzun ömürlü enerji sağlama kapasitesi, hareketli parça içermemesi nedeniyle yüksek güvenilirlik ve çeşitli ortamlarda çalışma yeteneği bulunmaktadır [15]. RTG'ler, özellikle güneş enerjisinin yetersiz olduğu derin uzay misyonlarında vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Bu jeneratörler, radyoaktif izotopların bozunmasından elde edilen ısıyı termoelektrik dönüştürücülerle elektrik enerjisine çevirir [8]. Uzun ömürlü olmaları ve bakım gerektirmemeleri, onları güvenilir ve stratejik bir çözüm haline getirmiştir [6].

Bununla birlikte, RTG teknolojisinin bazı dezavantajları da vardır. Termoelektrik jeneratörler genellikle %10'dan daha düşük verimlilikle çalışmaktadır [12]. Ayrıca, radyoaktif izotopların taşınması ve kullanımı sırasında radyasyon sızıntısı riski de göz önünde bulundurulması gereken önemli bir konudur [10].

Potansiyel Riskler:

1. Radyasyon Sızıntısı Riski: RTG'lerin kullanımı, içerdikleri radyoaktif materyaller nedeniyle sağlık ve çevresel riskler taşır. Özellikle, uzay aracı kazalarında radyoaktif materyallerin atmosfere sızması ciddi tehlikeler oluşturabilir [10].
2. Uzun Vadeli Atık Yönetimi: RTG'ler kullanıldıktan sonra yüksek derecede radyoaktif atık üretir. Bu atıkların güvenli bir şekilde yönetilmesi ve depolanması, önemli maliyet ve düzenlemeler gerektirir [1].

2.2. Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin Temel İlkeleri

RTG'ler, Seebeck etkisi olarak bilinen fiziksel ilkeye dayanmakta ve radyoaktif maddelerin doğal bozunması sonucu açığa çıkan ısıyı termoelektrik dönüştürücülerdir. Seebeck etkisi, iki farklı metal veya yarı iletken malzemenin uçlarının birleştirilmesi ve uçlar arasında bir sıcaklık farkı yaratılması durumunda ortaya çıkar. Seebeck katsayısı, malzemenin sıcaklık farkı karşısında ürettiği voltaj miktarını belirler [8]. RTG'lerde kullanılan radyoizotoplar, yüksek enerji yoğunluğuna ve uzun yarı ömre sahip olmalıdır. Plütonyum-238, bu özelliklere sahip ideal bir radyoizotoptur [1]. Plütonyum-238, neptünyum-237'nin nötronlarla bombardıman edilmesiyle üretilir. Üretim süreci ve güvenlik önlemleri, radyoaktif madde ile çalışmanın getirdiği riskleri minimize etmek için dikkatle yönetilmelidir [9].

RTG'lerin ana bileşenleri şunlardır:

- Radyoizotop Isı Kaynağı: Genellikle Plütonyum-238 kullanılır
- Termoelektrik Dönüştürücüler: Isıyı elektrik enerjisine dönüştüren cihazlar
- Isı Yönetim Sistemi: Isının etkin bir şekilde yönetilmesini sağlar [1,9,15].

Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG), modern RTG tasarımlarından biridir ve esnek modüler tasarımı sayesinde çeşitli uzay görevlerinde kullanılabilir. NASA tarafından belirtilen MMRTG'nin tasarım hedefleri arasında, güç seviyelerinin optimize edilmesi, en az 14 yıl boyunca güvenilir enerji sağlanması ve yüksek güvenlik standartlarının korunması yer almaktadır. MMRTG, Mars Science Laboratory (Curiosity) gibi görevlerde başarıyla kullanılmıştır ve bu görevde, Mars yüzeyinde sürekli enerji sağlayarak önemli bilimsel keşiflerin yapılmasına olanak tanımıştır [9].

3. MATERYAL ve METOT

Bu makalede, RTG teknolojisinin uzay görevlerinde kullanımını ve bu teknolojinin güvenlik risklerini analiz etmek amacıyla bir literatür taraması yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, RTG'lerin tarihsel gelişimi, uzay misyonlarındaki kullanım alanları ve mevcut alternatif enerji kaynakları üzerine yapılmış önceki araştırmalar incelenmiştir. Bu kapsamda, RTG teknolojisinin performansı, güvenilirliği ve çevresel etkilerine odaklanan makaleler, raporlar ve resmî belgeler sistematik bir şekilde değerlendirilmiştir. Makalenin amacı doğrultusunda, elde edilen veriler RTG'lerin uzun süreli uzay görevlerindeki başarısını ve riskleri minimize etme yollarını belirlemek için yapılandırılmıştır. Veriler, RTG teknolojisinin avantajları, dezavantajları ve güvenlik risklerinin değerlendirilmesi üzerine şekillendirilmiş olup, makalenin tartışma kısmında bu bulgular yorumlanmıştır.

3.1. Risk Analizi

Risk analizi, iş güvenliği ve gıda güvenliği de dahil olmak üzere birçok alanda potansiyel tehditleri ve fırsatları belirlemek, değerlendirmek ve yönetmek için sistematik bir yaklaşımdır. Bu süreç, birkaç temel bileşenden oluşur. İlk olarak, risk değerlendirme yöntemleri kullanılarak potansiyel tehlikeler tanımlanır. Hata Ağacı Analizi (FTA) ve Arıza Modları ve Etkileri Analizi (FMEA) gibi araçlar, tehlikelerin tanınmasında önemli rol oynar [16]. Sonrasında, olasılık ve etki analizi yapılır; bu aşamada belirlenen risklerin gerçekleşme olasılığı ve sonuçları değerlendirilir [17]. Özellikle gıda güvenliği bağlamında, nicel risk yönetimi zararların şiddetini ve olasılığını tahmin etmek için bilimsel verilerden yararlanır [18].

Risk yönetimi ise sürekli bir süreçtir ve değerlendirme sonuçları, siyasi önceliklerle uyumlu eyleme geçirilebilir stratejilere entegre edilir [18]. Ancak, risk analizi yapılandırılmış bir yaklaşım olmasına rağmen karmaşık olabilir. Özellikle endüstriyel sistemler veya gıda güvenliği düzenlemeleri gibi belirli bağlamlara adaptasyon gerektirir. Bu, çeşitli analitik araçların entegrasyonunu zorlaştırabilir [19].

Oluşturulan matris, olası risklerin olasılık ve etkilerine dayalı bir değerlendirme sunmakta ve hangi risklerin öncelikli olarak ele alınması gerektiğini belirlemektedir. Risklerin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için iki temel kriter dikkate alınmıştır: olasılık ve etki. Olasılık, belirli bir riskin gerçekleşme ihtimalini ifade ederken, etki, gerçekleşmesi durumunda doğuracağı sonuçları ölçmektedir. Her iki kriter de 1 ile 5 arasında bir puanlama ile değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Olasılık Skalası ve Etki Skalası

Olasılık Skalası	Etki Skalası
1 = Çok düşük	1 = Çok düşük
2 = Düşük	2 = Düşük
3 = Orta	3 = Orta
4 = Yüksek	4 = Yüksek
5 = Çok yüksek	5 = Çok yüksek

3.2. Potansiyel Riskler ve Hata Türleri

Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler (RTG), radyoaktif izotopların bozunmasından elde edilen ısıyı elektrik enerjisine dönüştüren güvenilir ve uzun ömürlü cihazlardır. RTG'ler, özellikle güneş enerjisinin yetersiz olduğu uzay görevleri gibi uzun süreli enerji gereksinimlerinde kullanılır [10]. Ana radyoizotop olarak Plütonyum-238 tercih edilir çünkü yarı ömrü uzun ve enerji yoğunluğu yüksektir [6]. RTG'ler, Voyager ve Mars misyonlarında olduğu gibi uzay araçlarına enerji sağlar, ayrıca denizaltılar ve uzak araştırma istasyonlarında da kullanılır [1,9]. Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör (RTG) teknolojisinin kullanımı, radyoaktif maddeler, termoelektrik sistemler ve çevresel/operasyonel koşullarla ilgili çeşitli riskleri beraberinde getirir. Bu riskler, doğru önlemler alınmadığı takdirde ciddi sonuçlar doğurabilir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Radyoaktif Yayılım Riski:

Uzay araçlarında kullanılan Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler (RTG), yapısal hasarlar, kaza veya doğal afetler sonucunda radyoaktif izotoplarının çevreye yayılması riskini taşır. Atmosferik giriş sırasında meydana gelebilecek kazalar, bu radyoaktif maddelerin çevreye dağılmasına yol açarak insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde ciddi zararlara neden olabilir. Bu durum radyasyon hastalıklarına, kanser riskinin artmasına ve çevresel kirliliğe yol açabilir. Bu tür riskleri en aza indirmek için RTG'ler, yüksek güvenlik standartlarına uygun olarak üretilmeli, güçlendirilmiş kaplamalar kullanılmalı ve acil durum planları detaylandırılarak düzenli tatbikatlarla test edilmelidir [11].

Radyoaktif maddelerin yayılmasını önlemek için RTG tasarımlarında, malzeme mühendisliği teknikleriyle yüksek mukavemetli kaplamalar kullanılmalıdır. Özellikle, çift katmanlı güvenlik kaplamaları ve termal genişleme dengesi sağlayan malzemeler, uzayda meydana gelebilecek ani darbelere karşı koruma sağlayabilir. Ayrıca, RTG'nin güvenlik analizleri için ileri düzey simülasyon teknikleri ve risk modelleme yöntemleri kullanılmalıdır [20, 21].

4.2. Radyoaktif Atık Yönetimi:

Radyoaktif atıkların uygun olmayan şekilde depolanması veya bertaraf edilmesi, çevresel ve insan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturur. Özellikle uzay görevlerinden dönen radyoaktif atıkların yanlış yönetimi, su ve toprak kirliliğine yol açarak ekosistemlere ve doğal yaşama zarar verebilir. Bu atıkların su kaynaklarına sızması, geniş çevresel kirliliğe ve biyolojik çeşitliliğin azalmasına neden olabilir. Bu risklerin önlenmesi için güvenli depolama kapları kullanılmalı ve ulusal ve uluslararası düzenlemelere uygun güvenli depolama alanları oluşturulmalıdır. Uzay ajansları ve ilgili kurumlar, radyoaktif atık yönetimi protokollerini sürekli gözden geçirerek bu alanda en iyi uygulamaları uygulamalıdır [10].

Radyoaktif atık yönetiminde, termal dirençli kompozit malzemelerden yapılmış kaplar kullanılmalı ve atıkların uzun süreli depolanması için derin jeolojik depolama alanları optimize edilmelidir. Ayrıca, sensör destekli izleme sistemleriyle bu depolama alanlarının güvenliği sürekli kontrol edilmelidir [22].

4.3. Termoelektrik Sistemle İlgili Riskler

4.3.1. Isı Transfer Problemleri:

Malzeme yorgunluğu ve termal stres, RTG'lerin uzun süreli kullanımında ciddi sorunlara yol açabilir. Özellikle aşırı ısı nedeniyle malzemelerde deformasyon oluşabilir ve bu da ısı transferinin yetersiz kalmasına neden olabilir. Yetersiz ısı transferi, RTG'nin ürettiği enerji miktarını azaltarak cihazın arızalanmasına ve verimlilik kaybına yol açabilir. Bu durum, uzay araçlarının kritik görevlerinin başarısız olmasına neden olabilir. Sorunların önüne geçmek için yüksek kaliteli malzemelerin kullanımı, düzenli bakım ve termal stres analizleri yapılmalıdır. Bu önlemler, malzemelerin yıpranmasını erken tespit ederek sistem arızalarının önlenmesine yardımcı olur [23].

Isı transfer sistemlerindeki verimliliği artırmak için, nanoteknolojik kaplamalar ve yüksek termal iletkenlik gösteren yeni nesil malzemeler kullanılabilir. Ayrıca, ısı kaybını azaltmak için termoelektrik bacakların geometrik optimizasyonu sağlanmalıdır. Bu tür iyileştirmeler, enerji üretim verimliliğini artırabilir [24].

4.3.2. Elektriksel Arızalar:

Elektrik bileşenlerinin arızalanması ve kısa devreler, RTG'nin elektrik üretiminde kesintilere neden olabilir. Bu durum, bileşenlerin aşırı yüklenmesi veya yaşlanması sonucu ortaya çıkar ve özellikle uzay görevlerinde uzun süreli kullanımda termal stres gibi faktörlerle tetiklenebilir. Elektriksel arızalar, RTG'nin işlevselliğini kaybetmesine ve bağlı olduğu sistemlerin devre dışı kalmasına yol açarak görevlerin başarısız olmasına neden olabilir. Bu tür sorunların önüne geçmek için yedekleme sistemleri, düzenli testler ve aşırı yük koruma önlemleri alınmalıdır. Elektrik bileşenlerinin düzenli bakımları, aşırı yüklenme ve yaşlanma belirtilerini erken tespit etmeyi sağlar. Ayrıca, aşırı yük koruma sistemleri, elektrik bileşenlerinin güvenliğini artırmada kritik bir rol oynar [25].

Elektriksel arızaların önlenmesi için akıllı kontrol sistemleri ve yedekleme mekanizmaları kullanılmalıdır. Örneğin, devre kesiciler ve güç dengeleme sistemleri, aşırı yüklenmelerin etkisini azaltabilir. Ayrıca, modüler tasarımlar sayesinde elektrik arızalarının etkisi lokalize edilebilir [26].

4.4.Çevresel ve Operasyonel Riskler

4.4.1.Uzay Görevleri ve Çevresel Koşullar:

Uzay ortamının zorlu koşulları, özellikle vakum, sıcaklık dalgalanmaları ve radyasyon, malzemelerin bozulmasına ve sistem hatalarına yol açabilir. Uzaydaki sıcaklık farkları ve radyasyon seviyeleri, Dünya koşullarından çok farklı olduğundan, bu koşullar malzemelerin termal genişleme ve büzülmesini etkileyerek yapısal bütünlüğü bozabilir. Ayrıca, radyasyon malzemelerin zamanla yıpranmasına neden olabilir. Bu durum, RTG'nin işlevselliğini olumsuz etkileyerek uzay görevlerinin başarısını riske atabilir. RTG'nin verimliliğinin azalması, uzay aracının enerji ihtiyacının karşılanamamasına ve görev süresinin kısalmasına yol açabilir. Sistem hataları da uzay aracının kritik işlevlerinin devre dışı kalmasına sebep olabilir. Bu riskler, dayanıklı malzeme seçimi, kapsamlı testler ve çevresel simülasyonlarla minimize edilebilir. Uzay koşullarına dayanıklı malzemelerin kullanılması ve bu malzemelerin vakum, radyasyon ve geniş sıcaklık aralıklarına dayanıklılığının test edilmesi, RTG sistemlerinin güvenilirliğini artırır. Ayrıca, çevresel simülasyonlar, uzay ortamının gerçek koşullarını taklit ederek olası sorunların önceden tespit edilmesini sağlar [1].

Uzay ortamındaki termal şoklar ve radyasyon etkilerine karşı, çok katmanlı izolasyon sistemleri ve radyasyona dayanıklı alaşımlar kullanılabilir. Ayrıca, uzay simülasyon ortamlarında yapılan testler, gerçek koşullara yakın sonuçlar sağlayarak tasarım güvenilirliğini artırabilir [27].

4.4.2. İnsan Hataları:

Eğitim programlarına artırılmış gerçeklik (AR) ve simülasyon tabanlı senaryolar dahil edilmelidir. Bu teknolojiler, operatörlerin gerçek zamanlı tepki verme kabiliyetini geliştirir ve hata oranlarını azaltır [25]. Eğitim eksikliği ve prosedür hataları, RTG'lerin yanlış işletilmesine ve güvenlik ihlallerine neden olabilir. Özellikle acil veya beklenmedik durumlar sırasında, personelin yeterli eğitim almaması, güvenlik protokollerinin ve acil durum prosedürlerinin yanlış uygulanmasına yol açabilir. Yanlış işletim ve güvenlik ihlalleri, radyoaktif maddelerin yanlış yönetimi sonucunda ciddi kazalara ve çevre kirliliğine neden olabilir. Bu durum, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Bu risklerin minimize edilmesi için düzenli eğitim programları, net prosedürler ve sürekli denetimler gereklidir. Personel, RTG'lerin kullanımı ve bakımı konusunda düzenli eğitim almalı ve bu eğitim sürekli güncellenmelidir. Ayrıca, güvenlik protokolleri ve acil durum prosedürleri net bir şekilde tanımlanmalı ve düzenli olarak gözden geçirilmelidir. Denetimler, olası hataların önceden tespit edilmesine ve gerekli önlemlerin alınmasına yardımcı olur [25].

4.5. RTG Teknolojisinde Risklerin Yönetimi ve Alınması Gereken Önlemler

RTG kullanımı sırasında karşılaşılabilecek risklerin yönetimi, güvenlik ve verimliliği sağlamak için önemli önlemler gerektirir. Bu önlemler, radyoaktif maddeler, termoelektrik sistemler ve çevresel/operasyonel koşullarla ilgili risklerin her birini spesifik olarak ele almalıdır. RTG teknolojilerinde risk yönetimi için, yapay zekâ tabanlı analiz araçları kullanılarak önleyici bakım algoritmaları geliştirilebilir. Bu algoritmalar, sistemin ömrünü uzatırken arızaların erken tespit edilmesine olanak tanır. Ayrıca, uluslararası standartlara uygun bir güvenlik çerçevesi oluşturulmalı ve sürekli güncellenmelidir [28].

4.5.1. Radyoaktif Yayılım Riskinin Yönetimi

Radyoaktif yayılım risklerini en aza indirmek için, kaplama sistemlerinde çok katmanlı kompozit malzemelerin kullanımı önerilmektedir. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklara ve mekanik şoklara karşı direnç sağlarken radyasyondan kaynaklanan malzeme bozulmasını önleyebilir. Ayrıca, ileri analiz yöntemleri kullanılarak güvenlik senaryoları test edilmeli ve modelleme teknikleriyle risk yönetim planları optimize edilmelidir [20]. RTG'lerin radyoaktif maddelerin yayılmasını önlemek için güçlendirilmiş kaplama sistemlerine sahip olması gerekir. Bu kaplamalar, yüksek mukavemetli ve radyasyona dayanıklı malzemelerden üretilmelidir. Ayrıca, sıkı güvenlik protokolleri uygulanmalı ve acil durum planları hazırlanarak düzenli tatbikatlar yapılmalıdır. Bu önlemler, radyoaktif yayılım risklerini en aza indirir [11].

4.5.2. Radyoaktif Atık Yönetimi

Radyoaktif atık yönetiminde, yeni nesil nano-yapılı kaplama teknolojileri, sızdırmazlık performansını artırabilir. Ek olarak, derin jeolojik depolama alanlarında sensör destekli izleme sistemleri kullanılmalı ve uzun süreli güvenlik raporlamaları oluşturulmalıdır. Bu sistemler, çevresel risklerin gerçek zamanlı takibini sağlayabilir [22]. Radyoaktif atıkların güvenli bir şekilde saklanması ve yönetilmesi, çevresel etkilerin azaltılması açısından önemlidir. Radyoaktif atıkların uygun depolama kaplarında saklanması, sızdırmazlık sağlamalı ve uzun vadeli depolama çözümleri kullanılmalıdır. Ayrıca, ulusal ve uluslararası düzenlemelere uyulmalıdır [10].

4.5.3. Termoelektrik Sistemle İlgili Risklerin Yönetimi

4.5.3.1. Isı Transfer Problemlerinin Yönetimi

Termal stres kaynaklı bozulmaları önlemek için, termoelektrik sistemlerde nano kaplamalar ve yüksek performanslı termal yağlar kullanılabilir. Ayrıca, ileri düzey termal modelleme yöntemleri, potansiyel zayıf noktaların tespiti için kritik öneme sahiptir [24, 29]. RTG'lerin verimliliğini artırmak ve malzeme bozulmasını önlemek için düzenli bakım yapılmalıdır. Ayrıca, termal stres ve aşınmaya dayanıklı yüksek kaliteli malzemeler kullanılmalı ve termal stres analizleri düzenli olarak gerçekleştirilmelidir [23].

4.5.3.2. Elektriksel Arızaların Yönetimi

Elektriksel arızaların etkisini azaltmak için yedekleme sistemleri oluşturulmalı ve düzenli testler yapılmalıdır. Aşırı yük koruması ile elektrik bileşenlerinin güvenliği artırılmalı, böylece kısa devre gibi sorunlar önlenmelidir [25]. Elektriksel arızaların minimize edilmesi için, enerji dengeleme algoritmaları ve akıllı güç yönetim sistemleri kullanılabilir. Özellikle, kısa devre algılama sensörleri ve otomatik devre kesiciler RTG'nin güvenilirliğini artırabilir [26].

4.5.4. Çevresel ve Operasyonel Risklerin Yönetimi

4.5.4.1. Uzak Görevleri ve Çevresel Koşulların Yönetimi

Uzak koşullarına dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi için, termomekanik testler ve radyasyon etkisi analizleri yapılmalıdır. Bu süreç, malzemelerin uzun vadeli dayanıklılığını artırarak görev başarısını garanti altına alır. Ayrıca, modüler tasarım yöntemleriyle sistemlerin bakımı ve onarımı kolaylaştırılabilir [27]. Uzak ortamının sert koşullarına dayanabilecek malzemelerin seçimi, RTG sistemlerinin güvenilirliğini sağlar. Malzemeler, uzak koşullarına dayanıklılık açısından kapsamlı testlerden geçirilmeli ve çevresel simülasyonlarla bu durumlar önceden değerlendirilmelidir [1].

4.5.4.2. İnsan Hatalarının Yönetimi:

İnsan hatalarının önlenmesi için, uzaktan eğitim modülleri ve sanal gerçeklik tabanlı simülasyonlar kullanılabilir. Ayrıca, güvenlik prosedürleri düzenli olarak güncellenmeli ve her görev öncesinde detaylı tatbikatlar yapılmalıdır. Eğitim eksikliği ve prosedür hataları, RTG'lerin yanlış işletilmesine neden olabilir. Bu nedenle, personel düzenli eğitim almalı, net prosedürler oluşturulmalı ve denetimler yapılmalıdır. Böylece güvenlik protokolleri ve acil durum planlarının doğru uygulanması sağlanır [25].

4.6. Risk Matrisinin Oluşturulması

Olasılık ve etki puanları, literatürdeki bilgiler ve risklerin doğası göz önünde bulundurularak atanmıştır. Aşağıda bazı önemli risklerin olasılık ve etki puanları verilmiştir:

- **Radyoaktif yayılım riski:** Olasılık (2), Etki (5). Bu risk, özellikle atmosferik giriş sırasında meydana gelebilecek kazalarda radyoaktif maddelerin çevreye yayılmasından kaynaklanır. RTG'lerin geçmiş uzay görevlerindeki güvenlik performansları göz önüne alınarak bu riskin olasılığı düşük olarak değerlendirilmiştir. Ancak etkisi, insan sağlığı ve çevresel faktörler açısından çok ciddi sonuçlara yol açabileceğinden yüksek olarak belirlenmiştir [10,11].

- **Radyoaktif atık yönetimi:** Olasılık (3), Etki (4). RTG'lerden kaynaklanan radyoaktif atıkların uzun vadeli yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik için kritik bir konudur. Plütonyum-238'in üretim ve bertaraf süreçleri, atık yönetimiyle ilgili zorlukları artırmaktadır. Bu nedenle, olasılık orta, etkisi ise ciddi olarak değerlendirilmiştir [1,9]. Plütonyum-238 Atıklarının Yönetimi kısmı iki alt başlığa ayrılmaktadır. Bunlar aşağıda verilmiştir;

Kaplama Malzemeleri:

- a. Iridyum Alaşımları: Plütonyum-238 kapsüllerinde radyasyonun dışarı sızmasını önlemek için kullanılan iridyum, yüksek sıcaklık dayanımı ve uzun ömürlü yapısıyla tercih edilmektedir [9,10].
- b. Karbon Karbon Kompozitler: Yüksek termal dayanım ve mekanik mukavemet sağlayan bu malzemeler, özellikle atmosferik giriş sırasında oluşan yüksek sıcaklıklara karşı koruma sağlar [11].
- c. POCO Grafit: Yüksek yoğunluklu ve düşük geçirgenlikli bu malzeme, radyoaktif materyallerin güvenli bir şekilde muhafaza edilmesine yardımcı olur [10].

Güvenli Saklama Teknikleri:

- a. Çok Katmanlı Koruma: Iridyum ve karbon-karbon katmanlarından oluşan kapsüller hem radyasyonu engeller hem de darbelere karşı koruma sağlar [9,11].

- b. Yeraltı Depolama: Uzun vadeli saklama için özel yeraltı depoları, sızıntıyı engellemek amacıyla çok katmanlı bariyerlerle inşa edilmiştir [1].
- c. Yüksek Basıncılı Kapsülleme: Kapsüller, radyoaktif sızıntıları önlemek için yüksek basınç dayanımına sahiptir ve kazalarda koruma sağlar [9].
- **Isı transfer problemleri:** Olasılık (3), Etki (3). Termal stres ve malzeme yorgunluğu nedeniyle oluşabilecek ısı transfer problemleri, özellikle RTG'nin uzun süreli çalışması durumunda ortaya çıkabilir. Bu nedenle bu risk, orta düzeyde olasılık ve etkiye sahiptir. Malzeme bozulması, Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin (RTG) uzun vadeli performansını etkileyen kritik bir faktördür. Aşağıda malzemelerin performansı ve ısı transferi sorunlarına ilişkin şu önemli noktalar vurgulanmıştır:
 1. **Termal Malzemelerin Performansı:**
 - Termal yorgunluk, malzemelerde mikro çatlaklara neden olarak ısı transferini düşürür.
 - Malzeme genleşme uyumsuzluğu, bağlantı noktalarında stres birikimine yol açabilir.
 - Korozyon ve oksidasyon, malzeme dayanımını zayıflatarak verimliliği azaltır.
 2. **Isı Dağılımı:**
 - Isı kaynaklarının eşit dağılmaması, termoelektrik dönüştürücülerde verim kaybına yol açar.
 - Sıcaklık farklarındaki azalma, elektrik üretimini olumsuz etkiler.
 - Farklı malzemelerin ısı iletkenlikleri, performansı doğrudan etkiler.
 3. **Çözüm Önerileri:**
 - Yüksek sıcaklık dayanımlı malzemeler (karbon kompozitler, iridyum alaşımları) önerilmektedir.
 - Termal tasarım optimizasyonu ile termal stres ve sıcaklık dengesizlikleri azaltılabilir.
 - Oksidasyon ve radyasyona karşı koruyucu kaplamalar kullanılmalıdır.

Malzeme bozulmasını önlemek için gelişmiş malzeme seçimi ve termal tasarım optimizasyonu kritik öneme sahiptir. Bu önlemler, RTG'lerin uzun vadeli enerji üretim performansını artırabilir [30]. En sık karşılaşılan Isı Transferi Arızaları Alt Türleri ve Risk Analizi aşağıda verilmiştir.

Tablo 3. Isı Transferi Arızaları Alt Türleri ve Risk Analizi

Arıza Türü	Olasılık (1-5)	Etki (1-5)	Risk Skoru	Referanslar
Malzeme yorgunluğu	3	3	9	[31]
Termal stres	3	3	9	[25]
Aşırı sıcaklık farkları	3	3	9	[9]

- **Elektriksel arızalar:** Olasılık (2), Etki (4). Elektrik bileşenlerinde meydana gelebilecek kısa devreler ve diğer elektriksel sorunlar, RTG'nin işlevselliğini bozabilir. Bu risk, yüksek kaliteli yedekleme sistemleri ile sınırlı tutulsa da etkisi kritik görevlerde belirgin hale gelir [25].

Nükleer enerji santralleri büyük ölçekli elektrik üretirken, radyoizotop termoelektrik jeneratörler (RTG) radyoaktif bozunmadan elde edilen ısıyı elektriğe çevirerek küçük ölçekli, uzun ömürlü enerji sağlar. RTG'ler, uzay görevleri gibi erişilmesi zor yerlerde kullanılırken, nükleer santraller şehirlerin enerji ihtiyacını karşılayacak kapasitededir. RTG'ler hareketli parça içermediği için dayanıklıdır ancak enerji üretimi sınırlıdır [32-34].

Elektrik bileşenlerinde kısa devre ve aşırı yüklenme sorunları, RTG sistemlerinde görev sürekliliğini tehdit eden önemli risklerdir. Bu sorunlar genellikle aşırı yüklenme, kısa devre, radyasyon etkileri ve termal stres nedeniyle ortaya çıkar. Yedekleme sistemleri bu tür riskleri önlemek ve görev sürekliliğini sağlamak için kritik bir rol oynar.

1. Yedekleme Sistemlerinin Faydaları:
 - Görev Sürekliliği: Arıza durumunda devreye girerek sistemin çalışmasını kesintisiz sürdürür.
 - Aşırı Yük ve Termal Koruma: Yük ve sıcaklık limitlerini izleyerek sistem bileşenlerini korur.
 - Çoklu Güç Kaynağı: Birincil enerji kaynağında arıza meydana geldiğinde yedek güç kaynağı devreye girer.
2. Koruma ve Önleyici Bakım:
 - Düzenli testler ve simülasyonlarla arıza olasılıkları azaltılır.
 - Yüksek kaliteli yalıtım malzemeleri ve modüler tasarım, arıza etkilerini sınırlamak için kullanılır.

Sonuç olarak, yedekleme sistemleri, elektriksel arızaları önlemede ve RTG sistemlerinin uzun vadeli güvenilirliğini artırmada kritik bir çözüm sunar [25,9]

- **Uzay görevlerinde malzeme bozulması:** Olasılık (3), Etki (5). Uzay koşullarındaki sıcaklık dalgalanmaları ve radyasyonun malzemelere zarar verme potansiyeli nedeniyle bu risk yüksek bir etkiye sahiptir. Malzeme seçimindeki iyileştirmeler bu riskin olasılığını azaltmıştır [1].
- **İnsan hataları:** Olasılık (4), Etki (4). Eğitim eksikliği veya prosedür hataları, özellikle kritik görevlerde kazalara ve güvenlik ihlallerine neden olabilir. Bu durum, insan faktörlerinin düzenli eğitimlerle kontrol altına alınmasının önemini göstermektedir [25]. En sık karşılaşılan İnsan Hatalarının Alt Türleri ve Risk Analizi aşağıda verilmiştir.

Tablo 4. İnsan Hatalarının Alt Türleri ve Risk Analizi

Alt Tür	Olasılık (1-5)	Etki (1-5)	Risk Skoru	Referanslar
Eğitim eksikliği	4	4	16	[9]
Prosedür hataları	3	5	15	[1]
Yetersiz denetim	4	4	16	[11]

Bu puanlar hem gerçekleşme olasılığını hem de oluşabilecek sonuçların ciddiyetini göz önüne alarak riskleri daha kesin bir şekilde sınıflandırmamıza olanak tanımaktadır. Her risk için bir risk skoru, olasılık ve etkinin çarpımıyla hesaplanmıştır. Bu çarpım yöntemi, risklerin öncelikle hale gelmesi ve yönetim stratejilerinin oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır.

Tablo 5. Risk Matrisi

Riskler	Olasılık (1-5)	Etki (1-5)	Risk Skoru (Olasılık x Etki)	Referanslar
Radyoaktif yayılım riski	2	5	10	[10,11]
Radyoaktif atık yönetimi	3	4	12	[1,9]
Isı transfer problemleri	3	3	9	[30]
Elektriksel arızalar	2	4	8	[25]
Uzay görevlerinde malzeme bozulması	3	5	15	[1]
İnsan hataları	4	4	16	[9]

Bu risk puanları hem gerçekleşme olasılığını hem de oluşabilecek sonuçların ciddiyetini göz önünde bulundurarak riskleri daha kesin bir şekilde sınıflandırmamıza olanak tanımaktadır. Her risk için bir risk skoru, olasılık ve etkinin çarpımıyla hesaplanmıştır. Bu yöntem, risklerin öncelikli hale gelmesi ve yönetim stratejilerinin oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır. Örneğin, insan hatası riski (16) ve malzeme bozulması riski (15) öncelikli olarak ele alınması gereken riskler olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, elektriksel arızalar gibi nispeten düşük riskli olaylar daha az öncelik taşır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörlerin (RTG) uzay görevlerindeki kullanımını kapsamlı bir şekilde ele alarak bu teknolojinin avantajlarını, karşılaşılan riskleri ve bu risklerin yönetimi için gerekli stratejileri incelemiştir. RTG'ler, uzun süreli enerji gereksinimlerini karşılamak için sunduğu benzersiz avantajlarla uzay görevlerinin başarısında kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle derin uzay görevlerinde, güneş enerjisine bağımlı olmaksızın kesintisiz enerji sağlama kapasitesi, RTG'leri vazgeçilmez bir teknoloji haline getirmiştir.

Araştırmanın bulguları, RTG'lerin etkin kullanımı için üç temel gerekliliği öne çıkarmaktadır:

- **Güvenlik ve Dayanıklılık:** RTG'lerin güvenilirliği, radyoaktif maddelerin yayılma riskinin minimize edilmesiyle artırılabilir. Çok katmanlı kompozit malzemelerin kullanımı, radyasyonun etkilerini azaltırken sistem dayanıklılığını artırabilir. Güçlendirilmiş kaplamalar ve sıkı güvenlik protokolleri ile bu risklerin önlenmesi sağlanabilir.
- **Termal ve Elektriksel Verimlilik:** Termoelektrik sistemlerin ısı transfer verimliliği ve elektriksel performansı, yeni nesil malzemeler ve gelişmiş modelleme teknikleriyle optimize edilebilir. Nano kaplamalar ve yüksek performanslı termal yağların kullanımı, enerji üretimini artırarak uzun vadeli görevlerde sistemin güvenilirliğini sağlar.

- Risk Yönetimi ve Eğitim: İnsan hatalarının etkisini azaltmak için, artırılmış gerçeklik (AR) ve simülasyon tabanlı eğitim programları önerilmektedir. Eğitim ve prosedürlerin güncellenmesi, olası hata oranlarını minimize ederek güvenlik standartlarını yükseltebilir.

Çalışmanın sonuçları, RTG teknolojisinin uzay araştırmalarında daha geniş bir uygulama alanına sahip olabileceğini ve bu teknolojinin doğru yönetim stratejileri ile insan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel risklerin azaltılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, uluslararası standartlara uygun güvenlik protokolleri ve sürekli geliştirilen malzeme teknolojileri, RTG'lerin etkinliğini ve güvenilirliğini artırmada kritik rol oynayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, RTG teknolojisinin uzay görevlerindeki stratejik önemini vurgulamış ve gelecekteki çalışmalar için bir çerçeve sunmuştur. Gelişmiş malzemeler, simülasyon teknikleri ve güvenlik önlemleri ile desteklenen bu teknoloji, uzay keşiflerinin sınırlarını genişletmek için büyük bir potansiyele sahiptir.

YAZAR KATKILARI

Çalışma tek yazar tarafından yazılmıştır. Tüm çalışma yazar tarafından yapılmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Çalışmada çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR

- [1] A. C. Taner, "Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör (Radioisotope Thermoelectric Generator – RTG) inovasyon teknolojili Plutonyum-238 atom yakıtlı robot uzay araçları", Fizik Mühendisleri Odası Yayınları, 2011.
- [2] W. Wu, C. Wang, Y. Liu, L. Qin, W. Lin, S. Ye, H. Li, F. Shen, and Z. Zhang, "Frontier scientific questions in deep space exploration", Chinese Science Bulletin, vol. 68, no. 6, pp. 606–627, 2023, doi: 10.1360/TB-2022-0667.
- [3] N. Cox et al., "EXPLORE- Innovative scientific data exploration and exploitation applications for (planetary) space sciences", presented at the Europlanet Science Congress 2022, Granada, Spain, Sep. 2022, doi: 10.5194/epsc2022-507.
- [4] B. Shen, "Exploration methods in reinforcement learning", in 2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2022, pp. 709–713, doi: 10.1109/AEECA55500.2022.9918998.
- [5] K. Kha, S. Whitley, and K. Fretz, "Cost and considerations for successful implementation of long duration space missions", presented at the 2023 IEEE Aerospace Conference, 2023, doi: 10.1109/AERO55745.2023.10115892.
- [6] O. L. Ayodele, D. N. Luta, and M. T. Kahn, "A micro-nuclear power generator for space missions", Energies, vol. 16, no. 4422, 2023, doi: 10.20944/preprints202304.1058.v1.
- [7] M. A. Hayder, H. B. Estrada, N. J. Lindsey, and M. Pecht, "Assessment of the calendar aging of lithium-ion batteries for long-term space missions", Frontiers in Energy Research, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1108269.
- [8] L. Tailin, L. Youhong, Z.g Yingzeng, C. Haodong, X. Qingpei, Z. Jun, Z. Rende, L. Yi, and X. Yongchun., "Comprehensive modeling and characterization of Chang'E-4 radioisotope thermoelectric generator for lunar mission", Applied Energy, vol. 336, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120865.
- [9] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG) Fact Sheet", 2013. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/pdf/719139main_MMRTG_Factsheet.pdf.
- [10] R. C. O'Brien, R. M. Ambrosi, N. P. Bannister, S. D. Howe, and H. V. Atkinson, "Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications", Journal of Nuclear Materials, vol. 377, no. 3, pp. 506–521, 2008, doi: 10.1016/j.jnucmat.2008.04.009.
- [11] F. Ritz, "Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG) Program Overview", presented at the IEEE Aerospace Conference, 2004, doi: 10.1109/AERO.2004.1367632.
- [12] S. Sethumadhavan and D. Burger, "Powering a cat warmer using Bi₂Te₃ thin-film thermoelectric conversion of microprocessor waste heat", presented at the ASPLOS, 2006.
- [13] D. M. Rowe, "Thermoelectrics, an environmentally friendly source of electrical power", Renewable Energy, vol. 16, pp. 1251–1256, 1999, doi: 10.1016/S0960-1481(98)00512-6.
- [14] A. Misra, "Overview of NASA Program on Development of Radioisotope Power Systems with High Specific Power", presented at the 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), 2006, doi: 10.2514/6.2006-4187.
- [15] O. Ersoz, "Radioisotope thermoelectric generator (RTG)", Applied Physics Press, 2008.
- [16] B. Elahi, "Risk analysis techniques", in Safety risk management for medical devices, 2nd ed., Elsevier, 2022, pp. 89–153, doi: 10.1016/b978-0-323-85755-0.00014-x.
- [17] S. Chelak, "Risk analysis and assessment", Ekonomika i upravljenje: problemi, rešenja, 2024, doi: 10.36871/ek.up.p.r.2024.03.07.029.
- [18] C. Heggum, "Risk analysis and quantitative risk management", in Encyclopedia of meat sciences, 3rd ed., Elsevier, 2024, pp. 540–550, doi: 10.1016/b978-0-323-85125-1.00067-3.

- [19] M. Shahrokhi, M. V. Sarashk, and A. Bernard, "Risk Analysis, a Fuzzy Analytic Approach", in Risk Management, Sustainability and Leadership, IntechOpen, 2023, doi: 10.5772/intechopen.108535.
- [20] R. M. Ambrosi, H. Williams, E. J. Watkinson, A. Barco, R. Mesalam, T. Crawford, C. Bicknell, P. Samara-Ratna, D. Vernon, N. Bannister, D. Ross, J. Sykes, M. C. Perkinson, C. Burgess, C. Stroud, S. Gibson, A. Godfrey, R. G. Slater, M. J. Reece, K. Çen, K. Simpson, R. Tuley, M. Sarsfield, T. P. Tinsley, K. Stephenson, D. Freis, J. F. Vigier, R. JM Konings, C. Fongarland, M. Libessart, J. Merrifield, D. P. Kramer, J. Byrne and B. Foxcroft, "European Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs) and Radioisotope Heater Units (RHUs) for Space Science and Exploration," Space Science Reviews, vol. 215, no. 55, 2019, doi: 10.1007/s11214-019-0623-9.
- [21] R. D. Lorenz and E. S. Clarke, "Influence of the Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG) on the local atmospheric environment", Planetary and Space Science, vol. 193, p. 105075, 2020.
- [22] J. S. Dustin and R. A. Borrelli, "Assessment of alternative radionuclides for use in a radioisotope thermoelectric generator", Nuclear Engineering and Design, vol. 385, p. 111475, 2021, doi: 10.1016/j.nucengdes.2021.111475.
- [23] O. Ersoz, "Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG)", MMRTG Fact Sheet Update, 2013.
- [24] T. C. Holgate, R. Bennett, T. Hammel, T. Caillat, S. Keyser and B. Sievers, "Increasing the efficiency of the multi-mission radioisotope thermoelectric generator", Journal of Electronic Materials, vol. 44, no. 6, pp. 1814–1823, 2015, doi: 10.1007/s11664-014-3564-9.
- [25] R. Bechtel, "MMRTG Thermoelectric Couple", Department of Energy, 2013.
- [26] H. Jing, Q. Xiang, R. Ze, X. Chen, J. Li, J. Liao and S. Bai, "A skutterudite thermoelectric module with high aspect ratio applied to milliwatt radioisotope thermoelectric generator", Applied Energy, vol. 350, p. 121776, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121776.
- [27] Z. Yuan, X. Tang, Z. Xu, J. Li, W. Chen, K. Liu, Y. Liu and Z. Zhang., "Screen-printed radial structure micro radioisotope thermoelectric generator", Applied Energy, vol. 225, pp. 746–754, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.073.
- [28] C. S. R. Matthes, D. F. Woerner, T.J. Hendricks, J.-P. Fleurial, K. I. Oxnevad and C. D. Barklay, "Next-generation radioisotope thermoelectric generator study", U.S. Government Work, 2024, doi: 10.1109/10.1000.
- [29] D. Palaporn, S. Tanusilp, Y. Sun, S. Pinitsoontorn, and K. Kurosaki, "Thermoelectric materials for space explorations", Materials Advances, vol. 5, pp. 5351–5364, 2024.
- [30] Y. Liu, Y. Zhang, Q. Xiang, F. Hao, Q. An and H. Chen, "Comprehensive modeling and parametric analysis of Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator", Applied Thermal Engineering, vol. 219, p. 119447, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119447.
- [31] Y. Liu, Y. Zhang, and X. Pei, "Performance analysis and optimization of the Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG)", Applied Thermal Engineering, vol. 219, p. 119447, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119447.
- [32] B. Johnson, "Power sources for space exploration", Stanford University, 2024. [Online]. Available: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/johnson1/>.
- [33] S. Keranda, M. del M. P. G. Selakau, and N. P. Lindahitch, "A micro-nuclear power generator for space missions", Energies, vol. 16, 2023, doi: 10.3390/en16114422.
- [34] S. Kesharwani, C. Kinney, and S. Vasu, "Numerical modelling of solid state combustion in novel pyrolants used as heat and energy sources for space missions", presented at the AIAA SciTech Forum, 2023, doi: 10.2514/6.2023-3917.



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Araştırma Makalesi/Research Article

Atık sigara izmaritinden elde edilen liflerin harçların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi

Buse Cengiz¹, Yunus Gündüz^{2*}, Yuşa Şahin¹

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

²Yozgat Bozok Üniversitesi, Kenevir Araştırmaları Enstitüsü, Yozgat, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi
18.10.2024
Kabul tarihi
09.12.2024
Yayın tarihi
31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Sigara İzmariti
Çimentolu Harç
Lif
Mekanik Özellikler
Fiziksel Özellikler

ÖZET

Dünyada her yıl 6 trilyon sigara izmariti üretilmektedir. Sigara izmariti deniz, okyanus ve toprağa atık olarak atılıp, doğaya karışarak canlı yaşamı için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Sigara izmariti geri dönüşümü olmayan ve yıllarca doğada kalıp orman yangınlarına sebep olan, menfezlere atılıp yağmur suyu ızgaralarını doldurarak kanalların tıkanmasına yol açan ve nehirlerle, okyanuslara atılarak su kaynaklarımızın kirlenmesine yol açan bir atıktır. Bilinen en eski lif takviyesi kerpiç duvarların sıvasında kullanılan saman takviyeli kildir. 20. Yüzyılın son çeyreğinde lifli betonlar üzerinde birçok çalışma yapılmıştır ve bu konuda önemli mesafeler kaydedilmiştir. Çalışma kapsamında atık sigara izmaritlerinden elde edilen sigara izmariti liflerinin çimentolu harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Atık sigara izmaritlerinden elde edilen lifler ve kısa kesilmiş kancasız çelik lifler, harç karışımlarına hacimsel olarak %0,5, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında katılmıştır. Üretilen harçlar üzerinde taze halde yayılma deneyi ve sertleşmiş halde birim ağırlık, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı tayini deneyleri uygulanmıştır. Referans numunenin yayılma değeri 20 cm, birim ağırlık değeri 1,85 g/cm³, eğilme dayanımı değeri 2,70 MPa ve basınç dayanımı değeri 18,85 MPa olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucuna göre, işlenebilirliği azaltmadan basınç dayanımında %5 ve eğilme dayanımında %10 artış hedeflerine hacimce %0,5 oranında atık sigara izmariti lifi içeren karışımda ulaşılmıştır.

Investigation of the effect of fibers obtained from waste cigarette butts on the mechanical and physical properties of mortars

ARTICLE INFO

Article history:

Received
18.10.2024
Accepted
09.12.2024
Published
31.12.2024

Keywords:

Cigarette Butt
Cement Mortar
Fiber
Mechanical Properties
Physical Characteristics

ABSTRACT

Six trillion cigarette butts are produced in the world every year. Cigarette butts are thrown into sea, ocean and soil as waste and mix with nature, posing a great threat to living things. Cigarette butts are waste that cannot be recycled and remain in nature for years, causing forest fires, being thrown into culverts and filling rainwater grids, causing clogging of channels, and being thrown into rivers and oceans, causing pollution of our water resources. The oldest known fiber reinforcement is straw-reinforced clay used in the plaster of adobe walls. Many studies have been carried out on fibrous concrete in the last quarter of 20th century and significant progress has been made in this regard. Within the scope of the study, the effect of cigarette butt fibers obtained from waste cigarette butts on the physical and mechanical properties of cementitious mortars was investigated. Fibers obtained from waste cigarette butts and short-cut hookless steel fibers were added to the mortar mixtures at the rates of 0.5%, 1%, 1.5%, 2% and 2.5% by volume. Spreading test in fresh and determination of unit weight, flexure strength and compressive strength in hardened were carried out on the produced mortars. It was determined that the reference sample had spreading value of 20 cm, unit weight value of 1.85 g/cm³, flexure strength value of 2.70 MPa and compressive strength value of 18.85 MPa. According to the results of the study, targets of 5% increase in compressive strength and 10% increase in bending strength without reducing workability were achieved in the mixture containing 0.5% waste cigarette butt fiber by volume.

ORCID ID: Buse Cengiz : 0009-0008-9409-0903; Yunus Gündüz : 0000-0001-9740-0980; Yuşa Şahin : 0000-0002-3586-412X

*Sorumlu yazar: Yozgat Bozok Üniversitesi, Kenevir Araştırmaları Enstitüsü, Yozgat, Türkiye

E-mail: yunus.gunduz@bozok.edu.tr

Bu makaleye atıfta bulunmak için: Cengiz, B., Gündüz, Y., Şahin, Y., "Atık sigara izmaritinden elde edilen liflerin harçların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 136-148, 2024.

1. GİRİŞ

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde mineral ve kimyasal katkıları ilave edilerek elde edilen kompozit bir malzemedir. Betonun birçok avantajı olmasına karşın gevrek bir malzeme olması dolayısıyla düşük çekme dayanımına sahiptir. Betonun bu dezavantajını gidermek için literatürde kısa kesilmiş lif kullanımı çok önerilen bir yöntemdir [1, 2 ve 3]. Betonda özellikle çelik lifler kullanarak; çekme, eğilme, darbe dayanımı ve tokluk gibi özellikler büyük ölçüde iyileştirilmiştir [4-6 ve 7]. Çelik liflerin yanı sıra bazalt, polipropilen ve cam [8, 9 ve 10] lifler de çimento esaslı malzemelerde başta mekanik özellikler olmak üzere durabilite ve yangın dayanıklılığını artırmada kullanılmaktadır [11].

Son zamanlarda atık malzemelerin geri dönüştürülerek, çimentolu kompozitlerde lif takviyesi olarak kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Hamzaçebi çalışmasında [12], atık araç lastiklerinden elde ettiği çelik liflerin betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Kullanılan atık çelik liflerin, lif içeriğinin ve narinlik oranının artmasıyla yarma dayanımını ve eğilme dayanımını önemli ölçüde artırdığı, işlenebilirliği ise azalttığı gözlenmiştir. Tulaian ve ark. yaptıkları çalışmada [13], atık plastik liflerden üretilen portland çimentolu harçların mekanik özellikleri üzerine araştırma yapmıştır. Çalışmada lif içeriği ve lif boyutu değişkenliğine göre harçların mekanik özelliklerinin değiştiği belirtilmiştir. Liflerin ilave edilmesiyle birlikte portland çimentolu harçların eğilme dayanımının referans numuneye kıyasla % 6 ile %84 oranında arttığı belirtilmiştir. Park ve Lee yaptıkları çalışmada [14], atık cam, çelik ve polipropilen lifler içeren çimentolu harçlar üzerinde alkali silika reaksiyonu deneyi yapmışlardır. Çalışmada atık cam, çelik ve polipropilen lif katılmasıyla beraber alkali silika reaksiyonunun %40'a kadar azaldığı belirtilmiştir. Aynı zamanda harçların eğilme dayanımının %110'a kadar artırdığı ifade edilmiştir. Spadea ve ark. yaptıkları çalışmada [15], geri dönüştürülmüş naylon liflerin çimentolu harçlara etkisini araştırmışlardır. Çalışmada atık balık ağlarından geri dönüştürülmüş naylon lifler 12,7 mm, 25,4 mm ve 38,2 mm olmak üzere 3 farklı boyutta çimentolu harçlara ilave edilmiştir. Çalışma sonucuna göre lif uzunluğu arttıkça harçların eğilme dayanımının önemli derecede arttığı (%35) belirtilmiştir. Aynı zamanda liflerin katılmasıyla beraber çimentolu harçların ilk çatlak oluşturma direncinin arttığı gözlenmiştir.

Atık sigara izmaritlerinin biyolojik olarak parçalanamayan çöp türü ve sokaklardan nehirlerle okyanuslardan plajlara kadar en çok toplanan atık malzeme olduğu belirtilmiştir [16]. Atık malzeme olarak sigara izmaritinin geri dönüştürülmesi önem arz etmektedir. Atık sigara izmaritinin çimento esaslı karışımlarda kullanımına yönelik çalışmalara literatürde rastlanmıştır. Tao ve arkadaşları çalışmalarında [17], atık sigara izmaritini lif haline getirilmeden doğrudan beton karışımlarında kullanmışlardır. Atık sigara izmariti, temizlenip kurtulduktan sonra parafin mumuyla kapatılarak sertleştirilmiştir. Çalışma sonucunda karışımlarda sigara izmariti miktarının artmasıyla mukavemet değerlerinin azaldığı ve sünekliliğin arttığı gözlenmiştir. Rosete çalışmasında [18], Tao ve ark. [17] gibi atık sigara izmaritini lif haline getirilmeden doğrudan beton karışımlarında kullanmıştır. Numunelerde sigara izmariti miktarının artmasıyla beton renginin koyulaştığı ve koku oluştuğu gözlenmiştir. İlerleyen dönemlerde ise koku yok denecek kadar azalmıştır. Rahman ve arkadaşları çalışmalarında [19], diğer araştırmacıların kullandığı gibi atık sigara izmaritini bütün olarak bitümlerle karıştırarak, asfalt yapımında kullanmışlardır. Sızma testi, yumuşama noktası testi, viskozite testi ve bir bağlayıcı tahliye testi uygulamışlardır. Numunelerin yumuşama noktası değeri azalmış ve viskozite değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Mohajerani çalışmalarında [20], %1 oranında atık sigara izmariti kullanarak tuğla elde etmiştir. Atık sigara izmaritli tuğla, normal tuğlaya göre daha iyi dayanım göstermiştir. Ayrıca atık sigara izmaritli tuğla daha iyi yalıtım sağlamıştır ve daha hafif olarak elde edilmiştir. Khojasteh ve Ahmadi yaptıkları çalışmada [21], farklı oranlarda atık sigara izmarit lifi içeren betonlar üretmişlerdir. Çalışmada 10 farklı oranda atık sigara izmarit lifi kullanılmıştır. Çalışmada %0,2 orana kadar atık sigara izmarit lifi ilavesinin numunelerde basınç dayanımını artıracağı belirtilmiştir. Daha yüksek oranda atık sigara izmarit lifi içeren numunelerin ise basınç dayanımına olumsuz etki yaptığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde %0,2 oranında atık sigara izmarit lifi içeren numunelerin eğilme dayanımının arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak betonda hacimce %0,2 oranında atık sigara izmarit lifi kullanımının betonun mekanik özelliklerini iyileştireceği ifade edilmiştir. Bayati ve ark. yaptıkları çalışmada [22], beton içerisine %1 ile %5 arasında atık sigara izmarit lifi ilave ederek betonun fiziksel, elektriksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Beton içerisine ilave edilen atık sigara izmarit lifi arttıkça karışımların birim ağırlığının azaldığı belirtilmiştir. Aynı şekilde %5 atık sigara izmarit lifi içeren karışımların elektriksel dirençlerinin azaldığı ifade edilmiştir. Bu karışımların basınç dayanımı değerlerinin referans karışıma kıyasla %38 oranında azaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak %1 ile %5 oranlarında atık sigara izmaritinin taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında kullanılabileceği ifade edilmiştir. Literatür çalışmalarına göre; atık sigara izmariti ve atık sigara izmarit lifi olarak adlandırılan malzemelerin betonda belirli oranlarda kullanılabileceği hatta taşıyıcı olmayan yapılarda yüksek oranlarda kullanılabileceği belirtilmektedir.

Çalışma kapsamında, sigara izmaritleri atık kutularında toplanıp, atık sigara izmaritlerin kaplamaları soyularak lifli bölgeleri elde edilmiştir. Liflerin, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) altında tane boyutları ve şekilleri incelenmiştir. Lif içermeyen standart harç karışımı ve atık sigara izmaritinden elde edilen lifleri içeren harç karışımları üretilmiştir. Atık sigara izmaritinden elde edilen lifler, harç karışımlarına hacimsel olarak %0,5, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında katılmıştır. Karşılaştırma yapmak amacıyla aynı oranlarda kısa kesilmiş kancasız uçlu ve 6 mm uzunluklu çelik lifler kullanılarak harçlara ilave edilmiş ve böylece çelik lif ile atık

sigara izmaritinden elde edilen liflerin harç özellikleri üzerine etkisi karşılaştırılmıştır. Üretilen çimentolu harçlar üzerinde taze halde yayılma deneyi ve sertleşmiş halde birim ağırlık gibi fiziksel özellikleri ölçmeye yönelik deneyler uygulanmıştır. Çimentolu harçların mekanik özellikleri ise 28 günlük numuneler üzerinde yapılmış olan eğilme ve basınç deneyleri ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında atık sigara izmaritlerinden elde edilen liflerin harçlarda hangi oranlara kadar kullanılabileceği ortaya konmuştur.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Malzeme

2.1.1. Çimento

Karışımların hazırlanması için Yozgat Votorantim Çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı ve özgül yüzey değerleri sırasıyla 3,1 ve 3500 cm²/g'dır.

2.1.2. Silis Kumu

Çalışma kapsamında silis kumu kullanılmıştır. Silis kumunun yoğunluğu ve su emme değerleri, TS EN 1097-6 [23] standardına göre sırasıyla 2,6 g/cm³ ve %1,85 olarak belirlenmiştir.

2.1.3. Su

Çalışma kapsamında üretilen harçlarda Yozgat ili şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.4. Çelik Lif

Çalışma kapsamında 6 mm uzunluğunda ve 0,13 mm çapında olan çelik lifler kullanılmıştır. Çelik lifin yoğunluğu 7,8 g/cm³ ve çekme dayanımı 2850 MPa değerindedir [24]. Karışımlarda kullanılan çelik lifler Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çelik lif

2.1.5. Atık Sigara İzmarit Lifi

Atık sigara izmaritini toplamak için Yozgat Bozok Üniversitesi kampüs içerisinde çeşitli alanlara sigara izmariti toplama kutuları yerleştirilmiştir. Atık sigara izmaritleri toplama kutularından toplanarak Yozgat Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında çeşitli işlemlere alınmıştır. İlk olarak elek yardımıyla sigara külü ve diğer toz malzemelerin ayrımı yapılmıştır. Daha sonra sigara izmaritlerinin kaplamaları soyularak sigara izmaritleri bütün lifler halinde elde edilmiştir. Bütün lifli halde bulunan sigara izmarit lifleri elle ayrıştırılarak lifler tane tane olacak şekilde karışıma hazır hale getirilmiştir. Atık sigara izmarit liflerin hazırlanma aşamaları Şekil 2'de verilmiştir. Atık sigara izmarit lifinin yoğunluğu ve su emme değerlerini belirlemek için herhangi bir standart bulunmamaktadır. Ancak literatürde atık sigara izmaritlerin selüloz asetat liflerinden oluştuğu belirtilmiştir. Selüloz asetat liflerin toplam gözenekliliğinin %97, yoğunluğunun 0,65 ± g/cm³ ve su emme değerinin yaklaşık %850 değerinde olduğu belirtilmiştir [25].



a) Atık sigara izmaritinin toplanması



b) Atık sigara izmaritinin, sigaranın küllerinden ayrılması



c) Atık sigara izmaritlerinin kaplamalarının soyulması



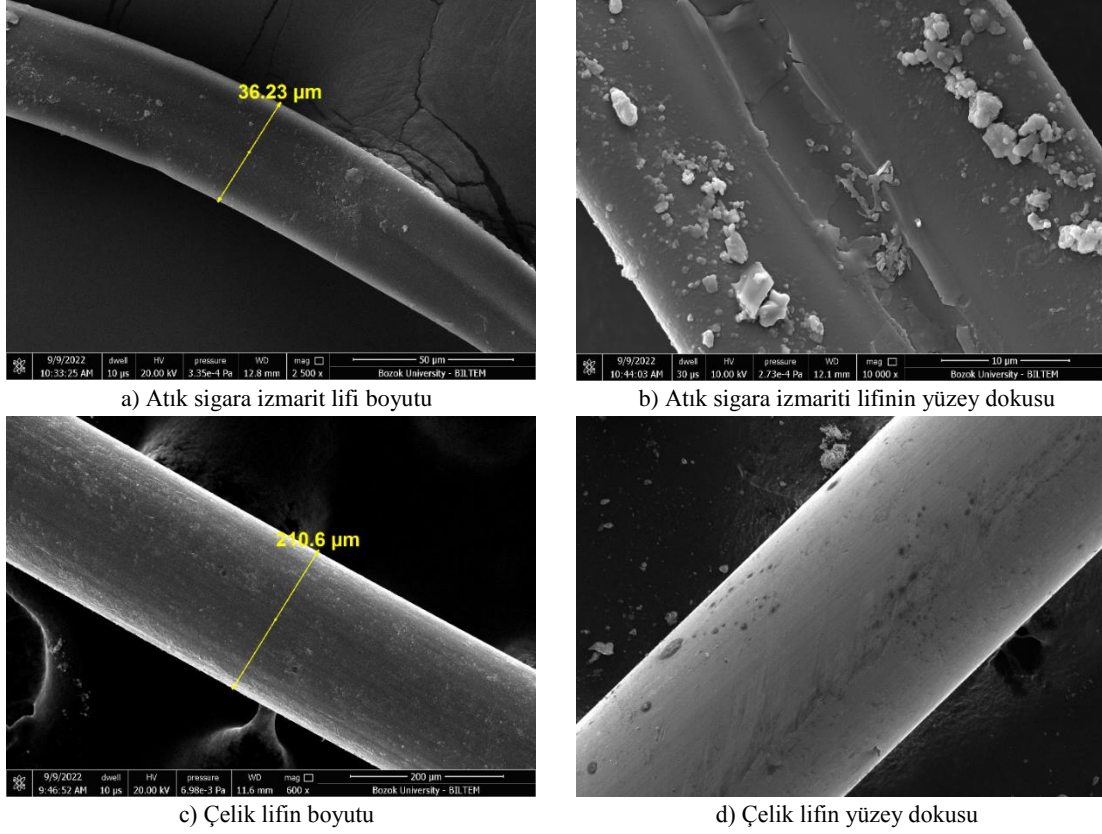
d) Atık sigara izmaritlerinin lif haline getirilmesi



e) Atık sigara izmarit lifi

Şekil 2. Atık sigara izmaritlerin toplanması ve karışıma hazır hale getirilmesi

Elde edilen lifler ve çelik lifler üzerinde SEM görüntüleri alınarak tane boyutları ve şekilleri incelenmiştir. SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Atık sigara izmarit lifinin ve çelik lifin SEM görüntüleri

Atık sigara izmariti liflerinin çapları ortalama 36 µm olarak ölçülmüştür. Çelik liflerin çapı ise yaklaşık 210 µm olarak ölçülmüştür. Atık sigara izmarit lifleri içyapısının boşluklu olduğu gözlemlenmiştir. Bundan dolayı su emme kapasitesi değerinin yüksek olacağı söylenebilir. Çelik lifin ise boşluksuz olduğu ve su emme kapasitesinin düşük olacağı söylenebilir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Harç Karışımı

Karışımlarda lifler hacimce %0,5, %1, %1,5, %2 ve %2,5 olacak şekilde hesaplanmıştır. Karışımlarda kimyasal katkı kullanılmaması amacıyla harçların su/çimento (S/Ç) oranı 0,6 olacak şekilde belirlenmiştir. Harç karışım miktarları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Harç karışım oranları, gr

Karışım	Çimento	Su	Silis kumu	Sigara izmarit lifi	Çelik lif
Referans				-	
İZ0,5				4,7	
İZ1				9,3	
İZ1,5				14,0	
İZ2				18,6	
İZ2,5	450	270	1350	23,3	
Ç0,5					33,3
Ç1					66,6
Ç1,5					99,8
Ç2					133,1
Ç2,5					166,4

Harç karışımları TS 1015-2 [26] standardında yer alan üretim işlemine uygun olarak hazırlanmıştır. Karışım kabına su konulduktan sonra mikser düşük hızda çalışırken 15 saniye içerisinde harç karışım katı kısmı ilave edilmiştir. Karıştırıcı 75 saniye çalıştırdıktan sonra karıştırma kabı tabanı ve kenarı kaşık yardımıyla sıyırılıp mikser 30 saniye yüksek hızda tekrar karıştırılmıştır. Taze haldeki harç karışımlar üzerinde TS 1015-3 [27] standardına uygun yayılma deneyi yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Yayılma deneyi düzeneği

Hazırlanan harç karışımı iki tabaka halinde kesik koni içerisine yerleştirildikten sonra harç yüzeyi düzenlenmiştir. Ardından kesik koni yukarıya doğru çekilerek alınmıştır. Dairesel levha üzerinde kalan harç kütlesi, yayılma tablası sabit sıklıkta 15 defa düşülerek levhaya yayılmıştır. Yayılan harç kütlesinin çapı ölçülerek karışımların yayılma değerleri not edilmiştir.

Hazırlanan harç karışımı 40*40*160 mm boyutlarında daha önceden yağlanmış kalıplara yarısı dolacak şekilde doldurulmuş ve sarsma tablasında sıkıştırma yapılmıştır. Sonra diğer yarısı doldurulup, aynı şekilde sarsma tablasında yerleştirme yapılmıştır. Sonrasında harç kalıpların üstü mala ile düzlenmiş ve numuneler 24 saat laboratuvar ortamında kalıpta beklemeye bırakılmıştır. Bir gün sonra kalıplar sökülerek numuneler 28 gün kür işlemine maruz kalacak şekilde 20±2°C sıcaklığa sahip kür havuzuna bırakılmıştır. Kür sonunda harç numuneleri üzerinde fiziksel özellikleri belirlemek için birim ağırlık, mekanik özellikleri belirlemek amacıyla eğilme dayanımı ve basınç dayanımı tayini testleri uygulanmıştır.

2.2.2. Birim Ağırlık

Sertleşmiş harç numuneler üzerinde TS EN 1015-10 [28] standardına uygun birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Numunelerin hacimleri havada ve suda tartılarak belirlenmiştir. Ardından numuneler sabit ağırlığa ulaşmaya kadar kurutulmuştur. Sertleşmiş harç numunelerin birim ağırlığı; kuru ağırlığın, numunenin hacmine bölünmesiyle belirlenmiştir.

2.2.3. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı TS EN 1015-11 [29] standardına uygun yapılmıştır. Eğilme dayanımından sonra ikiye ayrılan her bir numune üzerine 2.4 kN/s hızında basınç deneyi yapılmıştır. Toplam altı adet numune üzerinde basınç deneyi yapılmıştır. Basınç dayanımının hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

Burada;

f_c = Basınç dayanımı, MPa(N/mm²)

F = Kırılma anında oluşan en yüksek tepe yükü, N

A_c = Numunenin, üzerine basınç uygulandığı en kesit alanı, mm²

Basınç dayanımı düzeneği Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Basınç dayanımı düzeneği

2.2.4. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı TS EN 1015-11 [29] standardına uygun yapılmıştır. Yükleme hızı 0.05 kN/s uygulanmıştır. Üç adet numune üzerinde eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımının hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$f_{cf} = \frac{3 \times F \times L}{2 \times B \times D^2} \quad (1)$$

Burada;

f_{cf} = Eğilme dayanımı, MPa(N/mm²)

F = En yüksek tepe yükü, N

L = Mesnet açıklığı, mm

B = Numune genişliği, mm

D = Numune yüksekliği, mm

Eğilme dayanımı düzeneği Şekil 6'da verilmiştir.



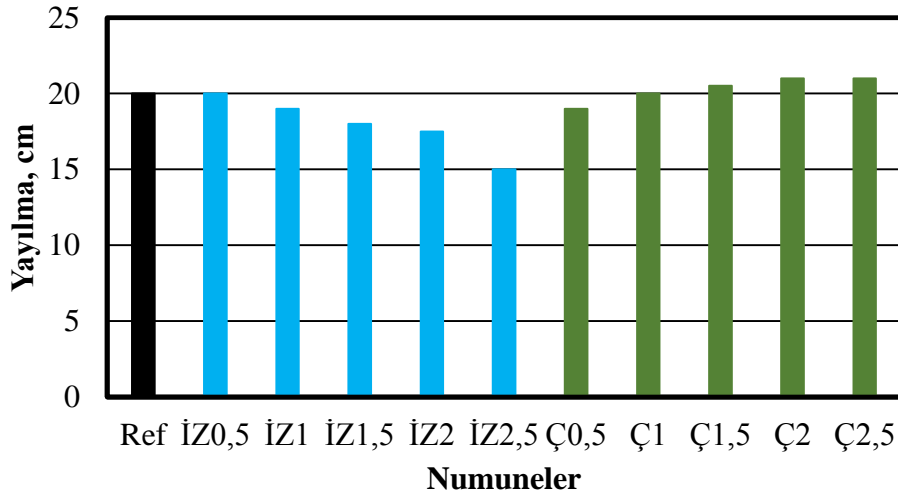
Şekil 6. Eğilme dayanımı düzeneği

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında taze harçlar üzerinde yayılma deneyi ve sertleşmiş harçlar üzerinde ise birim ağırlık, basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

3.1. Yayılma

Karışımlara ait yayılma değerleri Şekil 7’de verilmektedir.



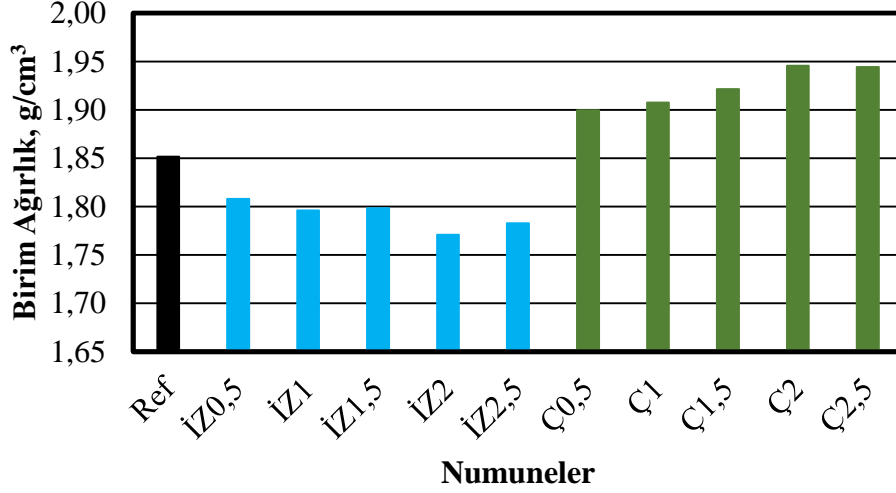
Şekil 7. Karışımların yayılma sonuçları

Referans karışımın yayılma değeri 20 cm olarak belirlenmiştir. Karışımlarda sigara izmariti lifi oranı arttıkça karışımların yayılma değerinin düştüğü görülmüştür. %2,5 oranında atık sigara izmarit lifi içeren karışımın yayılma değeri referans karışıma göre %25 oranında azalarak 15 cm değerinde bulunmuştur. Karışımlarda çelik lif oranı arttıkça karışımların yayılma değerinin arttığı görülmüştür. %2,5 oranında çelik lif içeren karışımın yayılma değeri referans karışıma göre %5 oranında artarak 21 cm değerinde

elde edilmiştir. Sigara izmariti lifinin yüksek su emme kapasitesine sahip olduğundan dolayı sigara izmariti lifi içeren karışımların yayılma değerinin düşük çıktığı düşünülmektedir.

3.2. Birim Ağırlık

Atık sigara izmarit lifinin birim ağırlığı düşük olduğundan atık sigara izmarit lifi içeren karışımların birim ağırlığı beklenildiği gibi referans karışıma kıyasla daha düşük olurken, çelik lif içeren karışımlarda ise referans karışıma kıyasla daha yüksek olmuştur. Karışımlara ait birim ağırlık değerleri Şekil 8’de verilmektedir.



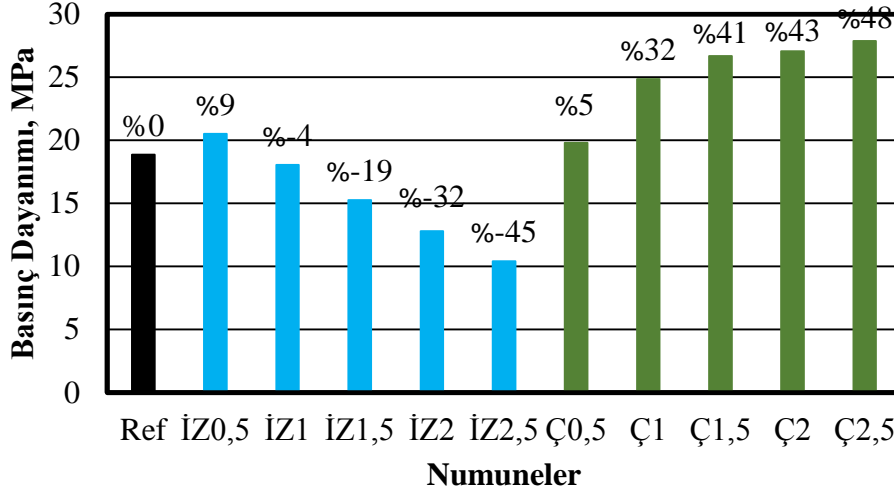
Şekil 8. Karışımların birim ağırlık sonuçları

Referans karışımın birim ağırlık değeri $1,85 \text{ g/cm}^3$ 'dir. Sigara izmariti lifi içeren karışımların birim ağırlık değeri referans karışıma göre daha düşük elde edilmiştir. En düşük birim ağırlık değeri, %2 sigara izmariti lifi içeren karışımda görülmüş ve referans karışımın birim ağırlığına kıyasla %4 düşük olarak $1,77 \text{ g/cm}^3$ değerinde elde edilmiştir. Çelik lif içeren karışımların birim ağırlık değerinin referans karışıma göre beklenildiği üzere daha yüksek elde edilmiştir. En yüksek birim ağırlık değeri, %2 çelik lif içeren karışımda görülmüş ve referans karışımın birim ağırlığına kıyasla %5 daha yüksek olarak $1,95 \text{ g/cm}^3$ değerinde elde edilmiştir. Karışımların birim ağırlık değerleri genel olarak, sigara izmarit lifi kullanım oranı arttıkça azalmış buna karşın çelik lif kullanım oranı arttıkça artmıştır. Bununla birlikte, İZ1,5 ve İZ2,5 numunelerin birim ağırlığı değerleri bir önceki numuneye kıyasla sırasıyla %0,12 ve %0,69 derecelerinde kısıtlı sayılabilecek artış göstermiştir.

Atık sigara izmarit lifinin yüksek su emme kapasitesine sahip olmasından dolayı liflerin karışım esnasında su absorbe edeceğinden karışım esnasında ve/veya karışım sonrasında liflerin absorbe ettiği suyun buharlaşarak uzaklaşması sonucu harçların birim ağırlık değerinin azalacağı düşünülmektedir. Çelik lif içeren karışımlarda ise, çelik lifin su emme kapasitesinin çok az ve/veya yok olması sebebiyle karışım esnasında ve/veya karışım sonrasında suyun buharlaşarak uzaklaşması olmayacaktır. Bu, çelik lifli harçların birim ağırlığının referans karışıma kıyasla yüksek çıkmasının başka bir nedeni de olabilir.

3.3. Basınç Dayanımı

Karışımlar üzerinde madde 2.2.2’de açıklanan yöntem uygun olarak basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları 6 numune ortalaması olarak Şekil 9’da verilmektedir.

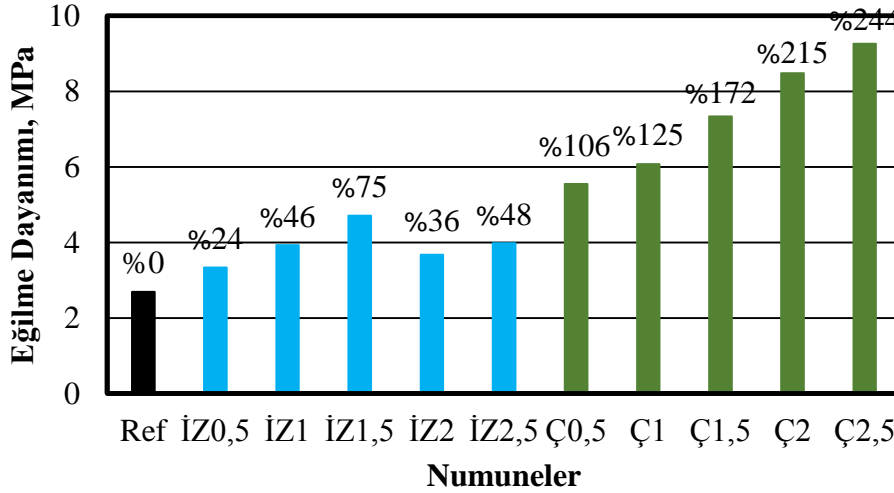


Şekil 9. Karışımların basınç dayanımı sonuçları

Referans karışımın basınç dayanımı değeri 18,85 MPa olarak elde edilmiştir. Karışımlara %0,5 oranında sigara izmariti lifinin katıldığı İZ05 kodlu karışımın basınç dayanımı değeri referans karışıma kıyasla %9 oranında daha yüksek olarak 20,50 MPa elde edilmiştir. Liflerin kısıtlı katıldığı %0,5 oranı hariç diğer oranlarda sigara izmariti lifi katılmasıyla beraber karışımların basınç dayanımları referans karışımın basınç dayanımına göre düşüş göstermiştir. Karışımlara çelik lif katılması ile birlikte karışımların basınç dayanımları artmıştır ancak belirgin bir doğrusal artıştan bahsedilememektedir. En yüksek basınç dayanımı %2,5 oranında çelik lif içeren karışıma ait olup, referans karışımın basınç dayanımına göre yaklaşık %48 oranında artış göstererek 27,86 MPa değerinde elde edilmiştir.

3.4. Eğilme Dayanımı

Karışımlar üzerinde madde 2.2.3'de açıklanan yöntem uygun olarak eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları 3 numune ortalaması olarak Şekil 10'da verilmektedir.



Şekil 10. Karışımların eğilme dayanımı sonuçları

Referans karışımın eğilme dayanımı değeri 2,70 MPa olarak elde edilmiştir. Karışımlara %0,5, %1 ve %1,5 oranında sigara izmariti lifinin katılması ile birlikte karışımların eğilme dayanımında doğrusala yakın bir artış olduğu söylenebilir. %1,5 oranında sigara izmariti lifi içeren harç karışımının eğilme dayanımı değeri 4,71 MPa olarak referans karışıma kıyasla yaklaşık %75 oranında artış göstermiştir. %2 ve %2,5 oranlarında sigara izmariti lifi içeren harç karışımların eğilme dayanımları, referans karışımın eğilme dayanımına kıyasla artış göstermesine rağmen %1,5 oranında sigara izmariti lifi içeren karışımın eğilme dayanımına kıyasla düşüş göstermiştir. Eğilme dayanımı değerleri %1,5 lif katılımında en yüksek değere ulaştıktan sonra yaklaşık yarı yarıya denebilecek düzeyde azalmıştır. İzmarit liflerinin %2,5 oranında katıldığı karışımda eğilme dayanımı değeri %2 oranında sigara izmarit lifi

içeren harç karışımına kıyasla %8 oranında artış gösterse de bu karışım Şekil 6'dan da görüleceği üzere çok düşük yayılma değerine sahiptir. Bundan dolayı, bu orandan daha fazla lif içerecek numunelerin, liflerin homojen olarak dağıldığı bir karışım elde edilebilmesi bakımından, üretilebilirliği düşük olacaktır. Harç karışımlara sigara izmariti lifinin katılmasıyla beraber en yüksek eğilme dayanımı değerinin yaklaşık %1,5 oranında elde edilebileceği söylenebilir. Karışımlara çelik lif katılması ile birlikte karışımların eğilme dayanımları beklenildiği üzere artmıştır. En yüksek eğilme dayanımı %2,5 oranında çelik lif içeren karışıma ait olup, referans karışımın eğilme dayanımına göre yaklaşık %244 oranında artış göstererek 9,25 MPa değerinde elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Çimentolu harçlarda atık sigara izmarit lifi içeriği arttıkça işlenebilirliğin azaldığı, buna karşın çelik lif içeriği arttıkça harçların yayılma değerinin arttığı görülmüştür. Ancak, çelik lifli miktarının yayılma değeri üzerinde daha kısıtlı bir değişikliğe neden olduğu (%5), atık sigara izmarit lifi miktarının ise daha belirgin (%25) değişikliğe neden olduğu saptanmıştır.
- Atık sigara izmarit lifi kullanımı ile beraber çimentolu harçların birim ağırlık değerinin %5 oranına kadar düşebileceği, çelik lif kullanımı durumunda ise çimentolu harçların birim ağırlık değerinin %5 oranına kadar artabileceği belirlenmiştir. Bu sonuç üzerinde, liflerin birim ağırlığının etkisi yüksektir, ancak liflerin su emme kapasitelerinin de etkisinin olabileceği düşünülmektedir.
- Atık sigara izmarit lifi kullanımının çimentolu harçların basınç dayanımını genel olarak olumsuz etkilediği görülmüştür. Ancak, atık sigara izmarit lifinin çimentolu harçlarda %0,5 oranında kullanımında basınç dayanımında %9 artış ve %1 kullanımında ise %4 gibi kısıtlı olarak değerlendirilebilecek bir azalma görülmüştür. Çelik liflerin kullanımı çimentolu harçların basınç dayanımını yükselttiği görülmüştür. Bununla beraber, çelik lifin %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında kullanıldığı çimentolu harçlarda basınç dayanımı değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.
- Beklenildiği üzere çelik lif içeren harçların eğilme dayanımı değerleri daha yüksek elde edilmiştir. Ancak, çimentolu harçlarda atık sigara izmarit lifi kullanımı ile birlikte tüm karışımların eğilme dayanımı değerlerinin referans karışıma kıyasla arttığı görülmüştür. Atık sigara izmariti liflerinin %1 ve %1,5 oranlarında kullanıldığı karışımlarda eğilme dayanımlarında sırasıyla %46 ve %75 gibi belirgin artışlar görülmüştür.

Sonuç olarak çimentolu harçlarda atık sigara izmaritinden elde edilmiş liflerin işlenebilirliğe olan olumsuz etkisi nedeniyle yüksek oranlarda kullanılmaması önerilse de, bu liflerin %1 - %1,5 gibi oranlarda çimentolu kompozitlerde kullanımlarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çelik liflerin ve atık sigara izmariti liflerinin beraber kullanımı için ilerleyen dönem çalışmalarında farklı oranların kullanımı ile mekanik özelliklerin detaylı olarak araştırılması önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 2209/A – Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destek Programı tarafından desteklenmiştir.

YAZAR KATKILARI

1. Yazar: Çalışma fikri, deneysel çalışmalar ve sonuçların analizi
2. Yazar: Deneysel çalışmalar, sonuçların analizi, makale yazılması ve düzenlemesi
3. Yazar: Yuşa Şahin: Sonuçların analizi, makale yazılması ve düzenlemesi

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmada herhangi bir kurum, kuruluş, kişiler ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK

Bu makalenin yayınlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] N. Banthia ve J.F. Trottier, "Concrete reinforced with deformed steel fibers, part I: bond-slip mechanisms" *Materials Journal*, vol. 91, no. 5, pp. 435-446, 1994.
- [2] F. Köksal, "Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı" Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2004.
- [3] Y. Gündüz, "Çelik Tel Donatılı Betonlarda Kırılma Parametrelerinin Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Yozgat, Türkiye, 2016.
- [4] D. Zhong ve K. Wu, "Fracture Properties of High-Strength Concrete" *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 86 – 88, 2001.
- [5] F. Köksal ve ark. "Effect of Steel Fiber Tensile Strength on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concretes" *Special Publication*, vol. 289, pp. 1-15, 2012.
- [6] D.Y. Yoo ve ark. "Material and Bond Properties of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Micro Steel Fibers" *Composites: Part B* 58, pp. 122-133, 2014.
- [7] P. Zhang ve ark. "A Review on Fracture Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete" *Journal of Building Engineering*, vol. 67, pp. 1-23, 2023.
- [8] E. Rousan ve ark. "Fresh, Mechanical, and Durability Properties of Basalt Fiber-Reinforced Concrete (BFRC): A Review" *Developments in the Built Environment*, vol. 14, pp. 1-17, 2023.
- [9] S. Yan ve ark. "An Experimental and Numerical Study on The Hybrid Effect of Basalt Fiber and Polypropylene Fiber on The Impact Toughness of Fiber Reinforced Concrete" *Construction and Building Materials*, vol. 411, pp. 1-10, 2024.
- [10] S.P.M. Perez ve ark. "Glass Fiber Reinforced Concrete: Overview of Mechanical and Microstructural Analysis" *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 9, no. 116, pp. 1-14, 2024.
- [11] C. Zhao ve ark. "Research on Different Types of Fiber Reinforced Concrete in Recent Years: An Overview" *Construction and Building Materials*, vol. 365, pp. 1-27, 2023.
- [12] D. Hamzaçebi, "Atık Çelik Liflerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [13] B.S. Tulaian, ve ark., "Recycled Plastic Waste Fibers For Reinforcing Portland Cement Mortar" *Construction and Building Materials*, vol. 127, pp. 102-110. 2016.
- [14] S.B. Park ve B.C. Lee, "Studies on Expansion Properties in Mortar Containing Waste Glass and Fibers" *Cement and Concrete Research*, vol. 34, 1145-1152, 2004.
- [15] S. Spadea ve ark., "Recycled Nylon Fibers as Cement Mortar Reinforcement" *Construction and Building Materials*, vol. 80, pp. 200-209, 2015.
- [16] T.E. Novotny ve ark., "Cigarettes Butts and the Case for an Environmental Policy on Hazardous Cigarette Waste" *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 6, 1691-1705, 2009.
- [17] L. Tao, ve ark., "Experimental Study on Uniaxial Compressive Strength of Concrete Incorporated with Cigarette Butts", Xijing University, Xi'an, China, 2018.
- [18] J. Rosete, "Recycling Cigarettes in Concrete", Master Thesis, California Polytechnic State University, USA, 2020.
- [19] M. Rahman, ve ark. "Possible Recycling of Cigarette Butts as Fiber Modifier in Bitumen for Asphalt Concrete", Master Thesis, School of Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia, 2020.
- [20] A. Mohajerani ve ark. "Recycling of Cigarette Butts in Fired Clay Bricks: A New Laboratory Investigation", *Materials*, vol. 13, no. 3, pp. 790, 2020.
- [21] T. Khojasteh ve H. R. Ahmadi, "Production of Green Fibred Concrete; a New Solution to Reduce Environmental Pollution Caused by Cigarette Butts", *Research Square*, vol. 1, pp. 1-18, 2024.
- [22] O. A. Z. Al-Bayati ve ark. "Reducing Energy Consumption By Using Cigarette Butts As Waste Material In Concrete Building Materials", *U.P.B. Sci. Bull.*, vol. 83, no. 4, pp. 277-290, 2021.
- [23] TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini, 2022.
- [24] Topçu, İ. B., 2006, "Beton Teknolojisi", Uğur Ofset A.Ş., Eskişehir.
- [25] J. Tannous ve ark. "Study of The Effects of Incorporating Depolluted Cellulose Acetate in Mortars, With and Without Superplasticizer, in View of Recycling Cigarette Butt Waste", *Construction and Building Materials*, vol. 346, 2022.
- [26] TS 1015-2, Kâgir harcı - Deney metotları - Bölüm 2: İmalatta kullanılan harç yığınlarından numune alma ve deney için hazırlama, 2000.
- [27] TS EN 1015-3, Kâgir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile), 2000.

- [28] TS EN 1015-10, Kâgir harcı-Deney metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini, 2001.
- [29] TS EN 1015-11, Kâgir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini, 2020.



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Araştırma Makalesi

Az Bilinen Ahşap Tavanlı Nakipzade Camii Üzerine Bir Değerlendirme

Sadakat Safiyye MUMCUOĞLU TÜRKER¹, *

¹ Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Yozgat, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

28.11.2024

Kabul tarihi

23.12.2024

Yayın tarihi

31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Yozgat

Nakipzade Camii

Ahşap Tavanlı Camii

Cephe

Karşılaştırmalı Analiz

ÖZET

XVIII. yüzyıldan günümüze, Yozgat camii mimarisinde ahşap tavanlı yapıların yoğun bir şekilde inşa edildiği görülmektedir. Bu yapılar arasında yer alan Nakipzade Camii, özellikle cephe tasarımında sergilediği taş işçiliğiyle dikkat çekmektedir. Cephe kullanılan silmeler, iki renkli kemer açıklıkları ve iyon düzende başlıklı sütunlar, yapının diğer ahşap tavanlı camilerden ayrılan özgün mimari unsurlarını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, az bilinen Nakipzade Camii'nin mimari özelliklerini ortaya koymak ve Yozgat Merkez'deki benzer camiler arasındaki yerini değerlendirmek amaçlanmıştır. Araştırmada, Nakipzade Camii'nin cephe rölövesi alınmış ve yapı yakın konumdaki benzer camilerle karşılaştırmalı analiz yöntemiyle incelenmiştir. Analizler sonucunda, Nakipzade Camii'ndeki taş işçiliği benzer bir yapıya rastlanmamıştır. Ancak cephe düzeni açısından Kayyımzade Camii ile benzerlikler olduğu belirlenmiştir. Duvar yapım tekniği, cephelerdeki kat silmeleri ve pilastr gibi unsurlar ise Nakipzade Camii'ni diğer camilerden belirgin bir şekilde ayırmaktadır.

An Evaluation on Nakipzade Mosque with a Little Known Wooden Ceiling

ARTICLE INFO

Article history:

Received

28.11.2024

Accepted

23.12.2024

Published

31.12.2024

Keywords:

Yozgat

Nakipzade Mosque

Wooden Ceiling Mosque

Façade

Comparative Analysis Method

ABSTRACT

From the XVIIIth century to the present day, it is seen that buildings with wooden ceilings have been built intensively in Yozgat mosque architecture. Nakipzade Mosque, which is among these buildings, draws attention with its stone craftsmanship, especially in its façade design. The mouldings used on the façade, two-colored arch openings and columns with Ionic order capitals constitute the unique architectural elements of the building that distinguish it from other wooden ceiling mosques. In this study, it is aimed to reveal the architectural features of the little-known Nakipzade Mosque and to evaluate its place among similar mosques in Yozgat Center. In the research, the facade survey of Nakipzade Mosque was taken and the building was analysed by comparative analysis method with similar the mosques in the vicinity. As a result of the analysis, no structure similar to the stone craftsmanship of Nakipzade Mosque was found. However, it was determined that there are similarities with Kayyımzade Mosque in terms of façade layout. Elements such as wall construction technique, band moldings and pilasters on the facades clearly distinguish Nakipzade Mosque from other mosques.

1. GİRİŞ

XVIII. yüzyıldan günümüze kadar, Yozgat il sınırlarında ahşap tavanlı camiler, yerel mimarının önemli örnekleri olarak dikkat çekmektedir. Bu camiler işlevsel açıdan bölgedeki dini yaşamın izlerini taşımakta ve mimari detaylarıyla dönemin kültürel özelliklerini yansıtmaktadır. Az bilinen Nakipzade Camii, özellikle cephe tasarımında gösterdiği taş işçiliğiyle Yozgat'taki camiler arasında öne çıkmaktadır. Yapının dış cephesindeki taş işçiliği, iki renkli kemer açıklıkları ve iyon başlıklı sütunlar, yapının diğer camilerden farklılaşmasını sağlayan özgün unsurlarıdır.

ORCID ID: Sadakat Safiyye MUMCUOĞLU TÜRKER: 0000-0001-8773-6296

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Sadakat Safiyye MUMCUOĞLU TÜRKER

E-mail: ss.mumcuoglu@yobu.edu.tr

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article: Mumcuoğlu Türker, S. S., "Az Bilinen Ahşap Tavanlı Nakipzade Camii Üzerine Bir Değerlendirme", Bozok Journal of Engineering and Architecture, vol. 3, no. 2, pp. 149-165, 2024.

Çalışmada, Nakipzade Camii'nin özellikle cephe tasarımı ve taş işçiliği bağlamında diğer benzer camilerden farklılaşan özelliklerini tespit etmek ve yapının mimari önemini ortaya koymak amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, Nakipzade Camii'nin bölgesel ve dönemseld açıdan değerlendirilmesi için Yozgat ilinin Merkez ilçesinde XVIII. ve XIX. yüzyıl arasında inşa edilen ahşap düz tavanlı camiler incelenmiştir. Bu yapılar arasında Cevahir Ali Efendi Camii, Başçavuş Camii, Musa Ağa Camii, Kayyımzade Camii, Şeyh Hacı Ahmet Efendi Camii ve Alacalıoğlu Camii yer almaktadır.

Literatür araştırması sonucunda, Nakipzade Camii'ni ele alan sınırlı sayıda yayının bulunduğu tespit edilmiştir. Bu kaynaklardan biri olan Vakıflar Genel Müdürlüğü arşivinde, camiye ait eski fotoğraflar (Resim 1-2) ve çeşitli belgeler yer almaktadır. Bu belgelerde, yapının 1952 yılında tescillendiği, Hicri 1260 (Miladi 1844) yılında II. Mahmut'un ikinci eşi Hoşyar Kadın tarafından yaptırıldığı ve Hicri 1306 (Miladi 1888) yılında sel felaketi nedeniyle yeniden inşa edildiği bilgisi yer almaktadır [1].

Türk Ocakları Yozgat Şubesi'nin kitabında, Nakipzade Camii'nin aynı isimdeki medrese ile birlikte inşa edildiği ifade edilmektedir. Ayrıca, caminin "Natırların Camii" olarak anılmasının, yapı haziresinde medresenin ünlü müderrisi Hacı İbrahim Efendi'nin hanımına ait mezar kitabesinin bulunmasıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bu mezar kitabesinde, İbrahim Efendi'nin künyesinin "Natırzade" olarak geçmesinin, caminin bu isimle anılmasında etkili olduğu vurgulanmıştır. Müderrisin ününden dolayı medresenin, yaptırının adıyla değil, müderrisin adıyla bilindiği aktarılmaktadır [2].

Acun'un kitabında, Nakipzade Camii'nin kitabesinde yer alan bilgilere, iki vakfiyesine, mimari ve süsleme özelliklerine detaylı bir şekilde değinilmiştir. Karşılaştırma ve değerlendirme bölümünde, yapı "boyuna dikdörtgen planlı, düz tavanlı ve son cemaat yerinin yanları kapalı camiler" plan grubuna dahil edilmiştir. Nakipzade Camii'nin yanı sıra, Yozgat Merkez'deki Musa Ağa Camii, Cevahir Ali Efendi Camii, Başçavuş Camii ve Kayyımzade Camii de bu plan grubuna dahil edilmiştir [3].

Daşcı'nın tezinde, Nakipzade Camii'nin mihrabındaki taş işçiliği ve kalem işi süslemelerine yer verilmiştir [4]. Yozgat Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü tarafından hazırlanan kitapta ise, Acun'un kitabındaki bilgiler aktarılmıştır [5]. Sağiroğlu ve Özen Yavuz'un bildirisinde, yapının mimari özelliklerine kısaca değinilmiş ve çalışma kapsamında yapılan anket sonucuna göre, Yozgat içinde ve dışında yaşayan halkın çoğunluğunun camiye ve konumunu bilmediği ifade edilmiştir [6]. Sayılan'ın bildirisinde ise, yapının kitabesinde yer alan bilgiler özetlenerek sunulmuştur [7].

Sevim ve Karacabey'in çalışmasında, Nakipzade Camii'nin kitabesinde yer alan bilgilere, mimari özelliklerine ve süsleme unsurlarına detaylı bir şekilde yer verilmiştir. Literatürdeki mevcut bilgilere ek olarak, yapının kadın bir bani tarafından yaptırılmış olmasına rağmen, süsleme programı açısından oldukça sade bir yapıya sahip olduğu ifade edilmiştir [8].

Nakipzade Camii'nin cephe özelliklerini analiz eden bu çalışmada, yapının aynı şehirde yakın tarihlerde inşa edilmiş benzer camilerle karşılaştırılarak önemi belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, öncelikle Nakipzade Camii yerinde incelenmiş (Şekil 3-10) ve yapının rölövesi (Şekil 11-13) hazırlanmıştır. Ardından, Yozgat'taki benzer camilerin ve Nakipzade Camii'nin tipoloji tablosu (Tablo 1) oluşturulmuştur. Bu tablo üzerinden, Yozgat Merkez'deki ahşap düz tavanlı camilerin (Şekil 14-19) cephe özellikleri ile Nakipzade Camii'nin bu yapılar arasındaki konumu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, incelenen camilerin benzeşen ve farklılaşan özellikleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

2. NAKİPZADE CAMİİ

Nakipzade Camii, Yozgat ilinin Merkez ilçesinde, Köseoğlu mahallesinde yer almaktadır. Günümüzde kent merkezine yakın bir konumda bulunan bu yapı, literatürde farklı isimlerle anılmaktadır. Vakıflar Genel Müdürlüğü arşivindeki belgelere göre, yapı "Nakipzade Camii, Natıroğlu Camii, Hüsyar Kadın Camii" olarak geçmektedir. Diğer kaynaklarda ise, cami farklı şekillerde adlandırılmıştır: "Nakîbzade, Nakipzade, Nakipzade, Nakipzâde, Natırların, Hüsyar Kadın ve Hoşyar Kadın" [1-9].

Nakipzade Camii, giriş kapısının üstündeki kitabeye göre Hicri 1260 / Miladi 1844 yılında II. Mahmut'un ikinci eşi olan Hoşyar Kadın tarafından medrese ile birlikte yaptırılmıştır. Kitabede, caminin, Hoşyar Kadın'ın kendinden önce vefat eden manevi kızı Beyhan Sultan ve öz kızı Mihrimah Sultan adına yaptırıldığı belirtilmektedir [3]. Vakıflar Genel Müdürlüğü arşivindeki belgelere göre cami, güneydeki çaydan gelen sel nedeniyle tahrip olduktan sonra Hicri 1306 / Miladi 1888 yılında yeniden inşa edilmiştir. Ayrıca, medreseye ait olan kitabenin de bu sırada camiye eklenmiş olabileceği ifade edilmiştir [1]. Günümüzde medrese yapısı mevcut değildir.

2.1. Nakipzade Camii'nin mimari özellikleri

Nakipzade Camii, doğusunda yuvarlak kemerli bir kapı açıklığından girilen ve etrafı duvarlarla çevrili bir yapı bahçesi içerisinde yer almaktadır. Yapının güneyi ve batısında hazire alanı bulunurken, kuzeyde sonradan kapatılan bir son cemaat yeri ve üst katında mahfil alanı yer almaktadır (Şekil 3, 11). Caminin batısında ise yapıya bitişik bir minare bulunmaktadır. Harim alanına giriş, son cemaat yerinin içinde kalan kesme taş söveli yuvarlak kemerli kapı açıklığından sağlanmaktadır. Mihraba dik uzanan dikdörtgen planlı olan cami, ahşap düz tavanlı ve tek mekândan oluşmaktadır. Harim alanı yaklaşık 8.5 m x 10.5 m boyutlarında bir alana sahiptir.

Yapının güney duvarının ortasında, farklı renklerde mermerle kaplanmış yuvarlak kemerli bir mihrap nişi, batısında ise ahşap minber bulunmaktadır (Şekil 4, 7). Doğu duvarının güneyinde, zeminden yüksek bir konumda tutulan duvara bitişik yuvarlak kemer açıklıklı bir vaaz kürsüsü mevcuttur. Ahşap korkuluklu vaaz kürsüsüne çıkış, doğu duvarının güneyindeki pencere açıklığından girilen ve duvar arasında kalan merdiven aracılığıyla sağlanmaktadır (Şekil 4, 6, 11). Harimin kuzey duvarında, iki adet taş kaideye oturan ahşap dikme ile taşınan üst kat kadınlar mahfili alanı yer almaktadır (Şekil 5). Mahfil alanına geçiş, son cemaat yeri alanının doğu duvarında bulunan iki renkli kesme taş söveli yuvarlak kemerli kapı açıklığından girilen merdiven aracılığıyla sağlanmaktadır. Mahfil alanı, son cemaat yerinin üst katının tamamını kaplamakta olup, harim alanındaki dikmelerin olduğu hizaya kadar uzanmaktadır. Mahfilin orta kısmı balkon şeklinde çıkma yapmaktadır. Mahfil katının altında kalan alanın doğusunda, yerden bir basamak yüksek tutulmuş bir seki alanı bulunmaktadır (Şekil 5).

Yapı, alt hizada on adet, üst hizada ise on iki adet pencere ile aydınlanmaktadır. Doğu, güney ve batı duvarlarındaki pencereler açıklıklarında, geniş duvar kalınlıklarından dolayı hem içte hem de dışta ahşap doğramalar bulunmaktadır (Şekil 7). Alt hizadaki pencereler yuvarlak kemerli formda olup, üst hizadaki pencereler ise dışta yuvarlak kemerli, içte ise düz atkılı formda tasarlanmıştır (Şekil 4, 12-13). Yapının eski fotoğraflarına bakıldığında, alt hizadaki pencerelerde içteki doğramaların bulunmadığı, üst hizadaki pencerelerin ise kemer görünümlü doğramalarının dikdörtgen şekliyle değiştirildiği gözlemlenmektedir (Şekil 2).

Eski fotoğraflara göre (Şekil 1), sonradan kapatıldığı anlaşılan son cemaat yeri, yapının kuzey cephesi boyunca uzanmakta olup, ikisi duvara bitişik olmak üzere dört adet iyon başlıklı sütun üzerine oturan basık kemer açıklıkları ile oluşturulmuştur. Bu kemer açıklıkları, günümüzde ahşap görünümlü PVC pencere ve kapı doğramaları ile kapatılmıştır (Şekil 3). Son cemaat yerinin zemininde yan kısımlar, orta kısımdan bir basamak daha yüksek tutulmuştur (Şekil 10).

Kare formda bir kaideye oturan minareye, son cemaat yeri alanının batı duvarında yer alan iki renkli kesme taş söveli yuvarlak kemerli kapı açıklığından girilerek ulaşılmaktadır. Minare silindirik ve yivli bir formda gövdeye ve peteğe sahiptir. Tek şerefeli olan minarede, kaideden gövdeye armudi formda bir geçiş sağlanmıştır. Minare, konik bir külahlı sonlanmaktadır (Şekil 3-4).

Nakipzade Camii'nin örtü sisteminde dışta kırma çatı, içte düz ahşap tavan kullanılmıştır (Şekil 8, 12-13). Harim alanının tavanında, kuzey-güney yönünde uzanan ince ahşap çıtalar, ikişerli olarak birleşerek uzun ince çerçeveler oluşturmuştur. Bu çerçevelerin doğu ve batı köşelerinde, ahşap çıtaların birleşiminden düğüm motifi görünümü elde edilmiştir. Tavanın merkezinde, kare formda düzenlenmiş üç katmanlı bir ahşap tavan göbeği bulunmaktadır (Şekil 9). Her bir katın çerçevesinde, ahşap oyma tekniği ile kafes görünümü verilen ajur süslemeler ve bitkisel motifler yer almaktadır. Ajur süslemeler, birbirlerine ters duran hilal formu motiflerin tekrar edilmesi ile oluşturulmuştur. Aynı ajur süsleme motifi, ahşap çıtalarla çevrelenen tavanın çerçevelerinde de görülmektedir (Şekil 9). Harim alanına benzer şekilde mahfil katının ve son cemaat yerinin tavanında doğu batı yönünde uzanan ince ahşap çıtaların ikişerli olarak birleştirilmesiyle oluşan ince uzun çerçeveler yer almaktadır (Şekil 5, 10).

Cami ve minare sarı renkli düzgün kesme taştan inşa edilmiştir. Yapının basık kemerlerinde, pencere ve kapı sövelerinde iki renkli kesme taş kullanılmıştır. Tavanlar, tavan göbeği, dikmeler, minber, kapı, pencere ve korkulukta ahşap kullanıldığı görülmektedir. Yapı kalem işi süsleme bakımından oldukça sadedir. Günümüzde duvarların belli bölgelerinde, mihrabın ve vaaz kürsüsünün etrafında sıva üstü kalem işi süsleme görülmektedir (Şekil 6-7).

Nakipzade Camii, taş süsleme bakımından, yakın çevresindeki benzer camilerle kıyaslandığında oldukça zengin bir taş işçiliğine sahiptir (Şekil 3-7). Mihrap, vaaz kürsüsü, sütun başlıkları ve cephe silmelerinde geometrik taş süslemeler görülmektedir. Ayrıca, kemer açıklıkları, kapı ve pencere sövelerinde iki renkli taş süslemeler kullanılmıştır. Yapının eski fotoğraflarına bakıldığında, kalem işi ve taş süslemelerin büyük ölçüde özgün özelliklerini koruyarak günümüze kadar ulaştığı anlaşılmaktadır (Şekil 1-2).

2.2. Nakipzade Camii'nin Cephe özellikleri

Nakipzade Camii, cephelerindeki özenli taş işçiliği ile Yozgat'taki diğer ahşap tavanlı camilerden belirgin bir şekilde ayrılmaktadır. Cephelerinde kullanılan iki renkli kesme taş söveler, iyon başlıklı sütunlar üzerine oturan geçmeli kemer açıklıkları ve üç farklı hizadaki kat silmeleri, yapıyı benzer camilerden farklılaştıran unsurlardır. Ayrıca, duvara bitişik sütun görünümü veren pilastrler de bu camiye özgü bir özellik olarak dikkat çekmektedir. Diğer camilerde minare kaidesi genellikle cami yapısından bağımsız silmelere sahipken, Nakipzade Camii'nde minare kaidesi ile ara kattaki silmelerin saçak hizasında birleşerek yapının bütünsel bir cephe düzeni oluşturduğunu göstermektedir.

Tüm cephelerde zemin kat, ara kat ve saçak altında farklı tarzlarda kat silmeleri bulunmaktadır. Cephelerin köşelerinde daha geniş, pencere aralarında daha ince olan ve duvardan çok az miktarda öne doğru çıkma yaparak sütun görünümü veren pilastrler kullanılmıştır [8]. Bu pilastrler saçak altında yatay olarak uzanan yarım sıra taş yüzeyle birleşmektedir. Pilastrler düşey yönde, kat silmeleri yatay yönde cephelere hareketlilik kazandırmıştır.

Yapıya girişin olduğu kuzey cephede (Şekil 3, 13) alt katta son cemaat yerini oluşturan dört adet iyon başlıklı sütunlara oturan üç adet basık kemer açıklığı, üst katta üç adet yuvarlak kemerli iki renkli kesme taş söveli pencere açıklığı yer almaktadır. Kemer açıklıklarında iki renkli geçmeli (makaralı) taş işçiliği görülmektedir. Ara kattaki silmeler, köşelerdeki iyon başlıklı sütunların düşey hizasından başlayarak bir sıra taş kadar yükselerek devam etmektedir. Cephenin batısında, yapıya bitişik konumda, kuzey duvarının gerisinde kalan tek şerefeli minare yükselmektedir. Zemin ve ara kattaki silmeler minare kaidesinin zemin ve saçak seviyesinde devam etmektedir.

Günümüzde kuzey cephedeki kemer açıklıkları ahşap görünümlü PVC pencere ve kapı doğrama ile kapatılmıştır. Yapının eski fotoğraflarına bakıldığında bu bölümün açık olduğu anlaşılmaktadır. Bu cephenin harim duvarının ortasında iki renkli geçmeli kesme taş söveli, yuvarlak kemerli kapı açıklığı üstünde inşa kitabesi ve iki yanında birer adet iki renkli kesme taş söveli, yuvarlak kemerli pencere açıklığı bulunmaktadır.

Yapının doğu cephesinde (Şekil 4, 13) alt hizada üç adet, üst hizada dört adet kesme taş söveli yuvarlak kemerli pencere açıklığı yer almaktadır. Alt hizadaki pencereler, yatay yönde silmesi olan dikdörtgen formlu çerçeve ile sonlanmıştır. Pilastrler ve kat silmeleri cepheyi düşey yönde dört, yatay yönde iki bölmeye ayırmıştır. Yapının batı cephesi (Şekil 3, 13), doğu cephesinin simetriği olacak şekilde benzer özelliklere sahiptir. Doğü cephesinden farklı olarak batı cephesinin kuzey yönünde öne doğru çıkma yapan minare yer almaktadır. Batı cephesinde minareden dolayı üst hizada üç adet kesme taş söveli yuvarlak kemerli pencere açıklığı bulunmaktadır. Ayrıca bu cephede orta hizada yer alan üç adet sütun görünümlü pilastrler, zemin kat seviyesinin altında iç ve dış bükey taş işleme ile sonlanmaktadır. Yapının eski fotoğrafına bakıldığında (Şekil 1) bu taş işçiliğin doğu cephesinde de olduğu anlaşılmaktadır. Günümüzde yol ve kaldırım kotunun yükselmesinden dolayı doğu cephesindeki bu süsleme toprak altında kalmıştır.

Mihrap cephesi olan güney cephede (Şekil 4, 13), alt hizada iki adet, üst hizada üç adet kesme taş söveli yuvarlak kemerli pencere açıklığı bulunmaktadır. Doğü ve batı cepheye benzer şekilde alt hizadaki pencereler, yatay yönde silmesi olan dikdörtgen formlu çerçeve ile sonlanmıştır. Pilastrler ve kat silmeleri cepheyi düşey yönde üç, yatay yönde iki bölmeye ayırmıştır. Cephenin orta kısmında yer alan iki adet sütun görünümlü pilastrler, zemin kat seviyesinin altında iç ve dış bükey taş işleme ile sonlanmaktadır.

3. YOZGAT MERKEZ'DEKİ AHŞAP DÜZ TAVANLI CAMİLER

Nakipzade Camii'nin cephe özelliklerini değerlendirmek için Yozgat ilinin Merkez ilçesinde yer alan ve benzer mimari özelliklere sahip olan yedi adet cami çalışma kapsamında ele alınmıştır (Şekil 20). Bu camiler Cevahir Ali Efendi Camii, Başçavuş Camii, Musa Ağa Camii, Kayyımzade Camii, Nakipzade Camii, Şeyh Hacı Ahmet Efendi Camii, Alacalıoğlu Camii'dir. Camilerde mihraba dik uzanan harim alanın kuzeyinde alt katta son cemaat yeri, üst katta kadınlar mahfili alanı bulunmaktadır. Kadınlar mahfili katı harim alanındaki iki adet dikmenin hizasına kadar uzamakta ve orta kısmı balkon şeklinde çıkma yapmaktadır.

Yapıların örtü sisteminde içte düz ahşap tavan dışta kırma çatı kullanılmıştır. Camilerin tek şerefeli minareleri kare kaideye oturmuştur. Silindirik gövdeye geçiş armudi bir formdadır. Minarelerin silindirik petekleri konik bir külahla sonlanmıştır. Bu benzerliklere karşın diğer yapılardan farklı olarak Cevahir Ali Efendi Camii ve Başçavuş Camii'nin üst kat mahfil alanı doğu ve batı duvarlarda uzun ince bir formda üç yönde uzanmaktadır (Şekil 14-15).

Çalışma kapsamında incelenen Cevahir Ali Efendi Camii, giriş kapısının üstündeki kitabeye göre Çapanoğlu Süleyman Bey'in vekilharıcı Hacı Ahmet Ağa adına Cevahir (Cevheri) Ali Efendi tarafından Hicri 1202 / Miladi 1788 yılında yaptırılmıştır [5]. Mihraba dik uzanan caminin kuzeydoğu köşesinde yapıya bitişik minare kaidesi yer almaktadır. Yapı köşelerde sarı renkli kesme taş kullanılarak moloz taş yığma tekniği ile inşa edilmiştir. Yapıya giriş kuzey cephede son cemaat yerinin içinde kalan yuvarlak kemerli kapı açıklığından sağlanmaktadır. Caminin alt hizasında kesme taş söveli, üst hizasında ise ahşap lentolu düz atkılı pencereler yer almaktadır (Şekil 14).

Yozgat kent merkezinde yer alan ahşap düz tavanlı bir diğer yapı ise Başçavuş Camii'dir. Giriş kapısının üstündeki kitabeye göre cami, Çapanoğlu Süleyman Bey'in Başçavuşu Halil Ağa tarafından Hicri 1215 / Miladi 1800-1 yılında inşa edilmiştir [9]. Mihraba dik uzanan caminin batı cephesinde yapıya bitişik minare kaidesi yer almaktadır. Yapı köşelerde farklı renklerde kesme taş kullanılarak moloz taş yığma tekniği ile inşa edilmiştir. Yapıya giriş kuzey cephede son cemaat yerinin içinde kalan yuvarlak kemerli kapı açıklığından sağlanmaktadır. Caminin alt hizasında sivri kemer alınlıklı kesme taş söveli, üst hizada ise sivri kemerli pencere bulunmaktadır. Kuzey cephede yer alan mahfil katındaki pencereler düz atkılı formdadır (Şekil 15).

Çalışma kapsamına giren Musa Ağa Camii, giriş kapısının üstündeki kitabeye göre Çapanoğlu Süleyman Bey'in harem kethüdası Musa Ağa Bin Hasan tarafından Hicri 1215 / Miladi 1800-1 yılında yaptırılmıştır [3]. Mihraba dik uzanan caminin kuzeydoğu köşesinde yapıya bitişik minare kaidesi yer almaktadır. Yapı köşelerde sarı renkli kesme taş kullanılarak moloz taş yığma tekniği ile inşa edilmiştir. Yapıya giriş kuzey cephede son cemaat yerinin içinde kalan yuvarlak kemerli kapı açıklığından sağlanmaktadır. Caminin alt hizasında sivri kemer alınlıklı kesme taş söveli, üst hizasında ise sivri kemerli pencere bulunmaktadır. Kuzey cephede yer alan mahfil katındaki pencereler düz atkılı formdadır (Şekil 16).

Kayyımzade Camii, giriş kapısının üstünde yer alan kitabeye göre Cevahir Ali Efendi tarafından Hicri 1219 / Miladi 1804 tarihinde inşa edilmiştir [10]. Mihraba dik uzanan caminin batı cephesinde yapıya bitişik minare kaidesi yer almaktadır. Yapı köşelerde farklı renklerde kesme taş kullanılarak moloz taş yığma tekniği ile inşa edilmiştir. Günümüzde moloz taş duvar örgüsünün üstü sıvanmıştır. Yapıya giriş kuzey cephede son cemaat yerinin içinde kalan yuvarlak kemerli kapı açıklığından sağlanmaktadır. Yapının harim bölümünü aydınlatan pencereler alt ve üst hizada yuvarlak kemerli, kadınlar mahfili katını aydınlatan pencereler ise kesme taş sövelidir (Şekil 17).

Şeyh Hacı Ahmet Efendi Camii, batı cephesindeki pencerelerin üstünde yer alan kitabelere göre Hacı Ahmet Efendi tarafından Hicri 1275 / Miladi 1858-9 yılında yaptırılmıştır. Minaresi 1952 yılında inşa edilmiştir. Yapı, mahfil alanında bulunan halvet hücreleri ile cami ve tekke işlevini bir arada barındırmaktadır [5]. Mihraba dik uzanan caminin kuzeybatı köşesinde yapıya bitişik minare kaidesi yer almaktadır. Yapının beden duvarları günümüzde sıvalı olduğu için taş duvar örgüsü anlaşılmamıştır. Yapıya doğu ve batı duvarının ortasında yer alan kapı açıklıklarından girilmektedir. Günümüzde kapatılan batı cephesindeki kapı kesme taş söveli yuvarlak kemerli açıklığa sahiptir. Yapının doğu cephesinde yer alan kapı, daha dar bir açıklıkta kesme taş söveli yuvarlak kemerlidir. Camide sadece alt hizada kesme taş söveli pencereler bulunmaktadır (Şekil 18).

Alacalıoğlu Camii, günümüzde kitabesi bulunmamakla birlikte, doğusundaki hazire alanında yer alan Alacalızade Mahmut Ağa'nın mezar taşındaki Hicri 1299 / Miladi 1881-1882 tarihinden hareketle, caminin bu tarihten önce inşa edilmiş olduğu belirtilmektedir [3]. Mihraba dik uzanan caminin doğu cephesinde yapıya bitişik minare kaidesi yer almaktadır. Yapı köşelerde sarı renkli kesme taş kullanılarak moloz taş yığma tekniği ile inşa edilmiştir. Yapıya giriş kuzey cephede son cemaat yerinin içinde kalan yuvarlak kemerli kapı açıklığından sağlanmaktadır. Yapının harim bölümünü aydınlatan pencereler alt ve üst hizada kesme taş söveli yuvarlak kemerli açıklığa, kadınlar mahfili katını aydınlatan pencereler düz atkılı açıklığa sahiptir (Şekil 19).

4. NAKİPZADE CAMİİ'NİN YOZGAT'TAKİ BENZER CAMİLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmada, Nakipzade Camii'nin cephe özelliklerini değerlendirmek için karşılaştırmalı analiz yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, benzer mimari özelliklere sahip yapıların belirli kriterler doğrultusunda sistematik olarak incelenmesini esas almaktadır. Kriterler, bölgenin ve dönemin mimari özelliklerini yansıtan plan şeması, taşıyıcı sistem, cephe malzemesi ve örtü sistemi gibi temel unsurlardan oluşturulmuştur. Bu analiz, Nakipzade Camii'nin mimari özelliklerini, bölgedeki diğer yapılardan ayırışan ve benzeşen yönleriyle birlikte değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

Nakipzade Camii ile karşılaştırılan yapılar, aynı coğrafi bölgede veya yakın çevrede yer alan, benzer işlevsel ve mimari özelliklere sahip dini yapılar arasından seçilmiştir. Yöntem çerçevesinde, Yozgat ilinin Merkez ilçesinde yer alan Cevahir Ali Efendi Camii, Başçavuş Camii, Musa Ağa Camii, Kayyımzade Camii, Nakipzade Camii, Şeyh Hacı Ahmet Efendi Camii ve Alacalıoğlu Camii olmak üzere toplam yedi cami incelenmiştir (Şekil 20). Bu yapılar, literatür taraması ve alan çalışmaları sırasında tespit edilen

örneklerden oluşmaktadır. Veriler, literatür incelemesi, yerinde yapılan gözlemler, fotoğraf ve ölçüm çalışmaları yoluyla elde edilmiştir. Elde edilen bilgiler, yapıların plan şeması, taşıyıcı sistemi, cephe açıklıkları, açıklıklarda kullanılan malzemeler ve örtü sistemi gibi unsurlar dikkate alınarak bir karşılaştırma tablosuna (Tablo 1) aktarılmıştır. Tablo 1 incelendiğinde, genellikle yapıların köşelerde kesme taş kullanılarak moloz taş yığma sistemle inşa edildiği anlaşılmaktadır. Bu yapılar arasında yalnızca Nakipzade Camii'nin tamamen sarı kesme taştan inşa edildiği görülmektedir.

Giriş kapılarının tamamı yuvarlak kemerli açıklıklara sahiptir ve kesme taş söveden oluşmaktadır. Pencere düzenine bakıldığında, Şeyh Hacı Ahmet Efendi Camii'nde tek sıra pencere, diğer tüm yapılarda ise iki sıra pencere düzeni bulunmaktadır. Kayyımzade Camii, Nakipzade Camii ve Alacalıoğlu Camii'nde alt hizadaki pencereler yuvarlak kemerli iken, diğer yapılarda düz atkılı pencereler tercih edilmiştir.

Harim alanının üst hizasında yer alan pencereler incelendiğinde, Cevahir Ali Efendi Camii'nde düz atkılı, diğer yapılarda ise kemerli açıklık kullanıldığı görülmektedir. Mahfil katındaki pencereler, Nakipzade Camii'nde kemerli açıklıklara sahipken, diğer camilerde düz atkılı bir yapıya sahiptir. Tüm camilerin alt hizasındaki pencereler kesme taş söveden yapılmıştır. Üst hizadaki pencerelerde ise malzeme farklılıkları gözlemlenmektedir: Alacalıoğlu Camii ve Nakipzade Camii'nde kesme taş söve, Başçavuş Camii ve Musa Ağa Camii'nde tuğla söve, Cevahir Ali Efendi Camii'nde ise ahşap lento kullanılmıştır. Diğer camilerden farklı olarak, Nakipzade Camii'nin alt hizasındaki pencerelerinde dikdörtgen formlu alınlıklar bulunması, yapıyı özgün kılan bir tasarım özelliği olarak dikkat çekmektedir.

Cephelerde tuğla malzemenin kullanımı ise yalnızca Başçavuş Camii ve Musa Ağa Camii'nde, alt hizadaki sivri kemer alınlıklarında ve üst hizadaki kemerli pencerelerin sövelerinde görülmektedir. Son cemaat yeri bulunan yapılarda, bu bölümün dikme ve kirişlerinde ahşap malzemenin tercih edildiği anlaşılmaktadır. Cephelerde kemer açıklığı ve sütun kullanımının yalnızca Nakipzade Camii'nde yer aldığı görülmektedir. Bu yapının kuzey cephesinde, iki renkli geçmeli (makaralı) kesme taşlardan oluşturulmuş basık kemerli açıklıklar dikkat çekmektedir. Bu kemerler, iyon başlıklı sütunlar üzerine oturmaktadır.

Yapıların cepheleri, genel olarak taş süsleme açısından sade bir şekilde tasarlanmıştır. Çoğu yapıda, özellikle minare kaidelerinin üst kısmında taş süsleme unsuru olarak silme tercih edilmiştir. Ancak diğer yapılara kıyasla en zengin taş süsleme örnekleri Nakipzade Camii'nde görülmektedir. Bu yapıda, zemin, mahfil ve saçak altı hizalarında farklı tarzlarda kat silmeleri dikkat çekmektedir. Ayrıca, alt hizadaki pencerelerin üzerindeki alınlıklarda ve minare kaidesinin üst hizasında da taş silme unsurlarına rastlanmaktadır.

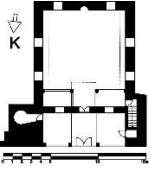

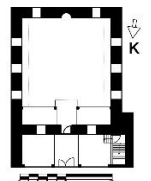

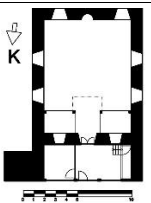

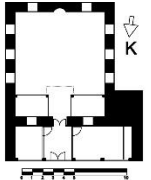

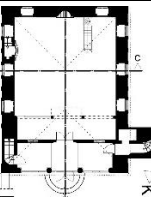

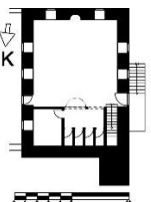

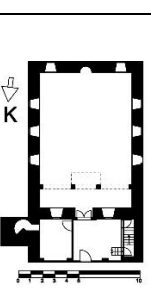

Nakipzade Camii'nin cephelerinde, iki renkli taşların kullanımıyla oluşturulan süslemeler, kemerlerde, pencere çerçevelerinde ve kapı sövelerinde belirgin bir özellik olarak öne çıkmaktadır. Cephelerde, sütun görünümü veren pilastrlar ve bunların alt kısmında geometrik taş işleme detayları yer almaktadır. Yapının kuzey cephesinde ise süsleme unsuru olarak iyon başlıklı sütunlar kullanılmıştır. Bu unsurlar, Nakipzade Camii'ni, sade cephe tasarımına sahip diğer yapılardan ayıran önemli mimari özelliklerdir.

Tablo 1 genel olarak değerlendirildiğinde, cephe malzemesi ve pencere yerleşimleri açısından bazı camilerin benzer tarzda inşa edildiği gözlemlenmiştir. Örneğin, 1800-1801 yıllarında inşa edilen Başçavuş Camii ve Musa Ağa Camii, beden duvarlarının örgüsü ve alt ile üst hizadaki pencerelerinin formu bakımından benzer özelliklere sahiptir. Ayrıca, 1804 yılında inşa edilen Kayyımzade Camii ile 1844 yılında inşa edilen Nakipzade Camii'nin duvar örgüleri ve taş işçiliği farklılık gösterse de her iki cami de iki sıralı pencere düzeni açısından benzer özellikler taşımaktadır.

Çalışma kapsamında ele alınan yapılar arasında en özenli cephe tasarımına sahip caminin Nakipzade Camii olduğu gözlemlenmiştir. Yapının diğer camilerden farklılaşmasında birden fazla etken neden olmuş olabilir. İlk olarak, yapının banisinin II. Mahmut'un ikinci eşi olan Hoşyar Kadın olması, caminin daha nitelikli taş işçiliğiyle inşa edilmesine etki etmiş olabilir. Diğer yapılar ise genellikle Çapanoğulların emirlerinde çalışan kişiler tarafından yaptırılmıştır. Bu durum, Hoşyar Kadın'ın banisi olduğu Nakipzade Camii'ne verilen önemin cephelerdeki taş işçiliğine yansıyan önemli bir unsur olabilir. Bu tür yapılar, banisinin sosyal ve kültürel statüsünü yansıttığı gibi, dönemin mimari anlayışını ve taş işçiliğinin niteliğini de sergilemektedir.

Diğer bir açıdan, yapının 1888'deki sel felaketi nedeniyle yıkılıp yeniden inşa edildiği bilgisi [1] göz önünde bulundurulduğunda, günümüzdeki halinin büyük ölçüde bu tarihteki restorasyon sürecinde şekillenmiş olması da mümkündür. Bu nedenle, yapının cephe tasarımındaki özenin hem banisinin hem de yeniden inşa sürecinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

Tablo 1. Yozgat merkezdeki ahşap düz tavanlı camilerin cephe tipolojisi tablosu

Yapının Adı ve İnşa Tarihi	Plan Şeması	Taşıyıcı Sistemi	Cephe Açıklıkları	Cephe Açıklıklarında Kullanılan Malzemeler	Örtü Sistemi	Cephe Fotoğrafı
Cevahir Ali Efendi Camii, 1788		Köşelerde Kesme Taş Kullanılarak Moloz Taş Yığıma Sistem	Alt ve Üst Hizada Düz Atkılı Pencere, Kuzey Cephede Yuvarlak Kemerli Kapı, Dikme ve Kiriş	Pencerelerde ve Kapıda Kesme Taş Söve, Ahşap Lento, Dikme ve Kiriş	İçte Düz Ahşap Tavan Dışta Kıрма Çatı	
Başçavuş Camii, 1800-1		Köşelerde Kesme Taş Kullanılarak Moloz Taş Yığıma Sistem	Alt Hizada Düz Atkılı, Üst Hizada Yuvarlak Kemerli ve Düz Atkılı Pencere, Kuzey Cephede Yuvarlak Kemerli Kapı, Dikme ve Kiriş	Pencerelerde ve Kapıda Kesme Taş Söve, Kemer Alınlıklarında ve Kemerli Pencerede Tuğla Söve, Ahşap Dikme ve Kiriş	İçte Düz Ahşap Tavan Dışta Kıрма Çatı	
Musa Ağa Camii, 1800-1		Köşelerde Kesme Taş Kullanılarak Moloz Taş Yığıma Sistem	Alt Hizada Düz Atkılı, Üst Hizada Yuvarlak Kemerli ve Düz Atkılı Pencere, Kuzey Cephede Yuvarlak Kemerli Kapı, Dikme ve Kiriş	Pencerelerde ve Kapıda Kesme Taş Söve, Kemer Alınlıklarında ve Kemerli Pencerede Tuğla Söve, Ahşap Dikme ve Kiriş	İçte Düz Ahşap Tavan Dışta Kıрма Çatı	
Kayımzade Camii, 1804		Köşelerde Kesme Taş Kullanılarak Moloz Taş Yığıma Sistem	Alt ve Üst Hizada Yuvarlak Kemerli Pencere, Kuzey Cephede Yuvarlak Kemerli Kapı, Dikme ve Kiriş	Pencerelerde ve Kapıda Kesme Taş Söve, Ahşap Dikme ve Kiriş	İçte Düz Ahşap Tavan Dışta Kıрма Çatı	
Nakıpzade Camii, 1844, 1888		Düzensiz Kesme Taş Yığıma Sistem	Alt ve Üst Hizada Yuvarlak Kemerli Pencere, Kuzey Cephede Yuvarlak Kemerli Kapı ve Basık Kemerli Açıklıklar	Pencerelerde, Kapıda ve Kemer Açıklıklarında İki Renkli Kesme Taş Söve	İçte Düz Ahşap Tavan Dışta Kıрма Çatı	
Şeyh Hacı Ahmet Efendi Camii, 1858-9, 1952		Bilinmiyor	Alt Hizada Düz Atkılı Pencere, Doğu ve Batı Cephede Yuvarlak Kemerli Kapı	Pencerelerde ve Kapıda Kesme Taş Söve	İçte Düz Ahşap Tavan Dışta Kıрма Çatı	
Alacalıoğlu Camii, 1881-2		Köşelerde Kesme Taş Kullanılarak Moloz Taş Yığıma Sistem	Alt ve Üst Hizada Yuvarlak Kemerli Pencere, Kuzey Cephede Yuvarlak Kemerli Kapı, Dikme ve Kiriş	Pencerelerde ve Kapıda Kesme Taş Söve, Ahşap Dikme ve Kiriş	İçte Düz Ahşap Tavan Dışta Kıрма Çatı	

Sevim ve Karacabey'in çalışmasında [8], Nakipzade Camii'nin banisinin kadın olmasına rağmen yapının süsleme unsurlarının oldukça sade olduğu ifade edilmiştir. Literatürde, kadın banilerin mimariye etkilerini inceleyen çalışmalardan, Selçuklu Dönemi yapıları üzerinden çıkarımlar yapan Durukan'ın makalesi dikkat çekmektedir [11]. Bu çalışmada, kadın baniler tarafından inşa edilen yapıların, dönemin erkek banilerinin eserlerine benzer mimari biçimlere sahip olduğu, ancak süsleme açısından farklılıklar barındırdığı belirtilmiştir. Kadınlar tarafından yaptırılan ve onarım gören yapılar, genellikle daha zengin ve yoğun süslemelere sahip olup, bu durum kadınların mimari süreçte estetik kaygıları ön planda tutmalarının bir sonucu olarak değerlendirilmiştir. Yozgat'taki ahşap tavanlı camilerin XVIII. yüzyıldan başlayarak inşa edilmiş olmaları göz önüne alındığında, dönemsel farklılıklardan dolayı benzer bir karşılaştırma yapılması mümkün olmamıştır.

5. SONUÇ

Çalışmada, Yozgat ilinin Merkez ilçesinde bulunan ahşap düz tavanlı camiler ile Nakipzade Camii'nin mimari özellikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve yapılar arasındaki benzerlikler ile farklılıklar değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında incelenen camiler, plan ve örtü sistemi açısından benzerlikler taşımasına rağmen, taşıyıcı sistem ve cephe özellikleri açısından farklılıklar sergilemektedir.

Nakipzade Camii, cephe tasarımında sergilediği özenli taş işçiliğiyle, diğer yapılardan belirgin şekilde ayrılmaktadır. İki renkli kesme taş söveler, iyon başlıklı sütunlara oturan basık kemer açıklıkları ve kat silmelerindeki detaylı işçilik, yapının mimari açıdan dikkat çekici unsurlarıdır. Ayrıca, cephelerde sütun görünümü veren pilastrlar ve geometrik taş süslemeler, Nakipzade Camii'ni bölgedeki diğer ahşap düz tavanlı camilerden özgün kılmaktadır. Bu özellikler, yapının bölgesel mimaride estetik ve işçilik açısından farklı bir konuma sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Karşılaştırmalı analizler sonucunda, Nakipzade Camii'ne plan, örtü sistemi ve cephe açıklıkları açısından en benzer yapının Kayyımzade Camii olduğu belirlenmiştir. Ancak, Nakipzade Camii'nin tamamen kesme taştan inşa edilmesi, pilastrların ve kat silmelerinin bulunması, iyon başlıklı kemer açıklıklarına sahip olması gibi özellikleri, cephe düzeni açısından daha özenli ve dikkat çekici bir mimariye sahip olduğunu göstermektedir.

Nakipzade Camii'nin mimari özelliklerini şekillendiren önemli unsurlardan birinin, yapının II. Mahmut'un eşi Hoşyar Kadın tarafından yaptırılmış olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Banisinin sosyal statüsü, camiye estetik ve işçilik açısından bir üstünlük kazandırmış olabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, 1888 yılında yaşanan sel felaketi sonrasında caminin yeniden inşa edilmiş olması, bugünkü yapısal özelliklerinin büyük ölçüde bu dönemde şekillenmiş olabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, Nakipzade Camii, mimari ve cephe özellikleri açısından Yozgat'ın önemli kültürel miras yapılarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu tür çalışmalar, yalnızca tarihi yapıların korunmasına değil, aynı zamanda bölgedeki dini ve kültürel mirasın daha geniş kitlelere tanıtılmasına da önemli katkılar sunmaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu makalede çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK

Bu makalenin yayımlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] VGM Arşivi, Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi, 2024.
- [2] Türk Ocakları Yozgat Şubesi. "Osmanlı Devleti ve Bozok Sancağı", Yozgat, Umut Matbaacılık, ss. 381-1, 2000.
- [3] Acun, H., "Bozok Sancağı (Yozgat İli)'nda Türk Mimarisi", Ankara, Türk Tarih Kurumu, ss. 95, 123-124, 142, 667, 2005.
- [4] Daşcı, A., "Yozgat Mihrablari", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2010.
- [5] Yozgat Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, "Yozgat Kent Tarihi", Yozgat, Bozok Ofset, ss. 125, 132, 2007.
- [6] Sağiroğlu, Ö. ve Özen Yavuz A., "Yozgat Tarihi Camilerinin İnanç Turizmi Açısından Değerlendirilmesi", II. Uluslararası Bozok Sempozyumu: Yozgat'ın Turizm Potansiyelleri ve Sorunları Bildiri Kitabı, Cilt II, 04 - 06 Mayıs 2017, ss. 542-552.
- [7] Sayılan, H., "Yozgat İli İnanç Turizmi Potansiyelinin Coğrafi Yönden Değerlendirilmesi", II. Uluslararası Bozok Sempozyumu: Yozgat'ın Turizm Potansiyelleri ve Sorunları Bildiri Kitabı, Cilt III, 04 - 06 Mayıs 2017, ss. 351-367.

- [8] Sevim, A. ve Karacabey, B., "Yozgat İl Merkezindeki Tarihi Camiler", Yozgat Tarihi ve Kültürü: Arkeoloji ve Sanat Tarihi, Ankara, Akçağ Basım, Cilt I, 2022, ss. 103-133.
- [9] Yozgat Kültür ve Dayanışma Derneği, "Yozgat Kataloğu 1990", İstanbul, Vaha Reklam Hizmetleri, ss. 84, 1990.
- [10] Acun, H., "Yozgat ve Yöresi Türk Devri Yapıları", Vakıflar Dergisi, vol. 13, 635-716, 1981.
- [11] Durukan, A. "Anadolu Selçuklu Sanatında Kadın Baniler." Vakıflar Dergisi, vol 27, 15-36, 1998.



Şekil 1. Nakıpzade Camii'nin kuzey ve güney cephelerinin eski fotoğrafları [1]



Şekil 2. Nakıpzade Camii'nin güneydoğu ve kuzeybatı köşelerine bakan iç mekân fotoğrafları [1]



Şekil 3. Nakipzade Camii'nin kuzey ve doğu cephesi, 2024



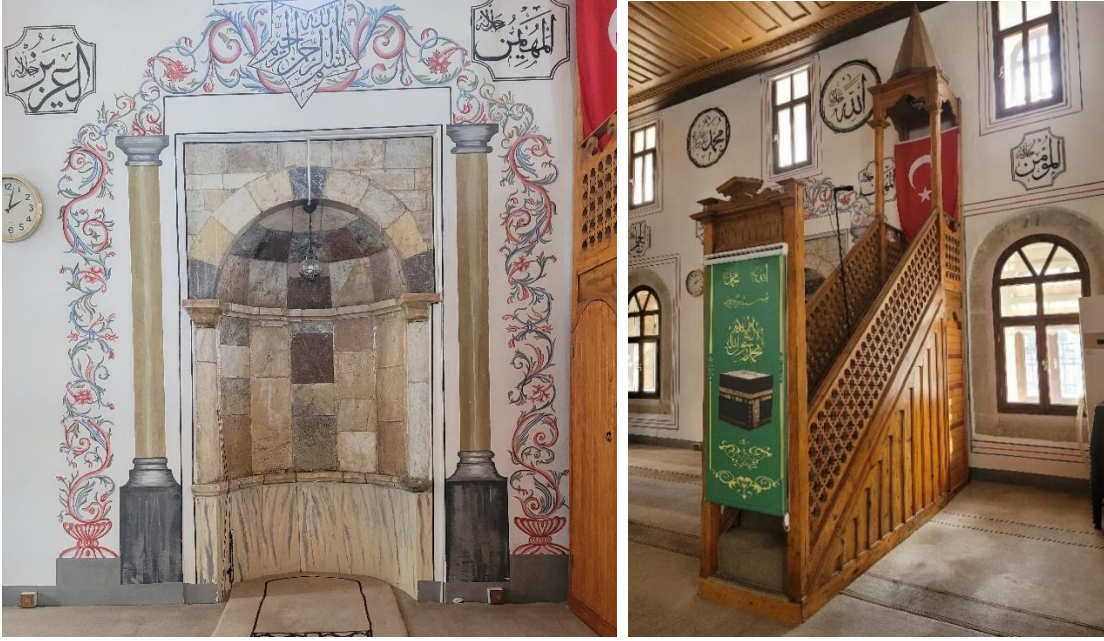
Şekil 4. Nakipzade Camii'nin mihraba bakan iç mekânı, güney ve doğu cephesi, 2024



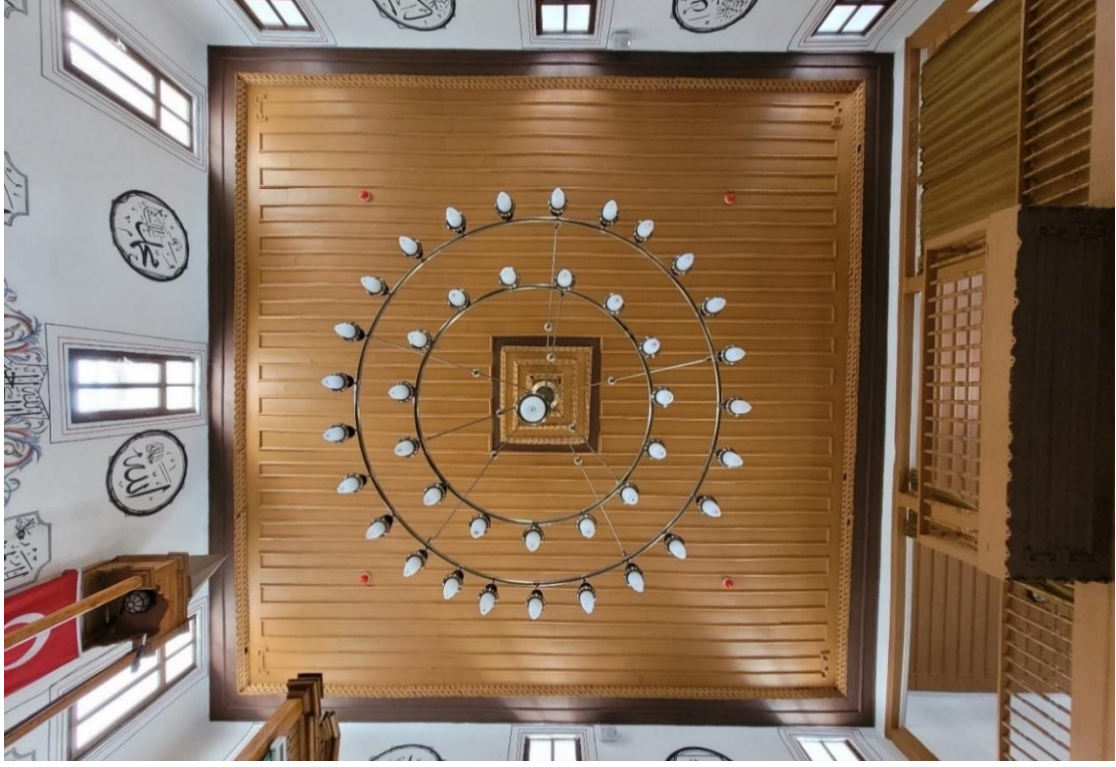
Şekil 5. Nakipzade Camii'nin kuzey cephesine bakan ve mahfil katına bakan iç mekânı, 2024



Şekil 6. Nakıpzade Camii'nin Vaaz kürsüsünü'nun görünü'mü ve kürsüye çıkan basamaklar, 2024



Şekil 7. Nakıpzade Camii'nin mihrabı ve aŐıŐap minberi, 2024



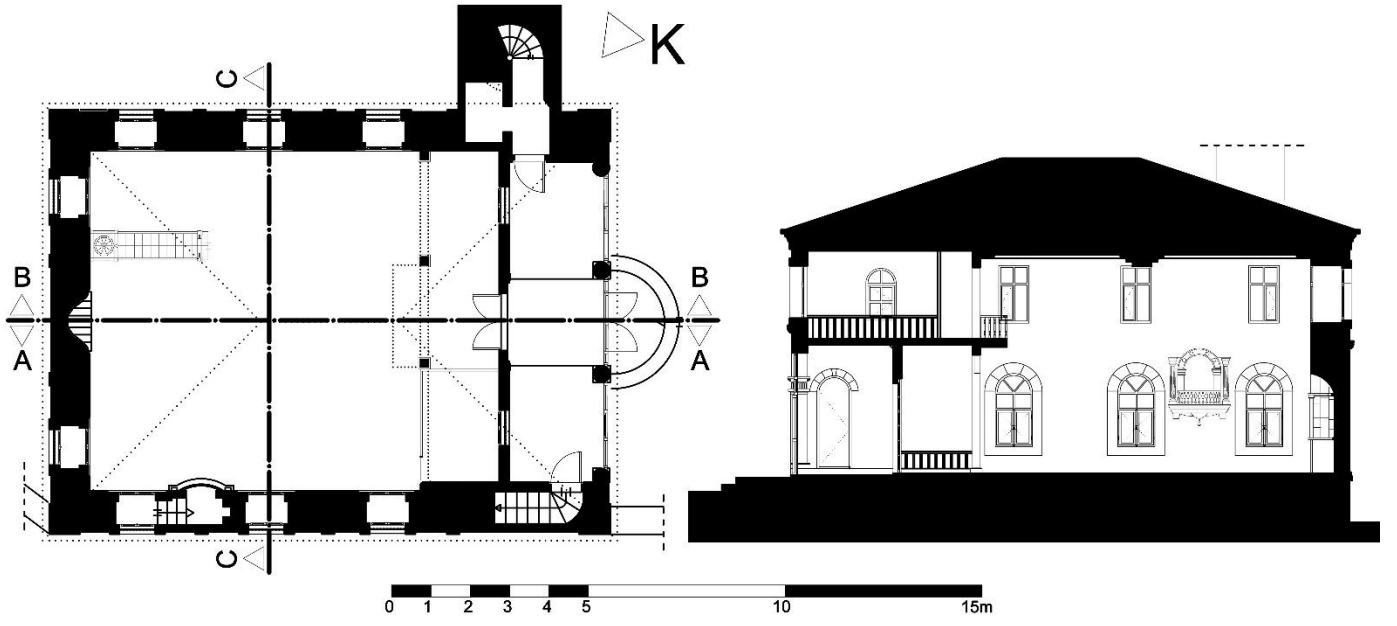
Şekil 8. Nakipzade Camii'nin ahşap tavanı, 2024



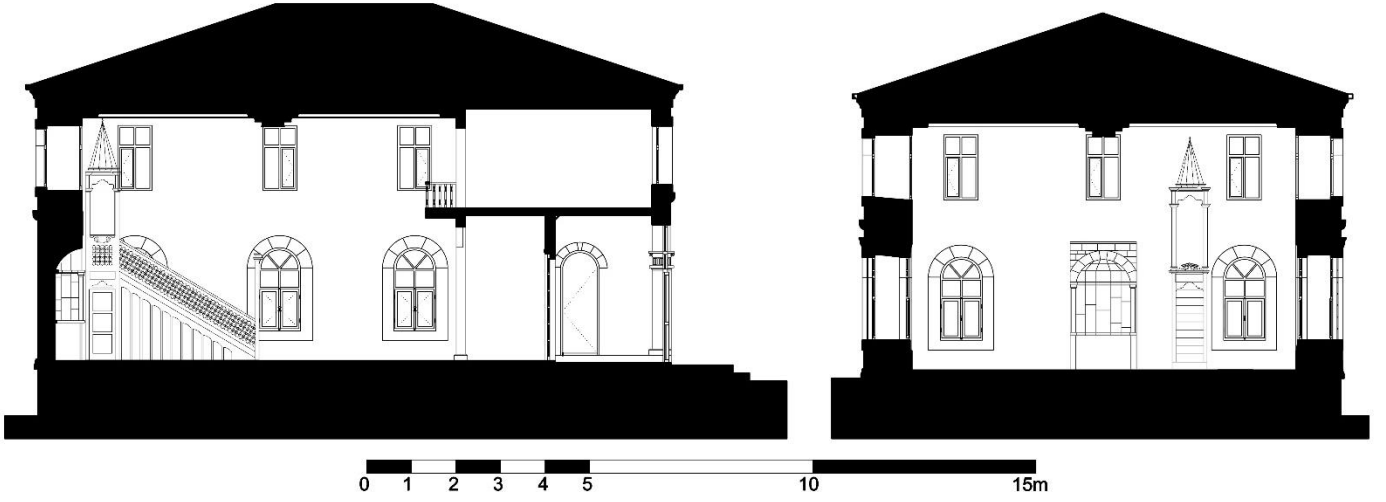
Şekil 9. Nakipzade Camii'nin ahşap tavan göbeği ve tavan köşelerindeki ahşap süslemeleri



Şekil 10. Nakipzade Camii'nin son cemaat yerinin iç mekânı, 2024



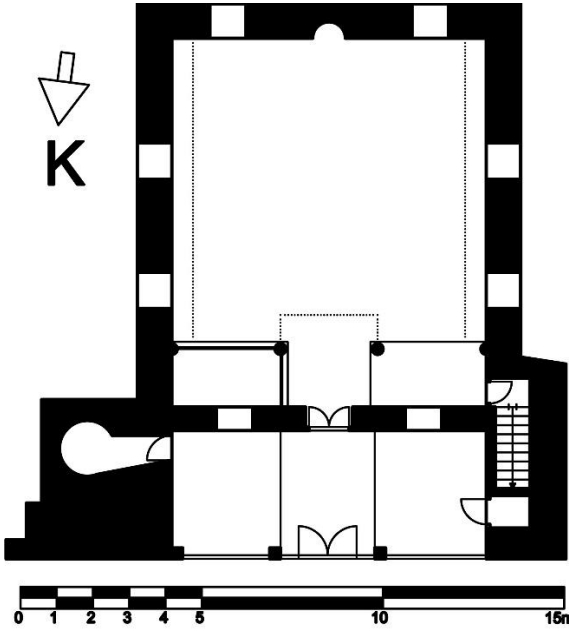
Şekil 11. Nakıpzade Camii'nin plan ve A-A kesiti rölöve çizimleri (VGM Arşivinden işlenerek)



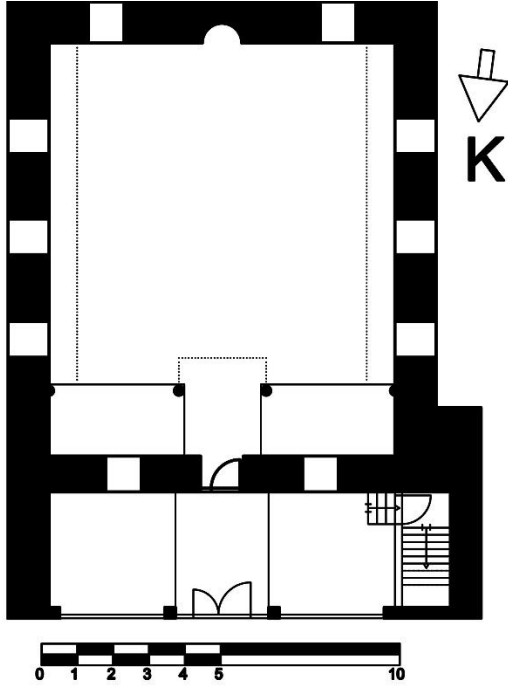
Şekil 12. Nakıpzade Camii'nin B-B ve C-C kesiti rölöve çizimleri (VGM Arşivinden işlenerek)



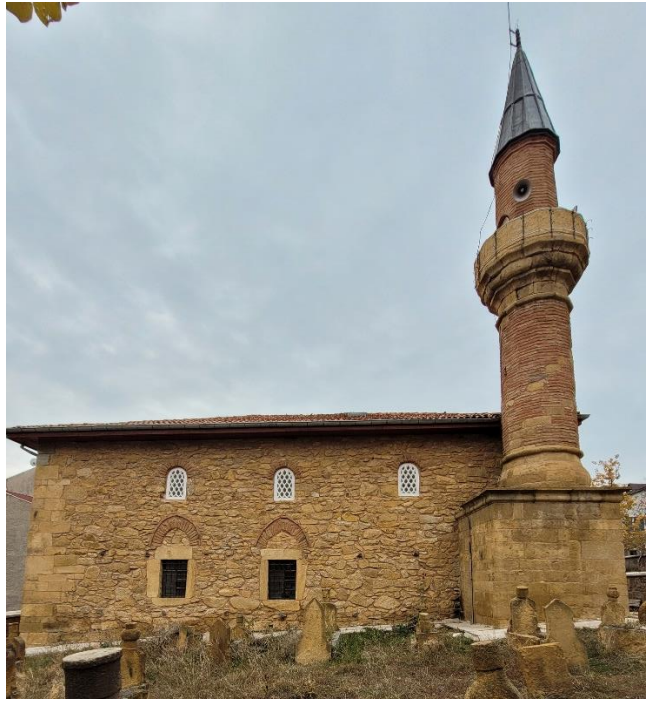
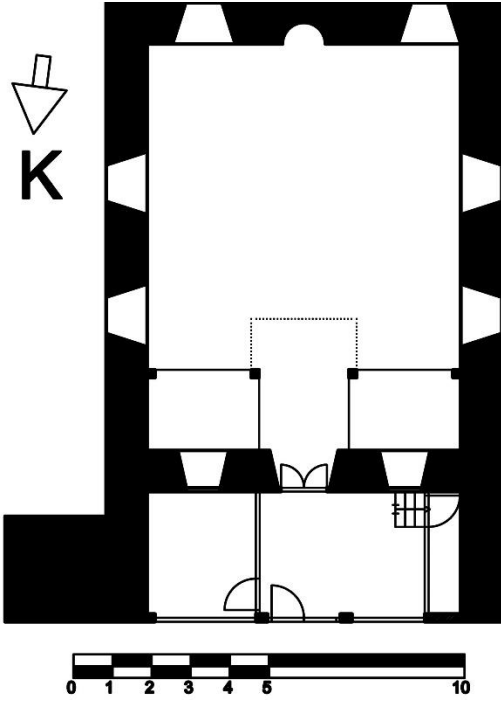
Şekil 13. Nakipzade Camii'nin güney, doğu, kuzey ve batı cephelerinin rölöve çizimleri (Yazar tarafından oluşturulmuştur)



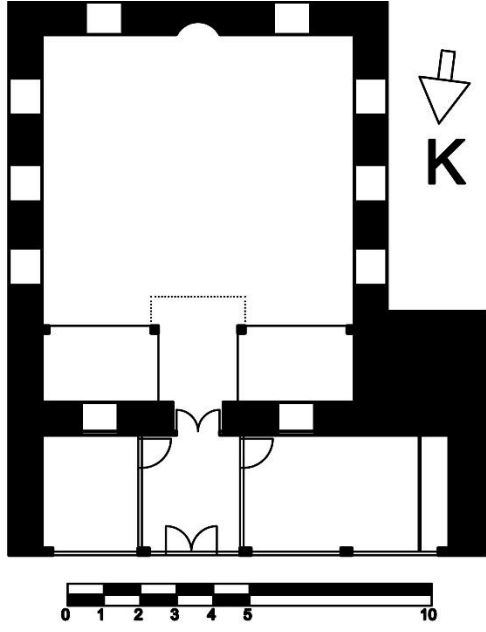
Şekil 14. Cevahir Ali Efendi Camii'nin planı (VGM Arşivinden işlenerek) ve cephe fotoğrafı, 2024



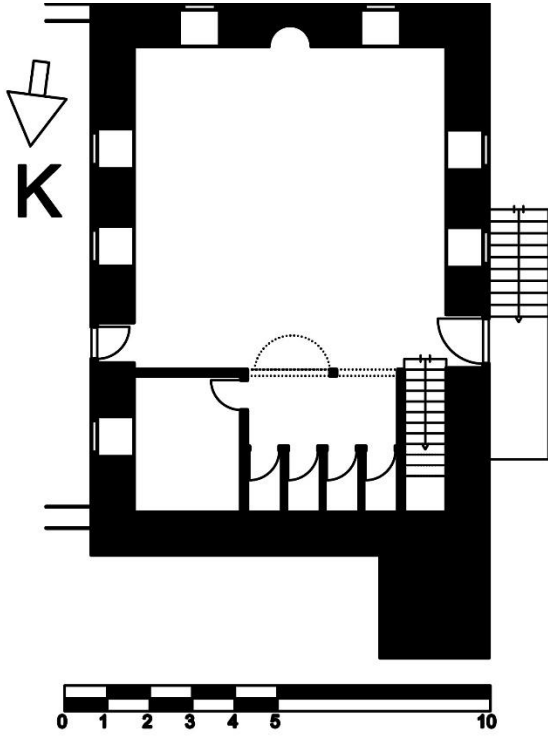
Şekil 15. Başçavuş Camii'nin planı (VGM Arşivinden işlenerek) ve cephe fotoğrafı, 2024



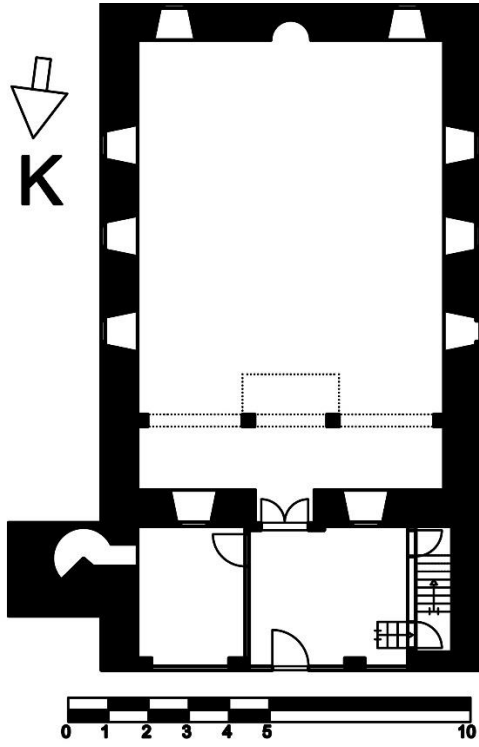
Şekil 16. Musa Ağa Camii'nin planı (Acun'dan işlenerek) ve cephe fotoğrafı, 2024



Şekil 17. Kayyımzade Camii'nin planı (Acun'dan işlenerek) ve cephe fotoğrafı, 2024



Şekil 18. Şeyh Hacı Ahmet Efendi Camii'nin planı (VGM Arşivinden işlenerek) ve cephe fotoğrafı, 2024



Şekil 19. Alacaloğlu Camii'nin planı (Sevim ve Karacabey'den işlenerek) ve cephe fotoğrafı, 2024



Şekil 20. Çalışmada ele alınan camilerin konumu (Google Earth'den işlenerek)