

Savunma Bilimleri Dergisi

The Journal of Defence Sciences

Millî Savunma
Üniversitesi

Alparslan Savunma
Bilimleri ve Millî
Güvenlik Enstitüsü



Bor Karbür: Fizikokimyasal Özellikleri, Sentez Yöntemleri ve Savunma Teknolojileri Alanında Uygulamaları

Gülbahar BİLGİÇ - Ayşegül BALIKÇIOĞLU GÜZEL - Mükerrerem ŞAHİN

Autonomous Steerable Ram-Air Type Load Parachute System Design and Alternative Trajectory Algorithm

Burak ÇİVELEK - Sinan KIVRAK

Decontamination Solutions and Techniques for Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Incidents

Kemal BAŞ - Serdar KARAKURT

Ballistic Performance of ETİAL-171 (A360) Aluminium

Baran ÖZDEMİR

Uzaktan Komutalı El Yapımı Patlayıcıların Doğaçılama Ev Yapımından Tüketici Elektronik Bileşenleri ile Tasarımına Evrimi: Tehdit Şebekelerince Tüketici Elektronik Pazarının Kullanımına Yönelik Bir Araştırma

Serkan KOÇ

Tedarikçi Seçiminin Savunma Alanı Özelinde İncelenmesi: Analitik Hiyerarşi Süreci ile Seçim Süreci

Oğuzhan ÜNLÜ - Memduh BEĞENİRBAŞ

Grafik Sinir Ağları Üzerine Bir İnceleme

Hamza Talha GÜMÜŞ - Can EYÜPOĞLU

İş Analiz Süreç Model Yaklaşımıyla Süreç Madenciliği Yöntemi Kullanılarak Yazılım Gereksinimleri Belirleme

Bahar ÖZYÖRÜK - Özge TAHMAZOĞLU

Savunma Sanayii Uygulamalarında Göz Önüne Alınan Başlıca İtke Vektörü Denetimi Yöntemlerinin İncelenmesi

Bülent ÖZKAN

Improvement of Quality Performance in Mask Production by Feature Selection and Machine Learning Methods and An Application

Semra TEBRİZCİK-Süleyman ERSÖZ-Adnan AKTEPE

Cilt (Sayı) / 20 (1)

Mayıs / May 2024

ISSN: 1303-6831

ISSN (Online): 2148-1776

Savunma Bilimleri Dergisi

The Journal of Defence Sciences

Millî Savunma Üniversitesi
Alparslan Savunma Bilimleri ve
Millî Güvenlik Enstitüsü

Cilt (Sayı) / Volume (Issue): 20 (1)
Mayıs / May 2024

BASKI

Kara Harp Okulu Basımevi

YAZIŞMA VE HABERLEŞME ADRESİ

Millî Savunma Üniversitesi

Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü

Kara Harp Okulu Yerleşkesi 06654 Bakanlıklar/ANKARA/TÜRKİYE

Telefon / Phone: +90 312 417 51 90 / 4915

E-posta / E-mail: alpdergi@kho.msu.edu.tr

Web: https://kho.msu.edu.tr/akademik/enstitu/enstitu_anasayfa.html

MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ
VE MİLLÎ GÜVENLİK ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA BİLİMLERİ DERGİSİ

TURKISH NATIONAL DEFENCE UNIVERSITY
ALPARSLAN DEFENCE SCIENCES AND
NATIONAL SECURITY INSTITUTE
THE JOURNAL OF DEFENCE SCIENCES

Cilt: 20 Sayı: 1 • Mayıs / May 2024 • ISSN 1303-6831 • ISSN (Online) 2148-1776

Dergi Sahibi – Baş Editör / Licensee – Editör-in-Chief

Prof. Dr. Hüsnü ÖZLÜ

Editör Yardımcıları/ Assistant Editors

Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Managing Editor

Arş Gör. Elif Ece ELMAS

Alan Editörleri / Field Editors

Prof.Dr.Alpaslan ATMANLI (Millî Savunma Üniversitesi)

Prof. Dr. Ali KARA (Gazi Üniversitesi)

Prof.Dr.Ziya TELATAR (Başkent Üniversitesi)

Prof.Dr. Mustafa ALKAN (Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY (Gazi Üniversitesi)

Doç.Dr. Tuğba TABANLIGİL CALAM (Gazi Üniversitesi)

Doç.Dr.Mehmet ŞİMŞEK (Millî Savunma Üniversitesi)

Doç.Dr.Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR (Millî Savunma Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Tuğba EROĞLU AZAK (Millî Savunma Üniversitesi)

Dr.Hüseyin Alper İRTEM (Millî Savunma Üniversitesi)

Teknik Editörler

Öğr. Gör. Yunus Emre KARAKOCA

Arş.Gör. Ezel KORLAELÇİ

Mizanpaj Editörü / Layout Editor

Öğr. Gör. Orhun DÖŞ

**Türkçe Dil Editörleri/Turkish Language
Editör**

Doç.Dr.Emrah BOZOK

Dr.Öğr.Üyesi Ahmet Metehan ŞAHİN

**İngilizce Dil Editörleri/English
Language Editör**

Dr.Öğr.Üyesi Sinan GÜL

Yayın Türü / Journal Type

Yaygın Süreli Yayın / Vernacular Publication

Yayın Aralığı / Publication Schedule

Altı Ayda Bir (Mayıs-Kasım) / Semi-Annually (May-November)

Taradığımız Veritabanları / Databases Indexing Our Journal

ULAKBİM TR DİZİN, EBSCO, Index Copernicus, ARASTIRMAX (Bilimsel Yayın İndeksi), SOBIAD (Fen Bilimleri).

Yayın ve Danışma Kurulu / Editorial and Advisory Board

Prof. Dr .Serdar SALMAN	Millî Savunma Üniversitesi
Prof. Dr. Nurettin ACIR	Millî Savunma Üniversitesi
Prof. Dr. Faruk UÇAR	Millî Savunma Üniversitesi
Prof. Dr. Çetin ELMAS	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet GÜRAL	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ	Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Bülent BOSTAN	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Yusuf SÖNMEZ	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Süleyman ERSÖZ	Kırıkkale Üniversitesi
Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ	Karabük Üniversitesi
Prof. Dr. Recep ÇALIN	Kırıkkale Üniversitesi
Prof. Dr. Alpay ÖZER	Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Semih ÖZDEN	Millî Savunma Üniversitesi
Doç. Dr. Faruk KILIÇ	Millî Savunma Üniversitesi
Doç. Dr. Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR	Millî Savunma Üniversitesi
Doç. Dr. Ayhan AYTAÇ	Millî Savunma Üniversitesi
Dr.Öğr.Üyesi Kemal Gürol KURTAY	Millî Savunma Üniversitesi
Dr.Öğr.Üyesi Semra AYDIN	Millî Savunma Üniversitesi

Amaç ve Kapsam

Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü tarafından hazırlanan ve 2002 yılından itibaren yayımlanan Savunma Bilimleri Dergisi, Mayıs ve Kasım aylarında olmak üzere yılda iki kez yayımlanmaktadır. Savunma Bilimleri Dergisinin amacı, savunma bilimleri alanındaki bilimsel gelişmeleri takip etmek ve bu konuda bilimsel araştırma ve uygulamalara yer vererek alana katkı sağlamaktır. Ayrıca araştırmacılar ve uygulamacılar arasındaki etkileşimi kurup destekleyerek savunma bilimlerinin gelişmesine hizmet etmektir. Dergi; savunma yönetimi, harekât araştırması, askerî elektronik sistemler, harp silah ve araçları, harp tarihi, KBRN savunma, askerî eğitim yönetimi, güvenlik araştırmaları, bilgisayar mühendisliği, istihbarat çalışmaları ve savunma bilimleri ile ilişkili diğer alanlarda nitelikli araştırmaları Türkçe ve İngilizce olarak yayımlamaktadır. Dergi; ULAKBİM TR DİZİN, EBSCO, Index Copernicus, ARASTIRMAX (Bilimsel Yayın İndeksi), SOBIAD (Fen Bilimleri) veri tabanları tarafından taranmaktadır. Dergiye gönderilecek makaleler DergiPark üzerinden kabul edilmektedir.

Makalelerdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler makale sahiplerine aittir; Millî Savunma Üniversitesi ile Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

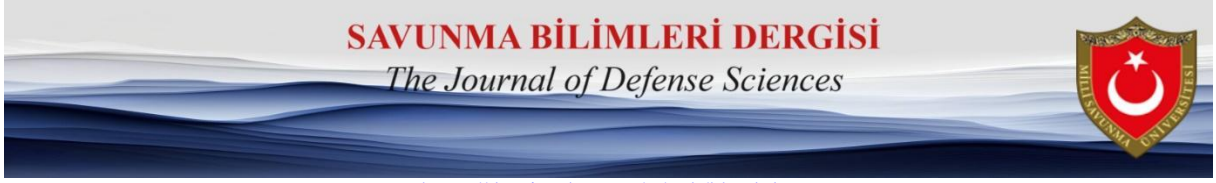
Purpose and Scope

The Journal of Defense Sciences, prepared and published by National Defence University Alparslan Defence Sciences and National Security Institute since 2002, is published semiannually in May and November. The purpose of Defence Sciences Journal is to contribute to the literature by following scientific developments in defence sciences and creating a communication environment for scientific research and applications. It also facilitates interaction between researchers and practitioners in order to achieve progress in the field. The journal contains qualified articles in both Turkish and English languages in the fields of Ballistics, Cyber Security, CBRN Defense, Weapon Systems Engineering, Electronic Warfare, Industrial Engineering, Military Electronic Systems Engineering, Civil Engineering, Aerospace Engineering, Operations Research and other fields related to defence sciences. The journal is scanned by ULAKİM TR DİZİN, EBSCO, Index Copernicus, ARASTIRMAX (Scientific Publication Index), SOBIAD (Science) databases. Manuscript to be sent to the journal are accepted through DergiPark.

The opinions, thoughts, postulations or proposals within the articles are but reflections of the authors and do not, in any way, represent those of Turkish National Defence University or of the Alparslan Defence Sciences and National Security Institute.

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Bor karbür: Fizikokimyasal Özellikleri, Sentez Yöntemleri ve Savunma Teknolojileri Alanında Uygulamaları Boron Carbide: Physicochemical Properties, Synthesis and Applications In Defense Technologies	
Gülbahar BİLGİÇ - Ayşegül BALIKÇIOĞLU GÜZEL - Mükerrerem ŞAHİN.....	1
Autonomous Steerable Ram-Air Type Load Parachute System Design and Alternative Trajectory Algorithm Otonom Yönlenebilir Kanat Tipi Yük Paraşüt Sistemi Tasarımı ve Alternatif Güzergah Algoritması	
Burak CİVELEK - Sinan KIVRAK.....	19
Decontamination Solutions and Techniques for Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Incidents Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer (KBRN) Olayları İçin Dekontaminasyon Solüsyonları ve Teknikleri	
Kemal BAŞ - Serdar KARAKURT	29
Ballistic Performance of ETİAL-171 (A360) Aluminium ETİAL-171 (A-360) Alüminyum'un Balistik Performansı	
Baran ÖZDEMİR	49
Uzaktan Komutalı El Yapımı Patlayıcıların Doğaçlama Ev Yapımından Tüketici Elektroniği Bileşenleri ile Tasarımına Evrimi: Tehdit Şebekelerince Tüketici Elektroniği Pazarının Kullanımına Yönelik Bir Araştırma Evolution Of Radio Controlled Improvised Explosive Devices From Improvised Homemade To Consumer Electronics Components: A Research On Potential Use Of Mass Market Consumer Electronics By Threat Networks	
Serkan KOÇ	61
Tedarikçi Seçiminin Savunma Alanı Özelinde İncelenmesi: Analitik Hiyerarşi Süreci ile Seçim Süreci Analysis of Supplier Selection in Defense Industry: Selection Process with Analytic Hierarchy Process	
Oğuzhan ÜNLÜ - Memduh BEĞENİRBAŞ.....	79
Grafik Sinir Ağları Üzerine Bir İnceleme A Review on Graph Neural Networks	
Hamza Talha GÜMÜŞ - Can EYÜPOĞLU.....	105
İş Analiz Süreç Model Yaklaşımıyla Süreç Madenciliği Yöntemi Kullanılarak Yazılım Gereksinimleri Belirleme Determining Software Requirements Using The Process Mining Method With The Business Analysis Process Model Approach	
Bahar ÖZYÖRÜK - Özge TAHMAZOĞLU.....	139
Savunma Sanayii Uygulamalarında Göz Önüne Alınan Başlıca İtke Vektörü Denetimi Yöntemlerinin İncelenmesi Investigation of the Noteable Thrust Vector Control Approaches Considered in Defense Industries Applications	
Bülent ÖZKAN.....	151
Improvement of Quality Performance in Mask Production by Feature Selection and Machine Learning Methods and An Application Öz nitelik Seçimi ve Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Maske Üretiminde Kalite Performansının İyileştirilmesi ve Bir Uygulama	
Semra TEBRİZCİK-Süleyman ERSÖZ-Adnan AKTEPE	167



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Bor Karbür: Fizikokimyasal Özellikleri, Sentez Yöntemleri ve Savunma Teknolojileri Alanında Uygulamaları

Boron Carbide: Physicochemical Properties, Synthesis and Applications in Defense Technologies

Gülbahar BİLGİÇ¹ , Ayşegül BALIKÇIOĞLU GÜZEL² , Mükerrerem ŞAHİN³ 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Metallurgy and Material Engineering, Nevşehir 50300, Türkiye

² Kazım Karabekir Vocational School, Karamanoğlu Mehmetbey University, 70600 Karaman, Türkiye

³ Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Derleme

Başvuru: 14.12.2023

Düzeltilme: 24.01.2024

Kabul: 03.02.2024

Keywords

Boron Carbide

Synthesis methods

Defense Technologies

Armor

Anahtar Kelimeler

Bor Karbür

Sentez yöntemleri

Savunma Teknolojileri

Zırh

Özet

Araç ve vücut zırh sistemlerinde kullanılan bor karbür (B_4C) balistik performans için önemli olan yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve kırılma dayanıklılığı gibi özellikler sergiler. Bu çalışma, B_4C bileşiğinin askeri ve savunma sektöründeki önemini ve uygulamalarda kullanımını özetlemektedir. Eşsiz fizikokimyasal özellikleriyle bilinen B_4C , ulusların askeri güçlerini ve savunma kabiliyetlerini güçlendirmede çok önemli bir rol oynamaktadır. Son araştırma eğilimlerinin, yararlarının ve potansiyel uygulamalarının anlaşılması, bu alanlarda daha fazla gelişmeye rehberlik edebilir. Çalışma daha etkili bir koruma ihtiyacı ve koruma sistemlerine yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Abstract

Boron carbide (B_4C), used in vehicle and body armor systems, exhibits properties such as high hardness, low density, and fracture toughness, which are important for ballistic performance. This study summarizes the importance of the B_4C compound in the military and defense sector and its use in applications. Known for its unique physicochemical properties, B_4C plays a crucial role in strengthening the military strength and defense capabilities of nations. Understanding recent research trends, benefits, and potential applications can guide further development in these areas. The study provides a need for more effective protection and a new perspective on protection systems.

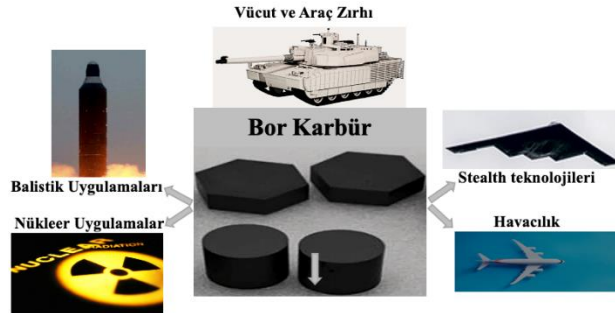
Önemli Noktalar / Highlights

- B_4C , yüksek erime noktasına, iyi mekanik özelliklere ve nötron absorpsiyon gibi özelliklere sahiptir.

-Yaklaşık 30 GPa'lık sertliğe sahip B_4C , "kara elmas" olarak da adlandırılmaktadır.

- Düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve kırılma dayanıklılığı gibi özelliklerinden dolayı iyi balistik performans sergiler.

Grafiksel Özet / Graphical Abstract



*Corresponding author, e-mail: glbhrblg@nevsehir.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

En basit kimyasal formülü B_4C olan bor karbür, askeri teknolojiler, havacılık teknolojileri, nükleer ve nötron koruma sistemleri ve uzay endüstrisi gibi birçok alanda kullanılan ileri seramik malzemedir. Askeri teknoloji, savaş durumlarında kullanılmak amacıyla oluşturulmuş çok çeşitli silah, ekipman, yapı ve araçları içerir. Yenilikçi, yüksek teknoloji askeri silahlar ve teçhizat, savaşan her ulusun belkemiğidir. Savaş için son teknoloji donanım geliştirmek ve bu donanımı acil durumlarda kullanabilmek için askeri araştırmalar çok önemlidir.

Bu yaygın uygulama alanı, bor karbürün fiziksel-mekanik özelliklerinin benzersiz birleşimiyle ilgilidir. Bor karbür yüksek elastisite modülü, yüksek balistik direnç, yüksek sertlik, aşırı koşullarda artan aşınma direnci, düşük yoğunluk vb. üstün özelliklere sahiptir [1]. Yalnızca elmas ve kübik- bor nitrür 'den daha düşük, yaklaşık 30 GPa'lık sertliğe sahip B_4C , "kara elmas" olarak da adlandırılmaktadır. Ancak B_4C elmas ve kübik-BN'den daha ucuzdur ve hazırlanması daha kolaydır. Ayrıca B_4C , yüksek termodinamik stabilitesi, düşük yoğunluğu ($2,52 \text{ g/cm}^3$) ve kimyasal inertliği ile üstün performans sergilemektedir. Yüksek erime noktası, korozyona karşı yüksek direnç ve nispeten düşük yoğunluk ve termal genişleme, bor karbürün zırh malzemeleri, kesici takımlar ve metal matrisli kompozitler için ideal bir seçim olmasını sağlayan özellikleridir [1,2].

Ancak saf bor karbür ürünleri, termal strese karşı gerekli boyutsal kararlılığı bir araya

getiren malzemelere ihtiyaç duyan bazı motorlarda motor bileşeni olarak kullanılmaya uygun değildir. Bunun nedeni bor karbürün kırılabilirliği ve nispeten düşük kırılma tokluğu özelliğidir. Modern teknolojilerin gereksinimlerini karşılamak için bor karbürün sinterleme yeteneği, bükülme mukavemeti, elektrik iletkenliği vb. performans parametrelerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Son on yılda yapılan çalışmalar, nanoyapılı bor karbür matrisine seramik ve/veya metalik nano katkı maddelerinin (borürler, karbürler, oksitler, metalik alaşımlar vb.) eklenmesiyle bu dezavantajların çoğunun giderilebileceğini kanıtlamıştır. Bu amaçla, bor karbür matrislerine bazı seramikler, titanyum ve zirkonyum diborürler, metaller, bakır-manganez (Cu-Mn) ve bakır-titanyum (Cu-Ti) ikili alaşımları ve kobalt-nikel-titanyum (Co-Ni-Ti) üçlü alaşımı ve tungsten karbür-kobalt (WC-Co) ve bazı ilgili bileşimler gibi metal oksitler eklenerek bor karbürün yapısı daha da güçlendirilmiştir [3]. William Taylor ve diğerleri [4] bor karbür parçacık takviyeli silisyum karbürün mekanik özelliklerini araştırdı. Çalışmada X-ışını kırınımı ve Raman spektroskopisi aracılığıyla yapılan artık gerilim ölçümleri, bor karbürün ağırlık yüzdesi arttıkça SiC matrisi içindeki basınç gerilimlerinin arttığını göstermektedir, ancak hem bükülme mukavemetinin hem de kırılma tokluğunun azaldığı bulunmuştur.

M.B. Stone ve diğerleri [5] termal nötron koruması için alüminyum ve B_4C bazlı malzeme üretmişler ve karakterize etmişlerdir. Nötron saçılma enstrümantasyonu için iki farklı bor bazlı katkı maddesiyle üretilmiş maskeyi,

geleneksel olarak üretilmiş bir bor nitrid maskesiyle karşılaştırdılar. İlk katkı maddesiyle üretilen maske, alüminyum ve bor karbürden oluşan bir kompozittir. İkinci katkı maddesiyle üretilen maske, bor karbür ve siyanoakrilattan oluşan bir kompozittir. Sonuçlarda alüminyum bor karbür malzemesi, yüksek termal iletkenliğin, düşük toplam nötron saçılma kesitinin ve düşük toksisitenin kriter olduğu koruma uygulamalarında kullanılması için önerilmiştir.

Ancak B₄C ile ilgili çok fazla çalışma olmasına rağmen, günümüzde bor karbürün yapısı, bağlanmasının temel yönleri ve karbon konsantrasyonunu değiştirerek neden olduğu önemli yapısal değişiklikler hala tam olarak anlaşılabilmiştir. Bu nedenle öncelikle bor karbürün yapısı ve sentez yöntemleri iyice anlaşılmalıdır. Bu çalışmada ilk olarak bor karbürün fizikokimyasal özellikleri, yapısı ve sentez yöntemleri kısaca özetlenmiştir. Ardından bor karbürün savunma teknolojileri alanındaki uygulamaları özetlenip, bu alandaki son araştırma eğilimlerine genel bir bakış sunulmuştur.

2.BOR KARBÜRÜN YAPISI (STRUCTURE OF BORON CARBIDE)

Tablo 1 bor karbürün fizikokimyasal özelliklerini göstermektedir. B₄C yüksek sertlik (38 GPa), düşük yoğunluk (2,52 g/cm³), yüksek erime sıcaklığı (2350 °C), yüksek elastisite modülü (460 GPa), kimyasal inertlik, yüksek nötron absorpsiyon kesiti (600 barn), mükemmel termal iletkenlik gibi benzersiz fizikokimyasal özellikleri nedeniyle son yıllarda pek çok araştırmaya konu olan yüksek performanslı bir seramik malzemedir [6].

Tablo 1: Bor karbürün fiziksel kimyasal ve yapısal özellikleri [6,16].

Kimyasal formül	B ₄ C
Molar kütle	55.255 g/mol
Görünüm	Koyu gri veya siyah toz, kokusuz
Yoğunluk	2.52 g/cm ³ , katı
Erime noktası	2,350 °C (4,260 °F; 2,620 K)
Kaynama noktası	>3500 °C
Kristal yapı	Kristal yapı
Elastik modülü	460 GPa
Vickers sertliği	38 GPa
Seebeck katsayısı	300µVK ⁻¹

Bor karbürün kesin yapısı ve atomik düzenlemesi, yaygın olarak kullanılan hesaplamalı modellemeler ve deneysel araştırmalarla birlikte, hala çalışma ve tartışma konusudur.

İdealleştirilmiş, en simetrik formunda bor karbürün yapısı genellikle bir ikosahedral B₁₂ birimi ve bir doğrusal --C–B–C-- zinciri içeren eşkenar dörtgen birim hücrede (uzay grubu R-3m) tanımlanır. En yaygın kabul edilen atomik yapısı Şekil 1’de görülen, rombohedral ekseninde yer alan ikosahedral birimleri birbirine bağlayan 3 atomlu lineer zincirler ve R $\bar{3}m$ uzay grubunun köşelerinde bulunan 12 atomlu ikosahedral birimlerden oluşur [7,8].

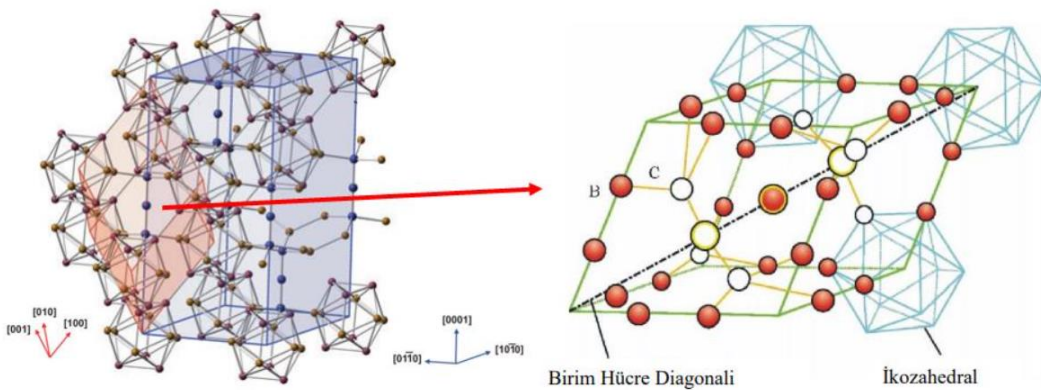
Bor karbürün basit 15 atomlu birim hücrelerinin altında bazı beklenmedik ayrıntılar ve önemli yapısal/bağlanma soruları yatmaktadır. Bor karbür yapısının, faz ayrımı veya ara yer dolulukları olmadan karbon içeriğindeki önemli bir değişime (B₄C’den B₁₀C’ye) dayanma kapasitesi bir sır olarak kalıyor [6,9]. B₁₂ birimleri, D_{3d} ortamında kristalografik olarak farklı bor atomları BE_q (Ekvator) ve BP’den (Polar) oluşur.

Bu B₁₂ birimleri BE_q atomları aracılığıyla karbon atomlarıyla bağ yaptığında katmanlar oluşur ve komşu katmanların B₁₂ birimlerini birleştirmek için çokyüzlüler arası BP-BP bağları kullanılır. İkosahedrondaki bu iki tür bor atomunun yanı sıra, bitişik katmanlardaki iki karbon atomunu birbirine bağlayan ve kısa doğrusal --C-B-C-- zincirini oluşturan benzersiz bir bor yapısı vardır [9-12].

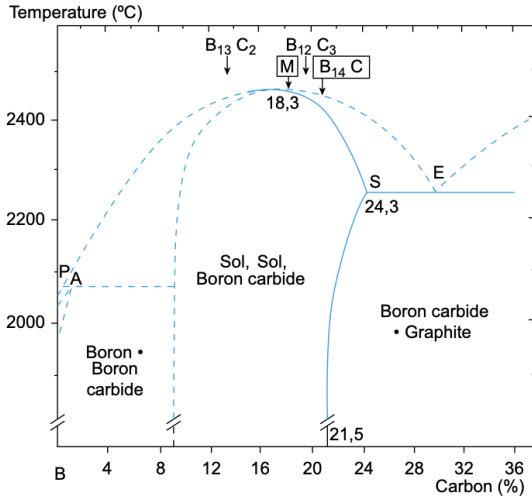
Mükemmel sertlik, yüksek elastiklik limiti ve düşük yoğunluk gibi benzersiz nitelikleri nedeniyle bor karbür, koruyucu vücut zırhında kullanım için mükemmel bir aday malzemedir. Güçlü kovalent bağlar ve yüksek atomlar arası elektron yoğunluğuna sahip benzersiz kafes yapısı, bu benzersiz özelliklerin nedenleridir. Bor karbürün birtakım polimorflarda mevcut olmasına rağmen, enerji açısından avantajlı B₄C yapısının genellikle C atomunun polar bölgede yer aldığı bir B₁₁C ikosahedradan ve aynı zamanda bir --C-B-C-- zincirinden oluştuğu anlaşılmaktadır [13].

Bor karbürdeki bor ve karbon atomlarının kristal yapı konumlarını belirlemek için nükleer manyetik rezonans, nötron ve X-ışını kırınımı, kızılötesi ve Raman spektroskopisi, X-ışını

absorpsiyonu ve saçılma teknikleri gibi deneysel yöntemler kullanılır. Bu tekniklerin ortaya çıkardığı potansiyel yapılar arasında üç farklı türde üç atomlu zincir bulunmaktadır: CBC, CBB ve BBB. Karbon konsantrasyonu bu zincirlerin dağılımını belirler. B₄C (%20 C) yapısı B₁₁C ikosahedrası ve CBC zincirlerinden oluşur. Bor zengini bir bileşimde, B₁₁C ikosahedrada bulunan karbon atomları aynı konumda kalırken, CBC zincirlerindeki bir karbon atomu bir bor atomu ile yer değiştirir. B₁₃C₂ bileşimine yakın bir yapıda ise B₁₁C ikosahedra ve CBB zincirleri bulunur. Karbon indirgenme süreci sırasında bazı B₁₁C ikosahedraları B₁₂ ikosahedraları ile yer değiştirirken, CBB zincirleri korunur. İkosahedrada bulunan bor-bor bağlarıyla karşılaştırıldığında, triatomik zincirlerdeki karbon-karbon bağları daha güçlüdür. Ayrıca, ikosahedralar içindeki bağlar, ikosahedralar arasındaki bağlardan daha güçlüdür. Şekil 2'de en çok kabul gören B-C faz diyagramı gösterilmiştir. Karbonun sabit fazda geniş bir katı çözünürlüğü olduğu ve homojenlik aralığının %8 C ile %20 C arasında uzandığı görülmektedir [6,8].



Şekil 1: Bor karbür rombohedral kristal yapısı [7,8].



Şekil 2: B-C faz diyagramı [14].

Toz formunda, sinterlenmiş üründe ve ince filmde uygulama alanları olan B_4C , yüksek sertliği nedeniyle metal ve seramik parlatma, yumuşatma ve su jeti kesimde aşındırıcı toz olarak kullanılır.

Malzemenin yüksek bir erime noktası, mükemmel termal iletkenliği ve düşük özgül ağırlığı vardır; bu özellikler, savunma uygulamalarında, özellikle personel ve araç zırhlarında kullanımı için önemlidir. Ancak, yüksek sertliği, uygulanabilirliğini sınırlayabilen nispeten düşük bir kırılma dayanıklılığını beraberinde getirir. Balistik senaryolarda olduğu gibi yüksek basınçlı darbelerde faz dönüşümleri nedeniyle sertliği azalabilir. Kapsamlı araştırmalar, bu dönüşümleri anlamaya ve bor karbürün yüksek basınç durumlarında sertliğini korumasını sağlamak için bunları azaltmanın yollarını bulmaya odaklanmıştır. Son on yılda yapılan çalışmalar, bu dezavantajların çoğunun seramik ve/veya metal nano katkı maddelerinin (borürler, karbürler, oksitler, metal alaşımlar vb.) nano yapıdaki bor karbür matrisine eklenmesiyle aşılabileceğini göstermiştir [3].

Ek olarak B_4C , p-tip yarıiletken bir malzeme olması nedeniyle yüksek sıcaklıkta çalışan elektronik cihazlarda kullanılmak üzere uygun bir malzeme adayıdır. Ayrıca, yüksek Seebeck katsayısına ($300\mu VK^{-1}$) sahip olması nedeniyle mükemmel bir termoelektrik malzemedir [15]. Bor karbür, ısı çiftler, diyotlar ve transistörler gibi uygulama alanlarına sahiptir. Aynı zamanda diğer metal borürlerin ve refrakter malzemelerin yapımında kullanılan prosesin önemli bir parçasıdır. Bor karbürün düşük yoğunluğu, yüksek sertliği ve düşük termal genleşme özellikleri, onu uzay gemilerinde kullanılan Be/Be alaşımları için uygun bir alternatif haline getirmektedir [6].

3.BOR KARBÜR SENTEZİ (BORON CARBIDE SYNTHESIS)

19. yüzyılda metal borür reaksiyonlarının bir yan ürünü olarak B_4C 'nin keşfine tanık olundu. İlk sentez çalışmalarında, bor karbürün saflığı %75'in altında kaldı. Daha sonra 1933 yılında, karbotermik indirgeme yöntemiyle %90 saflıkta kristal bor karbür üretilerek bir patent alındı [16]. B_4C üretmek için literatürde en çok kullanılan yöntemler, karbotermik indirgeme ve bor oksidin bir elektrik ark fırınında karbon ile reaksiyonlarıdır. Bununla birlikte mekanokimyasal sentezleme, magnezotermik indirgeme, elementlerden sentezleme, buhar fazı reaksiyonları, polimerik öncüllerden sentezleme, kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS) dahil olmak üzere çeşitli başka yöntemler de önerilmiş ve incelenmiştir [3,6,16-20].

Bor karbür tozu üretmenin ana yöntemleri arasında gaz fazı reaksiyonları, karbotermal

indirgeme ve bir elektrik ark ocağında karbon-B₂O₃ reaksiyonları yer alır. Bor karbürün %95'ten fazla bağlı yoğunluğuna ulaşmak için 2200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sıcak presleme işlemi şarttır [1]. Bu, son ürünün özelliklerini değiştirirse de doğru sinterleme yardımcılarının kullanılması, sinterleme sürecinin kısaltılmasına ve sıcaklığın düşürülmesine yardımcı olabilir [1]. Sentez sürecini optimize etmek, bor karbürün kalitesini kontrol etmek ve çeşitli uygulamalarda maliyet

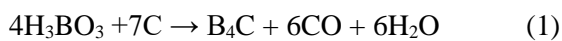
etkinliğini yönetmek için çok önemlidir. Bu sentez yöntemleri, sonuçta elde edilen bor karbürlerin bileşim, yapı ve özellikleri üzerinde çeşitli derecelerde kontrol sağlar ve farklı uygulamalar için uygun hale getirir. Araştırmacılar, bor karbür sentezinin verimliliğini ve çok yönlülüğünü artırmak için sürekli olarak yeni yöntemleri incelemekte ve geliştirmektedirler. Bor karbürün sentez teknikleri Tablo 2'de karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2: Bor karbür sentez yöntemlerinin karşılaştırılması [6].

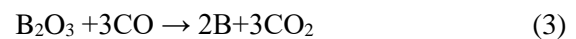
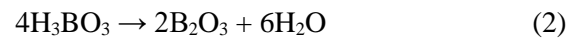
Yöntem	Bor kaynağı	Karbon kaynağı	Avantaj	Dezavantaj
Karbotermik indirgeme	H ₃ BO ₃ veya B ₂ O ₃	Grafit, aktif karbon	-Ucuz hammadde, -Ticari kullanım için uygun	-Yüksek bor kayıpları, -Parça halinde elde edilen toz için öğütmeye ihtiyaç var
Magnezotermik indirgeme	B ₂ O ₃ veya Na ₂ B ₄ O ₇	Grafit, aktif karbon	-İnce toz, ekzotermik reaksiyon, SHS'ye uygun işlem	-Ürün Mg, MgB ₂ ile kirlenmiş
Elementlerden sentez	Elemental bor	Grafit, aktif karbon	-Bor kaybı yok, -Ürünün saflığı ve karbon içeriği üzerinde kontrol	-Elemental borun yüksek maliyeti
Buhar fazı sentezi	BCl ₃ , BBr ₃ , BI ₃ , B ₆ H ₆ , B ₂ O ₃	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₂ , CCl ₄	-İnce filmler, toz, lifler, kılçıksı yapılar için uygun	-Yoğunlaşma için B ₄ C uygun toz üretmek zor -Büyük ölçekli üretim için uygun değil
Polimerlerden sentez	Borik asit, B ₂ O ₃ , polivinil pentaboran, polivinil borat, etil dekaboran	Polivinil alkol, sitrik asit, hidroksil benzil alkol, şeker, etilen glikol	-Düşük sıcaklıkta proses -Yüksek serbest karbon içeriği,	-Laboratuvar aşamasında
Sıvı faz reaksiyonu	BBr ₃ , Elemental bor	CCl ₄	-Düşük sıcaklık prosesi, -Nanopartiküller için uygun	-Reaktif metal ihtiyacı, Na veya Li gibi
İyon ışın sentezi	Elemental bor	Karbon	BxC için uygundur	-Yalnızca ince filmler için
Buhar sıvı katı büyüme	B ₂ O ₃	Karbon siyahı	Kılçıksı yapılar için uygun	-Erimiş metal katalizör ihtiyacı

3.1 Karbotermik İndirgeme

Ticari B₄C üretimde yaygın olarak kullanılan karbotermik indirgeme yönteminde, borik asit ve bor trioksit karbon ile indirgenir. Toplam karbotermik indirgeme reaksiyonu aşağıdaki gibidir;



Bu reaksiyon üç adımda gerçekleşir;



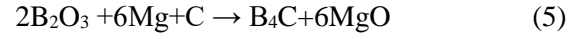
Borik asit ısıtıldığında (Denklem 2) ortama su vererek B₂O₃'e dönüşür. B₂O₃'ün karbon

monoksit ile indirgenmesi (Denklem 3) 1400 °C'nin üzerinde termodinamik olarak gerçekleşebilir. Toplam reaksiyon hızını arttırmak için fırın sıcaklığı 2000 °C'nin üzerine çıkarılır. Bu, 16800 kJ/mol enerji tüketen endotermik bir süreçtir. Bor karbür üretmek için karbotermik indirgeme işleminde üç farklı tipte elektrikle ısıtılan fırın kullanılır: boru tipi fırın, elektrik ark ocağı ve direnç malzemesi olarak grafit çubuk kullanan Acheson tipi fırın [6]. Karbotermik indirgeme yöntemiyle ticari olarak bor üretim sürecinde sıcaklık yaklaşık 2000 °C civarındadır ve sonuçta elde edilen ürün külçe halindedir. Bor karbürünün toz haline getirilmesi için öğütme işlemi kullanılır, ancak bu çok sert materyalin öğütülmesi ve yüksek sıcaklıkta gerçekleştiği için üretim maliyetini artırır. Endüstriyel elektrik ark ocaklarında sıcaklık eşit şekilde dağılmamaktadır; merkezden dışarı doğru çıktığında okumalar 1200 ile 2200 °C arasında değişir. Merkezdeki sıcaklık 2200 ila 2500 °C arasında değişmektedir. Sonuç olarak reaksiyona girmeyen reaktanlar nihai ürünlerdeki safsızlıklardır. Öğütme sırasında meydana gelen kirliliklerle birlikte, geleneksel üretim yöntemiyle elde edilen bor karbür önemli derecede safsızlıklar içermektedir [7]. Ticari olarak üretilen bor karbürlerde yaşanan bu zorluklar nedeniyle, bor karbürün alternatif yöntemlerle üretimi, önemli bir araştırma alanı olarak büyük ilgi görmektedir.

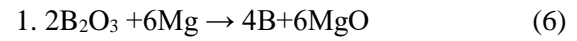
3.2 Magnezotermik İndirgenme

Karbon varlığında bor anhidritten bor karbür üretmeye yönelik diğer bir işlem, B₂O₃'ün magnezotermal indirgenmesidir. Cam, seramik,

kimya, metalurji ve elektrik-elektronik mühendisliği alanlarında bor oksit kullanılmaktadır [21]. Magnezotermik indirgenme üç basamakta ilerler (Denklem 5, 6, 7);



genel reaksiyonuyla gösterilen süreç iki basamakta devam eder;



Reaksiyon, ekzotermiktir ($\Delta H=1812$ kJ/mol). Magnezyumun 1000 °C'nin üzerindeki reaksiyon sıcaklıklarında yüksek bir buhar basıncına sahip olması nedeniyle, yüksek sistem basıncını korumak için argon veya hidrojen gibi bir inert gaz kullanılır. Bu yöntemle elde edilen ürünler, MgO'yu uzaklaştırmak için yıkanır. Bununla birlikte, magnezyum borürler adı verilen kararlı moleküller, bor karbürde kirletici madde olarak varlığını sürdürüyor. Bu işlem, ince taneli sinterlenmiş ürünlerin üretilmesinin yanı sıra son derece ince tozların sentezi için de iyi çalışır [6,22]. Ancak, yüksek maliyetli olması ve son ürünün safsızlıklar içermesi, bu yöntemin en büyük dezavantajlarıdır.

3.3 Kendiliğinden İlerleyen Yüksek Sıcaklık Yöntemi (SHS)

Garry [23], alkali Na₂B₄O₇ veya B₂O₃'ün 1650 ile 1700 °C arasındaki sıcaklıklarda karbon varlığında magnezotermik indirgenmesinden B₄C tozlarının üretimini tanımlayarak SHS prosesinin patentini almıştır. Katalizör olarak metalik sülfatların kullanılmasıyla reaksiyonun sıcaklığının 700 °C'ye düşürüldüğü bulundu.

Yüksek sıcaklıktaki sentez yolu için magnezotermik reaksiyonun ürettiği ısı tek başına yeterlidir. C, H₃BO₃ ve Mg tozlarından ince B₄C tozu üretmek için SHS'nin kullanımı araştırılmış ve bu karışımın aktivasyon sıcaklığı 670 °C olarak belirlenmiştir [24,25].

SHS yöntemi, yüksek kalorili uygulamalarda kullanılan bor karbürün elde edilmesinde kullanılan yöntemdir. Ancak bu yöntemin çıktısı, kalorifik değerinden dolayı kontrol edilemez. Başka bir deyişle, bu stratejiyi kullanmak, düzenli ve eşit kalitede bir ürünü tutarlı bir şekilde üretmeyi zorlaştırır.

3.4 Elementlerden Sentezleme

Bor karbürün bu sentezi, doğrudan B ve C elementlerinden B₄C eldesini içerir. Ancak elementel borun çok pahalı olması nedeniyle bu işlem uygun maliyetli değildir. Bu nedenle, özellikle B10 izotopunu içeren veya yüksek saflıkta bor karbür elde etmek gibi özel uygulamalarda kullanılmak üzere bu yöntem tercih edilir. Bor karbürün kendisini oluşturan parçalardan sentezlenmesi için öncelikle karbon ve bor içeren homojen bir toz karışımının yapılması gerekmektedir. Bu toz karışımı peletlenir ve inert bir ortamda veya vakum altında 1500 °C'yi aşan bir sıcaklıkta ısıtılır. Bu prosedür, kısmen sinterlenmiş peletler verir; bunlar daha sonra kırılır, ezilir ve son olarak ince bor karbür tozuna dönüştürülür.

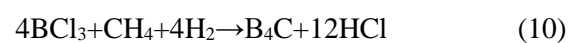
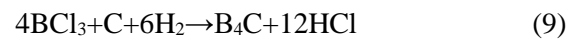
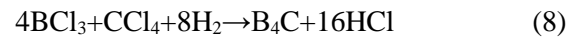
Literatürde yapılan çalışmalarda yüksek saflıkta bor karbür elde etmek için elemental bor, genellikle erimiş tuzun elektrolizi yöntemiyle üretilmiştir. Ayrıca, sıcak presleme, metal alaşımlama ve ısıtma, kıvılcım plazma

sinterleme, şok dalgası tekniği ve amorf bor ve grafit, karbon siyahı gibi karbon kaynaklarının kullanımı dahil olmak üzere çeşitli teknikler kullanılarak elementel bor karbürün sentezi üzerine araştırmalar yapılmıştır [26-30].

3.5 Buhar Fazı Reaksiyonu

Bor ve karbon içeren gazlı türler arasındaki reaksiyonun gerçekleştirilmesi yoluyla bor karbür sentezi kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Bu teknik, kılçıksız ince yapılar ve mikrometre altı boyutlu parçacıkların yanı sıra bor karbürden yapılmış kaplamalar oluşturmak için kullanılmıştır. BCl₃, BBr₃ ve BI₃ gibi bor halojenürler uygun bor kaynağı olmakla birlikte, kolay bulunabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle BCl₃ en çok tercih edilenidir. Halojenürlerin yanı sıra boran (B₆H₆) ve oksit (B₂O₃) de faydalı bor kaynaklarıdır. Karbon kaynağı olarak CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₂H₂ ve karbon tetra klorür (CCl₄) gibi hidrokarbon gazları kullanılmaktadır [4]. Bor karbür sentezi istenilen sıcaklık ve basınçta tutulan reaksiyon odasında gerçekleşir. Genellikle ortamda hidrojen bulunur ve bu hidrojen, aşağıdaki reaksiyonlara göre halojen oluşturan hidrojen klorürle reaksiyona girer (Denklem 8,9,10).

Buhar fazı reaksiyonu için böyle bir düzenek Bourdeau [29] tarafından patentinde anlatılmıştır. Buhar fazındaki bor halojen ürününün 1500 ila 2500 °C sıcaklıkta hidrokarbonla işlenmesiyle bor karbür elde edildi.



3.6 Polimerik Öncüllerden Sentezleme

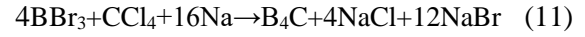
Düşük sıcaklıklarda seramik malzemeler yapmak için polimer öncüllerinin geliştirilmesi, yüksek sıcaklıktaki reaksiyon prosedürlerine alternatif olarak büyük ilgi görüyor. Polivinil pentaboran, karboran ($C_2B_nH_{n+2}$), trifenilboran ve borazinler gibi bazı bor yüklü organik bileşikler, B_4C eldesi için pirolize tabi tutulur.

Tipik olarak bu prosedür, inert bir ortamda veya vakumda 1000 ila 1500 °C arasında gerçekleştirilir. Serbest akışlı bir bor karbür tozu oluşturmak için şekeri borik asitle birleştirmeye yönelik bir yöntem, bir ABD patentinde açıklanmaktadır [30]. Karışım etilen glikolde çözüldükten sonra 180 °C'de havada kurutulur ve daha sonra hidrojenle 700 °C'ye kadar ısıtılır. İnce bor karbür tozu üretmek için bu reaksiyon ürünü öğütülür ve 1700 °C'de yedi saat boyunca yakılır. Düşük sıcaklıkta sentetik bir teknik Mondal ve Banthia tarafından açıklanmıştır [31]. Borik asidin polivinil alkol ile etkileşimi yoluyla bir polimerik öncünün sentezini içerir, bu da 400/800 °C'de piroliz yoluyla kristal bor karbür üretimiyle sonuçlanır. Borik asit ve sitrik asidin sulu çözeltisinden stabil bir jel oluşturma yöntemi Sinha ve meslektaşları tarafından ortaya atılmıştır [32]. Bu jel, vakum altında 1450 °C'ye ısıtıldığında B_4C üreten bir öncül elde etmek üzere ayrıca işlenir.

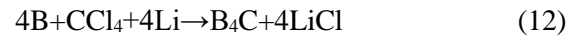
3.7 Sıvı faz reaksiyonu

Solvotermal süreç veya koredüksiyon yöntemi bu tekniğe verilen ek adlardır. Geleneksel tekniklerin aksine bu, gerekli özelliklere sahip bor karbürün önemli ölçüde daha düşük

sıcaklıklarda üretilmesini sağlayabilir. Shi ve diğerleri, aşağıdaki reaksiyona (Denklem 11) göre indirgeyici madde olarak sodyum kullanılarak boron tribromür ve karbon tetraklorürün ortak indirgenmesi yoluyla ultra ince bor karbür tozlarının oluşumunu araştırmışlardır [33].



Reaksiyon bir otoklavda 450 °C'de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen B_4C kristalleri, tekdüze küresel (80 nm çap) ve çubuk benzeri parçacıklardan oluşmuştur. Gu ve ark. solvotermal yolun nanokristalin B_4C 'nin oluşmasına yol açtığını kaydetti. Amorf bor tozunun 600 °C'de otoklavda sınıvlaştırılmasından sonra, CCl_4 'ün indirgenmesiyle B_4C oluşturuldu (Denklem 12) [34]. Yaklaşık 15-40 nm çapında parçacık boyutuna sahip altıgen B_4C kristalleri elde edilmiştir.



3.8 Kimyasal buhar biriktirme (Buhar sıvı katı (VLS) büyümesi)

Son zamanlarda bir silikon substrat üzerinde plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme (VLS yoluyla) ile sentezlenen "nanoteller" üzerine çalışmalar yapıldı. İnce ve kılçıksız bor karbür yapıları VLS büyüme mekanizmasıyla elde edilebilir. Bu yöntemde, gaz fazındaki borun ve karbonun, sıvı bir katalizör metale (Fe, Ni veya Co) taşınarak kılçıksız bor karbür yapıları olarak çözünür. Bor karbür kılıkları, karbon katalizör ile aşırı doymun hale geldiğinde metal damlacıklarından ayrılır [6].

Bu yöntemde, reaksiyon karışımına bir halojenit tuzu ve bir metal katalizör ilave edilerek VLS büyümesi destekler. Mekanizma şu şekildedir: oksit, karbotermal yollarla indirgenir ve daha sonra bor, gaz fazındaki türler olarak, büyük bileşenlerinin çözündüğü sıvı katalizör metale taşınır. Katalizörün karbon ve borun aşırı doyması, bor karbür kıllarının metal damlacıklarından ayrılmasına neden olabilir. Damlacıklara yakın reaktif gaz türlerinin miktarı belirli bir eşik değerinin altına düştüğünde veya damlacıklarla temas halinde olan karbon yetersiz olduğunda büyük yapısının büyümesi durur [35]. Carlsson ve ark. bu tekniği kullanarak B_4C yapılarını ve trombositlerini hazırlamışlardır [35]. Bor ve karbon kaynağı olarak sırasıyla B_2O_3 ve karbon siyahı kullanılmıştır. Kılçaksız yapıların büyümesini kolaylaştırmak için NaCl ve Co eklenmiştir. Reaksiyonlar 1200-1800 °C sıcaklık aralığında gerçekleşti ve katalizör metalleri olarak Co, Ni ve Fe test edildi. B_2O_3 , NaCl ile reaksiyona girerek BCl₃'yi oluşturmuştur. Bu durumda BCl karbonla birlikte sıvı kobaltta çözülür ve daha sonra bor karbür kılları halinde çöker.

4. SAVUNMA TEKNOLOJİLERİNDEKİ UYGULAMALAR (APPLICATIONS IN DEFENSE TECHNOLOGIES)

Askerler tarafından kullanılan mevcut balistik koruma sistemleri hem çok ağır hem de yeterli koruma sağlamamaktadır. Bu tür kayıpları ve yaralanmaları azaltmak için modern balistik zırh sistemleri için tipik olarak sinterlenmiş seramikler, sentetik elyaflar ve yüksek sertlikte metaller dahil olmak üzere çeşitli malzemeler kullanılır. Kompozit zırh olarak bilinen bu

malzemeler, uygulamaya (araç veya personel) ve tehdit tipine (parça, mermi, patlama vb.) göre uyarlanarak kombinasyon halinde kullanılmaktadır. Örneğin yeleşin özellikleri ve balistik dayanıklılık genel olarak seramik malzemelerin sertlik ve yoğunluk özellikleriyle ilişkilendirilebilir. Ancak balistik çarpmanın dinamik bir olay olduğu dikkate alındığında (yüksek deformasyon hızları), seramiklerin kırılma modu gibi özellikleri daha çok ön plana çıkmaktadır. Tablo 3'te listelenen özellikler, tane şekli ve boyutu, kristalin fazlar, faz dönüşümleri ve gözenekliliğin yanı sıra malzemenin mikro yapısıyla da ilişkilidir.

Bu malzemeler arasında bor karbür, olağanüstü sertliği, hafifliği ve nötron soğurma kapasitesi nedeniyle savunma sektöründe büyük ilgi gören bir malzemedir. Avantajlı özellikleri, savunma ve askeri teknolojilerdeki birçok kritik uygulamada kullanılabilir. Bu bölümde bor karbürün savunma alanında kullanılan uygulamaları araştırılmıştır.

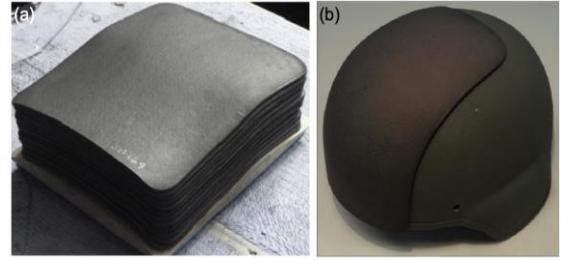
Tablo 3: Bor karbür malzeme özellikleri ile balistik performans arasındaki ilişki.

Seramik Özelliği	Balistik Performansa Etkisi
Yoğunluk	Kurşun geçirmez zırh ağırlığı
Sertlik	Mermi hasarı
Genç Modül	Şok dalgalarının yayılması
Mekanik direnç	Çoklu darbelere karşı dayanıklılık
Kırılma Tokluğu	Çoklu darbe dayanımı; saha dayanıklılığı
Kırılma Modu	Enerji Emilimi

4.1 Vücut ve Araç Zırhı

Balistik koruma, kişisel kullanım, kara, deniz ve hava araçları, askeri yerleşim bölgeleri için gereklidir. Zırh kullanımının silahlı çatışma ortamlarında ölümleri azalttığı bilinmektedir. Bu koruyucu donanımın kullanılmasıyla savaşçı yaralanmaları ve ölümleri başarılı bir şekilde azaltılır. Balistik koruma, mermileri insan vücudundan uzak tutma amacına hizmet eder. Ancak bu amaç için bir malzeme seçerken ağırlık, enerji emme kapasitesi, hasar direnci ve çoklu darbe direnci gibi bir dizi faktör dikkate alınır. Üretim parametrelerinin optimizasyonu ve fiziksel ve mikroyapısal özelliklerin bir karışımı, dikkate alınması gereken ek hususlardır. Kurşun geçirmez yelek üretiminin fiyatı, bu malzemeleri seçerken belirleyici bir faktördür. Yukarıda sayılan özelliklerden dolayı seramik malzemeler, onları uygulama için ideal kılan ve balistik zırh üretiminde kullanılan diğer malzeme sınıflarından daha iyi performans gösterir. Bu da onları balistik zırh üretiminde kullanılan mükemmel bir aday haline getirir. Balistik koruma sistemleri hafif ve ucuz olacak şekilde tasarlanmıştır. Genellikle, bu özellikler seramik zırh sistemleri ile sağlanır. Seramik zırh sistemleri, yüksek çekme gerilim değerlerine sahip Kevlar™ veya cam elyafı gibi dayanıklı özel takviye elyaflarla kaplanmış bir alüminyum gibi yumuşak metal gövdeden oluşur [36]. Kinetik enerjisi 2-4 kJ civarında olan bir merminin balistik yüzeye 800 m/s hızla çarpması sonucu ilk olarak sert seramik yüzey kırılıyor ve kalan enerji takviye elemanları tarafından emiliyor. Balistik koruma performansı, seramik kaplama malzemesinin mekanik özellikleri ve yapısından etkilenen

balistik enerjinin dağılımı ile belirlenir. Alümina gibi oksit seramikler ve karbür ve nitrür dahil oksit içermeyen seramikler, balistik koruma için yaygın olarak kullanılmaktadır. [37]. Günümüzde silisyum karbür (SiC), B₄C, alümina ve (Al₂O₃) balistik uygulamalarda en sık kullanılan seramiklerdir. Alümina bu malzemelerin işletme açısından en ekonomik olanıdır. Silisyum karbürün mekanik dayanım ve daha düşük yoğunluk açısından alüminaya göre avantajları olmasına rağmen, işleme ve malzeme edinimi ile ilgili daha büyük masraflar nedeniyle ekonomik faydası azalmaktadır. Bor karbür ise gelişmiş seramikler arasında balistik dirence ve daha düşük yoğunluğa ek olarak en iyi mekanik özellikleri sunan üründür [36].



Şekil 3: Bor karbür koruyucu yelek plakaları (a) ve kask zırhı (b) [14].

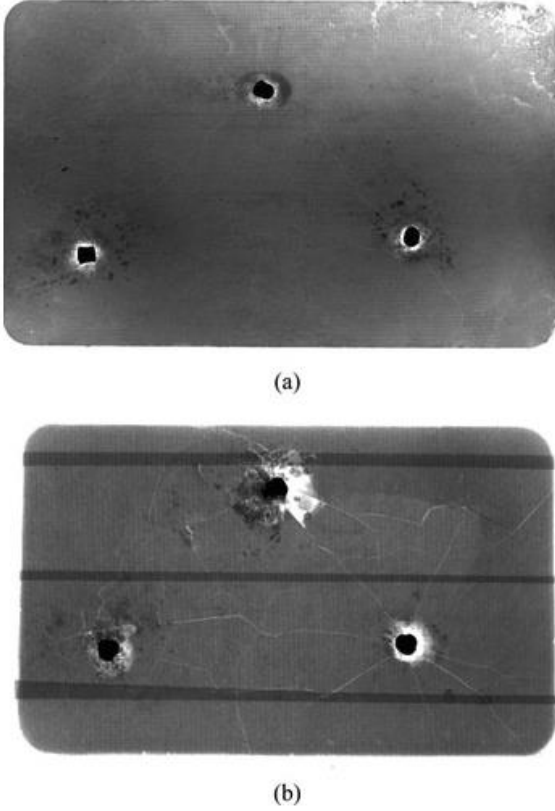
Bor karbürün savunmada birincil kullanımlarından biri gövde ve araç zırhı imalatıdır. Elmas ve kübik bor nitrürden sonra insanoğlunun bildiği en sert madde olan bor karbür, balistik darbelere karşı güçlü bir direnç sunduğundan zırhlı araçlar ve kişisel koruma ekipmanları için mükemmel bir seçenektir. Şekil 3'te bor karbürden yapılan koruyucu yelek plakaları (a) ve kask zırhı (b) görülmektedir. Yüksek sertliğine rağmen, bor karbür nispeten hafiftir ve personelin gelişmiş hareketliliğine ve zırhlı araçlar için daha iyi yakıt verimliliğine olanak tanır. Gücü en üst

düzeğe çıkarırken ağırlığı en aza indirmenin çok önemli olduğu uygulamalarda özellikle hayati önem taşır [38-40]. Yüksek sertlik, balistik özellikler için kritik bir parametre olmasına rağmen, kırılma tokluğu da balistik performans için aynı derecede önemlidir. Yüksek sertlik ve kırılma tokluğuna sahip zırh malzemeleri üstün balistik performans sağlamalıdır. Sonuç olarak bor karbür bazlı sistemler, mükemmel balistik performansın yanı sıra yüksek kırılma dayanıklılığına ulaşma potansiyeline sahiptir. Devam eden araştırmalar, sertliğin azalmasına neden olabilecek yüksek basınçlı darbeler altında malzemenin faz dönüşümlerini daha iyi anlamayı ve hafifletmeyi amaçlamaktadır [13,41,42].

Minoo Naebe ve arkadaşları polimer seramik B₄C katkılı kompozitleri, balistik darbe tepkilerini araştırmak için çeşitli kalibrelerdeki mermilere karşı tepkilerini araştırmışlardır [43]. Numuneler, B₄C ve cBN'nin çeşitli oranlarda ve ısıyla sertleşen fenolik veya epoksi reçine ve aramid hamuru ile kombinasyonlarla mekanik olarak karıştırılmasıyla hazırlandı. Daha sonra sıcak plaka presi kullanılarak kapalı bir kalıpta kuru karışımlar oluşturuldu. Nihai karolar daha sonra aramid arkalık malzemesi üzerine "çapraz yüzeyler" olarak yerleştirmek için epoksi yapıştırıcı ile kullanıldı. İlk kez, seramik parçacıkları ve polimer reçineden oluşan yeni bir kompozit malzeme, sıkıştırılabilir kalıplama yoluyla oluşturuldu ve bir zırh sistemi olarak test edildi. Önerilen hafif polimer B₄C kompozitler şekillendirilebilir ve olumlu çoklu vuruş kapasitesine sahip olduğu görüldü. Geliştirilen kompozit zırhın, daha fazla takviye

eklenmesine gerek kalmadan daha yüksek ağırlık ve daha büyük kalibreli mermi tehditlerine karşı ölçeklenebilir ve etkili olduğu kanıtlandı. Seramik kompozitlerin balistik performansı üzerindeki etkisini incelendiğinde cBN tabanlı zırhların balistik testleri, 784 m/s'lik bir hız artışı sağladığı görüldü. B₄C içeren polimer seramik kompozitler 702 m/s'lik bir hız artışı gösterdi. Bu, aynı artan hıza sahip olan eşdeğer Kevlar ~ 680 m/s hedefine göre marjinal bir gelişmedir [43].

Şekil 4'a, balistik çarpışma sonrasında B₄C/fenolik vuruş yüzünün X-ışını görüntüsünü sergilenmektedir. Gösterildiği gibi, mermi darbelerinin nispeten yakın mesafesi göz önüne alındığında, sınırlı radyal ve çevresel çatlama vardır. Karşılaştırma için, eşdeğer alan yoğunluğuna sahip monolitik sinterlenmiş B₄C karonun (Şekil 4b) bir X-ışını görüntüsü eklenmiştir; bu, özellikle merkezi üst darbe bölgesinde yoğun radyal çatlama ve ciddi çevresel çatlama gösterir. Polimer seramik zırhların, mermi çapının 2-3 katı hasara dayanma eğiliminde olduğunu ve zaman zaman çarpma bölgeleri arasında uzanan radyal çatlakların olduğunu fark edilmiştir. Zırh, geleneksel sinterlenmiş seramik malzemelerden çok daha fazla hasara dayanıklıdır ve bu, bu yeni polimer seramik malzemenin bir avantajıdır [43].



Sekil 4: (a) Sınırlı çevresel ve radyal çatlama gösteren B₄C bazlı polimer seramiğin (203 mm × 123 mm) ve (b) eşdeğer alan yoğunluğuna sahip monolitik sinterlenmiş B₄C karonun kapsamlı radyal ve çevresel çatlama gösteren boyutun X-ışını görüntüsü [43].

4.2 Nükleer Uygulamalar

Bor karbürün savunmada bir başka önemli uygulaması, mükemmel nötron absorpsiyon özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Termal nötronları soğurmada oldukça verimlidir ve bu da onu nükleer teknolojide, özellikle donanma gemilerindeki nükleer reaktörlerin kontrol çubuklarında paha biçilmez bir varlık haline getirir. Bor karbür içeren kompozit malzemeler, güçlü termal iletkenlikleri ve termal strese dayanma yetenekleri nedeniyle nükleer füzyon reaktörlerinde birinci duvar malzemesi olarak kullanılabilir. Malzemenin radyasyon kalkını özelliği, nükleer enerjiyle çalışan savunma

sistemlerinde personelin ve ekipmanın zararlı radyasyondan korunmasında da çok önemlidir. Bor karbürün nötron soğurma kapasitesindeki iyileştirmeler ve bu özellikten yararlanan kompozit malzemelerin geliştirilmesi, mevcut aktif araştırma alanlarıdır.

Düşük molar kütleleri nedeniyle, polimer matrisli kompozitler, nötron koruması için mevcut çeşitli seçenekler arasında endüstrinin ilgisini çekmiştir. Nötron koruma açısından bakıldığında, bu hidrojenli malzemeler aynı zamanda termal nötronları absorbe etme potansiyeline de sahiptir. Minimum büzülme, çoklu takviyelere güçlü yapışma, yüksek kimyasal ve ısı direnci, yüksek mekanik mukavemet ve gama ve nötron radyasyonuna karşı olağanüstü direnç gibi olağanüstü nitelikleri nedeniyle, epoksi reçineden yapılan kompozit bunlar arasında incelenmektedir.

Kiani ve arkadaşları, yüksek konsantrasyonda bor karbürde termal nötron koruma performansını test etmek için Epoksi/Kil/B₄C nanokompozitini hazırlamış ve karakterize etmişlerdir [44]. Ağırlıkça yüzde 3 montmorillonit nanokil içeren nanokompozitlerin termal nötron soğurma özellikleri üzerine deneysel araştırma yapıldı. Mekanik testler, daha yüksek B₄C konsantrasyonlarının, daha fazla çekme dayanımına sahip olduğunu, ancak söz konusu numunelerin tamamında Young modülünün daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Bor karbür parçacıklarının kullanılması, Epoksi/Kil nanokompozit numunelerine kıyasla numunelerin çekme mukavemetini azaltmıştır. Bu etki, B₄C dolgu maddesinin daha yüksek

konsantrasyonlarında daha ciddi hale gelir. Yani ağırlıkça %5 ve ağırlıkça %20 bor karbür içeren bir numunede çekme mukavemetinde sırasıyla yaklaşık %8 ve %28 oranında bir azalma gözlenmiştir. TGA analizine göre ise, B₄C içeren veya içermeyen nanokompozitler için T50%'nin sırasıyla 477 °C ve 439 °C olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak bu veriler, nötron soğurucu olarak B₄C'nin eklenmesinin epoksinin termal stabilitesinin arttığı anlamına geldiğini göstermektedir [44].

4.3 Havacılık Uygulamaları

Bor karbür, yüksek erime noktası ve termal kararlılığı nedeniyle havacılık uygulamalarında karşılaşılan yüksek sıcaklıklı ortamlarda kullanım alanı bulmaktadır. Bor karbürden yapılan malzemelerin aşırı sıcaklıklara dayanması, roket tahrik gibi sistemlerinin imalatında kullanılır [45,46].

Naslain ve arkadaşları havacılık uygulamaları için seramik matrisli kompozitlere B₄C içeren türler eklemiştir [45]. B-katkılı pirokarbon ve h-BN matrisleri şekillendirilmiş ve homojen veya çok katlı fiber kaplamalar olarak yük altında oluşan çatlaklara dayanıklılık için başarıyla kullanılmıştır. Kendi kendini onaran çok katlı bir matris, B katkılı pirokarbon katmanlarını ve B₂O₃ bazlı sıvı iyileştirme aşamalarını oluşturan B ve Si içeren organik (yani B₄C ve SiC) katmanlarını birleştirici bir kompozit model kullanılarak tasarlanmıştır. Tüm özellikler kimyasal buhar infiltrasyonu ile biriktirilmiştir. Sonuçta bu kompozitin yüksek çekme kapasitesine sahip olduğu rapor edilmiştir.

Reddy ve diğerleri havacılık uygulamalarında kullanılmak üzere bor karbür içeren kompozit malzemelerin geliştirilmesini araştırmışlardır [46].

Bu amaçla alüminyum alaşımıyla takviye edilmiş çeşitli silisyum karbür ve bor karbür bileşikleri elde ettiler. Yapılan testler sonucunda yüksek miktarda karbürün varlığı nedeniyle malzemenin daha yüksek çekme, eğilme mukavemetine ve sertliğine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca karbür ve alüminyum içeren numunenin daha fazla enerji emdiği görülmüştür.

4.4 Gelişen Uygulamalar

Bor karbürün savunma teknolojilerindeki geniş uygulama yelpazesi, malzemenin bu alandaki stratejik önemini vurgulamaktadır. Araştırma topluluğu, kritik savunma ve askeri uygulamalarda daha iyi performans elde etme umuduyla, özelliklerinden yararlanmanın yeni yollarını keşfetmeye devam ediyor. Bu karmaşık malzeme hakkındaki anlayışımız derinleştikçe, uygulamaları genişlemeye devam edecek ve bor karbürde sürekli araştırma yapılması gerekliliğinin altını çizecektir.

Düşük gözlemlenebilir teknoloji olarak da bilinen stealth (gizlilik) teknolojisi, askeri kişilerin, uçakların, gemilerin, denizaltıların, füzelerin, uyduların ve kara araçlarının radar, kızılötesi, sonar ve diğer tespit teknolojilerine görünürlüğünü azaltmak için tasarlanmış bir askeri teknoloji tekniğidir. Bor karbür doğrudan stealth teknolojisi ile ilgili olmasa da belirli stealth uygulamalarında benzersiz özellikleri nedeniyle rol oynayabilir. Bor karbürün yüksek

sertliği ve aşınmaya karşı dirençli olması, bir uçağın veya aracın yüzeyinin stealth yeteneklerini korumak için zorlu çevresel koşullara dayanmasında faydalı olabilir. Bazı stealth teknolojileri, radyo dalgalarının yansımalarını azaltmaya yönelik kaplamalar veya malzemeler içerir. Bor karbür, nispeten düşük bir kırılma indisine sahip olduğu için belirli uygulamalarda bu eşleşmeyi sağlamak için kullanılabilir, bu da radar dalgalarının yansımalarını azaltabilir. Bor karbür, stealth araçlarının üretiminde yapısal bileşenlerin üretilmesinde kullanılabilir. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, hafif ancak güçlü yapıların oluşturulmasında faydalıdır ve bu, stealth platformlarının genel performansını korumak için önemlidir [47].

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sonuç olarak, bor karbür savunma ve askeri uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. En çok vücut zırhlarında ve son derece güçlü ve dayanıklı olması gereken tank ve helikopter gibi askeri araçların imalatında kullanılır. Bu özelliklerinden dolayı bor karbür, bir ülkenin askeri gücünün ve savunma sektörünün geliştirilmesinde vazgeçilmez bir kimyasal bileşendir.

Ayrıca, borun savunma ve askeri uygulamadaki tam potansiyeli henüz kullanılmamıştır. Devam eden araştırma ve yenilikler, askeri teknolojiye dönüştürebilecek yeni uygulamaların geliştirilmesi için çok önemlidir. Bor ile ilgili araştırmalara yatırım yapan ülkelerin savunma yeteneklerinde önemli ilerlemeler yaşaması muhtemeldir. Bu da borun modern savunma alanındaki önemini teyit eder.

Bor karbürün yukarıda belirtilen avantajları olmasına rağmen balistik uygulamalarda iki dezavantajı vardır. Metallerde ve hatta silisyum karbürde görülen yerel plastik deformasyon süreçlerinden yoksundur, bu da onu çok kırılğan hale getirir. İkincisi, bor karbürün lokalize katı hal amorfizasyonu, yüksek hızlı çarpmaların ardından meydana gelir ve buna parçalanmada dikkate değer bir artış eşlik eder.

Bor karbür hakkındaki bilimsel literatür çok geniştir ve karmaşık atomik yapısını anlamaktan, yüksek basınçlı darbeler altında faz dönüşümünü incelemeye, kırılma tokluğunu arttırmaya ve zırhtan nükleer reaktörlere ve yarı iletkenlere kadar sayısız uygulamasını keşfetmeye kadar çok çeşitli konuları kapsar. Sentez yöntemlerindeki daha fazla araştırma ve yenilik, bu çok yönlü seramik malzeme için yeni olanaklar yaratmaya devam eder. Son olarak bor karbürün elektronik endüstrisinde ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımı önümüzdeki yıllarda hızlı bir büyüme gösterecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT)

Gülbahar BİLGİÇ: Kavramsal tasarım, Araştırma, Metodoloji, Yazma – Taslak, Görselleştirme, Gözden geçirme ve Düzenleme.

Ayşegül BALIKÇIOĞLU: Kavramsal tasarım, Araştırma, Yazma – Taslak, Görselleştirme.

Mükerrem ŞAHİN: Araştırma, Denetim, Onaylama, Görselleştirme, Yazma.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] K. A. Schwetz and W. Grellner, "The influence of carbon on the microstructure and mechanical properties of sintered boron carbide," *Journal of The Less-Common Metals*, vol. 82, no. C, 1981, doi: 10.1016/0022-5088(81)90195-8.
- [2] A. Sokhansanj and A. M. Hadian, "Purification of Attrition Milled Nano-size Boron Carbide Powder," *Int J Mod Phys Conf Ser*, vol. 05, 2012, doi: 10.1142/s2010194512001894.
- [3] L. Chkhartishvili *et al.*, "Advanced Boron Carbide Matrix Nanocomposites Obtained from Liquid-Charge: Focused Review," *Condensed Matter*, vol. 8, no. 2, 2023. doi: 10.3390/condmat8020037.
- [4] Shoulders, W. T., Guziewski, M., & Swab, J. J. (2023). Microstructural and thermal stress effects on mechanical properties of boron carbide particle-reinforced silicon carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(2), 1249–1261. doi:10.1111/jace.19535
- [5] Stone, M. B., Kolesnikov, A. I., Fanelli, V. R., May, A. F., Bai, S., & Liu, J. (2024). Characterization of aluminum and boron carbide based additive manufactured material for thermal neutron shielding. *Materials & Design*, 237, 112463. doi:10.1016/j.matdes.2023.112463
- [6] A. K. Suri, C. Subramanian, J. K. Sonber, and T. S. R. Ch Murthy, "Synthesis and consolidation of boron carbide: A review," *International Materials Reviews*, vol. 55, no. 1, 2010. doi: 10.1179/095066009X12506721665211.
- [7] F. Thévenot, "Boron carbide-A comprehensive review," *J Eur Ceram Soc*, vol. 6, no. 4, 1990, doi: 10.1016/0955-2219(90)90048-K.
- [8] V. Domnich, S. Reynaud, R. A. Haber, and M. Chhowalla, "Boron carbide: Structure, properties, and stability under stress," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 94, no. 11, 2011, doi: 10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x.
- [9] M. M. Balakrishnarajan, P. D. Pancharatna, and R. Hoffmann, "Structure and bonding in boron carbide: The invincibility of imperfections," *New Journal of Chemistry*, vol. 31, no. 4, 2007, doi: 10.1039/b618493f.
- [10] T. Aselage and D. Emin, "Boron Carbides," in *CRC Handbook of Thermoelectrics*, 1995. doi: 10.1201/9781420049718.ch31.
- [11] R. R. Ridgway, "Boron Carbide: A New Crystalline Abrasive and Wear-Resisting Product," *Transactions of The Electrochemical Society*, vol. 66, no. 1, 1934.
- [12] H. Werheit, "Boron-rich solids: A chance for high-efficiency high-temperature thermoelectric energy conversion," *Materials Science and Engineering B*, vol. 29, no. 1–3, 1995, doi: 10.1016/0921-5107(94)04023-W.
- [13] A. Chauhan, M. C. Schaefer, R. A. Haber, and K. J. Hemker, "Experimental observations of amorphization in stoichiometric and boron-rich boron carbide," *Acta Mater*, vol. 181, 2019, doi: 10.1016/j.actamat.2019.09.052.
- [14] I. G. Crouch, G. V Franks, C. Tallon, S. Thomas, and M. Naebe, "7 - Glasses and ceramics BT - The Science of Armour Materials," in *Woodhead Publishing in Materials*, 2017.
- [15] G. Amulele, M. H. Manghnani, H. Werheit, A. W. Lanati, and S. M. Clark, "Electrical conductivity of B~4.3C boron carbide up to 9 GPa and 1273 K," *Solid State Sci*, vol. 140, 2023, doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2023.107185.
- [16] W. M. Haynes and M. L. Williams, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 2016. doi: 10.1201/9781315380476.
- [17] R. R. Ridgway, "Boron Carbide: A New Crystalline Abrasive and Wear-Resisting

Product,” *Transactions of The Electrochemical Society*, vol. 66, no. 1, 1934.

[18] Gokmese, H., & Bostan, B. (2016). Fabrication and characterization of nanoparticle MgO/B₄C composite by Mechanochemical Method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(4), 684–694. doi:10.1177/0954408916629106

[19] Gokmese, H., Bostan, B., & Baris, M. (2016). Fabrication and characterization of nanoceramic particle Al₂O₃/B₄C composite by Mechanochemical Approach. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 47(3), 416–422. doi:10.1080/15533174.2016.1186075

[20] Pekdemir, A. D. (2018) “Borik Asit Ve Poliollerden Düşük Sıcaklıkta Bor Karbür Tozlarının Hazırlanması Ve Karakterizasyonu”. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi

[21] F. S. Bayraktar, R. Köse, and M. Şahin, “Bor Bileşiklerinin Solar Tuzun Termo-Fiziksel Özelliklerine Etkileri,” *Savunma Bilimleri Dergisi*, no. 39, 2021, doi: 10.17134/khosbd.913808.

[22] A. W. Weimer, W. G. Moore, R. P. Roach, J. E. Hitt, R. S. Dixit, and S. E. Pratsinis, “Kinetics of Carbothermal Reduction Synthesis of Boron Carbide,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 75, no. 9, 1992, doi: 10.1111/j.1151-2916.1992.tb05604.x.

[23] G. E. Garry, “Process for the production of boron carbide.,” 2,834,651, 1958

[24] T. A. Zhang, Z. H. Dou, H. Yang, and Q. L. Ding, “Preparation of boron carbide by magnesium reducing-SHS,” *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, vol. 24, no. 10, 2003.

[25] A. K. Khanra and M. M. Godkhindi, “Synthesis of boron carbide by self-propagating high temperature synthesis,” *Journal of the Australasian Ceramic Society*, vol. 41, no. 1, pp. 30–35, 2005.

[26] K. Yamada, “Boron carbide particles formed from an amorphous boron/graphite powder mixture using a shock-wave technique,” *Journal of the American Ceramic*

Society, vol. 79, no. 4, 1996, doi: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb08557.x.

[27] J. Wei, B. Jiang, Y. Li, C. Xu, D. Wu, and B. Wei, “Straight boron carbide nanorods prepared from carbon nanotubes,” *J Mater Chem*, vol. 12, no. 10, 2002, doi: 10.1039/b204792f.

[28] E. M. Heian, S. K. Khalsa, J. W. Lee, Z. A. Munir, T. Yamamoto, and M. Ohyanagi, “Synthesis of dense, high-defect-concentration B₄C through mechanical activation and field-assisted combustion,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 87, no. 5, 2004, doi: 10.1111/j.1551-2916.2004.00779.x.

[29] R. G. Bourdeau, “Process of preparing boron carbide from boron halide and a hydrocarbon,” 3,334,967, 1967

[30] G. L. Harris and S. P. Donald, “Method of producing boron carbide from water alcohol solution of carbon source,” 3,885,022, 1975

[31] S. Mondal and A. K. Banthia, “Low-temperature synthetic route for boron carbide,” *J Eur Ceram Soc*, vol. 25, no. 2-3 SPEC. ISS., 2005, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.08.011.

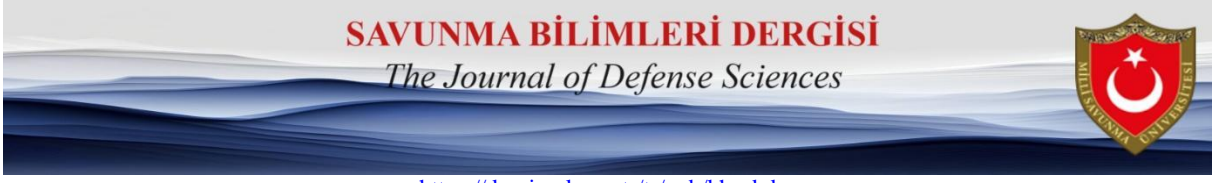
[32] A. Sinha, T. Mahata, and B. P. Sharma, “Carbothermal route for preparation of boron carbide powder from boric acid-citric acid gel precursor,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 301, no. 2–3, 2002, doi: 10.1016/S0022-3115(02)00704-3.

[33] L. Shi, Y. Gu, L. Chen, Y. Qian, Z. Yang, and J. Ma, “A low temperature synthesis of crystalline B₄C ultrafine powders,” *Solid State Commun*, vol. 128, no. 1, 2003, doi: 10.1016/S0038-1098(03)00627-6.

[34] Y. Gu, L. Chen, Y. Qian, W. Zhang, and J. Ma, “Synthesis of nanocrystalline boron carbide via a solvothermal reduction of CCl₄ in the presence of amorphous boron powder,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 88, no. 1, 2005, doi: 10.1111/j.1551-2916.2004.00023.x.

[35] M. Carlsson, F. J. García-García, and M. Johnsson, “Synthesis and characterisation of boron carbide whiskers and thin elongated platelets,” *J Cryst Growth*, vol. 236, no. 1–3, 2002, doi: 10.1016/S0022-0248(01)02272-2.

- [36] P. H. P. M. da Silveira, T. T. da Silva, M. P. Ribeiro, P. R. Rodrigues de Jesus, P. C. R. dos S. Credmann, and A. V. Gomes, "A Brief Review of Alumina, Silicon Carbide and Boron Carbide Ceramic Materials for Ballistic Applications," *Academia Letters*, 2021, doi: 10.20935/al3742.
- [37] E. Medvedovski, "Silicon carbide-based ceramics for ballistic protection," in *Ceramic Transactions*, 2003. doi: 10.1002/9781118406793.ch2.
- [38] P. G. Karandikar, G. Evans, S. Wong, M. K. Aghajanian, and M. Sennett, "A Review of Ceramics for Armor Applications," 2009. doi: 10.1002/9780470456286.ch16.
- [39] L. Vargas-Gonzalez, R. F. Speyer, and J. Campbell, "Flexural strength, fracture toughness, and hardness of silicon carbide and boron carbide armor ceramics," *Int J Appl Ceram Technol*, vol. 7, no. 5, 2010, doi: 10.1111/j.1744-7402.2010.02501.x.
- [40] K. Dasgupta, "Role of carbon nanotubes in the ballistic properties of boron carbide/carbon nanotube/ultrahigh molecular weight polyethylene composite armor," *Ceram Int*, vol. 46, no. 4, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.10.129.
- [41] G. Fanchini, J. W. McCauley, and M. Chhowalla, "Behavior of disordered boron carbide under stress," *Phys Rev Lett*, vol. 97, no. 3, 2006, doi: 10.1103/PhysRevLett.97.035502.
- [42] L. Farbaniec, J. D. Hogan, K. Y. Xie, M. Shaeffer, K. J. Hemker, and K. T. Ramesh, "Damage evolution of hot-pressed boron carbide under confined dynamic compression," *Int J Impact Eng*, vol. 99, 2017, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.09.008.
- [43] M. Naebe, J. Sandlin, I. Crouch, and B. Fox, "Novel polymer-ceramic composites for protection against ballistic fragments," *Polym Compos*, vol. 34, no. 2, 2013, doi: 10.1002/pc.22397.
- [44] M. A. Kiani, S. J. Ahmadi, M. Outokesh, R. Adeli, and A. Mohammadi, "Preparation and characteristics of epoxy/clay/B₄C nanocomposite at high concentration of boron carbide for neutron shielding application," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 141, 2017, doi: 10.1016/j.radphyschem.2017.07.013.
- [45] R. Naslain, A. Guette, F. Rebillat, R. Pailler, F. Langlais, and X. Bourrat, "Boron-bearing species in ceramic matrix composites for long-term aerospace applications," in *Journal of Solid State Chemistry*, 2004. doi: 10.1016/j.jssc.2003.03.005.
- [46] P. S. Reddy, R. Kesavan, and B. Vijaya Ramnath, "Investigation of Mechanical Properties of Aluminium 6061-Silicon Carbide, Boron Carbide Metal Matrix Composite," *Silicon*, vol. 10, no. 2, 2018, doi: 10.1007/s12633-016-9479-8.
- [47] Y. Wu, S. Tan, Y. Zhao, L. Liang, M. Zhou, and G. Ji, "Broadband multispectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application," *Progress in Materials Science*, vol. 135, 2023. doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101088.



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Autonomous Steerable Ram-Air Type Load Parachute System Design and Alternative Trajectory Algorithm

Otonom Yönlenebilen Kanat Tipi Yük Paraşüt Sistemi Tasarımı ve Alternatif Güzergâh Algoritması

Burak CİVELEK^{1*}, Sinan KIVRAK²

¹Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Sivas, Türkiye

²Ostim Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi

Başvuru: 17.11.2023

Düzeltilme: 02.01.2024

Kabul: 03.01.2024

Keywords

Airdrop

GPS-Guided System

Trajectory Planning

Air supply

Anahtar Kelimeler

Havadan Atma

GPS Güdümlü Sistem

Güzergâh Planlama

Havadan İkmal

Abstract

In areas that cannot be reached by land or sea, the necessary supplies can be delivered by parachute from the air. Airdrop is a commonly used replenishment method in both humanitarian aid operations and military operations. The most important limitations of airdrop replenishment are that the cargo may be affected by the wind and fall into undesirable areas and that the aircraft is vulnerable to enemy air defense systems. GPS-guided, steerable parachutes can be used for high-altitude, long-distance airdrop by protecting the aircraft from enemy air defense weapons and preventing the payload from being blown away by the wind or into the hands of undesirable persons. In this study, the design of the system required by the Turkish Armed Forces is made, the command and control unit is created and the trajectory tracking algorithm is presented.

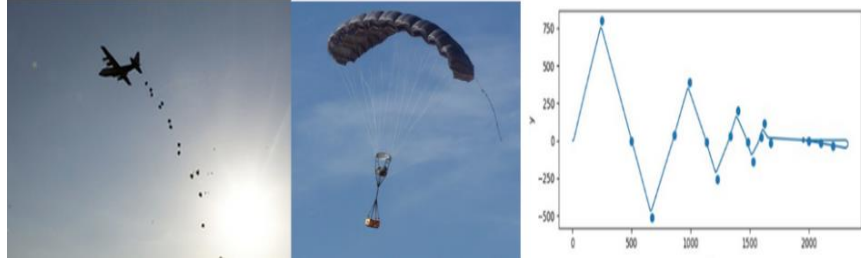
Özet

Kara ya da deniz yoluyla ulaşılamayan bölgelere ihtiyaç duyulan malzemeler paraşütle havadan ikmal edilerek ulaştırılabilir. Havadan ikmal hem insani yardım operasyonlarında hem de askeri operasyonlarda yaygın olarak kullanılan bir ikmal yöntemidir. Havadan ikmalin en önemli sınırlamaları, faydalı yükün rüzgârdan etkilenerek istenmeyen bölgelere düşebilmesi ve uçağın düşman hava savunma sistemlerine karşı savunmasız olmasıdır. GPS (Global Positioning System) güdümlü yönlendirilebilir paraşütler, hava aracını düşman hava savunma silahlarından koruyabilir ve faydalı yükün rüzgâr sürüklenmesiyle hedeflenen bölge dışına düşmesini veya istenmeyen kişilerin eline geçmesini önleyerek yüksek irtifadan ve yatayda uzak mesafelerden malzeme ikmali yapılabilmesi için kullanılabilir. Bu çalışmada, Türk Silahlı Kuvvetleri'nin ihtiyaç duyduğu hassas güdümlü paraşüt sisteminin yönlendirme ünitesinin tasarımı yapılmış, komuta kontrol birimi oluşturulmuş ve güzergâh takip algoritması sunulmuştur.

Önemli Noktalar / Highlights

Otonom yönlenebilen kanat tipi paraşüt sistemleri bir çeşit insansız hava aracıdır. Bu çalışmada paraşüt sisteminin istenilen hedef koordinat gidebilmesi için ihtiyaç duyduğu güzergâh algoritmaları ortaya konmuş ve özgün bir tasarım yapılmıştır.

Grafik Özet / Graphical Abstract



*Corresponding author, e-mail: 200101010@sivas.edu.tr

1. INTRODUCTION

There are many military applications related to the delivery of the payload to the target area using steerable parachutes. Sherpa, Screamer, Spades, MicroFly are some of them [1]. In general, the system consists of three main parts. These are the parachute, the control unit and the payload [2]. Ram-air parachute wings are used in the steerable load parachute [3]. This dome consists of two layers. Fabric with low air permeability is used in this bottom and top layer. Between the two layers there are cells that control the air flow. The air that enters from the cell side cannot exit from the back and is trapped in these cells. In this way, the wing becomes robust and exhibits a balanced behavior [4]. These wings are guided by two brake lines. The parachute can be rotated in the desired direction by controlling the parachute control lines with motors. In these systems, the parachute guidance system is placed between the main carrier parachute and the load [5]. After the load leaves the aircraft, the main parachute is opened at the desired altitude and the guidance is performed after the dome is completely filled with air. The dome has two steering rope groups. These rope groups merge as they move away from the dome and become a single rope. The guidance ropes are connected to two separate pulleys inside the guidance system. In order to reach the target coordinates entered into the system before the mission, two motors drive the pulleys to which the guidance ropes are connected and progress to the target coordinates is ensured. The air-opened image of the system is shown in Figure 1.

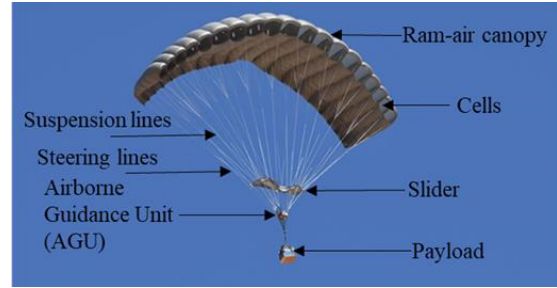


Figure 1: The air-opened image of the system.

In the literature, trajectory planning is generally based on multi-phase algorithms that plan the route by dividing into certain parts [3,6,7]. However, there are also studies that evaluate the trajectory as a single phase.

Guo et al. presented a five-phase trajectory algorithm in their study. These phases are the homing phase, the descent circle phase, the acquisition phase, the EMC (Energy Management Circle) phase, the final phase. Compared to other multi-phase studies, they reduced the turns made in the descent phase and made it suitable for high altitude drops [8].

In the study conducted by Guo et al. et al. a multiphase approach algorithm was designed for use in high altitude launches. The first two phases of the five phases were used for energy management at high altitude and the other two phases were used for energy management at low altitude [9].

Linggong et al. proposed in their study to follow the trajectory in real time without dividing it into phases and to stay on the route by controlling it with control algorithms [10].

Yi et al. preferred to follow a single-phase route supported by artificial intelligence algorithms in their study. As a result of the simulation, it was

shown that the parachute landed at the desired target coordinate with a precision of 12 meters or less, which reacts quickly to changing weather conditions [11].

In their study, Hao et al. determined a single-phase trajectory and reached the target by controlling this route with control algorithms [12].

In the powered parachute trajectory determination study by Qinglin et al. a single phase straight route was determined and it was aimed to stay on this trajectory with the control algorithm. A command and control unit was designed to test the system in a real drop and an electronic card based solely on GPS data was presented [13].

Although a single-phase trajectory was determined in the study on powered parachute systems by Yuhui et al, a reference point tracking strategy was proposed [14].

2. DESIGN OF THE COMMAND AND CONTROL UNIT

In the examination of the existing systems on the internet and on the real product, it was seen that all of them have a rectangular box-shaped outer casing and the guidance rollers are in the front part of the box and side by side [15]. In this study, since it was evaluated that the side-by-side position of the guidance rollers posed a risk of entanglement during the opening of the parachute, they were separated from each other as in the personnel harness and placed on the right and left parts of the system. Since the same parachutes used in personnel jumps will be used, the distance between the guidance rollers was ensured to be the length of the

shoulder span of average personnel. Since it is considered that there may be unnecessary space gaps if the design of the outer casing of the device is rectangular, the outer design of the device is designed as a plus shape. In this study, guidelines were made on the reels designed and it was ensured that the routing ropes travelled on these guidelines. On the left and right outside where the reels are located, two different lashing bars were placed connected to each other so that the parachute and the load could be connected at the same time. The lashing bars are not directly attached to the main body, but are attached to a single ground together. In this way, it is aimed to absorb the shock during the opening of the parachute by means of liaison bars without getting on the body of the device.

The design of the command and control device was made with Solidworks [16] drawing program, the outer casing and connection apparatus were made of aluminum metal by molding process, and some internal assembly apparatus were printed with 3D printer. Solidworks drawings of the designed guide unit is shown in Figure 2, the manufactured version of the unit is shown in Figure 3.

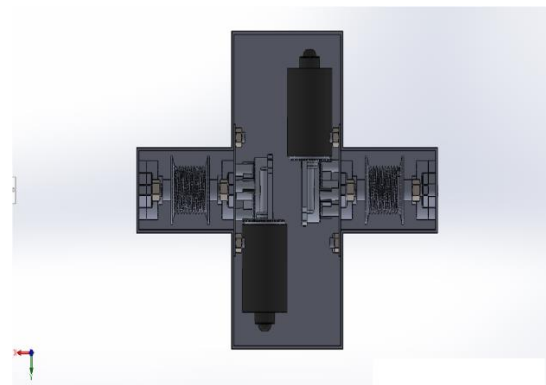


Figure 2: Solidworks drawings of the designed guide unit.

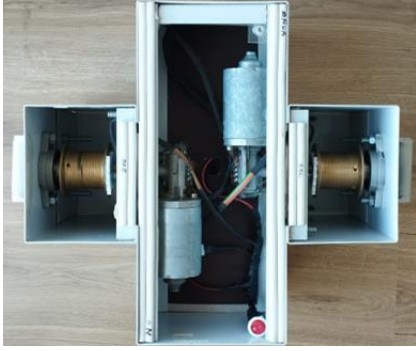


Figure 3: The manufactured version of the unit.

3. HARDWARE AND COMMAND CONTROL BOARD

The reels controlling the ropes are driven by two independent motors. The motors are 24 Volt and 55 RPM (Revolutions Per Minute). Idle operating current is 1 Ampere and forcing current is maximum 7 Ampere. Nominal load torque is 25 kg/cm. In the study, a high torque motor was preferred since the behavior of the motor was not known in advance. As a result of the studies, 12 Volt motors can be evaluated. 12 V 6 A dry batteries were selected as the power source. The system, which works with at least two series-connected dry batteries, has an area where ten batteries can be placed. In the future, the use of lithium-ion batteries, which have a longer life and can be charged faster and are lighter, can be considered.

Each motor is driven separately by IBT-2 BTS7960B motor driver. The ESP 32 module was preferred because it has an embedded Wi-Fi (Wireless Fidelity) module as a processor, has a sufficient number of legs for the system, can perform float point operation (ability to operate with decimal numbers) and has a processing speed of 160 mhz. 9-axis BNO-055 precision accelerometer-gyroscope-magnetic sensor, NEO-7M GPS sensor for position

determination, MS5803-01BA altimeter sensor as height sensor, DS3231 real-time clock sensor, micro SD card adapter, current meter and two KY040 rotary encoders were used. A 24C32 eeprom (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) module was used to prevent the SD card from being damaged by frequently written data such as encoder position. The processor communicated with the GPS sensor via UART protocol, accelerometer, height sensor, clock, SD card and eeprom module via I2C protocol. The front and back side of the command control board is shown in Figure 4.



Figure 4: The Command control board.

Stable reading of sensor data is very important for trajectory tracking [17]. In this study, a Kalman filter is applied to the sensor data [18]. It has been applied to many fields such as in autonomous systems [19] and control system [20]. Using the gyroscope and accelerometer data of the BNO055 sensor used in the command control card, the required Q and R

values for the Kalman filter were obtained in the environment created.

While the accelerometer sensor data produces a lot of noise against noise and sudden changes, it behaves stable in long-term measurements. While the instantaneous responses of the gyroscope sensor data are low, in the long term, deviations occur and filtering is needed since the data is processed by taking the integral of the data over time. In the created environment, the instantaneous data value read from the gyroscope was considered to be absolutely accurate and compared with the accelerometer data. A 2D adaptive grid search [21] technique was used to obtain the most appropriate Q and R values based on the standard deviation of the errors. In this way, the Q and R values with the lowest standard deviation were obtained. These optimum values were used for filtering the gyro data to ensure a smooth and long-term data flow.

The 2D adaptive grid search technique is a method used in optimization and mathematical modelling to find optimum solutions in a two-dimensional search space. The main objective of this technique is to perform the search in the regions where the probability of finding a solution with a favorable value is high, rather than exhaustively scanning the entire search space [22]. The mathematical representation of the method is as follows.

Firstly, the parameter space is defined.

$$Q \in [1,0] \quad (1)$$

$$R \in [1,0] \quad (2)$$

$$\Omega = \{(q, r) \mid q \in Q, r \in R\} \quad (3)$$

Then, certain points were selected by Adaptive grid search method. Kalman filter was applied using these points and values. The filtered data was compared with the actual value and estimated errors were obtained. The standard deviation of these errors was calculated as follows.

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e_{ij,k} - \hat{e}_{ij})^2} \quad (4)$$

Where N is the number of measurements, $e_{ij,k}$ is the prediction error at the k measurement for the parameters q_i and r_j , and \hat{e}_{ij} is the mean error for these parameters.

The values that minimize the standard deviation are then found.

$$(q^*, r^*) = \text{arc min}_{(q,r)} \epsilon_{\Omega} \sigma_{ij} \quad (5)$$

These (q^*, r^*) values represent the best-fit parameters with the lowest standard deviation of the estimation errors. As a result, Q value was determined as 0.0019 and R value as 0.6.

4. TRAJECTORY PLANNING ALGORITHM

Various route models have been used in the literature for the autonomous arrival of commanded cargo parachutes. There are two principles that should be taken into account when planning a route. One of these principles is to take the shortest route to the target and the other is to avoid sharp turns. This type of planning was first realised by Dublins in 1957 [23]. This method, known as the Dublins route, basically consists of a 4-stage plan (start, loiter, approach and flare) [24]. Another approach method is the "T Approach" method. It is so named because it proceeds by drawing a "T"

shaped landing pattern [25]. In another study, lower cost command and control methods were studied. It is a method that proceeds based on GPS data and reaches the target by speed planning [26,27].

In route planning, a multi-phase algorithm was adopted as in other examples. However, two different approach algorithms and a route algorithm consisting of five phases in total were used. These phases are Start, Approach, Descent, Landing and Emergency phases. Two different routes were designed as straight and zigzag trajectory algorithms. In the straight approach algorithm, ten control points are established between the start point and the target. The closest control point is determined as the target and it is ensured that these control points are passed first. Thus, the principle of travelling the shortest way by making wind correction at lower angles and the principle of avoiding sharp turns are complied with. When the checkpoint is reached, altitude control is performed and if altitude reduction is required, altitude descending maneuvers are performed and the descent procedure is initiated according to the wind direction.

The Arriving Phase Direct Mode is shown in Algorithm 1. The Arriving Phase Zigzag Mode is shown in Algorithm 2. The Descending Phase is shown in Algorithm 3. The Landing Phase is shown in Algorithm 4. P_x, P_y, P_z corresponds to x, y, z coordinates of P.

Algorithm 1: Arriving Phase Direct Mode

Data: P, T, CP = control points count, τ = Convergence threshold, Ψ = Heading angle of parachute

$$\Delta_x = (T_x - P_x)/CP; \quad (6)$$

$$\Delta_y = (T_y - P_y)/CP; \quad (7)$$

$$(CP_x^i, CP_y^i) = (P_x + i\Delta_x, P_y + i\Delta_y) \quad \forall_i \in [0, CP]; \quad (8)$$

```

for  $i \leftarrow 0$  to  $CP$  do
    while  $\text{dist}(CP^i, P) > \tau$  do
        if  $\text{angle}(CP^i, P) > \Psi$  then
            Update heading angle
        end
    end
end
Call Alg.(4)

```

Algorithm 2: Arriving Phase Zigzag Mod

Data: P, L = Landing minimum altitude, $D =$ Target maximum distance threshold

while $\text{dist}(P, T) > \tau$ **do**

Do checks;

Calculate target point;

$$\theta_p = \text{angle}(P, T); \quad (9)$$

$$\Delta_p = \text{dist} \frac{(P, T)}{4}; \quad (10)$$

$$\Delta_f = (P_z - M_a) * G_r * \frac{1,25}{4} \quad (11)$$

$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{\Delta_p}{\Delta_f} \right); \quad (12)$$

$$(T_x^1, T_y^1) = \left(P_x + \frac{\Delta_f}{2 \cos(\theta_c)}, \right. \quad (13)$$

$$\left. P_y + \frac{\Delta_f}{2 \sin(\theta_c)} \right);$$

$$(T_x^2, T_y^2) = \left(P_x + \frac{\Delta_p}{2 \cos(\theta_p)}, \right. \quad (14)$$

$$\left. P_y + \frac{\Delta_p}{2 \sin(\theta_p)} \right);$$

```

while  $\text{dist}(P, T^1) > \tau$  do
    Update heading angle;

```

```

    end
    while dist(P, T2) > τ do
        Update heading angle;
    end
end
end

```

Algorithm 3: Descending Phase

Data: P, L = Landing minimum altitude, D = Target maximum distance threshold

```

while Pz > L do
    if dist(P, T) > D then
        Call Alg.(1)
    end
end
end

```

Algorithm 4: Landing Phase

Data: P, E_s = Parafoil estimated speed
 $F_s = E_s + W_s$; (15)

$B_s = E_s - W_s$; (16)

$R_{mt} = P_z / v_z$; (17)

$\Delta_r = (T - P) \cos \theta_p$ (18)

$R_{st} = \frac{\Delta_r}{F_s}$ (19)

$B_d = \frac{(R_{mt} - R_{st}) F_s B_s}{F_s + B_s}$ (20)

$U_r = T - C_{yl}(B_d + A_c - W)$ (21)

5. SIMULATION RESULTS

The starting point is defined as 0,0 coordinate and the target is defined as 0,2000 coordinate. It is planned to descend from 3000 feet altitude to the target at 0 feet. It was assumed that the main parachute opened as soon as the system left the aircraft and the drop coordinate was taken as the start coordinate. Figure 5 shows the path followed in a windless environment. As

can be seen, the system successfully passed ten control points between the starting point and the target point during the approach phase. When the target point was over the target point, the altitude of 2500 ft was reduced to 500 ft with the descent phase, and when the landing conditions occurred, it followed the control points formed according to the direction of the wind and landed.

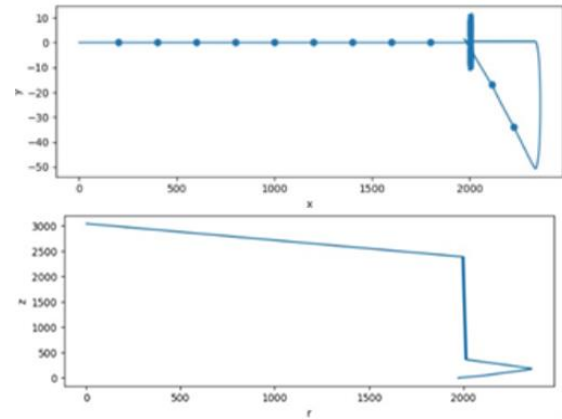


Figure 5: Simulation results of straight trajectory algorithm.

The starting point is defined as 0,0 coordinate and the target is defined as 0,2000 coordinate. It is planned to descend from 3000 feet altitude to the target at 0 feet. It was assumed that the main parachute opened as soon as the system left the aircraft and the drop coordinate was taken as the start coordinate. Figure 6 shows the path followed in a windless environment. As can be seen, the control points were passed with gradually narrowing maneuvers and the altitude of 750 ft was reduced to 500 ft with the descent phase when the target was over the target, as in the straight approach algorithm, and when the landing conditions occurred, it followed the control points formed according to the wind direction and provided landing.

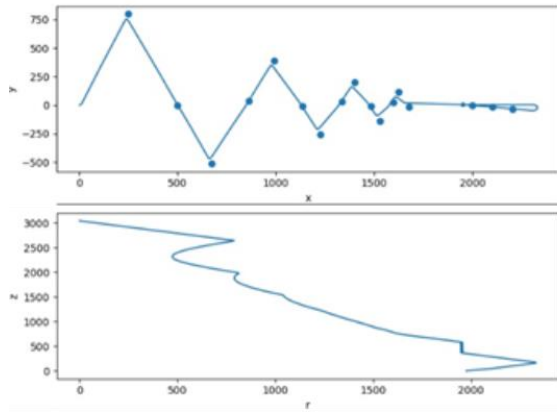


Figure 6: Simulation results of zigzag trajectory algorithm.

6. CONCLUSIONS

With the increasing use of replenishment via airdrop in the battlefield and humanitarian aid activities and the widespread use of steerable parachutes in this field, it is obvious that route planning models will make more precise calculations. The study is considered to be suitable for both the cases of deployment of the main parachute as soon as the system leaves the aircraft or deployment of the main parachute after the free fall with the stabilization parachute up to the desired altitude. After the deployment point of the main parachute, the required approach algorithm is selected with the calculations made and the route created is updated according to the developing situations and the system can change the approach algorithm if necessary. It is evaluated that the presented algorithms are within the limits of the weather conditions required for aerial resupply and are sufficient to land the system at the desired target coordinate by calculating the appropriate load release point by obtaining the altitude winds accurately.

ACKNOWLEDGMENTS

This research received no external funding

AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

Burak CİVELEK: Conceptual design, Data curation, Experimental studies, Writing

Sinan KIVRAK: Methodology, Audit, Approval, Review and Regulation

CONFLICTS OF INTEREST

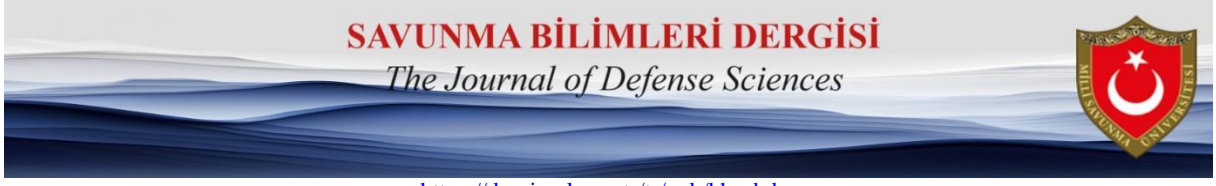
The authors declare that they have no conflict of interest.

REFERENCES

- [1] R. Benney, A. Meloni, A. Cronk ve R. Tiaden, "Precision Airdrop Technology Conference", U.S. Army Natick Soldier Research, Development and Engineering Center, Massachusetts, 2007.
- [2] M. R. Cacan, E. Scheuermann, M. Ward, M. Costello ve N. Slegers, "Autonomous Airdrop Systems Employing Ground Wind Measurements for Improved Landing Accuracy", *EEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pp. vol. 20, no. 6, pp. 3060-3070, 2015.
- [3] I. Kaminer ve O. A. Yakimenko, "On the development of GNC algorithm for a high-glide payload delivery system", *IEEE Conference on Decision and Control*, 2004.
- [4] E. Puskas, "Ram air parachute design considerations and applications", *Engineering, Materials Science*, 1984.
- [5] P. Carrabba, "The Right Place At The Right Time- An Analysis of High Altitude Airdrop and The Joint Precision Airdrop System", *Air Force Institute Of Technology*, 2005.

- [6] T. Jin, S. Qinglin, T. Panlong, C. Zengqiang ve H. Yingping, "Active disturbance rejection control (ADRC)-based autonomous homing control of powered parafoils", *Nonlinear Dyn.*, vol. 86, no. 3, pp. 1461-1476, 2016.
- [7] T. Jann, "Advanced Features for Autonomous Parafoil Guidance, navigation and Control", 18th AIAA Aerodynamic decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2005.
- [8] Y. Guo, J. Yan, Y. Luo, L. Fenghao ve X. Xing, "Optimization in Multiphase Homing Trajectory of Unpowered Parafoil with High-altitude", *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Athens, Greece., 2020.
- [9] Y. Guo, . Y. Jianguo, W. Cihang, . C. Mengping ve . X. Xiaojun, "Autonomous Homing Design and Following for Parafoil/Rocket System with High-altitude", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, pp. 2-15, 2021.
- [10] Z. Linggong, H. Weiliang, L. Feikai ve X. Wang, "Trajectory Tracking Control for Parafoil Systems Based on the Model-Free Adaptive Control Method", *IEEE Access*, pp. 152620-152636, 2020.
- [11] W. Yi, Y. Chunxin ve Y. Han, "Neural network-based simulation and prediction of precise airdrop trajectory planning", *Aerospace Science and Technology Volume 120*, p. 107302, 2022.
- [12] S. Hao, S. Qinglin, S. Mingwei, T. Jin ve C. Zengqiang, "Accurate Modeling and Homing Control for Parafoil Delivery System Based on Wind Disturbance Rejection", *IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems* vol. 58, no. 4, pp. 2916-2934, 2022.
- [13] S. Qinglin, Y. Li, Z. Yuemin, T. Jin ve C. Zengqiang, "Trajectory tracking control of powered parafoil system based on sliding mode control in a complex environment", *Aerospace Science and Technology Volume 122*, p. 107406, 2022.
- [14] L. Yuhui, M. Zhao, Y. Min, S. Tong ve Z. Zengha, "6-DOF Modeling and 3D Trajectory Tracking Control of a Powered Parafoil System", *IEEE Access*, vol.8, pp. 151087-151105, 2022.
- [15] M. Wuest ve R. Benney, "Precision Airdrop", *North Atlantic Treaty Organisation Research and Technology Organisation*, Neuilly-sur-Seine Cedex, France, 2005.
- [16] D. S. SolidWorks, *SolidWorks®*, cilt 1, Version Solidworks, 2005.
- [17] S. A. Quadri and O. Sidek, "Error and Noise Analysis in an IMU using Kalman Filter", *International*, vol. 7, pp. 39-48, 2014.
- [18] R. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, cilt 8, no. 1, pp. 35-45, 1960.
- [19] L. Lasmadi, "Attitude Estimation for Quadrotor Based on IMU with Kalman-Filter", *Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta*, 2018.
- [20] A. Ma'arif, I. Cahyadi, O. Wahyunggoro ve Herianto, "Servo state feedback based on Coefficient Diagram Method in magnetic levitation system with feedback linearization", *3rd International Conference on Science and Technology - Computer (ICST)*, 2017.



- [21] Z. Zabinsky, "Stochastic adaptive search for global optimization", vol. 72, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [22] P. Eiseman, "Adaptive Grid Generation", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, cilt 64, pp. 321-376, 1987.
- [23] L. Dublins, "On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents", American Journal of Mathematics , pp. 497-516, 1957.
- [24] A. Rosich ve E. Gurfil, "Coupling in-flight trajectory planning and flocking for multiple autonomous parafoils", Journal of Aerospace Engineering, pp. 691-720, 2012.
- [25] T. Jann, "Advanced features for autonomous parafoil guidance, navigation and control", 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2005.
- [26] M. Cacan, E. Scheuermann, M. Ward, M. Costello ve N. Slegers, "On the development of gnc algorithm for a high-glide payload delivery system", 42nd IEEE International Conference on Decision and Control, 2003.
- [27] Z. Erlin ve G. Haitao, "Guidance-based Path Following Control of the Powered Parafoil", CEAI, Vol.22, pp. 42-50, 2020 .



<https://dergipark.org.tr/pub/khosbd>

Decontamination Solutions and Techniques for Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Incidents

Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer (KBRN) Olayları İçin Dekontaminasyon Solüsyonları ve Teknikleri

Kemal BAŞ^{1,2}  Serdar KARAKURT^{2,3,*} 

¹Selçuk University, Beyşehir Ali Akkanat School of Applied Sciences, Emergency Aid and Disaster Management, Konya, Türkiye

²Selçuk University, Institute of Health Sciences, Department of CBRN, Konya, Türkiye

³Selçuk University, Faculty of Science, Department of Biochemistry, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Derleme

Başvuru: 14.09.2023

Düzeltilme: 04.01.2024

Kabul: 15.01.2024

Keywords

CBRN

Decontamination

Decontamination solutions

Mass casualty

Anahtar Kelimeler

KBRN

Dekontaminasyon

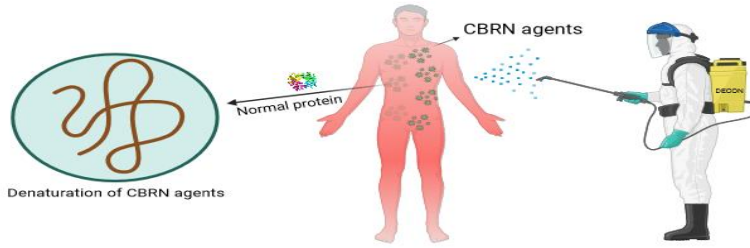
Dekontaminasyon solüsyonları

Kitlesel kaza

Önemli Noktalar / Highlights

Bazı kirlenici maddeler (ör. VX) çok düşük konsantrasyonlarda ölümcül olabileceğinden kapsamlı ve etkili bir dekontaminasyon önemlidir. Kirliliğin neredeyse %100'ünün dekontaminasyon ile arındırılması gerekir, %70- %80'lik dekontaminasyon seviyeleri yeterli değildir. Fiziksel, kimyasal ve mekanik olmak üzere üç tür dekontaminasyon tekniği vardır. Bu nedenle sorumlu bir KBRN dekontaminasyonu için her kontaminasyona özel bir dekontaminasyon zorunludur. Bu çalışma KBRN sıvılarının hazırlanma tekniklerinin ve müdahale yöntemlerinin karşılaştırılması olarak incelendiği ilk çalışmadır.

Grafiksel Özet / Graphical Abstract



Abstract

Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear (CBRN) pollutants endanger people's health, environment and cause safety risks for population and property. In the chlorine gas attack that took place in Iraq in 2007, 16 people lost their lives and more than 100 people were injured. In 2013, it was determined that more than 100 people suffered from shortness of breath as a result of explosives emitting odor and smoke from airplanes in Hama province of Syria. Decontamination, a crucial step in CBRN events, eliminates the effects of chemical, biological, radioactive, and nuclear substances acting on people, vehicles, materials, buildings, and areas or reducing them to a level that does not pose a health threat. Thus, decontamination plays a vital role in the defense against CBRN Warfare agents. With decontaminants, the wounded exposed to war agents are cleaned from these agents, which is accomplished by physical removal or chemical inactivation of the warfare agent. Once contamination is recognized, it is estimated that 90% of decontamination will occur within one minute by applying skin decontamination and removing clothing. Decontaminants used for skin and instrument decontamination generally consist of commercially available products made from alcohol, iodine, sodium chloride derivatives. When using these decontaminants, they should be dissolved at the specified concentrations, used following the instructions for use, applied to the body in appropriate amounts, and applied to the places specified for the body. This article aims to outline the general rules for decontamination solutions and techniques used in CBRN incidents

Özet

Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer (KBRN) kirlenici maddelerin insanları sağlığını, çevreyi tehlikeye atmakta, nüfus ve mülk için güvenlik risklerine neden olmaktadır. Irak'ta 2007 yılında meydana gelen klor gazı saldırısında 16 kişi hayatını kaybetmiş, 100'den fazla kişi de yaralanmıştır. 2013 yılında Suriye'nin Hama ilinde uçaklardan atılan patlayıcıların koku ve duman yayması sonucu 100'den fazla kişinin nefes darlığı çektiği tespit edilmiştir. KBRN olaylarında çok önemli bir adım olan dekontaminasyon, insanlar, araçlar, malzemeler, binalar ve alanlar üzerinde etkili olan kimyasal, biyolojik, radyoaktif ve nükleer maddelerin etkilerini ortadan kaldırır veya sağlık tehdidi oluşturmayacak düzeye indirir. Bu nedenle, dekontaminasyon KBRN Savaş ajanlarına karşı savunmada hayati bir rol oynamaktadır. Dekontaminantlar ile savaş ajanlarına maruz kalan yaralılar bu ajanlardan temizlenir, bu da savaş ajanının çoğunlukla fiziksel olarak uzaklaştırılması veya kimyasal olarak inaktive edilmesi ile gerçekleştirilir. Kontaminasyon fark edildiğinde, cilt dekontaminasyonu uygulayarak ve giysileri çıkararak dekontaminasyonun %90'ının bir dakika içinde gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Cilt ve alet dekontaminasyonu için kullanılan dekontaminantlar genellikle alkol, iyot, sodyum klorür türevlerinden üretilen ve ticari olarak satılan ürünlerden oluşmaktadır. Bu dekontaminantlar kullanılırken belirtilen konsantrasyonlarda çözülmeli, kullanım talimatlarına uyularak kullanılmalı, vücuda uygun miktarlarda uygulanmalı ve vücut için belirtilen yerlere uygulanmalıdır. Bu makale, KBRN olaylarında kullanılan dekontaminasyon solüsyonları ve tekniklerine ilişkin genel kuralları ana hatlarıyla belirlemeyi amaçlamaktadır.

*Corresponding author; karakurt@selcuk.edu.tr

1. INTRODUCTION

Disasters cause economic and social losses, interrupt social life and develop suddenly [1]. According to their formation, disasters can be divided into "natural disasters" without a human factor and "human-caused disasters" caused entirely by human influence. Chemical, biological, radiological, and nuclear disasters, known as CBRN, fall into human-caused disasters. As a result of exposure to chemical weapons, the toxic agent can enter the human body through different systems. While aerosol, vapor, and gas forms of chemical weapons are mainly inhaled from the respiratory system and included in the circulatory system, liquid, and solid forms are absorbed through the skin and taken into the body [2]. The eyes can also be the entry point of toxic agents in this context. Exposure can also occur with oral intake of foods and liquids contaminated by chemical weapons [3]. Nerve agents inhibit the enzyme Acetylcholinesterase and block nerve conduction, causing respiratory paralysis and death. Caustic agents cause skin, eye and respiratory lesions and irreversible damage of cell reactions. Physiological effects of blood poisoning agents include irritation of the nose and throat, chest tightness, choking sensation, coughing, increased respiration, difficulty breathing, redness and tearing of the eyes, headache, nausea and vomiting. The skin, which is the largest organ of the body and has the largest surface area in contact with the external environment, is one of the main targets of chemical warfare agents that can damage the skin or penetrate the skin and cause systemic poisoning [4]. Infection of skin with chemical

warfare agent is a significant problem for military and civilian populations during modern-day wars or terrorist attacks [5-7]. For example, chemical warfare agents can cause muscle paralysis, increased heart rate, hypertension, anxiety, respiratory depression and coma [8,9]. Therefore, the CBRN agent in contact with the skin must be removed as soon as possible to reduce toxicity [10,11]. Moreover, effective decontamination increases the time interval for treatment.

When the literature is examined, decontamination is divided into three categories: physical, chemical and mechanical. Burying chemical agents underground in times of war etc. is classified as mechanical decontamination. While physical decontamination methods include procedures such as washing and evaporation, reaction with chemicals and hydrolysis procedures fall into the category of chemical decontamination [11]. Sodium hypochlorite and calcium hypochlorite were the first decontaminants used against chemical warfare agents. Decontamination solution (DS2) is another solution that is effective against sulfur mustard isopropyl methylphosphonofluoridate (GB), 3,3 dimethyl-2-butyl methyl phosphonofluoridate. This review focuses on decontamination systems and techniques to reduce the toxic effects of CBRN agents, which pose a great risk to humanity, on humans, animals, and items.

2. DECONTAMINATION

The decontamination process at a CBRN scene ensures that the agent is removed from the environment, that victims or survivors do not

contaminate the environment, that first aid providers are contaminated and that the number of contaminated people is limited (Figure 1). [12]. This work is carried out by physical removal or chemical inactivation [13]. Rapid decontamination is vital in cases exposed to liquid nerve agents or sulfur mustard, which are rapidly absorbed through the skin as they cause cellular damage to the skin within a few minutes of exposure [14]. It is estimated that approximately 80% of the decontamination can

occur only by removing the clothing, as the yarns that make up the clothing fabric can capture and hold the chemical agent in liquid and vapor form [15]. Therefore, removing jewelry and watches, and clothing outside the treatment area reduces the risk of evaporation of contamination from these items. However, care should be taken to ensure that previously uncontaminated skin parts are not contaminated while removing the clothes.

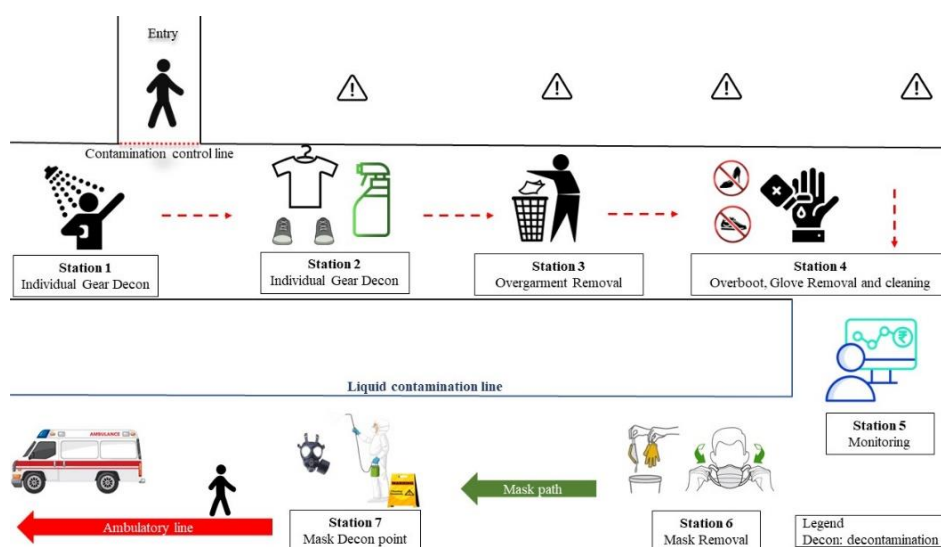


Figure 1: CBRN decontamination area.

Decontamination is usually carried out in the warm zone after the evacuation of the wounded from the hot zone [16]. This process can be broadly categorized as "wet" and "dry." Wet or water-based decontamination relies on water-based solutions to wash potentially contaminated areas of hair and skin. The main advantage of wet decontamination is that it is readily available, cheap, effective and water is ubiquitous in developed and developing countries [17]. If water-insoluble chemicals are present, soap products such as body wash or baby shampoo can be added to the water. Pouring these products onto a soft sponge and

rubbing gently on the skin can facilitate the removal of the agent. A comprehensive decontamination system should have the following features [18,19]:

- Should not be abrasive
- It should not damage soft objects such as paint and coating,
- It should be easy to prepare and apply,
- The decontamination formulation should not be disrupted when used together with a surfactant,
- It should have low toxicity,

- It should have little harmful effect on the environment.

Providing pre-hospital care for a CBRN event is essential for the protection of health. Prevention can be achieved by having decontamination liquids in homes or pharmacies. Commercial products are available for skin decontamination, but simple decontamination can be done using the "rinse-wash-rinse" technique with plenty of soap and water. In case of eye exposure, the eyes should be washed thoroughly with plenty of water or 0.9% saline solution (NaCl) [15].

3. METHODS TO REMOVE CHEMICAL WARFARE AGENTS

Decontamination is the cleaning process carried out to prevent a wounded person contaminated with a CBRN agent from infecting other wounded and the personnel who intervene with him/her. In general, decontamination is divided into 3: mechanical, physical and chemical.

3.1. Mechanical

The most easily applicable method for decontaminating any object or substance is to remove or cover the contaminated surface. Digging into the soil with a wooden stick or wood can help remove the agent.

3.2. Physical

Physical removal, the cheapest and easiest method for CBRN agents, includes some procedures. Washing CBRN agent-contaminated skin or items with water-based solutions can neutralize a significant amount of agent, but it should be remembered that the agent can penetrate further with water.

4. DECONTAMINANTS USED FOR CHEMICAL AND BIOLOGY AGENTS

4.1. Reactive Skin Decontamination Lotion Kit

The Reactive Skin Decontamination Lotion kit is a U.S. Food and Drug Administration (FDA) approved product consisting of a lotion-impregnated sponge in an easy-to-open package [20]. RSDL, a commercial product, contains Decon 139 and small amounts of 2,3 butanedione monoxime [21]. 2,3 butanedione monoxime (also known as Diacetyl Monoxime) is a weak acid with a pKa of 9.3 [22]. The RSDL kit has been developed to remove or neutralize chemical warfare agents and T-2 toxins from the skin. Chemical neutralization takes place by a reaction mechanism known as nucleophilic substitution. The use of the kit includes wiping the skin area exposed to the chemical warfare agent with an impregnated sponge. The reactions between the lotion and various chemical warfare agents have been extensively studied *in vitro* and *in vivo*. It was shown that the obtained reaction products used in operational situations had been received [23]. The shelf life of a ready-to-use kit is five years from the date of manufacture when stored under recommended storage conditions. The kit should be stored in its original container between 15°C and 30°C in a cool, well-ventilated area, away from incompatible materials and food, and protected from direct sunlight. Burning may occur if it comes into contact with strong oxidizing chemicals (e.g., dry chlorine products), so opened packages should not be thrown into places where strong

oxidizing substances are present. In case of exposure to a chemical warfare agent, the product starts to show its effectiveness within 2 minutes from opening the package. The first use of RSDL in the field was made by Canadian troops during the First Gulf War in 1991, and in the following years, the United States (U.S.) army applied to the Food and Drug Administration of the United States to incorporate this product. In 2002, the U.S. Food and Drug Administration granted a use permit for RSDL [23].

The volume of the RSDL kit contained in the 42 mL green pack is sufficient to decontaminate the forearms, hands, neck, and face. It removes or neutralizes RSDL, sarin (GB), tabun (GA), soman [24], cyclosarin (GF), VX, VR, Mustard, and T-2 toxins from the skin. In some animal in vivo studies, RSDL is more effective against chemical warfare agents than other decontamination methods [10,25]. However, reactive decontaminants can damage the skin if used in large quantities and not removed quickly. Furthermore, RSDL is known to cause eye irritation, and therefore eye contact should be avoided [25]. In addition, the direct application of RSDL to open wounds has been shown to impair wound strength and reduce the collagen content in the early stages of wound healing [26,27].

4.2. Decontamination Solution 2 (DS2)

In addition to the negative effects caused by hypochlorite solutions, the need to find more effective decontaminants has led researchers to investigate alternative methods for the decontamination of chemical warfare agents. In

1960, a new solution called DS2 (Decontamination Solution 2), which did not lose its activity even if stored for a long time and could be used between -26 °C and 52 °C, was developed for use in neutralizing chemical warfare agents [28]. DS2 is an anhydrous solution and contains 70% diethylenetriamine, 28% ethylene glycol monomethyl ether and 2% sodium hydroxide [29]. Although DS2 is a highly effective solution for decontaminating organophosphates and does not cause corrosion on most metal surfaces, it does damage materials made of plastic, rubber and leather. More importantly, it has a caustic effect on human skin [29].

4.3. Surfactant-Based Decontaminants for Chemical Warfare Agents

Surfactant-based decontamination solutions contain sodium dichloroisocyanurate and dichloroisocyanuric acids [30]. The solution is prepared with a mixture of approximately 1-15% hydrated dichloroisocyanuric acid salt and 1-9% lithium hypochlorite. In addition, it contains 1-10% propylene glycol co-solvent and 1-15% surfactant. The surfactant dissolves when it interacts with water and forms foam when in contact with air. With this solution, G agents, caustic agents and V agents are neutralized [30].

4.4. Water Based Decontamination

In water-based decontamination solutions of chemical warfare agents, 90 g benzyltrimethylammonium chloride, 25 g benzyltriethylammonium chloride, 185 g 2-amino-2-methyl-1-propanol are mixed with 20 g water. Finally, the pH of the resulting solution

is adjusted to 10.6 by adding approximately 20% water [31].

4.5. Chlorine and Chlorine Compounds

Chlorine and chlorine-containing compounds have highly oxidizing properties and show similar chemical reactions despite their different structures. The most important sources of chlorine are chlorine gas and hypochlorites [32]. A hypochlorite solution consists of household bleach, which is approximately 5.25% sodium hypochlorite (NaCl). Household bleach should contain 5.25% (50.000 ppm) sodium hypochlorite (NaOCl) [32]. 0.5% sodium hypochlorite solution is used for skin decontamination. To prepare a 0.5% solution, 1 part of bleach is mixed with 9 parts of water, but this solution may be contraindicated for use in different parts of the body, especially the eyes [33]. In the case of chemical warfare, it is recommended to use a newly prepared, diluted, alkaline 0.5% hypochlorite solution for decontamination [34-36]. The 0.5% prepared solution has been proven to be effective in oxidizing the mustard agent and organic phosphorus compounds [34, 36]. The effectiveness of chlorine and chlorine compounds is the inhibition of the intracellular enzymatic reactions, denaturation of proteins, inactivation of nucleic acids, and killing microorganisms [37].

Hypochlorites are destroyed in light, so they should be stored in opaque containers, closed. It is actively used because of its rapid effects, low cost, broad-spectrum antibacterial activity, and toxic residues [37]. Chlorine and chlorine compounds are also widely used in drinking

water disinfection, swimming pool cleaning, household cleaning [38]. Hypochlorite solutions should not be used undiluted because they are toxic to the skin and may do more harm than decontaminate [39]. For example, in one study, rabbits exposed to sarin gas were not affected when they were not decontaminated, but skin irritation was observed when washed with 5.0% bleach [40]. On the other hand, diluted use of bleach (0.5%) is preferred since it does not have any irritant properties for human skin [41]. The virucidal activity of sodium hypochlorite (NaClO) is related to the chlorine concentration of active chlorine expressed as a % or ppm (parts per million) [42]. It was found that 0.63% (6300 ppm) sodium hypochlorite significantly reduced the number of polioviruses [42].

4.6. Activated Aluminum Oxide-based Decontaminant

The surface contaminated with a CBRN agent is washed with aluminum oxide to remove the contamination and then decontaminated [43]. The absorbent material may contain not only activated aluminum oxide but also a mixture of magnesium monoperoxyphthalate. It should be noted that magnesium monoperoxyphthalate should be in the range of 1-50%.

4.7. Oxidizing Gels

Gels with oxidizing properties are formed by the combination of oxidizing agents and gels. In this way, detoxification is achieved by applying it to the area contaminated with chemical and biological agents. When gel-forming substances such as sodium alginate, pectin and silica form a gel, they do not flow on the applied

surface and form a colloidal structure. Oxidizing agents dispersed in water or organic solution can form gels when combined with colloidal matter in the range of about 10-30%. If the necessary substances are available, it can be prepared in a warm area or hospital where the CBRN agent is located and can be applied quickly by spraying. After decontamination, gel residues can be cleaned with water or vacuumed. For example, a gel consisting of a combination of 5.5% NaOCI and 13.5% fumed silica has been found to be effective against chemical agents.

4.8. Reactive Sorbent

It is obtained by mixing 148 g of sodium methoxide solution with 38.6 diethylenetriamine for 1 hour. The resulting solution is added to carbon with a surface area of 1800 m²/g and waited for it to dry. This solution is effectively used to decontaminate chemical and biological agents [44].

4.9. Alcohol and Alcohol Derivatives

Alcohol-based disinfectants have a broad-spectrum bactericidal effect, although they are recommended by the US Centers for Disease Control and Prevention [45]. Alcohols act by disrupting the 3-dimensional structure of proteins (Enzymes), disrupting the random ring of polypeptide chains and the helical structure [46,47]. Alcohol-based decontaminants are the leading decontaminants that provide the fastest and most significant reduction in microbial counts on the skin [46]. Ethyl alcohol 60%, isopropyl alcohol 50%, and n-propyl alcohol 40% show sufficient effect in concentrations. Although ethyl alcohol shows

sufficient effect at 60-80% concentrations, the concentration where it is optimally effective for skin decontamination is 70% [37].

Proteins are denatured easily in the presence of water, so water is necessary for the antimicrobial activity of alcohols. A much stronger and longer efficacy can be achieved by adding substances such as povidone iodine and chlorhexidine into alcohol. It has been determined that the antimicrobial activity in the abdomen and groin area cleaned with the solution obtained by mixing 2% chlorhexidine gluconate into 70% isopropyl alcohol is more effective against 70% isopropyl alcohol and 2% aqueous chlorhexidine gluconate [48]. Healthcare personnel should perform hand hygiene with 60-95% alcohol-based disinfectants before and after wearing gloves [49]. On the other hand, the main disadvantage of alcohol is that they do not have permanent effects and can irritate the skin [50]. In addition to the ineffectiveness of alcohol-based disinfectants against non-enveloped viruses, methyl alcohol is not used much in the health sector due to its weak bactericidal effect. [51].

4.10. Iodophor

Iodophores are solutions containing iodine and a solubilizing agent [52]. Iodophores penetrate the cell wall and membranes of microorganisms and disrupt DNA synthesis, but are less effective than other disinfectants in preventing biofilm formation of microorganisms [53]. Iodine solutions have been used for skin decontamination for many years. However, its use as decontamination is limited due to its poor solubility in water, low stability, staining of

surfaces, and odor. However, this was significantly reduced by complexing the iodine with a polymer [54]. Polyvidone iodide, a compound of iodine and polyvinylpyrrolidone, is the most widely used iodophor [55]. Contaminated hand and arm decontamination involves initial scrubbing with 0.7% povidone iodine (PI) and a secondary cleaning with 10.0% PI [56]. Iodophors are moderate decontaminants effective against plant bacteria, enveloped viruses, fungi, and some micro-bacteria. Its mechanism of action occurs through the oxidation of amino acids, which eliminates the cell's ability to synthesize protein [54]. Free iodine oxidizes the -SH groups of proteins and enzymes and transforms them into disulfide (S-S) forms, thereby distorting the structures and shapes of these substances. It is known to be effective against bacteria, such as broad-spectrum antibiotics and fungi and viruses, including HIV. Iodine, whose importance was unknown until 1950, found its place in the current usage areas with its molecular combination with polyvinylpyrrolidone [57,58]. 7.5% PI solution is used for decontamination in the surgical field [59]. Clinical studies have shown that many microorganisms are destroyed by rubbing using povidone-iodine, and intra-abdominal bacterial infection development is reduced by peritoneal washing. In studies examining the bactericidal and cytotoxic effects of 10% povidone-iodine (diluted 1:10), it was found that it inhibited the viability of Gram (-) and Gram (+) bacteria and was not harmful to normal fibroblast cells [60,61]. It should be noted that iodine also stains the skin an intense yellow-brownish color,

causes blue stains on clothing in the presence of starch, and combines with iron and other metals.

4.11. EasyDECON™ DF200 Solution

It is found in commercially available products that are produced to neutralize chemical and biological warfare agents. One of them is the EasyDECON™ DF200 solution, which can be applied as a foam and spray. The environmentally friendly solution has little or no effect on the skin. The product, which is used by the American army and fire departments, is used by military and civilian organizations in many other countries [62]. While preparing the solution, three different liquids called Part1, Part2, and Part 3 are used. In addition, it does not stain or damage the fabric/fabric so that it can be used on all surfaces without any problems. It is a mixture of ordinary household substances that neutralizes both chemical and biological agents in less than 30 minutes and is environmentally friendly. EastDecon 200 is effective against G-series nerve agents, VX nerve agents, H-series caustics, L-series caustics, phosgene oxime and chicken pox, anthrax, E. coli, SARS-Coronavirus, hoof and mouth diseases. The solution absorbs the existing contamination with its application, chemically oxidizes, and neutralizes it [62].

4.12. Hydrogen Peroxide(H₂O₂)

Hydrogen peroxide (H₂O₂) is used in sterilization, disinfection and as an antiseptic biocide. It is a colorless liquid. Although sporicidal activity increases significantly in the plasma phase, higher concentrations of hydrogen peroxide (10-30%) and longer contact times are required. Hydrogen peroxide is a

strong oxidizing agent as it produces free hydroxyl radicals. Free hydroxyl radicals are known to bind to cell components such as DNA, lipids and proteins and specifically target sulfhydryl groups and double bonds. Generally, 20°C and 6 hours contact time is accepted for sterilization with 7.5% hydrogen peroxide and 30 minutes contact time for disinfection under the same conditions [63].

Louis Thenard discovered H_2O_2 in 1818, and B. W. Richardson first suggested its use as a disinfectant in 1891 [64]. Today, it is widely used, mainly since it decomposes non-toxic by-products (e.g., oxygen and water). Few literature studies are discussing the mechanism of the biocidal effect of H_2O_2 as suggested in general studies on the mechanisms of action of biocides in general. H_2O_2 acts as a reactive oxidizing agent with biomolecules (proteins, lipids, nucleic acids, etc.) that make up cellular function [65]. In addition, compounds with hydrogen peroxide are a strong oxidizing agent, acting through the formation of hydroxyl free radicals (OH), which cause denaturation of the cellular component [65].

Today, the importance of no-touch disinfection (NTD) systems, which are automatic disinfection robots, has increased rapidly in combating pathogenic microorganisms colonized on the environmental surfaces of healthcare facilities. No-touch disinfection systems are broad-spectrum effective even against bacterial endospores and are based on hydrogen peroxide, which, unlike alternative disinfectants, does not have carcinogenic properties [64]. These systems are being which aim to provide more effective disinfection than

routine cleaning methods. To obtain the gas phase of approximately 1 micron by heating the 30% hydrogen peroxide aqueous solution after the ambient humidity and temperature is adjusted according to the disinfection condition and release hydrogen peroxide vapor in the appropriate amount of the volume of the environment to be disinfected [66]. Portable no-touch disinfection robots can perform disinfection in the environment where they are placed without human intervention after specific parameters are entered. Therefore, inside a building such as a house, apartment, or hotel, H_2O_2 solution can be used to kill biological microorganisms such as coronavirus. An important point that should not be forgotten during this process; It is closing openings such as windows, doors, and ventilation in the environment.

A hydrogen peroxide solution in a concentration as small as 0.5% effectively inactivates coronaviruses (e.g., SARS, MERS) on inanimate surfaces within 1 minute [67]. Clinically recommended and commercially available H_2O_2 solutions at concentrations of 3.0% and 1.5% show the minimal virucidal effect 15 seconds after administration [68].

Table 1: Decontaminant/disinfectant applied against microorganisms and the concentration to be applied.

Decontaminant	Concentration to be applied	Application Place	Microorganism Affected
Sodium Hypochlorite	%0.5 (5000 ppm)	Skin	Vegetative bacteria, Enterococcus, Staphylococcus, gram-positive and gram-negative bacteria –

Alcohol Ethyl or isopropyl alcohol	%70.0	Surface and skin	Gram-positive and gram-negative bacteria, Bacillus and Clostridium spores
Iodophores	30-50 ppm free iodine	Surface and skin	Bacteria, mycobacteria, viruses
Phenol and phenol compounds	%0.4-5	Surface and tool	Bacteria, fungus
Aldehyde Formaldehyde	%6-8	Surface	Bacteria, fungi, viruses, spores, mycobacteria
Glutaraldehyde	%2-3.2		Bacteria, fungi, viruses, spores, mycobacteria
Orthophthalaldehyde (OPA)	%0.55	Skin	
Hydrogen Peroxide	%3.0	Tool and surface	Bacteria, viruses, fungi

4.13. Factors Affecting Decontamination

In order for the decontamination solution to be effective, it must have certain properties. Some of these include the duration of the area contaminated with the agent, contamination intensity, size of the affected area, type of agent, and temperature of the environment. The preparedness of the personnel wearing A-B-C-D level protective clothing and the roughness or curve of the surface of the contaminated object are also of great importance in decontamination.

5. EFFECTS OF RADIOLOGICAL AND NUCLEAR AGENTS AND PROTECTION TECHNIQUES

In 1945, the US dropped an atomic bomb on Hiroshima, killing 60,000-70,000, and three days later on Nagasaki, killing 34,000 [69].

These two bombs are thought to have caused a total of 340,000 deaths over five years, mostly civilians. In 2016, a 16-year-old boy who found the missing Iridium -192 source in Sakarya and took it home was diagnosed with skin injury due to radiation exposure and at least 10 relatives were also affected by radiation [70]. Radiological and nuclear threats can take the form of the transportation and distribution of radioactive material or the detonation of a nuclear weapon [71]. In the event of a terrorist incident, intervention can only be possible by organizing appropriate response action plans that have been practiced on previously produced scenarios. For the success of pre-developed response action plans for radiological material emitting devices, there is a need for health personnel who are informed about basic radiation biology, appropriate medical support, the ability to train post-event medical support, urgent referral of knowledgeable and experienced people to centers for acute treatment, and long-term follow-up. According to the basic radiation protection standards recommended by International Radiological Protection [72], dose limits for whole body irradiation are as follows [72]:

- 2.5 $\mu\text{Sv}/\text{hour}$
- 20 $\mu\text{Sv}/\text{day}$
- 100 $\mu\text{Sv}/\text{week}$
- 5000 $\mu\text{Sv}/\text{year}$

Exceeding these values may cause various damages in the body. Exposure to radioactive fallout generally occurs in three ways: inhalation, ingestion and through the skin. Exposure up to 0.75 Sv (Sievert) is the amount of radiation that is considered safe for everyone

and is called the combat dose. As the exposure dose increases, a number of clinical symptoms begin to occur (Table 2).

Table 2. Clinical conditions that develop depending on the radiation dose exposed [73].

REM	Sievert	Clinical Effects
0-25	0-250	No observable clinical effects
25-100	250-1000	Minor changes in the blood picture
100-200	1000-2000	<ul style="list-style-type: none"> • fatigue and loss of appetite • Nausea and vomiting within 3 hours • Moderate changes in the blood picture
200-600	2000-6000	<ul style="list-style-type: none"> • Vomiting in 2 hours or less • Internal bleeding and infection • Major change in blood picture • Hair loss within 2 weeks
600-1000	6000-10000	<ul style="list-style-type: none"> • Vomiting within 1 hour or less • With a major change in the blood picture • Internal bleeding and infection • (80% to 100% of deaths occur within 2 months, and survivors take a long time to recover)

A radiological weapon is a device that causes damage and severe injury and death by spreading the radiation released due to the halving of the radioactive material contained in it specifically. These weapons, also called radiation weapons, cause pollution by scattering radioactive material around them. The primary sources of this pollution are generally nuclear power plants, nuclear weapons development facilities, nuclear research centers, and wastes. When a nuclear weapon explodes, air molecules are pushed out from the center of the explosion due to the high heat generated there collide and form a blast. While the power created by the heat and pressure that creates the blast causes damage to the living creatures and structures in the first moment, the blast collapses inwards due to the rapidly falling air pressure in the blast after a short time, resulting in a second shock

wave. While the power created by the heat and pressure that creates the blast causes damage to the living things and structures in the first moment, the blast collapses inwards due to the rapidly falling air pressure in the blast after a short time and a second shock wave is formed. Human beings, items, and animals that are slightly damaged by the first effect are destroyed mainly by this second shock wave. The effects of the weapon occur due to the radiation emitted to the environment. These effects depend on the type and quantity of the weapon used, the height of the explosion, and the structure of the region. When the bomb is detonated at or near the surface, residual effects increase in severity.

Radiological and Nuclear accidents cause significant loss of life and property and cause great casualties to countries. The nuclear reactor, which houses the 9M370 cruise missile belonging to Russia, exploded in 2019, resulting in 5 deaths and 3 severe injuries due to radiation [74]. As a result of the unwitting transport of Iridium 192 cargo packages on the passenger plane flying between Cairo-Zurich-Bussel in 2017, it was revealed that 26 passengers were exposed to higher doses of radiation than allowed [75]. Therefore, decontamination is vital to reduce the number of such accidents. For this purpose, the immediate and careful removal of the outer clothing of the wounded ensures that 90% of the CBRN warfare materials are removed. Decontamination is not only the removal of activity from people, but also the collection of evidence about the activity to which they have

been exposed and the provision of preliminary data on the possible effects of radiation.

5.1. First Responder

When faced with a patient contaminated with a radioactive substance, the first action to be taken is to intervene to ensure the survival of the injured person or to prevent the situation from getting worse, rather than the contamination itself. It should not interfere with the medical treatment to be applied to the injured and if necessary, the contaminated casualty should be admitted to the hospital. Injured persons who are transferred to a health facility after a radiological or nuclear event should be kept in the health facility until it is determined that they are not contaminated. Removing radioactive substances from people and belongings is not a simple and easy process and requires high amounts of personnel and material resources.

5.2. Decontamination Methods

Radioactive substances cannot be neutralized like chemicals. Instead, it is removed from the environment. This should not be forgotten when performing radiologic decontamination. Therefore, the difficult process is to remove the radioactive substance from the environment without contaminating it. While the patient is stabilized in the emergency room, his clothes are removed. Care should be taken to remove clothing regularly to avoid contamination of medical personnel and other personnel. Rather than tearing the patient's clothing, it should be removed or cut away from the airway and the radiological material should be kept inside the clothing. Priorities for skin decontamination are cleaning wounds and holes around the face.

Finally, the decontamination process is completed successfully on clean skin. To prevent contamination from flowing into the wound, the area around the wound is still decontaminated with a soft sponge. In addition, curtains should be worn at certain intervals to prevent contaminated agent from contaminating the environment. The wound is washed with sterile 0.9% NaCl (saline). The purpose of the initial washing is to try to remove contamination as much as possible. The floor should be sloped so that any saline or agents that fall on the floor can be collected in a multi-bin or in a different drain. The collected waste should be collected in a predetermined room for disposal. If there is bleeding after decontamination, the wound is re-bandaged. The skin should not be rubbed during decontamination; rubbing the skin accelerates the penetration of the agent into the skin [76,77].

Before decontamination, swabs taken from the ear, nostrils and wound sites of the wounded may give an idea about whether there is a risk of internal contamination. The specimens should be stored in separate vials or sealed tubes with identification information, where and from which side they were taken. These samples are a source of analysis not only for clinical investigations but also for forensic investigations. Transportation to health facilities without such study and recording procedures may not only increase the fear of health workers who do not have sufficient knowledge about radiation, but may also result in contamination of health facilities.

To carry out the decontamination process, it is necessary to define the various radiation zones of the crime scene. The purpose of defining zones is to minimize unnecessary radiation exposure and allow the quick and efficient recovery of the injured and preserve their health. For this purpose, as shown in Figure 2, the amount of radiation in and around the incident area should be measured. The environmental radiation exposure rate in these zones should be below 0.1 mR/h (1 microSv/h). When the radiation exposure level is 100 mR/hour, a medium level radiation exposure boundary is established, and when it is 1000

mR/hour, a high-level radiation exposure boundary is established (Figure 2). If the areas to be zoned area in open land, inside a building or in case of fire, cordon distances may vary between 30 and 400 meters depending on the scene [78]. These zones and their widths are determined according to the dose rates in the radiological-nuclear incident. In addition, meteorological information on wind direction and intensity is also needed when deciding on the zones, their distances and the placement of control points. The incident-specific personnel should intervene by wearing the necessary protective clothing.

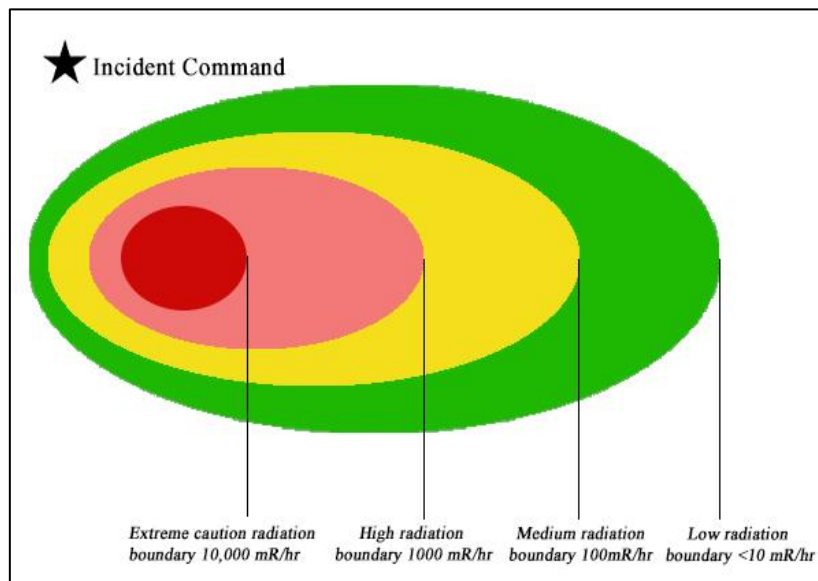


Figure 2: Radiation fields.

Substances that can cause radiological and nuclear contamination can be in solid and gaseous form. The most common radioactive contaminants are alpha and beta emitters. While substances emitting gamma rays cause damage to the whole body, beta emitters cause burns on the skin. There is a Geiger Müller (GM) counter to determine the amount of contamination and exposure. GM is used to measure the type and

amount of radioactive material found on the surface and for body contamination screening [79]. The most important way to control radioactive contamination is to limit the spread of the material [79]. This process controls the entrances and exits to the hot area, wearing ABC-level protective clothing and personnel monitoring [76]. Removing outer clothing and shoes and washing the hair quickly provides

90% of the contamination. It may be necessary to decontaminate the casualty's skin and eyes (if there is any sign of eye contamination) after the clothing is removed.

After the casualty's clothes and accessories are removed, the measurement is retaken. Before applying the clean wash and rinse technique, it is recommended to comb and shake the hair instead of cutting it. After washing, measurements are retaken from the injured people. If the level on which the dose is known is higher than the determined limits, the washing process is continued until the quantity falls below the level. If more than 10% reduction cannot be achieved according to the previous measurement results, the process is continued [79]. Washing the skin by rubbing it hard with hot water should also be avoided for decontamination. Rubbing and cleaning can cause radionuclide or radioactive material to enter between the stratum corneum layers in the skin and increase exposure[80,81].

Since radiation-induced illnesses can take hours or days to manifest clinically, hospital emergency department staff should have the ability to triage victims of radiological terrorism incidents according to urgency using traditional medical methods and trauma criteria. Patients should first be medically stabilized and radiation injuries should be assessed, taking into account clinical findings, dose exposure, type of radionuclide and the presence or absence of internal contamination [82]. The treatment of a patient who has received radiation may vary depending on the type of radiation (gamma, neutron), the type of radionuclide (cesium,

plutonium, etc.), the dose received, the level of exposure (full or partial body), the location of exposure (internal or external), and whether there are concurrent trauma or burn injuries. Furthermore, in the setting of a radiological nuclear incident or terrorist attack, it is inevitable that individuals will have comorbidities such as diabetes, hypertension, heart failure. Among them, a more vulnerable population is pregnant women, older people, children and young people.

5.3. QuickDECON™ Radiation Decontamination Solution

QuickDECON™ is a radionuclide ion-specific decontamination solution. The main technology used is called Mass Effect™. After applying QuickDECON™ to a radiation-affected surface, radioactive substances adhered to the surface are mobilized and detached from the surface. QuickDECON™ solution enables radioactive ions to mobilize, break off from the most non-porous surfaces, and pass into the water-based solution.

The solutions have been developed to provide the most effective purification possible and to be easy to use. It is water-based and environmentally friendly and applied using the spray method and wiping method. It is also used to remove radioactive substances from human skin. It has been accepted by The United States Food and Drug Administration (FDA) to be suitable for superficial use on human skin. QuickDECON™ is used in military and civil defense, nuclear medicine, hospitals and laboratories, nuclear power generation plants, nuclear waste handling facilities, civilian first

responders, bomb disposal teams, and homeland security [62]. Substances inactivated by both EasyDECON™ and QuickDECON™ solutions are shown in Table 3.

Table 3: Substances purified by EasyDECON DF200 solution and Quick DECON™ radiation decontamination solution.

Halogens	Transition Metals	Actinides
Fluorine, phosphorous, sulfur, chlorine, arsenic selenium, bromine, iodine, astatine	Lithium, beryllium, sodium, magnesium, potassium, calcium, chromium, manganese, iron, cobalt, nickel, copper, zinc, gallium, rubidium, strontium, indium, cesium, barium, thallium	Scandium, titanium, vanadium, yttrium, zirconium, niobium, molybdenum, technetium, ruthenium, rhodium, palladium, silver, cadmium, hafnium, tantalum, tungsten, rhenium, osmium, iridium, platinum, gold, mercury, radium, lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutetium, actinium, thorium, protactinium, uranium, plutonium, americium.

6. RESULTS

As in the past, CBRN warfare agents continue to be used for deterrent purposes, harming people, other living things, land and food, and polluting the environment. The cleaning of this contamination is carried out by trained personnel using different chemicals and equipment. While decontamination is generally performed for chemical agent pollution, for biological agents, removal is carried out by disinfection. Decontamination is vital both for the patient's life and for stopping the spread of pollution. The cleaning process is carried out by physically removing the agent and rendering it

ineffective by destroying its chemical structure. Although water is the most commonly used liquid during this process, it exists in different chemical solutions. When preparing these solutions, it is crucial to know the appropriate amounts of the necessary chemicals not to irritate the casualty and neutralize the agent. Apart from decontamination, methods such as burning contaminated tools and objects, turning the contaminated area with a strip, closing it for use, leaving it out, and waiting for the agent to inactivate itself are applied.

7. FUTURE STUDIES

Developments in the field of CBRN defense and studies on solutions, decontamination kits or decontamination powder for CBRN decontamination applications continue all over the world. The reason for conducting studies in the field of decontamination is that existing decontamination systems are difficult to use, can leave waste in the environment after decontamination, and are not applicable in all kinds of environments and conditions, etc. Decontamination systems to be constructed in the future must be user-friendly, non-corrosive, and contain stable active compounds. For this purpose, hydrogels, nanoporous structures, nanosized systems that allow drug release have the potential to be used due to their promising properties.

ACKNOWLEDGMENTS

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

Kemal BAŞ: Writing- review & editing, Writing-original draft, Investigation, Conceptualization.

Serdar KARAKURT: Writing- review & editing, Validation.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

REFERENCES

- [1] N. Varol, and T. Gültekin, "Disaster Anthropology," *Electronic Journal of Social Sciences*, 15(59), 2016. <https://doi.org/10.17755/esosder.263244>
- [2] H. John, et al., "Toxicokinetic aspects of nerve agents and vesicants," in *Handbook of toxicology of chemical warfare agents*. Academic press, p. 875-919. 2020 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819090-6.00052-0>
- [3] M. Ortatılı, et al., "Evaluation of Chemical, Biological, Nuclear and Radiological Casualties with Regard Terrorism," *Türkiye Klinikleri Journal of Forensic Medicine Special Topics* 1:44-52, 2015
- [4] L. Sun, et al., "Poly (γ -glutamic acid)-based electrospun nanofibrous mats with photodynamic therapy for effectively combating wound infection" *Materials Science and Engineering: C*. 113:110936, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110936>:
- [5] S. Sezigen, et al., "Victims of chemical terrorism, a family of four who were exposed to sulfur mustard," *Toxicology Letters*, 303, 9-15. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.12.006>
- [6] S. Sezigen, and L. Kenar, "Recent sulfur mustard attacks in Middle East and experience of health professionals," *Toxicology Letters*. 320, 52-57. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2019.12.001>:
- [7] J. Wiltens, "Clinical management of mustard gas casualties". *Annals of Medical Militaris*, 3, 1-61, 1989.
- [8] D.D. Haines, and S.C. Fox, "Acute and long-term impact of chemical weapons: lessons from the Iran-Iraq war", *Forensic Sci Rev*, 26, 2, 97-114, 2014.
- [9] H. Thiermann, F. Worek, and K. Kehe, "Limitations and challenges in treatment of acute chemical warfare agent poisoning" *Chemico-biological interactions*, 206, 3, 435-443, 2013. <https://doi.org/10.3109/15569527.2010.515280>
- [10] E.H. Braue, et al., "Efficacy studies of Reactive Skin Decontamination Lotion, M291 Skin Decontamination Kit, 0.5% bleach, 1% soapy water, and Skin Exposure Reduction Paste Against Chemical Warfare Agents, Part 1: Guinea pigs challenged with VX," *Cutaneous and Ocular Toxicology*, 30, 1, 15-28, 2011 <https://doi.org/10.3109/15569527.2010.515280>
- [11] Y.C. Yang, J.A. Baker, and J.R. Ward "Decontamination of chemical warfare agents. *Chemical Reviews*," 92,8,1729-1743, 1992 <https://doi.org/10.1021/cr00016a003>
- [12] I. Hahm, et al., "A multi-criteria decision-making process for selecting decontamination methods for radioactively contaminated metal components," *Nuclear Engineering and Technology*, 55, 1, 52-62, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.09.012>:
- [13] S.M. Simmons, et al., "Decontamination and reuse of personal protective masks and respirators in healthcare: Human-centered investigation and implementation considerations," *Human Factors in Healthcare*. 1:100003, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.hfh.2021.100003>
- [14] S. Costanzi, J.-H. Machado, and M. Mitchell, "Nerve agents: what they are, how they work, how to counter them," *ACS chemical neuroscience*. 9,5,873-885, 2018. <https://doi.org/10.1021/acschemneuro.8b00148>
- [15] L. Kenar, and S. Sezigen, "Kimyasal Savaş Yaralılarının Tıbbi Yönetimi için Pratik Rehber", 2017.
- [16] E. McDaniel, and J. McIsaac, "Combined Trauma and CBRN Exposure: Adding Insult to Injury," *ASA Monitor*. 86, 3, 28-29, 2022. <https://doi.org/10.1097/01.ASM.0000823084.85024.4a>

- [17] J. Brent, "Water-based solutions are the best decontaminating fluids for dermal corrosive exposures: a mini review," *Clinical toxicology*, 51, 8, 731-736, 2013 <https://doi.org/10.3109/15563650.2013.838628>
- [18] Y.C. Deong, and M.H. Jeong, "Convenient method of deactivating reactive esters under micellar and microemulsion media," *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 21, 2, 271-273, 2000. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2000.21.2.271>
- [19] S. Wellert, et al., "Decontamination of chemical warfare agents using perchloroethylene–Marlowet IHF–H₂O-based microemulsions: wetting and extraction properties on realistic surfaces" *Colloid and Polymer Science*, 286, 417-426, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00396-007-1788-4>
- [20] L. Taysse, et al, "Skin decontamination of mustards and organophosphates: comparative efficiency of RSDL and Fuller's earth in domestic swine," *Human & Experimental Toxicology*, 26, 2, 135-141, 2007. <https://doi.org/10.1177/0960327107071866>
- [21] S., Bjarnason, et al., "Comparison of selected skin decontaminant products and regimens against VX in domestic swine," *Human & Experimental Toxicology*, 27, 3, 253-261, 2008. <https://doi.org/10.1177/0960327108090269>
- [22] A.P. Kurtz, and T.D.J. D'Silva, "Estimation of Dissociation Constants (pKa'S) of Oximes from Proton Chemical Shifts in Dimethyl Sulfoxide Solution,". *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 76, 8, 599-610, 1987. <https://doi.org/10.1002/jps.2600760805>
- [23] RSDL, "Reactive Decontamination Lotion Kit", <https://www.rsdl.com/resources/#download>. (4.09.2022).
- [24] G. Clayton, and F. Clayton, "Patty's industrial hygiene and toxicology," New York (NY): John Wiley & Sons, Inc., 1994
- [25] D Schwartz, M., et al., "Reactive skin decontamination lotion (RSDL) for the decontamination of chemical warfare agent (CWA) dermal exposure," *Current pharmaceutical biotechnology*, 13, 10, 1971-1979, 2012. <https://doi.org/10.2174/138920112802273191>
- [26] J.M. Connolly, et al., "Impairment of wound healing by reactive skin decontamination lotion (RSDL®) in a Göttingen minipig® model," *Cutaneous and Ocular Toxicology*, 39, 2, 143-157, 2020. <https://doi.org/10.1080/15569527.2020.1751183>
- [27] T.J. Walters, et al., "Effect of Reactive Skin Decontamination Lotion on Skin Wound Healing in Laboratory Rats". *Military Medicine*, 172, 3, 318-321. 2007. <https://doi.org/10.7205/MILMED.172.3.318>
- [28] M.H. Kim, et al., "Continuous fed-batch alternating aerobic and anoxic system for biodegradation of Decontaminating Solution 2 with high nitrogen content," *Water-Energy Nexus*, 1, 1, 47-55, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2018.05.002>
- [29] B, Singh, et al., "Decontamination of chemical warfare agents," *Defence science journal*, 60, 4, 428. 2010.
- [30] J.G. Purdon, C.L. Chenier, and A.F. Burczyk, "Broad spectrum decontamination formulation and method of use," Google Patents, 2003.
- [31] D.T. Gronce, "Chemical warfare agent decontaminant solution using quaternary ammonium complexes," Google Patents, 1998.
- [32] M, Günaydın, et al., "Sterilizasyon Dezenfeksiyon Rehberi", İstanbul: Arvin Yayınevi, 41-43, 2015.
- [33] E.D. Clarkson, and R.K. Gordon, "Rapid decontamination of chemical warfare agents from skin, in *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents*, R.C. Gupta, Editor. 2020, Academic Press.
- [34] L.C. Cancio, "Chemical casualty decontamination by medical platoons in the 82d Airborne Division," *Military medicine*. 158, 1, 1-5, 1993. <https://doi.org/10.1093/milmed/158.1.1>
- [35] US Army Medical Research Institute of Chemical Defense, "Medical Management of Chemical Casualties: Handbook," Virginia, ABD, 1999.
- [36] F.R. Sidell, "Nerve agents", in *Medical Aspects of Chemical and Biological Warfare*, B.G.R. Zajtchuk, 129-178, 1997.
- [37] D.P. Menderes, and D.Y. Metin, "Dezenfeksiyon Antisepti Sterilizasyon Rehberi," 27-29, 2019.
- [38] A, Saniç, "Aldehitler ve Sterilizan Dezenfektanlar," 3. Sterilizasyon

Dezenfeksiyon Kongre Kitabı, Samsun, 108-119, 2003.

[39] R.J. Slaughter, et al., "The clinical toxicology of sodium hypochlorite," *Clinical toxicology*, 57, 5, 303-311, 2019. <https://doi.org/10.1080/15563650.2018.1543889>

[40] A. Kondritzer, W. Mayer, and P. Zvirblis, "Removal of sarin from skin and eyes," *Arch. Indust. Health*, 20, 1, 50-52, 1959.

[41] F. Racioppi, et al., "Household bleaches based on sodium hypochlorite: review of acute toxicology and poison control center experience," *Food and chemical toxicology*. 32, 9, 845-861, 1994. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(94\)90162-7](https://doi.org/10.1016/0278-6915(94)90162-7)

[42] I. Orel, H. Graf, and P. Riou, "Decontamination efficacy of sodium hypochlorite solutions for poliovirus," *Biologicals*, 67, 75-80, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biologicals.2020.07.007>

[43] P.W. Bartram, and G.W., "Wagner, Decontamination of Chemical Warfare Agents Using Activated Aluminum Oxide," 1997, Google Patents: United States of America.

[44] Brown, R.S., et al., "Decontamination of chemical warfare agents using a reactive sorbent," Google Patents, 2005.

[45] J.M. Boyce, and D. Pittet, "Guideline for hand hygiene in health-care settings: recommendations of the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee and the HICPAC/SHEA/APIC/IDSA Hand Hygiene Task Force," *American journal of infection control*, 30, 8, S1-S46, 2002.

[46] U. Abbasoğlu, "Dezenfektanlar: Sınıflama ve Amaca Uygun Kullanım Alanları," 6. Sterilizasyon Dezenfeksiyon Kongre Kitabı, Antalya, 109-120, 2009.

[47] B. Gürler, "Mirkoorganizmaların Dezenfektan Maddelere Karşı Oluşturduğu Direnç," *Hastane İnfeksiyonları Dergisi*, 7, 3, 137-140, 2003.

[48] D. Adams, et al., "Evaluation of a 2% chlorhexidine gluconate in 70% isopropyl alcohol skin disinfectant," *Journal of Hospital Infection*, 61, 4, 287-290, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2005.05.015>

[49] H. Demirağ, and S. Hintistan, "COVID-19'un klinik yönetimi ve hemşirelik".

Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 9, 2, 222-231, 2020. <https://doi.org/10.37989/gumussagbil.727393>

[50] E.D. Kartal, "Deri Antiseptisinde Yeni Stratejiler," 10. Uluslararası Sterilizasyon Dezenfeksiyon Kongresi. Belek/Antalya., 2017.

[51] M. Eterpi, G. McDonnell, and V. Thomas, "Disinfection efficacy against parvoviruses compared with reference viruses," *Journal of Hospital Infection*, 73, 1, 64-70, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2009.05.016>

[52] A.F. Özel and G. Turun, "Balık Çiftliklerinde Kullanılan Dezenfektanlar," II. International Hygiene Conference, Ankara, 2022.

[53] Chauret, C., "Sanitization," *Encyclopedia of Food Microbiology*, Academic Press: USA., 360-364, 2014.

[54] E. Fu, K. McCue, and D. Boesenberg, "Chemical Disinfection of Hard Surfaces – Household, Industrial and Institutional Settings," *Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces*, Elsevier Science, 573-592, 2007. DOI:10.1016/B978-044451664-0/50017-6

[55] S. Arıkan, "Temizlik, Dezenfeksiyon ve Sterilizasyon," *Hastane İnfeksiyonları Dergisi* 1, 2, 61-68, 1997.

[56] R. Kakaiya, C.A. Aronson, and J. Julleis, "Collecting Blood and Samples for Processing and Compatibility Test", in *Technical Manual*, J. Roback, et al., Published by American Association of Blood Banks: ABD, 942-943, 2008.

[57] R.L. Berkelman, B. Holland, and R. Anderson "Increased bactericidal activity of dilute preparations of povidone-iodine solutions," *Journal of clinical microbiology*, 15, 4, 635-639, 1982. <https://doi.org/10.1128/jcm.15.4.635-639.1982>

[58] A. Tam, et al. "Effect of different iodine formulations on the expression and activity of *Streptococcus mutans* glucosyltransferase and fructosyltransferase in biofilm and planktonic environments," *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 57, 5, 865-871, 2006. <https://doi.org/10.1093/jac/dkl085>

[59] M. Nishimura, et al. "Comparison of the hand disinfectant effects between super hypochlorous water and 7.5% povidone-iodine," *Pediatric Dental Journal*, 14, 1, 1-3,

2004. [https://doi.org/10.1016/S0917-2394\(04\)70001-4](https://doi.org/10.1016/S0917-2394(04)70001-4):

[60] M.N. Khan, and A.H. Naqvi. "Antiseptics, iodine, povidone iodine and traumatic wound cleansing," *Journal of tissue viability*, 16(4):6-10, 2006. [https://doi.org/10.1016/S0965-206X\(06\)64002-3](https://doi.org/10.1016/S0965-206X(06)64002-3)

[61] Rabenberg, V.S., et al. "The bactericidal and cytotoxic effects of antimicrobial wound cleansers," *Journal of athletic training*, 37, 1, 51, 2002.

[62] UTILIS. "EasyDECON™ DF200 Kimyasal ve Biyolojik Dekontaminasyon Solüsyonu ve QuickDECON™ Radyasyon Dekontaminasyon Solüsyonu", <http://www.utilis.com.tr/?/hizmet/214/EASYDECON%AE-DF200----->. (01.06.2022).

[63] Y. Woo, et al. "Determination of hydrogen peroxide concentration in antiseptic solutions using portable near-infrared system," *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 33, 5, 1049-1057, 2003.

[https://doi.org/10.1016/S0731-7085\(03\)00420-5](https://doi.org/10.1016/S0731-7085(03)00420-5):

[64] Linley, E., et al. "Use of hydrogen peroxide as a biocide: new consideration of its mechanisms of biocidal action," *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 67, 7, 1589-1596, 2012. <https://doi.org/10.1093/jac/dks129>

[65] G.E. McDonnell, "Antiseptics, disinfection, and sterilization. Types, action, and resistance," *International Microbiology*. 10:295-298, 2007.

[66] J.M. Boyce, "New approaches to decontamination of rooms after patients are discharged," *Infect Control Hosp Epidemiol*. 30, 6, 515-7, 2009.

<https://doi.org/10.1086/598999>

[67] G. Kampf, et al. "Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents," *Journal of Hospital Infection*, 104, 3, 246-251, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.01.022>:

[68] A.S. Bidra et al. "Comparison of in vitro inactivation of SARS CoV-2 with hydrogen peroxide and povidone-iodine oral antiseptic rinses," *Journal of Prosthodontics*, 29, 7, 599-603, 2020. <https://doi.org/10.1111/jopr.13220>

[69] Bozbıyık, A., et al. "Nükleer silahlar: Üretimi ve etkileri". *Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi*, 10, 10, 386-387, 2001.

[70] NEWS, "Overexposure of a member," <https://www.news.iaea.org/ErfView.aspx?mId=589eee98-3f83-48a5-aaaa-b4e0fd4f451d> (09.12.2023).

[71] R.P. Gale, and J.O. Armitage. "Are we prepared for nuclear terrorism?" *New England Journal of Medicine*, 378, 13, 1246-1254, 2018. 10.1056/NEJMSr1714289:

[72] ICRP, "Dose Coefficients for External Exposures to Environmental Sources", <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20144>. (15.09.2023).

[73] G. Erdem, "KBRN," in *Acil Yardım ve Afet Yöneticileri İçin Hastane Öncesi Acil Tıp*, Kongre Kitapevi, Ankara, 1053-1083, 2019.

[74] Nyonoksa explosion, "Database of radiological incidents and related events--Johnston's Archive," <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/2019RUS1.html>. (20.12.2023)

[75] VRT, "Badly packaged nuclear consignment on plane to Brussels", https://www.vrt.be/vrtnws/en/2017/07/30/badly_packaged_nuclearconsignmentonplanetobrusse-1-3035577/. (22.12.2022)

[76] R.E. Goans, "Medical management of radiological casualties," *Armed Forces Radiobiology Research Inst Bethesda Md*. 2010.

[77] S.L. Sugarman, "Decontamination", *The Medical Aspects of Radiation Incidents*, 33-38, 2017.

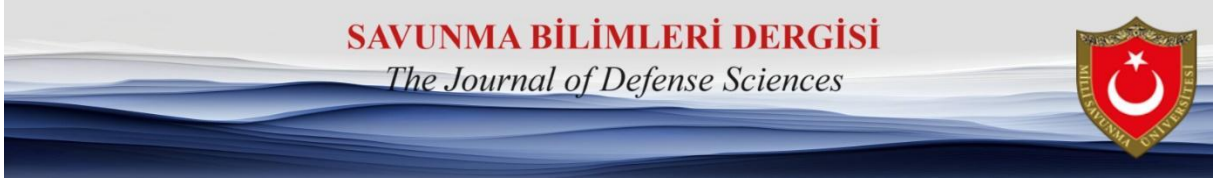
[78] M.D. Kaminski, S.D. Lee, and M. Magnuson, "Wide-area decontamination in an urban environment after radiological dispersion: A review and perspectives," *Journal of hazardous materials*, 305, 67-86, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.11.014>:

[79] Ince, S, "External Contamination and Decontamination Techniques". *Nucl Med Semin*, 3:211 215, 2017.

[80] G.C. Benjamin, M. McGeary, and S.R. McCutchen, "Assessing Medical Preparedness to Respond to a Terrorist Nuclear Event: Workshop Report". Washington, DC: The National Academies Press: Institute of Medicine, 2009.

[81] REMM, "Guidance on Diagnosis and Treatment for Healthcare Provider," <https://www.remm.nlm.gov/>. (05.01.2024).

[82] Li, C., et al., "Managing internal radiation contamination following an emergency: identification of gaps and priorities,". Radiation protection dosimetry. 171, 1, 78-84, 2016. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw199>:



<https://dergipark.org.tr/pub/khosbd>

Ballistic Performance of ETİAL-171 (A360) Aluminium

ETİAL-171 (A-360) Alüminyum'un Balistik Performansı

Baran ÖZDEMİR^{1,*}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 18.04.2023
Düzeltilme: 23.06.2023
Kabul: 02.10.2023

Keywords

ETİAL-171 (A-360)
Alüminyum
Ballistic Performance
EN-1522-1523
FB3-Class

Anahtar Kelimeler

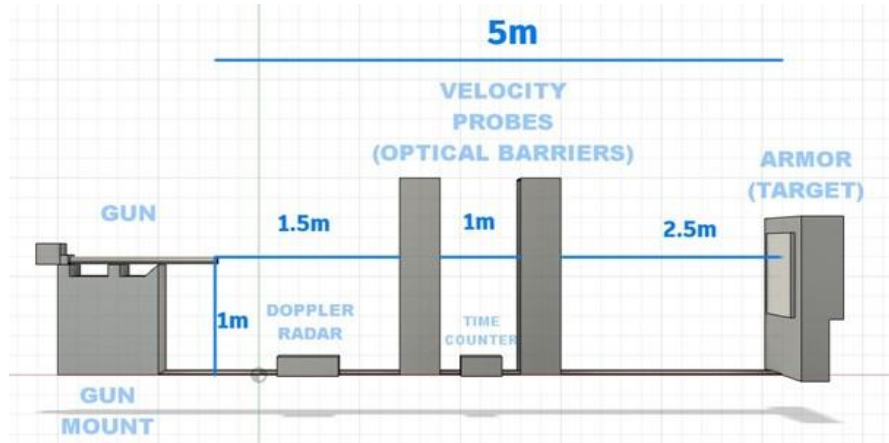
ETİAL-171 (A-360)
Alüminyum
Balistik Performans
EN-1522-1523
FB3-Sınıfı

Önemli Noktalar / Highlights

ETİAL-171 (A-360) Alüminyum 9x19 mm mermilere karşı göreceli olarak güzel performans sergilemiştir. Fakat, FB3-Sınıfı şartları için gereksinimleri karşılamamaktadır. ANSYS ile yapılan sümülyasyon testleri neticesinde, ETİAL-171 Alüminyum'un kafes zırhı olarak kullanılabilceği kanıtlanmıştır.

The ETİAL-171 (A-360) Aluminum performs relatively good performance against 9x19mm bullets. However, this performance did not satisfy the requirements of FB3-Class. It has been proven by the ANSYS data that the ETİAL-171 series can be used for cage armor.

Grafiksel Özet / Graphical Abstract



Abstract

This study was prepared to determine the ballistic protection capacity of ETİAL-171 (A360) series aluminum. The ballistic tests were divided into two parts, the amateur part which used 9x19 mm ammunition at a distance of 16 meters, and the professional part based on ballistic laboratory data using 357 magnum ammunitions. As a result of these tests, the ETİAL-171 aluminum was able to hold 3 out of 5 bullets based on 9x19 mm bullets, and it was not successful against 357 magnum bullets. When this resistance is evaluated, ETİAL-171 series aluminum cage armor can be used against chemical energy ammunition.

Özet

Bu çalışma ETİAL-171 (A360) serisi alüminyumun balistik koruma kapasitesini belirlemek amacıyla hazırlanmıştır. Balistik testler, 16 metre mesafede 9mm mühimmat kullanılan amatör kısım ve 357 magnum mühimmat kullanılan balistik laboratuvar verilerine dayanan profesyonel kısım olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Bu testler sonucunda ETİAL-171 alüminyum, 9mm mermiler baz alındığında 5 mermiden 3'ünü tutabilmiş, 357 magnum mermilere karşı ise başarılı olamamıştır. Bu direnç değerlendirildiğinde ETİAL-171 serisi alüminyum kafes zırh kimyasal enerjili mühimmatlara karşı kullanılabilir.

*Corresponding author, e-mail:235104109@aybu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Sectoral use of non-ferrous metals increases day by day on a world basis. In this respect, the nonferrous metals show widely varying projected growth rates; the growth rate for aluminum, 4.3 percent per year, is the largest [1]. One non-ferrous metal that has become increasingly important in the defense and military sectors is aluminum. Some series of aluminum are prominent in ballistic and aerospace applications such as 2000, 5000, 7000, and 8000 series aluminum. The first generation of ballistic aluminum armor is the 5000 series by U.S. Military Standards. Aluminum Alloy (AA) 5083-H131 has been used in systems such as the M1113, the M109, and the USMC Amphibious Assault Vehicle (AAV), in accordance with specification MIL-DTL-46027J [2]. This alloy is preferable because of its lighter weight, ease of weldability for manufacturing purposes, level of performance against fragmentation-based threats, and excellent corrosion resistance [2]. After that, the 7075-T6 aluminum alloy is being used as an armor for most of the combat vehicles. It is a heat treatable alloy provides improved protection at all angle and can have very good mechanical properties. Since the minimum weight for the given level of protection also comes into play to considerable mobility, 7075-T6 aluminum alloy armor plates are extensively used for armor vehicle [3]. Also, the 7075 series aluminum is suitable for different heat treatment methods to obtain better mechanical properties. For instance, a new heat treatment route was designed, and the effects of

pre-deformation on the retrogression and re-aging (RRA) and 17500 h natural aging (NA) heat treatment were investigated [4]. The results showed that the hardness values, dislocation densities, and lattice strain of the pre-deformed RRA + NA specimens were increased compared to the pre-deformed RRA specimens [4]. Thus, 7000 series aluminum has become the optimum quality for armored vehicles and ballistic properties with different heat treatments and strengthening works. Moreover, some aluminum series have been reinforced with SiC, B₄C, Al₂O₃, and ceramic particles to produce functionally graded material (FGM) and hybrid composites for more resistant defensive materials. These works show that aluminum can be excellent additive with different ceramics for composite armor. For example, the hot-rolled FGM specimen reinforced with B₄C offered the lowest density. The microhardness was improved by 32% and 30.4% in the inner to outer regions of the SiC- and Al₂O₃-reinforced FGMs, respectively, while it was improved by 22.6% in B₄C-reinforced FGM. On the other hand, the tensile strength and elongation of the B₄C-reinforced FGM specimen were better than those of the SiC- and Al₂O₃-reinforced FGMs [5]. In addition, the highest ballistic protection was achieved with B₄C-reinforced laminated FGM at an impact speed of 664.25 m/s with a penetration depth of 14 mm, while the impact speeds of SiC- and Al₂O₃-reinforced FGMs were 500.88 and 435.23 m/s, respectively [5]. In addition, studies have also been conducted on a hybrid Al-matrix composite reinforced with

both SiC and B₄C ceramic particulates. For example, the hybrid composite demonstrated a very high dynamic compressive strength (over 1.5 GPa), along with a good total strain of 11.7%, which readily reached an undiscovered strength area (far over 1.2 GPa) of typical composites [6]. The results showed that the hybrid composite was radially cracked with a small hole-mark and a few fallen-off debris, which indicated the higher ballistic properties than those of the SiCp- or B₄Cp-reinforced composite because of outstanding dynamic compressive strength and strain [6]. Lastly, the 2000 series aluminum has been developed for armored vehicles due to its high mechanical properties. The 2139-T8 has a higher ultimate tensile strength (~6% greater than 2519-T87,

~7% than 7039-T64, and ~30% greater than 5083-H131 when compared in the L direction), high hardness (~160 Brinell as compared with ~130-160 for alloys 7039 and 2519 and ~85 Brinell for alloy 5083) and is substantially tougher than all the other the tabulated aluminum alloys in all directions where they could be compared [7]. Furthermore, as with wrought aluminum grades, aluminum products produced by the casting process can also be used in military applications due to their required mechanical properties. The study aims to add the ballistic properties of cast ETIAL-171 (A-360) series aluminum against 9x19 mm and 357 magnum bullets to the literature and to evaluate it as cage armor with the help of ANSYS.

2. EXPERIMENTAL STUDIES

The ETIAL-171 aluminum plates required for this project were cast by the İnter Döküm in cubic 40x40x1 centimeter shapes. The casting process was carried out with green sand molding and an induction furnace with MgO lining at 700 °C. Figure 1 shows the image of the plate cast by the İnter Döküm. Figure 2 shows the composition of the elements that form the plate.



Figure 1: Aluminum cast plate.

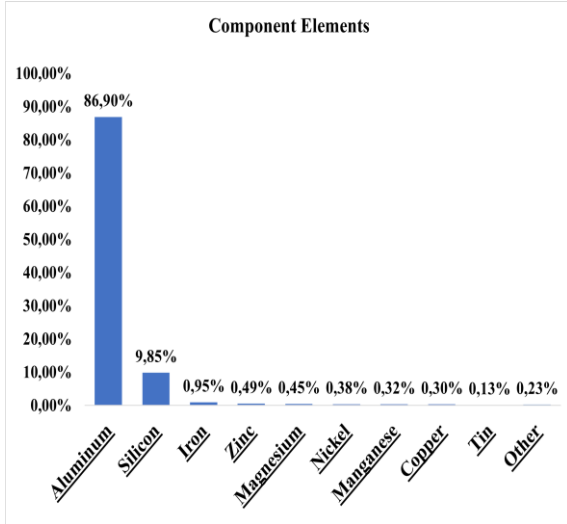


Figure 2: Component elements of cast plates.

(Analyzed by inductively coupled mass spectrometry)

The component elements on the figure 2 were found and confirmed by the Thermo iCAP RQ device. Then, the mechanical properties of the plates were determined. These measurements are obtained from the Qness hardness test machine and the UTEST (UTM 4000 and UTC 4940) test machines. The values of the plates in terms of mechanical properties are given in Table 1.

Table 1: Mechanical properties of cast plates.

Hardness, Brinell (HB)	72
Ultimate Tensile Strength (MPa)	298
Tensile Yield Strength (MPa)	145
Elongation (%)	3.2
Shear Modulus (GPa)	22.5
Shear Strength (MPa)	167

Two different methods and two different ammunitions were preferred for the shots on the

plates. The first method was carried out amateurishly using 9x19mm ammunition in such a way that there would be 5 shots in the open air from 16 meters without regard to angle. The second method was carried out in the KIM Technology ballistic laboratory by EN-1522-1523 standards by professionally using 357-magnum ammunition. After that, the testing of ETİAL-171 series aluminum as cage armor was carried out on a computer-based basis. The designs made in this study were created by the Fusion 360, and simulations were carried out with the ANSYS Explicit Dynamics.

2.1. ETİAL-171 Aluminum Plate Resistance Against 9x19mm Ammunition

ETİAL-171 series aluminum can be a very suitable alternative in the field of ballistics with its hardness above 70 HB and yield strength above 140 MPa. When these mechanical properties were evaluated, the suitability of low-caliber ammunition for testing was revealed. Low-caliber rounds are classified as ammunition with a core size of up to 7.62 mm and velocities below 1000 m/s. Considering the mechanical properties of the ETİAL-171 series plate and the effect of low-caliber ammunition, 9x19mm bullets have been preferred for firing. These munitions have an average velocity in the range of 360-420 m/s. Considering the weight of the projectiles and their speed, the energy of the projectiles varies in the range of several kilojoules (kj). The 9x19 mm ammunition has a complementary metal envelope and a rounded tip. This study was carried out in an amateur manner. A total of 5 shots were fired, and these shots were fired at a distance of 16 meters in an

amateurish manner, with no attention to the angle. Figure 3 shows a photograph taken during the amateur shooting.



Figure 3: A photograph taken during the amateur shooting.

Five different shots were fired at the aluminum plate amateurishly. These shots were fired one after the other, 3 on the front side and 2 on the backside. The ETİAL-171 Aluminum Plate succeeded to hold 3 of 5 shoots on the surface. Figure 4 shows the plate after the amateur shots.

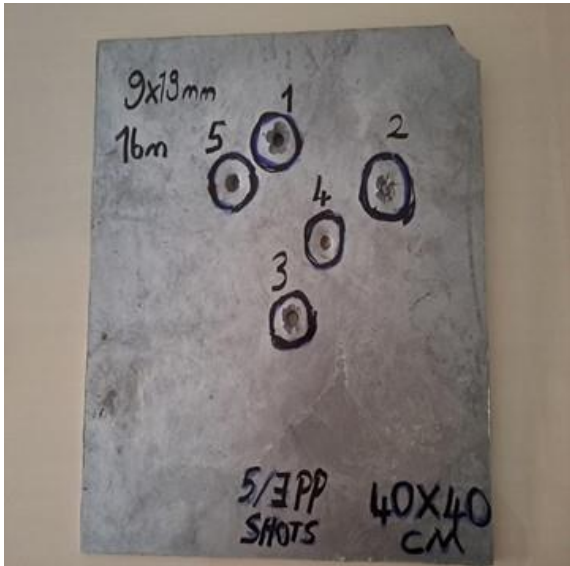


Figure 4: Plate after the amateur shots.

After these shots, the plate was professionally tested at the KIM Technology ballistic laboratory according to EN-1522-1523 standards.

2.2. ETİAL-171 (A-360) Aluminum Plate Resistance Against 357 Magnum Bullet in Accordance with EN-1522-1523 Standards

The work in this section has been carried out according to EN 1522 / 1523 Standards. This standard defines the requirements and classification that windows, doors, shutters, and blinds must satisfy when tested in accordance with EN 1523. Figure 5 shows a schematic exploded view of the FB3 Class ballistic setup.

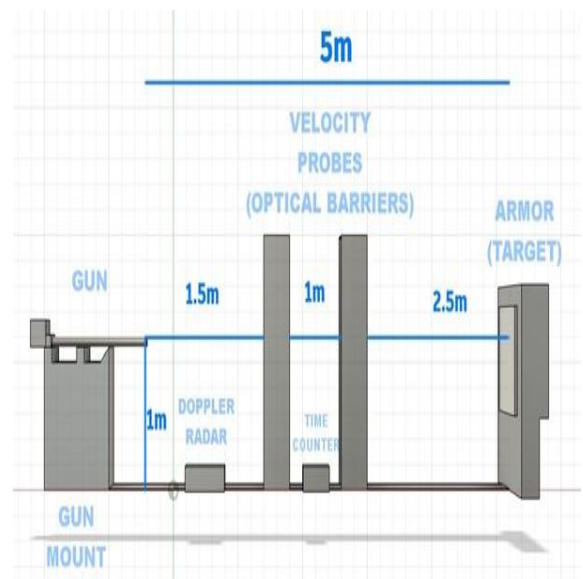


Figure 5: A schematic exploded view of the FB3 class ballistic setup.

This standard applies to attacks by handguns, rifles, and shotguns on windows, doors, shutters, and blinds complete with their frames and infills, for use in both internal and external locations in buildings. Shutters and Blinds must be tested separately and not in conjunction with a window or door, to achieve classification in terms of bullet resistance. When applying this standard, the FB3 Class was preferred instead of the FB2 Class. In the FB2 Class, the 9 mm Luger bullet had already been applied to the plate amateurishly. The effect of the 357-

magnum bullet with higher speed and weight on the plate would be more useful in determining the ballistic resistance of the ETİAL-171 plate. The characteristics and velocity values of the bullet are given in Table 2.

Table 2: Classification and requirements for testing with handguns and rifles (EN-1522-1998 Standards.).

Class	Type of Weapon	Caliber	Bullet		Test condition	
			Type	Mass (g)	Test range (m)	Bullet velocity (m/s)
FB1	Rifle	22LR	L/RN	2.6 ± 0.1	10 ± 0.5	360 ± 10
FB2	Handgun	9 mm Luger	FJ ¹ /RN	8.0 ± 0.1	5 ± 0.5	400 ± 10
			/SC			
FB3	Handgun	357 Mag.	FJ ¹ /CB	10.2 ± 0.1	5 ± 0.5	430 ± 10
			/SC			
FB4	Handgun	357 Mag.	FJ ¹ /CB	10.2 ± 0.1	5 ± 0.5	430 ± 10
			/SC			
	Handgun (see note)	44 Rem. Mag.	FJ ² /FN/SC	15.6 ± 0.1	5 ± 0.5	440 ± 10
FB5	Rifle	5.56 x 45*	FJ ² /PB/SCP1	4.0 ± 0.1	10 ± 0.5	950 ± 10
FB6	Rifle	5.56 x 45*	FJ ² /PB/SCP1	4.0 ± 0.1	10 ± 0.5	950 ± 10
	(see note)	7.62 x 51	FJ ¹ /PB/SC	9.5 ± 0.1	10 ± 0.5	830 ± 10
FB7	Rifle	7.62 x 51**	FJ ² /PB/HC1	9.8 ± 0.1	10 ± 0.5	820 ± 10

- L Lead
- FJ¹ = Full steel jacket (plated)
- CB Conned bullet
- FJ² = Full copper alloy jacket
- FJ Full metal jacket bullet
- FN Flat nose bullet
- HC1 Steel hard core, mass (3.7 ± 0.1) g hardness more than 63HRC
- PB Pointed bullet
- RN Round nose bullet
- SC Soft core (lead)
- SCP1 Soft core (lead) with steel penetrator (type SS109)

* To achieve stated values for (5.56 x 45), the recommended barrel twist length = (178±10) mm.

** To achieve stated values for Class FB7, the recommended barrel twist length = (254±10) mm.

For this test, soft point ammo is used, and two of the three shots required have been successfully applied by the KIM Technology. The last shot was not fired. Figure 6 shows the performance of the plate after shots.



Figure 6: ETİAL-171 plate after 357-magnum shots.

The report generated within the scope of that test by the KIM Technology. Table 3 shows the ballistic test report data.

Table 3: Ballistic test report data.

Name of Ballistic Test Standard	TS EN 1522/1523	
Level of Ballistic Test Standard	FB3	
Date	20.12.2022	
Time	10:00	
Test Number	20122022-1	
Ambient Temperature (°C)	19,9	
Ambient Humidity (%RH)	50,2	
Sample Information		
Owner of Sample	Yıldırım Beyazıt Üniveristesi	
Name of Sample	20122022-1	
Serial Number	-	
Weight / Size	*/400x400 mm	
Test Equipment		
Shot Distance (m)	5	
Velocity Reading Distance (m)	2,5	
Barrel / Gun	.357 Mag	.357 Mag
Bullet Weight / Gunpowder Amount (gn)	157,4 gn	-
Backing Material		
Name	Temperature	
-	-	
Results of Drop Test	-	
- - - - -	Average	-

Shot No	Velocity (m/s)		Deformation	Penetration (CP-PP)
1	431,2	431,3	-	CP
2	432,8	432,9	-	CP
Notes: -				
(a): Low Velocity				
(b): High Velocity				
(Possible Velocity Interval): 430 ± 10 m/s				
CP: Complete Penetration				
PP: Partial Penetration				

2.3. ETİAL-171 Aluminum Cage Armor Simulation

The densities of aluminum alloy vary between 2.66-2.84 g/cm³. The aluminum alloy has good advantages with density values, and impact-damping capacity. They have been used as door struts, windshield frames, extruded turret armor, and forged turret rings in light armored vehicles. In heavily armored tanks, it is used in the form of cage armor against high explosives and RPG ammunition. Chemical energy munitions, such as RPG, high-explosive (HE), high-explosive anti-tank (HEAT), and high-explosive squash heads (HESH), are freely directed at the target on impact. Typically, the copper or aluminum metal wall material is conical in shape, with the inner side facing in the opposite direction, and with the explosion, all the energy is concentrated in the focus of the conical inner surface, forming a long jet directed at the target. In simple terms, this is a metallic mass directed toward the target at extremely high velocity and pressure. In a sense, the metallic conical wall has now become a penetrator, and the impact velocity reaches 7-9 km/s, compared to 1-2 km/s for typical

penetrators. The metallic conical-shaped design is surrounded by explosives. With detonation, the explosives collapse into this conical structure, focusing it and compressing it with heat and detonation energy, creating a plasma jet of 8000-9000 m/s (25 Mach) [8]. The metallic layer is not molten but exhibits a fluid behavior under the influence of high pressure. Thus, when it hits the tank armor, the extremely high pressure deforms the armor, pushing the armor material and creating a penetration hole in front of the plasma jet. This type of explosive reaches stresses that exceed the mechanical strength of the armor in local areas of the armor with high pressure. Cage armor is used to minimize the effect of such explosives. Thus, it is aimed to lose the high pressure of the chemical energy ammunition detonated before it reaches the main armor. In this type of cage armor, 5083-H131, 7039-T64, 7075-T6, and 2519-T87 aluminum plates are used. In this section, the ETİAL-171 series aluminum is designed as cage armor with the help of the Fusion 360. Then, the resistance values that this design would be calculated against chemical-powered munitions were found with the help of the ANSYS Explicit Dynamics. Figure 7 shows the technical drawing of cage armor, ammunition, and main armor to describe the test design generated by the Fusion 360. In the simulation, the main armor is RHA, the cage armor is the ETİAL-171 Aluminum, the ammunition is 120 mm HE with a total of 4.5 kg TNT. Figure 8 shows the effect after detonation of the high explosive (HE) ammunition. Figure 9 shows the effect of the explosion on the ETİAL-171 aluminum.

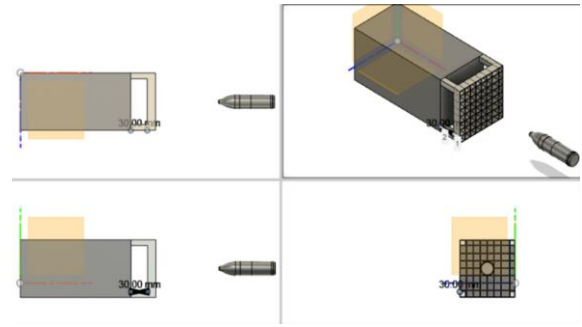


Figure 7: Technical drawing of the cage armor, ammunition, and main armor for test design.

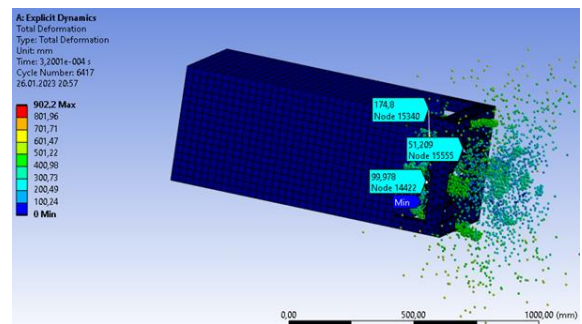


Figure 8: After detonation of the HE ammunition.

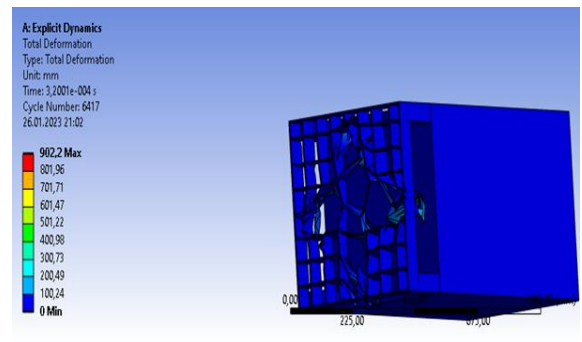


Figure 9: The Effect of the HE ammunition on the ETİAL-171 cage armor.

Then, these experiments were simulated again without cage armor. In order to better demonstrate the effect of the ETİAL-171 cage armor on the protection of the main armor. Figure 10 shows the impact and penetration of high explosive (HE) ammunition on the main armor without cage armor.

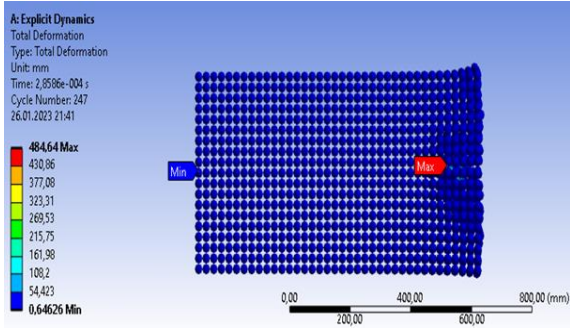


Figure 10: Impact and penetration of the HE ammunition on the main armor without cage armor.

High explosive ammunition, RPG, and various artillery shells reach very high values in terms of areal energy density. They create shock pressures during the explosion with the intensity level of energy density. Figure 11 shows blast wave and pressure difference during the explosion.

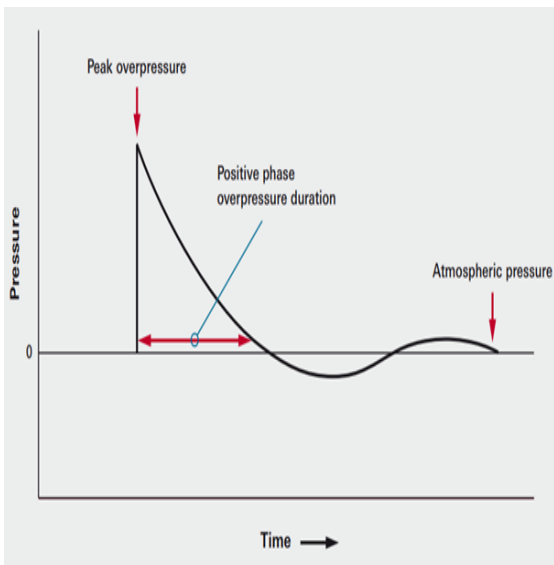


Figure 11. A visual representation of the blast wave, showing the pressure changes. [9,10].

Since it dampens and reduces this shock wave on the main armor, the ETİAL-171 aluminum stand out as a cage armor.

3. RESULTS AND DISCUSSION

According to simulation data, in a system protected by the ETİAL-171 cage armor, the high-explosive projectile could not show any penetration characteristics on the main armor. ETİAL-171 series aluminum, in terms of hardness and other mechanical properties, had the effect of breaking the integrity of the projectile. The fact that the explosion took place in the atmosphere ensured that the armor did not show creep behavior under high pressure and temperature. The ETİAL-171 cage armor protection systems provide excellent protection against high explosive projectiles, even though its total deformation is two times greater than that of RHA steel. The 120 mm HE ammunitions can penetrate up to 200 mm into RHA steel without cage armor.

ETİAL-171 (A-360) series aluminum reaches very good values in terms of mechanical properties. Even, the plate suffered a 5% loss of mechanical properties due to the low quality of the raw material during the casting process in this project. The density value of A-360 Aluminum is between the 5083-H131 series aluminum and the 2219-T87 series aluminum. This aluminum series is not processed without any heat treatment, with excellent viscous behavior and high silicon content during casting. The ammunitions and the kinetic energy they are generate as follows:

$$E(kinetic) = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (1)$$

E_k of 9mm Luger:

$$= \frac{1}{2} \times 8.0g \times 400^2 m^2/s^2 = 640Joule$$

E_k of 357 Magnum:

$$= \frac{1}{2} \times 10,2g \times 430^2 m^2/s^2 = 943 \text{Joule}$$

The 357-magnum ammunition also has a different design in terms of its envelope and softness. With this bullet structure, it penetrates the plate in the form of plugging. When penetration in metallic armor is considered, there is a direct relationship with the thickness of the target. If expressed by the formula:

$$h = \left(\frac{mv^2}{\pi D^2} \right) \times \frac{1}{\sigma_0} \quad (2)$$

“h” is the thickness of the target; “D” is the bore diameter (equal to the projectile diameter); “m” and “v” are the penetrator mass and velocity, “ σ_0 ” is the target strength.

ETİAL-171 series aluminum was able to hold 3 out of 5 shots fired from 16 meters using a 9x19mm bullet on the armor. For the 9x19mm Luger bullet, the armor plate with 72HB hardness showed that it did not have the strength to break the core of the bullet, but with its relatively high toughness value, it did not allow the bullet to pass through the armor with a success rate of 60%. Moreover, when we examined the data simulated as cage armor, we obtained the results that high-explosive chemical energy projectiles would apply the necessary pressure on the trigger mechanism for detonation in a way that minimizes the effect on the main armor. According to the simulations, we minimize the stress value of 484 MPa on the main armor with the cage armor. In addition, the maximum deformation data on the cage armor reaches a stress value of 902.2 MPa. This difference shows us the difference in strength between RHA steel and ETİAL-171 Aluminum.

It is obtained from simulation data that it will be a useful alternative to cage armor. As a result of firing with 357-Magnum bullets, it was unsuccessful to keep the bullets on the armor. The 357-Magnum projectile was successful in penetrating the armor with its 943 Joules kinetic energy and round nose flat point made of high-strength metal. ETİAL-171 aluminum in its no heat-treated form was partially successful up to the FB3 projectile penetration class, but it is insufficient for the FB3 projectile penetration class. It shows insufficient performance as a personal ballistic protector. Resistance against FB3 class can be provided, by applying to quench, tempering heat treatments, and cold or hot work on this subject. However, it is an ineffective option, considering its weight and density. In addition, with these weight and density values, success can be achieved in accessories such as doors, window edges, aerospace material, and door handles in building protection systems. Moreover, it can show excellent backbone performance and shrapnel-damping capability with its toughness.

4. CONCLUSIONS

Armor technologies consist of advanced composites with developing material technology. With these composites, high mechanical properties are optimized with appropriate weight values. Aluminum is used in some protection systems and aerospace applications with its cheap production, easy shaping, and relatively good mechanical properties. While the A-360 aluminum series is ideal as cage armor, it is insufficient as individual protective equipment. Heat treatment can be applied to increase mechanical properties

for different protection classes. However, the increasing core weight with the speed of the bullets reveals the inadequacy of aluminum together with the reports. Therefore, it is healthier to use this series of aluminum as a cage armor system, and shrapnel damping system.

5. LIMITATIONS OF THE PROJECT

The simulations performed within the scope of this project are carried out by the ANSYS Explicit Dynamics student version. This situation creates certain limitations. These limits are due to the use of the student version. Problem size limits are Structural Physics: 128K nodes/elements., The simulation data can be elaborated and repeated in more detail in different ways due to this situation. The simulation data used in this study were made in a way that can be compared with real data.

ACKNOWLEDGMENTS

This research has not received any external funding. I would like to thank Mazaka Endüstriyel Ürünler Sanayi Ticaret ve Teknoloji A.Ş., İnter Döküm A.Ş., and KİM Kayseri İleri Malzemeler Sanayi ve Teknoloji A.Ş. for their assistance in the use of appropriate facilities and the processing of the products.

AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

Baran ÖZDEMİR: Conceptual design, Data curation, Analysis, Funding acquisition, Research, Methodology, Project management, Resources, Software, Audit, Approval, Visualization, Writing-Draft, Writing-Reviewing, Editing, and Experimental studies.

CONFLICTS OF INTEREST

The author declares that he has no conflict of interest.

REFERENCES

- [1] G. O. Barney, *Global 2000: The Report to the President--entering the Twenty-first Century*. 1991.
- [2] D. D. Showalter, B. E. Placzankis, and M. S. Burkins, "Ballistic performance testing of aluminum alloy 5059-H131 and 5059-H136 for armor applications," May 2008. doi: 10.21236/ada481176.
- [3] S. K. Sundaram, A. Bharath, and B. Aravind, "Influence of target dynamics and number of impacts on ballistic performance of 6061-T6 and 7075-T6 aluminum alloy targets," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 50, no. 3, pp. 993–1011, Mar. 2020, doi: 10.1080/15397734.2020.1738245.
- [4] G. Altuntaş and B. Bostan, "Metallurgical characterization of natural aging effects on pre-deformed Al 7075/T651 alloy during retrogression and re-aging heat treatment," *Kovové Materiály (TlačEné Vydanie)*, vol. 60, no. 4, Sep. 2022, doi: 10.31577/km.2022.4.209.
- [5] Ş. Karabulut, H. Karakoç, M. Bilgin, H. Canpolat, G. Królczyk, and M. Sarıkaya, "A comparative study on mechanical and ballistic performance of functionally graded Al6061 composites reinforced with B₄C, SiC, and Al₂O₃," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 5050–5065, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.02.116.
- [6] M. C. Jo *et al.*, "Novel dynamic compressive and ballistic properties in 7075-T6 Al-matrix

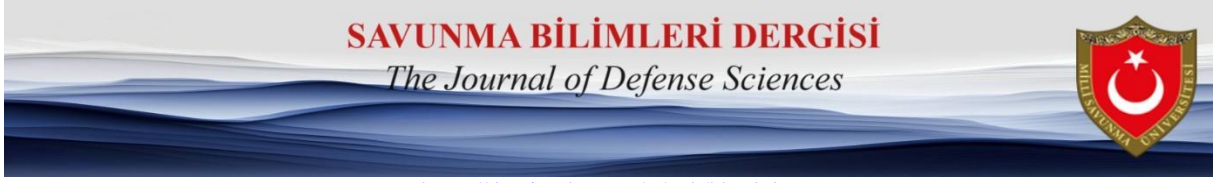
hybrid composite reinforced with SiC and B4C particulates,” *Composites. Part B, Engineering*, vol. 174, p. 107041, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107041.

[7] B. Cheeseman, W. Gooch, and M. Burkins, *Ballistic Evaluation of Aluminum 2139-T8*. 2008.

[8] T. Baykara, V. Günay, and A. Demirural, *Zırh Teknolojileri*, 1st ed. Yeditepe Üniversitesi Yayınevi, 2020.

[9] Baskin, T. W., & Holcomb, J. B. Bombs, Mines, Blast, Fragmentation, and Thermobaric Mechanisms of Injury. In *Ballistic Trauma* (pp. 45–66). SpringerLink. http://link.springer.com/chapter/10.1007/1-84628-060-5_3, 2005.

[10] Dullum, O., *The Rocket Artillery Reference Book*. Norway: Norwegian Defence Research Establishment. www.ffi.no/no/Rapporter/09-00179.pdf, 2010.



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Uzaktan Komutalı El Yapımı Patlayıcıların Doğaçlama Ev Yapımından Tüketici Elektroniği Bileşenleri ile Tasarımına Evrimi: Tehdit Şebekelerince Tüketici Elektroniği Pazarının Kullanımına Yönelik Bir Araştırma

Evolution Of Radio Controlled Improvised Explosive Devices From Improvised Homemade To Consumer Electronics Components: A Research On Potential Use Of Mass Market Consumer Electronics By Threat Networks

Serkan KOÇ^{1,*} 

¹ NATO CIED Center Of Excellence

Makale Bilgisi

Derleme

Başvuru: 23.05.2022

Dizelme: 01.07.2022

Kabul: 06.11.2022

Keywords

Improvised explosive devices
Electronic counter measures,
Consumer electronics
Technological trends
Threat networks

Anahtar Kelimeler

El yapımı patlayıcı
Elektronik karşı tedbirleri
Elektronik karşı tedbirleri
Teknolojik trendler
Tehdit şebekeleri

Önemli Noktalar / Highlights

El Yapımı Patlayıcılar genellikle basit malzemelerden yapılabilir ve düşük maliyetle üretilebilirler. El yapımı patlayıcıların çoğu, patlatıcılar, zamanlayıcılar veya uzaktan kumanda sistemleri gibi elektronik cihazlarla tetiklenir. Bu cihazlar tüketici elektroniği malzemelerinin hazır alınarak kullanılmaktadır.

Grafiksel Özet / Graphical Abstract



Özet

El Yapımı Patlayıcı (EYP) 'lar, yıkıcı, öldürücü, zarar verici etkileri olan, piroteknik veya yangın çıkarıcı kimyasallar içerebilen, doğaçlama bir şekilde yerleştirilen veya imal edilen ve yok etmek, etkisiz hale getirmek, taciz etmek veya dikkatini dağıtmak amacıyla tasarlanan cihazlardır. EYP 'ler askeri açıdan taktik silahlar olmakla birlikte stratejik etkiler yaratabilirler. Bu çalışmanın amacı, EYP yapımında terörist unsurlar ve tehdit şebekeleri tarafından sıklıkla kullanılan tüketici elektroniği ürünleri ve bu pazardaki mevcut eğilimlerin yanı sıra tehdit şebekeleri tarafından uzaktan komutalı EYP 'lerde ticari kullanıma hazır (COTS) ürünlerin artan kullanımını incelemektir. Çalışmanın alana temel katkısı, elektronik bileşenlerin pazardaki yüksek bulunabilirliği ve düşük fiyatının etkileri göz önüne alındığında, terör örgütleri ve tehdit şebekeleri tarafından kullanılan taktik, teknik ve prosedürler kapsamında, uzaktan komutalı EYP 'lerin tercih edilmesinin nedenleri, yeni teknolojilerin tehdide muhtemel etkileri ve tehdit şebekelerinin tüketici elektroniği malzemelerinin hazır alınarak kullanılmasına yönelik mevcut girişimlerinin ortaya konulmasıdır.

Abstract

Improvised Explosive Devices (IEDs) are devices that have destructive, lethal, damaging effects, that may contain pyrotechnic or incendiary chemicals, that are placed or manufactured in an impromptu manner and that are designed to destroy, neutralize, harass or distract. Although IEDs are tactical weapons from a military point of view, they can create strategic effects. The aim of this study is to reveal the current trends in the consumer electronics market, which is frequently used by terrorist organizations and threat networks in the construction of IEDs, as well as the increasing use of off-the-shelf (COTS) products in remote-controlled IEDs by threat networks. The main contribution of the study to the field is to reveal the reasons for the preference of remote-controlled IEDs within the scope of the tactics, techniques and procedures used by terrorist organizations and threat networks, the possible effects of new technologies on the threat, and the current attempts of threat networks to use readily available consumer electronics materials in the marketplace.

*Corresponding author, e-mail: serkankoc1982@gmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektronik endüstrisi 20. yüzyılda ortaya çıkmış ve sıradan insanların hayatına tüketici elektroniği olarak girmesinden bu yana her sene artan bir ivme ile büyüyerek trilyon dolarlık bir piyasa haline gelmiştir. Tüketici elektroniği pazarının baskın özelliği, elektronik ürünlerin sürekli artan bulunabilirliğidir. Moore Yasasına göre, yarı iletken bileşenlerin performansları her iki yılda bir iki katına çıkmaktadır. Bu eğilim, tüketici elektroniği pazarında ürün fiyatlarında bir düşüş eğilimine yol açmıştır. Genel olarak, bu durum elektronik endüstrisinde görülen üretim verimliliği artışı ve otomasyonda meydana gelen iyileşmelerin yanı sıra düşen işçilik maliyetleri ve genel tasarım iyileştirmelerindeki kazanımlar sonucu ortaya çıkmıştır. Omdia Tüketici Elektroniği Raporu'na göre tüketici elektroniği endüstrisi bugün 1,3 trilyon doların üzerinde bir değere sahiptir ve önümüzdeki yıllarda söz konusu endüstrinin piyasa değerinin daha da artması beklenmektedir. İkinci bir piyasa olarak göz önünde bulundurulabilecek küresel tüketici elektroniği onarım ve bakım pazarı ise, 2020'de tahmini 16,52 milyar ABD Doları artışla büyümeye devam etmektedir.

Uzaktan komutalı (Radyo Kontrollü) EYP'lerin yaygınlaşması, EYP'ler ile mücadele eden birimlere karşı, düşük maliyetli, oldukça esnek ve öngörülemeyen bir tehdit oluşturmuştur. Tüketici elektroniğinin pazarda yüksek mevcudiyeti ve hazır elektronik bileşenler, terör örgütleri ve tehdit şebekeleri tarafından uzaktan komutalı EYP yapımını kolaylaştırmaktadır. EYP'lerde ana imla hakkı adı verilen ve

patlayıcının yapımında kullanılan bileşenler genellikle amonyum nitrat gübresi, ağartıcı (peroksit), oje çıkarıcı, fren hidroliği, herbisitler, dezenfektanlar ve temizleme çözücüler gibi kolayca elde edilebilen ticari malzemelerdir. Bu ürünlerin ticareti, nakliyesi ve depolanması, tipik olarak, geleneksel mühimmatın nakliyesi ve depolanmasından daha az derecede inceleme ve düzenlemeye tabidir. EYP'ler üzerine yapılan araştırmalara göre, EYP yapımında kullanılan ticari mallar yasal üreticilerden terör örgütlerine doğrudan ulaşmamaktadır. Aksine, bölgesel dağıtım şirketlerinden birden fazla kullanım alanı olan malzemeler satın alan küçük yerel ticaret kuruluşları, gözetim zincirinin en zayıf halkası gibi görünmektedir. Söz konusu küçük kuruluşların istihbari açıdan gözetim altında tutulması da oldukça güçtür. Küçük işletmelerden kolaylıkla temin edilebilen elektronik malzemeler EYP yapımında kullanılan temel malzemelerdendir. Uzaktan komutalı EYP'lerde kullanılan en önemli elektronik bileşenlerden biri ise yarı iletkenlerdir. Tüketici elektroniği endüstrisinin arkasındaki merkezi itici güç, kendi başına 500 milyar dolara yakın yıllık satış rakamına sahip olan yarı iletken endüstrisi sektörüdür.

The International Criminal Police Organization (INTERPOL) 'a göre, organize bir biçimde milyarlarca dolarlık finansal kaynakları yöneten küresel suç örgütleri, sahte mal ticaretinden para kazanmaktan çekinmemektedirler. Uluslararası, bölgesel ve ulusal kanun uygulayıcı makamlar dünyanın birçok yerinde yürüttükleri soruşturmalarda, bu suç örgütleri

ile yasadışı uyuşturucu ticareti, kara para aklama ve yolsuzluk dahil olmak üzere diğer ciddi suçları işleyen örgütler arasındaki karmaşık bağlantıları ortaya çıkarmıştır. Bazı tahminlere göre, yasa dışı sahte ürün (fason elektronik malzemeler) işinin yılda 250 milyar doları fazlasıyla aştığını ortaya koymaktadır [1].

Bu sahte ürünlerin bir kısmı da, uzaktan komutalı EYP'lerin bileşenleri olarak kullanılabilir. Yapılan araştırmalarda bu sahte elektronik ürünler arasında güç dağıtım bileşenleri, transformatörler, şalt cihazları, röleler, kontaklar, zamanlayıcılar, devre kesiciler, sigortalar, dağıtım panoları ve kablolu aksesuarları, piller gibi kullanımı kolay birçok bileşen bulunmaktadır.

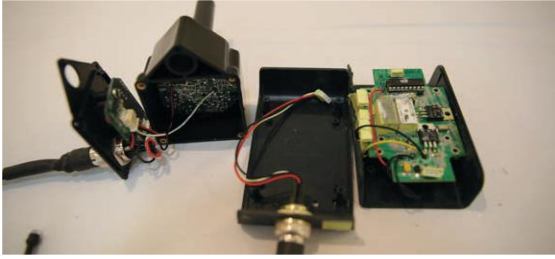
Bu çalışmanın amacı, EYP yapımında terörist unsurlar ve tehdit şebekeleri tarafından sıklıkla kullanılan tüketici elektroniği pazarındaki mevcut eğilimlerin yanı sıra tehdit şebekeleri tarafından uzaktan komutalı EYP'lerde ticari kullanıma hazır (COTS) ürünlerin artan kullanımını araştırmaktır. Çalışmanın alana temel katkısı, elektronik bileşenlerin pazardaki yüksek bulunabilirliği ve düşük fiyatının etkileri göz önüne alındığında, tehdit şebekelerinin tüketici elektroniği malzemelerini hazır bir biçimde alarak kullanmaya yönelik mevcut girişimlerinin ortaya konulmasıdır. Ayrıca terör örgütlerince hazırlanan EYP'lerin tespit ve imhasına yönelik yakın gelecekte daha sık kullanılabilir karşı tedbir sistemleri hakkında bilgiler verilecektir.

2. UZAKTAN KOMUTALI EYP TEHDİDİ (REMOTE CONTROLLED IED THREAT)

Uzaktan komutalı EYP'ler dünyadaki en yaygın EYP başlatma sistemidir. Tetikçi, ateşleme zincirini başlatmak veya ana şalteri devreye almak için elektromanyetik bir darbe göndererek cihazı çalıştırır. Elektromanyetik radyasyon yoluyla sinyal gönderip alabilen herhangi bir elektronik cihaz, Uzaktan komutalı EYP'lerin tetik anahtarı olarak kullanılabilir. Türlerine ve niteliklerine göre bu anahtarların bireysel avantajları ve sınırlamaları vardır. Örneğin son raporlara göre; Bahreyn'de uzaktan komutalı EYP yapımında kullanılacak elektronik kitleri ve kurban tarafından aktif edilen pasif kızılötesi (Passive Infrared-PIR) tetikleme bileşenleri bir arada kullanılmaktadır. Bu senaryoda, radyo kontrollü birimler, EYP'ye sadece devreye monte edilen PIR sensörü hedef tarafından ihlal edildiğinde aktif olabilecek şekilde bir sinyal gönderir. Çeşitli EYP olaylarında görüldüğü gibi, bir uzaktan komutalı EYP'nin yapımı, amaçlanan hedefe ve dost kuvvet karşı tedbirlerine ve terörist taktik, teknik ve prosedürlerine göre değişir [2].

EYP'lerin kullanımındaki son trendlere göre, terör örgütleri amaçlanan hedefe ve mevcut malzemelere göre cihaz tasarım ilkelerini belirlemektedir. Hedef bertaraf edilmesi vazgeçilmez derecede önemli olduğunda ve EYP saldırısının özellikle konvoyda gerçekleştirilmesi gerektiğinde, EYP'ler pasif bir kızılötesi sensör kullanılarak mobil telsizler tarafından tetiklenebilir. Cihazın güvenliği ve tetikleyicinin yanlışlıkla kendi kendini imha etmesine karşı korunması amacıyla ikincil ve üçüncül başlatma düzenekleri EYP'ye dahil

edilmektedir. EYP'lerin emniyetli biçimde etkisiz hale getirilmesi prosedürleriyle ilgili olarak, bu karmaşık tasarım, Patlayıcı Madde İmha (Explosive Ordnance Disposal/EOD) operatörünün görevini ciddi şekilde karmaşıktır. Raporlara göre, son yirmi yılda tüm EOD operatör ölümlerinin yaklaşık yüzde 36'sı, komutla başlatılan cihazların etkisiz hale getirilmesi esnasında meydana gelmiştir.



Şekil 1: Bahreyn Hizbullah militan hücrelerinde 2017-2018 yıllarında ele geçirilen bir Pasif Kızılötesi Alıcı (PIR) devresi [2].

Uzaktan komutalı EYP'ler, kablosuz başlatma sinyalini değişken mesafelerden göndermek için yapılarında çok çeşitli ticari ve ev yapımı almaç-göndermeç setleri içerirler. Hâlihazırda piyasada kolaylıkla temin edilebilen, çeşitli çıkış güçlerinde ve farklı frekanslarda haberleşme sağlayabilen elektronik cihazlar bulunmaktadır. Son yirmi yılda, terör örgütleri tarafından; Çift Tonlu Çoklu Frekans (DTMF), Uzun Menzilli Telsiz Telefonlar (LRCT), Kişisel Mobil Telsizler (PMR), Araba Alarmları, Oyuncaklar için RC Kontrol Cihazı, telemetri cihazları, çeşitli kablosuz iletişim cihazları ve cep telefonları gibi Tablo 1'de sunulan birçok uzaktan komutalı EYP anahtar varyasyonu kullanılmıştır. Tüketici

elektronığının çalışma frekansları, farklı yasal gereklilikler nedeniyle bölgeden bölgeye büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin Asya'da aynı dış görünüş ve tasarıma sahip uzaktan komutalı oyuncağın çalışma frekans aralıkları Afrika, Avrupa veya Amerika'dan önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Tüketici elektroniği artık her geçen gün çok daha kolay erişilebilir olması ve internet üzerinden herhangi bir kısıtlama olmaksızın satın alınabilmesi nedeniyle, söz konusu tehdide karşı başarılı bir savunma için ele geçirilen EYP'lerin teknik kıymetlendirilmesi (Technical Exploitation) ve bunun sonucunda üretilen değerlendirme raporu büyük önem taşımaktadır.

Tarihsel olarak incelendiğinde, bir terör örgütü tarafından EYP yapımında kullanılan malzemelerin diğer terör örgütleri tarafından da kullanıldığı açıkça görülebilmektedir. Örneğin, Bahreyn'de faaliyet gösteren bir terör örgütünün militanlarından, Husi isyancılarından ya da Yemen'deki Arap Yarımadası'ndaki El Kaide (AQAP) militanlarından ele geçirilen uzaktan komutalı EYP bileşenlerinin, toplu miktarlarda sipariş edilerek internetten temin edilebilecek çok yaygın kullanılan elektronik bileşenlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Yüksek güçlü bir elektronik cihazı açıp kapatmak ve kontrol etmek için kullanılan basit bir röle, büyük miktarlarda temin edilebilmekte ve çoğu uzaktan komutalı EYP tipinde kullanılabilir. Bu eğilim mikro denetleyicilerde de görülmektedir.

Tablo 1: Irak ve Arap yarımadasında karşılaşılan EYP'lerde bulunan elektronik bileşenler 2016-2018.

Elektronik Devre Elemanı	Bahreyn'de Kullanılan U/K'lı Kit ve PIR Sistemi	Yemen'de Husiler Tarafından Kullanılan U/K'lı Kit ve PIR Sistemi	Yemen'de Husiler Tarafından Kullanılan Mini/mikro İHA'lar	Yemen'de Kullanılan EYP'ler	Irak'ta DAESH Tarafından Kullanılan EYP'ler
HKE Sinyal Rölesi	X	X	X	X	X
Mikroçip Mikroişlemciler	X				X
Mikroçip Atmel Mikroişlemcileri	X		X		
Mikrosemi MT8770DE DTMF Almaç	X			X	
Nais AGN2004H Güç Geciktirici	X	X			
Omron GS6K-2-H PCB Güç Rölesi	X	X	X		
Panasonic Sinyal Rölesi	X				
Princeton Technology Corp PT2262 Uzaktan Komutalı Kodlayıcı	X				
ST Microelectronics Voltaj Düzenleyici	X	X	X	X	X
Woe Heat-Shrink Wrap	X	X	X		
Gri Kablo	X	X	X		

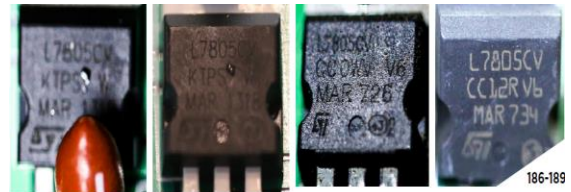
Birleşmiş Milletler'in (BM) en son raporlarına göre, silahlı grupların giderek daha karmaşık cihazları çeşitlendirme, tasarlama ve dağıtma konusundaki teknik kapasitesi artmaktadır.

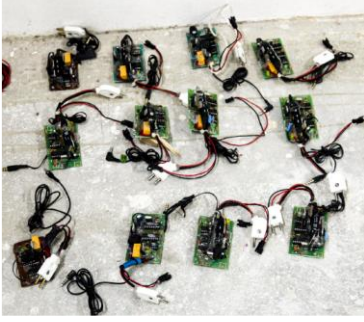
Tablo 2'de karşılaşılan EYP türlerine yönelik, tasarım ilkeleri ve farklı bölgelerde kullanılan malzemeler hakkında bilgiler sunulmuştur.

Tablo 2: EYP türlerine yönelik, tasarım ilkeleri ve farklı bölgelerde kullanılan malzemeler [3].

Ülke İsmi	Son Dönemde Karşılaşılan EYP'lerde Teröristlerce Kullanılan Tasarım Prensipleri	Terör Örgütlerince Kullanılan EYP Türleri	EYP Yapımında Kullanılan Materyal	Terör Örgütüne Yönelik Özel Bilgiler
Kongo Demokratik Cumhuriyeti	Askeri ve çift kullanım alanı bulunan elektronik bileşenlerle yapılan basit tasarımlar	Kablo komutalı EYP	Ele geçirilen askeri ya da ticari patlayıcı ve füyeler	Silahlı grupların giderek daha karmaşık cihazları geliştirmek, tasarlamak ve yerleştirmek için teknik kapasitelerinde bir artış gözlemlendi.
Nijerya	Askeri ve çift kullanım alanı bulunan elektronik bileşenlerle yapılan basit tasarımlar	Kurban tarafından tetiklenen EYP İnsan üzerine yerleştirilmiş intihar saldırısı niteliğinde EYP		
Somalia	Çift kullanım alanı bulunan ticari elektronik bileşenler ve kimyasallar	Araçlı saldırısı EYP	Savaş sonucu ele geçirilen askeri patlayıcılar	El-Şebab Terör Örgütü (Al-Shabaab), ev yapımı patlayıcılar kullanarak, EYP yapım yöntemlerinin çeşitlendiğini göstermektedir.
Kolombiya	Hedefi seçmek maksadıyla tasarlanmış kompleks EYP saldırısı	Kablo komutalı EYP		Kullanılan EYP'lerde görülen çeşitlilik, silahlı gruplar arasında teknik kapasitede bir artışa işaret etmektedir.
Yemen	EYP ana imla hakkı olarak anti personel mayınların kullanımı	Basma düzenekli EYP'ler	EYP'lerin çok sayıda fabrikasyon seviyede üretimi	Kurban tarafından tetiklenen EYP'lerin kullanımında görülen yeni taktikler mevcuttur. Örnek; EYP'lere müdahale eden personelin fark edememesi maksadıyla EYP'lerin kayaların içine gizlenmesi

Son yıllarda, Bahreyn'de ele geçirilen uzaktan komutalı EYP'ler ve Yemen'deki Husilerden ele geçirilen uzaktan komutalı EYP'ler ile dronlar incelendiğinde, mikrodenetleyiciler, güç röleleri ve voltaj regülatörleri gibi birçok elektronik bileşen söz konusu örgütlerce aynı marka ve modelde temin edilerek kullanılmıştır.

**Şekil 2:** PIC16F628A mikrodenetleyici.**Şekil 3:** Omron, NAIS ve HKE markalı güç röleleri.**Şekil 4:** STM markalı voltaj düzenleyiciler.



Şekil 5: DTMF alıcı devreleri.

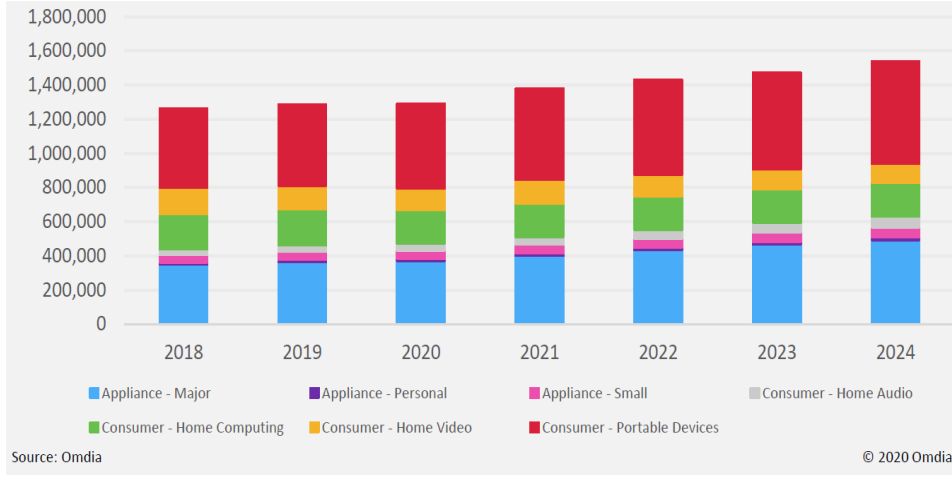
2.1. Tüketici Elektronik Pazarında Eğilimler

Tüketici elektroniği pazarındaki eğilimlerin EYP'ler üzerindeki etkilerini analiz etmeden önce, tüketici elektroniğinin neleri içerdiğinin net bir tanımını yapmakta fayda bulunmaktadır. “El Yapımı Patlayıcı Teknik Kıymetlendirme Sözlüğü”ne göre,

- Pazarda yaygın olarak bulunabilen tüketici elektroniği malzemeleri:
 - Uzaktan Komutalı Oyuncaklar
 - Beyaz Eşya/Küçük Ev Aleti Kumandası
 - Garaj Kapısı Kumandası
 - Kapı Zili
- Elde Kullanılabilen Telsizler
 - Kişisel Mobil Telsizler (PMR)
 - Radyo Almaç Göndermeçler
- Elde Kullanılmayan Telsizler
 - Taksi Radyosu
 - Herhangi Araç Gövdesine Monte Radyolar
- Kablosuz Telefonlar
 - Uzun Mesafe Kablosuz Telefon (LRCT)

- Yüksek Güçlü Kablosuz Telefon (HPCP)
- Cep Telefonu
 - Mobil Haberleşme Amaçlı Küresel Sistem (GSM)
 - Kod Bölmeli Çoklu Giriş (CDMA) Telefonu
- Diğer radyo haberleşme cihazları
 - Kablosuz Almaç (WICR)
 - Çift Tonlu Çok Frekanslı (DTMF) MOD 1-5 Cihazlar
 - Frekans Atlamalı Kablosuz Sensör Haberleşmesi (Multi-hop RF)
 - Havai Fişek Uzaktan Komutası
- Telemetri Sistemleri
 - Linx (DECT Telefonlar)
 - Maxstream (Radyo Modemler)
- Diğerleri.

Tüketici elektroniğine en geniş açıdan bakıldığında, günümüzde yapılan son araştırmalara göre, tüketici elektroniği endüstrisi 1,3 trilyon doların üzerinde bir değere sahiptir ve söz konusu endüstrinin önümüzdeki yıllarda istikrarlı bir şekilde büyümesi beklenmektedir. Gelişen ve yıkıcı teknolojiler ve mevcut teknolojilerde görülen yenilikler, pazarı yönlendirmeye devam etmektedir. Ayrıca, pazara sürülen her yeni ürünün sahip olduğu yetenekler müşteri beklentilerini beslemekte ve sonuç olarak insanların gerekirse başka harcama kalemlerinden kısıntı yapmak pahasına bu yeni teknolojilere yönelik harcama iştahlarını büyütme yol açmaktadır.



Şekil 6: Tüketici elektroniği gelirleri (ABD Doları) [4].

Terör örgütleri ve EYP tehdit şebekeleri, hazırladıkları EYP'lerde seri üretim ticari kullanıma hazır bileşenleri (COTS) her geçen gün daha fazla olacak şekilde kullanmaya devam etmektedirler. Özellikle radyo kontrol almaç-göndermeç kitlerinin kolay erişilebilirliği, terör örgütlerinin kullanımı açısından güvenilir ve emniyetli bir EYP yapımını kolaylaştırmaktadır. Pazarda mevcut ve tedariki kolay mikro denetleyicilerin internet vasıtasıyla verilen kendin yap tipi eğitimlerle (do it yourself) kolaylıkla programlanabilirliği ve söz konusu hazırlanan EYP'lerin çalıştırılabileceği çok geniş bir frekans aralığının mevcudiyeti, uzaktan komutalı EYP'yi dost güçlere karşı kullanılabilirlik etkili bir silah haline getirmektedir. Haberleşme elektroniği pazarının genişlemesi ve bunlara kolay erişim sayesinde, uzaktan komutalı EYP'lerin hazırlığı aşamasında kullanılan kitler çok az değişiklik gerektirmekte veya hiçbir tasarıma gerek kalmaksızın hazır olarak ana imla hakkına bağlanarak EYP olarak kullanılabilirlik. Mobil telsizler veya RF verici modülleri günümüzde artık her zamankinden daha yeteneklidir ve herhangi bir

uzaktan komutalı EYP içinde ateşleme anahtarı olarak kolayca kullanılabilirlik. Genel olarak, piyasada bulunan tüketici elektroniği malzemeleri, yüksek kalitede, güvenilir ve seri üretilmeleri nedeniyle düşük maliyetlidir. Ayrıca terör örgütüne başvurulacak saldırı taktiğine göre programlanabilmekte ve günümüzün karmaşık ve yoğun elektromanyetik spektrumunda çalışmak üzere tasarlanmaktadır. Geçmişte terör örgütleri, saldırı esnasında kullanacakları frekans belirlerken, piyasada mevcut olan RF cihaz veya almaç göndermeç modülü için önceden belirlenmiş frekanslar arasından seçim yapmaktaydılar. Ancak günümüzde çok daha geniş seçeneğe sahip olmanın özgürlüğünü kullanarak taktik ve tekniklerini belirleyebilmektedirler.



Şekil 7: Geçmişin basit PMR telsizleri 446 MHz.



Şekil 8: Çin üretimi Baofeng (20 Euro)136-174, 400-480, 430-450 MHz.



Şekil 9: Hazır kablosuz uzaktan komutalı algılayıcı anahtarlar (25 Euro).



Şekil 10: Pasif kızılötesi (0.44 Euro).

Bu cihazların kolay erişilebilirliği ve terör örgütlerince çokça kullanılabilirliği, tüketici elektroniği pazarındaki son dönemde görülen eğilimlerden kaynaklanmaktadır. Dünyada orta sınıf ekonomik statüdeki nüfus, son birkaç

yıldır hızla artmaktadır. Ayrıca, kentlerde yaşayan tüketicilerin yaşam tarzında bir değişim görülmektedir. Artan internet penetrasyonu ve artan gelir, tüketicilerin birden fazla elektronik cihaz kullanmasına imkân tanımaktadır. Bu süreç, önümüzdeki birkaç yıl içinde de tüketici elektroniği pazarının büyümesini hızlandırmaya devam edecektir [5].

Geleneksel olarak, terör örgütleri tarafından planlanan EYP saldırısına yönelik en önemli tasarım ilkelerinden biri, EYP'yi güvenli bir mesafeden tetikleyebilmektir. Bu ihtiyacı karşılamaya yönelik en önemli cihazlar RF kontrollü elektronik devrelerdir. Ancak RF haberleşmede kullanılan radyo dalgaları atmosferik koşullardan önemli ölçüde etkilenir; özellikle radyo dalgaları atmosferik etkiler nedeniyle değişen miktarlarda yansiyabilir, kırılabilir, emilebilir veya saçılabilir. Bu sınırlamalar nedeniyle, teröristler sinyali alıcıya göndermek için yeterince açık ve verimli iletişim kanallarını seçme eğilimindedirler. Söz konusu tehdide yönelik elektronik karşı tedbir geliştirmekten sorumlu mühendisler ve EYP uzmanları son döneme kadar esas olarak uzaktan komutalı EYP'lerin frekans çalışma aralığına odaklanmışlardır. Geçmişte mevcut RF cihazlarının sağlıklı iletişim kanallarının dar bantlara sahip olması, terör örgütlerince uzaktan komutalı EYP yapımında daha az sayıda frekans seçilmesine bunun sonucunda da karşı tedbir olarak kullanılan karıştırma sistemlerinin (jammer) de nispeten dar frekans bantlarında çalışacak şekilde tasarlanmasına yol açmıştır. Bugün piyasada farklı elektronik bileşenlerin bolluğu göz önüne alındığında, terör şebekelerinin uzaktan komutalı EYP'yi

tetiklemek için tercih edebileceği çok geniş bir frekans aralığı bulunmaktadır.

Bugünün tüketici elektroniği pazarı radyo frekans haberleşme alanında çok verimli ve etkili cihazları geçmişten çok ucuz fiyatlarla sunmaktadır. MHz'den GHz'e kadar elektromanyetik spektrumun değişik frekans bantlarında ticari olarak temin edilebilen RF cihazların kullanılabildiği EYP'lere karşı geliştirilen karşı tedbirler de çalışma frekans bantları açısından artık Khz ve Ghz bant aralığındaki tüm RF spektrumunu kapsamaktadır. Öte yandan, akıllı bir elektronik karşı tedbir uzmanı, dost güçlerin elektronik karşı önlemlerine karşı haberleşme frekanslarının karıştırılmasını önlemek amacıyla (frequency de-confliction) daha karmaşık ve gelişmiş tasarımlara gitmek zorundadırlar. Söz konusu tasarım kriterleri ve gerekli olan yazılım ve donanımlar, elektronik karşı tedbir sistemlerinin üretim maliyetlerini artırmaktadır.

Diğer yandan günümüzde yeni teknolojiler, terör örgütleri ve EYP tehdit şebekelerinin, kendi uzaktan komutalı EYP tasarımlarını tek seferde çok sayıda seri bir biçimde üretmesine imkân tanımaktadır. Eklemeli imalat veya 3D baskı ile, bilgisayarlı bir tasarım süreci sonunda malzemeler katmanlanarak üç boyutlu ürünler (EYP dış kapları için yeni tasarımlar vb.) oluşturulabilmektedir. Kısa işlem süresi, düşük maliyet ve daha yüksek kalitede nihai ürüne imkân tanıyan bu teknolojiler artık terör örgütlerinin de sıkça kullandığı imkânlar halini almıştır. Söz konusu teknolojiler sadece EYP dış kabı vb. materyal tasarımında faydalar sağlamamıştır. Uzaktan komutalı EYP'ler

kullanılabilecek yeni, hızlı ve yüksek bant genişliğine imkân tanıyan bir teknoloji olan 5G'nin ortaya çıkmasıyla birlikte, terör örgütleri daha yüksek doğrulukta ve kesintisiz iletişim yapmakla kalmayacak, nesnelerin interneti (internet of things) ile yeni imkânlar kazanacaktır. Bu şekilde bir elektronik cihaz ekosistemi aynı ağa bağlanarak (burada 5G), uzaktan erişilebilir sensör teknolojileri ile aynı ağa bağlı cihazlar kullanılarak uzaktan sürü EYP saldırıları gerçekleştirilebilmektedir.

Ayrıca 5G teknolojisi, yıkıcı yapısıyla sadece bu teknolojiyi daha etkili EYP saldırıları için kullanmayı hedefleyen düşmanları değil, bu teknolojiye karşı önlem geliştirmeye çalışan dost güçleri de etkileyecek gibi görünmektedir. Dost kuvvetler açısından bakıldığında, 5G teknolojisi, istihbarat, gözetleme ve keşif (ISR) sistemleri, komuta-kontrol uygulamaları, insanlı ve otonom araçlar alanında yeni yeteneklere sahip yeni ekipmanların ortaya çıkmasına yol açacaktır. Bununla birlikte, 5G teknolojisinin kullanılabildiği frekans bandı yalnızca kısa bir mesafe kat edebileceğinden, 5G bağlantı aralığının büyük olmaması gibi bazı kısıtlamalarla birlikte gelir. 5G kapsama alanı sağlanabilmesi amacıyla yeni 5G baz istasyonlarında kullanılacak antenler kurulmalıdır. Bu hem pahalı hem de zaman alıcı bir iştir. Son olarak, söz konusu teknolojiye kırsal kesimden erişim problemleri olacağından bu durum terör örgütleri ve tehdit şebekeleri için bir sınırlama anlamına gelmektedir.

3. TERÖR ÖRGÜTLERİ VE EYP TEHDİT ŞEBEKELERİ TARAFINDAN TÜKETİCİ ELEKTRONİĞİ MALZEMELERİNİN EYP OLARAK KULLANIMINDAKİ EĞİLİMLER (TRENDS IN THE USE OF CONSUMER ELECTRONICS MATERIALS AS IEDS BY TERRORIST ORGANIZATIONS AND IED THREAT NETWORKS)

3.1. Afrika

3.1.1. Mali/Burkina-Faso/Niger

Önemli Tehdit Şebekeleri: Cemaat Nusrat al İslam vel Müslimin (JNIM) / Büyük Sahra'da Daesh (ISGS) / İslami Mağrip'te El Kaide (AQIM)

Modifiye edilmiş (tristörlü veya transistörlü) kişisel mobil telsiz (PMR) ve cep telefonları kullanımından, uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devrelerinde, tüketici elektroniğinin yoğun kullanımına doğru açık bir evrim gözlemlenmektedir.

- Garaj Kapısı Kumandaları / Uzun Mesafeli (LoRa) spektrum modülasyon cihazları:
 - CX9-2C
 - TAD-T80
 - KL-BT serisi
 - KL-K120 serisi
 - KL-K400 serisi
 - KL-3000 serisi
 - KL-5000 serisi
- Araç Alarmları:
 - KFZ serisi

3.1.2. Nijerya/Çad/Kamerun

Önemli Tehdit Şebekeleri: Batı Afrika'da IŞİD (ISWAP) / Boko Haram

Mali/Burkina-Faso/Nijer'de kullanılan bazı modellerin yanı sıra diğer bazı farklı modeller

de dahil olmak üzere garaj kapısı kumandaları ve ev eşyası kumandalarının kullanımının yoğun olduğu bildirilmektedir.

3.1.3. Cezayir/Tunus/Libya/Mısır

Önemli Tehdit Şebekeleri: İslami Mağrip El Kaidesi (AQIM) / Ensar al-Sharia / Anasr al-Islam / Cund al-Islam/Daeş'in yan kolları

Libya'da uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devrelerinde tüketici elektroniğinin (araç alarmları) bazı kullanımları tespit edilmiş olsa da, söz konusu gruplar tarafından çoğunlukla uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devrelerinde ev yapımı veya modifiye elektronik cihazlar kullanılmaktadır:

- Doğrudan cep telefonuna veya kişisel mobil telsize (PMR) bağlı Çift Tonlu Çoklu Frekans (DTMF)
- Tristör veya transistör ilavesi ile modifiye edilmiş cep telefonları
- Çift çıkışlı özel uzaktan komutalı elektronik anahtarlar

3.1.4. Somali/Mozambik/Demokratik Kongo Cumhuriyeti

Önemli Tehdit Şebekeleri: El Şebab/Orta Afrika'da DAEŞ (IS-CAP)/Şebab

Modifiye edilmiş cep telefonlarının uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devrelerinde göreceli bir kullanımı vardır, ancak doğrudan piyasadan temin edilen tüketici elektroniği malzemelerinin kullanımı giderek artmaktadır:

- Ev aleti uzaktan kumandası:
 - GV-DCKZ
 - TY-RS-L011
 - KL-K103X
 - KL-CW11

- Motorsiklet Alarmları:
 - CL-A006
 - BM-338

3.2. Asya

3.2.1. Kuzey Kafkasya

Önemli Tehdit Şebekeleri: Kafkaslar ve Ceys el-Mücahirin vel-Ensar'da Faaliyet Gösteren DAES

Bu gruplar tarafından, ele geçirilen askeri cihazlarla birlikte çoğunlukla ev yapımı uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devreleri, modifiye cep telefonları veya modifiye Kişisel Mobil Telsiz (PMR) anahtarları kullanılmaktadır.

3.2.2. Afganistan

Önemli Tehdit Şebekeleri: Afganistan İslam Emirliği / Horasan Vilayeti'nde DAES Afganistan ve Pakistan'daki eğilimler, piyasadan doğrudan temin edilip hazır olarak kullanılabilen tüketici elektroniği malzemelerinin yerine, elektronik olarak modifiye edilmiş Kişisel Mobil Telsiz (PMR) cihazlarının, modifiye edilmiş cep telefonlarının, Çift tonlu Çok Frekanslı (DTMF) alıcılara dayalı ev yapımı uzaktan komutalı EYP anahtar devrelerinin kullanımını ortaya koymaktadır.

3.2.3. Güneydoğu Asya

Önemli Tehdit Şebekeleri: Arakan Ordusu/Dawlah İslamiya/Ebu Seyyaf Grubu/Yeni Halk Ordusu/Bangsamoro İslami Özgürlük Savaşçıları

Elektronik olarak modifiye edilmiş Kişisel Mobil Telsiz (PMR) kullanımının zaman zaman bildirilmiş olmasına rağmen, bölgede uzaktan

komutalı EYP'lerin anahtar devreleri olarak modifiye edilmiş cep telefonlarının baskın bir kullanımı gözlemlenmektedir.

3.2.4. Güney Asya

Önemli Tehdit Şebekeleri: Naksalit/Ceyş-i Muhammed/Assam/Maoist grupların Birleşik Kurtuluş Cephesi

Uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devrelerinde piyasadan doğrudan temin edilip hazır olarak kullanılabilen tüketici elektroniği malzemelerinin kullanımı tespit edilmemiştir.

3.2.5. Pakistan

Önemli Tehdit Şebekeleri: Tehreek-e-Taliban Pakistan/Jammu ve Keşmir Ulusal Kurtuluş Ordusu/Belucistan Kurtuluş Cephesi/Lashkar-e-Taiba/Lashkar-e-Jhangvi

Bölgede az sayıda karşılaşılan motosiklet alarmı devreleri dışında uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devrelerinde piyasadan doğrudan temin edilip hazır olarak kullanılabilen tüketici elektroniği malzemelerinin yaygın kullanımı tespit edilmemiştir.

3.2.6. Suriye

Önemli Tehdit Şebekeleri: Şam'da DAES/Hay'at Tahrir al-Sham/Şii milisleri

Suriye'de son aylarda, bulunan/ele geçirilen uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devreleri çoğunlukla modifiye edilmiş cep telefonlarına ve Çift Tonlu Çoklu frekans (DTMF) veya Uzun Menzilli Telsiz Telefona (LRCT) dayalı ev yapımı uzaktan komutalı cihazlara dayanmaktadır.

3.2.7. Irak

Önemli Tehdit Şebekeleri: Irak'ta DEAŞ ve Levant/Şii milisleri

Irak'ta DEAŞ tarafından kullanılan (daha çok ev yapımı veya modifiye edilmiş elektronik cihazlara dayanan) uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devreleri ile İran tarafından sağlanan elektronik bileşenler/cihazların bir karışımından ve bazı tüketici elektroniğinden oluşan Şii milisler tarafından kullanılanlar arasında büyük bir fark bulunmaktadır. Farklı terör örgütleri ve gruplar tarafından, araç alarmları, ev eşyası uzaktan kumandası ve Wi-Fi tabanlı cihazlar kullanılabilir.

3.2.8. Arap Yarımadası

Önemli Tehdit Şebekeleri: Arap Yarımadası'ndaki El Kaide (AQAP)/Ensar Allah/DAEŞ

Bölgedeki en aktif tehdit şebekesi, doğrudan İran tarafından desteklenen Ensar Allah'tır (Husi isyancıları olarak da bilinir). İran'ın hedefleri mali destek, askerî eğitim ve Tahran'daki liderlik için "güvenli bir sığınak" sağlamak olarak görünmektedir [6].

Alınan bu destek sayesinde uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devreleri olarak İran tarafından sağlanan ev yapımı cihazlara rastlanmaktadır. Çok fazla olmamakla birlikte Husiler tarafından uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devrelerinde piyasadan doğrudan temin edilip hazır olarak kullanılabilen tüketici elektroniği malzemelerinin kullanımı da tespit edilmiştir.

3.2.9. Lübnan/Filistin/İsrail

Önemli Tehdit Şebekeleri: Hizbullah/El Kassam Tugayları/İslami Filistin Cihadı

Uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devreleri olarak, ev yapımı veya değiştirilmiş elektronik cihazların (örneğin uzaktan parmakla çalıştırılan düğme tetikleyicileri, RFT, modifiye cep telefonları, RF modüllerine dayalı ev yapımı elektronik cihazlar) kullanımı yaygındır ancak doğrudan piyasadan temin edilebilen araç alarmlarının sınırlı kullanımı da bildirilmektedir.

3.3. Amerika

3.3.1. Kolombiya

Önemli Tehdit Şebekeleri: Ulusal Kurtuluş Ordusu (ELN)/ Kolombiya Devrimci Silahlı Kuvvetleri (FARC)

Uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devreleri olarak söz konusu gruplar tarafından, ev yapımı modifiye edilmiş elektronik cihazlar kullanılmaktadır.

3.3.2. Meksika

Önemli Tehdit Şebekeleri: Jalisco Yeni Nesil Kartel/Birleşik Karteller/Sinaloa Karteli

Uzaktan komutalı EYP'lerin anahtar devreleri olarak Meksika'da faaliyet gösteren gruplar tarafından ev yapımı elektronik anahtar devreleri ile modifiye edilmiş elektronik cihazların kullanımının baskın olduğu bildirilmektedir.

4. GELECEK ÖNGÖRÜLERİ (FUTURE PREDICTIONS)

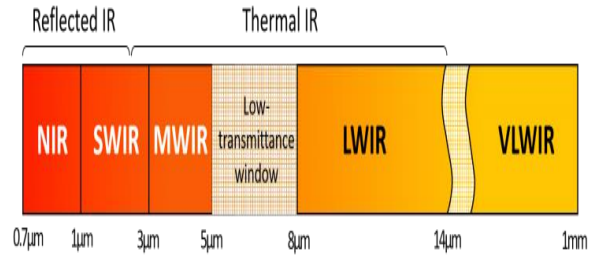
Uzaktan komutalı EYP'ler, terör örgütleri açısından oldukça esnek kullanım alanlarına

sahip, etkili ve düşük maliyetli bir tehdittir. Tehdit ağları, piyasada kullanıma hazır ve elektromanyetik spektrumun çok çeşitli bölgelerinde farklı frekanslarda çalışan elektronik cihazları EYP yapımında kullanabilmektedir. Söz konusu tehdide yönelik elektronik karşı tedbirlerin geliştirilmesi açısından, tehdidi doğru bir şekilde tanımlamak tüketici elektroniği pazarının genişlemesi ve erişiminin kolaylaşması nedeniyle, karşı tedbir geliştiricilere büyük zorluklar çıkarmaktadır.

Teknolojik karşı tedbirler açısından, EYP'nin tespit edilmesi, etkisiz hale getirilmesi ve EYP'nin tetiklenmesinin önlenmesi alanlarında çeşitli teknolojiler mevcuttur. Bu teknolojilerin farklı teknolojik hazırlık seviyeleri bulunmakta ve bazıları için harekât alanda kullanım için yeterli olgunluğa ulaşmasının 10-20 yıl sürebileceği değerlendirilmektedir.

Uzaktan tespit teknolojilerinden birisi olan Hiperspektral Görüntüleme (HS), hiperspektral sensör ve kamera teknolojilerinin gelişimi ile giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Sensör teknolojisi ve sistemlerindeki önemli gelişmeler, dost kuvvetlere, hedeflerin tespitini ve sınıflandırılmasını sağlamak amacıyla gelişmiş imkânlar sağlamaktadır. Özellikle havadan tespitte kullanılan HS kameralar son on yılda hem gittikçe daha etkili hem de maliyet açısından etkin hale gelmiştir. Optik tabanlı herhangi bir uzaklık algılama tekniği için, üç ana operasyonel bileşen gereklidir: söz konusu hedefi aydınlatmak için aşağı doğru yönlendirilebilen önemli ölçüde parlak bir kaynak, hedeften optik sinyali toplama yeteneğine sahip optikler ve ilgilenilen bir hedefin varlığı veya yokluğunu tanımlayan

araçlar [7]. HS görüntüleme, bitki hastalıklarının, böcek zararlılarının ve istilacı bitki türlerinin izlenmesi, ürün verimi tahmini ve tarımsal ürünlerin sınıflandırılması gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Hiperspektral uzaktan algılamada 4 tip hiperspektral veri kullanılır: Görünür (VIS) bölge, kısa dalga kızılötesi (SWIR), orta dalga kızılötesi (MWIR) ve uzun dalga kızılötesi (LWIR). Hem yansıma hem de emisyonun spektral imzalarının kullanılması, uzaktan algılama uygulamalarında önemli olabilmektedir [8].



Şekil 11: Hiperspektral uzaktan algılamada kullanılan dalga boyları.

Bu teknolojilerden bir diğeri olan Doğrusal Olmayan Bağlantı Algılama Teknolojisi (Non-Linear Junction Detection), açık veya kapalı olmalarına bakılmaksızın cihazlarda bulunan elektronik bileşenlerin varlığını tespit etme ve doğrulama yeteneğine sahiptir. Yeterli olgunluğa ulaşabilmesi durumunda söz konusu teknolojinin kullanıldığı sistemlerle, uzaktan komutalı EYP'lerle mücadelede, güzergâhın EYP'den temizlenmesi operasyonları sırasında EYP'lerdeki yarı iletkenlerin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Çünkü tüketici elektroniği pazarındaki eğilimin ana itici gücü olan yarı iletkenler, doğrusal olmayan özelliklere sahiptir. Tespit sistemleri ile alınan sinyalin 2.

ve 3. harmoniklerini kullanarak bu bileşenleri ayırt etmek mümkündür. Harmonik radar ismi verilen bu tespit sistemi f_0 frekansında (desimetre dalga boylarında) elektromanyetik dalgalar yayar ve doğrusal olmayan elektronik bileşenler veya IED'deki farklı metallerin oksitlenmiş bağlantıları tarafından üretilen harmonik frekanslarda ($2 f_0, 3 f_0$) dalgaları alır [9]. Bu teknolojiye bu harmonik frekansları almak için çok hassas alıcılar kullanılır ve yarı iletkenin EYP'deki yerini belirlemek için yönlendirilmiş bir anten kullanılır.

Diğer bir gelecek teknolojisi olan THz frekanslarındaki elektromanyetik radyasyon, diğer birçok frekansa kıyasla güçlü nüfuz etme yeteneklerine sahiptir. Terahertz tekniklerinde kullanılan çok kısa darbeler (femtosaniye), nesnelerin 3 boyutlu görüntülenmesini sağlar. Bu, toprak ve diğer kaplama malzemelerinin altında görüntülemeye yardımcı olur. İletken olmayan birçok malzemenin içini görmemizi sağlar ve farklı kaplara ve diğer EYP malzemelerine nüfuz etme avantajlarına sahiptir. THz spektral bölgesindeki birçok elektronik bileşenin benzersiz spektral izleri bulunmaktadır. Orijinal ve sahte malzeme bile THz frekanslarında görüntülenmesiyle ayırt edilebilmektedir. THz radyasyonu iyonize edici radyasyon değildir ve bu özellik, bu teknolojinin mikrowatt aralıklarında çok düşük güç seviyelerinde çalışmasını mümkün kılar. Öte yandan, X-ışını sinyallerinin aksine zararlı değildirler. Havalimanı giriş kontrollerinde gizli malzemeleri bulmak için uzun yıllardır başarıyla kullanılmaktadır. Ancak yarı iletkenler gibi elektronik bileşenlerin tespiti için kullanılabilmesi için halen teknoloji hazırlık

düzeyi düşüktür. Bir cisim üzerinde THz radyasyonunun tespiti, bolometre veya piroelektrik dedektörlerle yapılabilmektedir. Tutarlı bir algılama için THz radyasyonuna benzer fotoiletken anten veya elektro-optik kristal femtosaniye lazer darbeleri birlikte kullanılır [10]. Bu teknolojiye gelecekte yüksek potansiyel beklenmekte, güzergâhın EYP'lerden temizlenmesi operasyonlarında sıklıkla kullanılacağı öngörülmektedir.

Uzaktan komutalı EYP'lerden gelen tehdit karşısında sıklıkla modern ordularca kullanılan karıştırma teknolojisi son yirmi yıldır gelişim göstermektedir. Temel olarak geleneksel karıştırma sistemleri, herhangi bir EYP'nin radyo sinyali gönderme ve alma yeteneğini bozan bir elektromanyetik balon oluşturur. Son yıllarda reaktif karıştırma, aktif karıştırmaya göre daha az güç gerektirdiğinden, giderek daha popüler hale gelmiştir. Reaktif karıştırma yönteminde, EYP'de bulunan uzaktan komutalı cihazın aktivasyon sinyalinin gönderilmiş olması gerekmektedir. Söz konusu aktivasyon sinyalinin ve bu sinyalin frekansının tespitinden sonra karıştırma sinyali üretilmekte ve sadece bu kanal için gönderilmektedir [11]. Yazılım tanımlı karıştırma sistemleri, tüm tehdit bandını kapsayan "DDS tabanlı FPGA kontrollü Süpürme Karıştırma" adı verilen teknikten yararlanmaktadır. Bu tür sistemler programlanabilmekte ve farklı tehditlere göre özel operasyonel ve taktik gereksinimler için özelleştirilebilirler. Tüketici elektroniği pazarındaki son eğilimlerin bir sonucu olarak ve farklı frekanslarda çalışabilen geniş ürün yelpazesi ile reaktif karıştırma teknolojisinin kullanılması ile tüm frekans spektrumunu çok

kısa bir sürede (milisaniye) incelenebilmekte ve tehdit sinyallerine hızla tepki verilebilmektedir. Reaktif bozucularla oluşturulan baloncuk ve etkin koruma aralığı, aynı çıkış gücüne sahip aktif bir karıştırıcıdan çok daha fazladır. Bugün birçok modern ordu, uzaktan komutalı EYP'lere karşı bu karmaşık tasarımlı reaktif karıştırma teknolojisini kullanmaktadır. Gelecekte bu teknolojinin kullanımının giderek yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSIONS AND EVALUATION)

Terör örgütleri ve tehdit ağları tarafından, tüketici elektroniği pazarından kolaylıkla temin edilebilen elektronik bileşenler, uzaktan komutalı EYP'lerin üretiminde kullanılmaktadır. Dost unsurlara yönelik gerçekleştirilen EYP saldırılarında görülen son eğilimler ile terörist taktik ve tekniklerine göre terör örgütleri EYP tasarım ilkelerini belirlerken, hedeflerinin ne kadar kritik olduğuna ve ellerinde mevcut malzemelere göre seçmektedir. Piyasada bulunan tüketici elektroniği malzemeleri, seri üretimleri nedeniyle yüksek kaliteli ve ucuzdur, ayrıca karmaşık ve sıkışık bir elektromanyetik ortamda çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Uzaktan komutalı (Radyo Kontrollü) EYP'lerin yaygınlaşması, EYP'ler ile mücadele eden birimlere karşı, düşük maliyetli, oldukça esnek ve öngörülemeyen bir tehdit oluşturmuştur. Söz konusu EYP'lerin yapımında kullanılan ticari mallar yasal üreticilerden terör örgütlerine doğrudan ulaşmamakla birlikte genellikle küçük bölgesel dağıtım şirketleri ve acentalarca bu transfer gerçekleşmektedir. Bu anlamda

istihbarat birimlerince bölgesel dağıtım şirketlerinden birden fazla kullanım alanı olan malzemeler satın alan küçük yerel ticaret kuruluşları, gözetim zincirinin en zayıf halkası olmaları nedeniyle çok sıkı gözetim altında tutulması gerekmektedir.

EYP'lerin tespiti sonrası her ne kadar tehdit bertaraf edilmiş görünse de, karşı tedbir geliştiriciler ve silahlı kuvvetler açısından söz konusu tehdide karşı başarılı bir savunma için ele geçirilen EYP'lerin teknik kıymetlendirilmesinin büyük bir titizlikle yapılması gerekmektedir. Bu anlamda tespit edilen EYP'ler ve diğer malzemeler adli delil niteliği taşıdıkları için söz konusu teknik kıymetlendirme ancak kolluk kuvvetlerince yerine getirilebilmektedir. Ülkemizde silahlı kuvvetlerin karşı tedbir geliştirmekle görevli birimleri, kolluk kuvvetlerince üretilen değerlendirme raporlarını incelemeyi talep etmeli ve buradan elde edilen bilgiler doğrultusunda tedbir geliştirmelidir.

Terör örgütleri ve tehdit şebekelerinin EYP yapımında giderek daha karmaşık cihazları kullanma, tasarlama ve dağıtma konusundaki teknik kapasitesi her geçen gün artmaktadır. Bu kapsamda teknik kıymetlendirme raporları hazırlayan kolluk kuvvetleri bünyesindeki analistler yakın gelecekte, ele geçirilen EYP'lerden elde ettikleri büyük miktarda veriyi işleyerek ve verilerdeki kalıpları tanıyarak belirli görevleri yerine getirecek şekilde eğitilebilir yapay zekalı yazılımları kullanabilecek, geriye dönük analizler yapabilecek, gelecekteki olası EYP saldırılarının yerini ve türünü tahmin etmeye

çalışacaktır. Bu tür bir analiz, silahlı kuvvetler ve diğer güvenlik birimlerinin yeni tehditlere odaklanmasını ve karşı önlemler veya yeni tespit teknikleri geliştirmesine de imkân tanıyacaktır.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT)

Serkan KOÇ: Kavramsal tasarım, araştırma, metodoloji, kaynaklar, görselleştirme, yazma-taslak, yazma-gözden geçirme ve düzenleme.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] United Nations "Focus On: The Illicit Trafficking of Counterfeit Goods and Transnational Organized Crime." <https://www.unodc.org/unodc/en/eneewsunodc/2014/February/unodc-eneews---4-february-2014.html> (05.05.2022).
- [2] Conflict Armament Research, "THE IED THREAT IN BAHRAIN", London, 2019.
- [3] United Nations General Assembly, "Countering the threat posed by improvised explosive devices", Report of the Secretary General, 2020.
- [4] OMDIA, "Consumer Electronics Market Tracker - Q2 2020" <https://omdia.tech.informa.com/om012080/consumer-electronics-market-tracker---q2-2020>. (05.05.2022).

[5] Persistent Market Research, "Consumer Electronics Market Revenues to Rake in at a CAGR of 15.4%, Smartphones to Continue Dominance over 2016-2020" 23 Aralık 2016.

[6] J. Freeman, "The al Houthi insurgency in the North of Yemen: An analysis of the Shabab al Moumineen." Studies in Conflict & Terrorism, 2009.

[7] Major, K.J., Shaw, L.B., Busse, L., Gattass, R., Arnone, D., Lopez, E., Pushkarsky, M., Kane, J., Clewes, R.J., Lee, L. and Howle, C.R., "Fiber optic coupled quantum cascade infrared laser system for detection of explosive materials on surfaces. Optics & Laser Technology," 119, sf.105635, 2009.

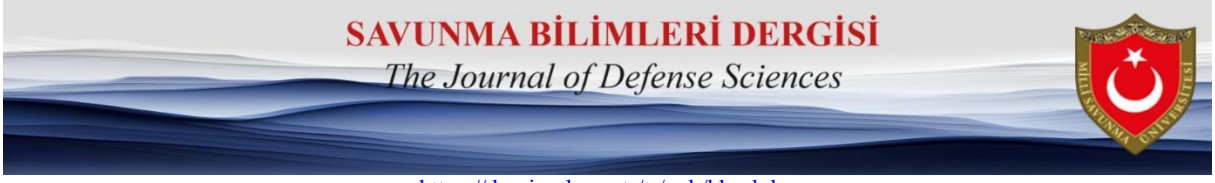
[8] Sakarya, U., Teke, M., Demirkesen, C., Haliloğlu, O., Kozal, A.Ö., Deveci, H.S., Öztoprak, A.F., Töreyn, B.U. and Gürbüz, S.Z., "June. A short survey of hyperspectral remote sensing and hyperspectral remote sensing research at TÜBİTAK Uzay", In 2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), sf. 187-192, 2015.

[9] Bajic, Milan, and Tamara Ivelja. "The rationale and concept of collecting IED, UXO and landmines signatures." www. mine. vlada. Hr, 2018.

[10] Châteauneuf, Marc, et al. "Detection of explosives using THz time domain spectroscopy." International Society for Optics and Photonics, 2007, Vol. 6796, 2007.

[11] Mileusnić, Mladen, et al. "Analysis of jamming successfulness against RCIED activation with the emphasis on sweep

jamming." *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics* 32.2, 211-229, 2019.



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Tedarikçi Seçiminin Savunma Alanı Özelinde İncelenmesi: Analitik Hiyerarşi Süreci ile Seçim Süreci

Analysis of Supplier Selection in Defense Industry: Selection Process with Analytic Hierarchy Process

Oğuzhan ÜNLÜ^{1*} Memduh BEĞENİRBAŞ²

¹Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma ve Milli Güvenlik Enstitüsü, Savunma Yönetimi Bölümü, 06420, Çankaya /ANKARA

²Milli Savunma Üniversitesi, Kara Harp Okulu, Savunma Araştırmaları Bölümü, 06420, Çankaya /ANKARA

Önemli Noktalar / Highlights

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 16.01.2024
Düzeltilme: 23.01.2024
Kabul: 08.02.2024

Çalışma, tedarikçi seçimi özelinde hem literatürdeki çalışmalarda kullanılan kriterlerin tek bir çatıda toplanması itibari ile hem de savunma strateji/yöntemlerinin incelenerek kriter havuzuna eklediği yeni kriterler ile farklılık arz etmektedir.

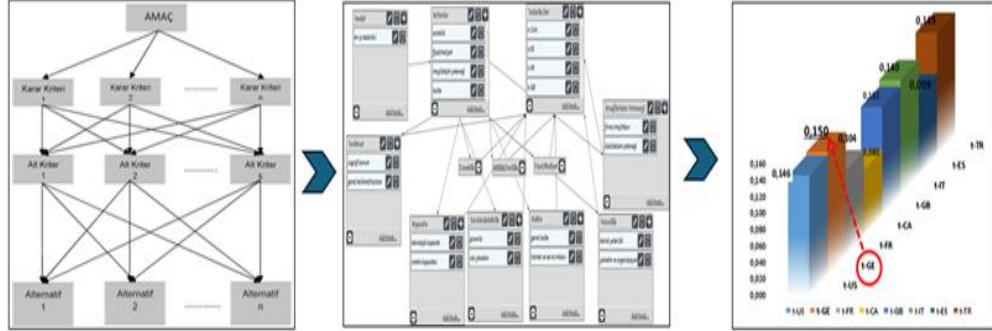
Grafiksel Özet / Graphical Abstract

Keywords

Supplier Selection
Defense Supply
Decision Making
MCDM
AHP

Anahtar Kelimeler

Tedarikçi Seçimi
Savunma Tedariki
Karar Verme
ÇKKV
AHP



Özet

Bu çalışmada, literatürde yer alan tedarikçi seçim kriterlerine ilişkin bulgular ilk çalışmalardan başlayarak zaman içindeki gelişimi de dikkate alınarak literatür taraması ile incelenmekte, tedarikçi seçimi probleminin niteliği tartışılmakta, savunmanın kritik alanlarında tedarikçi seçiminde kullanılması önerilen kriterler ortaya konmakta, bu ortaya konan kriterler ile alan uzmanı olarak görev yapmış/yapmakta olan kişilerin görüşleri de dikkate alınarak çok kriterli karar verme tekniklerinden AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) yöntemi ile savunma alanında tedarikçi seçimi gerçekleştirilmektedir. Seçim işlemi bitiminde ise sonuç değerlendirilmekte ve bu alandaki gelecek çalışmalara önerilerde bulunmaktadır.

Abstract

In this study, findings regarding supplier selection criteria, taking into account the development over time starting from the initial studies, are examined through a literature review, the nature of the supplier selection problem is discussed, criteria recommended to be used in supplier selection in critical areas of defense are presented, and supplier selection in defense area is performed using the AHP method from multi-criteria decision-making techniques, taking into account the opinions of individuals who have served/are serving as field experts. At the end of the selection process, the results are evaluated and suggestions are made for future studies in this field.

*Corresponding author, e-mail: unlu.o1393@dzkk.tsk.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarihin akışında güvenlik sorununun gerekçeleri dönemselsel olarak farklılık göstermiştir. Bazı dönemlerde ‘hakimiyet’ duygusu, çoğu dönemde ise ekonomik gerekçelerin ön plana çıktığı görülmektedir. Günümüzde ise; güvenlik sorununun arka planında ekonomik kaynakları kontrol altına alma ya da siyasi hükümlanlık kurma gibi asli gerekçelerinde çok fazla değişiklik olmasa da, ön planındaki küreselleşme, terör, teknolojik gelişmeler ve teknolojinin farklı amaçlarla kullanımı, büyük göç olaylarının ortaya çıkardığı sorunlar gibi sebepler görünürlük kazanmıştır [1]. Ön plana çıkan gerekçelere bağlı olarak da devletlerin güvenlik önlemi alma yöntemlerinde değişiklikler gözlenmektedir. Ancak gerekçesi ve yöntemi ne olursa olsun devletlerin kendi savunma yeteneklerini optimize etme, buna ilişkin tüm alternatifleri değerlendirme ve askeri ihtiyaçlarını karşılayacak bir yaklaşımda olduğu görülmektedir [2]. Dolayısıyla karar vericiler ihtiyaçlarını karşılayacak çözümlü üretirken birçok kısıt arasında çözüm üretmek durumundadırlar.

Geleceğin belirsizliği göz önüne alındığında güvenlik konusunun en önemli özelliklerinden biri, acil ve ertelenemez oluşudur. Tehdit alanı son derece belirsiz ve dinamiktir. Her an yeni durumların ortaya çıkma ihtimali mevcuttur. Belirsizlik ve buna bağlı olarak riskler arttıkça ‘güvenlik’ ve ‘savunma’ ihtiyacı da artmaktadır. Ancak ‘savunma’, oldukça ‘pahalı’ bir ürün/hizmettir ve savunma için gereken silah sistemlerinin maliyeti her geçen

gün daha da artmaktadır [3]. Ülkelerin ekonomik kaynakları ise sınırlıdır. Ekonomik kısıtlar içinde büyük harcamalar gerektiren ‘savunma’, mevcut kaynakların oldukça verimli ve etkili kullanımını gerektirmektedir. Bu durumda ihtiyaç duyulan savunma ekipmanlarının, altyapı platformları ile mal ve hizmetlerin en ekonomik ve etkili şekilde tedariki kritik derecede önem kazanmaktadır. Bu nedenle ‘tedarik süreci’ her geçen gün giderek daha fazla önem kazanmakta; hatta kritik hale gelmektedir.

İster ticari isterse ticari olmayan örgütler için olsun, doğru ve uygun tedarikçilerle çalışmak her zaman en önemli konulardan biri olmuştur. Bunun nedeni, tedarik işlevinin örgütün asli işlevlerini yerine getirmesini ya da planlanan hedeflerine ulaşmasını direkt etkileyecek bir niteliğe sahip olmasıdır. Tedarik işlevinin örgütün planlarına ya da beklentilerine uygun olarak çalışmadığı durumlarda, örgütün hedeflerini tutturması riske girebilir ya da asli işlevlerini yerine getirmesi önemli derecede zarar görebilir. Bu nedenle literatürde tedarikçi seçiminin ‘stratejik’ öneme sahip olduğu sıklıkla dile getirilen bir husus olmuştur [4].

Tedarikçi seçimi literatürde üzerinde uzun yıllardan beri tartışılan bir konu olup, buna ilişkin ilk kapsamlı çalışmaların 1960’lara kadar uzandığı görülmektedir [5]. Daha sonraki süreçte de konu öneminden bir şey kaybetmeksizin aksine artan yoğunlukta tartışılmaya devam etmiş; son yıllarda küresel rekabet ortamı, risk ve güvenilirlik unsurları, kalite, maliyet ve zaman etkenleri gibi birçok faktörün etkisi altında farklı ürün-hizmet ya da

endüstri alanlarına doğru genişlemiş bulunmaktadır. Bu nedenle uygun tedarikçilerin seçimi, kar amaçlı olsun ya da olmasın, örgütlerin büyük bir kısmı için hala en önemli hatta stratejik karar alanlarından birisi olmuştur.

Savunma alanında tedarikçi seçimi ise ülkenin savunma ve güvenlik ihtiyaçlarının karşılanmasında kritik rol oynadığından makalede tedarikçi seçiminin savunma alanı özelinde incelenerek süreçte hangi kriterlere dikkat edilmesi gerektiği, belirlenen kriterler üzerinden seçimin nasıl yapılacağı ve yapılan analizlerin nasıl yorumlanacağına ortaya konması amaçlanmaktadır. Çalışmada literatürde yer alan tedarikçi seçim kriterlerine ilişkin bulgular kronolojik olarak ilk çalışmalardan başlayarak tarihsel gelişimi de dikkate alınarak incelenmekte, tedarikçi seçimi probleminin niteliği tartışılmakta, savunmanın kritik alanlarında tedarikçi seçiminde kullanılması önerilen kriterler ortaya konmaktadır. Söz konusu ortaya konan kriterler ile alan uzmanı olarak görev yapmış/yapmakta olan kişilerin görüşleri de dikkate alınarak AHP yöntemi ile savunma alanında tedarikçi seçimi gerçekleştirilmekte ve analizler değerlendirilmektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE (CONCEPTUAL FRAMEWORK)

2.1. Savunma Tedariki (Defense Supply)

Savunma tedariki, askeri güç ve yeteneklerin sürdürülebilirlik, etkinlik ve verimlilik açısından sağlanması için gerekli olan malzeme, ekipman, hizmet ve teknolojilerin temin edilmesi sürecidir. Savunma tedariki, bir

ülkenin savunma planlaması ve stratejik hedefleri doğrultusunda gerçekleştirildiğinde etkili bir silahlı kuvvet oluşturulmasına yardımcı olur [6]. Savunma tedariki, silah sistemleri, askeri teçhizat, lojistik destek, iletişim ekipmanları, mühimmat, araç-gereç ve personel gibi çeşitli malzemeleri içermekle birlikte bunların yanı sıra, askeri güçlerin eğitimi, bakım ve onarım hizmetleri, tedarik zinciri yönetimi, teknoloji transferi ve güvenlik ihlalleri gibi konular da savunma tedariki sürecinde önemli rol oynar. Savunma tedariki bir ülkenin savunma ve güvenlik ihtiyaçlarının karşılanmasında kritik bir rol oynar. Ulusal güvenlik, barışı koruma, ekonomik gelişim, bağımsızlık ve özgürlük bağlamında çok önemli bir yer tutmaktadır. Savunma tedarikinde tedarikçi seçimi, bir savunma kuruluşu veya ordu tarafından ihtiyaç duyulan malzemeleri veya hizmetleri sağlayacak olan tedarikçinin belirlenmesidir. Savunma tedarikinde tedarikçi seçimi stratejik bir süreçtir çünkü kaliteli ve güvenilir malzeme ve hizmetlerin temini, savunma birimlerinin başarısı için hayati öneme sahiptir. Tedarikçi seçiminin doğru yapılması, maliyetleri düşürmek, malzeme ve hizmet sağlama süresini kısaltmak, teknoloji transferini maksimize etmek, inovasyona destek vermek gibi avantajlar sağlayabilir. Bunun için tedarikçilerin yetenekleri, deneyimleri, mali durumları, kalite yönetimi süreçleri, lojistik kabiliyetleri, referansları ve müşteri ilişkileri gibi faktörler dikkate alınır.

Tüm endüstrilerde olduğu gibi savunma sanayiinde de güçlü ve güvenilir tedarikçilerle çalışmak stratejik öneme sahiptir [7]. Bununla

birlikte uygun tedarikçi(lerin) seçimi, ister savunma sanayi firmaları olsun, isterse askeri ya da politik karar vericiler olsun nitelik itibarıyla bir ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) problemi ve çok sayıda seçim kriterinin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir.

2.2 Tedarikçi Seçimi Probleminin Niteliği (The Nature of Supplier Selection Problem)

Tedarikçi seçimi, kendine özgü bir problem türüdür. Seçim kriterleri kendi aralarında birbiriyle çelişen önceliklere sahiptir [8,9]. Örneğin, bir firma –çoğu zaman- satın almak istediği ürünün kalitesinin maksimum olmasını isterken, fiyatının minimum olmasını arzu etmektedir. Bu iki amaç, birbiriyle çelişme anlamına gelmektedir. Çoğu zaman düşük fiyat kaynaklı bir avantaj, düşük kalite veya düşük teslimat güvenilirliği tarafından iptal edilebilmektedir [8]. Tedarikçi seçimi (fiyat, kalite, tedarik süresi, satış sonrası hizmetler, garanti ve iade politikaları, teknik altyapı yeterliliği, kapasite, esneklik vb.) çok sayıda kriteri içerdiğinden, bu kriterlerin çoğu birbiri ile çelişen ve birbirinin avantajını iptal eden durumlar ortaya çıkarabilmektedir. Bu nedenle tedarikçi seçimi eş zamanlı olarak çok sayıda kriterin birlikte ele alınmasını gerektiren bir karar problemi olup, tedarikçi seçim kararı bazen sayıları onları bulan kriterlerin hep birlikte değerlendirilmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu niteliği nedeniyle ‘tedarikçi seçimi’ literatürde Çok Kriterli Bir Karar Verme (ÇKKV) problemi olarak tanımlanmaktadır [10,11,12,13].

Tedarikçi seçiminin bir diğer özelliği, uzun vadeli ve güvene dayalı bir çalışmayı ve ilişkiyi hedeflemesidir [7]. Bugünkü yoğun rekabet ortamı, pazarın yapısı, pazar dinamiklerindeki hızlı ve sürekli değişimler, teknolojik gelişmeler ve bunların hızı ve yönü gibi çok sayıda etken, örgütlerin amaçlarına uzun vadeli ve güvenli iş ortaklarıyla devam edebileceklerini göstermiş; onları güvenilir iş ortaklarıyla uzun vadeli ilişkiler kurmaya zorlamıştır. Bugün tedarikçi seçimi ile örgütler yalnızca mal ya da hizmet satın almakla kalmamakta; bilakis uzun vadeli, güvenilir ve nispeten kalıcı ilişkilere –iş ilişkilerine, çözüm ortaklıklarına- girmektedirler [14]. Dolayısıyla örgütün her tedarikçi seçimi, aslında özü itibarıyla kendisi için uzun vadeli ve güvenilir bir çözüm ortağı ve bir iş ilişkisi ortaklığı arayışını / girişimini oluşturmaktadır.

En uygun tedarikçilerin seçimi –maliyet, zamanlılık, sürdürülebilirlik, risk ve güvenlik, rekabet vb. birçok bakımdan- ister ticari firmalar ya da savunma sanayi firmaları olsun, isterse askeri ya da politik karar vericiler için olsun, özünde birçok niteliği ortak olan ve birbirine ‘benzer’; bununla birlikte savunma (askeri ya da politik) karar vericileri için kendine özgü yönleri de olan ve bu bakımdan da ‘kendine özgü’ bir yönetim ve karar problemidir.

Savunma sanayi firmaları ile ticari firmalar tedarikçi seçimi bakımından –ticari karar vericiler ile askeri ve politik karar vericilere kıyasla- daha çok ortak noktaya sahiptirler. Tedarikçi seçimi konusuna yaklaşıırken literatürde savunma sanayi firmaları için

yapılan çalışmaların büyük oranda ticari firmalar için yapılan çalışmalarla benzer yaklaşımları kullandığı görülmektedir, bkz. [11];[15]. Bu son derece doğal bir yaklaşımdır çünkü her iki firma türü için de rekabet edebilirlik, maliyet minimizasyonu, kâr maksimizasyonu vb. temel amaçlar ya da güdülerdir.

Örgütlerin çok sayıda seçim kriterini birlikte değerlendirerek tedarikçi seçimine karar vermesi gerekliliği; yani, tedarikçi seçimi probleminin ÇKKV niteliği, problemin karakteristiğine uygun yöntemlerin geliştirilmesini ve uygulanmasını gerekli kılmıştır. Tedarikçi seçim probleminin önemi ve yaygınlığı ise adı geçen yöntemlerin literatürde yaygın olarak kullanılmasını beraberinde getirmiştir [7,10]. Dahası, tedarikçi seçim probleminin önemine dayalı olarak literatürde farklı teknikler bütünleştirilerek daha verimli sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır [10].

Takip eden kısımda literatürde öne çıkan tedarikçi seçim kriterleri daha detaylı olarak tartışılmaktadır.

2.3. Tedarikçi Seçim Kriterlerine Genel Bir Bakış (An Overview of Supplier Selection Criteria)

Literatürde bütün tedarik durumları, bütün sektörler ya da bütün ürünler için genel geçer bir tedarikçi seçim kriterleri setinden bahsetmek mümkün değildir. Bilakis, seçim kriterlerinin ürün, hizmet ya da öncelik verilen unsura göre değişiklik arz ettiği görülmektedir [8,12]. Bu esasen beklenen bir durumdur

çünkü bazı durumlarda fiyat, kalite, tedarik süresi vb. öncelik kazanırken, -örneğin, savunma sanayi gibi- bazı durumlarda bir mal ya da hizmetin belli bir süre içinde tedarik edilebilirliği, riskin minimum olması ya da tedarikçinin güvenilirliği gibi hususlar asli unsur(lar) haline gelebilmektedir.

Tedarikçi seçim kriterleri hakkında literatürdeki temel bulgulardan biri, tedarikçi seçiminde değerlendirilmesi gereken kriter setinin sektör ya da mal-hizmet grubuna bağlı olarak ciddi derecede farklılık gösterdiği'dir. Demir, seçim kriterlerinin farklı sektörler ve ürün grupları için ne kadar farklılık gösterdiğini literatürdeki farklı çalışmaları özetleyerek göstermiştir [10]. Fiyat (maliyet) vb. bazı kriterler her ne kadar farklı problem durumları ya da sektörler bazında ortak kriter olarak yer alsın da bazı durumlarda seçim kriter seti tamamen değişebilmekte; tamamen sektör ya da problem spesifik hale gelebilmektedir. Örneğin, ticari firmalarla çoğu ortak kriterleri kullanarak tedarikçi seçimi yapan savunma sanayi firmaları karşısında, salt bir savunma sanayi projesi farklılık gösterdiğinde tamamen projeye özgü tedarik kriterleri ortaya çıkabilmekte ve (literatürde) bahsedilen kriterlerinin çoğu kapsam dışı kalabilmektedir. Yürekli ve Duman'ın çalışmaları bu konuda verilebilecek iki tipik örnektir [15,16]. Yürekli -Savunma Sanayi Müsteşarlığı (SSM) tarafından yürütülen- ATAK Taarruz Helikopteri Projesi'nde tedarikçi seçimini tamamen proje teknik ekibi tarafından geliştirilmiş çoğu teknik ve güvenlikle ilgili kriterlerden oluşan bir kriter seti kullanılarak yapmıştır. Benzer şekilde Duman'da Türkiye

için en uygun hava savunma sistemleri seçimini çalışmış; S-400, Patriot, ASTER, MEADS ve HQ-9 gibi hava savunma sistemleri arasından yapılacak seçimde ‘seçim kriter seti’ olarak maliyet, menzil (kapsam), irtifa, maksimum hız, faydalı yük ağırlığı ve radar menzili’ni –tamamen ürüne özgü nitelikleri- belirlemiştir. Görülebileceği üzere altı adet kriterden oluşan setin en az beş tanesi teknik kriterlerden oluşmaktadır. Bu bulgular, tedarikçi seçimi konusuna ‘sektör’, ‘ürün’ ya da üzerinde çalışılan ‘karar problemi’ bağlamında yaklaşmak gerektiğini göstermektedir. Ancak konuyu daha iyi anlamak ve tedarikçi seçim kriterlerine literatürdeki genel yaklaşımı ve bazı bulguları görmek bakımından biraz daha yakından bakmakta fayda bulunmaktadır.

Tedarikçi seçim kriterlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar 1960'lara kadar uzanmaktadır [11]. Dickson tedarikçi seçiminde dikkate alınması gereken –bazılarının isimleri bugünküne kıyasla nispeten farklılık gösterse de çoğu hala geçerli olan; fiyattan kaliteye, esneklikten tedarik süresine uzanan- 23 adet faktör (kriter) belirlemiştir [5,12] (Tablo 1). Benzer şekilde Weber ve Current Fortune 500 firmalarından birinin satın alma biriminde gerçek bir satın alma olayı üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada en az 23 kriter üzerinde çalışmışlardır [17]. Weber ve arkadaşları ise 1966-1991 dönemine ait toplam 74 adet çalışmayı içeren kapsamlı bir literatür incelemesinde adı geçen çalışmaları Dickson'ın çalışmasındaki kriterlere göre sınıflandırarak, kriterleri ‘Çok önemli’, ‘Oldukça önemli’, ‘Orta derecede önemli’ ve

‘Nispeten önemli’ şeklinde dördü bir derecelmeye tabi tutmuştur [18]. Sonuçta; fiyat, teslimat, kalite, üretim imkânları ve kapasite, teknik yeterlilik, finansal durum, performans geçmişi ve garanti koşullarını ‘çok önemli’ ve ‘oldukça önemli’; bunun dışındakileri de ‘orta derecede önemli’ ya da ‘nispeten önemli’ kriterler şeklinde nitelendirmişlerdir. Araştırmacılar incelemeye aldıkları çalışmaların hangi kriterleri içerdiğini de ayrıca detaylı şekilde sınıflandırmışlar; böylece hangi kriter hakkında kaç tane akademik çalışmanın yapıldığını tespit etmişlerdir. Bulgulara göre incelenen çalışmaların çoğu Dickson'ın ilk üç kriterini - fiyat (%80), teslimat (%59) ve kalite (%54)- konu edinmiştir. Bunu ‘üretim imkânları ve kapasite’ (%31), ‘coğrafi konum’ (%22) ve ‘teknik yeterlilik’ (%20) izlemiştir. Buna karşın çalışmaların hiç birinde Dickson'ın ‘oldukça önemli’ şeklinde nitelendirdiği ‘garanti koşulları’ yer almamıştır.

Weber ve arkadaşları, Dickson'ın yaptığı çalışmada belirlediği 23 kriterden JIT (Just In Time_Tam Zamanlı Üretim) üretim yapan 74 firmanın tedarikçi seçiminde 11 kriterin ön plana çıktığını tespit etmişlerdir [18]. Bunlardan kalite, fiyat, teslimat, üretim tesisleri ve kapasitesi ve teknik yeterlilik kriterlerini ‘çok önemli’ ve ‘oldukça önemli’; buna karşın coğrafi konum, davranış, yönetim ve organizasyon, paketleme, iş(lem) kontrolleri, tamir servisi (satış sonrası hizmet imkanları) kriterlerini ise ‘orta derecede önemli’ olarak nitelendirmişlerdir. Bu bulgular, tedarikçi seçim kriterlerinin JIT üretime geçildiğinde Dickson'ın

sıralamasındaki önem derecelerinin de değişebildiğini; bazı kriterlerin önem bakımından daha üst sıralara çıkarken, bazılarının ise daha geriye düşebildiğini göstermektedir. Bu durum ise tedarikçi seçim kriterlerinin yukarıda işaret edildiği üzere üretilen (ihtiyaç duyulan) mal ve hizmet konusuna göre farklılık göstermesinin yanında, üretim sistemine ya da başka durumlara göre farklılaşabildiğini göstermektedir. Bu bulgu, daha sonraki çalışmalarda da açıkça ortaya konulmuştur [13].

Dickson ile Weber ve arkadaşlarının 'inceleme' tarzı çalışmalarının bir benzeri Zhang ve arkadaşları tarafından (1992-2003 dönemine ilişkin olarak) 49 çalışma üzerinde gerçekleştirilmiştir [18,19]. Zhang ve arkadaşları da Weber ve arkadaşları gibi 'fiyat', 'kalite' ve 'teslim' kriterlerini çok önemli olarak nitelendirmiştir. Bunların yanında 'üretim imkânları ve kapasitesi', 'teknik servis' (satış sonrası hizmetler) ve 'yönetim ve organizasyonu' önemli kriterler olarak nitelendirmişlerdir. Aynı çizginin devamı niteliğindeki bir başka çalışma, 2003-2007 dönemini kapsayacak şekilde Tahiri ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [13]. Araştırmacılar, Dickson'dan başlayarak farklı dönemlere ilişkin tedarik kriterlerini inceleyen 10 adet çalışmayı ele alarak, tedarikçi seçim kriterlerinin önem derecelerini karşılaştırmışlardır. Eş zamanlı olarak önceki dönemlerde tedarikçi seçiminde ön plana çıkan kantitatif nitelikli kriterlerin yanında kalitatif kriterleri de incelemiştir. Çalışmanın işaret ettiği önemli noktalardan biri Dickson'dan bu yana tedarikçi seçiminde kalitatif kriterlerin

sayısında gittikçe bir artış olduğudur. Araştırmacılar, 1960'larda yalnızca kalitatif nitelikli kriterlerin yer aldığı çalışmaların, özellikle 2000 sonrası dönemde kalitatif kriterlere daha büyük oranda yer vermeye başladığına ve önceki dönemlerde uygulanan kantitatif nitelikli tekniklere kıyasla AHP (Analytic Hierarchy Process) ve Bulanık (Fuzzy) AHP gibi tekniklerin kalitatif kriterlerle çalışmaya daha fazla imkan verdiğine işaret etmişlerdir. İncelenen çalışmalarda farklı sayılarda ve derecelerde yer alan kalitatif nitelikli kriterler; ilişki ve organizasyon, isteklilik (heveslilik), güven, disiplin, yönetim ve organizasyon, tedarikçi profili ve risk faktörü olarak belirlenmiştir.

Bu genel nitelikli yaklaşımlara ilave olarak daha yakın dönemdeki çalışmalardan birkaç kesit sunmak durumun daha net olarak ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır. Örneğin; Can ve Arıkan tarafından Türk Savunma Sanayisinde AR-GE çalışmaları gerçekleştirilen bir firma için robot kolu üretimi ve yazılımının geliştirilmesine yönelik alt tedarikçi seçimi için AHP ile PROMETHEE II yöntemlerini bütünleşik olarak kullandıkları bir çalışmada, tedarikçi seçimi fiyat, garanti, (personel) bilgi düzeyi, (teslim) zaman(ı), ulaşım (mesafesi / coğrafi konum) ve (firma) deneyim(i) kriterleri bazında gerçekleştirilmiştir [20]. Saraçoğlu ve Dağistanlı ise yine savunma sanayi dahil pek çok sektöre bağlantı elemanları üreten bir firmada 12 tedarikçi arasından (en uygun) tedarikçilerin seçimi amacıyla 4 ana kriter (yönetim, servis, ürün ve dokümantasyon) ve bunlara ilişkin toplamda 19 alt kriter üzerinde

çalışarak Bulanık AHP ve VIKOR yöntemleri bütünleşik şekilde kullanılarak 3 adet tedarikçinin seçimi gerçekleştirilmiştir [21].

Başka bir çalışmada ise hava platformu üreten bir savunma firmasında spesifik bir projede kullanılacak malzeme özelinde tedarikçi seçim problemi ele alınmıştır [10]. Üç aşamalı olarak tasarlanan çalışmanın ilk aşamasında adaylar TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) metoduyla teknik yeterlikleri açısından değerlendirilmiş; ikinci aşamada, ilk aşamada uygun bulunan tedarikçiler AHP yöntemi ile değerlendirilerek bunlara ilişkin skor değerler elde edilmiştir. Çalışmadaki temel değerlendirme kriterlerini kalite, teklif gerekliliklerine uyumluluk, fiyat, risk ve güvelik, teknoloji ve firma imajı oluşturmuştur. Üçüncü aşamada ise firmanın hedefleri ve kısıtları doğrultusunda geliştirilen hedef programlama ile siparişlerin tedarikçilere ataması gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde Aydın ve Eren'de savunma sanayinde faaliyet gösteren ve gövde parçası üreten bir firma için gerçekleştirdikleri ve AHP ve TOPSIS yöntemini birlikte kullandıkları bir tedarikçi seçimi çalışmasında kalite, maliyet, makine parkuru, işçilik ve teknik yeterlilik kriterlerini esas almışlardır [22]. Aydın ve Eren hava savunma sanayindeki bir başka çalışmada kalite, maliyet, teslim süresi, işçilik ve teknoloji kriterlerini kullanarak tedarikçi seçimi yapmışlardır [23]. Bu kez Bulanık AHP ve Hedef Programlama yöntemlerini kullanmışlardır. Dolu ise Konya'daki bir savunma sanayi firması için 6 adet tedarikçiyi değerlendirdiği çalışmada –Bulanık TOPSIS Yöntemi kapsamında- geleneksel kriterler ile

birlikte sürdürülebilirlik, üretim kapasitesi gibi kriterleri kullanmıştır [24]. Çelikkol ise yine savunma sanayi teknolojileri alanındaki bir firmada 4 tedarikçi arasından fiyat, kalite, destek, firma imajı ve hız kriterlerini esas alarak en uygun tedarikçiyi seçmeye çalışmıştır [11]. Ak Oğuz ve Köksal AHP-TOPSIS yöntemleri ile tedarikçi seçimini kapalı-devre kamera sistemleri temini problemine uygulayarak çok sayıda tedarikçi arasından en uygun tedarikçinin seçimine çalışmış, seçim kriterlerini maliyet, teslim süresi, kalite, teknik yeterlilik, hizmet, esneklik ve iletişim yeteneği olarak belirlemiştir [14].

Gerek tedarikçi seçim kriterlerine yönelik genel inceleme çalışmalarından gerekse kesit olarak sunulan çalışmaların esas aldıkları kriterler göz önüne alındığında her ne kadar her iki araştırma grubunun üzerinde çalıştıkları fiyat, kalite, teknik yeterlilik, kapasite vb. üzerinde çokça durulan kriterler olsa da çalışmaların birçok kriter itibarıyla farklılık gösterdiği; 'tedarikçi seçim kriterlerinin mal-hizmet, sektör ve tedarikçi seçim problemine göre farklılık gösterebildiği; bu nedenle 'fiyat', 'kalite', 'teknik yeterlilik', 'teslim süresi' vb. genel nitelikli kriterlerin yanında ilave kriterlerin tedarik edilmek istenen mal-hizmet, sektör ya da karar probleminin niteliğinin göz önünde alınarak ilaveten tespit edilmesi gerektiği görülmektedir.

2.4. Savunma Yönetiminde Tedarikçi Seçimine Yönelik Literatür İncelemesi (Literature Review on Supplier Selection in Defense Management)

Çalışma kapsamındaki tedarikçi seçim kriterlerine yönelik detaylı literatür incelemeleri ile ilgili özet bilgiler Tablo 1’de verilmektedir. Söz konusu tabloda belirtilen konular ve kriterler hakkında öncelikle aşağıdaki hususları ifade etmek faydalı olacaktır.

1. Tedarikçi seçim kriterlerine ilişkin ilk çalışmalar Dickson’ın çalışmasında belirtildiği üzere 1960’lara kadar gitmesine rağmen, ‘seçim kriteri’ olarak nitelendirilen kavramlarda henüz tam bir ortak anlayış ve standartlaşma sağlanamamıştır. Örneğin, konu hakkında çoğu çalışmada aynı kriterler çoğunlukla farklı kavramlarla ifade edilmektedir. Bu farklılık literatür incelemesi niteliğindeki çalışmalara ilişkin bulguların sınıflandırılmasını, raporlanmasını ve yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada da söz konusu zorlukla karşılaşmıştır.

2. Teslimat süresi ve teslimat hızı gibi kavramlar temelde benzer şeyleri ifade etmesine rağmen, birçok çalışmada farklı kriterler gibi ele alınmıştır. Bunları birbirinden kesin çizgilerle ayırt etmek zor ve literatür incelemesinin amacı da konuyu açıklığa kavuşturmak olduğundan, daha net bir karara varmak için adı geçen kriterler Tablo 1’de birleştirilerek özetlenmiş ve gerekli istatistikler bu şekilde oluşturulmuştur. Bu sayede

tedarikçi seçim kriterleri ile ilgili olarak ortaya daha net bir resim koymak mümkün olmuştur.

3. Tablo 1’de de görüldüğü üzere 1960’lardaki ilk çalışmalardan günümüze kadarki çalışmalarda literatürde yer alan bazı seçim kriterleri çalışmaların yapıldığı zamanda bağımsız kriterler durumunda (işlem kontrolleri, garanti koşulları, iş için isteklilik vb.) iken geldiğimiz an itibarıyla daha spesifik (iş tanımı, ihtiyaçlardaki değişiklik gibi sebepler nedeniyle yeterlilik, iletişim gibi başlıklara evrilmiştir) bir çerçevede değerlendirilir duruma gelmiştir. Bu tür kriterler de doğal olarak ilgili kavramların içine dâhil edilmiştir.

4. Tedarikçi kriterlerine ilişkin literatürün yoğunluğuna karşın bu alandaki kavramların henüz aynı derecede standartlaşmamış olması ve Tablo 1’deki alt kriterlerin her birinin niteliği itibarıyla başka kriterlerle de ilişkili olması nedeniyle, adı geçen kriterlerin başka ana kriterlerle ilişkili olduğu ileri sürülebilir.

Bu çalışmada her bir alt kriterin mümkün olduğunca doğru ana kriter altında ifade edilmesine gayret edilmiştir.

Tablo 1: Tedarikçi seçim kriterleri literatür incelemesi.

ANA KRİTER	ALT KRİTER	Akman vd. (2021)	Dolu (2020)	Duman (2019)	Demir (2018)	Umarosman ve Hacıveli oğulları (2018)	Aydın ve Eren (2018a)	Aydın ve Eren (2018b)	Çelikkol (2017)	Demirbaş ve Akdoğan (2014)	Can ve Arslan (2014)	AkÖz ve Köksal (2018)	Özdemir (2010)	Ho vd. (2010)	Yüreklî (2008)	Tahriri vd. (2007)	Pri ve Low (2006)	Akman ve Alkan (2006)	Özelve Özyörük (2007)	Liu ve Hai (2005)	Chan ve Chan (2004)	Kahraman vd. (2003)	Dağdeviren ve Eren (2001)	Weber (1993)	Weber (1991)	Dickson (1966)	ARA TOPLAM	GENEL TOPLAM			
Esneklik	Fiyat / Maliyet	X	X							X		X	X	X				X	X	X	X					X	11	11			
		X	M	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X					X			X	X	22	22		
Güvenlik	Güvenlik			X						X				X		X												4			
	Millîlik (Kritik Teknolojilerde)									X					X													2			
	Risk			X										X		X											4				
	Sürdürülebilirlik		X					X																			2				
İletişim	Davranış																									X	2				
	Sorumluluk Alma																				X						1				
	İş için İsteklilik															X										X	2				
	İş Yapma İstekliliği (Responsiveness)																									X	1				
	İlişki / İlişki Ağları / İlişki Düzeyi													X		X											3				
	İletişim Kanalları, İmkanları ve Yeteneği																									X	2				
	Güven																X										1				
	Tedarikçi Profili																X										1				
	İmaj	Firma İmajı (ve İtibarı)		X					X						X											X	6				
	Müşteri Memnuniyeti																			X								1			
	Kalite	İzlenim																									X	1			
(Satış Sonrası Dahil) Hizmet ve Servis			X			X			X					X		X									X	X	11				
Genel Kalite			X				X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	21				
Ürüne Özgü Teknik Gereksinimler															X												1				
Eğitim Desteği									X																	X	2				
Kapasite	Deneyim (Tecrübe)										X																2				
	Finansal Durum (Yapı)																									X	5				
	Firma Yetenekleri (Nakliye vs.)		X										X	X													1				
	Geçmişteki İş Miktarı																										1				

Tablo 1: Tedarikçi seçim kriterleri literatür incelemesi (Devamı).

ANA KRİTER	ALT KRİTER	Akman vd. (2021)	Dolu (2020)	Duman (2019)	Demir (2018)	Umarosman ve Hacveli oğulları (2018)	Aydın ve Eren (2018a)	Aydın ve Eren (2018b)	Çalkol (2017)	Demiras ve Akdoğan (2014)	Can ve Arıkan (2014)	Ak Oğuz ve Köksal (2018)	Özdemir (2010)	Ho vd. (2010)	Yürekli (2008)	Tahriri vd. (2007)	Pi ve Low (2006)	Akman ve Alkan (2006)	Özel ve Özönük (2007)	Liu ve Hai (2005)	Chan ve Chan (2004)	Kahraman vd. (2003)	Dağdeviren ve Eren (2001)	Weber (1993)	Weber (1991)	Dickson (1966)	ARA TOPLAM	GENEL TOPLAM	
Teknik Kapasite	Kalifiye Personel	X				X																					2		
	Üretim Kapasitesi (Üretim ve Hizmet Kapasitesi: Teknik Kapasite)	X	X			X	X			X		X	X	X		X				X				X	X		11		
	Bilgi Düzeyi										X																1		
	Eğitim Durumu	X																									1		
	Teklif Gerekliliklerine Uygunluk			X									X													X	3		
	Teknik Yeterlilik					X						X													X	X	5		
	Paketleme Yeteneği																								X	X	2		
	Ar-Ge														X												1		
	Yeniilik (inovasyon)																					X					1		
	Teknoloji (Teknolojik Seviye, Yeterlilik ve İmkanlar)	X	X		X			X						X	X									X	X		6		
Teslimat	Tedarik Performansı	X																									3		
	Teslim Süresi ve Hızı	X	X				X		X	X	X									X							6		
	Teslimat	X	X			X			X				X	X			X	X		X	X						14		
	Coğrafi Konum	X									X		X														6		
Yeterlilik	Performans Geçmişi												X														3		
	İş(lem) Kontrolleri																								X	X	2		
	Garanti Politikası (Koşulları)								X															X			5		
	Sipariş Süreç Uyumluluk	X																									1		
	İşletme Geçmişi	X																									1		
	Türkiye Temsilcilikleri									X																	1		
	Disiplin																X										2		
Z Diğer	Yönetim ve Organizasyon												X	X		X								X	X		5		
	Çevre													X													1		
	İşgücü İlişkileri Kaydı																										1		
TOPLAM KRİTER		3	17	2	7	2	6	4	9	8	6	8	9	15	7	14	4	4	3	4	8	6	3	4	10	11	24	194	194

Tablo 1’de görüldüğü üzere bu çalışma kapsamında temel olarak öne çıkan daha önceki çalışmalar yakından incelenmiştir. Bu çalışmaların birkaç tanesi literatür incelemesi niteliğindeki çalışmalardan, diğerleri ise – çoğunluğu son dönemlere ilişkin ama bir kısmı da bu konudaki resme farklı zaman boyutları itibarıyla bakma amacına yönelik olarak- önceki dönemleri de kapsayacak tedarikçi seçimi çalışmalarından oluşmaktadır.

Tablo 2: Literatürde Esas Alınan Tedarikçi Seçim Kriterlerinin Kullanım Dağılımı.

KRİTER	TOPLAM	YÜZDE (%)
Kapasite	42	21,6
Kalite	35	18,0
Teslimat	32	16,5
Fiyat / Maliyet	22	11,3
Yeterlilik	17	8,8
Güvenlik	12	6,2
Esneklik	11	5,7
İletişim	11	5,7
İmaj	10	5,2
Diğer	2	1,0
Genel Toplam	194	100

Kaynak: Araştırmacılar tarafından daha önceki çalışmalardan istifade edilerek hazırlanmıştır.

Literatürde çok farklı kavramlarla ifade edilmiş olsa da büyük çoğunlukla tedarikçi seçim kriterleri Tablo 2’de de görüldüğü üzere 10 temel başlık altında toplanmıştır. Bunlar; sırasıyla *Kapasite*, *Kalite*, *Teslimat*, *Fiyat-Maliyet*, *Yeterlilik*, *Güvenlik*, *Esneklik*, *İletişim*, *İmaj* ve *Diğer* şeklindedir. Yukarıda da ifade edildiği üzere, tedarikçi seçimi alanında yapılan çalışmaların bulguları çalışmanın yapıldığı endüstri, ürün-hizmet ya da karar probleminde göre farklılık gösterse de, bu inceleme için seçilen çalışmalar genel nitelikli olduğundan, seçim kriterlerine yönelik genel

durumu yansıttığı söylenebilir. Zaten inceleme bulguları, literatürü destekleyici niteliktedir. Örneğin; Ho ve arkadaşları, fiyatın tedarikçi seçiminde en önemli kriter olmadığı, ancak dördüncü sırada sıralamaya girebildiğini belirtmişlerdir [25]. Esasen ‘tedarikçi seçiminin’ amaçları ve niteliği dikkate alındığında, bu beklenen bir durumdur. Özellikle başta savunma tedariki olmak üzere birçok alanda tedarikçi seçimi uzun dönemli, stratejik ve kritik bir çözüm ortağı ya da çalışma ortaklığı seçimi olduğundan, fiyat/maliyet unsurundan daha öncelikli kriterlerin olması, karar probleminin doğası gereğidir. Tablo 2’deki istatistikler de zaten bu durumu açıkça göstermektedir. Literatürdeki çalışmaların %21’den daha fazlasında *kapasite* ilk seçim kriteri olarak yer almıştır. Bunu sırasıyla %18 ve %16,5 ile *kalite* ve *teslimat* izlemiştir. *Fiyat/Maliyet* ise yaklaşık %11 ile dördüncü sırada kendine yer bulmuştur. Diğer kriterler yaklaşık %9’dan %1’e kadar farklı oranlarda bunları takip etmektedir.

2.4. Tedarikçi Seçiminde Kullanılan Teknikler (Techniques Used in Supplier Selection)

Literatürde tedarikçi seçiminde kullanılan ÇKKV oldukça farklılık arz etmektedir. Araştırmacılar bu nedenle adı geçen teknikleri farklı kriterlere göre sınıflama ihtiyacı duymuşlar ve bu kapsamda farklı ölçütler ya da yaklaşımlar kullanarak sınıflandırmalarda bulunmuşlardır. ÇKKV Teknikleri ve sınıflandırmaları Tablo 3’te gösterilmektedir.

Tablo 3: Tedarikçi Seçiminde Kullanılan ÇKKV Teknikleri ve Sınıflandırılması.

Tedarikçi Seçiminde Kullanılan ÇKKV Teknikleri/Sınıflandırılması	
Çalışma	Teknikler
Wang, J.W., Cheng, C.H., Chen, H.K. [26]	(i) Değer Ölçüm Modelleri (AHP – Analitik Hiyerarşi Süreci- ve MAUT – Çok Nitelikli Fayda Teorisi-; Amaç, (ii) İstek ve Referans Modelleri – Hedef Programlama (GP) ve (TOPSIS) –İdeal Çözüme Göre Tercih Sıralaması; (iii) Sıralama Yöntemleri (ELECTRE) ve (PROMETHEE) – Değerlendirmelerin Zenginleştirilmesi için Tercih Sıralama Organizasyon Yöntemi)
Demir [10] Prasanna ve Goh [27] Lee vd. [28]	Analytic Hierarchy Process (AHP)
Cengiz vd. [29] Ünlü [30]	Analytic Network Process (ANP)
Sarkar vd. [31]	Artificial Intelligence Algorithms (AIA), Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)
Sarkar vd. [31] Özkır [32]	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
Yürekli [15]	Elimination and Choice Translating Reality English (ELECTRE)
Prasanna ve Goh [27]	The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)
Sarkar vd. [31]	Data Envelopment Analysis (DEA), Grey Relation Analysis (GRA), Multiple Segment Goal Programming (MSGP)
Park vd. [33]	Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis (MOORA), Mathematical Programming (MP)
Tayalı [34]	Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS)
Sarkar vd. [31] Demir [10] Çelikkol [11]	Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR)

Tedarikçi Seçiminde Kullanılan ÇKKV Teknikleri/Sınıflandırılması	
Çalışma	Teknikler
Liao ve Kao [35] (adı geçen yöntemler ait oldukları yöntem sınıfı içerisinde bahsedilmiştir.)	(i) Doğrusal Programlama (DP) – Linear Programming (LP), (ii) Veri Zarflama Analizi (VZA) – Data Envelopment Analysis (DEA), (iii) Maliyet Tabanlı Yöntemler (MTY) – Cost Based Methods (CBM), (iv) Yapay Neural Ağlar (YNA) ya da Yapay Zeka Yöntemleri (YZY) - Artificial Neural Networks (ANN) or Artificial Intelligence Methods (AIM), (v) Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) – Analytical Hierarchy Process (AHP), (vi) Analitik Ağ Süreci (AAS) - Analytic Network Process (ANP), (vii) Bulanık Set (Mantık) Teorisi (BST) - Fuzzy Set Theory (FST), (viii) TOPSIS, ve (ix) Matematiksel ve İstatistiksel Modeller (MİM) – Mathematical and Statistical Models (MSM)
Arabzad vd. [36]; Sanayei vd. [37] (adı geçen yöntemler ait oldukları yöntem sınıfı içerisinde bahsedilmiştir.)	Yaygın kullanılan ÇKKV yöntemlerini farklı (sırasıyla 5 ve 6) kategorilerde topladığı görülmektedir.
Yürekli [15]	‘Temel Yöntemler’, ‘Tek Sentezleme Kriteri Yöntemleri’, ‘Sıralama Yöntemleri’ ve ‘Etkileşimli Yöntemler’ şeklinde sınıflandırmıştır.
Özdemir [12]	Maliyet tabanlı modeller, matematiksel programlama modelleri, istatistiksel modeller, tümleşik modeller ve yapay zeka ve uzman sistemler olmak üzere altı grupta toplanmıştır.

Özetle, bu bulgulardan adı geçen yöntemlerin sınıflandırmasının farklı ölçütlere göre farklı şekillerde yapılabildiği, sınıflandırmanın üzerinde çalışılan probleme ve bakış açısına göre şekillendiği anlaşılmaktadır. Buradaki asli konu söz konusu yöntemlerin ne şekilde sınıflandırıldığından ziyade üzerinde çalışılan karar probleminin niteliğine göre ne tür bir yöntemin kullanılacağına belirlenmesidir.

Yöntem seçiminde belli bir yöntemin ‘yaygınlığı’, ‘uygulama kolaylığı’, ‘karar problemine uygunluğu’, ‘maliyeti’ vb. çeşitli hususları dikkate almak gerekir [11,12,13].

3. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

“Tedarikçi Seçiminin Savunma Alanı Özelinde İncelenmesi: Analitik Hiyerarşi Süreci ile Seçim Süreci” isimli çalışmamızın evreni Türk Savunma Sanayisidir. Ayrıca çalışmamızda

evreni temsil etmesi için seçilen örneklem savunma tedariki ile ilişkili projeler yürüten önde gelen Türk Savunma Sanayi kuruluşlarıdır. Evren ve örneklemin belirlenmesi müteakibinde savunmanın kritik alanlarında tedarikçi seçim sürecinde literatürden (Tablo 1) ve savunma tedarik stratejilerinden elde edilen kriterler; örnekleminde yer alan savunma firmalarında görevli alanında yetkin en az 3 yıl tecrübesi bulunan elektronik/sensör/imalat saha/proje mühendisi ve satın alma/tedarik uzmanlarının görüşüne sunulmuştur. Ana ve alt kriter karşılaştırma tablolarından oluşan görüş formlarına mühendisler/uzmanlar tarafından girişler yapılmış, toplanan karşılaştırmalar analiz edilerek elde edilen nihai kriter karşılaştırmalarının Super Decision programı aracılığıyla AHP hesaplamaları yapılmış ve en ideal tedarikçi seçimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan Super Decision programı, AHP metodu kullanılarak karar verme problemlerini çözmek için bir yazılım aracıdır. Super Decision programı, karar verme sürecinde AHP'nin uygulanmasını kolaylaştıran bir arayüz ve hesaplama motoru sağlamaktadır. Bu program, kullanıcıların problem hedeflerini, kriterlerini ve alternatiflerini tanımlayarak ve bu bileşenler arasındaki ilişkileri belirleyerek karar verme problemlerini analiz etmelerine ve sonuçlarını görselleştirmelerine olanak tanır. Bu sebeple çalışmada kullanılması tercih edilmiştir.

3.1. Analitik Hiyerarşik Prosesi (AHP) (Analytical Hierarchical Process)

AHP, çok kriterli karar verme süreçlerinde kullanılan bir analitik yöntemdir ve karar

verme sürecini daha yapılandırılmış ve anlamlı hale getirir. AHP'nin sağladığı bu yapı, karmaşık çok kriterli karar verme problemlerini daha anlaşılır ve yönetilebilir hale getirir. Bu yöntem, özellikle büyük ve karmaşık sistemlerde, farklı kriterlerin birbirleriyle olan ilişkilerinin dikkate alınması gereken durumlarda etkili bir araçtır. Yani AHP, çok karmaşık ve çok faktörlü karar verme problemlerini çözmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem, karar verme sürecinde birden çok kriterin, alt kriterlerin veya seçeneklerin göreceli önemini belirlemek için kullanılır.

AHP yöntemi, bir karar ağacı yapısı oluşturarak ve ağırlıklandırma matrisleri kullanarak karar verme sürecini analiz eder. Bu yapıda, bir ana kriteri alt kriterler ve alt kriterlere bağlı olan seçenekler şeklinde hiyerarşik bir yapıda düzenler. Daha sonra, katılımcılar bu faktörler arasındaki ilişkileri değerlendirir ve öneme göre ağırlıklandırma yapar.

AHP'nin kullanım alanları oldukça geniştir. Özellikle karmaşık ve çok faktörlü problemlerin çözümünde tercih edilir. Aşağıdaki alanlarda kullanılabilir:

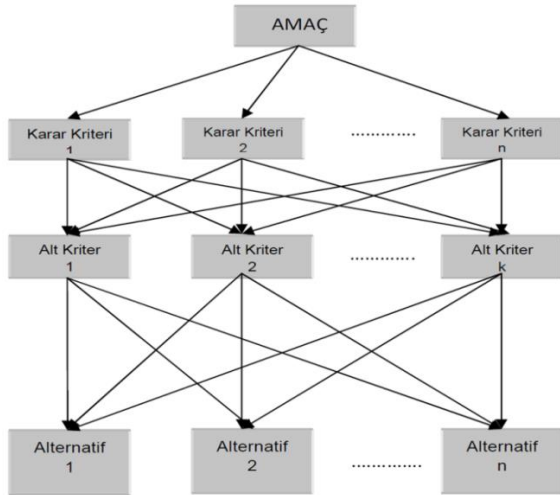
- * Proje yönetimi: Proje planlaması, risk analizi, proje önceliklendirme vb. gibi süreçlerde.
- * İş süreçleri: İş süreçlerinde iyileştirme faaliyetleri, verimlilik analizi, kaynak dağıtım gibi konuların analizinde.
- * Stratejik planlama: Şirketlerin stratejik planlamalarında, yatırım değerlendirmelerinde veya yeni ürün geliştirme sürecinde.

* Tedarik zinciri yönetimi: Tedarikçi seçimi, lojistik planlama, envanter yönetimi gibi tedarik zinciriyle ilgili kararların alınmasında.

* Personel yönetimi: İşe alım, terfi, eğitim planlaması gibi personel yönetimi ile ilgili kararların alınmasında.

AHP, birden çok kriterin ve faktörün değerlendirildiği karar verme süreçlerinde sistematik bir yaklaşım sunar ve karmaşıklığı azaltır. Bu nedenle, birçok farklı alanda kullanılan etkili bir karar verme yöntemidir. AHP yönteminin çözüm adımları aşağıda yer almaktadır:

•Hiyerarşik yapının oluşturulması: AHP'nin giriş çözüm adımı problemin daha kolay anlaşılabilmesi için hiyerarşik bir formatta alt kırılım problemlere ayrıştırma sürecidir. Şekil 1'de standart karar hiyerarşi örneği sunulmuştur.



Şekil 1: AHP hiyerarşi yapısı.

•İkili karşılaştırmaların yapılması: Kriterler oluşturulduktan sonra ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Matriste yer alan w_i/w_j gösterimi hedef için i . kriterin j . kriterden ne kadar daha önemli olduğunu gösterir. İkili karşılaştırma matrisleri $n \times n$ boyutunda matris olup, matrisin

köşegenini oluşturan değerler 1 olmalıdır. Karşılaştırmalar Tablo 4'te yer alan tabloya göre doldurulur.

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad \frac{w_i}{w_j} = a_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

Tablo 4: İkili karşılaştırma tablosu.

Önem Değeri	Değer Tanımlamaları
1	Her iki faktör için eşit önemde olması durumu
3	1. Faktörün 2. faktörden daha önemli olması durumu
5	1. Faktörün 2. faktörden çok önemli olması durumu
7	1. Faktörün 2. faktöre nazaran çok güçlü bir öneme sahip olması durumu
9	1. Faktörün 2. faktöre nazaran mutlak üstün bir öneme sahip olması durumu
2,4,6,8	Ara değerler göstergesi

•Önem derecelerinin belirlenmesi: Karar matrisleri oluşturulması hitamında öncelik ve ağırlık vektörleri hesaplanır. Öncelik vektörü bulunurken önce normleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi elde edilir.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (2)$$

Söz konusu adımlar bütün değerlendirme faktörleri için aynı şekilde yinlendiğinde faktör sayısı kadar sütun vektörü oluşturulacaktır. n

tane sütun vektörü aşağıda örnek gösterilen B matrisi haline getirilir.

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Müteakibinde ise her bir satırda var olan elemanların aritmetik ortalaması hesaplanır. Bu ortalama (1xm) boyutunda matrisin ilgili olduğu satırı verecektir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad (4)$$

Bu işlemin sonucu olarak m boyutunda w öncelik vektörüne ulaşılır.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Buradaki söz konusu w_i ($i=1,2,3,\dots,m$) i kriterinin görece önemini ifade etmektedir.

•Tutarlılık analizi yapılması: Kıyas yapıcılarının kriterler arasında karşılaştırma yaparken tutarlı olduğunu ölçmek için Tutarlılık Oranı (CR) hesaplanır. Hesaplamalarda n kriter sayısına bağlı olarak rastgele indeks sayıları kullanılır. Hesaplamalar sonucunda bulunan değer 0.10'un altında ise karşılaştırma matrisi tutarlıdır sonucuna varılır. Diğer durumlarda matris tekrar düzenlenmelidir.

•En iyi alternatifin belirlenmesi: AHP'nin son adımında, her bir alternatifin kriterlere olan önem ağırlıkları bir matris şeklinde belirlenir. Bir karar probleminde n adet alternatif ve m

adet kriter olduğunda, nxm boyutlu bir karma öncelikler matrisi oluşturulur. Bu matris, kriterlerin karşılaştırıldığı matrisin sütun vektörüyle çarpılır. Sonuç olarak, nxm boyutlu matrisle mx1 boyutundaki matrisin çarpımı da nx1 boyutunda bir matris olur. Her bir alternatif, yüzdeler bir değer alır ve tüm alternatiflerin yüzdeler değerlerinin toplamı 1'e eşittir. En yüksek yüzdeler değere sahip olan alternatif, AHP yöntemiyle çözülen problemin en iyi alternatifidir.

AHP'nin kullanım alanı ve sağladığı yapı, karmaşık ÇKKV problemlerini daha anlaşılır ve yönetilebilir hale getirdiği göz önünde bulundurulduğunda ve Tablo 3'de belirtilen sınıflandırmalar dikkate alındığında uygulamamızda tercih edilmiştir.

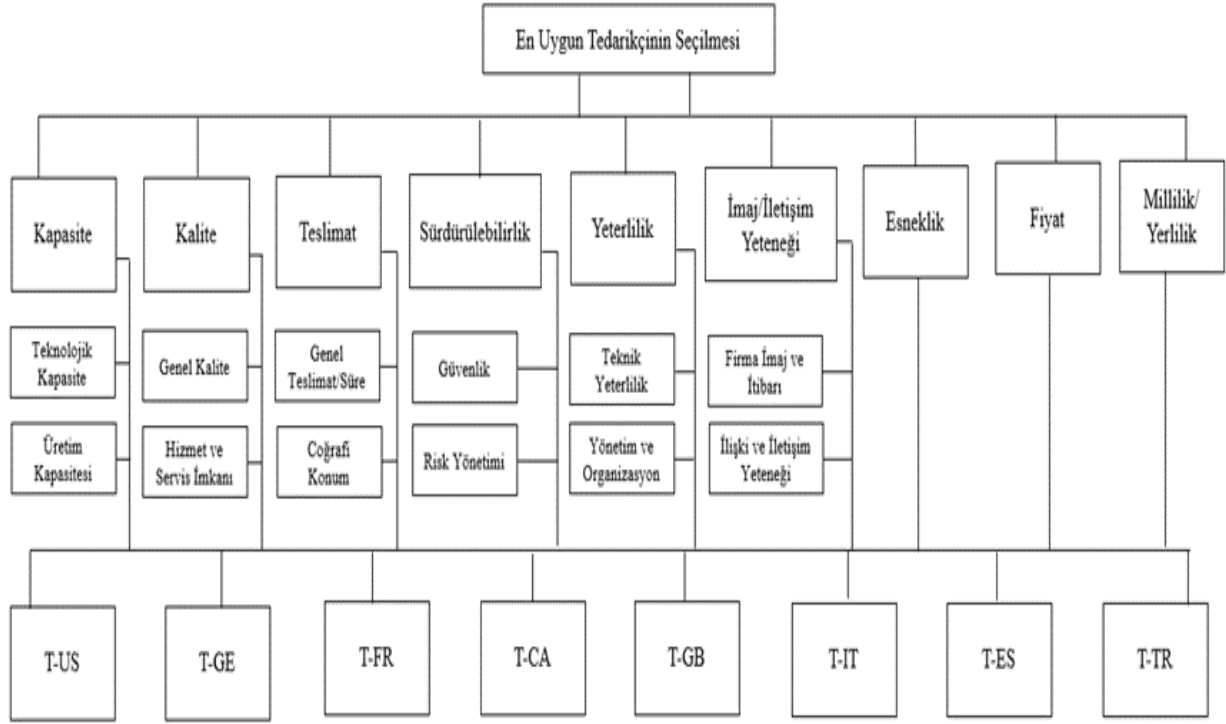
4. UYGULAMA (APPLICATION)

Savunmanın kritik alanlarında kullanılmak üzere alınacak haberleşme sistemi için 8 farklı ülkeden toplam 8 ülke tedarikçi arasından [ABD (t-US), Almanya (t-GE), Fransa (t-FR), Kanada (t-CA), İngiltere (t-GB), İtalya (t-IT), İspanya (t-ES), Türkiye (t-TR) (her ülkeden bir savunma sanayi firma tedarikçisi bulunmaktadır)] seçim yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. AHP hesaplamaları Super Decisions programı aracılığıyla yapılmıştır.

Savunma alanına yönelik tedarikçi seçim sürecinde literatürden elde edilen ve Tablo 1'de belirtilen kriterler problemin yapısına uygun olarak ve savunma firmalarında (birden fazla savunma kuruluşu) çalışan alan uzmanı olan mühendislerin ve tedarik birimlerinde görev yapan satın alma/tedarik uzmanlarının

görüşleri de dikkate alınarak azaltılmış/birleştirilmiştir. Ayrıca savunma tedarik stratejileri incelenmiş ve bu stratejilerden çalışmamıza entegre edilebileceği değerlendirilen kriterler

çalışmaya dahil edilmiştir. Sonuç olarak çalışmada; 9 ana ve 12 alt kriter tedarikçi seçiminde kullanılacaktır. Problemin hiyerarşik yapısı ise Şekil 2’de yer almaktadır.



Şekil 2: Problemin hiyerarşik yapısı.

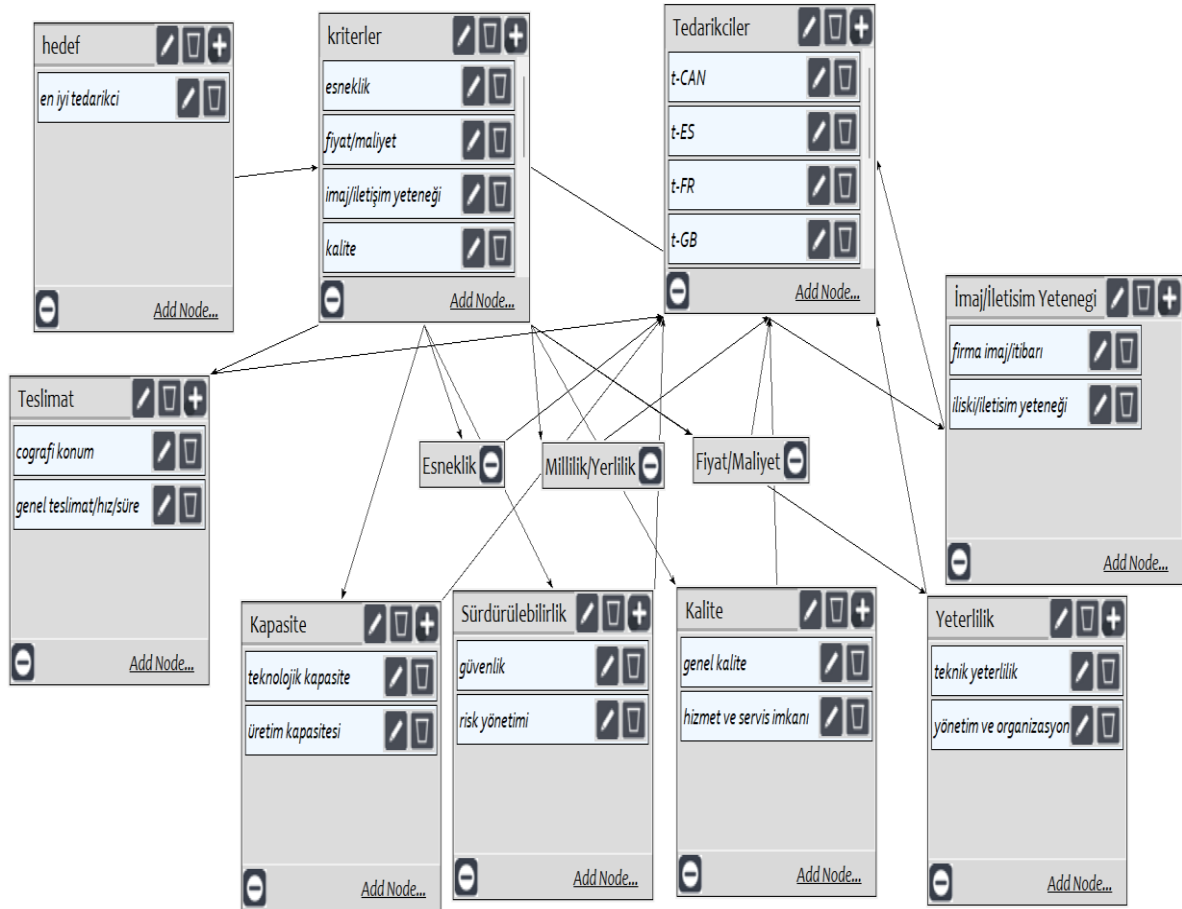
Çalışmanın ana ve alt kriterleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5: Çalışmada Kullanılan Kriterlerin Gösterimi.

ANA KRİTER	ALT KRİTER
Kapasite (KP)	Teknolojik Kapasite (TK)
	Üretim Kapasitesi (ÜK)
Kalite (KL)	Genel Kalite (GK)
	Hizmet ve Servis İmkânı (HS)
Teslimat (TS)	Gn.Teslimat/Süre (GT)
	Coğrafi Konum (CK)
Sürdürülebilirlik (SR)	Güvenlik (G)
	Risk Yönetimi (RY)
Yeterlilik (YT)	Teknik Yeterlilik (TY)

ANA KRİTER	ALT KRİTER
	Yönetim ve Organizasyon (YO)
İmaj/İletişim Yeteneği (İİ)	Firma İmaj/İtibarı (Fİ)
	İlişki/İletişim Yeteneği (İY)
Esneklik (ES)	Alt Kriter Bulunmamaktadır.
Fiyat (F)	Alt Kriter Bulunmamaktadır.
Millilik/Yerlilik (MY)	Alt Kriter Bulunmamaktadır.

Çalışmanın Super Decision programında gösterimi ise aşağıda yer alan Şekil 3’de sunulmaktadır.



Şekil 3: Problemin ağ yapısı.

Tablo 5’te yer alan kriterlerden faydalanılarak kriterlerin birbirlerine göre üstünlüklerini gösteren AHP karar matrisleri oluşturulmuştur. Ortaya çıkan matriste sütunların toplamı 1’e eşit olmak zorundadır. Sonrasında satırların

ortalaması hesaplanarak her kriter için bu işlem yinelenmiştir. Yapılan işlem ve yinelemeler sonucunda Tablo 6’da yer alan verilere ulaşılmıştır.

Tablo 6: Tedarikçilere göre kriter ağırlıklarının gösterimi.

Kriter Ülke	ES	F	MY	Fİ	İY	GK	HS	TK	ÜK	G	RY	CK	GT	TY	YO
t-US	0,16	0,06	0,06	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24	0,24	0,03	0,09	0,03	0,03	0,25	0,28
t-GE	0,07	0,06	0,06	0,24	0,25	0,22	0,26	0,24	0,24	0,05	0,06	0,09	0,05	0,25	0,26
t-FR	0,05	0,10	0,06	0,06	0,06	0,08	0,07	0,07	0,07	0,03	0,03	0,08	0,05	0,09	0,09
t-CA	0,03	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05
t-GB	0,09	0,10	0,06	0,13	0,10	0,12	0,13	0,21	0,21	0,08	0,09	0,05	0,08	0,14	0,14
t-IT	0,16	0,14	0,06	0,13	0,13	0,17	0,13	0,10	0,10	0,20	0,20	0,13	0,15	0,09	0,08
t-ES	0,11	0,19	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,15	0,11	0,07	0,22	0,03	0,03
t-TR	0,29	0,28	0,56	0,08	0,10	0,05	0,06	0,03	0,03	0,40	0,35	0,49	0,36	0,05	0,05

İkili karşılaştırmalar neticesinde ana kriterlerin genel ağırlık gösterimi Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7: Ana kriterlerin genel ağırlık gösterimi.

esneklik	0.09511
fiyat/mal-	0.04220
imaj/ilet-	0.02178
kalite	0.24271
kapasite	0.09827
millilik/~	0.13972
sürdürüle-	0.06252
teslimat	0.11038
yeterlilik	0.18732

Karşılaştırmalar neticesinde elde edilen tutarlılık oranları (TO) Tablo 8’de yer almaktadır:

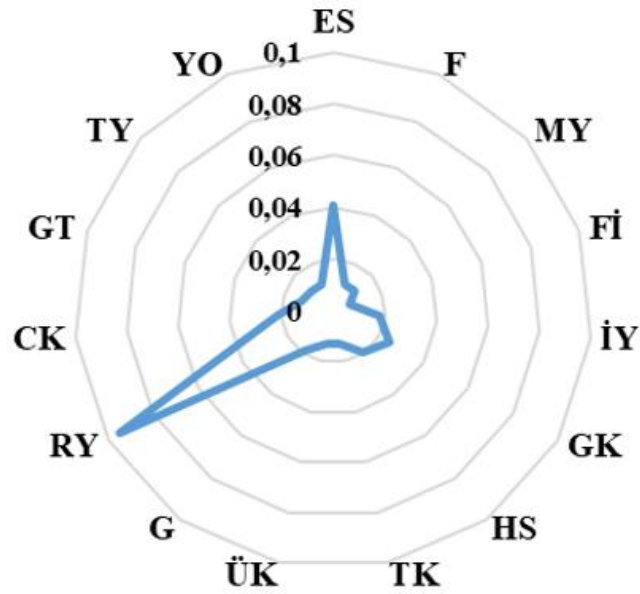
Tablo 8: Tutarlılık oranları (TO).

	ES	F	MY	Fİ	İY	GK	HS	TK	ÜK	G	RY	CK	GT	TY	YO
TO	0,041	0,011	0,011	0,007	0,018	0,025	0,020	0,013	0,013	0,019	0,095	0,022	0,013	0,011	0,011

Şekil 4’de ise tutarlılık oranlarının radar gösterimi yer almaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere hesaplanan tüm karşılaştırma

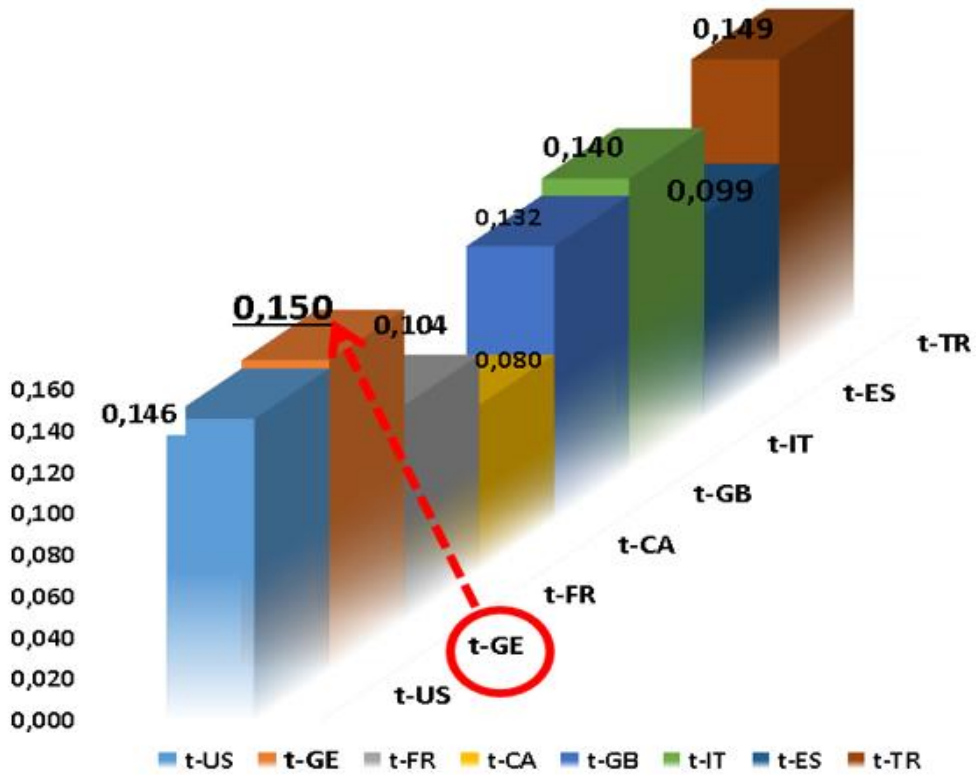
matrislerinin tutarlılık oranları 0,10’dan küçük çıkmıştır. Buradan oluşturulan ikili

karşılaştırma matrislerinin tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.



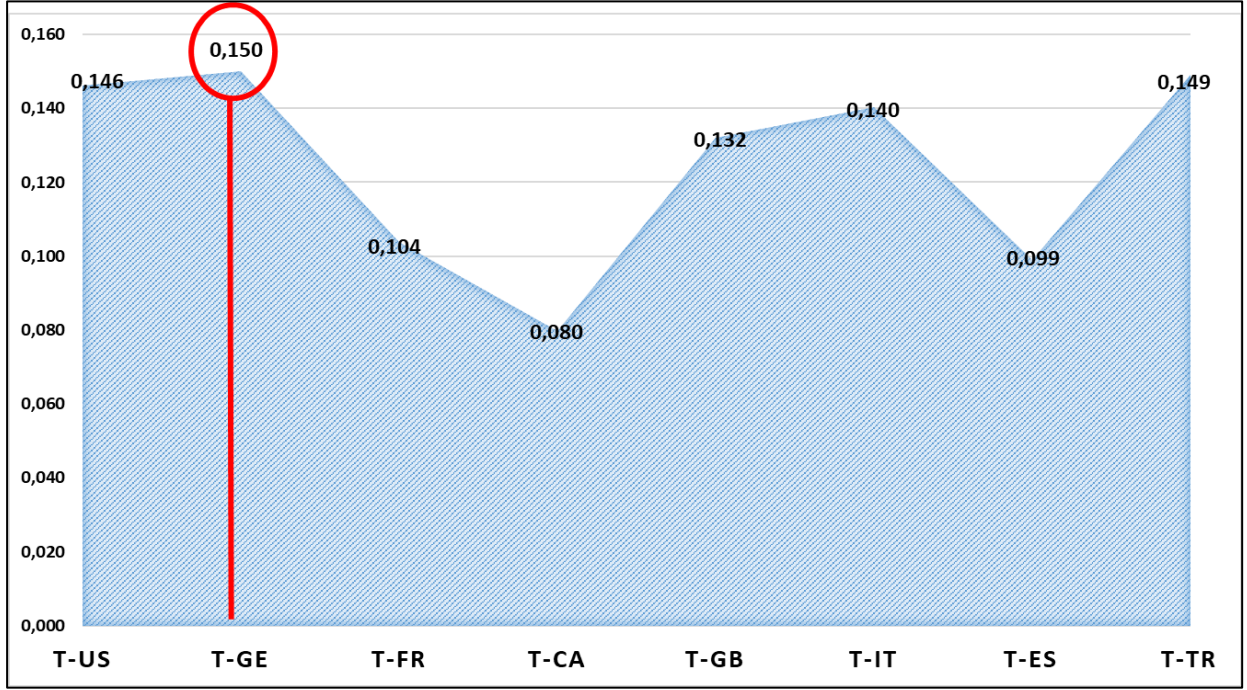
Şekil 4: Tutarlılık oranları radar gösterimi.

Tüm kriterlerin karşılaştırılması sonucunda tedarikçilerin puan baremine karşılaştırılması Şekil 5'te, söz konusu tedarikçiler arasında en ideal tedarikçinin gösterimi ise Şekil 6'da yer almaktadır.



Şekil 5: Tedarikçilerin karşılaştırılması.

Aşağıda yer alan grafikte de belirtildiği üzere t-GE tedarikçisinin en yüksek değer ile yer aldığı görülmektedir.



Şekil 6: En ideal tedarikçinin gösterimi.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND DISCUSSION)

Savunma alanında doğru ve uygun (yeterli) tedarikçilerle çalışmak her zaman en önemli konulardan biri olmuştur çünkü tedarik işlevinin tedarikçinin asli işlevlerini yerine getirmesini ya da planlanan hedeflerine ulaşmasını direkt etkileyecek bir niteliğe sahip olmaktadır. Tedarik işlevinin tedarik makamının planlarına ya da beklentilerine uygun olarak çalışmadığı durumlarda, hedeflerin tutturulması riske girebilir ya da asli işlevlerini yerine getirme hususu önemli derecede zarar görebilir. Bu durum zamanında tedarik edilemeyen savunma silah/sistemlerinden dolayı savunma yönetimi ve planlamasında zafiyetler yaratabilir.

Tedarikçi seçimi, küreselleşmiş rekabet ortamı, risk ve güvenilirlik unsurları, kalite, maliyet ve zamanlılık etkenleri gibi birçok faktörün etkisi altında önemini bugün de gittikçe artan şekilde devam ettirmektedir. Bu nedenle uygun tedarikçilerin seçimi, kurumların büyük bir kısmı için hala en önemli hatta stratejik karar alanlarından biri olarak devam etmektedir.

Stratejik önemi her geçen gün artan savunma alanı özelindeki tedarikçi seçimine yönelik bu çalışmamızda seçim kriterleri; 1960'lardan günümüz çalışmalarına kadarki araştırmaların standartlaştırılıp sınıflandırılarak analiz edilmesinden ve savunma tedarik strateji/yöntemlerinin incelenerek derlenmesinden elde edilmiştir. Müteakiben problemin yapısına uygun olarak ve savunma firmalarında çalışan alan uzmanı olan mühendislerin görüşleri de

dikkate alınarak azaltılmış/birleştirilmiştir. Çalışma, tedarikçi seçimi özelinde hem literatürdeki çalışmalarda kullanılan kriterlerin tek bir çatıda toplanması itibari ile hem de savunma strateji/yöntemlerinin incelenerek kriter havuzuna eklediği yeni kriterler ile farklılık arz etmektedir. Ayrıca makalede, sivil ve askeri alanda faaliyet gösteren kuruluşların tedarikçi seçimine yönelik incelemeler yer alsa da nihai olarak elde edilen kriterler ve bunun uygulama bölümünde değerlendirilmesi savunma alanı ile sınırlıdır. Savunmanın kritik alanlarında kullanılmak üzere alınacak haberleşme sistemi için 8 farklı ülkeden toplam 8 tedarikçi arasından (t-US, t-GE, t-FR, t-CA, t-GB, t-IT, t-ES, t-TR) seçim için AHP hesaplamaları Super Decisions programı aracılığıyla yapılmış ve karşılaştırmaların tutarlı olup olmadığı kontrol edilerek tutarlı olduğu görülmüştür. Hesaplamalar sonucunda teknik yeterlilik, hizmet ve servis imkânı, genel kalite, teknolojik kapasite ve üretim kapasitesi gibi kriterlerde rakiplerine önemli avantaj sağlayan t-GE tedarikçisinin seçilebilecek en ideal tedarikçi olduğu görülmüştür. Söz konusu seçim işleminde diğer tedarikçiler için elde edilen sıralama ise t-TR, t-US, t-IT, t-GB, t-FR, t-ES ve t-CA şeklindedir. İkinci sırada yer alan t-TR tedarikçisinin millilik/yerlilik kriterinde rakiplerine nazaran avantajlı konumda bulunmasına rağmen kalite ve yeterlilik hususlarında aynı performansı gösterememesi en ideal tedarikçi seçilememesine neden olmaktadır. Burada unutulmaması gereken husus ise bahse konu yöntemin karar vericiler

için bir karar destek sağladığı, nihai tercihin karar vericiler tarafından yapılacak olmasıdır.

Çalışmanın kesitsel olarak yapılan bir çalışma olduğu, çalışma sonuçlarının boylamsal yapılacak çalışmalarla problemin çözümünde tedarikçilerin hedefleri ve kısıtları doğrultusunda geliştirilecek hedef programlama ile kritik alımlarda siparişlerin tedarikçilere atamasının yapılarak geliştirilebileceği ve sapmaların minimize edilebileceği değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT)

Oğuzhan ÜNLÜ: Kavramsal tasarım, Analiz, Yazma.

Memduh BEĞENİRBAŞ: Metodoloji, Denetim.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] O. Ünlü, ve M. Beğenirbaş, Geleceğin Belirsizliğinde Beşeri Sermayenin Önemi: Savunma Planlayıcılarına Öneriler, Güvenlik Stratejileri Dergisi, 17 (39), 639-667, (2021).

[2] B. Desticioğlu, & M. A. Ayan, Savunma Tedarik Konusunda Yapılan Çalışmaların Bibliyometrik Analizi. Savunma ve Savaş Araştırmaları Dergisi, 32(1), 159-196, (2022).

- [3] R. Matthews, “Smart Management of Smart Weapons”, Part Three, pp. 75-93. Berkok, Uğurhan G. (Ed.), *Studies in Defense Procurement*, School of Policy Studies, Queen’s University Kingston, Ontario, Canada), (2006).
- [4] Y. Aydın, T. Eren, “Savunma Sanayiinde Stratejik Ürün İçin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Tedarikçi Seçimi”. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 7 (1), 129-148, (2017).
- [5] G. W. Dickson, “An analysis of vendor selection systems and decision). *Journal of Purchasing*. 2(1), 5–17, (1966).
- [6] M. Beğenirbaş, *Savunma Yönetimi ve Planlaması*, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, (2022).
- [7], G. Akman, K. C. Pamuk, Ç. Karabıçak, “Yeni Ürün Geliştirme Sürecinde Bulanık AHP & ORESTE Bütünleşik Yöntemi ile Tedarikçi Seçimi: Savunma Sanayisinde Bir Uygulama”. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 788-807 . DOI: 10.35193/bseufbd.954791, (2021).
- [8] Aicha Aguezoul, Ladet Pierre. “A multiobjective approach to vendor selection taking into account transportation”. 2nd World on Production & Operations Management Society, Cancun, Mexico. pp.17. fffal-00553891ff, Apr (2004),
- [9] N. Umarusman, T. Hacıvelioğulları, “Solution Proposal For Supplier Selection Problem: An Application In Agricultural Machinery Sector With Global Criterion Method”. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 33 (1), 353-368. DOI: 10.24988/deuuiibf.2018331743, (2018).
- [10] K. N. Demir, “Bir savunma sanayii firmasında tedarikçi seçimi çalışması”. (Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara), (2018).
- [11] M. Çelikkol, “Tedarikçi seçimi problemi: savunma sanayinde bir TOPSIS uygulaması”. *Multi-criteria Decision Making*, 1, 1-12, (2017).
- [12] A. Özdemir, “Ürün grupları temelinde tedarikçi seçim probleminin ele alınması ve Analitik Hiyerarşi Süreci ile çözümlenmesi”. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, İ.İ.B.F. Dergisi*, 12(1), (2010).
- [13] F. Tahriri, M. R. Osman, R. M. Yusuff, A. Esfandyari, “A classification of multi-criteria and evaluation of supplier selection methods”. *Proceedings of the 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, October 20-23, Alexandria, Egypt. (Eds: M. H. Elwany & A. B. Eltawil), (2007).
- [14] M. Ak Oğuz ve M. Köksal, “AHP ve TOPSIS Yöntemi İle Tedarikçi Seçimi”. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 17 (34), 69-89. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ticaretfbf/issue/55969/506870>, (2018).

[15] H. Yürekli, “Taarruz Helikopterleri Seçiminde ELECTRE Yönteminin Kullanılması”. (Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi SBE İşletme A.B.D. Sayısal Yöntemler Bilim Dalı. İstanbul), (2008).

[16] İ. Duman, “Çok ölçütlü karar verme yöntemleriyle hava savunma sistemi seçimi”. (Yüksek Lisans Tezi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı. Haziran), (2019).

[17] C.A. Weber, J.R. Current, “Theory and Methodology: A Multi-Objective Approach to Vendor Selection”, *European Journal of Operational Research*, 68, 173–184, (1993).

[18] C. A. Weber, J. R. Current, W. C. Benton, “Vendor selection criteria and methods”. *European Journal of Operational Research*, 50, 2-18, (1991).

[19] Z. Zhang, J. Lei, N. Cao, K. To, K. Ng “Evolution of supplier selection criteria and methods”. *Eur. J. Oper. Res.* 4: 335-342, (2003).

[20] Ş. Can, F. Arıkan, “Bir savunma sanayi firmasında çok kriterli alt yüklenici seçim problemi ve çözümü”. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 645-654, (2014).

[21] İ. Saraçoğlu, H. A. Dağistanlı, “Tedarikçi seçiminde Bulanık Mantık-AHP ve VIKOR yönteminin bağlantı elemanları firmasında uygulanması”. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 12, 40-54, (2017).

[22] Y. Aydın, T. Eren, “Savunma sanayiinde stratejik ürün için çok kriterli karar verme yöntemleri ile tedarikçi seçimi”. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 129-148, (2018a).

[23] Y. Aydın, T. Eren, “Hava Savunma Sanayii alt yüklenici seçiminde bulanık mantık altında çok kriterli karar verme ve Hedef Programlama yöntemlerinin kullanılması”. *Journal of Aviation*, 2(1), 10-30, (2018b).

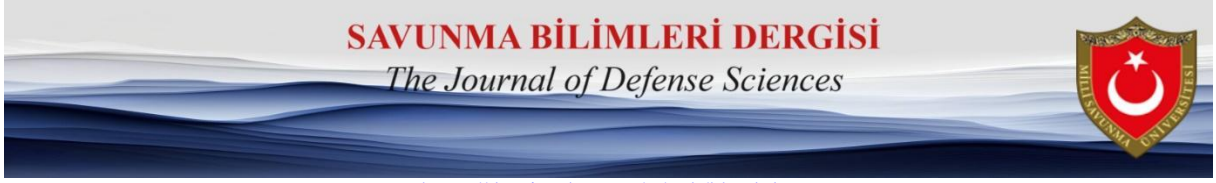
[24] T.A. Dolu, “Savunma Sanayi Sistemlerine Parça Tedariğinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Kullanılması: Konya Sanayisinde Uygulama”. (Yüksek Lisans Tezi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı. Aralık), (2020).

[25] W. Ho, X. Xu, P.K. Dey, “Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review”. *Eur. J. Oper. Res.*, 202: 16-24. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.05.009, (2010).

[26] J.W. Wang, C.H., Chen, H.K., “Fuzzy hierarchical TOPSIS for supplier selection”. *Applied Soft Computing*, 9, 377-386, (2009).

[27] S. Prasanna Venkatesan, M. Goh, "Multi-objective supplier selection and order allocation under disruption risk". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, 95(C), 124-142. DOI: 10.1016/j.tre.2016.09.005, (2016).



- [28] D. Lee, T. Lee, Sk. Lee, Or. Jeong, H. Eom, Sg. Lee, “BestChoice: A Decision Support System for Supplier Selection in e-Marketplaces”. J. Lee, J. Shim, Sg. Lee, C. Bussler, S. Shim, (Eds) *Data Engineering Issues in E-Commerce and Services*. DEECS 2006. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 4055. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11780397_16, (2006).
- [29] E.A. Cengiz, O. Aytekin, I. Özdemir, H. Kusan, A. Cabuk, “A Multi-criteria Decision Model for Construction Material Supplier Selection”. *Procedia Engineering* (196), 294-301, (2017).
- [30] O. Ünlü, “Doğu Akdeniz'de Mersin ve İskenderun Limanlarına alternatif sivil ve askeri liman kuruluş yeri belirleme çalışmaları”. (Yüksek Lisans Tezi. MSÜ Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara), (2020).
- [31] S. Sarkar, D. K., B. Sarkar, “An integrated fuzzy multiple criteria supplier selection approach and its application in a welding company”. *Journal of Manufacturing Systems*. 46, January, 163-178, (2018).
- [32] V. Özkır, “Belirsizlik Altında Çevre Bilinçli Tedarikçi Seçimi Probleminin İncelenmesi”. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 19 (1), 23-37. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/doujournal/issue/66678/1043144>, (2018).
- [33] H.S. Park, A.E.S. Choi, “Fuzzy multi-objective optimization case study based on an anaerobic co-digestion process of food waste leachate and piggery wastewater”. *Journal of Environmental Management*, Volume 223, 1 Pages 314-323. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.009>, (2018)
- [34] H. A. Tayalı, “Tedarikçi Seçiminde WASPAS Yöntemi”. *The Journal of Academic Social Science*, 5(47): 368-380, (2017).
- [35] C.N. Liao, H.P. Kao, “An Integrated Fuzzy TOPSIS and MCGP Approach to Supplier Selection in Supply Chain Management”. *Expert Systems with Applications*, 38 (9), 10803–10811. [doi:10.1016/j.eswa.2011.02.031](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.031), (2011)
- [36] S.M. Arabzad, M. Ghorbani, J. Razmi, H. Shirouyehzad, “Employing fuzzy TOPSIS and SWOT for supplier selection and order allocation problem”. *Int J Adv Manuf Technol*. 76, 803–818. doi.org/10.1007/s00170-014-6288-3, (2015).
- [37] A. Sanayei, S.F. Mousavi, A. Yazdankhah, “Group decision making process for supplier selection with VIKOR under fuzzy environment”. *Expert Systems with Applications*, 37, 24-30, (2010).



<https://dergipark.org.tr/pub/khosbd>

Grafik Sinir Ağları Üzerine Bir İnceleme

A Review on Graph Neural Networks

Hamza Talha GÜMÜŞ^{1,*}  Can EYÜPOĞLU² 

¹Milli Savunma Üniversitesi, Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

²Milli Savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Derleme

Başvuru: 16.04.2023

Düzeltilme: 21.08.2023

Kabul: 28.08.2023

Keywords

Grafik Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları

Derin Öğrenme

Grafik Evrişimli Ağlar

Anahtar Kelimeler

Graph Neural Networks

Artificial Neural Networks

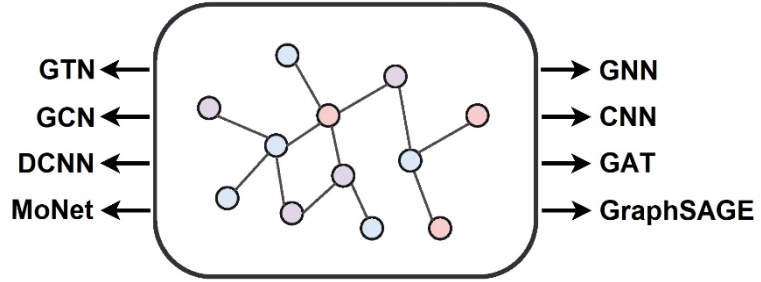
Deep Learning

Graph Convolutional Networks

Önemli Noktalar / Highlights

Yapay sinir ağları ailesinin bir üyesi olan grafik sinir ağları, son yıllarda gözle görülür bir yaygınlaşma kazanarak büyük bir ilgi odağı haline gelmiştir. Çizge sinir ağları olarak da adlandırılan grafik sinir ağları düğümler ve kenarlar arasındaki ilişkilerin modellenmesiyle farklı bilim alanlarında yeni çalışmaların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Ayrıca farklı amaçlar için tasarlanmış alt modelleriyle güncelliğini korumakta ve uluslararası çalışmaların odak noktasını oluşturmaktadır. Bu çalışma modellerin kullanımı ve detaylandırılması üzerine yapılan kapsamlı bir araştırma olmasının yanı sıra Türkçe literatürde bu alanda yapılan ilk çalışmalardan biri olması sebebiyle de önem arz etmektedir.

Grafiksel Özet / Graphical Abstract



Özet

Grafik sinir ağları (Graph Neural Networks-GNN), yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks-ANN) ailesine mensup ve grafikler üzerinden bilgi çıkarımı işlemi gerçekleştiren bir derin öğrenme yöntemidir. Bilinen ilk modeller GNN tabanlı oluşturulsa da evrişimli ağların kullanımının yaygınlaşması ile grafik evrişimli ağ (Graph Convolutional Network-GCN) modeli de popülerlik kazanmıştır. Bu durum GNN'lerin gelişmesine katkı sağlarken, iki ağ tabanında yeni modeller oluşturulmasına öncül olmuştur. Bu çalışmada GNN ve GCN modelleri tabanında oluşturulmuş 65 alt model ve bu modellerin etkilediği diğer modeller incelenmiştir.

Abstract

Graph neural networks (GNN) are a deep learning method that belongs to the family of artificial neural networks (ANN) and perform information extraction over graphs. Although the first known models were created based on GNN, the Graph Convolutional Network (GCN) model has gained popularity with the widespread use of convolutional networks. While this has contributed to the development of GNNs, it led to the creation of new models on two network bases. In this study, 65 sub-models created on the basis of GNN and GCN models and other models affected by these models were examined.

*Corresponding author, e-mail: 238004030@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Grafik sinir ağları (Graph Neural Networks – GNN), farklı modellerden oluşmakta, görevler farklı ve benzer modeller ile dikkate alınmaktadır. İlk grafik sinir ağı kavramı temel olarak 2009 yılında GNN modeli başlığıyla literatüre katılmıştır [1]. Teknolojinin gelişmesi ve bilişim dünyasına artan ilgi ve merakla birlikte kavram yıllar içerisinde gelişmiş, farklı modellere ayrılmış ve tek başına alt alan olma durumuna yükselmiştir. Araştırmamız kapsamında incelenen site özetinde toplam 65 grafik model tespit edilmiştir. Bu modeller; GCN (Graph Convolutional Networks – Grafik Evrişimli Ağlar), DCNN (Diffusion-Convolutional Neural Networks – Difüzyon-Evrişimli Sinir Ağları), HMGNN (Heterogeneous Molecular Graph Neural Network – Heterojen Moleküler Grafik Sinir Ağı), GAT (Graph Attention Network – Grafik Dikkat Ağı), DualGCN (Dual Graph Convolutional Networks – Çift Grafik Evrişimli Ağlar), GraphSAGE, CGMM (Contextual Graph Markov Model – Bağlamsal Grafik Markov Modeli), GraphTransformer, StoGCN, MPNN (Message Passing Neural Network – Mesaj Aktarma Sinir Ağı), NN4G (Neural Network for Graphs – Grafikler için Sinir Ağı), SSE (Stochastic Steady-State Embedding – Stokastik Kararlı Durum Gömme), PNA (Principal Neighbourhood Aggregation – Temel Komşuluk Toplaması), MONET (Mixture Model Network – Karışım Modeli Ağı), BiGG (BiG Graph Generation – Büyük Grafik Oluşturma), DGCNN (Deep Graph Convolutional Neural Network – Derin Grafik Konvolüsyonel Sinir Ağı), TGN

(Temporal Graph Network – Geçici Grafik Ağı), ARMA (Auto-Regressive Moving Average – Otomatik Gerileyen Hareketli Ortalama), MXMNet (Multiplex Molecular Graph Neural Network – Çoklu Moleküler Grafik Sinir Ağı), GIN (Graph Isomorphism Network – Grafik İzomorfizm Ağı), PinvGCN (Pseudoinverse Graph Convolutional Network – Sözdde Ters Grafik Evrişimli Ağ), LightGCN (Light Graph Convolution Network – Hafif Grafik Evrişim Ağı), S-GCN (Spherical Graph Convolutional Network – Küresel Grafik Evrişimli Ağ), RGCN (Relational Graph Convolution Network – İlişkisel Grafik Evrişim Ağı), TaxoExpan, SchNet (Schrödinger Network – Schrödinger Ağı), Point-GNN (Point Graph Neural Network – Nokta Grafiği Sinir Ağı), GGS-NNs (Gated Graph Sequence Neural Networks – Geçitli Grafik Dizisi Sinir Ağları), IPA-GNN (Instruction Pointer Attention Graph Neural Network – Talimat İşaretçi Dikkat Grafiği Sinir Ağı), DiffPool, HEGCN (Hierarchical Entity Graph Convolutional Network – Hiyerarşik Varlık Grafiği Evrişimli Ağ), AGCN (Adaptive Graph Convolutional Neural Networks – Uyarlanabilir Grafik Evrişimli Sinir Ağları), AdaGPR (Adaptive Generalized Pageranks – Uyarlanabilir Genelleştirilmiş Pageranks), GNS (Graph Network-based Simulators – Grafik Ağı Tabanlı Simülatörler), NeuroTactic, GCNII (Graph Convolutional Networks II – Evrişimli Sinir Ağları II), GAGNN (Group-Aware Neural Network – Gruba Duyarlı Sinir Ağı), FastGCN (Fast Graph Convolutional Networks – Hızlı Evrişimli Sinir Ağları II), Hi-LANDER (Hierarchical Link Approximation And Density

Estimation Refinement – Hiyerarşik Bağlantı Yaklaşımı ve Yoğunluk Tahmini İyileştirme), DGI (Deep Graph Infomax – Derin Grafik Infomax), CayleyNet, CGNN (Crystal Graph Neural Network – Kristal Grafik Sinir Ağı), GeniePath, BiGCN (Bi-Directional Graph Convolutional Network – Çift Yönlü Grafik Evrişimli Ağ), MinCutPool, GraphESN (Graph Echo State Network – Grafik Yankı Durum Ağı), TGN (Temporal Graph Network – Geçici Grafik Ağı), PGCChebNet, PGC-DGCNN, RE-NET (Recurrent Event Network – Tekrarlayan Etkinlik Ağı), Cluster-GCN (Cluster Graph Convolutional Networks – Küme Evrişimli Sinir Ağları), GNNCL (Graph Neural Networks with Continual Learning – Sürekli Öğrenme ile Grafik Sinir Ağları), MeshGraphNet, GCNFN (Graph Convolutional Networks for Fake News Detection – Sahte Haber Tespiti için Grafik Evrişimli Ağlar), Symbolic Deep Learning (Sembolik Derin Öğrenme), GATv2 (Graph Attention Network v2 – Grafik Dikkat Ağı v2), Graph Contrastive Coding (Grafik Karşılaştırmalı Kodlama), LGCL (Learnable Graph Convolutional Layer – Öğrenilebilir Grafik Evrişim Katmanı), AutoGL (Automated Graph Learning – Otomatik Grafik Öğrenme), GAP-Layer (Spectral Gap Rewiring Layer – Spektral Boşluk Yeniden Kabloleme Katmanı), CT-Layer (Commutate Times Layer – İşe Gidiş Süreleri Katmanı) ve GaAN (Gated Attention Networks – Geçitli Dikkat Ağları) şeklindedir. Modeller GNN tasarımı kullanıldığı gibi zorlu görevler özneline ya da GNN tasarım modülleri dışında özel görevler için de üretilmiştir [2]. Tablo 1 ve Tablo 2’de grafik modeller ile ilgili literatür taraması yapılmış ve

makale sayıları gösterilmiştir. Grafik modeller CNN ve GNN’ler dışında kendi üretilen alt modellerden de türetilmiştir.

Tablo 1: Grafik model makale sayıları.

Model	Makale Sayısı	Model	Makale Sayısı
GCN	685	GaAN	2
DCNN	235	HMGNN	1
GAT	107	DualGCN	1
GraphSAGE	70	CGMM	2
GraphTransformer	87	StoGCN	1
MPNN	36	NN4G	0
SSE	25	PNA	3
MONET	18	BiGG	1
DGCNN	30	TGN	1
ARMA	24	MXMNet	1
GIN	22	PinvGCN	1
LightGCN	12	S-GCN	2
RGCN	18	TaxoExpan	1
SchNet	12	Point-GNN	1
GGs-NNs	9	IPA-GNN	1
DiffPool	6	HEGCN	1

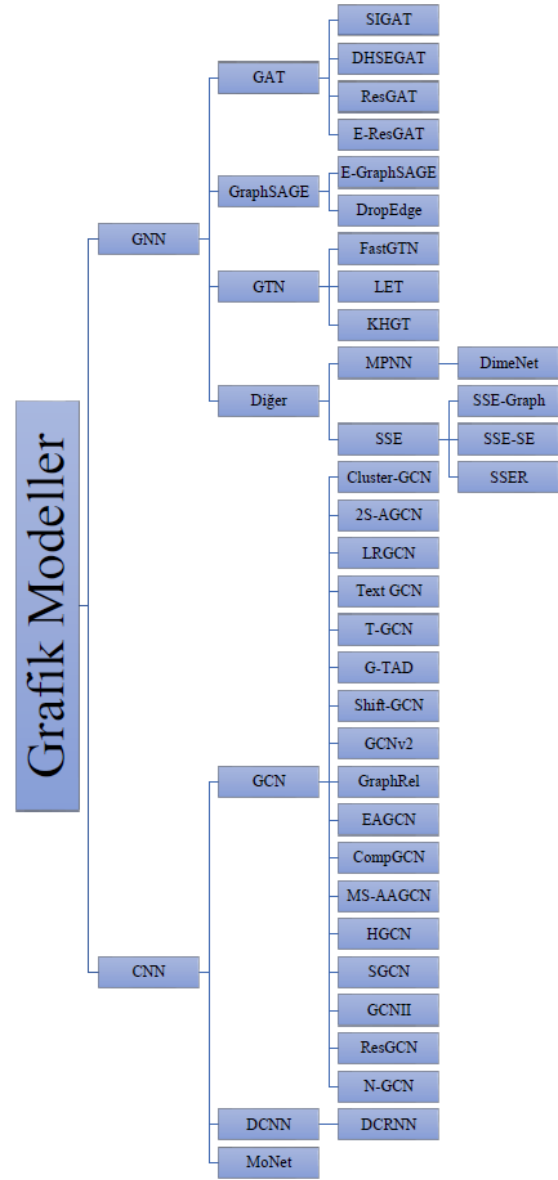
Tablo 2: Grafik model makale sayıları.

Model	Makale Sayısı	Model	Makale Sayısı
AGCN	7	AdaGPR	1
GNS	9	NeuroTactic	1
GCNII	7	GAGNN	1
FastGCN	4	Hi-LANDER	1
DGI	7	CayleyNet	1
CGNN	5	GeniePath	1
BiGCN	3	MinCutPool	1
DGCNN	3	GraphESN	0
TGN	4	MXMNet	1
ChebNet	4	PGC-DGCNN	1
RE-NET	2	Cluster-GCN	3
GNNCL	2	MeshGraphNet	1
GCNFN	2	SDL	1
GATv2	3	GCC	2
LGCL	3	GaAN	2
CT-Layer	1	GAP-Layer	1
AutoGL	1		

2. GRAFİK SINİR AĞLARI (GRAPH NEURAL NETWORKS)

İlk incelenen model olan GCN'ler bilinen adıyla grafik evrişim ağları olarak adlandırılmaktadır. GCN'ler CNN (Convolutional Neural Networks – Evrişimli Sinir Ağları)'lerin bir türevi olarak literatüre eklenmiştir. Yarı denetimli eğitimi kullanarak geliştirilmiş bir yaklaşımdır. Düğüm sınıflandırma, genel sınıflandırma, grafik sınıflandırma, grafik öğrenme, eylem tanıma, bağlantı tahmini, iskelet tabanlı eylem tanıma ve grafik gömme gibi alanlarda kullanılmaktadır. Evrişimsel mimari kullanılmasının amacı CNN'lerin grafik ve 3 boyutlu öklid uzayında veriminin düşük olmasıdır. Grafiklerde yapı ve düğüm özelliklerini kodlama yapan gizli katman öğrenimi gerçekleştirmektedir [3]. Şekil 1'de grafik modellerin alt modelleri görülmektedir.

GCN'ler birçok farklı katman ve alanda uygulanmaktadır. Bu uygulama GCN'lerin zorluklarını da ortaya koymaktadır. Büyük ölçeklerde eğitim zorluğu GCN'lerin ortak zorluklarından birisi olmuştur. Basit çözüm olarak öne sürülen; SGD tabanlı algoritmalar, katman sayısı artışı ile maliyetin artması ve grafiğin tamamının tutulması sebebiyle büyük bir alan gereksinimine ihtiyaç duymaktadır. Bu zorluğu aşmak için küme-GCN geliştirilmiştir. Küme-GCN, her adımında ilişkili düğüm bloklarını örnekleyerek komşuluk aramasını kolaylaştırmaktadır [4]. GCN'ler sinir ağları ailesi arasında yaygın kullanılan ve güçlü sinir ağı denilebilecek potansiyel ve performansta olan sinir ağlarıdır.



Şekil 1: Grafik modellerin alt modelleri ile ilişkisi.

Düğüm temsili hesaplamasında öz yineleme kullanılmaktadır ve komşuluk değerleri de kullanıldığında, katman sayısı ve alan boyutunun artmasına neden olmaktadır. Düğüm başına alan boyutu yüksek olması sebebiyle alt örnekleme uygulanması da sonucu tam olarak çözmemektedir. Bunun için geliştirilen metotta iki komşu kullanıldığında başarı sağlanan kontrol değişkeni tabanlı algoritmalar yardımıyla komşu boyutu örneklenmiştir [5]. Yarı denetimli öğrenme için etiket yayma algoritmaları olarak bilinen LPA algoritmaları

da kullanılmaktadır. LPA'lar, özellik yayılımı kullanan GNN'nin aksine etiket yayılımı kullanmaktadır. İki algoritmada verimli olmasına karşılık birleştirilmek için henüz bir model geliştirilmemiştir. Bu sebeple benzer özellikler gösteren, eğitim ve sonuçta özellik ile birlikte yayılımı birleştirerek kullanılan UniMP (Unified Message Passing – Birleşik Mesaj Geçiş) modeli geliştirilmiştir. Model, ilk adımında grafik dönüştürücü ağını benimsemekte, ikinci adımında ise ağı eğiterek maskeli etiket tahmini yapmaktadır [6]. GCN'ler aynı zamanda insan bedeni iskelet sistemini uzay-zamansal grafikler şeklinde modellemişlerdir. Model giriş değeri sabit ayarlama ve manuel topoloji ile oluşturulmuştur. Bu modelde ikinci derece bilgiler yani uzunluk ve yön bilgileri hesaplama maliyetini artırması sebebiyle nadir durumlarda araştırılmaktadır. Bu sorunu çözmek için 2s-AGCN (Two-Stream Adaptive Graph Convolutional Network – İki Akışlı Uyarlanabilir Grafik Evrişim Ağı) modeli önerilmiştir [7]. GCN'ler aynı zamanda gerçek dünya modelleri içinde kullanılmaktadır. Bunun en bilinen örneklerinden birisi yol hatası tahminidir. Grafiklerde yapı dinamiği ve zaman bağımlılığını belirleme için kullanılan LRGCN (Long Short-Term Memory R-GCN – Uzun Kısa Süreli Bellek R-GCN) modeli önerilmiştir. Zamansal kavramlarda zaman içi ve zamanlar arası ilişkiler için GCN'yi kullanan LRGCN, SAPE (Self-Attentive Path Embedding – Özenli Yol Gömme) modeline de ilham olmuştur. Bu modelin özelliği ise keyfi uzunlukları grafiklerde bulunan sabit uzunluklara ekleyebilmesidir. Bu sayede gerçek dünya

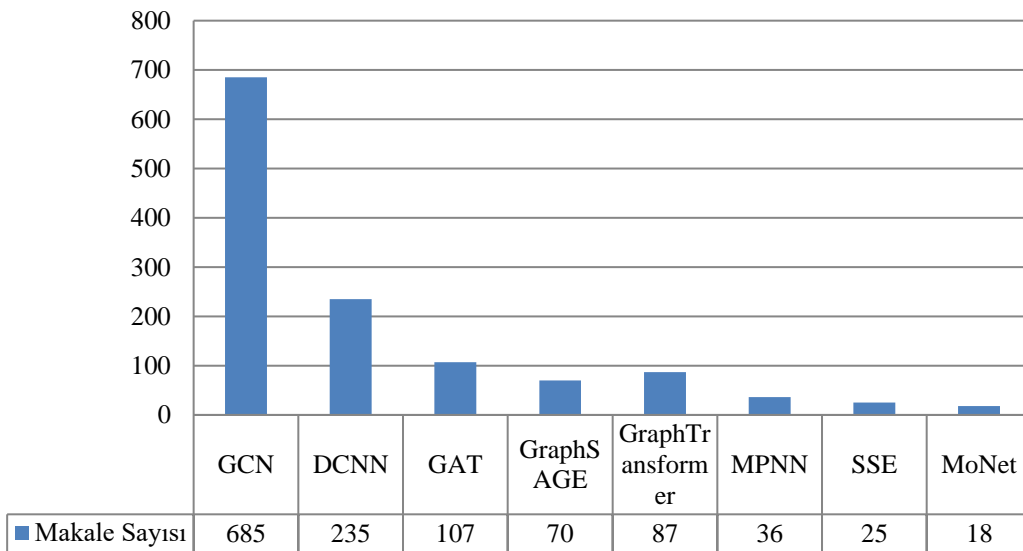
tahmini kolaylaşmaktadır [8]. GCN'ler aynı zamanda dizi içerisinde bulunan nesnelere tahmini için de kullanılmaktadır. Bu tahmin görüntü tanıma olarak adlandırılmaktadır [9]. Metin sınıflandırma görevi CNN'ler içerisinde oldukça yaygındır. CNN'ler arasında çok fazla metin sınıflandırma çalışması olsa da GCN'ler içerisinde bu sayı oldukça azdır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için Text GCN (Metin GCN) modeli önerilmiştir [10]. Makine öğrenimi problemlerinden biri olan ve eğitim esnasında gözlemlenmeyen sınıfları inceleyerek aitlik sınıfını tahmin eden ZSL (Zero Shot Learning – Sıfır Atışlı Öğrenme), anlamsal ve kategorize edilmiş ilişkili ölçeklendirmek için GCN ile ilişkilendirilmiştir. Geliştirilen model bilinen sınıflardan elde edilen bilgiler ile çıkarım yaparak bilinmeyen sınıflar için tahminde bulunmaktadır. Grafik üzerinde anlamsal boyutlar girdi olarak işlenir ve kategorisel olarak tahminler elde edilir [11]. GCN'ler yol tahmini için kullanıldığı gibi trafik tahmini için de kullanılmaktadır. Gerçek zaman içerisinde doğru trafik tahmini için geliştirilmiş T-GCN (Temporal GCN – Geçici GCN) modeli, günümüzde gelişen akıllı trafik sistemleri için gerçekleşen sorunlara değinmiştir. Model aynı zamanda gelişimi ile kentsel tasarım ve trafik kontrol yönetimine de atıfta bulunmaktadır [12]. Video anlama derin öğrenme algoritmalarının önemli konularından biridir. Videolar içerisinde zamana bağlı eylem algılama, anlamsal bağlam yerine zamansal bağlama odaklı olmuştur. Bu soruna çözüm için G-TAD (Graph Temporal Action Detection – Grafik Zamansal Eylem Algılama) modeli önerilmiştir. Model alt grafik yerelleştirmede

zaman ve anlamı birleştirerek sonuçlar üretmektedir [13]. GCN'ler iskelet tabanlı görevlerde eylem tanıma için de kullanılmaktadır. Bunun başlıca sebebi bu görevin bilgisayarlı görme alanında etkin olması olmuştur. Uzay-Zaman grafiğinin esnek olmaması ve hesaplama maliyetinin yüksek olması sebebiyle sınırlandırıcı olmaktadır. Bu sorunların çözümü için geliştirilen Shift GCN (Kaydırma GCN), eylem tanıma görevlerini başarıyla yerine getirmiştir [14]. GCN'ler metin tahmini dışında yazışma tahmini görevleri için de kullanılmaktadır. Yazışma tahmininde asıl etken tanımlayıcı oluşturma ve kilit noktalar olmaktadır. Bu sorun için geliştirilen GCNv2 modeli, 3 boyutlu geometri için eğitilmiş fakat orb ile tasarlanması gerçek zamanlı eşzamansal yerelleştirme ve haritalamada yapabilmektedir [15]. İlişki tahmini GCN'lerde yaygın kullanılan bir görev olmuştur. Farklı modeller geliştirilerek ilişki tahminleri yapılmıştır. Bu modellerden biri de GCN kullanarak geliştirilen GraphRel modelidir. GraphRel, kelime grafiği kullanarak metin tahmini benzeri bir yol izlemektedir. Araştırdığı metnin bölgesel ve metinsel özelliklerinden yararlanarak metin içerisinde bulunan çiftlerin örtük özelliklerini çıkarmaktadır [16]. İlişkili grafikler farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanlardan biri de kimya bilimidir. CNN'lerin yetersiz kalarak genelleştirilmesiyle oluşturulan GCN'ler moleküler grafiklerde kullanılması farklı modellerle zenginleştirilmiştir. Bu modellerden biri olan EAGCN (Edge Attention-Based Multi-Relational GCN – Uç Dikkat Tabanlı Çok İlişkisel GCN) modeli, düğüm özellikleri ve dikkat ağı görevlerini birlikte

görerek öğrenmektedir. Model dikkat matrisi kullanarak verimini artırmaktadır [17]. GCN'ler kullanılmaya başlanmasından itibaren ana odak noktasını yönsüz grafikler üzerinden gerçekleştirmektedir. Çok ilişkili ve yönlü grafiklerin hesaplama maliyetleri fazlalığı, parametre sayısının yüksekliği ve düğüm öğrenme sınırlaması gibi sebeplerden dolayı çalışmaların önünde zorluk oluşturmaktadır. Bu zorluğa karşılık ilişkileri tahmin eden ve düğümleri öğrenme kullanan ilişkisel grafik modeli CompGCN (Composition GCN – Kompozisyon GCN) modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model yüksek başarı elde etmiştir [18]. Sinir ağlarında geliştirme esnasında karşılaşılan yeni sorunlar ve zorluklar diğer modellere her zaman örnek olmuştur. Bir model geliştirilirken, deneyler esnasında karşılaşılan zorluk farklı bir modelde çözüm önerisi olarak sunulmuştur. Karşılaşılan zorluklar yeni modellerin gelişimini büyük ölçüde etkilemiştir. Bu zorluklar CNN'lerin öklid dışı yapıları için GCN'leri genellemesiyle farklı bir bakış kazanmış ve gelişimi hızlandırmıştır. İskelet tabanlı eylem tanıma görevi, farklı modellerde kullanılmış ve bazı modeller sadece bu zorluğa çözüm oluşturmak için geliştirilmiştir. GCN'lerde bulunan zorluklar iskelet eylem tanıma ile birleşince grafik topolojisi manuel ya da buluşsal olarak ayarlama ve uzunluk ile yön hesaplama zorluğu başlıca sorunlarından biri olmaktadır. Bu duruma karşılık önerilen MS-AAGCN (Multi-Stream Attention-Enhanced Adaptive Graph Convolutional Neural Network – Çoklu Akış Dikkati Artırılmış Uyarlanabilir Grafik Evrişimli Sinir Ağı) modeli bireysel ve uçtan

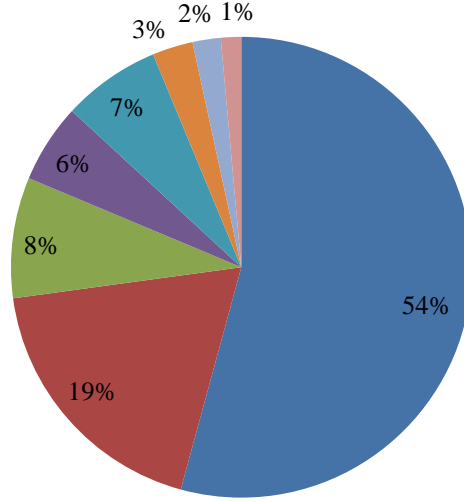
uca öğrenme ile grafik esnekliği sağlayarak uyumluluğu artırmaktadır. Model mekan-zaman-yön dikkat modeli ile üstün performans göstermektedir [19]. GCN'ler 3 boyutlu uzayda yüksek başarı elde etmektedir. Grafikler üzerinde yapılan çalışmalarında başarıları kendilerini kanıtlamıştır. Farklı şekillerde başarıları bilinse de hiperbolik durumlarda sorunlarla yaşamaktadırlar. Bu sorunu aşmak için geliştirilen HGCN modeli öznelikleri doğru analiz ederek eğrilik seviyesini belirlemesiyle GCN işlemlerini gerçekleştirmektedir. Giriş özellikleri öklid olan Hiperbolik GCN her katmanda eğitim yaparak verimini arttırmaktadır [20]. Grafik modellerde sekiz model hem fazla çalışma sayısı ile hem de kullanımından dolayı öne çıkmaktadır. Şekil 2'de bu modellerle ilgili makalelerin sayısını, Şekil 3'te ise bu modellerle ilgi yazılmış olan makalelerin oranlarını Şekil 4'te ise zaman içerisinde kullanımlarını gösteren grafikler verilmiştir.

Difüzyon – evrişim işlemlerinin tanıtımı ve kullanımının başlanmasıyla, difüzyon kullanan grafiksel verilerden öğrenme gereksinimi ve düğüm sınıflandırma yönteminin kullanımı için DCNN modeli geliştirilmiştir. Modelin öne çıkan özelliği, grafiksel verilerde gizli temsiller ile birlikte çok boyutlu verilerin geometrik nesnelere ile temsil edilmesine olanak tanınmasıdır [21]. DCNN'ler farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bu alanlardan birisi de tıbbi görüntülemedir. Tıbbi görüntüleme yöntemleri veri biliminin gelişmesi ve veri setlerinin çoğalmasıyla birlikte tahmin algoritmaları ile kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu veri setlerinden biri olan ChestX-ray14, 14 farklı göğüs hastalığı için büyük veri olarak kullanılmaktadır. DCNN'ler eğitilerek bilgisayarlı tanı sistemleri oluşturulabilmektedir. ChestX-ray14 veri kümesi DCNN ile kullanılmasıyla teşhis edilebilen eğitilmiş bir model geliştirilmiştir [22].



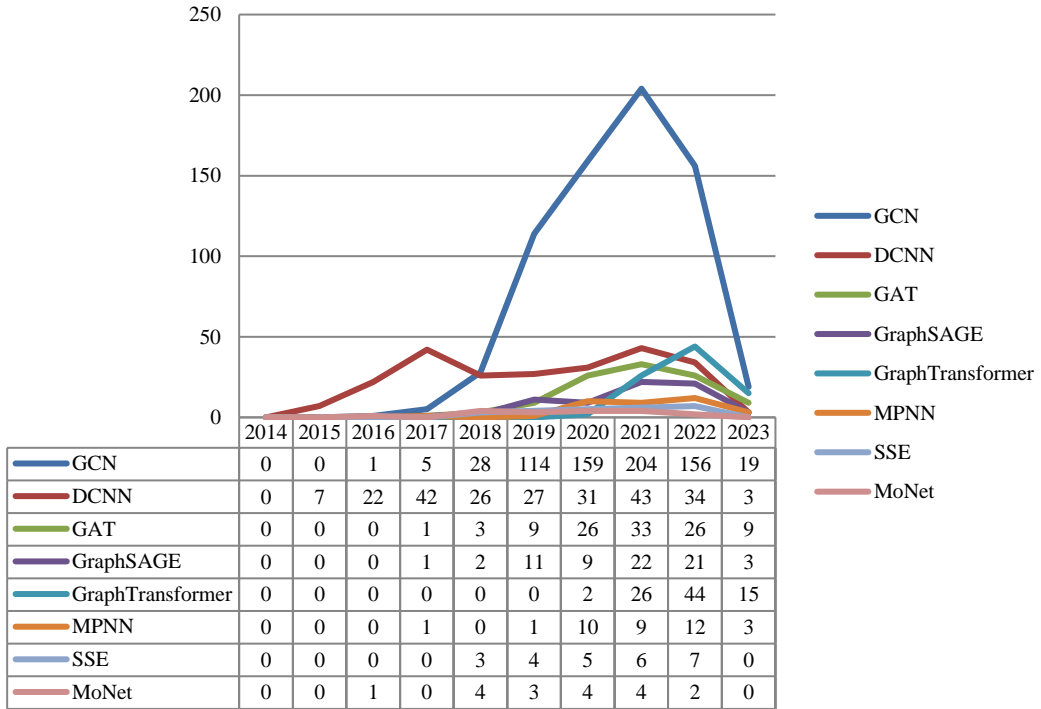
Şekil 2: Makale sayısı.

■ GCN ■ DCNN ■ GAT ■ GraphSAGE ■ GraphTransformer ■ MPNN ■ SSE ■ MoNet



Şekil 3: Yazılmış makalelerin yüzdelik oranı.

Zaman İçinde Kullanım



Şekil 4: Modellerin zaman içerisindeki kullanımı.

DCNN'ler aynı zamanda yeni modellere ilham olmuştur. DCRNN (Diffusion Convolutional Recurrent Neural Network – Difüzyon Evrişimli Tekrarlayan Sinir Ağı) modeli, uzay-zamansal tahmini verimli bir şekilde

kullanmakta ve sinirbilim, ulaşım ile iklim alanlarında tahmin gerçekleştirmektedir. Trafik tahmini sinir ağları tarafından yaygın kullanılan ve deneyler yapılan bir modeldir. Trafik akışının bir grafik üzerinde modellenmesi ve

mekânsal-zamansal bağımlılığı kullanan trafik tahmini için grafiklerde çift yönlü yürüyüşler kullanılmaktadır [23]. DCRNN üzerinden geliştirilen bir başka modelde ise trafik tahminin yanı sıra tıkanıklık tahmini de yapılmıştır [24].

GAT, maskeli öz-dikkat katmanlarını kullanarak grafik kıvrım ve yaklaşımlarında bulunan eksikliklerin giderilmesi için geliştirilmiş bir GNN modelidir [25]. İlişkisel grafik evrişim ağlarının eğitilmesi ile ilişkisel grafik dikkat ağları modeli oluşturulmuştur. İlişkisel dikkat ağlarının asıl amacı moleküler grafiklere çözüm üretmektir. Yapılan deneyler sonucunda modelin ilişkisel GCN'lere göre başarısız olduğu görülmüştür [26]. GNN'lerde mevcut anlayışlardan birisi eş yönsüz modellerin geliştirilmesinin gerekli olduğu yönünde olmuştur. Anizotropik modellerin izotropik modellerden daha başarılı olacağı düşünülmüş ayrıca grafik dikkat ağları ile karşılaştırmalı bir model geliştirilmiştir. EGC (Efficient Graph Convolution – Verimli Grafik Evrişim), mekansal değişim uyarlanabilirlik filtreleri ile modellenerek GAT'lara rakip olmuştur [27]. Grafik dikkat ağları başarısını sadece pozitif bağlantılı ağlarda sağlamaktadır. Pozitif ve negatif bağlantılarda verimli değildir. Bu sebeple GAT geliştirilerek SIGAT (Signed Graph Attention Networks – İmzalı Grafik Dikkat Ağları) modeli geliştirilmiştir. Modelin asıl amacı, ağdaki mesajları toplamak ve yaymaktır. Bu amaç için denge ve durum teorilerini genelleyerek imzalı bağlantı tahmini yapmaktadır. Model benzer model SGCN (Signed Graph Convolutional Network – İmzalı Grafik Evrişim Ağı) ve ağ gömme

yöntemlerinden daha verimli sonuçlar almıştır [28]. Model bağlantı tahmini görevi için kullanılmak üzere yenilenerek işaretli bağlantıları da tahmin edebilme özelliği kazandırılmıştır. wsGAT olarak bilinen model, SGCN ve GCNII ile karşılaştırıldığında daha verimli bir sonuç vermiştir [29]. GNN'lerin başka bir sorunu olan mevcut komşu ortalama yapılarına GAT'lar ile bir bakış sağlanmıştır. Mesafe dağılım bilgisini konum ve uzaysal değerler ile hesaplayan model düğümü iç özellikleri ile bir araya getirerek vektör uzayında toplamaktadır. DHSEGAT (Distance and Hop-wise Structures Encoding Enhanced Graph Attention Networks – Mesafe ve Hop-wise Yapıları Kodlama Geliştirilmiş Grafik Dikkat Ağları), gömme vektörlerinde başarı sağlayarak verimli sonuçlar elde etmiştir [30]. Bir başka kullanım alanı ise anomali tespittir. Anomali tespiti, veri içerisinde beklenilmeyen durum ve kalıpların bulunduğu tespit yöntemidir. GAT tespit üzerinde çok değişkenli zaman kullanmaktadır. Bu sebeple tespit veri madenciliği ve endüstriyel anlamda önem arz etmektedir. En büyük sorun ise farklı zaman dilimlerinin birbirlerinde hata oluşturması ve birbirleri ile etkileşime geçememesidir. Bu duruma çözüm olarak kendi denetimini kendisi yapabilen bir model geliştirilmiş, paralel olarak zaman serileri işlenmiştir [31].

GraphSAGE, tek tek gözlemlemeye dayalı olarak geliştirilmiş bir çerçeve modeldir. Düğümler GNN'lerde birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Düğüm gömme eğitimlerinin başında gelen sorun ise tüm düğümlerin bilinmesi durumudur. Görünmeyen ve bilinmeyen düğümler için önceki yıllarda

geliştirilmiş olan düğüm gömme modelleri işlevselliğini kaybetmektedir. Bu sebeple metin tabanlı ve tek tek gözlemlemeye dayalı öğrenme gerçekleştirilen GraphSAGE modeli geliştirilmiştir. Modelin çalışma prensibi komşu örneklemeye dayanmaktadır [32]. Grafik temsil öğrenmesi için en gelişmiş çerçeve olan GNN'ler, komşu özellikleri üzerinden çıkarım yapabilmektedir. Geliştirilen modeller genellikle tek tip grafik yapıları üzerine dayanmaktadır. Farklı grafik yapılarında modeller başarısız olmakta ve bu GNN'ler içerisinde bir sorun haline gelmektedir. GNN'lerde modellerin ayırt etme gücü için geliştirilen Weisfeiler-Lehman çizge izomorfizm testi yaygın olarak kullanılmaktadır. Test ayrıca grafik çekirdeği tasarımı için de kullanılmaktadır. Test analiz işleminde kullanılırken aynı kategori ya da benzer biçimli grafikler içerisinde eş yapı yani eşbiçim olarak ayırt etmektedir. Testin farklı alanlarda kullanılması ve akademik gelişim sebebiyle benzer modelleri ortaya çıkmıştır [33-34]. Günümüzde siber güvenliğin gelişimi ve bu gelişime ek olarak siber tehdit kavramının ortaya çıkarak yaygınlaşması GNN modellerine etki etmiştir. Bu durum karşısında en önemli görevlerden birisi de izinsiz giriş tespiti olmaktadır. Geliştirilen modeller çoğunlukla ağ topolojisi üzerine olsa da farklı alt alanlara da değinilmesi yeni görev ve modellerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. İzinsiz giriş tespiti, yetkisiz girişlerin farkına varırken veri bütünlüğünü de koruma temelindedir. GraphSAGE modeli temelleştirilerek izinsiz giriş tespiti için E-GraphSAGE modeli oluşturulmuştur. Bu modelde temel fikir GNN

üzerinden genelleştirme yaparak modelin izinsiz giriş tespiti üzerinde kullanılması amaçlanmaktadır. Model işlem yaparken orijinal bilgi verisini korumakta ayrıca az seviye sınıflarda da iyileştirme yapmaktadır [35]. İzinsiz giriş tespiti GraphSAGE modelleri için bir başlangıç noktası olmaktadır. Geliştirilen başka bir model GNN tabanında NIDS (Network Intrusion Detection System – Ağ Saldırı Tespit Sistemi) kullanarak analiz yapmaktadır. Model temelinde DOS (Disk Operating System – Disk İşletim Sistemi) ve IoT (Internet of Things – Nesnelerin İnterneti) bağlantılarında bulunan ağ izinsiz giriş tespitleri için geliştirilmiştir. Modelin gelişmişlik seviyesi yüksek ayrıca ağ anormalliği tespit etme yeteneğiyle de ön plana çıkmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda başarısını kanıtlamış NIDS'lar üzerinde farklı veri kümeleri ile test edilerek başarısını pekiştirmiştir [36]. GNN modelleri siber güvenlik alanında birçok farklı model ortaya çıkarmıştır. İzinsiz giriş tespiti dışında siber güvenlik alanının temel konularından olan ve ayrıca birçok makale ve tez ile incelenen zararlı yazılım tespiti, GNN modelleri için de büyük bir önem arz etmektedir. LIN (Leaping Information Networks – Sıçrayan Bilgi Ağları) modelleri ile tanıtılan ve JK (Jumping Knowledge – Atlama Bilgisi) mimarisi olarak bilinen komşuluktan yararlanan GNN modeli ile birleştirilmiştir. LIN analiz için kullanılmakta ve özellik-uyum görevlerini kolaylaştırmaktadır. Program görevleri ve görev arası etkileşim iletişimi için kullanılan Android FCGs (Function Call Graphs – İşlev İletişim Grafikleri) görev için iletişim temelinde

kalıpları analiz ederek çalışmaktadır. GNN sorunu olan aşırı yumuşatma için kullanılan atlama bilgisi sorunu en düşük seviyeye indirerek verimi yükseltmektedir [37-38]. Bir başka görev düğüm öğrenmesi için GraphSAGE modelleri aktif olarak kullanılmaktadır. Düğüm öğrenmesi görevindeki ana temel bellek verimliliği artırımı ve düğüm çıkarımlarındaki hesaplamalar olmaktadır. GraphSAGE bu zorlukları başarı ile aşmakta, yüksek doğruluğu elde etmektedir. Geliştirilen model veri temelinde düğüm örnekleme yapmaktadır [39]. Düğüm öğrenmesi görevi farklı görevlerin toplamı olarak da tanımlanabilir. Bu görevlerden birisi düğüm sınıflandırma görevidir. DropEdge isimli model temelinde GCN kullanılarak geliştirilmiştir. Model eğitimlerini engelleyen başlıca faktörler olan aşırı yumuşatma ve sığdırmanın zorluklarına karşı geliştirilen model veri artırımı ve mesaj geçişlerini azaltarak bu zorlukları aşabilmektedir. Model GraphSAGE, ResGCN ve JKNet ile birleştirilerek farklı veri setleri üzerinde başarı göstermiştir [40]. GCN modelleri GNN'lerde yaygın kullanımı ve farklı modeller ile birleştirilmesi ile üstün performans sağlamaktadır. Yarı denetimli öğrenme ve grafik öğrenmede yerleştirmelerin denetimsiz öğrenimi konularını birleştirerek N-GCN modelini oluşturmuştur. Modelin başarısı birden fazla GCN'i eğitmesi ve çıktı kombinasyonu öğrenmesi ile kendini kanıtlamıştır. N-GCN modeli GraphSAGE ile tekrar modellenerek bozulmalara karşı N-SAGE modelinin temelini oluşturmuştur [41].

Grafik dönüştürücü sinir ağları, rastgele grafikler için geliştirilmiş sinir ağı mimarisidir. GraphTransformator adı ile bilinen ağ, NLP (Natural Language Processing – Doğal Dil İşleme) için tasarlanmış, düğüm özelliklerinin belirsizliği, grafik topolojisinin önem arz ettiği ve temelden öngörü verimsizliği ile zorluklar çıkarmakta ve düşük verim elde etmektedir. İlk modele nazaran sonradan geliştirilen modellere dikkat katmanı, konumsal kodlama, katman normalizasyonu ve bağlantı tahmini görevlerini gerçekleştirecek eklemeler ile model verimli hale getirilmektedir. Mimari her ne kadar basit olarak tanımlanmış olsa da gelecek çalışmalara örnek olacağı savunulmuştur. Grafik dikkat katmanı grafik dönüştürücü sinir ağları için de diğer modellerde olduğu gibi önem arz etmektedir [42]. GNN'ler farklı kenar ve düğüm sayısından oluşan heterojen grafiklerin öğrenmelerinde büyük bir sorun teşkil etmektedir. Grafik dönüştürücü ağları bu soruna değinerek gürültü engellemeli ve düğüm temsillerini öğrenebilen bir model olmaktadır. Bu sorun için geliştirilen model standart grafik dönüştürücü ağlarına göre 230 kat daha hız ve az bellek kullanımı ile verimini göstermektedir. Model hızı ve verimi sebebiyle FastGTN (Fast Graph Transformer Networks – Hızlı Grafik Dönüştürücü Ağ) adını almaktadır [43]. Grafik dönüştürücü ağlarının dil işlemede kullanımı yaygınlaşmaktadır. Uzakdoğu dilleri, batılı dillere göre daha zor öğrenme seviyesinde olduğundan öğrenim hem önemli bir hale gelmekte hem de anlamsallık sebebiyle zorlaşmaktadır. Bu sebepten grafik dönüştürücü ağları dil işleme konusunda farklı çalışmalar ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmalardan birisi de

LET (Linguistic Knowledge Enhanced Graph Transformer – Dil Bilgisi Gelişmiş Grafik Dönüştürücü) modelidir. Model Çin dili üzerine geliştirilmiş ve anlamsal-yazım sorunlarına karşı verim elde etmiştir [44]. Grafik dönüştürücü ağları, farklı kullanıcı davranışı, bilgi tabanlı öğelerde ilişkisel çıkarım ve kullanıcı-öge özellikleri gibi farklı zorluklarla ilgilenmektedir. Modeller zorluklara karşı verimlilik alma ve zorluklara son verme amaçlı geliştirilmektedir. Bu zorluklara karşı olarak KHGT (Knowledge-Enhanced Hierarchical Graph Transformer Network – Bilgiyle Geliştirilmiş Hiyerarşik Grafik Dönüştürücü Ağ) modeli geliştirilmiştir. Model kullanıcı-öge arasındaki etkileşim özelliklerini araştırırken türlere özel davranış durumları belirleyebilmektedir. Ayrıca model tahmin görevlerinde hedef davranışı kullanarak etkileşimi ayırt edebilmektedir [45]. GraphTransformatör modelleri aynı zamanda biyoloji ve kimya grafiklerinde de kullanılmaktadır. İlaç keşfi için en önemli konulardan olan ara yüz temas tahminine yönelik hesaplamalarda doğruluk seviyesi yüksek olmalıdır. Bu yükseklik grafik dönüşüm ağı modellerinde de incelenerek verimin artırılması sağlanmıştır. Bu durum grafik dönüşüm ağlarının zengin öğrenmede etkili olduğunu göstermektedir [46].

GNN'lerin bilişim dışında da birçok farklı alanda kullanıldığı bilinmektedir. GNN'ler; kimya, biyoloji, malzeme bilimi ve ilaç keşfi gibi moleküler grafikler üzerinde başarılı olmaktadır. Modellerin çalışmasında giriş parametre değerlerini hesaplamak için mesaj geçiş algoritmaları kullanılmaktadır. Bu durum

MPNN'nin ortaya çıkmasında etkili olmuştur [47]. Moleküler grafiklerin bilimsel araştırmalarda kullanılması MPNN'lere değer katmıştır. Fakat standart modellerde bulunan düğüm arası mesafe kullanımının grafik temsil edilmesi ve yön bilgisinin dikkate alınmaması mesaj ileten ağlarda zorluklar oluşturmaktadır. Bu zorluklara karşılık DimeNet (Directional Message Passing Neural Network – Yönlü Mesaj Geçiren Sinir Ağı) modeli geliştirilerek, mesajların yönler ile ilişkilendirilmesiyle eşdeğerlik kazanılmaktadır. Model yön bilgisini düğümler arasındaki açılarla dönüştürerek elde etmektedir. Geliştirilme sürecinde dik ve verimli temsil oluşturulmak için global Bassel fonksiyonları ve harmonikleri kullanılmıştır. Deneyler sonucu yaygın kullanılan ve etki-tepki prensiplerine dayanan gauss radyal tabanı kullanılarak geliştirilmiş olan modellerden daha fazla verimli olduğu kanıtlanmıştır. RBNN (Radial Basis Neural Network – Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağları) biyolojide başarısını kanıtlamış sinir ağı modeli olurken MPNN modelleri moleküler grafiklerde başarısını kanıtlayarak RBNN modellerini geride bırakmıştır [48,49]. Moleküler grafikler arasında yaygınlaşan MPNN modelleri grafiklerin arasında mesafe ölçümü için de kullanılmaktadır. Mesafe ölçümünde modelleri zorlayan hesaplama karmaşıklığı, geometrik derin öğrenme yöntemleri ile ortadan kaldırılmaktadır. Bu verimi sağlayabilmek için ikiz sinir ağı olarak bilinen ve çıktıları karşılaştırılabilir bir şekilde eşit seviye hesaplama dayalı SNN (Siamese Neural Network – Siyam Sinir Ağı) kullanılmaktadır [50]. MPNN'lerde bulunan bir başka durum ise

seyrek grafiklerde başarısını kanıtlamış olmasına rağmen karmaşık grafiklere olan uyarlamaları verimli fakat teoride sınırlı durumda olmasıdır. WL testi birçok modelde kullanıldığı gibi MPNN modellerinin bazılarında da kullanılmaktadır. Buradaki asıl amaç spektral alanda yerleştirmektir. Kullanım sonucunda alt görev olarak tanımlanan görevlerde de başarı göstermektedir [51].

Grafiklerde sinir ağı tabanında geliştirilen modeller çoğunlukla bir sorun nedeniyle gelişime ihtiyaç duymaktadır. Geleneksel algoritmalar bu durumlar karşısında yetersiz olduğundan farklı kararlı modeller geliştirilmektedir. Bu algoritmalarından birisi de otomatik, ölçeklenebilir ve etkili model olan ayrıca gömme temsili ile güncellemeler arasında sabitlik sağlayarak yansıtılabilen SSE algoritmasıdır [52]. Veri setleri analizinde bulunan karmaşıklık, grafiklerde düzenleme ve sabit parametre sorunları SGD (Stochastic Gradient Descent – Stokastik Gradyan İnişi) algoritmalarıyla düzenlenmektedir. SGD tabanında geliştirilen SSE modelinde büyük ölçüde sinir ağı eğitimi için kullanılmıştır. Model ile SSE tabanlı iki farklı algoritma (SSE-Graph, SSE-SE) geliştirilmiş ayrıca grafik gömme kullanılarak ağırlık azaltma ile yüksek performansa ulaşması sağlanmıştır [53]. SSE algoritması ayrıca olay tahmini için de kullanılmaktadır. Olay tahmini genellikle mühendislikte ve karmaşık sistemlerin analizinde kullanılmaktadır. Model temelinde LSF (Limit-State Function – Limit Durum Fonksiyonu), SSE modeline uyarlayarak yeni modeli ortaya çıkarmıştır. SSER (Spectral

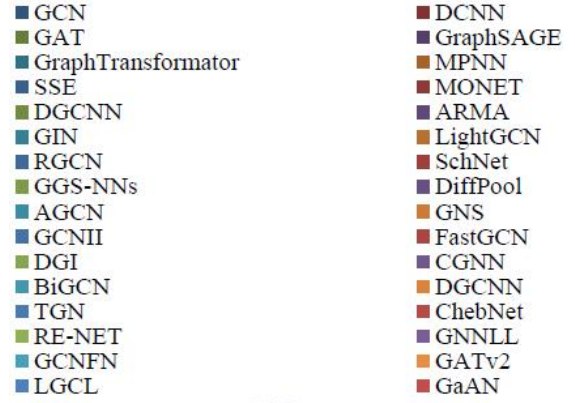
Embedding-Based Reliability – Stokastik Spektral Tabanlı Güvenilirlik) modeli hata ihtimalini hesaplayarak eleme yöntemiyle çalışmaktadır [54].

GNN için 65 farklı model olsa da genellikle yaygın kullanım GCN, DCNN, GAT, GraphSAGE, GraphTransformer, SSE ve MoNet modellerinden oluşmaktadır. MoNet modeli, karışım modeli sinir ağı olarak tanımlanmaktadır. MoNet temelinde derin öğrenmeye dayanan bir algoritmadır. CNN modellerinde konuşma tanıma, dil işleme, bilgisayarlı görü, akustik sinyaller ve görüntü analizi görevleri grafik ve öklid düzlemlerinde karşılaştığı sorunlar sebebiyle geometrik derin öğrenme kavramını ortaya çıkarmıştır. Farklı modeller bu alan üzerine gerçekleşse de CNN temelinde GNN'ler geliştirilmiş ve bu modellere artan ilgi sayesinde hızlı bir gelişim göstermiştir [55]. Sinir ağları bu alanlar dışında gelecek tahmini, otonom sürüş, akıllı sistem güvenliği ve nokta bulutları gibi birçok alanda da kullanılmaktadır. Akıllı araç sistemlerinde 3B nokta bulutları bilgi modellemesi ve algılama gibi sebeplerden dolayı önem arz etmektedir. Düzensiz yapıları ve yapılandırılmamış olma sebeplerinden dolayı tahminlerde zorluk oluşturmaktadır. Bu zorluğa karşılık, hareket özelliği tanıtımı ve grafiksel hareket bilgisi tahminini yakalayacak bir model geliştirilmiştir. MoNet adı birçok farklı modelde CNN ve GNN temelinde geliştirilmiştir. Belirlenen iki özelliğinde zaman-uzay durumunu tahmin etmek için MotionRNN tekrarlayan sinir ağı geliştirilmiştir. MoNet algoritması bu sorunlara CNN ve RNN bağlantıları yardımı ile çözüm

bulmakta ayrıca dikkat tabanını da hareket katmanına yerleştirmektedir [56]. Aynı şekilde MoNet algoritmaları tespit işlemi için de kullanılmaktadır. Bir başka MoNet modeli çoklu görüntü akışı kullanarak yarı denetimli öğrenme modeli anahtar nokta detektörü olarak modellenmiştir. İnsan olmayan türlerde yani genelleştirilmiş konularda ve büyük nitelikli açıklama gereksinimi bulunan veriler düşünülerek işlenmiştir. Eğitim esnasında hesaplama sorunu, karmaşıklık ve örnekleme uyuşmasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sayede modelin verimi artmakta ayrıca iki görünüm yöntem ile de karşılaştırma yapmaktadır. Model insan-köpek-maymun gibi farklı tür grafiklerde kilit noktalarını yerleştirebilmektedir. Yarı denetimli model olan MoNet tarafından belirli sayıda etiketlenmiş ve farklı tür varlıkların kilit nokta tespiti yapılmıştır. Ayrıca modelde poz algılama kullanılarak 3 boyutlu yapılandırma revize edilebilmektedir [57]. Ayrıca Şekil 5'te grafik modeller ile ilgili yazılmış makalelerin yüzdeleri ve en fazla kullanılan modellerin grafiği görülmektedir.

Veri kümeleri modellerin denenmesi ve verimlerini göstermeleri için en önemli etmenlerden birisi olmuştur. Tablo 3'te en fazla kullanılan modellerin hangi veri setleri ile test edildiği gösterilmiştir. Tabloda gösterilen sekiz model dışında en fazla örnek veren modeller LightGCN, DGCNN, GIN, ARMA ve RGCN modelleri olmuştur. Modeller GCN tabanında geliştirilmiştir.

Makale Sayısı



Şekil 5: Yazılmış makale sayısı yüzdeleri oranı. LightGCN modeli, GCN tabanlı olarak geliştirilmiş bir modeldir. GCN'ler sınıflandırma görevi için tasarlanmış olmalarına rağmen ritimsel bozukluk analizi yapamamaktadır. GCN'lerde özellik dönüşümü ve doğrusal olmayan etkinlik tasarımlarının ortak bir filtre ile birleştirilmesi sonucu yapılan deneylerle az da olsa verimin arttığı gözlemlenmiştir. Bu iki tasarımın dâhil olması verimi arttırmasına rağmen eğitim zorluğu oluşturmaktadır. Bu zorluğun aşımı için LightGCN komşuluğu etken olarak kullanıcı-öğretim tabanında katmanlara yayılım yapmaktadır. Bunun sonucunda ağırlık toplamı kullanılabilir ve rasyonel analizler elde edilir. NGCF (Neural Graph Collaborative Filtering – Nöral Grafik İşbirlikçi Filtreleme) modeline göre daha fazla verim sergilemektedir [58].

UltraGCN ise LightGCN içerisinde bulunan mesaj geçiş katmanı sorununu katman atlaması ile basitleştirerek kenar ağırlığı atamaktadır. Bu sayede model kolay eğitilmekte ve verimi artmaktadır. LightGCN ile yapılan karşılaştırmasında 10 kat fazla verim ve hız elde etmiştir [59].

Tablo 3: Grafik modellerde yaygın kullanılan veri kümeleri ve modeller.

Veri Kümesi	G N N	G C N	D C N N	G A T	G S	G T	M P N N	S S E	M o N e t
Pubmed	X	X		X	X		X		X
Reddit	X	X							
OGB	X	X		X	X				
PPI	X	X		X		X			
CORA	X	X		X	X		X		X
Nell	X	X							
ZINC	X	X		X	X	X	X		X
EgoGesture	X	X							
ImageNet	X	X							X
PASCAL VOC	X	X	X						
COCO	X	X	X						
OHSUMED	X	X							
CIFAR 10	X			X	X				X
Flickr30k	X			X	X				
Citeeser	X				X		X		
Cluster	X					X			
Pattern	X					X			
OpenAI Gym	X							X	
Human3.6 M	X								X
Faust	X								X
MNIST	X								X

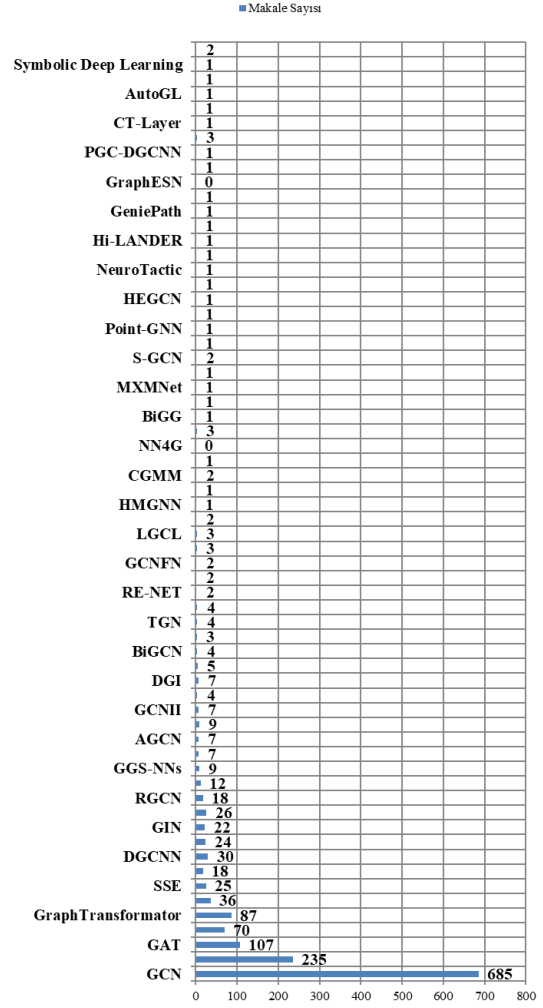
CNN'lerin kullanım alanlarından birisi de grafik benzerlik eşleme görevidir. Bu görev için GCN'ler geliştirilmiş ancak geliştirilen modeller düzenli verilere odaklanmış ve başarılarını burada yakalamıştır. Analiz esnasında sabit forma geçilmektedir ve bu geçiş sürecinde veriler düzensizleşebilmektedir. Bu soruna çözüm olarak DGCL (Disordered Graph

Convolutional Layer – Düzensiz Grafik Evrişim Katman) geliştirilmiş, Gauss modeli ile revize edilerek DGCNN (Disordered Graph Convolutional Neural Network – Düzensiz Grafik Evrişim Sinir Ağı) modellenmiştir [60]. DGCNN modeli, zengin bilgiyi karakterleştirerek faydalı özellik çıkarımı ve grafik anlam-tutarlılık okumasında zorluk yaşamaktadır. Bu zorluğun da aşılması için SortPooling katmanı tasarlanmış ve vektörel dönüşüme gerek kalmaksızın orijinal grafik eğitimi yapabilmektedir [61]. DGCNN modeli genişletilerek 3B nesne algı mimarisi ile nesneyi tahmin etme görevinde kullanılmıştır. Model otonom güvenlik konusunda yüksek verim elde etmektedir [62].

Grafik İzomorfizm ağı, WL testini genelleştirerek modellerde ayırt edici gücü arttırmaktadır. Modelin amacı grafik ve düğüm sınıflandırma görevlerini verimli bir şekilde yerine getirebilmektir [33]. GNN modelleri sağlık alanında da farklı alanlarda kullanılmaktadır. Son yıllarda farklı modeller geliştirilmiş bu modellerden birisi de fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging – Fonksiyonel Manyetik Rezonans Görüntü) verileri üzerine olmuştur. Komşuluk matrisini kullanarak kaydırma yapılması ile ikili analiz yöntemi kullanılmaktadır. İkili analiz sayesinde görselleştirme yapılabilmekte ve model beyin görselleştirme deneylerinde verim elde edebilmektedir [63]. GNN'ler genellikle spektral polinom filtrelere dayanmaktadır. Frekans tepkisi, küresel yapı yakalama ve gürültü dayanıklılığı sağlayan ayrıca esnek bir filtre olan ARMA, eğitim için verimli ve özyineleme sayesinde dağınık formüle sahiptir.

Grafik regresyonu, yarı denetimli sınıflandırma, grafik sinyal sınıflandırma ve grafik sınıflandırma görevlerinde kullanılan ARMA, verimli bir katman olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır [64]. ARMA aynı zamanda bilgi önem düzeyinin yüksek olduğu görevler için de modellenmiştir. Çıkış bilgilerinin tüm girdileri kapsamasıyla kendisini eğitebilmekte ve evrişime indirgemektedir [65]. RGCN, bilgi grafiklerinin bilgi okuma ve yanıt arama amaçlı geliştirilmiş GNN modelidir. Bu görevler neticesinde eksik bilgilerin kurtarılmasını sağlayan bağlantı tahmini yapabilmekte ayrıca eksik nitelikleri kurtararak bilgi almasını sağlayan varlık sınıflandırması görevlerini başarıyla tamamlamaktadır. RGCN modeli gerçeksele bilgi veri tabanı deneylerinde başarı elde etmiş ve tahmin-sınıflandırma için bağımsız bir model olduğunu kanıtlamıştır [66]. Model diğer modellerde de sıkça karşılaştığı üzere araştırmacılar tarafından güncellenerek düğüm sınıflandırma görevi için yeniden modellenmiştir. Test süresince kıyaslamalı bilgi grafikleri kullanılarak modelin veriminin yüksek olduğu hesaplanmıştır. İlişkisel veri tahmini ve modellemesi yapabilen RGCN, özne-nesne-ilişki arasındaki bağlantıyı başarılı bir şekilde kurabilmektedir [67].

Bu çalışma kapsamında en fazla makale yazılan modeller incelenerek karşılaştırılmıştır. Toplam 65 ana model arasından yaygın kullanılan 11 model detaylı olarak ele alınmıştır. Şekil 6'da yazılan makalelerin adet grafiği görülmekte ayrıca tüm modeller en az bir kaynak çalışma ile elde edilmiştir.



Şekil 6: Makale sayısı.

Grafik modeller içinde 51 farklı model daha bulunmaktadır. İlk incelenen SchNet modeli kesin konum ayrışması sonrası bilgi kaybı sorununa geliştirilmiş filtreli bir evrişim katmanıdır. Kuantum ve moleküler grafikler üzerinde düğüm arası kuvvet ile toplam enerji ortak modeli oluşturulmuştur [68]. Grafik modeller girdi öznelik öğrenmesi üzerinde de çalışmaktadır. Optimizasyon gereksinimi ve kapılı tekrar katmanlarının verimi artırma düşüncesi ile GGS-NN modeli ortaya çıkmıştır. Grafik tabanlı işlemlerde dizi tabanına sahip olan LSTM modelleri gibi modellere göre daha kapsamlı bir model olmuştur [69]. Grafik yapılarındaki boyutsal-bağlantısal farklılıklar

ve karmaşıklıklar yeni modellerin gelişmesine ilham olan bir sorun olmuştur. Rastgele grafiklerde genelleştirme ve esneklik sağlayan AGCN modeli, metrik öğrenme ile grafiği verimli bir şekilde öğrenebilmektedir. Model eğitim sırasında görev odaklı ve uyarlanabilir model olduğu için bu ismi almıştır [70]. GNN modellerinin hiyerarşik temsilleri öğrenememe sorunu tahmin ve sınıflandırma görevleri için sorun teşkil etmekte ve sınırlandırmaktadır. Bu sebeple havuz modülü olarak DiffPool geliştirilmiştir. Diffpool, katmanlarda bulunan düğümleri türevlemeye yarayan bir eğitim ile öğrenmesini gerçekleştirir. Eğitim sonucunda eşleme ve girişi oluşturabilme yeteneğini kazanmaktadır. Model deneyler ile birlikte %5-%10 arası iyileştirme sağladığı gözlemlenmiştir [71]. Bir başka deneyde ise DiffPool modelinin popüler sınıflandırma doğruluğu dikkat çekmiş ve GCN, TAGCN ve GraphSAGE modelleri ile karşılaştırma yapılmıştır. TAGCN (Topology Adaptive Graph Convolutional Network – Topoloji Uyarlanabilir Grafik Evrişimsel Ağ) modelinin diğer iki modele göre daha fazla verim elde ettiği gözlemlenmiştir [72]. Mühendislik ve doğa bilimleri alanlarında malzeme tahmini önemli bir görev olarak kullanılmaktadır. Kristal grafiklerde karmaşık görünüm sebebiyle gerçekleşen zorluk uzay-bilgi dengelemesi ile tahminini başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir. Araştırma neticesinde bağ mesafesi kullanmayan modelin daha verimli olduğu gözlemlenmiş ve CGNN'ler (Crystal) toplu özellik tahmini ile kendini öne çıkarmıştır. Model iki farklı sınıflandırma kullanmış, sınıflandırmanın merkezine ise bant boşluğu-manyetizma

bilgisini koymaktadır. Araştırmalar sonucunda taramadan yüksek verim sağlanmış Ayrıca veri madenciliği kavramlarına da atıfta bulunulmuştur [73]. Katman boşluklarında bulunan boşluklar analizi etkilemekte ve bu etkiyi en az seviyeye indirmek için DCGAN (Deep Convolutional Generative Adversarial Network – Derin Evrişimli Üretken Düşman Ağı) geliştirilmiş fakat modelin kendini sürekli yenileyebilmesi için revize edilerek CGNN (Continuously Generative Neural Networks – Sürekli Üretken Sinir Ağları) modelleri geliştirilmiştir. Model ters problemlere odaklanmakta ve kararlılık tahmini türetmektedir. Simülasyon için de kullanılan model görüntü bulanıklaştırma konusunda başarısını kanıtlamıştır [74]. GNN'lerin düğüm topoloji ve düğüme özgü ayrımlarda sorunlar yaşadığı bilinmekte ayrıca bu sorun üzerine de birçok model geliştirilmektedir. Bu modellerden biri de CGNN (Curvature Graph Neural Network – Eğrilik Grafiği Sinir Ağı) modelidir. Model grafik içerisinde bulunan eğriliklerden yararlanarak GNN'ye uyarlanabilmektedir. Negatif eğrilik işleme modülü ve eğrilik normalleştirme modülü kullanılarak komşu düğüm ağırlığı elde edilmektedir. Deneyler sentetik ve reel dünya verileri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Modelin en önemli özelliği ise topoloji kullanımının derinleştirilmesi ve eğrilik ile komşu düğüm önemini göstermesidir [75]. Simüle sistemler GNN modellerinde inceleme konusu olan görevlerden birisi olmuştur. Bu görev üzerine geliştirilen modellerden birisi olan GNS (Graphics Network Based Simulators – Grafik Ağı Tabanlı Simülatörler) modeli genellikle

fiziksel sistemleri simüle etmek için kullanılmaktadır. Çalışması ise düğümler fiziksel sistemi temsil ederken öğrenilen mesaj geçişi sayesinde dinamik hesaplanmaktadır [76]. GCN modelleri sadece GNN için değil sinir ağları modelleri arasında da en çok incelenen modellerden birisi olmaktadır. Fakat bilinen GCN modelleri her ne kadar derin olsa da yumuşatma sorunu sebebiyle derinliğe karşılık sığ kalmaktadır. Bu soruna karşılık GCNII modeli geliştirilmiştir. Model her ne kadar GCN tabanında geliştirilmiş olsa da ayrı bir model olarak kabul edilmekte ve yüksek verimi ile başarısını göstermektedir [77]. CNN modellerinden türetilen bir diğer model ise ChebNet'tir. Sayısal grafik ve matematiksel tanımlamaları sayesinde evrişimli ve hızlı filtreler tasarlayabilmektedir. Yaygın kullanım alanları; görüntü-konuşma-video temsili, sosyal ağ, beyin bağlaçları ve metin gömme alanları olmaktadır [78]. GCN modelleri eğitim ve test verileri üzerinden öğrenme gerçekleştirmektedir. Bu durum büyük ve karmaşık veriler için öğrenme zorluğu oluşturmaktadır. Zorluğu ortadan kaldırmak için kullanılan integral dönüşümleri sayesinde, eğitim için verim arttırılmıştır. İntegral dönüşümlerinin çok sayıda tekrar eden rastgele örneklemelere karşılık nümerik sonuçlar elde edilen Monte Carlo yaklaşımı kullanılması çıkarımlarda da genelleme yeteneğini arttırmaktadır [79]. Denetimsiz öğrenme ile düğüm temsillerinin kullanımı için geliştirilen DGI, yerleşik evrişim kullanarak karşılıklı bilgiyi ve üretilen temsilleri üst seviyeye çıkarmaktadır. Yama temsili özetleme ve alt düğümler için öğrenim görevlerini

tekrarlamasıyla verim elde etmektedir. DGI modelinin en önemli özelliği ise dönüştürücü-tümevarımsal öğrenmenin uyarlanabilirliğidir [80]. GCN'lerde sinyaller çoğunlukla düşük geçişli filtreler ile tasarlanmaktadır. Bunun başlıca sebebi hesaplama maliyetinin düşmesi ve verimin arttırılmasıdır. BIGCN modelinde ise çift yönlü filtreler ile de verim alınabileceği ortaya atılmıştır. İki yönlü filtreleme dayanan model, orijinal grafik ile birlikte gizli özelliklerin bağlantı grafik sinyallerini de filtreleyebilme yeteneğine sahiptir. Modeli öne çıkaran özellik ise karşılaştırmada aldığı verimi dışında güçlü gürültü önleme yeteneğine sahip olmasıdır [81]. Derin öğrenme, GNN modelleri için ana çalışma konularından birisi olmasına rağmen zamansal özellik gelişimi konusunda çok sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu durum araştırmacıların dikkatini çekerek dinamik grafiklerin temelinde zamansal olay dizilerini temsil eden bir öğrenme modeli geliştirilmiştir. TGN grafik vektörü ve bellek modülü sayesinde eş zamanda hesaplamalarda verimli bir sonuç çıkarmaktadır [82]. Görevlerin zamanlarla ilişkilendirilmesi zaman-bilgi grafiği için bir sorun haline gelmektedir. Modellerin çoğu geçmişe dayalı tahmin kullanırken gelecek durumlar için yapamamaktadır. Gelecek tahmini için geliştirilen RE-NET, zaman-bilgi grafiklerinin geçmiş durumlarını analiz ederek olasılık dağılımlarını hesaplamaktadır. Çalışmasında tekrar eden olay kodlayıcı kullanırken modelleme için de komşu bilgisi toplama kullanılmaktadır [83]. Grafik modellerin bir diğer kullanım alanı teyit ve tespit işlemidir. Sosyal medya platformlarının gelişimi ve

kullanımının yaygınlaşması neticesinde teyit edilmiş bilginin ve sahte haber tespitinin önemi artmıştır. Yayılım odaklı sahte bilgi tespitine karşılık GNN kullanımı, metin bilgisine ihtiyaç duyulmadan GNN doğruluğu ne kadar kabul edilir ve yeni oluşturulan ya da gizli veriler ile nasıl analiz yapılır düşüncesi ile ortaya çıkmıştır. Makine öğrenimi modelleri saldırılara karşı tam savunma gösterememesi sebebiyle sahte haber kaynağının oluşturacağı etmenlere karşı duyarlılığı düşük olacaktır. Eğitilmiş sistemlerde ise yeni ya da gizli veriler beklenen verimi sağlayamazsa bu duruma karşılık yeniden eğitilmesi gerekecektir. Tüm süreç düşünüldüğünde uzun bir süreç gerçekleşeceği için bir model geliştirilme ihtiyacı duyulmuştur. Geliştirilen modele GNNCL adı verilmiş ve metin bilgisi olmadığı süreçler için de verimli olduğu gösterilmiştir. Model de cevaplanamayan diğer sorun olan farklı veri kümesi eğitimi ise deneyler sonucu beklenildiği gibi düşük performans göstermiş fakat denge konumuna getirilmiştir [84]. Sahte haber tespiti modellerde başarı yakalaması ve yaygınlaşması ile farklı modellere konu olmuş sadece sahte haber tespiti yapılan ve GCNFN adında bir model bile geliştirilmiştir. Modelde yayılım tabanlı modül kullanılarak içerik kıyaslama, bağımsız dil ve saldırılara karşı direnç yetenekleri kazandırılmıştır. Geometrik derin öğrenme kullanımı sayesinde profil, etkinlik, yayılım ve sosyal grafik gibi heterojen grafiklerin anlaşılması sağlanmıştır. Twitter üzerinde yapılan testler neticesinde model stratejik olarak da başarısını göstermiştir [85]. Tahmin görevler her geçen gün kendisini genişletmekte ve yeni modellere fırsat

sunmaktadır. Tahmin görevleri genellikle sayılabilir özellik uzayı ile eş biçimlilik görevlerine odaklanmaktadır. Odak noktasına gerçek dünya girdileri ve gizli katman sürekli özelliklerinde eklenmesiyle birden çok toplayıcı genelleştiren PNA modeli geliştirilmiştir. PNA çoklu toplama ile birden fazla görevi gerçek dünya girdileri ile analiz ederek işlem yapmaktadır [86]. Karşılaştırma yapımı grafik modeller arasında görevlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dil işleme ve bilgisayarlı görü kullanarak ağ topolojik özelliklerini kendi kendine denetleme ile modellemektedir. GCC (Grafik Kontrastlı Kodlama – Graph Contrastive Coding) olarak adlandırılan model ağ içi ve alt grafik örneği olarak içsel ve aktarılabılır yapısalılığı ile karşıt öğrenme kullanmaktadır [87]. Model aynı zamanda sonraki yıllarda revize edilerek grafik tabanlı anomali tespiti için kullanılmaktadır. GCCAD (Graph Contrastive Coding Anomaly Detection – Grafik Kontrastlı Kodlama Anomali Algılaması) modeli grafik kontrastlı kodlama kullanarak tüm düğüm ortalamasını denetimli olarak gerçekleştirmektedir. Düşük etiket sayısı ve düğüm etiketi oluşturma için kendi kendini denetleme yeteneği de modele eklenmiştir. Karşı hedefe ulaşım, şüpheli bağlantıları kaldırma ve grafik bağlamı öğrenme ile verimli bir hale getirilmiştir [88]. Komşu grafiklerin sabit olmaması ve genelleştirilememesi evrişim işlemlerini engellemektedir. Bu sorunu aşmak için geliştirilen LGCL modeli dönüşüm için değerler sıralamasında her bir özellik için sabit sayıda komşu düğüm seçimini otomatik olarak gerçekleştirmektedir. Bu işlem sayesinde

evrişim işlemleri kullanılabilir. Büyük ölçekli grafiklerde ise alt grafik eğitimi ile hesaplama ve bellek azaltılmakta bu sayede de verim artmaktadır [89]. Verilerin kullanımı ve anlamsal olarak çıkarımın daha basit şekilde yapılabilmesi için birleştirme yapılmaktadır. Yapılandırılmış verileri kodlayarak öğrenme sürecini gerçekleştiren ve olasılıksal model katmanları ile derin bir mimari oluşturan CGMM kenarlar ile tepe noktaları boyutunda ölçekli ve verimli bir şekilde dağılmıştır. Grafik kodlaması karşılaştırma yapabilmek için ayrımsal modeller ile kullanılmaktadır [90]. Grafik dikkat ağı grafik üzerinde öğrenme gerçekleştirme ve dikkat katmanlarının performansını artırma için geliştirilmiştir. Modellerinde genellikle çok başlıklı dikkat mekanizması bulunurken büyük grafiklerde bu hesaplama maliyetini artırmaktadır. Bu sorunu çözmek için evrişimli alt ağ kullanan ve her dikkat başlığının önemini kontrol eden GaAN modeli geliştirilmiştir. GaAN, tümevarımsal düğüm sınıflandırma için kullanılırken trafik tahmini gerçekleştirmek için de GGRU (Graph Gated Recurrent Unit – Grafik Kapılı Tekrarlayan Birimi) kullanmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda verimli bir performans sergilemiştir [91]. Tümevarımsal yöntemler ile öğrenme gerçekleştiren modeller sembol temsili için de kullanılmaktadır. Eğitim ilk başta seyrek temsilleri öğrenirken bir sonraki aşamada açık ilişkiler için sembolik temsil uygulanmaktadır. Model kozmik yapılarda konsantrasyon tahmini ile analitik formül keşfeder. Çıkarılan veriler ile sinir ağlarının keşfi basitleşmekte ve sembolik öğrenme geliştirilmektedir. Model, SDL (Symbolic

Deep Learning – Sembolik Derin Öğrenme) adıyla anılmaktadır [92]. Molekül analizlerin GNN'lerin başlıca önem gerektiren görevlerinden birisi olduğu bilinmektedir. Heterojen molekül kullanımı ve analizi kuantum özellik tahmini için zor bir görev olsa da alan özneline modeller geliştirilmektedir. Geliştirilen modellerden biri olan HMGNN, çok kenar ve cisim etkileşimlere dikkat etmektedir. Karmaşık grafiklerde kimya problemleri için eğitim sırasında edinilen bilgilerden yararlanmakta ayrıca sinirsel mesaj geçişi de yapılmaktadır [93]. Moleküler grafiklerde bir başka tahmin de fizikokimyasal özellikler üzerinedir. Geliştirilen model iki katmanlı olmakla birlikte ilk katman kovalent etkileşimlerle çalışırken diğer katman ise küresel bağlantılar ile çalışmaktadır. Anlam gücü ve hesaplama sorununu aşma ve denge sağlama amacıyla mesaj iletim modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen modele MXMNet adı verilmiştir [94]. Yoğunluk ve büyüklük GNN'ler için çözülmesi gereken bir sorun olmaktadır. Bu soruna çözüm için geliştirilen modellerden biri olan PinVGCN, üç takımlı filtrelerle yoğun grafiklere odaklanmaktadır. Model sorunun çözümü için Laplacian grafiklerini kullanmakta ve asıl kullanımı Laplacian tersi ile gerçekleştirilmektedir. Uygun parametre seçimi ile verim artırılmış ayrıca gerçek dünya veri setleri ile yapılan deneylerde başarılı olmuştur [95]. Moleküler grafikler üzerinde geliştirilen bir diğer model olan S-GCN modeli protein işlemede kullanılmaktadır. Protein içerisinde bulunan aminoasitleri yerel koordinatları ile ilişkilendirerek düğümler arasında açılal

bilgilerle küresel filtreler oluşturmaktadır. Model CASP (Critical Assessment of Structure Prediction – Yapı Tahmininin Kritik Değerlendirmesi) ile değerlendirilmiş ve rekabetçi bir tutum sergilemiştir [96]. Bir diğer model GAT üzerinden gelişim gösteren GATv2 operatörüdür. Statik dikkat problemine odaklanarak çözüm gerçekleştirmekte ve düğümler sıralanarak analiz gerçekleştirilmektedir [97]. Sınıflandırma görevleri GNN'lerin başlıca görevlerinden birisi olmuştur. Anlamsal bakımdan yorumlanabilirlik sınıflandırma görevlerini kolaylaştırmakta ve verimini artırmaktadır. TaksoExpan modeli, web içerikleri içinde kendi kendini denetlemeye dayalı geliştirilmiş tahmin ve sınıflandırma modelidir. TaksoExpan modeli yerel yapı kodlaması ile iyileştirilmiş konumlu GNN geliştirilmekte ayrıca modelin öğrenilmesiyle gürültüye dayanıklı eğitim içerisi etiket gürültüleri ile kendi kendine denetleme yapabilmektedir [98]. Nesne algılama için geliştirilen Point-GNN modeli her düğüm ve köşe için nesne kategorisi ve şekil tahmini gerçekleştirmektedir. Model kutu birleştirme ve puanlama işlemi ile 3 boyutlu nesne algılama için verimli bir potansiyel sergilemiştir [99]. Grafik modeller, hata tespiti, kod tamamlama ve program tamiri gibi yazılımsal konularda da görevleri yerine getirmektedir. Kontrol mekanizması ile görevleri tamamlarken akıl yürütme programlarında uygun değerlerdir. Tekrarlayan sinir ağları ise akıl yürütme için uygundur fakat program yapısı içermemesi sebebiyle verim elde edememektedir. IPA-GNN modeli kontrol grafikleri ile program yönetimini öğrenme görevi için genelleştirilmiş

bir modeldir. RNN modeli gevşemesi ya da uygulama için uyumlanmış GNN alt türü olarak görülebilir [100]. Seyrek grafikler için geliştirilen gözlemsel model BIGG grafik üretici bir modeldir. Temel bilimler alanlarında yaygın kullanılan grafik oluşturma görevi, derin öğrenme yöntemlerinin ölçeklenmesinden dolayı sınırlı bir alana sahip olmuştur. BIGG tam bitişiklik matrisi oluşturmamak için seyreklikten faydalanmaktadır ve bu durum zaman karmaşasını azaltır [101]. Bir başka görev olan ilişki analizi, uzaktan denetlemede cümle çıkarımı yapmayı odak haline getirmiştir ancak bu durum kapsam bakımında çok az ilişki ile sınırlı kalmaktadır. HEGCN belgeler için çok bölümlü ilişki analizi için geliştirilmiş bir modeldir. Belgeler BILSTM (Bi-Directional Long Short-Term Memory – Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek) katmanı ile kodlanmakta, katman üstü hiyerarşi için ise GCN kullanılmaktadır [102]. GCN modelleri farklı görevler için uyarlanarak yeni modellerin doğuşuna fırsat vermektedir. Bu modellerden biri de AdaGPR modelidir. Model GCNII modelinin uyarlanması ile geliştirilmiştir. Temelde GCNII modelinin Pagerank öğrenimi için genelleme sınırı ve katsayı sırası ile sınırlandırılmasıyla oluşturulan model sınır analizi ile aşırı yumuşatma yapmaktadır. Bu sayede komşuluk derecesi yüksek evrişimlerde model derinliğinin önemini göstermektedir [103]. Tahmin görevlerinin GNN modeller arasında büyük bir önem arz ettiği bilinmektedir. Tahmin türlerinden birisi de taktik tahmindir. Geliştirilen modeller derin sinir ağı ile donatılarak insan uzman gibi uzman ve ayrıntılı talimatların zorluğu ortadan

kaldırmaktadır. Geliştirilen modellerden biri olan NeuroTactic ise teorik ve temsil için GNN'lerden yararlanmaktadır. İlk tasarım görevi öncü seçimi ve grafik karşılaştırma olan model eğitim sonrası akış görevi ve taktiksel tahmin için kullanılmaya başlanmıştır [104]. Tahmin için geliştirilen bir diğer model ise GAGNN modelidir. Model temelde ülkesel alan içerisinde hava kalitesi tahmin görevi için geliştirilmiş aşamalı bir modeldir. Model çalışma mantığında bölgesel grafikler ile gizli ve konum modelleme gerçekleştirir. Bölgeler arası fark olabileceği için gruplandırma işlemi ile bu sorunu ortadan kaldıran model mesaj geçiş mekanizması kullanımı ile bağımlılıkları modeller. Yapılan deneyler Çin üzerinde denenmiş ve modelin iyi bir performans gerçekleştirdiği belirtilmiştir [105]. Simülasyon uygulamaları da grafik modeller için ilgi çekici konulardan birisi olmuştur. Geliştirilen modellerden biri olan MeshGraphNet ağ tabanlı simülasyon öğrenimi çerçevesi olarak geliştirilmiştir. MeshGraphNet, ağ grafikleri ile mesaj iletimi ve simülasyon esnasında ağ ayıklama için eğitilebilir bir modeldir. Tek yön denetim kullanırken kodlama-işlem-çözme mimari modelini kullanmaktadır [106]. Kümeleme işlemleri için geliştirilen Hi-Lander, aşamalı bir GNN modelidir. Tahmin yeteneğini kullanarak grafik oluşturma işlemlerinde bağlantıları birleştirmektedir. Denetimsiz kümelenmeden farklı ise eğitimde denetimli öğrenme kullanmasıdır [107]. Grafiklerin zorluğu arttıkça GNN modellerine de ilgi artışı aynı seviyede olmuştur. Spektral grafiklerin evrişim öğrenimi geliştirilen CayleyNets modeli bu duruma örnektir. Frekans bantları

üzerinde uzmanlaşan eğitimi sayesinde filtreleri verimli bir şekilde hesaplamaktadır. Cayley polinomları sayesinde seyrek grafiklerde veri boyutuyla ölçeklenebilir ve zengin yönlü spektral filtreler üretebilmektedir [108]. Uyarlanabilirlik ile değişmez grafiksel verilerde alan öğrenimi gerçekleştirebilmesi için geliştirilen GeniePath, önem öğrenmesi, filtreleme ve ayıklama işlemi gerçekleştirmektedir [109]. Cluster-GCN modeli de kümelenmeden yararlanarak geliştirilmiş GCN türevi modeldir. Kümelenme dışında bağlantı tahmini ve düğüm sınıflandırma görevleri için de kullanılan verimli bir performans elde etmiştir [4]. GCN türevi bir başka model olan StoGCN ise, komşu boyut örnekleme izni ile çalışan bir algoritmadır [79]. NN4G modeli ise grafikler için geliştirilmiş sinir ağlarındandır. İleri besleme ile geri beslemenin olmadığı nöronları kullanarak farklı grafik türlerinde etkin bir şekilde çalışmaktadır. Model konum bilgilerinden yararlanarak aşamalı biçimde grafik topolojisinde etkinliğini göstermektedir [110]. Evrişim filtreleri modelleme ve analiz için sinir ağlarında önemli bir yer edinmektedir. PGC-DGCNN modeli GNN'ler özelinde kullanılan filtreyi geliştirerek komşu mesafesini hesaplayarak filtreyi zenginleştirir. Bu sayede modeller içerisinde verim artacak ve etkisi görülecektir [111]. Eğitim için geliştirilen modellerden birisi de MinCut Pooling modelidir. Düğüm-küme eşleşmesi gerçekleştiren havuzlama operatörü olarak bilinmektedir. Sınıflandırma ve kümeleme için verimli bir model olan MinCut, denetimli ve denetimsiz görevlerde de başarısını göstermiştir

[112]. ESN (Echo State Network – Yankı Durum Ağı) modelinin grafikler üzerinde genellenmesiyle ortaya çıkan GraphESN, farklı tür grafiklere karşı genişletilmiş RecNN (Recursive Neural Networks – Özyinelemeli Sinir Ağları) modeli üzerinde verimli bir yaklaşım gerçekleştirmektedir. İleri besleme okuma kullanan GraphESN, uyarlanabilirlik özelliği sayesinde doğrusal çıktılar vermektedir [113]. İncelenen son model olan DualGCN modeli de GCN temelinde geliştirilmiş modellerden birisidir. Model en-boy üzerinde duygu analizi gerçekleştirmek için modellenmiştir. Model temelinde bağımlılık ağaçlarına dayanmaktadır. Bağımlılık ağaçlarında ayrıştırma sorunları sonuç hatası, gayri resmi ifadeler, karmaşıklık) nedeniyle sınırlılık getirmektedir. SnGCN modülü ile ayrıştırma hatalarının yanlışlık oranını azaltmak planlanırken SemGCN modülü ile de dikkat mekanizması yardımıyla anlamsal çıkarımlar yapılmaktadır. Deneysel sonuçta üstün performans gösteren model, ortogonal ve diferansiyel düzenleyiciler sayesinde de öğrenme gerçekleştirmektedir [114].

2.1 Grafik Sinir Ağlarının Limitleri

GNN'ler, farklı modellerden oluşan grafik sinir ağları ailesine mensup bir yapıdır. CNN modellerinin 3D veriler üzerinde etkili olamaması sebebiyle ortaya çıkmıştır. Modeller kendilerine özgü olmalarına rağmen ortak özellikler barındırmaktadır. GNN'lerin temel özellikleri Tablo 4'te görülmektedir [115].

Tablo 4: Grafik sinir ağlarının özellikleri.

Giriş Verileri	Düğümün ve kenarların sırasıyla varlıkları ve ilişkilerini temsil ettiği, sosyal ağlar, moleküler grafikler vb. gibi grafik yapıları veriler.
Veri Gösterimi	Düğümün ve kenarların sırasıyla varlıkları ve ilişkilerini temsil ettiği, sosyal ağlar, moleküler grafikler vb. gibi grafik yapıları veriler.
Topoloji İşleme	Dinamik grafik topolojilerini modelleyebilir ve grafik yapısındaki değişikliklere uyum sağlayabilir.
Komşuluk Toplama	Mesaj geçişi veya grafik konvolüsyon işlemleri yoluyla komşu düğümlerden/kenarlardan özellikleri toplar.
Özellik Öğrenme	Düğümün ve kenarların temsillerini grafik yapısına ve düğüm/kenar özniteliklerine dayalı özellikler olarak öğrenir.
Ölçeklenebilirlik	Dinamik çizge yapıları ve mesaj geçirme işlemleriyle başa çıkma ihtiyacı nedeniyle ölçeklenebilirlik sorunları ile karşı karşıya kalabilir.
Yorumlanabilirlik	Çizge yapısına dayalı olarak düğüm ve kenar özelliklerinin yorumlanabilir gösterimlerini sağlayabilir.
Uygulama	Sosyal ağ analizi, ilaç keşfi, tavsiye sistemleri gibi çizge yapıları veriler üzerindeki görevler için çok uygundur.

GNN özellikleri gibi benzer şekilde avantaj, dezavantaj ve kısıtlara sahiptir. GNN modelleri grafik verilerinde varlık ilişkileri bulabilirler ve veri işleme gerçekleştirirler. Düğüm, kenar ve komşulardan oluşması sebebiyle sınıflandırma bilgileri düğüm ve kenar öğrenme ile gerçekleştirmektedir. Bu sayede eğitim sırasında işlenmemiş düğümlere genelleme yapabilmekte ve yarı denetimli öğrenmelerini geliştirebilmektedir. Komşulardan öğrendikleri bilgiler ile çoklu ilişkileri başarı ile yakalayarak sınıflandırmalı öğrenmeye olanak tanımaktadır. Öğrenme denetimli – denetimsiz olarak algılansa da yapı ve giriş özellikleri ile düğüm ve kenarlardan özellik öğrenme işlemini gerçekleştirebilmektedir. Model geliştirilmesi esnasında katmanların esnekliği sayesinde ön bilgi ile performans artırılabilir [115-]

118]. Tablo 5'te en yaygın sekiz modelin başarı gösterdiği alanlar sıralanmıştır.

Tablo 5: Grafik modellerin kullanım alanları.

GCN	Düğüm Sınıflandırması, Genel Sınıflandırma, Grafik Öğrenme, Grafik Sınıflandırma, Eylem Tanıma, Bağlantı Tahmini, İskelet Tabanlı Eylem Tanıma, Öneri Sistemleri, Grafik Gömme
DCNN	Genel Sınıflandırma, Semantik Segmentasyon, Görüntü Sınıflandırma, Nesne Tanıma, Nesne Algılama, Bilgisayarlı Tomografi (BT), Yüz Tanıma, Tümör Segmentasyonu
GAT	Grafik Dikkat, Düğüm Sınıflandırma, Grafik Öğrenme, Bağlantı Tahmini, Grafik Sınıflandırma, Genel Sınıflandırma, Bilgi Grafikleri, Grafik Temsil Öğrenme, Öneri Sistemleri
Graph Transformer	Düğüm Sınıflandırması, Grafik Sınıflandırması, Grafik Temsil Öğrenme, İlaç Keşfi, Bilgi Grafikleri, Bağlantı Tahmini, İlişki Çıkarımı, İlişki Sınıflandırması
GraphSAGE	Düğüm Sınıflandırması, Düşman Savunması, Grafik Bölme, Grafik Dikkat, Grafik Madenciligi, Grafik Öğrenme, İzinsiz Giriş Tespiti, Öneri Sistemleri, Sahte Haber Algılama, Veri Depolama
MPNN	Oluşum Enerjisi, Düğüm Sınıflandırması, Grafik Sınıflandırması, Moleküler Özellik Tahmini, İlaç Keşfi, Grafik Regresyon, Grafik Temsil Öğrenme, Bulanıklaştırma, Grafik Özellik Tahmini
SSE	Derecelendirmeyi Öğrenme, Atama, Açıklama Üretimi, Aktif Öğrenme, Zaman Serisi, Borsa Tahmini, Çok Aracılı Güçlendirme Öğrenimi, Duygu Analizi, Ortak Filtreleme
MoNet	Optik Akış Tahmini, Görüntü Oluşturma, Nesne Keşfi, Denetimsiz Nesne Segmentasyonu, Eylem Birimi Algılama, Yüz Hareketi Birimi Algılama, Çok Görevli Öğrenme, Kalabalık Sayma

Birçok farklı alanda uygulanması popülerlik sağlarken yeni çalışmalara yol gösterebilmektedir. Bu durum hem belirtilen avantajları sağlarken hem de dezavantaj ve limitleri oluşturmaktadır. Tablo 5'te görülen bu sekiz model bu alanlarda başarı iken kullanıldıkları diğer alanlarda başarı ölçütleri bu alanlara kıyasla daha düşüktür. Günümüzde tüm GNN modelleri için bu durum geçerlidir. GNN modelleri genellemede komşuluk bilgileri

kullanarak işlenmektedir. Komşuluklar arası seyrek bağlantılar öğrenmeyi güçlendirmektedir. Bu durum sınırlı genelleme olarak adlandırılmaktadır. Gerçek dünya uygulamalarında sık karşılaşılan bir durum olan esneklik ve karmaşıklık GNN modelleri için hem dezavantaj hem de kısıt oluşturmaktadır. Çoklu katmanların düğümlere olan etkisi sebebiyle GNN modelleri düğüm özelliklerini karıştırabilir ve bu durum düğüm ile kenarların öznelik verilerinin kaybına yol açar. Özellikle büyük grafiklerde bu duruma ek olarak ölçekleme zorlaşır ve maliyet ile bellek kullanımını artırmaktadır. Bu durum performansa olumsuz etki etmektedir. Ek olarak bu hususlar göz önüne alınınca dikkat içermesi gereken özellik mühendisliği gerektirmektedir. Homojen veriler üzerinde yüksek etki sağlasa da bu hususlar heterojen verilerde zorluk oluşturmaktadır. Grafik yapısı sebebiyle de yorumlama etkisi azalmaktadır. Tablo 6'da GNN avantaj-dezavantaj-limit gösterildiği gibi sadece heterojen grafiklerde değil, yapısında birden fazla farklı grafik bulunduran dinamik grafiklerde de zorluk çıkarmaktadır. Maliyet ve bellek kullanımının artması performansı olumsuz etkilemektedir [115-118].

Farklı alanlar için yeni modeller oluşturulmuş olsa da GNN'ler, sinir ağları ailesine mensup diğer modeller gibi sınırlar bulundurmaktadır. Derin sinir ağı modellerinin grafik sürümü olan derin grafik sinir ağları, yüksek boyut sebebiyle performansı düşürmektedir. Büyük grafik modelleri ile işlem gerçekleştirme modellerin önündeki en büyük sınırdır.

Tablo 6: Grafik sinir ağlarının avantaj – dezavantaj – limitleri.

Avantaj	Dezavantaj	Limit
Grafik Verileri İşleme	Sınırlı Genelleme	Grafik Boyutu
Düğüm ve Grafik Sınıflandırması	Aşırı Yumuşatma	Sınırlı Küresel Bağlam
Transdüktif Öğrenme	Ölçeklenebilirlik	Zamansal Bilgi Eksikliği
Hiyerarşik Temsil	Özellik Mühendisliği	Saldırı Karşı Savunma
Özellik Öğrenme	Heterojen Veriler	Veri Dengesizliği
Etki Alanı Birleştirme	Yorumlanabilir Temsiller	Belirsizlikle Mücadele
Uygulanabilirlik	Dinamik Grafikleri İşleme	Dinamik Grafikleri İşleme

Yerel ve yakın komşu-kenar öğrenmesi gerçekleştiren modeller geniş kapsamda bağlamları yakalamakta zorluk çekmektedir. İlk modellerde zaman serisi zorlukları da bu sebeple ortaya çıkmıştır. Heterojen ve dinamik verilerde bulunan sınıf dengesizliği yine grafik modellere zorluk oluşturmaktadır. Kullanım bakımından tahminlerde oluşan sorunlar sebebiyle dikkat ağları ortaya çıkmıştır. Dikkat ağları tahmin görevlerinde önceki yıllarda olan belirsizliği azaltmaktadır. Fakat bazı modeller deneysel kapsamda üretildiği için bu durum GNN'lerin sınırlarından kabul edilmektedir. En büyük sınır ise siber güvenlik sağlanmasıdır. Grafik verileri çok çabuk bozulabilen verilerdendir. Grafiklerde hafif bozulma bile sınıflandırma ve tahmin gücünü etkilemektedir. Sinir ağları düşman saldırılarına açıktır ve bu durum sinir ağlarında bulunan en büyük sınır olarak kabul edilebilir.

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

GNN modelleri, sinir ağlarının gelişmesine katkı sağlayarak yeni modeller için öncül olmuştur. Model, CNN üzerinde etkide

bulunarak GCN kavramını oluşturmuş ve bu gelişmeyle GNN ailesinde büyük bir genişlemenin önünü açmıştır. 2008 yılında ilk modelin yayınlanması ile başlayan süreç günümüzde bu iki modelin altında 65 farklı alt model oluşturarak popülerlik kazanmıştır. Bir modelin yeni oluşturulacak modelleri etkilemesi ile araştırmacılar GNN'ler hakkında her geçen gün yeni çalışmalar oluşturmakta ve sinir ağları kavramını geliştirmektedir. Bu çalışmada öncelik olarak yaygın 8 model özneline inceleme gerçekleştirilmiş, temelde ise 65 modele etki eden ve etkilendiği modeller incelenerek değerlendirilmiştir. Genel anlamda modeller GNN ve Grafik CNN mimarileri özelliklerini taşımaktadır. Modeller arası farklılıkların oluşma sebebi geliştirilen modellerin ortak mimari kullansa da farklı alanlara odaklanması ve alana özgü olmasıdır. Modellerin ortak kullanım alanları temel alındığında (örn. sınıflandırma görevleri) alana özgü olma hali devam etmektedir. Bir modelin başka bir modelden üstün olması ya da aynı modelin farklı alanlarda gösterdiği performans değişken olmakla beraber karşılaştırma yapılması bu sebeple oldukça zordur. GNN modellerin dezavantajları genellikle sınırları belirlemektedir. Grafik verilerinin büyük olması performansı düşürse de verim üzerinde etkisi oldukça azdır. Model avantajları, dezavantajları göz önüne alındığında modellerin verimi kendini avantajlı göstermektedir. Her modelin alana özgü olması bu durumun bir ispatıdır. GNN modelleri mimarinin avantaj elde edebilecek bölümlerini kullanmaktadır. Tüm bu hususlar dikkate alındığında modellerin başarı sergilediği ve

sergilemeye de devam edeceği düşünülmektedir. Aynı zamanda deney için geliştirilen modeller bu sınırları kaldırmak için de etkin faktör olmaktadır. Günümüzde sınırlılık ve dezavantajları bulunsa da GNN modelleri en avantajlı modeller olma yolunda ilerlemektedir.

Bilgisayar biliminin gelişmesi ile GNN'lerin gelişimi doğru orantılıdır. İlk e-ticaret şirketlerinden olan Amazon, GNN'leri başlıca araştırma alanlarına dâhil etmiştir. Amazon, sinir ağlarını ürün önermesi, veri modelleme ve işleme ile araştırma alanlarında kullanmaktadır. İlerleyen yıllarda yeni modeller e-ticaret sisteminde yaygınlaşacak ve e-ticaret alanında farklı işlemler üzerinde kullanılmaya başlanacaktır [119]. GNN'ler temel bilimlerde alanında da etkin şekilde kullanılmaktadır. Fizik alanında fiziksel sistem modellemesi ve ilişkisel akıl yürütme; kimya alanında moleküler parmak izi, kimyasal reaksiyon tahmini, polieczacılık yan etki modellemesi ve retrosentez tahmini; biyoloji alanında ilaç keşfi, protein arayüz tahmini, yan etki tahmini ve hastalık sınıflandırılmasında kullanılmaktadır. Metin alanında sıra etiketleme, ilişki ve olay çıkarımı, soru cevaplama ve bilgi doğrulama; görüntü alanında sınıflandırma, görsel soru cevaplama, nesne ve etkileşim algılama; doğal dil işlemede ilişki çıkarma, coğrafi konum, konuşma modelleme ve makine aktarımı; bilgisayarlı görü uygulamalarında sosyal ilişki anlayışı, insan – nesne etkileşimi, durum ve eylem tanıma; trafik ağlarında yolcu talep yönlendirme, park yeri tahmini, durum ve akış tahmini uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. GNN modelleri, 2014 yılında

popülerlik kazanmasına rağmen dokuz yıl gibi bir sürede farklı alanlarda başarı göstermiştir. Bilişim güvenliğinin önem kazanması ile GNN'ler siber güvenlik alanında da kötü amaçlı yazılım algılama, güvenlik açığı tanımlama, topolojik saldırı ve savunma, anomali algılama, spam algılama ve söylenti tespiti alanlarında etkili olmuştur. Her model farklı bir alan için geliştirilmiş olsa da ortak çerçeveler ile kullanılarak dönüşüm sağlanabilmektedir. Bu sebeple kullanılan modeller farklı alanlar ile de kullanılmaktadır. Bilgisayar biliminin gelişimi GNN'lere yeni alanlar açarak popülerliğini artıracak ve yeni modellerin oluşmasına yol açacaktır. Bu çalışma özelinde modeller tanıtılırken kaynaklar gösterilerek çalışmaların incelenmesi basitleştirilmiştir. Ayrıca ilk Türkçe kaynaklardan olması sebebiyle ülkemizde GNN alanında bir farkındalık yaratacağı ve ardılı olacak çalışmalara öncülük edeceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Milli Savunma Üniversitesi Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Siber Güvenlik Tezsiz Yüksek Lisans Programına bağlı olarak yürütülen “Siber Güvenlikte Grafik Sinir Ağları” adlı dönem projesinin bir bölümüdür.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT)

Hamza Talha GÜMÜŞ: Kavramsal tasarım, Araştırma, Metodoloji, Onaylama, Yazma - Taslak, Yazma - Gözden geçirme ve Düzenleme.

Can EYÜPOĞLU: Kavramsal tasarım, Araştırma, Metodoloji, Denetim, Onaylama, Yazma - Taslak, Yazma - Gözden geçirme ve Düzenleme.

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] F. Scarselli, M. Gori, A. C. Tsoi, M. Hagenbuchner, and G. Monfardini, "The Graph Neural Network Model," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 20, no. 1, pp. 61-80, Jan. 2009, doi: 10.1109/TNN.2008.2005605.
- [2] paperswithcode.com, "Papers with Code - An Overview of Graph Models," <https://paperswithcode.com/methods/category/graph-models> (accessed May 5, 2023).
- [3] T. N. Kipf and M. Welling, "Semi-supervised classification with graph convolutional networks," 5th International Conference on Learning Representations, ICLR 2017, arXiv preprint arXiv:1609.02907 (2016).
- [4] W. L. Chiang, X. Liu, S. Si, Y. Li, S. Bengio, and C. J. Hsieh, "Cluster-GCN: An Efficient Algorithm for Training Deep and Large Graph Convolutional Networks," *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2019, pp. 257-266, doi: 10.1145/3292500.3330925.
- [5] J. Chen, J. Zhu, and L. Song, "Stochastic training of graph convolutional networks with variance reduction," *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning*, arXiv preprint arXiv:1710.10568 (2017).
- [6] Y. Shi, Z. Huang, S. Feng, W. Wang, and Y. Sun, "Masked label prediction: Unified message passing model for semi-supervised classification," arXiv, arXiv:2009.03509 (2020).
- [7] L. Shi, Y. Zhang, J. Cheng, and H. Lu, "Two-Stream Adaptive Graph Convolutional Networks for Skeleton-Based Action Recognition," 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019, pp. 12018-12027, doi: 10.1109/CVPR.2019.01230.
- [8] Jia et al., "Predicting Path Failure In Time-Evolving Graphs," *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, July 2019, pp. 1279-1289, doi: 10.1145/3292500.3330847.
- [9] B. Chen, R. Barzilay, and T. Jaakkola, "Path-Augmented Graph Transformer Network," arXiv, May 2019, doi: 10.48550/arxiv.1905.12712.
- [10] L. Yao, C. Mao, and Y. Luo, "Graph Convolutional Networks for Text Classification," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 33, no. 01, pp. 7370-7377, Jul. 2019, pp. 7370-7377, doi: 10.1609/aaai.v33i01.33017370.
- [11] X. Wang, Y. Ye, and A. Gupta, "Zero-Shot Recognition via Semantic Embeddings and Knowledge Graphs," 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 6857-6866, doi: 10.1109/CVPR.2018.00717.
- [12] L. Zhao et al., "T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 9, pp. 3848-3858, Sept. 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2935152.
- [13] M. Xu, C. Zhao, D. S. Rojas, A. Thabet, and B. Ghanem, "G-TAD: Sub-Graph Localization for Temporal Action Detection," 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Seattle, WA, USA, 2020, pp. 10153-10162, doi: 10.1109/CVPR42600.2020.01017.

- [14] K. Cheng, Y. Zhang, X. He, W. Chen, J. Cheng, and H. Lu, "Skeleton-Based Action Recognition With Shift Graph Convolutional Network," 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Seattle, WA, USA, 2020, pp. 180-189, doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00026.
- [15] J. Tang, L. Ericson, J. Folkesson, and P. Jensfelt, "GCNv2: Efficient Correspondence Prediction for Real-Time SLAM," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 4, pp. 3505-3512, Oct. 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2927954.
- [16] X. Zhu, Q. Huang, C. Li, J. Cui, and Y. Chen, "Skeleton-Based Action Recognition with Combined Part-Wise Topology Graph Convolutional Networks," Lecture Notes in Computer Science, pp. 43-59, Dec. 2023, doi: 10.1007/978-981-99-8429-9_4.
- [17] C. Shang et al., "Edge Attention-based Multi-Relational Graph Convolutional Networks," arXiv, Feb. 2018, doi: 10.48550/arxiv.1802.04944.
- [18] S. Vashishth, S. Sanyal, V. Nitin and P. Talukdar, "Composition-based Multi-Relational Graph Convolutional Networks," arXiv, Jan 2020, doi: 10.48550/arXiv.1911.03082.
- [19] J. Li, L. Chen, M. Li, M. Wu, W. Pedrycz, and K. Hirota, "Skeleton-Based Multi-Stream Adaptive Graph Convolutional Network for Indoor Scene Action Recognition," 2023 China Automation Congress (CAC), Chongqing, China, 2023, pp. 6103-6108, doi: 10.1109/CAC59555.2023.10451388.
- [20] I. Chami, R. Ying, C. Ré, and J. Leskovec, "Hyperbolic Graph Convolutional Neural Networks," Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 32, pp. 4869-4880, 2019.
- [21] J. Atwood and D. Towsley, "Diffusion-Convolutional Neural Networks," arXiv.org, Jul. 08, 2016. <https://arxiv.org/abs/1511.02136>.
- [22] P. Kumar, M. Grewal, and M. M. Srivastava, "Boosted Cascaded Convnets for Multilabel Classification of Thoracic Diseases in Chest Radiographs," arXiv, Nov. 2017, doi: 10.48550/arxiv.1711.08760.
- [23] C. Li and D. Goldwasser, "Encoding Social Information with Graph Convolutional Networks for Political Perspective Detection in News Media," Jan. 2019, doi: 10.18653/v1/p19-1247.
- [24] D. Andreoletti, S. Troia, F. Musumeci, S. Giordano, G. Maier, and M. Tornatore, "Network Traffic Prediction based on Diffusion Convolutional Recurrent Neural Networks," IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Paris, France, 2019, pp. 246-251, doi: 10.1109/INFOCOMW.2019.8845132.
- [25] P. Veličković, G. Cucurull, A. Casanova, A. Romero, Pietro Liò, and Y. Bengio, "Graph Attention Networks," arXiv, Oct. 2017, doi: 10.48550/arxiv.1710.10903.
- [26] D. Busbridge, et al., "Relational graph attention networks," arXiv preprint, Apr 2019, arXiv:1904.05811.
- [27] S. A. Taylor, F. L. Opolka, P. Liò, and N. D. Lane, "Do We Need Anisotropic Graph Neural Networks?," arXiv, Apr. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2104.01481.
- [28] J. Huang, H. Shen, L. Hou, and X. Cheng, "Signed Graph Attention Networks," Lecture Notes in Computer Science, pp. 566-577, Jan. 2019, doi: 10.1007/978-3-030-30493-5_53.
- [29] M. Grassia and G. Mangioni, "wsGAT: Weighted and Signed Graph Attention Networks for Link Prediction," Studies in computational intelligence, pp. 369-375, Jan. 2022, doi: 10.1007/978-3-030-93409-5_31.
- [30] Z. Huang, "DHSEGATs: distance and hop-wise structures encoding enhanced graph attention networks," Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 350-359, April 2023, doi: 10.23919/JSEE.2023.000057.
- [31] H. Zhao et al., "Multivariate Time-Series Anomaly Detection via Graph Attention Network," 2020 IEEE International Conference

- on Data Mining (ICDM), Sorrento, Italy, 2020, pp. 841-850, doi: 10.1109/ICDM50108.2020.00093.
- [32] W. Hamilton, Z. Ying, and J. Leskovec, "Inductive Representation Learning on Large Graphs," Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. 2017, doi: 10.48550/arXiv.1706.02216.
- [33] K. Xu, W. Hu, J. Leskovec, and S. Jegelka, "How Powerful are Graph Neural Networks?," arXiv, Oct. 2018, doi: 10.48550/arxiv.1810.00826.
- [34] S. Chen, S. Lim, F. Mémoli, Z. Wan, and Y. Wang, "Weisfeiler-Lehman meets Gromov-Wasserstein," arXiv, Feb. 2022, doi: 10.48550/arxiv.2202.02495.
- [35] L. Chang and P. Branco, "Graph-based Solutions with Residuals for Intrusion Detection: the Modified E-GraphSAGE and E-ResGAT Algorithms," arXiv, Nov. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2111.13597.
- [36] W. W. Lo, S. Layeghy, M. Sarhan, M. Gallagher and M. Portmann, "E-GraphSAGE: A Graph Neural Network based Intrusion Detection System for IoT," NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Budapest, Hungary, 2022, pp. 1-9, doi: 10.1109/NOMS54207.2022.9789878.
- [37] K. Xu, C. Li, Y. Tian, T. Sonobe, K. Kawarabayashi, and S. Jegelka, "Representation Learning on Graphs with Jumping Knowledge Networks," Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning, PMLR 80:5453-5462, 2018, doi: 10.48550/arXiv.1806.03536.
- [38] W. W. Lo, S. Layeghy, M. Sarhan, M. Gallagher, and M. Portmann, "Graph Neural Network-based Android Malware Classification with Jumping Knowledge," 2022 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC), Edinburgh, United Kingdom, 2022, pp. 1-9, doi: 10.1109/DSC54232.2022.9888878.
- [39] J. Oh, K. Cho, and J. Bruna, "Advancing GraphSAGE with A Data-Driven Node Sampling," arXiv, Apr. 2019, doi: 10.48550/arxiv.1904.12935.
- [40] Y. Rong, W. Huang, T. Xu, and J. Huang, "Dropedge: Towards Deep Graph Convolutional Networks On Node Classification," ArXiv, 2020, doi: 10.48550/arXiv.1907.10903.
- [41] S. Abu-El-Haija, A. Kapoor, B. Perozzi, and J. Lee, "N-GCN: Multi-scale Graph Convolution for Semi-supervised Node Classification," Proceedings of the 35th Uncertainty in Artificial Intelligence Conference, PMLR 115, pp. 841-851, 2020, doi: 10.48550/arXiv.1802.08888.
- [42] V. P. Dwived and X. Bresson. "A generalization of transformer networks to graphs," AAAI 2021 Workshop on Deep Learning on Graphs: Methods and Applications, 2021, doi: 10.48550/arXiv.2012.09699.
- [43] S. Yun et al., "Graph Transformer Networks: Learning meta-path graphs to improve GNNs," Neural Networks, vol. 153, pp. 104-119 Jun. 2022, doi: 10.1016/j.neunet.2022.05.026.
- [44] B. Lyu, L. Chen, S. Zhu, and K. Yu, "LET: Linguistic Knowledge Enhanced Graph Transformer for Chinese Short Text Matching," AAAI, vol. 35, no. 15, pp. 13498-13506, May 2021, doi: 10.1609/aaai.v35i15.17592.
- [45] L. Xia, "Knowledge-Enhanced Hierarchical Graph Transformer Network for Multi-Behavior Recommendation," The Thirty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, vol. 35, no. 5, pp. 4486-4493, May 2021, doi: 10.1609/aaai.v35i5.16576.
- [46] A. Morehead and C. Chen, "Geometric Transformers for Protein Interface Contact Prediction," arXiv, Oct. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2110.02423.
- [47] J. Gilmer, S. S. Schoenholz, P. F. Riley, O. Vinyals, and G. E. Dahl, "Neural Message Passing for Quantum Chemistry," Proceedings of the 34th International Conference on

Machine Learning, PMLR 70:1263-1272, 2017, doi: 10.48550/arXiv.1704.01212.

[48] M. Gastegger, A. McSloy, M. Luya, Kristof Schütt, and R. J. Maurer, "A deep neural network for molecular wave functions in quasi-atomic minimal basis representation," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 153, no. 4, Jul. 2020, doi: 10.1063/5.0012911.

[49] D. S. Broomhead and D. Lowe, "Multivariable Functional Interpolation and Adaptive Networks," *Complex Systems*, vol. 2, no. 6, pp. 568-576, 1988.

[50] P. Riba, A. Fischer, J. Lladós and A. Fornés, "Learning Graph Distances with Message Passing Neural Networks," 2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Beijing, China, 2018, pp. 2239-2244, doi: 10.1109/ICPR.2018.8545310.

[51] M. Balcilar, P. Heroux, B. Gauzere, P. Vasseur, S. Adam, and P. Honeine, "Breaking the Limits of Message Passing Graph Neural Networks," 38th International Conference on Machine Learning, pp. 599-608, 2021, doi: 10.48550/arXiv.2106.04319.

[52] H. Dai, Z. Kozareva, B. Dai, A. Smola, and L. Song, "Learning Steady-States of Iterative Algorithms over Graphs," *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning*, PMLR 80, pp. 1106-1114, 2018.

[53] L. Wu, S. Li, C.-J. Hsieh, and J. Sharpnack, "Stochastic Shared Embeddings: Data-driven Regularization of Embedding Layers," *Proceedings of the 33rd International Conference on Neural Information Processing Systems*, p. 3, pp. 24-34, May 2019, doi: 10.48550/arxiv.1905.10630.

[54] P.-R. Wagner, S. Marelli, I. Papaioannou, D. Straub, and B. Sudret, "Rare event estimation using stochastic spectral embedding," *Structural Safety*, vol. 96, p. 102179, May 2022, doi: 10.1016/j.strusafe.2021.102179.

[55] F. Monti, D. Boscaini, J. Masci, E. Rodolà, J. Svoboda, and M. M. Bronstein, "Geometric Deep Learning on Graphs and Manifolds Using Mixture Model CNNs," 2017 IEEE Conference

on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA, 2017, pp. 5425-5434, doi: 10.1109/CVPR.2017.576.

[56] F. Lu et al., "MoNet: Motion-Based Point Cloud Prediction Network," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 13794-13804, Aug. 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3128424.

[57] Y. Yao, Y. Jafarian, and H. S. Park, "MONET: Multiview Semi-Supervised Keypoint Detection via Epipolar Divergence," 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 2019, pp. 753-762, doi: 10.1109/ICCV.2019.00084.

[58] X. He, K. Deng, X. Wang, Y. Li, Y. Zhang, and M. Wang, "LightGCN: Simplifying and Powering Graph Convolution Network for Recommendation," *Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, pp. 639-648, Jul. 2020, doi: 10.1145/3397271.3401063.

[59] K. Mao, J. Zhu, X. Xiao, B. Lu, Z. Wang, and X. He, "UltraGCN: Ultra Simplification of Graph Convolutional Networks for Recommendation," *CIKM'21: Proceedings of the 30th ACM International Conference on Information & Knowledge Management*, pp. 1253-1262, Oct. 2021, doi: 10.1145/3459637.3482291.

[60] B. Wu, Y. Liu, B. Lang, and L. Huang, "DGCNN: Disordered graph convolutional neural network based on the Gaussian mixture model," *Neurocomputing*, vol. 321, pp. 346-356, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.neucom.2018.09.008.

[61] M. Zhang, Z. Cui, M. Neumann, and Y. Chen, "An End-to-End Deep Learning Architecture for Graph Classification," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 32, no. 1, Apr. 2018, doi: 10.1609/aaai.v32i1.11782.

[62] Y. Wang and J. M. Solomon, "Object DGCNN: 3D Object Detection using Dynamic Graphs," *Advances in Neural Information*

Processing Systems, vol. 34, pp. 20745-20758, 2021, doi: 10.48550/arXiv.2110.06923.

[63] B.-H. Kim and J. C. Ye, "Understanding Graph Isomorphism Network for rs-fMRI Functional Connectivity Analysis," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 14, Jun. 2020, doi: 10.3389/fnins.2020.00630.

[64] F. M. Bianchi, D. Grattarola, L. Livi, and C. Alippi, "Graph Neural Networks With Convolutional ARMA Filters," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 44, no. 7, pp. 3496-3507, 1 July 2022, doi: 10.1109/TPAMI.2021.3054830.

[65] J. Su, S. Wang, and F. Huang, "ARMA Nets: Expanding Receptive Field for Dense Prediction," *European Semantic Web Conference, ESWC 2018: The Semantic Web*, pp. 593-607, Feb. 2020, doi: 10.48550/arxiv.2002.11609.

[66] M. Schlichtkrull, T. N. Kipf, P. Bloem, R. van den Berg, I. Titov, and M. Welling, "Modeling Relational Data with Graph Convolutional Networks," *The Semantic Web*, pp. 593-607, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-93417-4_38.

[67] T. Thanapalasingam, L. van Berkel, P. Bloem, and P. Groth, "Relational graph convolutional networks: a closer look," *PeerJ Computer Science*, vol. 8, p. e1073, Nov. 2022, doi: 10.7717/peerj-cs.1073.

[68] K. Schütt, P.-J. Kindermans, H. E. Sauceda Felix, S. Chmiela, A. Tkatchenko, and K.-R. Müller, "SchNet: A continuous-filter convolutional neural network for modeling quantum interactions," *Neural Information Processing Systems, NeurIPS 2017*, vol. 30, pp. 992-1002, 2017, doi: 10.48550/arXiv.1706.08566.

[69] Y. Li, D. Tarlow, M. Brockschmidt, and R. S. Zemel, "Gated Graph Sequence Neural Networks," *Proceedings of the 5th International Conference on Learning Representations*, pp. 273-283, Apr. 2016, doi: 10.48550/arxiv.1511.05493.

[70] R. Li, S. Wang, F. Zhu, and J. Huang, "Adaptive Graph Convolutional Neural

Networks," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 32, no. 1, pp. 105-132, Apr. 2018, doi: 10.1609/aaai.v32i1.11691.

[71] Z. Ying, J. You, C. Morris, X. Ren, W. Hamilton, and J. Leskovec, "Hierarchical Graph Representation Learning with Differentiable Pooling," *Neural Information Processing Systems*, 2018, doi: 10.48550/arXiv.1806.08804.

[72] M. Cheung, J. Shi, L. Y. Jiang, O. Wright, and Moura, "Pooling in Graph Convolutional Neural Networks," *53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, pp. 462-466, Apr. 2020, doi: 10.48550/arxiv.2004.03519.

[73] T. Yamamoto, "Crystal Graph Neural Networks for Data Mining in Materials Science," *Research Institute for Mathematical and Computational Sciences, LLC*, 2019.

[74] G. S. Alberti, M. Santacesaria, and S. Sciotto, "Continuous Generative Neural Networks," *arXiv*, May 2022, doi: 10.48550/arxiv.2205.14627.

[75] H. Li, J. Cao, J. Zhu, Y. Liu, Q. Zhu, and G. Wu, "Curvature Graph Neural Network," *Information Sciences*, vol. 592, pp. 50-66, doi: 10.1016/j.ins.2021.12.077.

[76] A. Sanchez-Gonzalez, J. Godwin, T. Pfaff, R. Ying, J. Leskovec, and P. Battaglia, "Learning to Simulate Complex Physics with Graph Networks," *International Conference on Machine Learning*, pp. 8459-8468, Nov. 21, 2020, doi: 10.48550/arXiv.2002.09405.

[77] M. Chen, Z. Wei, Z. Huang, B. Ding, and Y. Li, "Simple and Deep Graph Convolutional Networks," *International Conference on Machine Learning*, pp. 1725-1735, Nov. 21, 2020, doi: 10.48550/arXiv.2007.02133.

[78] M. Defferrard, X. Bresson, and P. Vandergheynst, "Convolutional Neural Networks on Graphs with Fast Localized Spectral Filtering," *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 3844-3852, 2016, doi: 10.48550/arXiv.1606.09375.

- [79] J. Chen, T. Ma, and C. Xiao, "FastGCN: Fast Learning with Graph Convolutional Networks via Importance Sampling," arXiv, Jan. 2018, doi: 10.48550/arxiv.1801.10247.
- [80] P. Veličković, W. Fedus, W. L. Hamilton, P. Liò, Y. Bengio, and R. D. Hjelm, "Deep Graph Infomax," arXiv, Sep. 2018, doi: 10.48550/arxiv.1809.10341.
- [81] Z. Chen, T. Ma, Z. Jin, Y. Song, and Y. Wang, "BiGCN: A Bi-directional Low-Pass Filtering Graph Neural Network," *Analysis and Applications*, vol. 20, no. 6, pp. 1193-1214, 2022, doi: 10.1142/s0219530522400048.
- [82] E. Rossi, B. Chamberlain, F. Frasca, D. Eynard, F. Monti, and M. Bronstein, "Temporal Graph Networks for Deep Learning on Dynamic Graphs," arXiv, Jun. 2020, doi: 10.48550/arxiv.2006.10637.
- [83] W. Jin, M. Qu, X. Jin, and X. Ren, "Recurrent Event Network: Autoregressive Structure Inference over Temporal Knowledge Graphs," *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, Nov. 2020, pp. 6669-6683, doi: 10.18653/v1/2020.emnlp-main.541.
- [84] Y. Han, S. Karunasekera, and C. Leckie, "Continual Learning for Fake News Detection from Social Media," *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2021: 30th International Conference on Artificial Neural Networks*, pp. 372-384, Sep. 2021, doi: 10.1007/978-3-030-86340-1_30.
- [85] F. Monti, F. Frasca, D. Eynard, D. Mannion, and M. M. Bronstein, "Fake News Detection on Social Media using Geometric Deep Learning," arXiv, Feb. 2019, doi: 10.48550/arxiv.1902.06673.
- [86] C. Gabriele, C. Luca, B. Dominique, L. Pietro, and V. Petar, "Principal Neighbourhood Aggregation for Graph Nets," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 33, pp. 13260-13271, 2020, doi: 10.48550/arXiv.2004.05718.
- [87] J. Qiu et al., "GCC: Graph Contrastive Coding for Graph Neural Network Pre-Training," *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, Aug. 2020, pp. 1150-1160, doi: 10.1145/3394486.3403168.
- [88] B. Chen et al., "GCCAD: Graph Contrastive Coding for Anomaly Detection," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 35, no. 8, pp. 8037-8051, Aug. 2023, doi: 10.1109/TKDE.2022.3200459.
- [89] H. Gao, Z. Wang, and S. Ji, "Large-Scale Learnable Graph Convolutional Networks," *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, Jul. 2018, pp. 1416-1424, doi: 10.1145/3219819.3219947.
- [90] D. Bacciu, F. Errica, and A. Micheli, "Contextual Graph Markov Model: A Deep and Generative Approach to Graph Processing," *35th International Conference on Machine Learning*, pp. 294-303, Jul. 03, 2018, doi: 10.48550/arXiv.1805.10636.
- [91] J. Zhang, X. Shi, J. Xie, H. Ma, I. King, and D.-Y. Yeung, "GaAN: Gated Attention Networks for Learning on Large and Spatiotemporal Graphs," Mar. 2018, arXiv:1803.07294.
- [92] C. Miles et al., "Discovering Symbolic Models from Deep Learning with Inductive Biases," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 33, 2020, doi: 10.48550/arXiv.2006.11287.
- [93] Z. Shui and G. Karypis, "Heterogeneous Molecular Graph Neural Networks for Predicting Molecule Properties," *2020 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, Sorrento, Italy, 2020, pp. 492-500, doi: 10.1109/ICDM50108.2020.00058.
- [94] S. Zhang, Y. Liu, and L. Xie, "Molecular Mechanics-Driven Graph Neural Network with Multiplex Graph for Molecular Structures," ArXiv, arXiv:2011.07457.
- [95] D. Alfke and M. Stoll, "Pseudoinverse graph convolutional networks," *Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 35, pp. 1318-1341, Apr. 2021, doi: 10.1007/s10618-021-00752-w.

- [96] I. Igashov, N. Pavlichenko, and S. Grudin, "Spherical convolutions on molecular graphs for protein model quality assessment," *Machine Learning: Science and Technology*, vol. 2, no. 4, p. 045005, Jul. 2021, doi: 10.1088/2632-2153/abf856.
- [97] S. Brody, U. Alon, and E. Yahav, "How Attentive are Graph Attention Networks?," arXiv, May 2021, arXiv:2105.14491.
- [98] J. Shen, Z. Shen, C. Xiong, C. Wang, K. Wang, and J. Han, "TaxoExpan: Self-supervised Taxonomy Expansion with Position-Enhanced Graph Neural Network," *Proceedings of The Web Conference*, pp. 486-497, Apr. 2020, doi: 10.1145/3366423.3380132.
- [99] W. Shi and R. Rajkumar, "Point-GNN: Graph Neural Network for 3D Object Detection in a Point Cloud," *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle, WA, USA, 2020, pp. 1708-1716, doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00178.
- [100] D. Bieber et al., "Learning to execute programs with instruction pointer attention graph neural networks," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 33, no. 2020, pp. 8626-8637, doi: 10.48550/arXiv.2010.12621.
- [101] H. Dai, A. Nazi, Y. Li, B. Dai, and D. Schuurmans, "Scalable Deep Generative Modeling for Sparse Graphs," *International Conference on Machine Learning*, Nov. 21, 2020, pp. 2302-2312, doi: 10.48550/arXiv.2006.15502.
- [102] T. Nayak and H. T. Ng, "A Hierarchical Entity Graph Convolutional Network for Relation Extraction across Documents," arXiv, Aug. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2108.09505.
- [103] K. Wimalawarne and T. Suzuki, "Layer-wise Adaptive Graph Convolution Networks Using Generalized Pagerank," *Proceedings of the 14th Asian Conference on Machine Learning*, PMLR, vol. 189, pp. 1117-1132, 2023.
- [104] Z. Li, B. Chen, and X. Si, "Graph Contrastive Pre-training for Effective Theorem Reasoning," *International Conference on Machine Learning (ICML)*, vol. 139, pp. 874-883, 2020.
- [105] L. Chen et al., "Group-Aware Graph Neural Network for Nationwide City Air Quality Forecasting," *ACM Transactions on Knowledge Discovery From Data*, vol. 18, no. 3, pp. 1-20, Dec. 2023, doi: 10.1145/3631713.
- [106] T. Pfaff, M. Fortunato, A. Sanchez-Gonzalez, and P. W. Battaglia, "Learning Mesh-Based Simulation with Graph Networks," arXiv.org, Jun. 18, 2021, https://arxiv.org/abs/2010.03409
- [107] Y. Xing et al., "Learning Hierarchical Graph Neural Networks for Image Clustering," *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 3447-3457, doi: 10.1109/ICCV48922.2021.00345.
- [108] R. Levie, F. Monti, X. Bresson and M. M. Bronstein, "CayleyNets: Graph Convolutional Neural Networks With Complex Rational Spectral Filters," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 1, pp. 97-109, Jan. 2019, doi: 10.1109/TSP.2018.2879624.
- [109] Z. Liu, et al., "GeniePath: Graph Neural Networks with Adaptive Receptive Paths," *AAAI*, vol. 33, no. 01, pp. 4424-4431, Jul. 2019, doi: 10.1609/aaai.v33i01.33014424.
- [110] A. Micheli, "Neural Network for Graphs: A Contextual Constructive Approach," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 20, no. 3, pp. 498-511, March 2009, doi: 10.1109/TNN.2008.2010350.
- [111] D. V. Tran, N. Navarin, and A. Sperduti, "On Filter Size in Graph Convolutional Networks," *2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, Bangalore, India, 2018, pp. 1534-1541, doi: 10.1109/SSCI.2018.8628758.
- [112] F. M. Bianchi, D. Grattarola, and C. Alippi, "Spectral clustering with graph neural networks for graph pooling," *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning (ICML'20)*, vol. 119, p. 82, pp. 874-883, 2020.

[113] C. Gallicchio and A. Micheli, “Graph Echo State Networks,” The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Barcelona, Spain, 2010, pp. 1-8, doi: 10.1109/IJCNN.2010.5596796.

[114] R. Li, et al., “Dual graph convolutional networks for aspect-based sentiment analysis,” Proceedings of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing, pp. 6319-6329, 2021.

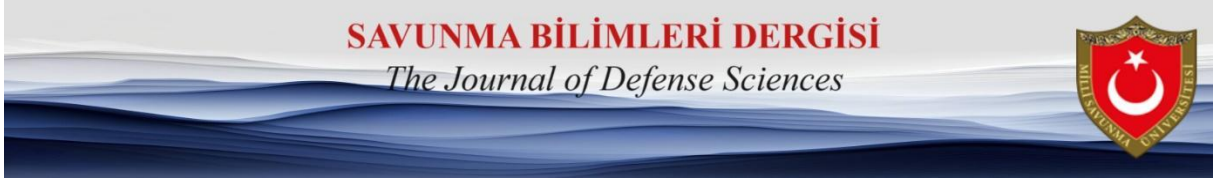
[115] H. T. Gümüş ve C. Eyüpoğlu, “Grafik Sinir Ağlarına Genel Bir Bakış,” EMO Bilimsel Dergi, vol. 13, no. 2, pp. 39-56, 2023.

[116] Waikhom and R. Patgiri, “Graph Neural Networks: Methods, Applications, and Opportunities,” arXiv.org, Sep. 08, 2021, arXiv:2108.10733.

[117] C. Liu et al., “Graph Pooling for Graph Neural Networks: Progress, Challenges, and Opportunities,” arXiv.org, Jun. 22, 2023, arXiv:2204.07321.

[118] S. Georgousis, M. P. Kenning, and X. Xie, “Graph Deep Learning: State of the Art and Challenges,” IEEE Access, vol. 9, pp. 22106-22140, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3055280.

[119] Amazon Science “Amazon at WSDM: The future of graph neural networks,” <https://www.amazon.science/blog/amazon-at-wsdm-the-future-of-graph-neural-networks> (accessed May 7, 2023).



<https://dergipark.org.tr/pub/khosbd>

İş Analiz Süreç Model Yaklaşımıyla Süreç Madenciliği Yöntemi Kullanılarak Yazılım Gereksinimleri Belirleme

Determining Software Requirements Using The Process Mining Method With The Business Analysis Process Model Approach

Bahar ÖZYÖRÜK ^{1,*} Özge TAHMAZOĞLU ²

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 11.04.2023
Düzeltilme: 25.07.2023
Kabul: 20.09.2023

Keywords

Süreç Madenciliği
İhtiyaç Analizi
Gereksinim Keşfi
Disco

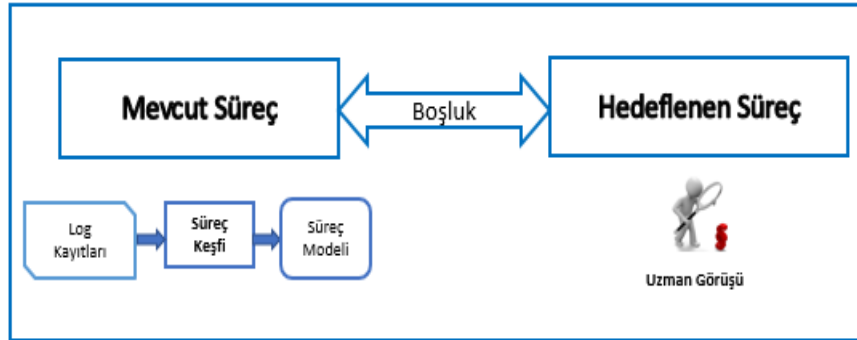
Anahtar Kelimeler

Process Mining
Needs Analysis
Requirements Discovery
Disco

Önemli Noktalar / Highlights

Kullanıcı odaklı projelerde, kullanıcının geçmiş verilerine göre süreçlerinin iyileştirilmesi önemlidir. Süreçlerin, süreç madenciliği ile keşfedilmesi ve hedef süreçlerin kullanıcı görüşü alınarak belirlenmesi, sonuçta kullanıcı tarafından belirlenen gereksinimlerin ortaya çıkarılması açısından literatürden farklı bir yaklaşımdır. Bu çalışma ihtiyaç analizi sonucunda gereksinimleri belirlerken süreç madenciliğinin nasıl kullanılabileceğini uygulamalı olarak gösterdiği için literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

Grafiksel Özet / Graphical Abstract



Özet

Süreç madenciliği günümüzde popüler konular arasında yer almaktadır. İş analiz süreç model yaklaşımında ihtiyaç analizi adımı bulunmaktadır. Bu çalışmada süreç madenciliği ve ihtiyaç analizi yöntemleri kullanılarak gereksinimleri ortaya çıkarma çalışması yapılmıştır. Süreç madenciliği yöntemi ile mevcut süreç keşfedilirken Disco aracı kullanılmıştır. Hedeflenen iş süreci uzman görüşü alınarak oluşturulmuştur. İhtiyaç analizi yöntemiyle mevcut ve hedeflenen süreç arasındaki boşluklar belirlenerek gereksinimler ortaya çıkarılmıştır.

Abstract

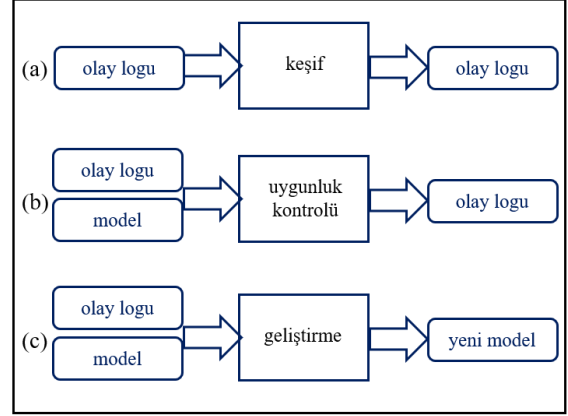
Process mining is among the popular topics today. There is a needs analysis step in the business analysis process model approach. In this study, requirements were uncovered using process mining and requirements analysis methods. Disco tool was used while exploring the current process with the process mining method. The targeted business process was created by taking expert opinion. Requirements were revealed by determining the gaps between the current and targeted process through the needs analysis method.

*Corresponding author, e-mail: bahar@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Süreç madenciliği günümüzde yapılan çalışmalar arasında popülerliğini korumaktadır. Süreç madenciliğinin süreç keşfi, süreç uygunluk kontrolü ve süreç geliştirme olarak amaçları bulunmaktadır. Süreç madenciliği ile iş süreçlerinin analizi yapılabilmektedir. İş süreçlerinin belirlenmesi, kurumlarda standart bir süreç yapısının yürütülmesi yönetim açısından önemlidir. Kurumların iş süreçlerini belirlemesi ve süreçlere uygun olarak operasyonlarını yürütmesi süreç kalitesi açısından önemlidir. İş süreçleri modelleme, kurumların süreçlerini yeniden tasarlamak, tekrarlanabilir hale getirmek, yaygınlaştırmak, etkinleştirmek, tetkik etmek ve süreç otomasyonunu sağlamak gibi amaçlarla kullanılan bir araçtır.

“Süreç madenciliği, günümüzün bilgi sistemlerinde hazır bulunan olay loglarından bilgi çıkararak gerçek süreçleri keşfetmeyi, izlemeyi ve iyileştirmeyi amaçlar [1].” Süreç madenciliğinin “üç farklı türü keşif, uygunluk kontrolü ve geliştirmedir [1].“ İlk tür olan keşif tekniği, bir olay günlüğü alır ve bir model üretir. İkinci tür süreç madenciliği uygunluktur. Mevcut bir süreç modeli, aynı sürecin bir olay günlüğü ile karşılaştırılır. Üçüncü tür süreç madenciliği geliştirmedir. Mevcut bir süreç modeli geliştirilmektedir [1].” Şekil 1’de “süreç madenciliğinin üç farklı türü görülmektedir [2].”



Şekil 1: Süreç madenciliğinin üç temel amacı. (girdiler ve çıktılar açısından) (a) keşif, (b) uygunluk kontrolü, (c) geliştirme.

“Süreç madenciliğinde akış kontrolü, olay ve zaman gibi perspektifler de vardır [1].” Akış kontrolü perspektifi, aktivitelerin sıralanması üzerinde odaklanmıştır. Organizasyonel perspektif, logları gerçekleştiren aktörler ve bu aktörlerin birbirleri ile olan ilişkilerini ortaya çıkarır. Organizasyonel perspektifin amacı modeli organizasyon ve roller açısından sınıflandırmaktır. Olay perspektifi olayların özelliklerine odaklanır. Zaman perspektifinin odak noktası ise olayların gerçekleşme zamanlarıdır.

“Süreç madenciliğinin başlangıç noktası olay logudur. Günümüzün bilgi sistemlerinde gerçekleşen aktiviteler ile ilgili detaylı bilgiler depolanmaktadır. Depolanan bu bilgilere olay logları denir [1].”

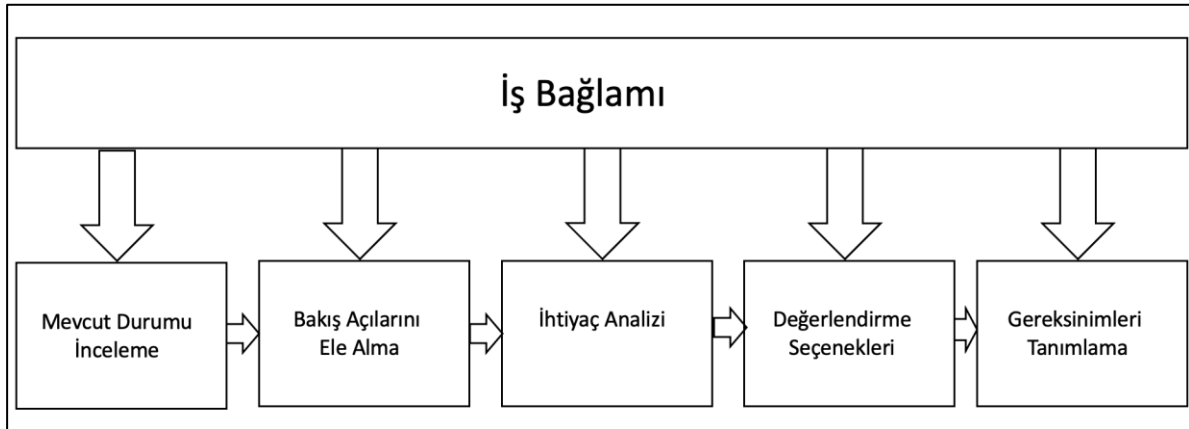
Süreç madenciliği yazılımı olan “Disco, Fluxicon tarafından geliştirilen ticari bir araçtır ancak tam destekli akademik lisans seçeneğine sahiptir. Windows veya Mac OsX üzerinde çalışır. Disco, kullanımı çok kolay bir kullanıcı arayüzüne sahiptir ve süreç madenciliğinin nasıl

değerlendirildiğini herkes kolayca anlayabilir [3].”

“Gerçekte keşfedilen süreç madenciliği uygulama alanları çok geniştir [4].” Sağlık hizmeti, Bilgi Teknolojileri, İmalat, Eğitim, Finansal, Lojistik, Kamu, Güvenlik, Çağrı Merkezi, UX / Kullanılabilirlik, Robotik, Eğlence, Fayda, Giysi, Danışmanlık, Perakende, Biyoloji, Perakende, Eczacılık / Biyoloji, Otel, Tarım sektörleri örnek verilebilir.

İncelenen iş sistemleri çok çeşitli olabilir; belirli bir proje için iş analistlerinin birkaç teknik

uygulaması ve bir dizi farklı paydaş görüşünü analiz etmesi gerekebilir. Bazen proje, organizasyonun sorunlu bir bölümünü araştırmak ve ileriye dönük yollar için anahat önerileri üretmek olabilir. “Projeler, iş analistinin belirli iş veya sistem gereksinimlerini analiz etmesini ve belgelemesini gerektirebilir. Dolayısıyla, bir süreç modeli geliştirmede karşılaşılan zorluklar, insanların işlerini yürütmelerine yardımcı olacak bir çerçeve sağlarken yeterince esnek bir şey sunmaktır. Şekil 2’de gösterilen süreç modeli bu zorlukların üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır [5].”



Şekil 2: İş analiz süreç modeli yaklaşımı.

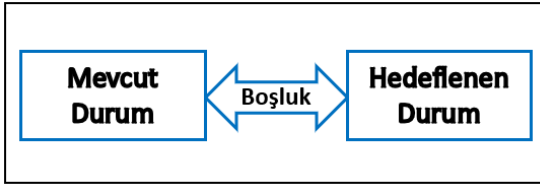
Mevcut durumu inceleme aşaması, “sorunlar ve sorunları ortaya çıkarmakla ilgilidir. Bir dizi araştırma tekniğini kullanmayı ve incelenen duruma en uygun olanları seçmeyi içerir. Ayrıca bulunanların belgelenmesini de içerir [6].”

Bakış açılarını ele alma aşamasının amacı, “incelenen iş sistemi hakkındaki paydaş perspektiflerinin bir değerlendirmesini yapmaktır. Bu perspektifler daha sonra paydaş

değerlerini ve inançlarını ortaya çıkarmak için analiz edilebilir ve iş faaliyeti modellerine dönüştürülebilir [5].”

İhtiyaç analizi aşamasının odak noktası, iş sisteminde nerede iyileştirmeler yapılabileceğini belirlemektir. Şekil 3’te anlatılan yaklaşım, “mevcut veya "olduğu gibi" bir görüşün istenen, gelecek veya "olacak" bir sistemle karşılaştırıldığı "boşluk analizi" olarak bilinir [5].” Bu yöntem, mevcut bir prosedür

setine veya Bilgi Teknolojileri sistemi işlevlerine yeni özelliklerin eklendiği geleneksel, daha sistematik iş veya sistem iyileştirme yaklaşımıyla çelişir. Boşluk analizinde vurgu, nerede olmak istediğimizi anlamak ve şu anda nerede olduğumuza bakarak bizi oraya götürmek için neyin değişmesi gerektiğini belirlemektir.



Şekil 3: Boşluk analizi.

Değerlendirme seçenekleri aşamasının amacı potansiyel değişiklik yelpazesini iyileştirme eylemleri paketlerinde bir araya toplamaktır. Bu paketler, daha sonra geliştirilen ve daha ayrıntılı olarak belgelenen bir dizi seçeneğin geliştirilmesi için temel oluşturur. Daha sonra değerlendirilmek üzere işletme yöneticilerine sunulur.

Gereksinimleri tanımlama aşamasının amacı, yeni iş sistemi için iş gereksinimlerini ortaya koyan iyi biçimlendirilmiş bir gereksinimler belgesi üretmektir. Bu belge, gereksinimlerin açık metin açıklamalarını ve her gereksinimi kaynağından çözümüne kadar izlemek için yeterli bilgiyi içermelidir. Süreç ve veri gereksinimlerini şematik olarak temsil etmek ve böylece gereksinim tanımının kesinliğini ve netliğini geliştirmek için modelleme teknikleri kullanılabilir.

İş analizi sürecinde gereksinimlerin ortaya çıkarılması önemli bir adımdır. İş analizi süreç model yaklaşımına göre ihtiyaç analizi

adımında iş ihtiyaçları, sorunlar ve boşluklar belirlenebilmektedir. İhtiyaç analizi mevcut durum ile hedeflenen durum arasındaki farkların belirlenmesi diğer adıyla boşluk analizi olarak da bilinmektedir.

Yazılım ürünleri yıllar geçtikçe karmaşık bir hal alabilmektedir. Yazılım ihtiyaçlarını belirlemek zor bir süreç haline gelebilmektedir. Yazılım ürünleri değişen süreçlere ayak uydurmak zorundadır. Yazılım geliştirme sürecinde analiz aşamasında gereksinimleri doğru belirlemek yazılım kalitesi ve sürdürülebilirliği açısından çok önemlidir. Gereksinimleri ortaya çıkarırken ihtiyaç analizi yönteminden faydalanılabilmektedir.

Süreç madenciliğine dayalı bir yaklaşımda, “bir gereksinim mühendisi, paydaşların hedeflerini gerçekleştirme yollarını bulmak için süreç keşif algoritmalarından yararlanabilir. Keşfedilen model, paydaşın tercihlerini ve önceliklerini ortaya koyan temel süreç modelini temsil eder. Keşfedilen bu tür bir model, analistlerin gerçek davranışı, varsa önceden belirlenmiş modellerle karşılaştırmasını da sağlar [7].” Yapılan çalışmada, İş süreç yönetiminde mevcut sürecin ortaya konulmasında Süreç madenciliğinden faydalanılabileceği aktarılmıştır.

Literatürde yapılan bir çalışmada hedef modellerin üretilmesi faydasından bahsedilmiştir. “GoCC modeli süreç madenciliği kullanılarak gereksinimlerin ortaya çıkartılabileceği konusunda örnek bir çalışmadır [8].”

Literatürde yapılan bir diğer çalışmada “iş süreç yönetimi yazılımı kullanılan bir inşaat

firmasında yazılıma girilen verilerin süreç madenciliği yazılımına aktarılması ile ortaya çıkan iş akışları ile analiz aşamasında yapılan çalışmalar sonrası tasarlanan iş akışları arasındaki farklar değerlendirilmiş, optimum kaynak ile verimli iş akışlarının nasıl olması gerektiği ile ilgili çeşitli önerilerde bulunulmuştur [9].” Yapılan çalışmada yürütülen sürecin analiz aşamasındaki belirlenen süreç ile uygunluğu kontrol edilmiştir.

Süreç madenciliği ve gereksinim ile ilgili çalışmalara bakıldığında, “süreç madenciliği ve gereksinim konularında hazırlanan bibliyometrik çalışmada, 1999 yılından 14.10.2022 tarihine kadar Web Of Science veritabanında bulunan 162 yayın incelenmiştir. Web Of Science veritabanından elde edilen veriler Vosviewer 1.16.17 versiyonundaki uygulaması kullanılarak bibliyometrik analiz çalışması yapılmıştır. Aşağıdaki bulgular elde edilmiştir [10].” Süreç madenciliği ve gereksinim ile ilgili atf yapılan ülkelerin ilişki durumlarına göre en az Almanya, Çin, ABD, Brezilya, Avustralya, ikinci sırada Hollanda, Belçika, üçüncü sırada; İtalya, Avusturya, Polonya, Mısır, Kanada ve dördüncü sırada; İngiltere, Fransa, Endonezya, İspanya arasında daha yoğun ilişki olduğu görülmüştür. Davide Aloini 7 makale ile süreç madenciliği ve gereksinim alanında en fazla çalışan yazardır. David Benavides süreç madenciliği ve gereksinim alanında en fazla atf alan araştırmacıdır. Toplam bağlantı yoğunluğu en fazla olan yazarlar Will Van Der Aalst ve Moe Wynn’dır. En fazla kullanılan anahtar

kelimelerin sırasıyla; Süreç Madenciliği(111), İş Süreç Yönetimi(12) ve Gereksinim Mühendisliği(8) olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada süreç madenciliği kullanılarak bir sürecin olay logları yorumlanarak mevcut iş süreci ortaya çıkarılacaktır. Hedeflenen süreçler uzman görüşü alınarak belirlenecektir. İhtiyaç analizi tekniği ile gereksinimler ortaya çıkarılacaktır. İhtiyaç analizinde mevcut iş süreci süreç madenciliği yöntemiyle, hedeflenen iş süreci uzman görüşü alınarak belirlenecektir. Hedeflenen süreç ve mevcut süreç arasındaki farklar ortaya konulacaktır. Tespit edilen farklar ve boşluklar sonucunda gereksinimler ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla yapılan deneysel çalışma aktarılmaktadır.

Kullanıcı odaklı projelerde, kullanıcının geçmiş verilerine göre süreçlerin süreç madenciliği ile keşfedilmesi ve hedef süreçlerin kullanıcı görüşü alınarak belirlenmesi, sonuçta kullanıcı tarafından belirlenen gereksinimlerin ortaya çıkarılması açısından literatürden farklı bir yaklaşımdır. Literatürde gereksinimleri ortaya çıkarma aşamasında süreç madenciliği kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu çalışma ihtiyaç analizi sonucunda gereksinimleri belirlerken süreç madenciliğinin nasıl kullanılabileceğini uygulamalı olarak gösterecektir.

Süreç madenciliği çalışmalarında yaşanan zorluklardan biri olan uygun verinin bulunmaması kısıttır. Bu soruna yol açan temel sebeplerden biri kullanıcıların yazılım

konusundaki eğitim eksikliğinden kaynaklanabilir.

2.DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Mevcut iş sürecinin keşfi yapılırken süreç madenciliği aracılığıyla mevcut iş süreci keşfedilmiştir. Hedefleniş süreci uzman görüşü alınarak belirlenmiştir. İhtiyaç analizi yöntemiyle yazılım gereksinimleri belirlenmiştir.

2.1 Mevcut İş Sürecinin Keşfedilmesi ve Analizi

Verilerin toplanması, hizmet abonelik süreci işlemleri yürütülen bir programdan türetilerek elde edilmiştir. Hizmet abonelik süreci log verileri 2015-2022 yıllarını kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Elde edilen log verileri xls formatında saklanmıştır. Elde edilen log verileri “Disco [11]”, programında değerlendirilmek üzere aktarılmıştır. Disco programı 3.3.7 versiyonu kullanılmıştır. Veriler xls formatında üretilerek veri toplama adımı tamamlanmıştır. Bu aşamadan sonra verilerin kontrol edilmesi ve ön işleme aşamasından geçirilmesi gerekmektedir.

Veri işleme: Veri işleme aşaması veri seti ile süreç madenciliği algoritmalarından en temel süreç modelleme tekniklerinden Alfa algoritması yaklaşımı kullanılmıştır.

“Süreç madenciliğinde asıl amaç aşağıdaki gibi sürecin özelliklerine verdiği cevaplardır. Hali hazırda bulunan süreç;

- Gerçek süreç nasıl görünüyor?

- Gerçek süreç nasıl gerçekleştirilir?
- Gerçek süreç, politikalarımıza ve yönergelerimize uygun mudur?
- Müşteriye nereden değer katıyoruz?
- Önemli varyasyonlarımız var mı?
- Önemli miktarda israf var mı?

Sorularına verdiği cevaplarla sürecin gerçekliği ve doğruluğu tespit edilecektir [9].”

Hizmet abonelik sürecinde türetilen veriler 2015-2022 yılları arasındaki Taslak Abonelik Kaydet aktivitesi ile başlayan ve veri girişi ile elde edilen loglardan oluşmaktadır. Ms excel formatındaki veriler Disco programına import edilmiştir. Veri seti Tablo 1’de gösterilmiştir. Veri seti Vaka, İşlem, Zaman, Kullanıcı, Birim, Ürün alanlarından oluşmaktadır. Vaka alanı vaka numarasından oluşur. İşlem alanı Hizmet abonelik süreci işlem adlarından meydana gelmektedir. İşlem zamanı, işlemin gerçekleşme zamanıdır. Kullanıcı bilgisi, işlem yapan kullanıcı bilgisidir. Birim, kullanıcıların bağlı olduğu birimlerdir. Ürün bilgisi aboneliği yapılan ürün veya hizmet bilgisidir. Veriler maskelenmiş bir şekilde değiştirilmiştir.

Veriler süreç madenciliği programı olan Disco programına import edilirken Şekil 4’teki ekran oluşmaktadır. Veriler Disco içerisine import edilirken; VAKA alanını Case ID, İŞLEM alanını Activity, ZAMAN alanını Timestamp, KULLANICI alanını Resource, BİRİM ve ÜRÜN alanını Other olarak yapılandırılmıştır.

Excel dosyası Disco programı içerisine aktarıldığında ekrandaki görüntü Şekil 4’teki

Tablo 1: Hizmet abonelik süreci log verileri excel tablo görüntüsü.

VAKA	İŞLEM	ZAMAN	KULLANICI	BİRİM	ÜRÜN
1	Taslak Abonelik Kaydet	2015-10-10 15:03:33.000	A4	Uygulama Destek	I4
2	Abonelik Kaydet	2016-04-28 11:23:06.000	A69	Müşteri İlişkileri	T1

gibidir. Bu görüntüde sütunları kullanıcı isteğine göre yapılandırmak mümkündür. Verilerin programa atılması ve içerisinde

bulunan MAP sekmesinin tıklanması ile Şekil 5'te iş akışının haritası görülebilmektedir.

VAKA	İŞLEM	ZAMAN	KULLANICI	BİRİM	ÜRÜN	
1	13185	Taslak Abonelik Kaydet	2015-10-10 15:03:33.000	A4	Uygulama Destek	I4
2	13186	Taslak Abonelik Kaydet	2015-10-10 17:36:04.000	A4	Uygulama Destek	I4
3	13187	Taslak Abonelik Kaydet	2015-10-11 09:51:41.000	A4	Uygulama Destek	I4
4	13301	Taslak Abonelik Kaydet	2015-11-17 16:34:02.000	A2	Müşteri İlişkileri	I4
5	13305	Taslak Abonelik Kaydet	2015-11-28 11:53:36.000	A4	Uygulama Destek	I10
6	13397	Taslak Abonelik Kaydet	2015-12-16 10:11:17.000	A4	Uygulama Destek	I4
7	13571	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-18 15:59:07.000	A72	Müşteri İlişkileri	I2
8	13584	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-20 15:38:41.000	A68	Uygulama Destek	I10
9	13585	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-20 15:44:40.000	A10	Müşteri İlişkileri	I10
10	13586	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-20 15:47:51.000	A10	Müşteri İlişkileri	I7
11	13587	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-20 15:49:29.000	A10	Müşteri İlişkileri	I10
12	13588	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-20 15:50:35.000	A10	Müşteri İlişkileri	I10
13	13589	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-20 15:58:14.000	A10	Müşteri İlişkileri	I10
14	13590	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-20 16:02:35.000	A10	Müşteri İlişkileri	I10
15	13593	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-23 16:46:51.000	A75	Müşteri İlişkileri	I2
16	13594	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-23 17:18:27.000	A10	Müşteri İlişkileri	I2
17	13595	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-23 18:31:53.000	A75	Müşteri İlişkileri	I10
18	13596	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-23 18:43:05.000	A75	Müşteri İlişkileri	I10
19	13601	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-27 15:47:41.000	A10	Müşteri İlişkileri	I2
20	13602	Taslak Abonelik Kaydet	2015-01-27 16:49:59.000	A17	Müşteri İlişkileri	I2

Şekil 4: Disco programına alınan verilerin ekran görüntüsü.

Şekil 5 incelendiğinde aktivite durumu %100 olduğunda mükemmel süreç ortaya çıktığını göstermektedir. İşletilen sürecin mükemmel süreç olduğu görülmektedir. Mükemmel süreç elde edildiğinden süreçte gereksiz faaliyet olmadığı söylenebilir. Süreçteki tüm işlemlerin gerekli olduğu söylenebilmektedir. Süreçte Abonelik Pasif Et işleminden sonra Abonelik Aktif Et işlemi arasında döngü olduğu

görülmektedir. Bu işlemler tekrarlanabilmektedir.

13 aktivite üzerinden akan 28326 vaka 69484 olay oluştuğu gözlemlenmektedir. Süreç analiz edildiğinde Taslak Abonelik Kaydet işleminden sonra Ödeme Bilgisi Değiştir, Abonelik Kaydet, Abonelik Reddet, Hatalı Kayıt işlemleri arasındaki sürelerde fazla bekleme olduğu görülmektedir

2.3 İhtiyaç Analizi Yöntemiyle Gereksinimleri Belirleme

Abonelik süreci, süreç madenciliği yöntemiyle keşfedilen (bkz. Şekil5) Hizmet abonelik süreci mevcut iş akışı ile uzman görüşü alınarak belirlenen Şekil 6'daki Hizmet abonelik süreci hedeflenen iş süreç akışı karşılaştırılmıştır. İhtiyaç analizi yöntemiyle aşağıdaki gereksinimler belirlenmiştir.

Gereksinimler;

- Gereksinim1: Taslak Abonelik Güncelleme İşlem Hareketlerini Kaydetme
- Gereksinim2: İşlem Bildirimlerini Gönderme
- Gereksinim3: Kullanıcı Kılavuzlarını Ekranlara Kısayol Olarak Ekleme

2.3.1 Gereksinim1: Taslak Abonelik Güncelleme İşlem Hareketlerini Kaydetme

Mevcut süreçte Taslak Abonelik Güncelleme işlemi yapıldığı varsayılmıştır. Yapılan işlemlerin log kayıtlarının tutulması gerektiği talep olarak önerilmektedir.

2.3.2 Gereksinim2: İşlem Bildirimlerini Gönderme

Yapılan işlemlerden sonra bildirim gönderilmesi önerilmiştir. Abonelik Kaydet, Abonelik Reddet, Abonelik Değiştir, Sözleşme Değiştir, Abonelik Bilgisi Değiştir, Ödeme Bilgisi Değiştir, Ek Abonelik Tanımla, Abonelik Pasif Et, Abonelik İptal Et, Abonelik Aktif Et işlemlerinden sonra yapılan işlemlerin

kullanıcıya bilgilendirme maili olarak iletilmesi önerilmiştir.

2.3.3 Gereksinim3: Kullanıcı Kılavuzlarını Ekranlara Kısayol Olarak Ekleme

Kullanıcı tarafından yapılan işlemlerin destek alınmadan yapılması ve kullanıcıların işlerini standart bir şekilde yapabilmeleri için işlem yapılan ekranlara kullanıcı kılavuzu kısayolu konulması önerilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Hizmet Abonelik Süreci olay logları Disco programına aktarılarak mevcut iş süreci keşfedilmiştir. Varsayımlara dayalı olarak değil kullanıcı verilerine dayalı gerçek iş süreci ortaya çıkarılmıştır. Mevcut iş sürecinde darboğazlar yani fazla bekleme sürelerine sahip işlem adımları belirlenmiştir.

Hedeflenen iş süreci uzman görüşü alınarak belirlenmiştir. Hizmet abonelik süreci hedeflenen iş süreç akışı belirlenmiştir. Süreç madenciliğinde süreçlerin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Hedeflenen iş süreci iyileştirilmiş iş sürecidir. Süreç madenciliğinde organizasyonel süreçlerde iyileştirme yapıldıktan sonra kullanılan yazılımın geliştirilmesi için gereksinimler ortaya çıkarılmıştır.

İhtiyaç analizi yöntemiyle gereksinimler ortaya çıkarılmıştır. Ortaya çıkarılan gereksinimler; Gereksinim1: Taslak Abonelik Güncelleme İşlem Hareketlerini Kaydetme, Gereksinim2: İşlem Bildirimlerini Gönderme, Gereksinim3:

Kullanıcı Kılavuzlarını Ekranlara Kısayol Olarak Ekleme'dir.

Daha önce bahsedilen literatürde yapılan çalışmada mevcut iş süreçleri keşfedildikten sonra analiz sürecinde belirlenen iş süreci ile karşılaştırma yapılmıştır [9].” Bu çalışmada hedeflenen iş süreç modeli ile karşılaştırılması açısından farklılık göstermektedir.

Daha önce bahsedilen literatürde yapılan çalışmada “gereksinimleri ortaya çıkarmada GoCC yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemle hedeflenen iş süreç modeliyle log verilerinin uygunluk kontrolü yapılarak, tespit edilen sapmalardan gereksinimlerin ortaya çıkarılabileceği öne sürülmüştür [8].” Bu çalışmada hedeflenen iş süreçlerinin uzman görüşü alınarak belirlenmesi, süreç madenciliği yöntemiyle mevcut iş süreçlerinin keşfedilmesi ve sonrasında ihtiyaç analizi yöntemiyle boşluklar belirlenerek gereksinimlerin ortaya çıkarılması açısından farklılık göstermektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Süreç Madenciliğinin 3 farklı amacı süreç keşfi, süreç uygunluk kontrolü ve süreç geliştirmedir. Gerçek süreçleri keşfetmede süreç madenciliği kullanılmaktadır. Süreç keşif tekniğinde, bir olay günlüğü alınır ve bir model üretilir. Süreç madenciliğinin başlangıç noktası olay logudur.

İhtiyaç analizi, mevcut ve istenen durumlar arasındaki farkları keşfetmek ve bu farklılıkları veya 'boşlukları' analiz ederek iş değişikliği fırsatlarını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. İhtiyaç analizi mevcut durum ile hedeflenen durum arasındaki farkların

belirlenmesi ile yapılmaktadır. İhtiyaç analizi yöntemiyle gereksinimler ortaya çıkarılmaktadır.

Literatüre gereksinimleri ortaya çıkarma aşamasında süreç madenciliği yönteminden faydalanılması ve uygulamalı olarak gösterilmesi açısından faydalı bir çalışma olmuştur.

Gereksinim Mühendisliğinde gereksinimleri ortaya çıkarma aşamasında kullanıcı log verilerinden faydalanılarak süreç madenciliği yöntemiyle mevcut iş sürecinin ortaya çıkarılması farklı bir yaklaşım olmuştur.

İlerleyen çalışmalarda farklı iş süreçlerinde süreç madenciliği ve ihtiyaç analizi yöntemlerinden faydalanılarak gereksinimleri ortaya çıkarma çalışması yapılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT)

Bahar ÖZYÖRÜK: Kavramsal tasarım, Yazma, Metodoloji, Deneysel Çalışmalar

Özge TAHMAZOĞLU: Kavramsal tasarım, Yazma, Metodoloji, Deneysel Çalışmalar

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

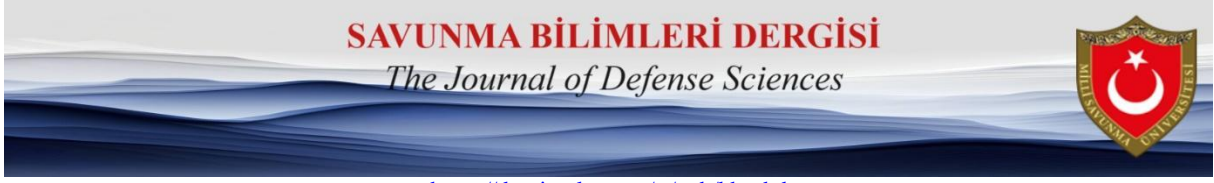
Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] W. Van Der Aalst, *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Springer (in English), 2011.
- [2] W. Aalst *et al.*, "Process Mining Manifesto," presented at the Business Process Management Workshops, 2011.
- [3] U. Çelik and E. Akçetin, "Process Mining Tools Comparison," (in English), *Online Academic Journal of Information Technology*, vol. 9, 2018, doi: 10.5824/1309-1581.2018.4.007.x.
- [4] C. S. Garcia *et al.*, "Process mining techniques and applications – A systematic mapping study," *Expert Systems With Applications*, pp. 260-295, 2019.
- [5] D. Paul, J. Cadle, and D. Yeates, *Business Analysis*, 3 ed. United Kingdom: BCS Learning & Developed Limited (in English), 2014.
- [6] D. Paul, P. Turner, J. Cadle, J. Hunsley, and D. Beckham, *Business Analysis Techniques: 123 essential tools for success*, 2 ed. BCS Learning & Development Limited (in English), 2021.
- [7] M. Ghasemi, "What Requirements Engineering can Learn from Process Mining," (in English), *2018 1st International Workshop on Learning from Other Disciplines for Requirements Engineering (D4re 2018)*, Proceedings Paper pp. 8-11, 2018, doi: 10.1109/d4re.2018.00008.
- [8] M. Ghasemi, "Towards Goal-oriented Process Mining," in *26th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE)*, Banff Ctr Arts & Creativ, Banff, CANADA, Aug 20-24 2018, LOS ALAMITOS: Ieee Computer Soc, in International Requirements Engineering Conference, 2018, pp. 484-489, doi: 10.1109/re.2018.00066. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000576671200057
- [9] B. G. Köse, "İşletmelerde süreç madenciliği tekniği kullanılarak isy sistematiğinin yazılım destekli bir sektörel uygulaması örneği – inşaat sektörü," Endüstri Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, 2017.

[10] B. Özyörük and Ö. Tahmazoğlu, "Süreç Madenciliği ve Gereksinim İle İlgili Bibliyometrik Analiz," in *8. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, 2022: Güven Plus Grup A.Ş.

[11] "Fluxicon." <https://fluxicon.com/disco/> (accessed 16.12.2022, 2022).



<https://dergipark.org.tr/pub/khosbd>

Savunma Sanayii Uygulamalarında Göz Önüne Alınan Başlıca İtki Vektörü Denetimi Yöntemlerinin İncelenmesi

Investigation of the Notable Thrust Vector Control Approaches Considered in Defense Industries Applications

Bülent ÖZKAN^{1,*}

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 03.10.2022
Düzeltilme: 06.02.2023
Kabul: 27.02.2024

Keywords

Thrust vector control
Munition control
Control
Thrust
Maneuver

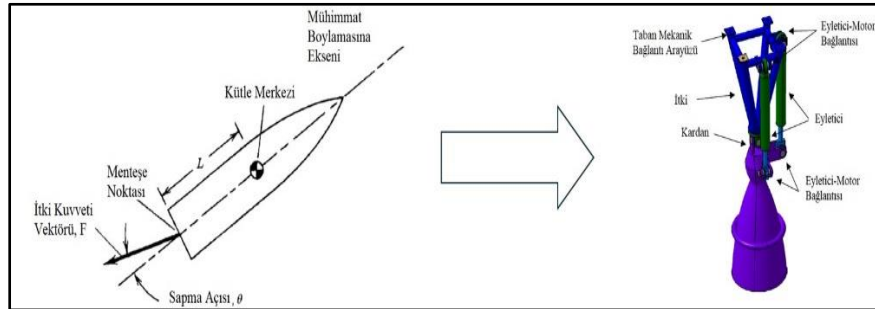
Anahtar Kelimeler

İtki vektörü denetimi
Mühimmat denetimi
Denetim
İtki
Manevra

Önemli Noktalar / Highlights

Hava araçlarının denetiminde uygulanan yaklaşımlardan biri olan itki vektörü denetimi (İVD) tekniğinde, alternatifleri olan kanat veya kanatçık kullanımlı aerodinamik denetim ve tepki jeti denetimi yöntemlerinden farklı olarak, özellikle yerden fırlatılan ve kısa zaman zarfı içerisinde kısa süreli ivmelenme gereksinimi doğuran değişken genlik ve yönlü manevra isterlerinin karşılanması mümkün olmaktadır. Ayrıca, ilk uçuş yörüngesinin hızla düzeltilmesi gereken ve yüksek hedef bulma hızı istenilen yerden havaya roketler ile aerodinamik denetimin imkânsız olduğu düşük dinamik basınç altında uçan fırlatma sistemleri ve uzay araçlarının yönlendirilmesinde de İVD yaklaşımı dikkate alınmaktadır.

Grafiksel Özet / Graphical Abstract



Özet

Son yıllarda, özellikle geniş alana saldırı kavramının yerini nokta hedef tahribatının alması sonucunda denetimli mühimmat kullanımı daha popüler hale gelmiştir. Menzil, uçuş süresi ve hedefte doğruluk gibi başarımlar parametrelerinin iyileştirilmesi doğrultusunda, aerodinamik denetim yüzeyleri, tepki jeti ve itki vektörü gibi yönlendirme mekanizmaları, mühimmat denetimi kapsamında gerek teorik gerekse pratik olarak geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bahsedilen yöntemler bir arada değerlendirildiğinde, itki vektörü denetiminin, aerodinamik denetim yüzeylerinin sebep olduğu daha geniş sürüklenme yüzeyi ve düşük manevra kabiliyeti olumsuzluklarına sahip olmaması, ayrıca tepki jeti yaklaşımına nazaran denetlenebilirliğinin daha yüksek olması nedeniyle, bilhassa kısa zaman zarfında yüksek manevra yeteneğinin istendiği uygulamalar için bir adım öne çıktığı görülmektedir. Bu çalışmada, mühimmat denetiminde ele alınan başlıca itki vektörü denetimi yaklaşımlarından bahsedilmekte ve belirtilen yöntemlerin üstünlük ve zayıflıkları karşılaştırmalı olarak vurgulanmaktadır.

Abstract

Recently, especially the change in the defense concept from the mass destruction to the point demolition has made the use of the controlled munition more popular. In accordance with the improvement in the performance parameters including the range, time of flight, and accuracy in target, the diverting mechanisms involving the aerodynamic control surfaces, reaction jet, and thrust vector have found a wide area of usage in both theoretical and practical senses. Evaluating all of the mentioned methods together, it is observed that the thrust vector control exceeds one step further regarding the implementations in which higher maneuver capability is required within short time durations because it does not have any serious disadvantages originated from the larger drag areas of aerodynamic control surfaces and lower maneuverability. In this study, notable approaches are handled within the concept of the thrust vector control and the advantages and disadvantages of the mentioned methods are emphasized in a comparative manner.

*Corresponding author, e-mail: bozkan@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karşı tarafa mümkün olduğunca fazla zarar verebilme düşüncesine dayanan ve alan tahribatını esas alan roket ve bomba gibi klasik mühimmatın yerini alan güdümlü mühimmatlar, önceden belirlenen hedefleri noktasal olarak imha edebilme yetenekleri sayesinde son dönemde oldukça geniş kullanım alanı bulmuştur. Genel anlamda füzeler ve akıllı bombalar olarak sınıflandırılan güdümlü mühimmatlar, önceden belirlenen bir güdüm yaklaşımıyla uyumlu olarak tasarlanan mühimmat denetim (kontrol) sistemi (otopilot) ve kullanılan algılayıcılar vasıtasıyla, istenen hedeflere yüksek doğrulukla tevcih edilebilmektedir. Belirtilen kapsamda, seçilen güdüm ve denetim yönteminin etkinliği ilgili mühimmatın başarımını da doğrudan etkilemektedir [1].

Mühimmat denetimi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, aerodinamik denetim, tepki jeti denetimi ve itki vektörü ile denetim olarak adlandırılan temelde üç farklı yönlendirme mekanizmasına rastlanmaktadır [1]. Gezegen ve uydular gibi gök cisimleri üzerine uzay araçlarının yumuşak ve denetimli bir şekilde indirilmeye çalışıldığı atmosfer dışı platform yönlendirme uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan tepki jeti denetiminin yanında genellikle seyir şeklinde olan uzun atmosfer içi uçuş durumlarında aerodinamik denetim yaklaşımı tercih edilmektedir [2-4]. Diğer taraftan, özellikle yerden fırlatılan ve kısa zaman zarfı içerisinde değişken genlik ve yönlü manevra isterlerinin karşılanmasının söz konusu olduğu mühimmatta itki vektörü

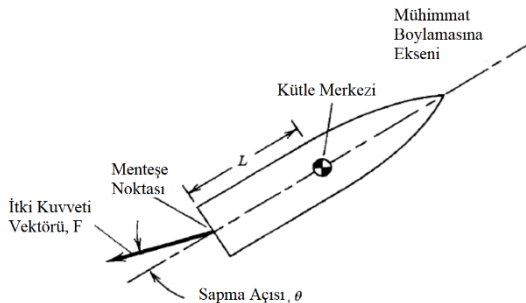
denetimi (İVD) yönteminin ele alındığı görülmektedir [4]. Bilhassa hava araçlarının hız vektörlerinin çok kısa süre içerisinde değiştirilmesinin gerektiği keskin manevralar, mühimmat itkisinin gövde eksenine etrafında farklı yönlerde döndürülebildiği değişken yönelimli İVD tekniğini en uygun seçenek haline getirmektedir [5,6]. İVD yaklaşımının göz önünde bulundurulmuş durumlar için uygulanabilirlik düzeyinin belirlenebilmesi amacıyla, deneysel çalışmaların yanında hesaplamalı akışkanlar dinamiği esaslı çözümler de farklı işletim durumları için yapılmıştır [7]. Belirtilen kapsamda, yüksek manevra yeteneği gerektiren, elden fırlatılan tanksavar silahları gibi aerodinamik denetimi zor olan, dik fırlatılabilecek ve fırlatıldıktan sonra ani manevralar yapabilen ve denizaltıdan fırlatılan roketler, İVD yaklaşımının hayat bulduğu başlıca uygulamalar olarak gösterilebilir. Ayrıca, ilk uçuş yörüngesinin hızla düzeltilmesi gereken ve yüksek hedef bulma hızı istenilen yerden havaya roketler ile aerodinamik denetimin imkânsız olduğu düşük dinamik basınç altında uçan fırlatma sistemleri ve uzay araçlarının yönlendirilmesinde de İVD yaklaşımı dikkate alınmaktadır [4]. Aerodinamik denetimde kullanılan denetim yüzeylerinin (kanat ve kanatçıkların) mühimmata getireceği ek sürüklenme kuvveti etkisi ile tepki jeti kullanılarak denetiminin doğasından kaynaklanan düşük denetim hassasiyetinin neden olacağı olumsuzlukları haiz olmaması, bahsedilen kısa süreli ivmelenme durumları için İVD'yi daha uygulanabilir kılmaktadır. Atmosfer dışı uçuşlarda aerodinamik yüzeylerin işe

yaramaması da İVD'nin popülaritesini artırmıştır. Bu bağlamda, İVD sistemini oluşturan alt sistem ve bileşenlerin tasarlanıp üretilmesi hususu, milli teknoloji geliştirme faaliyetleri bakımından da önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, İVD yaklaşımının temel prensibi anlatıldıktan sonra belirtilen kapsamda ele alınan başlıca tekniklerden bahsedilmektedir. Ardından, incelenen yöntemler dahilinde göz önüne alınmış olan denetim yaklaşımları da ana hatlarıyla anlatılmaktadır. Ele alınan yöntemlerin üstünlük ve zayıflıklarının sıralanmasının ardından bu hususlar üzerinden genel bir karşılaştırma yapılmakta ve nihayetinde genel bir değerlendirme sunulmaktadır.

2. BAŞLICA İTKİ VEKTÖRÜ DENETİMİ YAKLAŞIMLARI (NOTEABLE THRUST VECTOR CONTROL APPROACHES)

İVD yöntemi, Şekil 1 ile gösterildiği gibi, ana itki vektörü yönünün mühimmat kütle merkezinden geçmeyecek şekilde saptırılması ve bu şekilde kütle merkezi etrafında manevrayı sağlayacak bir moment oluşturulması esasına dayanmaktadır [5].



Şekil 1: İtki vektörünün oluşturduğu döndürme momenti [4].

Temelde, yönlendirilecek itkili platformun gaz çıkış kısmı olan lülenin hareketli ve sabit olması

durumlarından birisi göz önüne alınarak kurgulanan İVD, genel olarak dört ana yaklaşımdan biri esas alınarak uygulanmaktadır [4,8]:

- i. Motor çıkış gazlarının hareketli lüleler ile yönlendirilmesi: Bu yaklaşımda hareketli gaz çıkış lülesindeki hareket, esnek eklem, kardan, bilya yuva ya da menteşe yardımıyla elde edilmektedir.
- ii. Motor çıkış gazlarının mekanik yönlendiricilerle saptırılması: Bu yöntemde yönlendirme jet kanadı, jet saptırıcı veya jetavator gibi mekanik saptırıcılar kullanılarak hareketsiz lüledeki akışa müdahale etmek suretiyle sağlanmaktadır.
- iii. Gaz çıkış lülesi iç basınç dağılımının değiştirilerek yönlendirmenin sağlanması: Bu teknikte itki, ikincil bir akışkan lüle içine püskürtülmek suretiyle lüle iç basıncının değiştirilmesiyle elde edilmektedir. İkincil akışkan sıvı ya da gaz olabilmektedir.
- iv. Ana akıştan farklı olarak ayrı bir itki üreten araç kullanılması (tepki denetimi): Belirtilen yaklaşımı haiz sistemler, genellikle uydu ve uzay araçların yörüngeye yerleştirilmesi veya uzaydaki bir unsura (gezegen veya kuyruklu yıldız gibi) indirilmesi gibi oldukça özel uygulamalarda tercih edilmektedir.

2.1 Hareketli Lüle Yöntemi

Hareketli lüle yönteminin kullanıldığı sistemler, her ne kadar üretim sıkıntıları ve işlevsel hatalar görülse bile, başarımlar açısından oldukça iyi

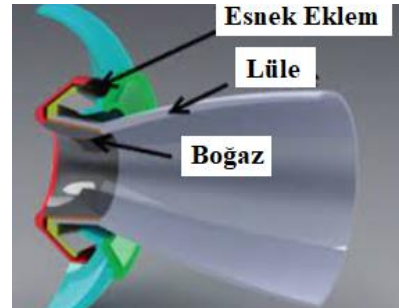
durumdadır. Genel anlamda, hareketli lüle sistemlerinin tamamı çoklu lüle uygulamaları ile kısıtlandırılmıştır. Bunun sebebi, tek başlarına uygulanmaları durumunda, lülenin hareketinden dolayı meydana gelecek yandönme, yunuslama ve yuvarlanma düzlemlerinde maruz kalınacak kuvvet ve moment bileşenlerini etkili bir şekilde denetleyebilmektir. 1974 yılında yayınlanan NASA-SP-8114 numaralı teknik raporda, belirtilen hareketli lüle sistemlerinden sadece esnek eklemli (İng. flexible joint) lüle sistemi ile döner lüle sisteminin kullanımda olup diğerlerinin yalnızca statik ateşleme testine tabi tutulduğundan ve döner lüle sisteminin yalnızca çoklu lüleli motorlar için sınırlandırıldığından bahsedilmektedir. Bu sebeple NASA-SP-8114 numaralı belgede, diğer hareketli lüle sistemlerine göre daha az geliştirme sorununa sahip olduğu ve kendini kanıtlamış olduğu için, hareketli lüle sistemlerinden sadece esnek eklemli lüle sistemiyle ilgili tasarım ayrıntıları yer almaktadır [9].

Hareketli lüle yöntemini kullanan başlıca sistemler arasında Ariane 5, Athena 1, ASRM fırlatma roketi itki motoru, Arrow 2 anti-balistik füzesi, Aster 15 karadan havaya füze sistemi, Aster 30 karadan havaya füze sistemi, Conestoga 1620, UGM 27B-Polaris A2, UGM 73-Poseidon, SM-2 IVA itki motoru, Taurus seyir füzesi, VEGA ve Trident 1-C4 sayılabilir. Burada belirtilen hareketli lüleye sahip sistemlerin, temelde uydu fırlatma roketleri, çapları büyük balistik füzeler ve hava savunma sistemleri olduğu görülmektedir. Hava savunma sistemlerinde kullanılan hareketli lüleler esas füzeden ziyade itki motoru (İng. booster)

kısımında yer almakla beraber, belli irtifadan sonra İVD sistemi esas füzeden ayrılmaktadır. Hava-hava füzeleri açısından bakıldığında, roketlerdeki çaplarının oldukça büyük olduğu bilinmektedir.

2.1.1 Esnek Eklem

Esnek eklem yönteminde lüle, motora elastik bir bağlantı ile bağlanmaktadır. Esnek eklem, elastomer ve kuvvetlendirici dilimlerin birbirine ve ayrıca ön ve arka halkalara yapııştırılması ile oluşan katmanlı bir yapıya sahiptir. Esnek eklem içeren İVD sistemleri her ne kadar günümüzde büyük stratejik ve çok büyük uydu fırlatma sistemlerinde kullanılsa da 5 ila 15° aralığında vektör açısı gerektiren taktik sistemlerde de hızla uygulanmaya başlanmıştır. Bahsedilen sistemler, kullanılan yataklama malzemesi ve teknolojisi dolayısıyla oldukça karmaşık yapılardır. Şematik çizimi Şekil 2 ile verilen eklem esnekliğini sağlayan elastomer ve sağlamlaştırıcı metal (veya kompozit) katmanlar genellikle küresel kesitli olup yarıçap merkezleri aynıdır. Genel uygulama küresel kesit kullanarak olsa da konik kesitli esnek eklem geometrileri de mevcuttur [4].



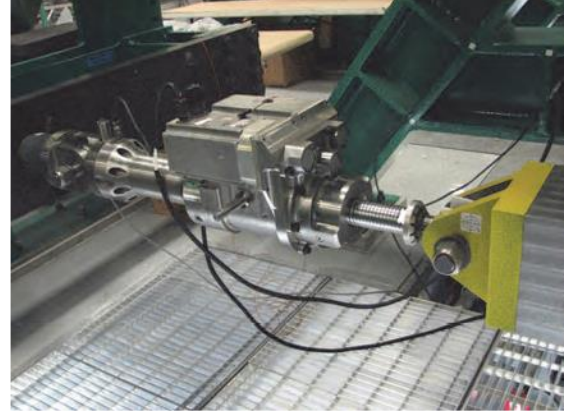
Şekil 2: Esnek eklem yapısı [10].

Esnek eklem bir ucu sabit diğeri ise hareketli parçaya bağlıdır. Yapı aksenal simetrik olduğu

için her yöne doğru saptırılabilir. Herhangi bir yöne doğru belli bir açıyla saptırıldığında elastomer katmanlar kayma deformasyonuna uğramakta ve sağlamlaştırıcı katmanlar toplam vektör açısının belli bir oranı kadar dönmektedir. Dönme hareketi etkin dönme noktasının etrafında gerçekleşmekte ve bu nokta çoğunlukla elastomer katmanlarının farklı kayma deformasyonlarından ötürü geometrik dönme noktasıyla çakışmamaktadır. Esnek eklemlerden, saptırmanın yanında sızdırmazlık sağlamaları da beklenmektedir. Bu durum esnek eklemin sıcak yanma gazlarından korunmasını gerektirmektedir. Esnek eklemler, kendi üzerlerindeki aksel basıncı motor çalışma basıncından daha fazla olacak şekilde tasarlanmaktadır [4].

Anılan geometride, gövdeye esnek eklemlerle bağlanan hareketli lülenin birbirine dik yandönme ve yunuslama düzlemlerindeki açısal hareketleri, Şekil 3 ile gösterildiği şekilde, genellikle elektrik motoru içeren elektromekanik eyleticiler vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bahsedilen eyleticilerin, çoğunlukla fırçasız doğru akım elektrik motoru tipinde olduğu görülmektedir [11,12]. TÜBİTAK SAGE, ROKETSAN ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi tarafından ortak olarak yürütülen bir proje kapsamında, elektrik motorlu eyleticiler içeren esnek eklemlerli bir İVD sistemi geliştirilmiştir.

İç ve dış kaynaklı bozucu girdilerin olumsuz etkilerini asgari düzeye çekerek beklenen açısal konum değerlerine ulaşabilmek amacıyla, belirtilen elektromekanik eyletim birimlerinin denetiminde klasik ve gürbüz esaslı denetim yöntemleri tercih edilmektedir [2,11,13].

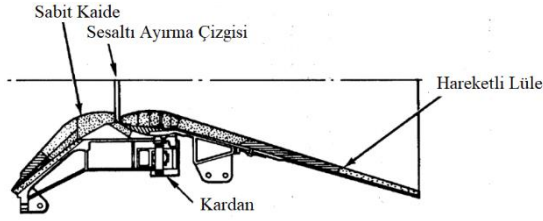


Şekil 3: Elektromekanik lüle eyleticisi [11].

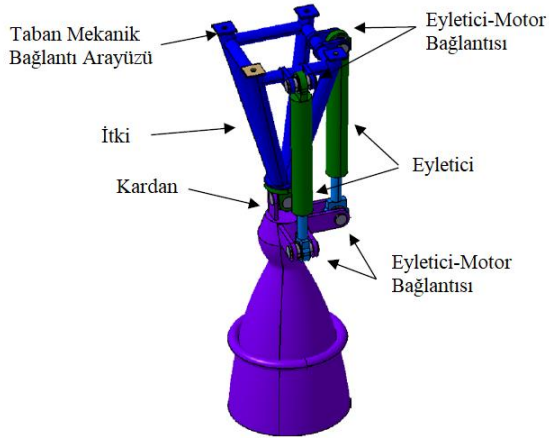
2.1.2 Kardanlı Lüle

Şematik görünüşü Şekil 4 ile verilen kardanlı lüle konfigürasyonunda lüle, roket motoruna bir kardan (İng. gimbal) aracılığıyla bağlanmaktadır. NASA-SP-8114 numaralı belgede kardanlı lüle yöntemi uygulanarak sadece statik ateşleme yapıldığı, ancak yaklaşımın gerçek bir sistemde denenmediği belirtilmektedir [9]. Kardanlı lüle sisteminde itki kaybı oldukça az olup itki gücü değişkendir. Kardandan kaynaklanan kayma hareketinden dolayı sızdırmazlık önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu anlamda, bu tip sistemlerin güvenilirliği sızdırmazlık kabiliyetlerine bağlıdır. Üretimi oldukça zor olan kardanlı lüveli sistemler, genellikle büyük çaplı roketler için düşünülmektedir [4]. LAPAN RX450 sistemi gibi karadan karaya fırlatılan orta menzilli roketler en fazla rastlanılan kardanlı lüleyi haiz İVD uygulamalarındandır [14]. Bahsedilen büyük çaplı roketler içerisinde, taşıdığı faydalı yükü planlanan belirli bir irtifaya kadar çıkaran kademeli roketler de yer almaktadır [15]. Son dönemde, yeniden kullanılabilir dikey kalkış ve dikey inişli roket platformlarında da Şekil 5 ile verilen kardanlı

lüle esaslı İVD mekanizmalarına rastlanmaktadır [8]. Özellikle gezegen ve uyduların üzerine yumuşak iniş gerçekleştirilmesi istenen uzay araçları ve kapsüllerin İVD ile yönlendirilmesinde göz önüne alınan kardanlı lüle mekanizmalarından, klasik yaklaşımların yanı sıra gürbüz denetim yöntemlerinin kullanımının da öngörüldüğü çalışmalarda bahsedilmektedir [3]. Gelecekte gerçekleştirilmesi öngörülen uzay misyonları kapsamında, kardanlı lüle içeren İVD tekniğinin kullanılması öngörülen uzak gezegen taşıyıcılarından biri de nükleer ısıl roketlerdir [16].



Şekil 4: Kardanlı lüle yapısı.

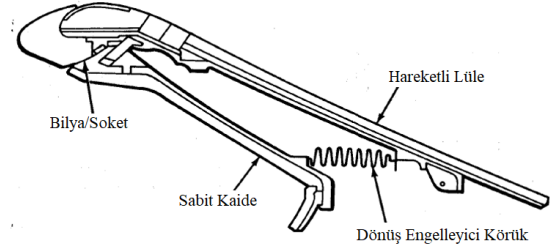


Şekil 5: Dikey kalkış ve dikey inişli roket platformunda kullanılan kardanlı lüle [8].

2.1.3 Bilya-Yuva Tipi Lüle

Görünüşü Şekil 6 ile verilen bilya-yuva yönteminde lüle, motor gövdesine küresel bir

arayüz ile bağlanmaktadır. Belirtilen yaklaşımın gerçek bir sistem üzerindeki uygulamasına rastlanmamıştır. Geliştirilmesi esnek eklem yönteminden sonra kesintiye uğrayan sistemin sadece 9,6 inç (yaklaşık 244 mm) çapındaki lülede bir kez test edildiği kayda geçmiştir [9].



Şekil 6: Bilya-Yuva tipi lüle [9].

2.1.4 Mentşelenmiş Lüle

Bu yöntemde lüle roket motoruna tek bir eksenden bağlanmakta olup diğer yönlerde hareket edebilmesi için bu şekilde düzenlenmiş en az iki adet lülenin kullanılması veya her bir eksen denetimi için sisteme menteşe eklenmesi gerekmektedir. Belirtilen yaklaşım, deneysel olarak sadece düşük hızlarda (İng. low subsonic) statik ateşleme yapılan uygulamalarda ele alınmaktadır [9].

2.2 Sabit Lüle Yöntemi

Sabit lüleli sistemlerde itkinin yönlendirilmesi, lüle hareketi yerine ikincil bir akışkan, lüle dışına yerleştirilmiş hareketli kanatçıklar ya da saptırıcılar kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

2.2.1 İkincil Akışkan Püskürtmeli Sistemler

İkincil akışkan püskürtmeli sistemlerde (İAPS'lerde), ikincil akışkan lüle duvarının bir tarafından verilerek mevcut akış bozulmakta ve böylelikle ilgili itki birimi (roket) yönlendirilmektedir. Bu yöntemde lüle çıkış

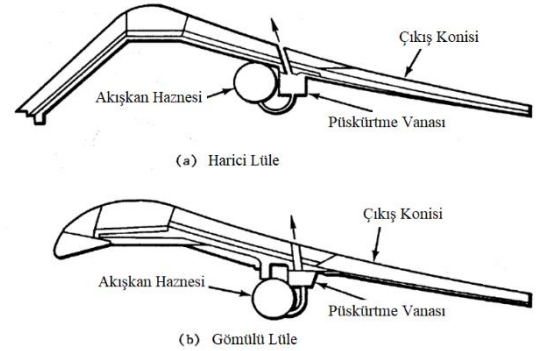
konisi içerisinde geçen akışa çıkış konisi duvarı üzerinden yeni bir akışkanın eklenmesi suretiyle lülenin sesüstü bölgesinde şok dalgaları oluşturulmakta ve bu sayede lüle iç duvarındaki basınç değişiminin simetrisi bozularak püskürtme parametrelerine bağlı bir yan kuvvet elde edilmektedir [4]. Bahsedilen uygulama esnasında, ikincil akışkandan kaynaklı olarak itki biriminin boylamasına eksenine doğrultusunda da ilave bir itki kuvveti ortaya çıkmaktadır [5]. Belirtilen yaklaşım sayesinde uçuş yörüngesine müdahale edilerek uçuş sırasında yörünge düzeltilmesi veya değiştirilmesi sağlanmaktadır. Hareketli parça gerektirmeden ve aksel itki kaybına yol açmaksızın denetim sağlayabildiğinden, İAPS, diğer İVD yöntemlerinden daha güvenilir bir yapıda olup özellikle balistik füze sistemlerinde geniş kullanım alanları mevcuttur [4].

İAPS farklı yaklaşımlarla hayata geçirilmektedir. En kolay uygulama ikincil akışkanın ana motordan sağlandığı durum olup balistik füzeler ve uzay fırlatma sistemlerinde kullanılmaktadır. Uygulamada, püskürtme (enjeksiyon) akışkanı seçimi, püskürtme yeri ve açısının belirlenmesi, orifis çapının ve orifisler arası mesafenin tespiti ile püskürtme sıvısının ve sıvıyı yüksek basınçta tutmak için gereken akışkan miktarının kesinleştirilmesi önemli kriterlerdir. Sistem tasarımında genellikle istenilenleri karşılayacak nitelikteki en hafif ve en küçük konfigürasyon tercih edilmekte olup ikincil akışkan püskürtme sisteminin roket motoruna tümlenmesine de ayrıca dikkat edilmektedir. İAPS elemanlarının yüksek ısıdan korunması için yeterli yalıtımın sağlanması da bir diğer gerekliliktir [4].

İAPS'nin uygulandığı sistemler olarak SHAVIT, ASLV, LGM-30G Minuteman III, SS 24–Scalpel, AGNI-1, Minotaur ve Start sıralanabilir.

2.2.1.1 Sıvı Püskürtmeli Lüle

Bu yöntemde, Şekil 7 ile gösterildiği gibi inert ya da reaktif bir sıvı kullanılmaktadır. Freon-12 ve su, belirtilen kapsamda kullanılan başlıca sıvılardır. Sıvı seçimi, genellikle yöntemin itkiye katkı sağlayıp sağlamayacağı belirlendikten sonra yapılmaktadır. Bahis konusu yaklaşımın üstünlüğü hızlı tepki verebilme kapasitesi ve kullanılan sıvıya göre sisteme itki ekleyebilmesidir. Öte yandan, oldukça ağır olması ve kullanılan vanaların itki vektöründeki değişimle doğrusal bir şekilde değişmemesi, yaklaşımın en önemli zayıflıklarıdır [4].

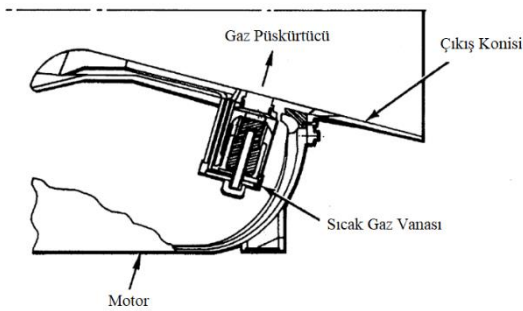


Şekil 7: Sıvı püskürtmeli lüle [9].

2.2.1.2 Gaz Püskürtmeli Lüle

Şematik görüntüsü Şekil 8 ile verilen gaz püskürtmeli lüle yönteminde, adından da anlaşılacağı üzere ikincil akışkan olarak gaz kullanılmakta olup azot bu gazlardan biridir. Temel olarak sıvı püskürtmeye çok benzeyen yöntemin tek farkı dışarıdan besleme yerine

gazın lüenin gerisinden çekilerek genişleyen kısmından lüeye basılmasıdır. Bu yaklaşımın üstünlüğü, ek akışkan ihtiyacı olmadığı için tank gereksiniminin de bulunmamasıdır. Dolayısıyla sıvı püskürtmeli olan sisteme göre daha hafif olan yöntemin en önemli zayıflığı sıcak egzoz gazının taşınması ile ilgili sorunlardır [4]. Bahsedilen zayıflığın da üstesinden gelecek şekilde, belirli inert gazların ikincil akışkan olarak ele alınan lüle üzerindeki farklı noktalardan egzoz gazına sesüstü hızlarda püskürtüldüğü güncel çalışmalara da konuyla ilgili kaynaklarda rastlanmaktadır [5]. Ayrıca, lüle duvarlarının iç yüzeylerinde asimetri oluşturacak şekilde hava püskürtülmesi yoluyla uygulanan şok vektörü denetimi de gaz püskürtmeli lüle yaklaşımının güncel bir uygulaması olarak öne çıkmaktadır [6]. Benzer şekilde, katı roket motorlu sistemlerde sıkıştırılabilir ikincil gaz püskürtülmesi yoluyla İVD yapılan eniyelenmiş (optimal) tasarım çalışmaları da analiz düzeyinde ele alınmıştır [17].



Şekil 8: Gaz püskürtmeli lüle [9].

2.2.2 Mekanik Yönlendiriciler

Ana akışın momentum vektörünün değiştirilmesi prensibine göre görev yapan ve başlıca uygulamaları jet kanadı, jet saptırıcı ve

“jetavator” formunda olan hareketli mekanik yönlendiriciler, tıpkı aerodinamik denetim yüzeyleri gibi lüenin çıkışına konarak roket motorunun ateşlenmesinden sönmeye kadar olan süre boyunca çalışmaktadır [4].

Mekanik yönlendirici kullanan başlıca sistemler AAM-5, AIM-9X Sidewinder, IRIS-T, Kuen-Wu, MICA, AA-11 ‘ARCHER’(R-73, R-74), V3E A-DARTER, ASPIDE Mk1 / 2000 (Mk30), RUM-139 VL-ASROC, SH-08 Gazelle, Vergeltungswaffe-2 (V2), RIM-7, Tomahawk, Evolved Sea Sparrow, Kosmos, Start-1 ve TÜBİTAK SAGE tarafından geliştirilen havadan havaya fırlatılan Bozdoğan sistemleridir.

2.2.2.1 Jet Kanadı

Jet kanadının ilk kullanımı Almanlar’ın V-2 füzesiyle başlamaktadır. Diğer yöntemlere göre en eski yöntem sayılabilecek bu yaklaşımda lüle çıkışına konulan kanatlar sayesinde akışın yönü değiştirilmektedir. Sistem prensip olarak aerodinamik denetimin aynısı olmakla birlikte daha küçük aerofoiller içermektedir. Kanıtlanmış ve pratikteki uygulaması oldukça fazla olan bu yöntem düşük eyletim gücü gereksinimi ve yuvarlanma ekseninde denetime izin vermesi sayesinde diğer tekniklere nazaran göre daha çekici hale gelmiştir. Uygulama sırasında roket gazından kaynaklanan yüksek sıcaklık ve hızlara maruz kaldıkları için, jet kanatlarında kritik konu uygun geometrinin oluşturulması ve malzemenin seçimidir [4].

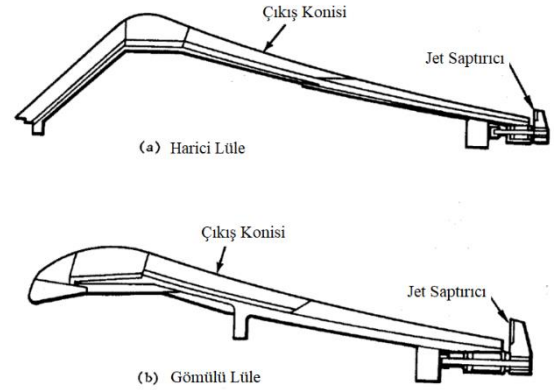
Jet kanadının çalışma şekli, sesüstü hızlarda görev yapan kanatların kaldırma kuvveti oluşturma prensibi ile aynıdır. Jet kanadı egzoz gazlarına karşı belirli bir hücum açısıyla

durduğu zaman, kanadın akışa bakan tarafında oluşan şok dalgası bu yüzeyde basıncı artırırken, arka yüzeyde oluşan genişleme dalgaları da basıncı aynı yüzeyde azaltmaktadır. İki yüzey arasında oluşan basınç farkı da kanada dik bir eksende kuvvet uygulanmasını sağlamaktadır. Bu kuvvetin denetim için faydalı olan bileşeni kaldırma kuvveti, aksenal itkinin azalmasına yol açan bileşeni de sürüklenme kuvveti olarak adlandırılmaktadır. Sürüklenme kuvvetinin kaldırma kuvvetine oranı ne kadar düşük ise, sistemin başarımı o kadar yüksek olur. Burada elde edilen faydalı yükün denetlenmek istenen gövdenin (roketin) kütle merkezi etrafında oluşturduğu moment, istenen hareket denetiminin gerçekleştirilmesine neden olmaktadır [4].

Hareketli lüle sistemlerinin aksine, jet kanadı ve İAPS konfigürasyonları doğrusal sistemler değildir. Bu nedenle, akışa eklenen gaz miktarı veya jet kanadı hücum açısının iki katına çıkarılması durumunda elde edilen yan itki kuvvetindeki artış aynı oranda gerçekleşmemektedir. Bu sebepten dolayı, yapılacak teorik çalışmaların deneysel olarak kanıtlanması ihtiyacı kaçınılmaz olarak belirmektedir [4]. Bahsedilen teorik çalışmalar kapsamında, jet kanadı yapısındaki İVD sistemli lülelerin parametrik incelemesi ve eniyilenmesine dönük hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir [18]. Belirtilen amaç doğrultusunda, jet kanatlı İVD mekanizmalarının verimliliğinin incelenerek itki vektörü yönelim açısı değişimine bağlı olarak eniyilenmiş bileşen boyutlarının belirlenmesine çalışılmıştır [19].

2.2.2.2 Jet Saptırıcı

Görünüşü Şekil 9 ile gösterildiği gibi olan jet saptırıcı yöntemini kullanan sistemlerde, lüle çıkışında kenarlara konulan plakaların döndürülmesi ile akış bozularak yönlendirme sağlanmaktadır. Bu sistemin en önemli özelliği itki yönlendirmesinin kullanılan plakanın alanı ile doğru orantılı olmasıdır. Ayrıca, düşük sürme torku ve paketlenme kolaylığı açısından da faydalı bir yaklaşımdır. Tomahawk füzesinin itki motoru kısmı ve R-73 Archer AA-11 füzeleri en bilinen kullanım alanları olan jet saptırıcı yönteminin jet kanadına kıyasla denenmişliği daha düşüktür [4].



Şekil 9: Jet saptırıcılı İVD sistemi [9].

2.2.2.3 Jetavator

Jetavatorlar, lülenin, dairesel bir halka etrafında, ekseninde bir noktadan kardanla taşınmasıyla oluşmaktadır. Dairesel halkanın hareket ettirilmesi ile gaz akışına yön verilmekte ve denetim sağlanmaktadır. Fakat bu sistemde itki kaybı %10'dan %20'ye kadar varabilmektedir. Öte yandan, jetavator sistemlerinde akışın yönünü 30° açısına kadar değiştirmek mümkün olmaktadır. Bu yöntem Swingfire füzesinde uygulanmakta olup genel

olarak denizaltından altılan füzelerde jetavator kullanımı yaygındır [4].

2.2.2.4 Tepki Denetimi

Tepki denetimi yöntemi, roket motorundan ayrı olarak, gövde üzerinde belirli yerlere konumlanmış küçük eyletim sistemlerinden oluşmaktadır. Belirtilen yaklaşımda sıcak ya da soğuk gaz kullanılabilir. Sıcak gazlı konfigürasyon kullanılması durumunda özel vana ve ateşleyiciler gerekmekte olup soğuk gaz kullanan sistemler görece daha kolay ve daha güvenilir gözükmektedir. Ancak, soğuk gaz kullanan sistemlerde gaz depolamak için tank ihtiyacı bulunmaktadır. Soğuk gazlı tepki denetimi yaklaşımında genellikle azot gazı tercih edilmektedir. Bu kapsamda helyum gazı da bir seçenek oluşturmakta fakat tank hacmi ve kütlelerinden dolayı pek tercih edilmemektedir. Tepki denetimli sistemler, genellikle darbe adımı modülasyonlu (İng. pulse width modulated) sistem yapısındadır [4].

3. GÖZ ÖNÜNE ALINAN BAŞLICA DENETİM YAKLAŞIMLARI (NOTEABLE CONTROL APPROACHES UNDER CONSIDERATION)

İVD üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, başta esnek eklemli ve kardanlı lüleli yapılar olmak üzere özellikle hareketli lüle içeren sistemlerin denetiminde öncelikli olarak geleneksel oransal, tümlevsel ve türevsel (İng. proportional plus integral plus derivative, PID) işlemi esaslı denetim yaklaşımının uygulandığı görülmektedir. En temel kapalı çevrim denetim sistemi yapısı olarak adlandırılabilir PID kurallı algoritma ile, atanan başarımların gereksinimlerinin önemli oranda yerine getirebildiği çeşitli benzetimler

ve deneysel çalışmalar aracılığıyla gösterilmiştir [2,3,11,13]. Bağlı bulunduğu hava platformuna etkileyen rüzgâr etkisi ile platformun doğrusal olmayan modelinde kullanılan parametreler üzerindeki belirsizliğin İVD'nin referans açısı sinyali takibi başarımına olabilecek olumsuz etkisinin asgari düzeye çekilebilmesi amacıyla, kesir dereceli PID (İng. fractional order PID, FPID) yaklaşımı da ilgili bilgisayar benzetimleri yardımıyla incelenmiştir. Akabinde, uçuş esnasında yakıt tüketimi nedeniyle meydana gelen kütle değişimi ve uçuş irtifası ile hızındaki farklılaşmaya bağlı olarak sabit kalmayan aerodinamik katsayıların etkisi de dikkate alınarak, mevcut FPID şeması uyarlamalı hale getirilerek, denetleyici (kontrolcü) kazançlarının belli zaman dilimlerinde güncellendiği katsayı güncellemeli FPID (İng. gain scheduling FPID, GSFPID) kuralı uygulanmıştır. Neticede, GSFPID kurallı denetim sisteminin rüzgâr ve parametre belirsizliğinden olumsuz yönde etkilenme düzeyinin hayli düşük olduğu, ayrıca sistem kararlılığının da klasik PID ve hatta FPID kurallı denetim sistemlerinden daha yüksek çıktığı gözlenmiştir [20]. Literatürde, hareketli lüleli haiz İVD sistemleri için, sürtünmenin doğrusal olmayan karakteristiğini ele alarak sistem cevabındaki faz kaymasını azaltmayı amaçlayan PID kuralı esaslı regülatör sistemlerine de rastlanmaktadır [21]. Bunların yanı sıra, karadan karaya fırlatılan orta menzilli roketler gibi genel maksatlı uygulamalarda, özünde PID kuralının bir türevi olan oransal ve türevsel (İng. proportional plus derivative, PD) işleminin ele alındığı çalışmalar da mevcuttur.

Yapılan bilgisayar benzetimlerinden elde edilen sayısal sonuçlar incelendiğinde, PD işlemlili İVD yaklaşımı sayesinde, küçük denetim komutları ile kardanlı lülede büyük açısall yerdeğıştirmelere ulaşıldığı görülmektedir [14]. İVD içeren konfigürasyonlarda akışkan modellemesi ve parametre belirsizliğinden kaynaklanan etkilerin göz ardı edilemediği durumlarda, H_∞ ve H_2 normu tabanlı veya kayan kipli denetim esaslı gürbüz denetim yaklaşımları ele alınmaktadır. Bahsedilen yaklaşımlar kullanılarak, ele alınan İVD'li platformun referans girdi takip başarımının yanı sıra kararlılığının da artırılması sağlanmaya çalışılmaktadır [2,3,11,13]. Belirtilen çerçevede, kardanlı lüleli İVD mekanizması ile yönlendirilen bir roketin parametre belirsizlikleri ve rüzgâr etkisi altındaki yönelim başarımını artırmak ve aynı zamanda da kararlılığını garanti etmek amacıyla kayan kipli denetim yönteminin kullanıldığı ve yapılan bilgisayar benzetimleri neticesinde önceden tanımlanan amaçlara ulaşıldığının gösterildiği çalışmalara rastlanmaktadır [22].

Tasarlanan güdüm ve denetim şemasının etkinliğini artırmak amacıyla, model öngörülü denetim gibi yöntemlerin esas alındığı eniylenmiş denetim yaklaşımları da İVD kapsamında ele alınmaktadır. Genişletilmiş Kalman Filtresi gibi gözleyicilerle birlikte uygulandığında, bahsedilen eniyileme algoritmalarının özellikle bozucu girdi tesirlerinin asgari seviyeye çekilmesinde etkin olduğu bilgisayar benzetimleri ve testler yardımıyla gösterilmiştir [23]. Çok değışkenli denetim tahsis algoritmaları da İVD eniyilemesi

dahilinde ele alınan hususlar arasında gözükmektedir [24].

Uzay mekiğı ve uydu gibi faydalı yükleri yeryüzü seviyesinden başlayarak önceden belirlenen irtifalara çıkarmak amacıyla kullanılan kademeli roketler, genellikle modüler kademe birimlerinin sıvı yakıtlı olması nedeniyle, büyük ivmeli yükseliş hareketinden kaynaklanan çalkantının yol açtığı bozucu girdilerden fazlaca etkilenmektedir. Bahsedilen birimlerin yönlendirilmesinde kullanılan kardanlı lüle geometrisindeki İVD mekanizmalarında, belirlenen referans takip ve kararlılık gereksinimlerini karşılamak üzere doğrusal olmayan geribeslemeli denetim yönteminin dikkate alındığı görülmektedir. Önerilen şemanın doğrulaması, gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri vasıtasıyla yapılmıştır [15]. Ayrıca, temelde gürbüz bir denetim yaklaşımı olan çok değışkenli geri beslemeli denetim yönteminin, bir önceki tekniğın farklı bir uygulaması olarak iniş roketlerinin İVD sistemlerinde kullanılabilirliğinin incelendiği çalışmalarda göze çarpmaktadır [3].

4. ÇEŞİTLİ İTKİ VEKTÖRÜ DENETİMİ YAKLAŞIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF THE SEVERAL THRUST VECTOR CONTROL APPROACHES)

Uygulama prensiplerinde farklılıklar gözlenmekle birlikte, İVD yöntemlerinin tamamı, Şekil 1 ile gösterildiği gibi temelde ana itki vektörü yön çizgisinin aracın kütle merkezinden geçmeyecek şekilde saptırılması ve böylelikle manevra sağlayacak bir moment oluşturulması esasına dayanmaktadır.

Uygun İVD sisteminin seçiminde göz önüne alınması gereken pek çok faktör vardır. Bunlardan en önemlisi uygulamanın niteliği olup, bu alanda gerçekleştirilen çalışmalar bir dizi tasarım ve uygun İVD yöntemi seçimi kriterlerinin belirlenmesini sağlamıştır. Bu çalışmalar sonucunda, herhangi bir uygulama için uygun İVD sisteminin seçimi sırasında göz önüne alınması gereken tasarım kriterlerinin ilgili mühimmatın yörüngesi, saptırma miktarı, motor balistiği, uçuş süresi ve denetim gereklilikleri olduğu ortaya konulmuştur. Bunların yanı sıra mevcut denetim sisteminin yeterliliği, motor başarımına olan etki, güvenilirlik, geliştirme süresi ve maliyeti, uyarlanabilirlik, bütünleme, kurulum ve bakım gereklilikleri de diğer etmenler olarak belirlenmiştir [25]. Bu bağlamda, uygulamada yaygın olarak karşılaşılan İVD yaklaşımlarının üstünlük ve zayıflıkları, Tablo 1 ile verildiği şekilde karşılaştırılmıştır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Uzay araçları ve mühimmatlar başta olmak üzere kısa süre içerisinde ani manevra ihtiyacını karşılaması beklenen uçan platformlarda tercih edilen İVD yaklaşımı, hareketli ve sabit lüle geometrileri üzerinden uygun denetim kuralının seçimi ile etkin bir şekilde uygulanabilir. Bahsedilen lüle geometrisi ve denetim

yaklaşımının seçiminde, uygulamanın genel özelliklerinin yanı sıra olası İVD yöntemlerinin üstünlük ve zayıflıkları ile belirlenen başarımlar dikkate alınmalıdır. Ayrıca, İVD ile yönlendirilecek sistemin görevini atmosferin içinde veya dışında yapacak olması da tasarım kriterlerinin belirlenmesi bakımından önem arz etmektedir. Bu kapsamda, işlevini atmosfer içerisinde icra edecek şekilde geliştirilen yerden havaya ve havadan havaya itkili mühimmatta (füzelerde) önceki uygulamalarda jet kanadı ve jet saptırıcılar kullanılmakta iken teknolojik gelişmelerle uyumlu olacak şekilde artan manevra ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla esnek eklem ve kardanlı lüle tipindeki İVD sistemlerine geçilmiştir. Atmosfer dışı amaçlar için geliştirilen platformlarda ise küçük girdilerle büyük cevaplar almaya olanak sağlayan tepki denetimi yaklaşımı en fazla tercih edilen teknik olarak göze çarpmaktadır.

İVD esaslı denetim sistemi geliştirilirken, toplam ömür devri maliyetinin yanı sıra ele alınan sistemin kararlılığının garanti edilmesi de tasarım sürecinin en önemli unsurlarından birini oluşturmaktadır. Bahsedilen husus, bilhassa hareketli lüle konfigürasyonlarının göz önüne alındığı uygulamalarda istenen başarımların özelliklerinin karşılanması bakımından önem arz etmektedir.

Tablo 1: Çeşitli İVD sistemlerinin karşılaştırılması [2,4,11,13].

İVD Sistemi	Üstünlük	Zayıflık
Esnek Eklem	<ul style="list-style-type: none"> Karakterizasyon ve uygulama düzeyi gelişmiş, güvenilirliği yüksek Geniş çalışma sıcaklığı aralığı Yüksek sızdırmazlık başarımı İhmal edilebilir Coulomb sürtünmesi Denetim kolaylığı 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek saptırma torqu 15°'den daha büyük vektör açılarında yüksek hacim ihtiyacı Kayan dönme noktası Isıl koruma ihtiyacı Karmaşık ve büyük denetim tahrik sistemi ihtiyacı
Bilya-Yuva	<ul style="list-style-type: none"> Karakterizasyon ve uygulama düzeyinin gelişmiş olması Yüksek güvenilirlik ±20° vektör açısı kapasitesi Düşük hacim Küçük eyletim sistemi ihtiyacı 	<ul style="list-style-type: none"> Sızdırmazlığın sağlanması için sürekli aksenal yük ihtiyacı Eksenal dönmenin sağlanması için karşı dönüş sistemi ihtiyacı Yüksek itki kaybı Tahmin edilemez sürtünme katsayısı Sızdırmazlık problemi Yüksek Coulomb sürtünmesi torqu
Kardanlı Lüle / Menteşelenmiş Lüle	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek sapma açısı Denetim kolaylığı 	<ul style="list-style-type: none"> DeneySEL bir çalışma olması Yüksek aşınma görülmesi Kısıtlı çalışma zamanı Kardanlı bağlantı
İAPS	<ul style="list-style-type: none"> Hızlı tepki kapasitesi Püskürtme itkisinin motor itkisine eklenmesi Fırlatma öncesi denetim ihtiyacının az olması 	<ul style="list-style-type: none"> Azami ±6° vektör açısı kapasitesi Büyük kütle Uygun akışkan seçimi zorluğu Denetim zorluğu
Jet Kanadı	<ul style="list-style-type: none"> Döndürme denetimi ±10° vektör açısı kapasitesi Lüleden bağımsız yerleştirme Düşük tork ihtiyacı Hızlı tepki kapasitesi 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek itki kaybı Düşük sıcaklıklı yakıtı veya kısa yanma süresi olan motorlarla sınırlı olması Nispeten büyük kütle Küçük vektör açısı için büyük kanat dönme açısı ihtiyacı
Jet Saptırıcı	<ul style="list-style-type: none"> Düşük risk ve yüksek gelişmişlik Düşük hacim Hızlı tepki kapasitesi Yatay kuvvetin doğrudan saptırıcı alanının lüle alanına oranıyla orantılı olması 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek itki kaybı Düşük sıcaklıklı yakıtı veya kısa yanma süresi olan motorlarla sınırlı Yüksek tork gereksinimi Nispeten büyük kütle
Jetavator	<ul style="list-style-type: none"> Yanal kuvvetlerin sapma ile beraber doğrusal olarak değişmesi 	<ul style="list-style-type: none"> Gaz çıkış lüle çapına kısıtlama getirmesi Büyük itki kaybı Zamana göre sürekli değişen tork ihtiyacı Oldukça ağır olması Hareketli parça sayısı fazlalığı

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT)

Bülent ÖZKAN: Kavramsal tasarım, araştırma, metodoloji, kaynaklar, görselleştirme, yazma-taslak, yazma-gözden geçirme ve düzenleme.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] B. Özkan, “Dynamic Modeling, Guidance, and Control of Homing Missiles”. Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2005.
- [2] D. Bernacchia, “Design of Thrust Vectoring Attitude Control System for Lunar Lander Flying Testbed”, Bitirme Tezi, Università’ Di Bologna, Bologna, İtalya, 2019.
- [3] A. G. Kamath, “Robust Thrust Vector Control for Precision Rocket-landing”, Yüksek Lisans Tezi, University of California, ABD, 2021.
- [4] G. P. Sutton ve O. Biblarz, “Rocket Propulsion Elements”, New York: John Wiley & Sons, Inc., New York, ABD, 2001.
- [5] J. Jerin, S. R. Subanesh, K. T. R. Aravind, N. Naveen, R. Vignesh, G. B. Krishna ve K. V. R. Sanal, “Numerical Studies on Thrust Vectoring Using Shock İnduced Supersonic Secondary Jet”, International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, cilt. 7, no. 8, 1714-1720, 2013.
- [6] E. Resta, R. Marsilio ve M. Ferlauto, “Thrust Vectoring of a Fixed Axisymmetric Supersonic Nozzle Using the Shock-Vector Control Method”, Fluids, cilt. 441, no. 6, 1-17, 2021. DOI: 10.3390/fluids6120441.
- [7] D. Li ve K. Wu, “Numerical Study on Rod Thrust Vector Control for Physical Applications”, Hindawi International Journal of Aerospace Engineering, no. 2021, 1-15, 2021.
- [8] A. Krammer, L. Blecha, ve M. Lichtenberger, “Fin Actuation, Thrust Vector Control and Landing Leg Mechanisms Design for the RETALT VTVL Launcher”, CEAS Space Journal, cilt. 14, 577-591, 2022. DOI: 10.1007/s12567-021-00421-0.
- [9] “Solid Rocket Thrust Vector Control”, Teknik Rapor, NASA, Virginia, ABD, 1974.
- [10] M. A Ramezani, S. Yousefi ve N. Fouladi, “An Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Geometric Parameters on the Flexible Joint Nonlinear Behavior for Thrust Vector Control”, Institution of Mechanical Engineers Bildirileri, Part G: Journal of Aerospace Engineering, cilt. 233, no. 8, 2772-2782, 2019.
- [11] L. B. Bates ve D. T. Young, “Development Testing of Electric Thrust Vector Control Systems for Manned Launch Vehicle Applications”, 41st Aerospace Mechanisms Symposium Bildirileri, Jet Propulsion Laboratory, ABD, 2012.

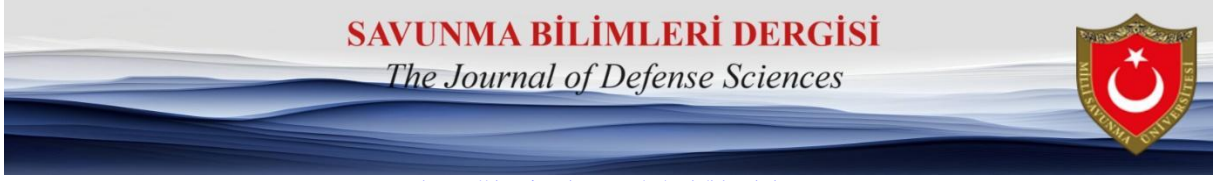
- [12] G. Dée, T. Vanthuyne, A. Potini, I. Pardos ve G. De Crombrughe, “Electromechanical Thrust Vector Control Systems for the Vega-C Launcher”, 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS) Bildirileri, Madrid, İspanya, 2019. DOI: 10.13009/EUCASS2019-186.
- [13] H. Yağmur, C. Bayar, S. Şen, S. ve K. Serbest, “Design of a 3-DOF Thrust Control System for Rocket Engines”, Journal of Smart Systems Research (JOINSSR), cilt. 3, no. 1, 30-48, 2022.
- [14] O. Sudiana ve K. N. Hakim, “Linear Actuator of Thrust Vectoring Control on Solid Rocket Motor on LAPAN Sounding Rocket”, International Conference on Engineering, Construction, Renewable Energy, and Advanced Material 2022 (ICECREAM 2022) Bildirileri, 1-10, Cakarta, Endonezya, 2022.
- [15] J. R. Hervas ve M. Reyhanoğlu, “Thrust Vector Control of an Upper-Stage Rocket with Multiple Propellant Slosh Modes”, Hindawi Mathematical Problems in Engineering, 2012, 1-18, 2012. DOI: 10.1155/2012/848741.
- [16] C. B. F. Ensworth, “Thrust Vector Control for Nuclear Thermal Rockets”, Teknik Rapor, NASA, ABD, 2013.
- [17] V. Emelyanov, M. Yakovchuk ve K. Volkov, “Multiparameter Optimization of Thrust Vector Control with Transverse Injection of a Supersonic Underexpanded Gas Jet into a Convergent Divergent Nozzle”, Energies, cilt. 14, 1-22, 2021. DOI: 10.3390/en14144359.
- [18] D. D. Majil, “Design and Analysis of Jet Vane Thrust Vectoring Nozzle Using CFD and Optimization of Nozzle Parameters”, Indian Journal of Science and Technology, cilt. 9, no. 39, 1-6, 2016. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i39/100778.
- [19] R. Cong, Y. Ye, Z. Zhao, J. Wu ve C. Zhang, “Numerical Research on Jet Tab Thrust Vector Nozzle Aerodynamic Characteristics”, 3rd International Conference on Fluid Mechanics and Industrial Applications Bildirileri, 1-6, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1300/1/012089.
- [20] M. F. Ahmed ve H. T. Dorrah, “Design of Gain Schedule Fractional PID Control for Nonlinear Thrust Vector Control Missile with Uncertainty”, Automatika, cilt. 59, no. 3-4, 357-372, 2018. DOI: 10.1080/00051144.2018.1549696.
- [21] C. Shi, J. Yang ve Z. Xu, “Research on Thrust Vector Control of Nonlinear Solid Rocket Motor Nozzle Based on Active Disturbance Rejection Technology”, MATEC Web of Conferences 309 (CSCNS2019) Bildirileri, 1-9, 2020. DOI: 10.1051/mateccconf/202030904008.
- [22] I. M. Perez, R. G. Rodriguez, M. V. Navarrate ve L. R. Velasco, “Sliding-mode Based Thrust Vector Control for Aircrafts”, 12th International Micro Air Vehicle Conference (IMAV2021) Bildirileri, Puebla, Meksika, 2021.
- [23] R. Linsen, P. Listov, A. Lajarte, R. Schwan ve C. N. Jones, “Optimal Thrust Vector Control of an Electric Small-Scale Rocket Prototype”, 2022 International

Conference on Robotics and Automation
(ICRA) Bildirileri, Philadelphia, Pennsylvania,
ABD, 2022.

DOI: 10.1109/ICRA46639.2022.9811938.

[24] J. S. Orr ve N. J. Slegers, “High-efficiency Thrust Vector Control Allocation”, Faculty Publications-Biomedical, Mechanical, and Civil Engineering, cilt. 20, 1-9, 2014.

[25] A. B. Facciano, K. G. Seybold, L. W.-K. Teri ve D. O. Widmer, “Evolved SeaSparrow Missile Jet Vane Control System Prototype Hardware Development”. Journal of Spacecraft and Rockets, 522-531, 2002.



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Improvement of Quality Performance in Mask Production by Feature Selection and Machine Learning Methods and An Application

Öznitelik Seçimi ve Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Maske Üretiminde Kalite Performansının İyileştirilmesi ve Bir Uygulama

Semra TEBRİZCİK^{1,*} Süleyman ERSÖZ¹ Adnan AKTEPE¹

¹Kırıkkale University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, Kırıkkale 71450, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi

Başvuru: 17.05.2023

Düzeltilme: 13.07.2023

Kabul: 26.07.2023

Keywords

Machine Learning

Feature Selection

Classification

Defective and Defect-Free

Product Prediction

Filters Methods

Anahtar Kelimeler

Makine Öğrenmesi

Öznitelik Seçimi

Sınıflandırma

Hatalı ve Hatasız Ürün

Tahmini

Filtreleme Methodları

Abstract

In this paper, the body production process of the surgical (medical) mask is analyzed. As it is known, surgical masks have become a part of our lives by becoming widespread all over the world with the COVID-19 pandemic. In the surgical mask body production process, using the real data of the production factors, first of all, filtering feature selection methods and analyzes were made and the feature selection method to be used was determined. With the specified feature selection method, the factors affecting the product quality are determined. Secondly, machine learning methods were used to determine the values and value ranges of factors (features) in the production of defect-free products. The performances of the machine learning models established in the second stage were increased by feature selection analysis. In the study, together with the parameter optimizations made to machine learning algorithms, it was seen that the best algorithm to estimate the defective product rate was the Ibk algorithm with 92.3% accuracy, 91.9% F measurement and 93% AUC value. Finally, in line with the decision rules revealed in the study, it was observed that the fabric types used for the upper/middle/lower layers that make up the body part in the mask body production process greatly affect the rates of defective or defect-free products. If the rod apparatus around the nose belongs to class k, it has been determined that many masks are defective. Improvement suggestions were presented according to the application results.

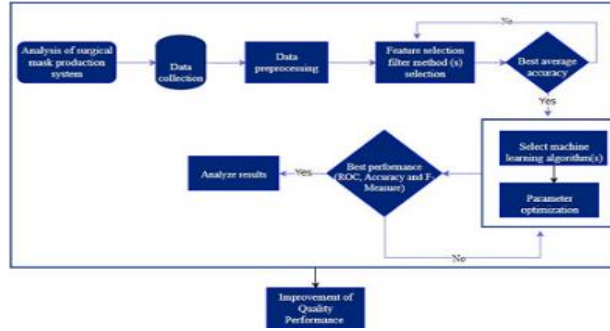
Özet

Bu makalede cerrahi (tıbbi) maskenin gövde üretim süreci analiz edilmektedir. Bilindiği gibi cerrahi maskeler, COVID-19 pandemisi ile birlikte tüm dünyada yaygınlaşarak hayatımızın bir parçası haline gelmiştir. Cerrahi maske gövde üretim sürecinde üretim faktörlerine ait gerçek veriler kullanılarak öncelikle filtreleme öznitelik seçim yöntemleri ile analizler yapılarak kullanılacak öznitelik seçim yöntemi belirlenmiştir. Belirlenen öznitelik seçimi yöntemi ile ürün kalitesi üzerinde etkili olan faktörler belirlenir. İkinci olarak, hatasız ürünlerin üretimindeki faktörlerin (özniteliklerin) değerlerini ve değer aralıklarını belirlemek için makine öğrenmesi yöntemlerinden yararlanılmıştır. İkinci aşamada kurulan makine öğrenmesi modellerinin performansları öznitelik seçimi analizi ile artırılmıştır. Çalışmada makine öğrenmesi algoritmalarına yapılan parametre optimizasyonları ile birlikte hatalı ürün oranını tahmin etmek için en iyi algoritmanın %92,3 doğruluk, %91,9 F ölçümü ve %93 AUC değeri ile Ibk algoritması olduğu görülmüştür. Son olarak çalışmada ortaya çıkan karar kuralları doğrultusunda, maske gövde üretim sürecinde gövde kısmını oluşturan üst/orta/alt katmanlar için kullanılan kumaş türlerinin, hatalı veya hatasız ürün oranlarını büyük ölçüde etkilediği gözlemlendi. Burun etrafını saran çubuk aparatları k sınıfına ait ise birçok maskenin hatalı olduğu tespit edilmiştir. Uygulama sonuçlarına göre iyileştirme önerileri sunulmuştur.

Önemli Noktalar / Highlights

In this article, the factors affecting product quality in the body production process of the surgical (medical) mask were determined by the feature selection method. Machine learning methods were used for of defect-free /defective product classification. The values and value ranges of the features were determined in line with the decision rules. The performances of machine learning classification models were improved by feature selection analysis and parameter optimizations.

Grafiksel Özet / Graphical Abstract



*Corresponding author, e-mail: semra.tebrizcik@kku.edu.tr

1. INTRODUCTION

In our modern world, developments in information technology provide significant advantages in managing businesses and making effective decisions. The point where computing technologies have come allows us to collect, record and store large amounts of data. Machine learning approaches, which is a sub-branch of artificial intelligence, are used in the analysis of existing data, transforming them into information and making decisions about the process.

Machine learning is the ability of computers to make decisions about similar events that will occur in the future and produce solutions by learning the information and experiences about an event. As a result of the computer systems that will learn, reviewing and repeating all the examples related to the event to be learned many times, generalizations are made about the event. When examined in general, it is seen that machine learning studies are carried out for two purposes. First, hetero association, where an event is examined from different angles, the general aspects of the event are revealed, and then problem solutions are made using these general aspects in a similar situation encountered. The second purpose is auto-association. Here, on the other hand, if the information is missing, the missing information can be completed thanks to machine learning. In this case, a sample is given to the learning system as an input, and the same sample is requested as an output. For example, after learning a picture of a person, the owner of a torn picture can be determined [1].

We also encounter machine learning problem solving approaches in many areas of the manufacturing and service sector. For example, by using the past sales data about the product in the manufacturing sector, the future sales data of the product are estimated and contribute to the decision-making process of the company. By analyzing the similarity relations between customer behaviors in the banking sector, customer segments are formed and marketing strategies are developed accordingly.

Production factors (attributes, variables) are constantly measured at different stages and their values are stored in the databases of the enterprises. These data include which machine is used in the production line with which setup parameters, characteristics of the operators (experience, age, shift type, etc.), raw materials used in the process, environment (humidity, temperature, etc.), sensors attached to the machines (vibration, force, pressure, etc.), machine malfunctions and maintenance, product quality and other important features. In this context, machine learning is generally more efficient than other traditional mathematical and statistical models in production, as it can predict the unknown feature values for a new sample by understanding the complex relationships between the properties of data samples [2].

Quality is one of the most important factors affecting productivity in production processes. In order to survive in the competitive environment in production enterprises, it is necessary to produce the product in accordance with the desired quality characteristics, to ensure customer satisfaction and to reduce production costs. In addition, it is aimed to keep

the rate of products produced defective at a minimum level. Production efficiency can be increased with the production of high quality products as a result of determining the production factors that affect the production of defective products in a production enterprise and applying the necessary corrections and proactive approaches to the enterprise.

Studies in the literature to improve product quality performance in manufacturing enterprises were initially conducted using Statistical Quality Control and Total Quality Management approaches. However, nowadays, with the increasing automation systems, it becomes difficult to make sense of existing data and to extract information in this direction. With the developments in data collection systems and analysis tools, the usability of increasing data is realized by the use of machine learning methods, which is a sub-branch of artificial intelligence.

Smart manufacturing is a manufacturing category that aims to optimize concept creation, production and product processes, from traditional approaches to digitized and autonomous systems [3]. Since smart manufacturing enables the production of high quality products, studies are being carried out to create quality prediction models using machine learning methods [4].

In this study, machine learning methods have applied using real data to produce solutions to improve the quality performance of a factory that produces surgical masks. The objective of this study is to reduce the rate of poor quality products. In order to achieve this objective, binary classification algorithms are used. The

decision rules were determined according to best performance algorithms. In addition, feature selection approach has contributed to performance of the algorithms.

The use of masks comes to the fore in the use of protective equipment during the pandemic. The mask is a vital product to prevent contamination, and it must have all the qualities and quality characteristics it should have. Otherwise, it should not reassure people against contagion and then assume a deceptive role. In order to be able to take a proactive approach against the COVID-19 pandemic, which threatens humanity, and to be able to prevent contamination, the most important point is that the quality characteristics of the mask have the desired qualities.

One of the systematic aspects of the study is the use of correlation-based feature selection algorithms. In the study, different filter feature processing approaches were used to remove irrelevant features or to create the dataset with more suitable ones. Then, statistical, rule-based and ensemble learning algorithms are applied with the features obtained by these methods. Finally, decision rules are created for defect-free products. In addition, the study reveals the successful results of defective/defect free mask classification with 92.3% accuracy, 91.9% F measurement and 93% ROC area rate of the established model. As a result of the literature research conducted within the scope of the study, no machine learning classification application was found using quality features in the production of surgical masks.

The rest of the paper is organized as follows. In Section 2, we summarize relevant studies in the

literature that have been conducted with machine learning applications for quality performance prediction. In Section 3, we present the feature selection techniques and the machine learning approaches and the machine learning techniques. In Section 4, we present the methodology of the study and data collection and preparation stages, the implementation of the proposed system and discuss the evaluations performed and the results obtained. Finally, conclusions are drawn in section 5.

2. LITERATURE RESEARCH

In this section, we present a literature review on models established different disciplines and methodologies in the fields of machine learning and data mining algorithms. The literature review includes studies on different industrial applications, quality performances in industrial products, as well as applications focusing on mask production processes. We present the first studies in the literature on machine learning and data mining in different disciplines and methodologies.

Chen et al. (2015) examined the factors (attributes) that are effective in customer loss of a company in the logistics sector and developed models for estimating customer loss. In the first part of the study, customer value analysis was applied to identify the customers who contributed to the company's profitability and the Knowledge Gain method was used to determine the most effective attributes. In the second part, C4.5, Multilayer Perception, Support Vector Machine and Logistic Regression algorithms in Machine Learning Software were used to estimate customer churn,

and the accuracy rates were calculated as 93%, 90%, 88% and 87%, respectively. The results showed that the prediction models created with the classification algorithms used can be an early warning tool for companies in case of potential loss of customers [5].

Brillinger et al. (2021) investigated Decision Tree, RandomForest, boosted Random Forest, machine learning algorithms for their capabilities in predicting the energy demand of CNC machining operations based on real production data. In the study, the most accurate energy demand estimations were obtained with the RandomForest algorithm [6].

Miguéis et al. (2018) estimated the general academic performance of university students based on the information obtained at the end of their first academic year. They propose a model supported by data mining classification techniques for prediction models. The results showed that the model powered by Random Forests achieved performance levels of about 96.1% in terms of accuracy. Together with the resulting prediction model, the proposed segmentation framework provides a useful tool for identifying optimal strategies to implement to promote higher levels of performance and reduce academic failure and improve the quality of the academic experience generally provided by a higher education institution [7].

Go et al. (2019) evaluated the performance results of the prediction models they developed for sentiment analysis applications using Naive Bayes, Maximum Entropy and Support Vector Machines (SVM) classification algorithms on Twitter data. In the study, text documents were represented using different structures such as 1-

gram, 2-gram and sentence elements. With the developed method, it has been observed that the classification performance with an accuracy rate of 80% is achieved [8].

Yucalar et al. (2019) developed basic predictors for detecting software flaws and an ensemble strategy to increase model performances, especially bug detection capabilities. The results show that the ten ensemble estimators in WEKA have better error prediction performance compared to the basic estimators. Rotation Forest, especially Random Forest, Logic Boost, Adaboost and Voting have been shown to be alternative successful error estimators that can be used in software quality studies [9].

Kececi et al. (2020) investigated machine learning techniques for authentication using activity data of human walks. The activities recorded in the dataset are walking, running, sitting and standing. Data were collected with devices such as wearable accelerometers and gyroscopes. In total, the data identify 18 individuals, so each person was considered a different class. In the proposed system, IB1, Random Forest and Bayesian Net algorithms have achieved over 99% accuracy [10].

Ali et al. (2021) predicted heart disease using a data set that includes characteristics of individuals at risk for heart disease. Among the features, the most effective features causing heart disease were determined by performing feature importance and correlation analyzes. A number of different classification algorithms including MLP, KNN, DT, RF, LR and ABM1 were applied for model predictions. The results revealed that KNN, DT, and RF performed best

with 100% accuracy and the features identified were the most effective in predicting heart disease [11].

Droomer & Bekker (2020) have established a machine learning model to predict when customers will buy products using data from customers based on past purchasing behavior of people in the banking industry. Artificial Neural Network, Recurrent Neural Network (RNN), Linear Regression, Extreme Gradient Boosting (XGBoost) machine learning algorithms were used in the study. It has been observed that the Artificial Neural Network algorithm gives high performance results. With the information obtained, it will provide support in the decisions of the marketing team to advertise to a person at the appropriate time [12].

Machine learning applications for quality performance estimation in the literature are presented. The studies that use Support Vector Machines, Decision Trees, Naive Bayes, K-Nearest Neighbour, Logistic Regression, Gradient Descent, K-star, Artificial Neural Network methods are considered mostly.

Yan & Shao (2002) used nonlinear Support Vector Machine (SVM) classification algorithms to diagnose bearing failure. In the study, 40 samples were selected for the training set to learn the model, and 15 samples were selected for the test set to evaluate the learning outcome. Since the model is nonlinear, Matlab 6.0 is used to solve quadratic programming. The results have shown that the Support Vector Machine is applicable in diagnosing emerging defective [13].

Kayaalp (2007) has shown that fault detection in asynchronous motors can also be done using REP Tree and M5P-M4.0 decision tree algorithms. Studies have shown that more useful REP Tree of the decision tree [14].

Şanlıtürk (2018) used Random Forest, Naive Bayes, Support Vector Machines and K-Nearest Neighbor machine learning methods by performing normalization and scaling operations on the data set to predict the defect products that may arise during the powder coating phase of the washing machine production process. The results show that the Random Forest algorithm offers the best performance in the scaling data set [15].

Fourie & Plessis (2020) used logistic regression, artificial neural networks and random forest algorithms for railway wheel flange height estimations in their studies. The results showed that all three models provided predictions with over 90% accuracy [16].

Karadağ (2018) analyzed the amount of waste in packaging production in 2 different groups. In the first group, the waste was determined based on a single value, while in the second group, the waste range was expanded and handled in 3 ways. In the study, 10 versions were also developed to investigate the effect of production factors on waste. Estimation studies were made using 20 different machine learning algorithms on the 20 data sets created and their performances were compared [17].

Zhang et al. (2020) developed a model that predicts the number of defects in the steel production process in order to identify the most influential variable (attribute) that can cause

defects and to reduce the number of defects in the steel plate. They used Partial Dependency Analysis with variable significance measure to identify the most influential variable. The results showed that operator experience is effective. Partial Least Squares (PLS), Support Vector Machines (SVM), Poisson Regression, Negative Binomial Regression and Random Forest decision tree algorithms were used to develop the prediction model in the study. As a result of the model trials, it was observed that the prediction accuracy of the Random Forest algorithm gave better results than the other models used [18].

Tobias et al. (2020) evaluated different machine learning models with different preprocessing steps for the detection and classification of faults in electromechanical drive systems by differentiating their respective hyperparameter values. Performance results were compared using K-nearest Neighbor, SVM, Random Forests, Extreme Gradient Boosting Machines (XGBoost) and different Artificial Neural Network Models within the scope of deep learning. The results show that the KNN algorithm stands out due to its 99.94% accuracy rate and good performance in all other criteria. In the study, it was emphasized that this situation in no way revealed that ANNs did not perform worse in general, on the contrary, there were no satisfactory hyperparameters or weights during training [19].

Ravikumar et al. (2022) firstly, using the decision tree algorithm C4.5 algorithm to classify gear failures in the internal combustion (IC) engine gearbox, they determined the features that contribute more to the

classification model. They used K-Nearest Neighbor algorithm, K-star algorithm and Local Weighted Learning Algorithms for fault classification with determined features. The results showed that the maximum classification accuracy of about 97.5% was achieved with the K-star algorithm [20].

Jizat et al. (2021) used classification algorithms for the detection of wafer faults in the semiconductor industry. In the study, prediction models were established for 3 defect classes and one non-defective class by using K-Nearest Neighbors (K-NN), Logistic Regression, Stochastic Gradient Descent and Support Vector Machine algorithms. The results showed that the Logistic Regression algorithm is the best classifier to detect a wafer error with an accuracy of 86.9% [21].

Bak et al. (2021) used a Shallow neural network (SNN) model to predict the product quality of the die casting manufacturing process. First, to reduce the complexity of the structure of the SNN model, variable selection applications were made to select a representative and determinant production parameter in the data set in the data preprocessing stage. Then, the number of layers and neurons in the SNN structure was selected according to the minimum RMSE by comparing the ANN models with various structures. The application results showed that the SNN model can be used to reliably predict the product quality of the die casting process [22].

The studies on about quality mask production in the literature are as follows.

Chen et al. (2009) in their study, developed a new automation solution with the emergence of operator errors when semi-automatic systems based on aerial imagery are used in systems that reveal mask defects. The results showed that the new system eliminates operator error and significantly improves efficiency [23].

Yagawa et al. (2014) aimed to develop a high-performance mask production process with resolution and high productivity by investigating the current production features of a NGL (Next Generation Lithography) type mask. They showed that the production of tissue thinner than 15nm on the mask can be done with the images obtained with special printers. The results showed that the performance of the current mask manufacturing process has the potential to produce NGL (Next Generation Lithography) mask [24].

Shen et al. (2021) compared the two approaches they identified to encourage vendors to improve their quality level in the production of poor quality masks during the Covid-19 pandemic. It has been tried to determine which one is more effective during the pandemic. The two approaches they evaluated in their work are; random monitoring of the market and/or encouraging vendors to incorporate blockchain technology into their products. The results showed that quality control and blockchain adoption can encourage the low-quality vendor to improve the quality level [25].

Park & Jeong (2022) aimed to automate the identification of good and defective products in the mask production process by utilizing machine vision technology in a mask manufacturing company in Korea. In the study,

a deep learning and machine vision based anomaly detection production environment is implemented using Laon People Navi AI Toolkit. The results show that the productivity of the company's defective mask detection process can be significantly improved and that this technology can be applied to similar mask production processes in the future to make similar production sites more sustainable [26].

Li & Wang (2023) investigated the relationship between process parameters and structural variables of intercalated meltblown nonwovens. In the study, they used machine learning algorithms to solve the nonlinear relationship. The results revealed that the optimized back propagation neural network model is the most suitable [27].

In summary, in the literature, there are prediction models made using machine learning algorithms in different fields. Within the scope of the study, machine learning applications for quality performance prediction are emphasized. As an inference from literature review; in this literature review, many machine learning and data mining algorithms in the literature can be used for a data set, but based on the characteristics of the data set used in this study, examples of the most successful algorithms are given.

3. METHODS

The methods used in this study are machine learning classification algorithms within the scope of supervised learning. In addition, it is aimed to determine the features that are effective in the production process by using the methods of feature selection methods.

3.1 Feature Selection Methods

Feature selection is a research area that focuses on finding the optimal feature subset [28]. The feature selection process defines which features are more discriminatory than others [29]. By removing irrelevant and repetitive features from the data set, system performance is generally improved [29,30]. Since the data size is reduced with the feature selection, it is not certain to increase the prediction rate while reducing the load rate to be calculated. For this reason, it is necessary to run different models by trial and error in experimental environments in order to demonstrate that the success rate increases the performance results of the relevant prediction models. Also feature selection is a data reduction method that is considered in the data preprocessing phase. Feature selection methods proposed in the literature are divided into three main categories: Filtering, Wrapper and Embedded methods [30,31].

3.1.1 Wrapper Methods

Wrapper methods are methods in which all possible subsets are searched for feature subset selection. Methods such as step-by-step forward selection and step-by-step backward elimination are used to search for subsets. In stepwise forward selection, starting with an empty attribute set is added to the subset of an attribute that is predicted to be the best at each stage and that has not been added before [30,31]. The process continues until only one attribute is added to the subset at each stage and the prediction accuracy rate of the classification algorithm used is not increased. The attribute selected at any stage cannot be removed from

the subset later on. In the step-by-step backward elimination method, starting with a subset formed from all the features, the feature that is predicted to be the worst is removed from the subset at each stage [32]. During the elimination, once the features are removed from the subset, they cannot be included in the subset again.

3.1.2 Filter Methods

In filtering methods, feature selection is made by ranking with statistical criteria such as mutual information, point-based mutual information, pearson correlation coefficient, without using any classifier. In order to select a new set of features, filter methods calculate a score value for each attribute in the dataset, through the evaluation function, and the features with the highest score values among these values are selected for the best feature subset [33]. The model starts with a complete set of features, and various statistical techniques such as information gain, chi-square, gain ratio, ReliefF, OneR and correlation can be used to filter out the most relevant features [34].

3.1.3 Embedded Methods

Embedded (hybrid) methods are used to obtain the advantages of both methods. Embedded methods are a method in which filtering and wrapper methods are applied simultaneously. An independent measure and a mining algorithm are used to measure how well the newly developed subset is. In this method, firstly, the filtering method is used to reduce the search area, and then the wrapper method is applied to determine the best feature subset [35].

In filtering methods, feature selection is made before applying the machine learning algorithm, whereas in wrapper methods, the machine learning algorithm is used as a tool for the best feature selection. In embedded methods, machine learning algorithm and feature selection algorithm are applied in a hybrid way. Usually, the authors suggest the use of filters as they carry out the feature selection process independently of the inductive algorithm and are faster than embedded and wrapper methods [36,37]. In our study, feature selection analyzes were performed using filtering methods.

3.2 Machine Learning

Machine learning is a branch of artificial intelligence. By using historical data, it provides the process of teaching the relationships between the data and the hidden patterns to the model through computer programs, transforming the existing data into meaningful information and making inferences [38,39]. In terms of learning characteristics, it can be initially categorized into two main classes; supervised learning and unsupervised learning [40,41]. Along with the developments in analysis methods, semi-supervised learning and reinforcement learning approaches are also included in these classes [42]. Figure 1 shows machine learning approaches.

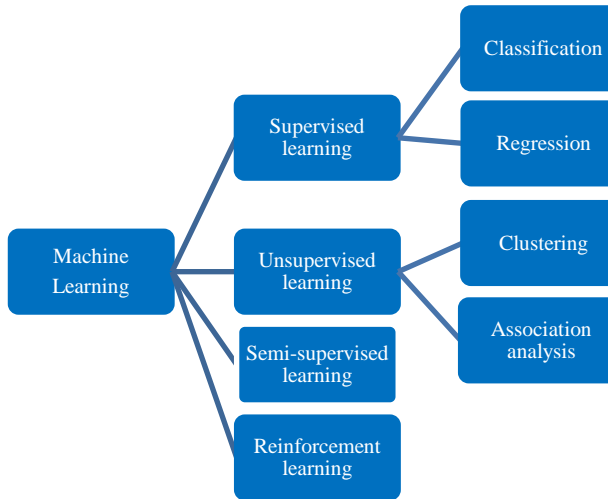


Figure 1: Machine learning approaches [38].

3.2.1 Supervised Learning

Supervised learning is a machine learning approach in which training data consisting of a sample containing both inputs and desired outputs is first presented to the model. Supervised learning is a machine learning approach in which each feature in the dataset collected from a real system relates to the related class (output) feature. In the supervised learning approach, the aim is to estimate the value of the class feature for new observation values. Classification and Regression algorithms are examined in this context [32,43].

3.2.2 Unsupervised Learning

In order to learn the value of the output attribute in supervised learning, a model established with training data is needed. However, in unsupervised learning, there is no need for training data since no class label estimation is performed. Therefore, there is no information about which observation is in which class. As a result, unsupervised learning is learning the relationships between unlabeled observations using certain similarity criteria. The aim of

unsupervised learning is to establish similar relationships between the data used and to form groups depending on these relationships. The most prominent methods used in unsupervised learning can be expressed as Clustering and Association analysis [44].

3.2.3 Semi-Supervised Learning

Supervised learning and unsupervised learning approaches may be insufficient in model solution in datasets where the number of data with output (class) feature is small, whereas there is much more data without output features. In this case, semi-supervised learning approach is used to reveal information about unlabeled data and classify them by using data with a small number of class labels. The purpose of semi-supervised learning is to predict the labels of unknown unlabeled samples only [39].

3.2.4 Reinforcement Learning

Reinforcement learning is an approach used to understand and automate goal-oriented learning and decision making. It is based on trial and error learning from other computational approaches by interacting directly with the environment, without relying on individual, external interaction, or exemplary control models. The system determines the best action or policy to achieve the goal through trial and error practices. Therefore, it organizes the actions that provide the most rewards and learns how to reach the given goal [39].

Within the scope of this study, the algorithms of the supervised learning approach are discussed in the application section.

Machine learning methods used in this study: Logistic regression classifier similar to linear regression model, Decision Trees which is an efficient and non-parametric supervised learning method that can be used for both classification and regression analysis, Naive Bayesian classifiers, statistical classifiers based on conditional probability and Statistical Learning Support vector machine which is a machine learning method based on theory (SLT) which is a type of classification algorithm and also used in WEKA [45] machine learning software as Sequential Minimal Optimization Classification (SMO) and LibSVM classifiers with support vector machine algorithm rules. The K-nearest neighbor (Kb) algorithm, which is one of the most basic classification methods. Multilayer Perceptron used in problems where the relationship between input and output is not linear and there is more than one intermediate layer between input and output. In addition, Ensemble Learning methods, which are machine learning methods used under the Supervised learning approach [46] which, unlike ordinary learning approaches, combine the predictions of multiple machine learning methods to reveal higher prediction accuracy and improve the prediction performance of model performance results. Within the scope of ensemble learning methods, Reduced Error Pruning Tree (REP Tree) and Random Tree algorithms are some of the algorithms developed in recent years [30]. In the application part of this study, Random Forest, Bagging, AdaBoost M1, REP Tree and Random Tree ensemble learning algorithms were used.

3.2.5 Evaluation Metrics for Classification

In this study, we used Confusion Matrix (Table 1) and Area Under the ROC (Receiver Operating Characteristic) curve, which are common methods used to measure classification model performances. In the confusion matrix, there are values related to model prediction and actual data, and information about correct and incorrect predictions made with the test data set used in the model [32]. Accuracy, precision, recall and F-measure are calculated as in Equation 1-4.

Table 1: Confusion matrix.

		Actual class	
		Positive	Negative
Predicted class	Positive	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	Negative	False Negative (FN)	True Negative (TN)

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$\text{F - Measure} = \frac{2 * \text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Recall} + \text{Precision}} \quad (4)$$

The area under the ROC curve is a model performance measure for classification prediction that considers all possible classification thresholds. The area under the curve can be regarded as the summary of model success. The success of the model performance is evaluated by the closeness of the area under the ROC curve to 1 [48].

4. STAGES OF THE STUDY AND APPLICATION

With the COVID-19 pandemic, the use of different types of masks has become widespread in order to protect people and not spread the contagion. The World Health Organization (WHO) recommends the use of medical masks to patients and caregivers [47]. Since the mask is in direct contact with the face, it should be produced without using materials that will cause an allergic reaction on the user's skin. It should be resistant to risk situations such as tearing or breaking at the connection points. It should have a structure that will allow individuals to be fitted tightly on their nose, mouth and chin, and to ensure that the sides of the mask fit the face completely. It should be ensured that the individual can breathe comfortably. The surface of the mask should be durable and maintain its integrity throughout the life of the product, and should not have sharp edges that may cause injury in the parts that come into contact with the individual. Before using the mask, it should be packaged in a way that protects it from mechanical damage and contamination and should be presented with the instructions for use. This study was carried out in a mask factory that started production with the Covid 19 epidemic process. The factory in normal order implements quality control processes with reactive approaches. In the application period of our study, quality and cost parameters were taken into the background due to the high demand for the mask. In our study, the process of identifying masks incorrectly was examined by physical control of the masks. The quality control process was physically carried out based on errors such as

incorrect cutting and folding of the fabrics in the process, defect caused by the amount of heat applied in the printing process, and the equipment used for the nose wire not being suitable for the mask. As a result of the practices we have done with our study, proactive approaches have been adopted on the factors of production.

In this study, machine learning methods were applied to produce solutions with artificial intelligence techniques by taking sufficient measurements from the quality characteristics of the current production. Data pre-processing and feature selection analyzes were made and the quality of the recorded raw data was increased. During the model creation phase, binary classification was made using the classification methods Random Forest, Bagging, Bayes Net, Naive Bayes, Multiplayer Perception, J48, Ibk, Random Tree, SMO, LibSVM, Logist Regression, AdaBoost M1 and REP Tree machine learning algorithms. Among the established prediction models, the model with the best performance metric results has selected. Decision rules for the production factors (features) have extracted from the established forecasting models, and it has determined as a result of the analysis in which value ranges these factors affect the production of defective/defect-free products. The methodology of our study is presented in Figure 2.

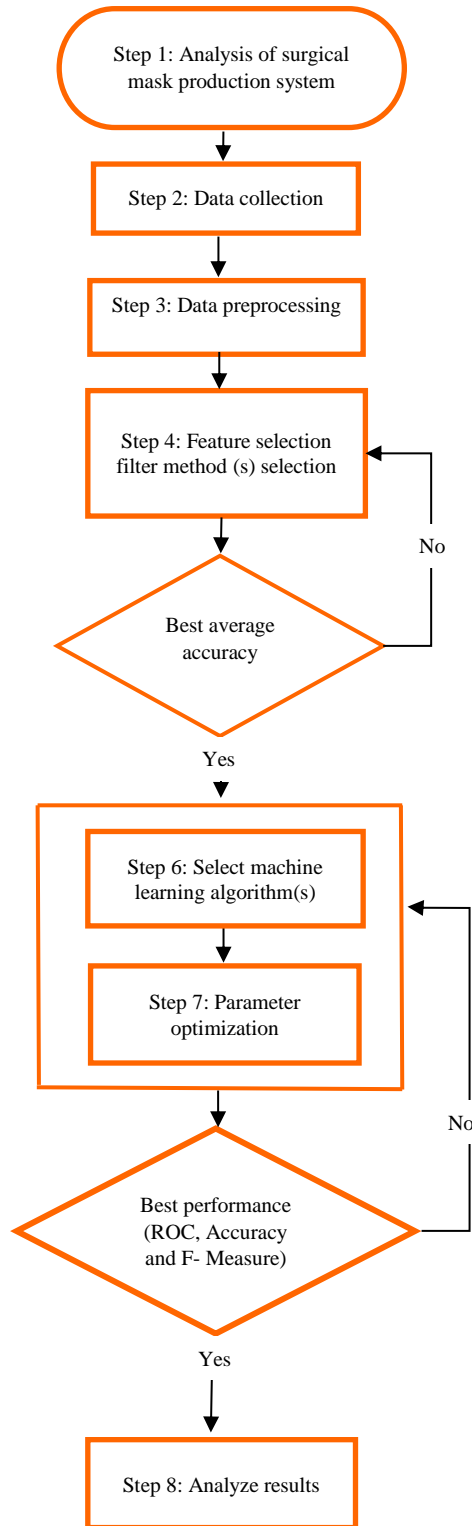


Figure 2: Methodology of our study.

4.1 Collection and Preparation of Data (Data Preprocessing)

The data set used in this study was obtained in 2021 from a mask factory that started production with the Covid 19 epidemic process. The data of 350.000 masks determined

according to a production period from the factory were accepted as the universe and the data to be used in the study were calculated by calculating the number of samples (n) and found 894 (Equation 5) [49]. In the study, the analyzes were carried out with 959 pieces of data by obtaining more data.

$$n = \frac{Nz^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + z^2 * p * q} \quad (5)$$

where N denotes the population number, p frequency of the event under investigation, q frequency of absence of the event under investigation (the p and q parameters are taken as 0.30 and 0.70, respectively), d the desired deviation according to the incidence of the event (d=0.03), and z the value found from the Z table at the detected error level (at 95% confidence this value is 1.96).

Production factors in the process were determined and the measurements of these factors were taken and recorded. At this stage, the production factors (attributes) determined initially; shift type (normal and night), machine information (machine type, machine speed, ultrasonic temperature and frequency value of the machine), measurements of the mask (mask body width and mask body length) and fabric properties of the mask, nose surrounding stick, operator information (name, age, gender, educational status and experience). Observation values of these factors were recorded manually by creating production follow-up chart forms. In the data preprocessing stages, WEKA machine learning software were used to see the general picture of the basic data set and for statistical analysis.

The missing records detected in the data set were filled in by taking into account the statistical properties of the feature in order to prevent the model solutions from producing erroneous results. Considering the normal distribution of the data belonging to an attribute with a numerical data type with missing records, it was filled with its average value. For example, in the dataset, missing data for the `body_length` (data type numeric) feature is filled with the mean value of 16,93. In the missing data in the categorical features, the most frequently repeated (mode) value was entered instead of the missing records. In the data set, for example, missing records of the categorical feature `nose_surrounding_stick` (1-2) are filled with the mode value of 2. In data conversion processes, some numeric and string values are categorized. For example, `operator_train` feature; 2 classes as `primary school=1`, `high school=2`, `oprtr_age` attribute; 18-24, 25-34, 35-44, 45-54 and `55_over` were converted into 5 classes, and the fabric types used for the upper/middle/lower layers of the body were converted into 5 classes as A, B, G, M and T. It was noticed that some of the observations frequently had a faulty product class among the kept data and it was determined that the situation causing these repetitions was a defective machine. Observations of this machine were removed from the data set in order to determine the relevant machine number from the records kept and to avoid bias in model training.

The data set created after data preprocessing and initial data reduction stages consists of 14 features (13 independent and 1 dependent variable) and 959 observations, it belongs to the

class of 707 defect free and 252 data defect indicating mask body. The sample dataset are explained in Table 2 and Table 3.

4.2 Feature Selection Application

This section presents the analysis results of the experiments on the filtering methods used for the selection of the best features, and comparisons are made for accuracy rates. In this study, six filters approaches are applied to the dataset, namely Information Gain, Gain Ratio, ReliefF, Chi Squared, OneR, Correlation based Feature Selection. All of them are available in the WEKA 3.9.5 machine learning software [45]. A ranker was used as search method for filter feature selection.

The three performance measures mentioned in the literature to evaluate the performance of the feature selection method are the number of features selected, classification accuracy, and processing time [31]. In this research, classification accuracy is taken into account. For the classification models used, the 10-fold cross validation model validation method [50] was used, but with this method, the accuracy rates were compared with 20% and 30% test data [51]. The highest accuracy values in the results were obtained with the 10-fold cross validation model validation method.

For the algorithms used for both feature selection and binary classification in the study, parameter adjustments were made to give the best value of the performance of the classifiers. The best performance result for the `Ibk` classifier is observed when the parameter `k` is at the value of 2. The best performance results were found with the kernel function `PUK` for the

statistical learning algorithms SMO and the RBF kernel function for the LibSVM algorithm. The best performance results for the ensemble learning algorithms Bagging and AdaBoost M1 classes were found when J48 was used as the baseline estimator. Other parameter values of these algorithms and parameter values used for other algorithms discussed in the study showed good classification performance results at the values in WEKA's default parameter settings.

In the Table 4, the classification algorithms used and the average accuracies of the features selected with the 6 feature methods are compared. In the Table 4, the feature selection methods with an average accuracy of 90% and above are indicated in bold. The feature selection method with the highest average accuracy in our study was the ReliefF method, which was also emphasized in the literature [34]. Experts on the selected features have also confirmed that the criteria determined in our study are suitable. The attribute sets obtained by the Info Gain AttributeEval and Gain Ratio AttributeEval methods are the same and thus have the same performance results in the classification models.

The Cut-off parameter for the Information Gain, Gain Ratio, ReliefF methods is 0.01 and the Cut-off parameter for the Correlation Attribute is 0.07.

Table 2: Features and descriptions in the dataset.

No	Features name	Explanation	Data type
1	Shift	The working system in the factory is realized in 2 shifts.	Nominal
2	Body machine type	The type of machine where 3 fabrics are combined and the mask body is formed.	Nominal
3	Body machine speed adjustment	The speed value of the body machine during use.	Numeric
4	Operator age	Operator age.	Ordinal
5	Operator train	Operator training.	Ordinal
6	Operator experience	Operator experience.	Numeric
7	Body upper fabric type	The type of upper fabric used to form the body part.	Nominal
8	Body middle fabric type	The type of middle fabric used to form the body part.	Nominal
9	Body lower fabric type	The type of lower fabric used to form the body part.	Nominal
10	Body length	Mask body length.	Numeric
11	Body width	Mask body width.	Numeric
12	Nose surrounding stick	Rod shaped apparatus that covers the nose.	Nominal
13	Body ultrasonic heat	The amount of heat given for the pattern created on the fabrics.	Numeric
14	Class	Indicates that the mask was produced defective or defect free	Nominal

Table 3: The sample dataset.

Data No	shift	body_ machine_ type	body_ machine_ speed_ adjustment	oprtr_ age	oprtr_ train	oprtr_ experience	body_ upper fabric_ type	body_ middle fabric_ type	body_ lower fabric_ type	body_ length	body_ width	nose_ surrounding_ stick	body_ ultrasonic_ heat	class
1	2	1	30	45-54	1	9	M	M	B	17	9.5	o	91	defective
2	2	1	30	45-54	1	9	M	M	B	17	9.5	o	91	defective
3	2	1	30	45-54	1	9	M	M	B	17	9.5	o	91	defective
4	2	1	30	45-54	1	9	M	M	B	16.9	9.4	o	91	defective
5	2	1	30	45-54	1	9	M	M	B	17	9.5	o	91	defective
...
955	2	1	60	55_over	1	9	B	M	A	17.2	9	o	84	defect free
956	2	1	60	55_over	1	9	B	M	A	16.8	9.2	o	84	defect free
957	2	1	60	55_over	1	9	B	M	A	16.8	9.4	o	84	defect free
958	2	1	60	55_over	1	9	B	M	A	17.2	9.3	o	84	defective
959	2	1	60	55_over	1	9	B	M	A	16.6	9.2	o	84	defect free

Table 4: Classification performance results established by 10-fold cross validation method of the algorithm to be used in feature selection.

Classification Algorithm	Accuracy					
	Info Gain AttributeEval	Gain Ratio AttributeEval	Relieff AttributeEval	Chi Squared AttributeEval	OneR Attribute	Correlation Attribute
Random Forest	0.896	0.896	0.917	0.896	0.849	0.916
Bagging (J48)	0.906	0.906	0.913	0.906	0.854	0.910
Bayes Net	0.809	0.809	0.767	0.815	0.749	0.787
Naive Bayes	0.800	0.800	0.799	0.802	0.703	0.802
Multilayer Perception	0.897	0.897	0.910	0.897	0.856	0.907
J48	0.905	0.905	0.910	0.906	0.853	0.909
Ibk (k=2)	0.908	0.908	0.923	0.908	0.856	0.922
Random Tree	0.897	0.897	0.919	0.894	0.844	0.916
SMO (PUK)	0.900	0.900	0.908	0.900	0.851	0.907
LibSVM (RBF)	0.874	0.874	0.906	0.874	0.830	0.877
Logistic Regression	0.870	0.870	0.862	0.835	0.844	0.870
REP Tree	0.894	0.894	0.908	0.896	0.850	0.904
AdaBoost M1 (J48)	0.897	0.897	0.913	0.898	0.850	0.913
Avarege	0.881	0.881	0.889	0.879	0.830	0.888

In Figure 3, the average accuracy rates obtained with the data sets selected by the feature selection methods and containing the basic features are visualized.

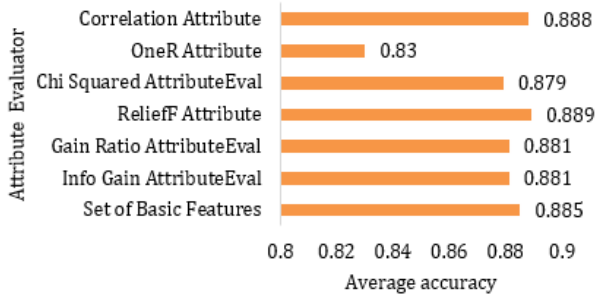


Figure 3: Comparison of average accuracy results of feature selection methods.

4.3 Model Experiments and Evaluations

After determining the feature set that is predicted to be the best for the prediction models to be established in the classification of defective products that may arise in the production of surgical mask body with filter methods, which are the feature selection method, model experiment studies were carried out. When the model results were examined in the study, it was seen that the algorithm that best estimated the defective product rate in different classification methods applied using the 10-fold cross-validation method was the Ibk (k=2) algorithm with 92.3% accuracy, 91.9% F measure and 93% AUC value. According to the classification results, 186 of the 194 surgical mask bodies produced defective during the quality control process were correctly estimated as defective products. During the quality control process, 699 of the 707 surgical mask bodies that were actually defective free were accurately predicted (Table 5).

Table 5: Ibk (k=2) classification algorithm confusion matrix.

		Actual class	
		defective	defective free
Predicted class	defective	186	66
	defective free	8	699

4.4 Comparison of Application Results

When the performance results are compared, the best 10 fold cross validation method is used. According to the results in Table 6, Random Forest, Bagging, AdaBoost M1, Random Tree, Rep Tree ensemble learning algorithms have the most successful performance results after the Ibk (k=2) classifier.

For example, the classifier that creates J48 decision rules has the most successful performance results after Ibk (k=2) and ensemble learning algorithms with 0.910 accuracy, 0.906 F measure and 0.909 AUC performance criteria. The decision rules produced by this classifier are as follows:

- If body_upper fabric_type = A and body_machine_type = 1, 31 products are classified as defect free.
- If body_upper fabric_type = A and body_machine_type = 2, 39 products are classified as defective.
- If body_upper fabric_type = B and body_machine_speed_adjustment <= 60, 337 products are classified as defect free, and 24 products are classified as defective.
- If body_upper fabric_type = B and body_machi-ne_speed_adjustment 60-70 and body_ ultrasonic_ heat > 84, 20 products are classified as defect free.

•If `body_upper fabric_type = B` and `body_machin-e_speed_adjustment 60-70` and `body_ ultrasonic_ heat 70-84`, 12 products are classified as defective.

•If `body_upper fabric_type = B` and `body_machine_speed_adjustment 60-70` and `body_ ultrasonic_ heat 70-84` and `body_machine_type = 1`, 15 products are classified as defect free.

•If `body_upper fabric_type = B` and `body_machin-e_speed_adjustment 60-70` and `body_ ultrasonic_ heat 70-84` and `body_machine_type = 2` and `nose_surrounding_stick= k`, 25 products are classified as defective.

•If `body_upper fabric_type = B` and `body_machin-e_speed_adjustment 60-70` and `body_ ultrasonic_ heat 70-84` and `body_machine_type = 2` and `nose_surrounding_stick= o`, 17 products are classified as defect free and 2 products are classified as defective.

•If `body_upper fabric_type = B` and `body_machin-e_speed_adjustment 60-80`, 67 products are classified as defect free and 2 products are classified as defective.

•If `body_upper fabric_type = B` and `body_machin-e_speed_adjustment 60-80` and `body_lenght > 16.8`, 132 products are classified as defect free and 29 products are classified as defective.

•If `body_upper fabric_type = B` and `body_machin-e_speed_adjustment 60-80` and `body_lenght <= 16.8` and `body_middle_fabric_type = M`, 40 products are

classified as de-fect free and 1 products are classified as defective.

•If `body_upper fabric_type = B` and `body_machin-e_speed_adjustment 60-80` and `body_lenght <= 16.8` and `body_middle_fabric_type = T`, 4 products are classified as de-fect free and 16 products are classified as defective.

•If `body_upper fabric_type = G` and `shift = 1` and `nose_surrounding_stick= o`, 3 products are classified as defect free.

•If `body_upper fabric_type = G` and `shift = 1` and `nose_surrounding_stick= k`, 2 products are classified as defect free and 96 products are classified as defective.

•If `body_upper fabric_type = G` and `shift = 2`, 38 products are classified as defect free.

•If `body_upper fabric_type = M`, 33 products are classified as defect free and 10 products are classified as defective.

•If `body_upper fabric_type = T`, 38 products are classified as defect free and 2 products are classified as defective.

In addition, after the J48 classification, it was seen that the Multilayer Perception artificial neural network classifier had 0.908 accuracy, 0.904 F measure and 0.924 AUC value. It has been seen that SMO and LIBSVM, which are statistical learning algorithms, have over 90% accuracy and F measure performance results. SMO and LIBSVM, which are statistical learning algorithms, have over 90% accuracy and F distance performance results. Finally, it was observed that the performance of Logistic Regression, Naive Bayes and Bayes Net

classifiers decreased when compared with other algorithms.

5. CONCLUSION AND DISCUSSIONS

In this paper, in the surgical mask production process, defective/defective-free binary classification studies were carried out with machine learning algorithms by using filtering methods, which is the feature selection method, to determine the most effective features (factors).

The study reveals that the ReliefF method used for feature selection gives the best performance result compared to other feature selection methods. Random Forest, Bagging, Bayes Net, Naive Bayes, Multilayer Perception, J48, Ibk, Random Tree, SMO, LibSVM, Logistic Regression, REP Tree and AdaBoostM1 machine learning algorithms were used with ideal parameter values. Model validations were found using 10-fold cross validation with highest accuracy for defective product prediction using Accuracy, F-measure and AUC performance metrics.

In the research, it was revealed that the most effective variables in the production of defect mask body are body lower fabric type, body middle fabric type, body upper fabric type, body machine speed adjustment, nose surrounding stick, shift, body ultrasonic heat, body machine type, operator age, operator experience.

Statistical, classification and ensemble learning algorithms were applied to the classification models with the 10-fold cross-validation test method using the data set containing the selected features. As a result of the applications, it has been revealed that the algorithm that best

estimates the rate defective products is the Ibk algorithm with $k=2$ parameter.

With 92.3% accuracy rate, 91.9% F-measurement and 93% ROC area rate (Table 5) of the established model, it reveals the successful results (Table 6) of defective/free-defective mask classification.

In line with the decision rules, it has been observed that the fabric types used for the upper/middle/lower layers forming the body part in the mask body production process greatly affect the realization of the defective/defect-free product. It has been concluded that the use of fabrics belonging to the G class determined for the fabric types is compared to the other fabric types (A, B, M and T), and more defect-free products are produced. It has been found that many masks are defective if the nose surrounding stick apparatus is in class k .

Table 6: Performance results of installed models.

Classification algorithm	Accuracy			Precision			Recall			F-Measure			AUC		
	10-fold cross validation	20% test data	30% test data	10-fold cross validation	20% test data	30% test data	10-fold cross validation	20% test data	30% test data	10-fold cross validation	20% test data	30% test data	10-fold cross validation	20% test data	30% test data
Random Forest	0.917	0.885	0.899	0.918	0.893	0.906	0.917	0.885	0.899	0.913	0.878	0.893	0.932	0.912	0.901
Bagging (J48)	0.913	0.88	0.885	0.916	0.885	0.887	0.913	0.88	0.885	0.909	0.873	0.88	0.929	0.881	0.892
Bayes Net	0.767	0.760	0.736	0.764	0.746	0.722	0.767	0.760	0.736	0.766	0.743	0.727	0.793	0.762	0.756
Naive Bayes	0.802	0.740	0.736	0.792	0.723	0.722	0.802	0.740	0.736	0.794	0.726	0.727	0.778	0.721	0.715
Multilayer Perception J48	0.908	0.885	0.896	0.909	0.893	0.909	0.908	0.885	0.896	0.904	0.878	0.888	0.924	0.891	0.909
	0.910	0.880	0.882	0.912	0.885	0.882	0.910	0.88	0.882	0.906	0.873	0.876	0.909	0.86	0.871
Ibk (k=2)	0.923	0.885	0.896	0.926	0.893	0.901	0.923	0.885	0.896	0.919	0.878	0.890	0.930	0.901	0.910
Random Tree	0.916	0.885	0.899	0.917	0.893	0.906	0.916	0.885	0.899	0.912	0.878	0.893	0.911	0.903	0.901
SMO (PUK)	0.908	0.880	0.892	0.914	0.898	0.906	0.908	0.88	0.892	0.902	0.87	0.883	0.833	0.798	0.809
LibSVM (RBF)	0.906	0.849	0.858	0.911	0.876	0.881	0.906	0.849	0.858	0.900	0.831	0.84	0.832	0.746	0.747
Logistic Regression	0.860	0.818	0.826	0.865	0.837	0.838	0.860	0.818	0.826	0.847	0.793	0.804	0.83	0.752	0.777
REP Tree	0.908	0.880	0.882	0.911	0.885	0.884	0.908	0.880	0.882	0.904	0.873	0.876	0.903	0.873	0.901
AdaBoostM1 (J48)	0.913	0.896	0.885	0.914	0.902	0.887	0.913	0.896	0.885	0.91	0.890	0.880	0.930	0.918	0.906

ACKNOWLEDGMENTS

This research received no external funding.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Semra TEBRİZCİK: Conceptualization, Data Editing, Methodology, Analysis, Research, Software, Writing Original Draft Preparation, Visualization, Writing, Resources

Süleyman ERSÖZ: Conceptualization, Methodology, Data Curation, Research, Project Management

Adnan AKTEPE: Analysis, Validation, Review and Editing, Audit

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

[1] Öztemel E. (2016). Artificial Neural Networks. 4nd ed. Istanbul, Turkey, Papatya Press.

[2] Doğan A, Birant D. (2021). “Machine learning and data mining in manufacturing”. Expert Systems with Applications, 166(2021), 1-22.

[3] Öztemel E, Gürsev S. (2018). “Literature review of industry 4.0 and related technologies”. Journal of Intelligent Manufacturing, 31(2020), 127-182.

[4] Cho E, Jun J, Chang T, Choi Y. (2020). “Quality prediction modeling of plastic extrusion process”. ICIC Express Letters Part B: Applications, 11(5), 447–452.

[5] Chen K, Hu YH, Hsieh YC. (2015). “Predicting customer churn from valuable B2B customers in the logistics industry: A case study”. Information Systems and E-Business Management, 13(2015), 475–494.

[6] Brillinger M, Wuwer M, Hadi MU, Haas F. (2021). “Energy prediction for CNC machining with machine learning”. CIRP Journal of

Manufacturing Science and Technology, 35(2021), 715-723.

[7] Miguéis V, Freitas LA, Garcia PJV, Silva A. (2018). “Early segmentation of students according to their academic performance: A predictive modelling approach”. *Decision Support Systems*, 115(2018), 36–51.

[8] Go A, Bhayani R, Huang L. (2019). “Twitter sentiment Classification Using Distant Supervision”. Stanford, United States of America, Project Report, CS224N.

[9] Yucalar, F., Özçift, A., Borandağ, E., & Kılınç, D. (2020). Yazılım kalitesi mühendisliğinde çoklu sınıflandırıcılar: Yazılım hata tahmin yeteneğini geliştirmek için tahmin edicileri birleştirmek. *Engineering Science and Technology, International Journal*, 23 (4), 938-950.

[10] Kececi A, Yıldırak A, Özyazıcı K, Ayluctarhan G, Ağbulut O, Zincir I. (2020). “Implementation of machine learning algorithms for gait recognition”. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(4), 931–937.

[11] Ali M, Kumar BP, Ahmad KM, Francis B, Julian MWQ, Moni MA. (2021). “Heart disease prediction using supervised machine learning algorithms: performance analysis and comparison”. *Computers in Biology and Medicine*, 136 (2021), 1-10.

[12] Droomer M, Bekker J. (2020). “Using machine learning to predict the next purchase date for an individual retail customer”. *South African Journal of Industrial Engineering*, 31(3), 69-82.

[13] Yan W, Shao H. (10-14 June 2002) “Application of support vector machine nonlinear classifier to fault diagnoses”. *Proceedings of the 4rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, Shanghai, China.

[14] Kayaalp K. (2007). *Fault Detection in Induction Motors Using Data Mining*. MSc Thesis, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey.

[15] Şanlıtürk E. (2018). *Prediction of Defective Product with Machine Learning Algorithms*. MSc Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.

[16] Fourie CJ, Plessis JA. (2020). “Implementation of machine learning techniques for prognostics for railway wheel flange wear”. *South African Journal of Industrial Engineering*, 31(1), 78-92.

[17] Karadağ G. (2018). *Prediction of Production Wastage Via Data Mining*. MSc Thesis, Yasar University, Izmir, Turkey.

[18] Zhang X, Kano M, Tani M, Mori J, Ise S, Harada K. (2020). “Prediction and causal analysis of defects in steel products: Handling nonnegative and highly overdispersed count data”. *Control Engineering Practice*, 95(2020), 1-8.

[19] Tobias G, Falco B, Robert M, Alexander V, Martyna B, Alexander D. (2020). “Evaluation of machine learning for sensorless detection and classification of faults in electromechanical drive systems”. *Procedia Computer Science*, 176(2020), 1586–1595.

- [20] Ravikumar KN, Madhusudana CK, Kumar H, Gangadharan KV. (2022). "Classification of gear faults in internal combustion (IC) engine gearbox using discrete wavelet transform features and K star algorithm". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 30 (101048).
- [21] Jizat JAM, Majeed AP, Ahmad AF, Taha Z, Yuen E. (2021). "Evaluation of the machine learning classifier in wafer defectsclassification". *ICT Express*, 7(4), 535-539.
- [22] Bak C, Roy AG, Son H. (2021). "Quality prediction for aluminum diecasting process based on shallow neural network and data feature selection technique". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 33(2021), 327-338.
- [23] Chen CY, Tuo L, Yoo CS, Pang L, Peng D, Sun J. (2009). "Mask defect auto disposition based on aerial image in mask production". *Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XVI*, 7379 (73791), 1-11.
- [24] Yagawa K, Ugajin K, Suenaga M, Kobayashi Y, Motokawa T, Hagihara K, Saito M, Itoh M. (2014). "High performance mask fabrication process for the next-generation mask production". *Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XXI*, 9256(925608), 1-7.
- [25] Shen B, Cheng M, Dong C, Xiao Y. (2021) "Battling counterfeit masks during the COVID-19 outbreak: quality inspection vs. blockchain adoption". *International Journal of Production Research*, 1-17.
- [26] Park, M., & Jeong, J. (2022). Design and Implementation of Machine Vision-Based Quality Inspection System in Mask Manufacturing Process. *Sustainability*, 14(10), 1-20, 6009.
- [27] Li, Z., & Wang, X. (2023). Optimizing process parameters for the production of intercalated melt-blown nonwoven materials for face masks based on machine learning algorithms. *Textile Research Journal*, 00405175231167862.
- [28] Masud M, Khan L, Thuraisingham B. (2011). *Data Mining for Active Defense, Data Mining Tools for Malware Detection*. New York, USA, CRC Press.
- [29] Tsai CF, Hsu YF, Lin CY, Lin WY. (2009). "Intrusion detection by machine learning: A review". *Journal of Expert Systems with Applications*, 36(2009), 11994–12000.
- [30] Akpınar H. (2017). *Data Data Mining Data Analysis*. 2nd ed. Istanbul Turkey, Papatya Press.
- [31] Pratama SF, Muda AK, Choo YH, Muda NA. (2011). "Computationally inexpensive sequential forward floating selection for acquiring significant features for authorship invarianceness in writer identification". *International Journal on New Computer Architectures and Their Applications*, 1(3), 581-598.
- [32] Han J, Kamber M, Pei J. *Data Mining Concepts and Techniques*. 3rd ed. University of Illinois at Urbana-Champaign Micheline Kamber Jian Pei Simon Fraser University, Waltham, USA, Elsevier, 2012.

- [33] Awad Aİ, Hassanien AE, Baba K. (September 3-5, 2013). "Linear correlation-based feature selection for network intrusion detection model". *Advances in Security of Information and Communication Networks. First International Conference, Cairo, Egypt.*
- [34] Guyon I, Elisseeff A. (2003). "An introduction to variable and feature selection". *Journal of Machine Learning Research*, 3(2003), 1157-1182.
- [35] Sutha K, Tamilselvi J. (2015). "A review of feature selection algorithms for data mining techniques". *International Journal on Computer Science and Engineering*, 7(6), 63-67.
- [36] Bolón V, Sánchez N, Alonso A. (2015). *Foundations of Feature Selection*. Editors: Sullivan B, Wooldridge M. *Feature Selection for High-Dimensional Data*. 23-26, London, United Kingdom, Springer.
- [37] Baoshuang Z, Yanying L, Zheng C. (2022). "A novel random multi-subspace based ReliefF for feature selection", *Knowledge-Based Systems*, 252 (2022), 109400.
- [38] Berry MW, Mohamed A, Yap BW. (2019). *Supervised and Unsupervised Learning for Data Science*. 1st ed. German, Springer Nature.
- [39] Mohri M, Rostamizadeh A, Talwalkar A. (2012). *Foundations of machine learning*. 2nd ed. London, England, MIT Press.
- [40] Bell J. (2015). *Machine Learning and the City: Applications in Architecture and Urban Design*. Editor: Carta S. *What Is Machine Learning*, 1-14, Indianapolis, Indiana, Wiley.
- [41] Lantz B. (2013). *Introducing Machine Learning*. Editors: Jones J, Sheikh A. *Machine Learning with R*. 20-22, Birmingham, UK, Packt Publishing.
- [42] Xu N. (2019). "Understanding the reinforcement learning". *Journal of Physics*, 12 (7), 1-6.
- [43] Alpaydın E. (2010). *Introduction to Machine Learning*. 2nd ed. London, England, MIT Press.
- [44] Flach P. (2012). *Machine Learning the Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data: Beyond Binary Classification*. 1st ed. New York, ABD, Cambridge University Press.
- [45] Hall M, Frank E, Holmes G, Pfahringer B, Reutemann P, Witten IH. (2009). "The Weka data mining software: an update". *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 11(1), 10–18.
- [46] Verma A, Mehta SA. (12-13 January 2017). "Comparative study of ensemble learning methods for classification in bioinformatics". *IEEE 7th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering, Noida, India.*
- [47] Alicılar HE, Col M. (2020). *COVID-19*, Editors: Memikoglu O, Genc V. *Effective approaches to protection from COVID-19*, 79-83, Ankara, Turkey, Press Ankara University.
- [48] Burkov A. *The Hundred Page Machine Learning Book*. Quebec, QC, Canada, 2019.
- [49] Yazıcıoğlu Y, Erdoğan S. (2014). *SPSS Applied Scientific Research Methods*. 4nd ed. Ankara, Turkey, Detay Publishing.

[50] Pudil P, Novovicová J. (1998). Novel Methods for feature Subset Selection with Respect to problem Knowledge. Editors: Liu H, Motoda H. Feature Extraction, Construction and Selection, 101-116. Boston, MA, Springer.

[51] Gholamy A, Kreinovich V, Kosheleva O. (2018). “Why 70/30 or 80/20 relation between training and testing sets: A pedagogical explanation”. The University of Texas, El Paso, USA, Departmental Technical Reports, UTEP-CS-18-09, 1-6.