

**V. ULUSAL
MÜHENDİSLİKTE BİLİMSEL VE MESLEKİ
ÇALIŞMALAR KONGRESİ
(UMUH BILMES 2022)
TAM METİN BİLDİRİ KİTABI**



ARALIK 2022

Kitabın Adı: V. Ulusal Mühendislikte Bilimsel ve Mesleki
Çalışmalar Kongresi Tam Metin Bildiri Kitabı

ISBN: 978-605-71214-4-8

Hazırlayanlar: Tolga YÜCEHAN
e-mail: tolgayucehan@gmail.com
Umut SARAY
e-mail: umutsaray@gmail.com

Yayın Tarihi: 24.12.2022



DÜZENLEME KURULU

Düzenleme Kurulu Başkanı

Öğr. Gör. Umut Saray Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Düzenleme Kurulu Başkan Yardımcısı

Dr. Tolga Yücehan Afyon Kocatepe Üniversitesi

Düzenleme Kurulu Üyeleri

Dr.	Cem Cüneyt Ersanlı	Sinop Üniversitesi
Dr.	Uğur Çavdar	İzmir Demokrasi Üniversitesi
Dr.	Elif Tezel Ersanlı	Sinop Üniversitesi
Dr.	Pınar Çavdar	İzmir Demokrasi Üniversitesi
Dr.	Canan Başlak	Selçuk Üniversitesi
Dr.	Munise Didem Demirbaş	Erciyes Üniversitesi
Dr.	Sefa Ersan Kaya	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Dr.	Dilek Aydemir	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Dr.	Atiye Kaş	Pamukkale Üniversitesi
Dr.	Abdil Karakan	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr.	Serkan Göksu	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Öğr. Gör.	Celal Altıntaş	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Öğr. Gör.	Erdem Kanişlı	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
-	Sinem Gülşen	-
-	Bahar Terzioğlu	-

Düzenleme Kurulu Sekreteryası

Öğr. Gör. Celal Altıntaş Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

- Sinem Gülşen -

- Bahar Terzioğlu -



BİLİM KURULU

Dr. Cem Cüneyt Ersanlı	Sinop Üniversitesi
Dr. Uğur Çavdar	İzmir Demokrasi Üniversitesi
Dr. Tolga Yücehan	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Dr. Mohammad Ali Ghorbani	University of Tabriz
Dr. İbrahim Uzun	Kırıkkale Üniversitesi
Dr. Bülent Kurt	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Vitaly Koshevyy	Odessa National Maritime Academy
Dr. Serhii Kravchuk	National Technical University of Ukraine
Dr. Márcio R. C. Reis	Federal Institute of Goias
Dr. Doru Vatau	University Politehnica Timisoara
Dr. Igor Nevliudov	Kharkiv National University of Radioelectronics
Dr. Yuriy Danyk	National Defense University of Ukraine
Dr. Erkan Afacan	Gazi Üniversitesi
Dr. Aşkın Güngör	Pamukkale Üniversitesi
Dr. Necmi Taşpınar	Erciyes Üniversitesi
Dr. Mevlida Operta	University of Sarajevo
Dr. Munise Didem Demirbaş	Erciyes Üniversitesi
Dr. Nacima Memic	University of Sarajevo
Dr. Salim A. Messaoudi	King Fahd University of Petroleum and Minerals
Dr. Yousef Nazzal	Zayed University
Dr. Alexey Babushkin	Ural Federal University
Dr. Selma Corbo	University of Sarajevo
Dr. Sabahudin Bajramovic	University of Sarajevo
Dr. Halil İbrahim Oğuz	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Fatih Taşpınar	Düzce Üniversitesi
Dr. İsa Navruz	Ankara Üniversitesi
Dr. Cahit Bilim	Mersin Üniversitesi
Dr. Sibel Güneş	Erciyes Üniversitesi



Dr. Pınar Çavdar	İzmir Demokrasi Üniversitesi
Dr. Ali Öztürk	Düzce Üniversitesi
Dr. Jasna Avdic	University of Sarajevo
Dr. Oktay Erdoğan	Pamukkale Üniversitesi
Dr. Michal Vary	Slovak University of Technology
Dr. Özlem Ulukut Çoşkun	Süleyman Demirel Üniversitesi
Dr. Recep Ekici	Erciyes Üniversitesi
Dr. Suat Sarıdemir	Düzce Üniversitesi
Dr. Fuat Okay	Kocaeli Üniversitesi
Dr. Fatih Polat	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Dr. Serpil Halıcı	Pamukkale Üniversitesi
Dr. Elif Tezel Ersanlı	Sinop Üniversitesi
Dr. Kadriye Yaman	Eskişehir Teknik Üniversitesi
Dr. Eduard Zharikov	National Technical University of Ukraine
Dr. Sameh Hadouaj	University of Carthage
Dr. Bilal Şenol	İnönü Üniversitesi
Dr. Halil Arslan	Cumhuriyet Üniversitesi
Dr. Utku Köse	Süleyman Demirel Üniversitesi
Dr. Osman Gökdoğan	Süleyman Demirel Üniversitesi
Dr. Mehmet Güçyetmez	Ahi Evran Üniversitesi
Dr. Salih Tosun	Düzce Üniversitesi
Dr. Feyza Gürbüz	Erciyes Üniversitesi
Dr. Güllü Kırat	Bozok Üniversitesi
Dr. Selda Kayral	Celal Bayar Üniversitesi
Dr. Ali Yıldız	Bozok Üniversitesi
Dr. Aslıhan Tırnakçı	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Esra Özhancı	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Meliha Aklıbaşında	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Seval Cömertler	Uşak Üniversitesi



Dr. Nihan Kaya	Hitit Üniversitesi
Dr. Cem Emeksiz	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Dr. Hasan Polat	Fırat Üniversitesi
Dr. Soner Buytoz	Fırat Üniversitesi
Dr. Praveen Kumar	Nss College of Engineering
Dr. Emre Kıyak	Eskişehir Teknik Üniversitesi
Dr. Mustafa Eker	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Dr. Özer Özdemir	Anadolu Üniversitesi
Dr. Mehmet Şenol	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Tülay Yağmur	Aksaray Üniversitesi
Dr. İlhami Karataş	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Dr. Fethi Dağdelen	Fırat Üniversitesi
Dr. Güngör Çağdaş Dinçel	Aksaray Üniversitesi
Dr. Serkan Yıldırım	Atatürk Üniversitesi
Dr. Özlem Toprak	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Dr. Adem Gölcük	Selçuk Üniversitesi
Dr. Yılmaz Güven	Kırklareli Üniversitesi
Dr. Nafel Doğdu	Akdeniz Üniversitesi
Dr. Olena Osharovska	Odessa National Academy
Dr. Mariia Skulysh	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Dr. Canan Başlak	Selçuk Üniversitesi
Dr. Sevgi Ünal Karakuş	Bartın Üniversitesi
Dr. Ahmad Bin Yussuf	University of Malaya
Dr. Asuman Duru	Uşak Üniversitesi
Dr. Yusuf Sert	Bozok Üniversitesi
Dr. Abdullah Elen	Bandırma Onyedil Eylül Üniversitesi
Dr. Gökçe Nur Yılmaz	TED Üniversitesi
Dr. Muradiye Karasu Ayata	Ahi Evran Üniversitesi
Dr. Derya Öğüt Yavuz	Uşak Üniversitesi



Dr. Nurcan Çalış Açıkbaz	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Dr. Gökhan Açıkbaz	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Dr. Ayşen Melda Çolak	Uşak Üniversitesi
Dr. Nurdoğan Topal	Uşak Üniversitesi
Dr. Emre Avuçlu	Aksaray Üniversitesi
Dr. Cem Boğa	Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi
Dr. Havva Dinler	Uşak Üniversitesi
Dr. Burcu Begüm Kenanoğlu	Uşak Üniversitesi
Dr. Esin Hande Bayrak Işık	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Dr. Mihrimah Özmen	Erciyes Üniversitesi
Dr. Özgür Demir	Muş Alparslan Üniversitesi
Dr. Nedim Muzoğlu	İstanbul Üniversitesi
Dr. Alperen Şahinoğlu	İstanbul Esenyurt Üniversitesi
Dr. Doğan Erdemir	Erciyes Üniversitesi
Dr. Mustafa Safa Yılmaz	Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi
Dr. Gökhan Özer	Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi
Dr. Bilge Hilal Çadırcı	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Dr. Rıdvan Koçyiğit	Atatürk Üniversitesi
Dr. Abdil Karakan	Afyon Kocatepe Üniversitesi



KONGRE PROGRAMI

SÖZLÜ SUNUMLAR				
16 Aralık 2022 - Cuma				
Oturum 1				
Salon Adı: UMUH BILMES 2022		Oturum Başkanı: ÖĞR. GÖR. UMUT SARAY Oturum Başkan Yardımcısı: ÖĞR. GÖR. ERDEM KANIŞLI		
Saat	Çalışmanın Başlığı	Tüm Yazarlar	Sorumlu Yazar	Sunum Yapan Yazar
16:00 - 16:10	GENİŞLETİLMİŞ DOĞAL GRAFİT (ENG) MALZEMESİNİN HİDROJEN DEPOLAMAYA ETKİSİ	GAMZE ATALMIŞ, KURSHOD SATTARKHANOV, RÜVEYDA N. KAPLAN, YÜKSEL KAPLAN	GAMZE ATALMIŞ	GAMZE ATALMIŞ
16:10 - 16:20	KOMPLEKS HİDRÜRLERİN HİDROJENASYON ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ	KURSHOD SATTARKHANOV, GAMZE ATALMIŞ, YÜKSEL KAPLAN	GAMZE ATALMIŞ	GAMZE ATALMIŞ
16:20 - 16:30	ND: YAG DARBELİ LAZER İLE AA7075 KAYNAK PROSES GELİŞTİRİLMESİ	ORKUN NURİ ASAN, FURKAN TURGUT, BARIŞ ERDOĞAN	ORKUN NURİ ASAN	FURKAN TURGUT
16:30 - 16:40	GELENEKSEL MOONWASH YÖNETİMİNİN ÖRME KUMAŞLAR ÜZERİNDEKİ DEFORMASYONUNU AZALTMAK AMACIYLA ALTERNATİF YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ	BUSE MERT, ALİ SEVİM, FUNDA SEVER	BUSE MERT	BUSE MERT
16:40 - 16:50	LAZER İNDÜKLENME YÖNTEMİ İLE POLİMERDEN GRAFEN ELDESİ	KADER ERDOĞAN, EMRE AKCAN, MEHMET UÇAR	KADER ERDOĞAN	KADER ERDOĞAN
16:50 - 17:00	DÜŞÜK KAPASİTELİ HAVA TEMİZLEME CİHAZINDA TÜRBÜLANSA VE TERS AKIŞA BAĞLI SES KAYNAKLARININ AZALTILMASI	S. FATİH KIRMIZIGÖL, BUSE ÇAKIR, MEHMET UÇAR	S.FATİH KIRMIZIGÖL	S.FATİH KIRMIZIGÖL
17 Aralık 2022 - Cumartesi				
Oturum 2				
Salon Adı: UMUH BILMES 2022		Oturum Başkanı: ÖĞR. GÖR. UMUT SARAY Oturum Başkan Yardımcısı: ÖĞR. GÖR. ERDEM KANIŞLI		
Saat	Çalışmanın Başlığı	Tüm Yazarlar	Sorumlu Yazar	Sunum Yapan Yazar
11:00 - 11:10	YERALTI OCAĞI GALERİLERDE OLUŞAN DRENAJ SULARININ KARAKTERİZASYONU VE ARITILABİLİRLİĞİ	BURCU TÜRK TEN, MUSTAFA IŞIK	BURCU TÜRK TEN	BURCU TÜRK TEN
11:10 - 11:20	TEKSTİL SEKTÖRÜNDE SU AYAK İZİ VE AZALTMA YOLLARI	EKİN TEMİZ, HÜLYA AKYAÇ ÖZEN, SEMRA ÇORUH	EKİN TEMİZ	EKİN TEMİZ
11:20 - 11:30	AMASYA İLİ KAMU HASTANELERİNDE TIBBİ ATIKLARIN YÖNETİMİ VE COVID-19 SALGIN DÖNEMİNİN TIBBİ ATIK MİKTARLARINA ETKİSİ	ÖZGE NUR ERARSLAN, SEMRA ÇORUH	ÖZGE NUR ERARSLAN	ÖZGE NUR ERARSLAN
11:30 - 11:40	AKILLI SÜRDÜRÜLEBİLİR ATIK YÖNETİMİ STRATEJİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE BİR HİBRİT BULANIK AHP-TOPSIS UYGULAMASI	BİHTER GİZEM DEMİRCAN, KAN YETİLMEZSOY	BİHTER GİZEM DEMİRCAN	BİHTER GİZEM DEMİRCAN
11:40 - 11:50	TRANSFER ÖĞRENME YARDIMIYLA GLİOBLOSTOMA BEYİN TÜMÖRLERİNİN TESPİTİNDE VERİ ÇOĞALTIMI VE HİPERPARAMETRELERİN ETKİSİ	NEDİM MUZOĞLU	NEDİM MUZOĞLU	NEDİM MUZOĞLU
11:50 - 12:00	DİJİTAL MAMOGRAFİ DEDEKTÖRLERİNDE HOMOJENLİĞİN İNCELENMESİ	MELİKE KAYA KARAASLAN, NEDİM MUZOĞLU, ÖZCAN GÜNDOĞDU	MELİKE KAYA KARAASLAN	MELİKE KAYA KARAASLAN



Oturum 3				
Salon Adı: UMUH BILMES 2022		Oturum Başkanı: ÖĞR. GÖR. UMUT SARAY Oturum Başkan Yardımcısı: ÖĞR. GÖR. ERDEM KANIŞLI		
Saat	Çalışmanın Başlığı	Tüm Yazarlar	Sorumlu Yazar	Sunum Yapan Yazar
13:00 - 13:10	ENDÜSTRİYEL ROBOT KOL SİSTEMLERİ VE UYGULAMALARI	DENİZCAN GÖKALP	DENİZCAN GÖKALP	DENİZCAN GÖKALP
13:10 - 13:20	ISI KALKANI ÜRETİMİNDE KULLANILAN KALIBIN ÇELİK ALAŞIMINDAN ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ VE KARAKTERİZASYONU	RAMAZAN TOYGUN KIZIL, DUYGU KAPLAN, RABİA ŞEVVAL AKAN, MUHAMMET ULUDAĞ	RAMAZAN TOYGUN KIZIL	DUYGU KAPLAN
13:20 - 13:30	2 ZAMANLI BENZİNLİ BİR MOTOSİKLET MOTORUNDA TERMAL BARİYER KAPLAMANIN MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	FADEL ALHAMADO ALCHEHABI, M. AKİF KUNT, HALUK GÜNEŞ	FADEL ALHAMADO ALCHEHABI	FADEL ALHAMADO ALCHEHABI
13:30 - 13:40	HAFİFLETİLMİŞ MODÜLER ROBOT TUTUCU TASARIMI	MURAT ONAT, ENES KORKUT, ORTAÇ AKDİKMEN	MURAT ONAT	MURAT ONAT
13:40 - 13:50	BASINÇLI HAVA SİSTEMLERİNDE HAVA KAÇAK TESPİTİ VE ENERJİ VERİMLİLİĞİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ANALİZİ	AHMET FARUK FIRAT, ÇİĞDEM GÜNDOĞAN TÜRKER	AHMET FARUK FIRAT	AHMET FARUK FIRAT
13:50 - 14:00				
Ara				
Oturum 4				
Salon Adı: UMUH BILMES 2022		Oturum Başkanı: ÖĞR. GÖR. UMUT SARAY Oturum Başkan Yardımcısı: ÖĞR. GÖR. ERDEM KANIŞLI		
Saat	Çalışmanın Başlığı	Tüm Yazarlar	Sorumlu Yazar	Sunum Yapan Yazar
14:30 - 14:40	İNTERMETALİK METAL HİDRÜRLERDE HİDROJEN DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ	KURSHOD SATTARKHANOV, GAMZE ATALMIŞ, YÜKSEL KAPLAN	GAMZE ATALMIŞ	KURSHOD SATTARKHANOV
14:40 - 14:50	KAYNAKLI ÜRETİM HATTI ALTERNATİF FİKSTÜR TASARIMI	MURAT ONAT, ENES KORKUT, ORTAÇ AKDİKMEN	MURAT ONAT	MURAT ONAT
14:50 - 15:00	HIZLI PROTOTİPLEME TEKNİĞİ İLE ÜRETİLEN POROZ 316L PASLANMAZ ÇELİK YAPILARIN FARKLI ELEKTROLİTLER KULLANILARAK ANODİK YÜZEY MODİFİKASYONU	AZADE YELTEN, BATUR ERCAN	AZADE YELTEN	AZADE YELTEN
15:00 - 15:10	KEÇELİ VERNİK APLİKASYONUNA SAHİP YATAY TİP MAKİNELERDE ÜRETİLEN EMAYELİ BAKIR TELLERDE OLUŞAN YÜZEY PROBLEMLERİNE KEÇE TİPLERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ	İSMAİL HASER, CEYLAN KARABUDAK	İSMAİL HASER	CEYLAN KARABUDAK
15:10 - 15:20				
15:20 - 15:30				



18 Aralık 2022 - Pazar**Oturum 5****Salon Adı:** UMUH BILMES 2022**Oturum Başkanı:** ÖĞR. GÖR. Umut Saray
Oturum Başkan Yardımcısı: ÖĞR. GÖR. Erdem Kanişlı

Saat	Çalışmanın Başlığı	Tüm Yazarlar	Sorumlu Yazar	Sunum Yapan Yazar
11:00 - 11:10	ANKASTRE FIRINLARDA ISIL VERİMLİLİĞE ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	MUHARREM KEYFOĞLU, MEHMET UÇAR, S. FATİH KIRMIZIGÖL	MUHARREM KEYFOĞLU	MUHARREM KEYFOĞLU
11:10 - 11:20	BİR EMNİYET KAVRAMASI MODELİ	ALP İMER, FERİT SİMSAROĞLU, VOLKAN YIKGEÇ, BURAK ÖNDER	ALP İMER	ALP İMER
11:20 - 11:30	İN-VİTRO HÜCRE MEKANİK STİMÜLASYON CİHAZI TASARIMI VE İMALATI	AHMET BATUR, MUHAMMED TARIK ÇÖPOĞLU, BÜŞRA SUDE ŞANLIBAYRAK, ZEYNEP DEĞİRMENCİOĞLU, EYLEM KURULGAN DEMİRCİ, HAKAN OFLAZ	AHMET BATUR	AHMET BATUR
11:30 - 11:40	AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU İLE BUĞDAY KURUTMAYA YÖNELİK İNCE TABAKALI KURUTMA MODELLERİNİN İNCELENMESİ	ALPER DOĞAN, SENEM ŞENTÜRK LÜLE	SENEM ŞENTÜRK LÜLE	SENEM ŞENTÜRK LÜLE
11:40 - 11:50	AKILLI EV TEKNOLOJİLERİNİN KABULÜ VE YENİLİKÇİ TÜKETİCİ DAVRANIŞLARININ DEĞERLENDİRİLMESİNDE ANKETLER	H. NURGÜL DURMUŞ ŞENYAPAR	H. NURGÜL DURMUŞ ŞENYAPAR	H. NURGÜL DURMUŞ ŞENYAPAR
11:50 - 12:00	AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU AKIŞ HİDRODİNAMİĞİNİN BUĞDAY KURUTMA İÇİN HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ	ALPER DOĞAN, SENEM ŞENTÜRK LÜLE	SENEM ŞENTÜRK LÜLE	SENEM ŞENTÜRK LÜLE

Ara

Oturum 6**Salon Adı:** UMUH BILMES 2022**Oturum Başkanı:** ÖĞR. GÖR. Umut Saray
Oturum Başkan Yardımcısı: ÖĞR. GÖR. Erdem Kanişlı

Saat	Çalışmanın Başlığı	Tüm Yazarlar	Sorumlu Yazar	Sunum Yapan Yazar
13:00 - 13:10	HAVAYOLU İŞLETMELERİNDE OPERASYONEL PERFORMANSIN SWARA-TOPSIS MODELİ İLE ANALİZİ	RABİA DEMİR GÜVEN, EMİN BAŞAR BAYLAN	RABİA DEMİR GÜVEN	RABİA DEMİR GÜVEN
13:10 - 13:20	SOSYAL MEDYA VERİLERİ İLE DUYGU ANALİZİ	SEVGİ GÜLÇİN AKTEMUR, MİHRİMAH ÖZMEN, SİNAN KUL	SEVGİ GÜLÇİN AKTEMUR	SEVGİ GÜLÇİN AKTEMUR
13:20 - 13:30	REKRİSTALİZASYON YÖNTEMİ İLE MONO AMONYUM FOSFAT ÜRETİMİ	MEHMET YILMAZ, CANSU GÜLER, YUNUS EMRE BELET	MEHMET YILMAZ	MEHMET YILMAZ
13:30 - 13:40	2018 TBDY'YE GÖRE MEVCUT BİNALARIN LİNER OLMAYAN YÖNTEMLE PERFORMANS ANALİZİNİN YAPILMASI	RECEP DELİBAŞ, EMİN HÖKELEKLİ	RECEP DELİBAŞ	RECEP DELİBAŞ
13:40 - 13:50				
13:50 - 14:00				



Oturum 7**Salon Adı:** UMUH BILMES 2022**Oturum Başkanı:** ÖĞR. GÖR. UMUT SARAY
Oturum Başkan Yardımcısı: ÖĞR. GÖR. ERDEM KANIŞLI

Saat	Çalışmanın Başlığı	Tüm Yazarlar	Sorumlu Yazar	Sunum Yapan Yazar
14:30 - 14:40	YERE NÜFUZ EDEN RADAR SİSTEMİNDE ANTEN POLARİZASYONU YARDIMIYLA HEDEF CİSİMLERİN GEOMETRİK NİTELİKLERİNİN KESTİRİMİ	MERVE NUR DUTĞUN, AHMET SERDAR TÜRK	MERVE NUR DUTĞUN	MERVE NUR DUTĞUN
14:40 - 14:50	ENTEGRE MAST YAPISININ GEMİ RADAR KESİT ALANI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	SEYHAN ÇAKAL, MUSTAFA HELVACI	SEYHAN ÇAKAL	SEYHAN ÇAKAL
14:50 - 15:00	İNSAN ODAKLI AYDINLATMA KONTROLLÜ AĞ GEÇİDİ CİHAZI GELİŞTİRİLMESİ	RIFAT ŞAHİNER, AHMET FEYZİOĞLU	RIFAT ŞAHİNER	RIFAT ŞAHİNER
15:00 - 15:10	ELEKTRONİK AYGITLARIN GELENEKSEL ARIZA-FİZİĞİ METODU VE HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA SİMÜLASYON VERİLERİ İLE GÜVENLİ KULLANIM ÖMÜRLERİNİN BELİRLENMESİ	CELAL ASLAN, AYTÜLÜ AKBAŞLI	CELAL ASLAN	CELAL ASLAN
15:10 - 15:20	RÜZGAR TÜRBİNİ TRAFOLARI TASARIM ZORLUKLARI: İNCELENMESİ VE ANALİZİ	MURAT KAVUK, HASAN YILDIZ, AHMET FEYZİOĞLU	MURAT KAVUK	MURAT KAVUK
15:20 - 15:30				



İÇİNDEKİLER

DÜZENLEME KURULU	ii
BİLİM KURULU	iii
KONGRE PROGRAMI	vii
İÇİNDEKİLER.....	xi
SÖZLÜ SUNUMLAR / ORAL PRESENTATION	1
IN-VİTRO HÜCRE MEKANİK STİMÜLASYON CİHAZI TASARIMI VE İMALATI	2
1. GİRİŞ VE KURAMSAL ÇERÇEVE	3
2. AMAÇ	4
3. KAPSAM	4
4. YÖNTEM	4
5. BULGULAR	7
6. SONUÇ	8
7. KAYNAKÇA	8
BİR EMNİYET KAVRAMASI MODELİ.....	9
1. GİRİŞ.....	10
2. MATERYAL VE METOD.....	12
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	15
4. KAYNAKÇA	15
AKILLI SÜRDÜRÜLEBİLİR ATIK YÖNETİMİ STRATEJİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE BİR HİBRİT BULANIK AHP-TOPSIS UYGULAMASI	17
1. GİRİŞ.....	18
2. MATERYAL VE METOT	19
3. BULGULAR	27
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	29
5. KAYNAKÇA	29
YERALTI OCAĞI GALERİLERDE OLUŞAN DRENAJ SULARININ KARAKTERİZASYONU VE ARITILMASI	31
1. GİRİŞ.....	31
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	41
5. KAYNAKÇA	42



GELENEKSEL MOONWASH YÖNETİMİNİN ÖRME KUMAŞLAR ÜZERİNDEKİ DEFORMASYONUNU AZALTMAK AMACIYLA ALTERNATİF YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ.....	43
1. GİRİŞ.....	43
2. MATERYAL VE METOT	44
3. BULGULAR VE SONUÇ.....	45
4. KAYNAKÇA	47
ELEKTRONİK AYGITLARIN GELENEKSEL ARIZA-FİZİĞİ METODU VE HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA SİMÜLASYON VERİLERİ İLE GÜVENLİ KULLANIM ÖMÜRLERİNİN BELİRLENMESİ.....	49
1. GİRİŞ.....	49
2. ARIZAYA YOL AÇAN OLASI MEKANİZMALARIN BELİRLENMESİ.....	50
3. ÜRÜNDE ARIZA OLUŞTURABİLECEK YÜKSEK ORANDA HIZLANDIRILMIŞ STRESLERİN BELİRLENMESİ.....	50
4. ARIZALARIN MODELLENMESİ VE BİR DAĞILIM EĞRİSİNİN ELDE EDİLMESİ	51
5. ORTALAMA ARIZA SÜRESİNİN (MTTF) BULUNMASI	53
6. BULGULAR VE SONUÇLAR.....	53
7. KAYNAKÇA	53
ENDÜSTRİYEL ROBOT KOL SİSTEMLERİ VE UYGULAMALARI.....	54
1. GİRİŞ.....	54
2. METODOLOJİ.....	56
3. UYGULAMA ÖRNEKLERİ	57
4. SONUÇ	60
5. KAYNAKÇA	61
2 ZAMANLI BENZİNLİ BİR MOTOSİKLET MOTORUNDA TERMAL BARİYER KAPLAMANIN MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ.....	63
1. GİRİŞ.....	63
2. TERMAL BARİYER KAPLAMA.....	64
3. MATERYAL VE METOT	65
4. TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	67
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	69
6. KAYNAKÇA	69
GENİŞLETİLMİŞ DOĞAL GRAFİT (ENG) MALZEMESİNİN HİDROJEN DEPOLAMAYA ETKİSİ	72
1. GİRİŞ.....	72
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	73
3. SONUÇLAR.....	75



4. KAYNAKÇA	76
KOMPLEKS HİDRÜRLERİN HİDROJENASYON ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ	77
1. GİRİŞ.....	77
2. ALANATLAR.....	79
3. BORHİDRÜRLER	82
4. SONUÇ	84
5. KAYNAKÇA	85
İNTERMETALİK METAL HİDRÜRLERDE HİDROJEN DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ	88
1. GİRİŞ.....	88
2. AB ₅ ALAŞIMLAR	91
3. AB ₂ ALAŞIMLAR	92
4. AB ₃ ALAŞIMLAR	94
5. AB ALAŞIMLAR	95
6. SONUÇLAR.....	96
7. KAYNAKÇA	98
AKILLI EV TEKNOLOJİLERİNİN KABULÜ VE YENİLİKÇİ TÜKETİCİ DAVRANIŞLARININ DEĞERLENDİRİLMESİNDE ANKETLER	101
1. GİRİŞ.....	101
2. YENİLİKÇİ TÜKETİCİ DAVRANIŞI İÇİN ANKET HAZIRLANMASI	102
3. AKILLI EV TEKNOLOJİLERİNİN KABULLENİLMESİ VE BENİMSENMESİ	103
4. SONUÇ	105
5. KAYNAKÇA	105
YERE NÜFUZ EDEN RADAR SİSTEMİNDE ANTEN POLARİZASYONU YARDIMIYLA HEDEF CİSİMLERİN GEOMETRİK NİTELİKLERİNİN KESTİRİMİ	107
1. GİRİŞ.....	107
2. BİSTATİK YNR SİSTEMİ TASARIMI	108
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	110
4. SONUÇ	116
5. KAYNAKÇA	116
HAFİFLETİLMİŞ MODÜLER ROBOT TUTUCU TASARIMI.....	117
1. GİRİŞ.....	117
2. ÇALIŞMANIN AMACI VE TASARIM SÜRECİ.....	119
3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	124
4. KAYNAKÇA	125
KAYNAKLI ÜRETİM HATTI ALTERNATİF FİKSTÜR TASARIMI	126
1. GİRİŞ.....	126



2. ÇALIŞMANIN AMACI VE TASARIM SÜRECİ.....	127
3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	132
4. KAYNAKÇA	132
ND; YAG DARBELİ LAZER İLE AA7075 KAYNAK PROSES GELİŞTİRİLMESİ	134
1. GİRİŞ.....	134
2. LAZER IŞIĞI MALZEME ETKİLEŞİMİ	135
3. DENEYSEL KURULUM	138
4. SONUÇLAR.....	141
5. KAYNAKÇA	142
HAVAYOLU İŞLETMELERİNDE OPERASYONEL PERFORMANSIN SWARA-TOPSIS MODELİ İLE ANALİZİ	144
1. GİRİŞ.....	144
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	145
3. SONUÇ	147
4. KAYNAKÇA	149
ISI KALKANI ÜRETİMİNDE KULLANILAN KALIBIN ÇELİK ALAŞIMINDAN ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ VE KARAKTERİZASYONU	151
1. GİRİŞ.....	151
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	152
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	153
4. SONUÇLAR.....	155
5. KAYNAKÇA	155
2018 TBDY'YE GÖRE MEVCUT BİNALARIN LİNER OLMAYAN YÖNTEMLERLE PERFORMANS ANALİZİNİN YAPILMASI	156
1. GİRİŞ.....	156
2. DEPREM.....	156
3. PERFORMANS DÜZEYİ DEĞERLENDİRME	157
4. MEVCUT YAPININ DEĞER TESPİTİ	159
5. YAPININ PERFORMANS ANALİZİ	161
6. GÜÇLENDİRME	162
7. SONUÇLAR.....	162
8. KAYNAKÇA	163
AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU İLE BUĞDAY KURUTMAYA YÖNELİK İNCE TABAKALI KURUTMA MODELLERİNİN İNCELENMESİ.....	164
1. GİRİŞ.....	164
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	165
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	166



4. SONUÇ	168
5. KAYNAKÇA	168
AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU AKIŞ HİDRODİNAMİĞİNİN BUĞDAY KURUTMA İÇİN HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ	171
1. GİRİŞ.....	171
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	173
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	174
4. SONUÇ	179
5. KAYNAKÇA	179
ENTEGRE MAST YAPISININ GEMİ RADAR KESİT ALANI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	181
1. GİRİŞ.....	181
2. RADAR KESİT ALANI	182
3. ANALİZLER.....	184
4. SONUÇLAR.....	194
5. KAYNAKÇA	195



SÖZLÜ SUNUMLAR / ORAL PRESENTATION

SÖZLÜ SUNUMLAR



IN-VİTRO HÜCRE MEKANİK STİMÜLASYON CİHAZI TASARIMI VE İMALATI

**Ahmet Batur ^{1*}, Muhammed Tarık Çöpoğlu ², Büşra Sude Şanlıbayrak ³,
Zeynep Değirmencioglu ⁴, Eylem Kurulgan Demirci ⁵, Hakan Oflaz ⁶**

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Türkiye

ORCID ID:0000-0002-2166-5912, ahmetbatur@gmail.com

² Gebze Teknik Üniversitesi, Biyomühendislik Bölümü, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-3225-0851, mtarik@gtu.edu.tr

³ Gebze Teknik Üniversitesi, Biyomühendislik Bölümü, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-3446-903X, sudesanlibayrak@outlook.com

⁴ Gebze Teknik Üniversitesi, Biyomühendislik Bölümü, Türkiye

ORCID ID: 0000-0003-3625-5788, zeynepdoglu7@gmail.com

⁵ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kimya Bölümü, Türkiye

ORCID ID:0000-0003-1180-7195, eylemkurulgan@iyte.edu.tr

⁶ Gebze Teknik Üniversitesi, Biyomühendislik Bölümü, Türkiye

ORCID ID:0000-0003-4366-1901, hakanoflaz@gmail.com

*** Sorumlu Yazar**

Özet

Canlıların temel yapı taşları olarak adlandırılan hücreler, bir canlının yapısal ve işlevsel özelliklerini gösterirler. Hücrelerle yapılan in vitro deneyler, canlıların temel süreçlerinin incelenmesinde, örneğin çeşitli hastalıkların araştırılmasında ve bu hastalıklara çare bulunmasında büyük önem taşır. Hücrelerin yaşayabileceği iki tür kuvvet vardır. Bunlar dış kuvvetler ve kendiliğinden oluşan (iç) kuvvetler olarak ikiye ayrılır. Hücreler, dış kuvvetlere yanıt olarak iç kuvvetler üretebilir. Bu kuvvetler, hücre davranışını etkileyerek doku ve organların büyüme ve gelişmesinde rol oynar. Harici bir mekanik kuvvet uygulayarak hücreleri in vitro uyarmak mümkündür. Mekanik stimülasyon, insan sağlığı ve hastalıklarının birçok farklı yönü üzerinde etkisi olan hücrelerin deformasyonuna ve yeniden şekillenmesine neden olabilir. Örneğin, kök hücreler mekanik sinyallere yanıt olarak farklılaşabilir. Doğal uyaranlar in vivo olarak mevcuttur. Bu uyarıları in vitro oluşturmak için in vitro mekanik stimülasyon sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, hücre kültürüne farklı hassasiyet ve homojenlik seviyelerinde mekanik uyarım uygular. Bu çalışma, moleküler biyoloji çalışmalarda ya da medikal uygulamalarda kullanılmakta olup belli dokulara veya hücrelere mekanik uyarım uygulayarak dokuların veya hücrelerin mekanik özelliklerini belirleyen ve aynı zamanda kök hücre veya farklılaşmış hücrelerin başka hücre tipine farklılaşmasının sağlanmasında kullanılan mekanik uyarım sisteminin geliştirilmesi ile ilgilidir. Tasarlanan ve prototip olarak üretilen mekanik stimülasyon cihazı deneylere tabi tutuldu ve mekanik olarak uyarılmayan kontrol grubundaki hücreler ile mekanik olarak uyarılan deney grubundaki hücrelerin hücre büyüme hızları karşılaştırıldı. Deney grubunda hücre büyümesinin daha fazla olduğu gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Kök Hücre, Doku Mühendisliği, Mekanik Stimülasyon, Hücre uyarımı, Biyomekanik



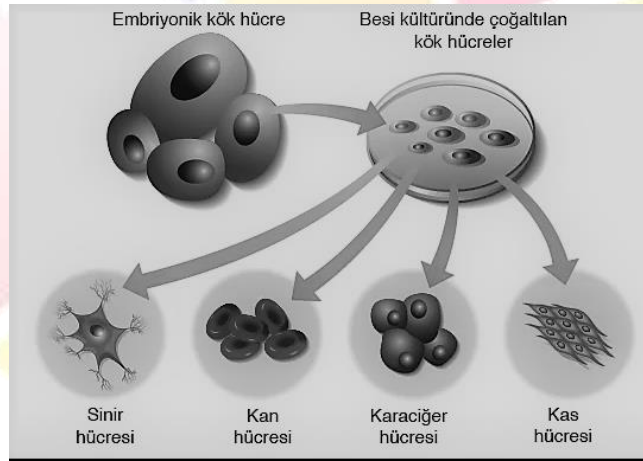
1. Giriş ve Kuramsal Çerçeve

Günümüzde Doku Mühendisliği çalışmaları, tedavi süreçlerinde büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmalarda anahtar kelime kök hücrelerdir. Kök hücreler, kendini yenileme özelliğe sahip, özelleşmiş hücrelere doğru farklılaşabilen, çok hücreli canlılarda doku ve organları oluşturan hücrelerdir. İn-vitro hücre kültürü uygulamaları sayesinde doku ve organ üretimi mümkün hale gelmiştir.

Hücrelerin içinde yer aldığı, hücreleri fiziksel ve kimyasal olarak etkileyen ve hücrelerin sınırlarını çizen yapıya Ekstraselüler matriks (ECM) denir. Hücreler, ECM'den gelen uyarımlara verdikleri tepkiler sayesinde gelişirler ve farklılaşırlar. (Wade & Burdick, 2012).

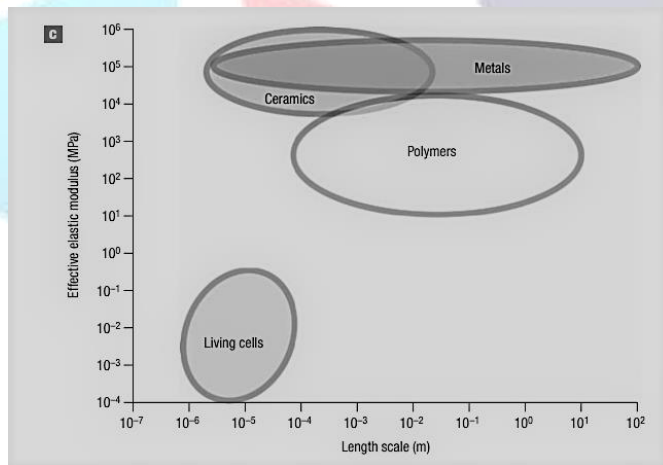
Mekanotransdüksiyon, hücrelerin fiziksel uyarımları algılaması için biyokimyasal sinyallere dönüşmesidir. Hücreler, çevreden gelen fiziksel uyarımları algılar ve çeşitli iç kuvvetler yaratarak uyarımlara yanıt verirler. İç kuvvetin yaratılması için yapılan kasılmalar aynı zamanda hücrenin büyümesini ve gelişmesini sağlar. (Humphrey, Dufresne & Schwartz, 2014).

ECM, her dokuda farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahiptir. Dolayısıyla doku hücresi bu özellikler doğrultusunda özelleşecektir. (Mouw, Ou & Weaver, 2014).



Şekil 1: Kök hücre farklılaşmasını anlatan şematik bir görsel

Literatürde, çeşitli seramik, metal ve polimerlerin, canlı hücrelerle elastisite modülü gibi mekanik özellikleri bakımından kıyaslandığı çalışmalar yer almaktadır. (Bao & Suresh, 2003).



Şekil 2: Canlı hücreler ile çeşitli mühendislik malzemelerinin elastisite modülü bakımından karşılaştırılması

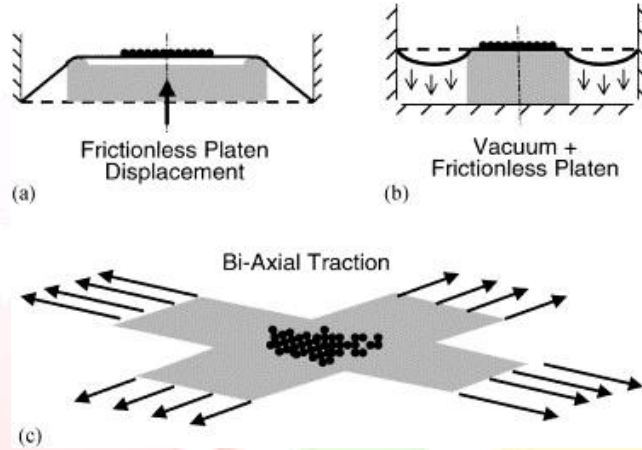
Sonuç olarak doku ve hücre çalışmalarındaki uygulamalar mekanik, kimya, biyoloji, genetik gibi alanları içeren multidisipliner bir özelliğe sahiptir. Bu durum yapılan uygulamaları



zorlaştırmaktadır. Bu çalışma; bu probleme makine mühendisliği ve biyomühendislik yaklaşımlarını bir arada kullanarak çözüm bulmayı hedeflemektedir.

2. Amaç

Bu çalışmanın amacı, hücreleri mekanik olarak uyararak hücrelerin gelişmesini ve farklılaşmasını hızlandıran bir hücre stimülasyon cihazının tasarlanması ve üretilmesidir. Bugüne kadar hücrelerin in vitro mekanik uyarılması için birçok sistem geliştirilmiştir. Bu tür sistemler, hidrostatik basınç, sıvı kesme gerilimi veya substrat gerilimi gibi mekanik girdilerin kontrollü dağılımına sahip hücre kültürü sistemlerini içerir. (Brown, 2000)



Şekil 3: Literatürde yer alan çeşitli sistemlerin şematik görünümü

Ancak bu sistemlerin en önemli sorunu hücre kültürü üzerine uygulanan mekanik uyarının hücre kültürü boyunca homojen bir dağılım göstermemesidir. Uyarıların kültür içerisinde homojen bir şekilde yayılmaması, hücrelerin farklı tepkiler oluşturmalarına neden olabilir. Ayrıca araştırılacak etkinin hücreler üzerinde gözlemlenebilirlik oranını azaltır. Buradan hareketle, mekanik uyarıların hücre kültürü boyunca homojen bir dağılım yapacağı bir sistemin üretilmesi tasarım kriteri olmuştur.

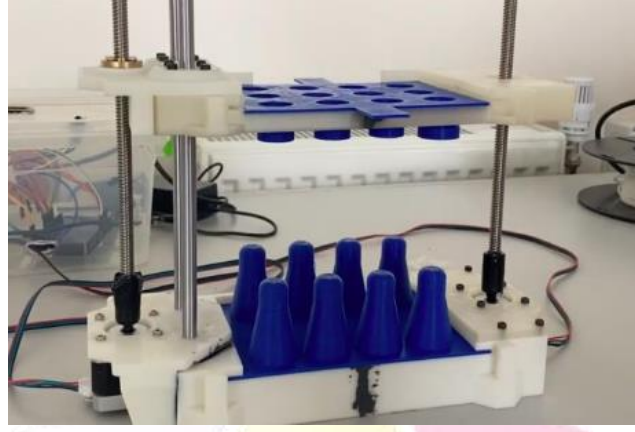
3. Kapsam

Litaratürde var olmayan, özgün değerlere sahip hücre stimülasyon cihazı Gebze Teknik Üniversitesi Biyomühendislik Bölümü Biyomekanik Laboratuvarı'nda tasarlanmış ve yine bu laboratuvardaki 3D yazıcılarda prototip olarak üretilmiştir. Yine aynı bölümün laboratuvarlarında inkübatör içinde hücre kültürü ekimi yapılarak 6814 döngülük süreçte hücre kültürü uyarılarak cihaz test edilmiş ve sonuçlar mikroskopla gözlemlenip kayıt altına alınmıştır.

4. Yöntem

Cihaz alt ve üst iki plakadan oluşmaktadır. Üst plakaya montajlanan well plate içine hücre kültürü ekilmiştir. Ekimin yapıldığı well plate taban yüzeyi elastik bir malzemedir. Cihazın alt kısmında ise üst tabakada yer alan çukurların elastik yüzeyine girdi yaparak çukurlardaki hücre kültürünü uyuracak çıkıntılar mevcuttur.





Şekil 4: Yeni tasarlanan cihazın genel görünümü

Cihaz üzerindeki tüm plastik parçalar 3D yazıcıda üretilmiştir. Aşağıdaki görsellerde görüleceği gibi membran well plate yapısının alt kısmına plastik kapaklar yardımı ile sıkı geçme ile montajlanmıştır.



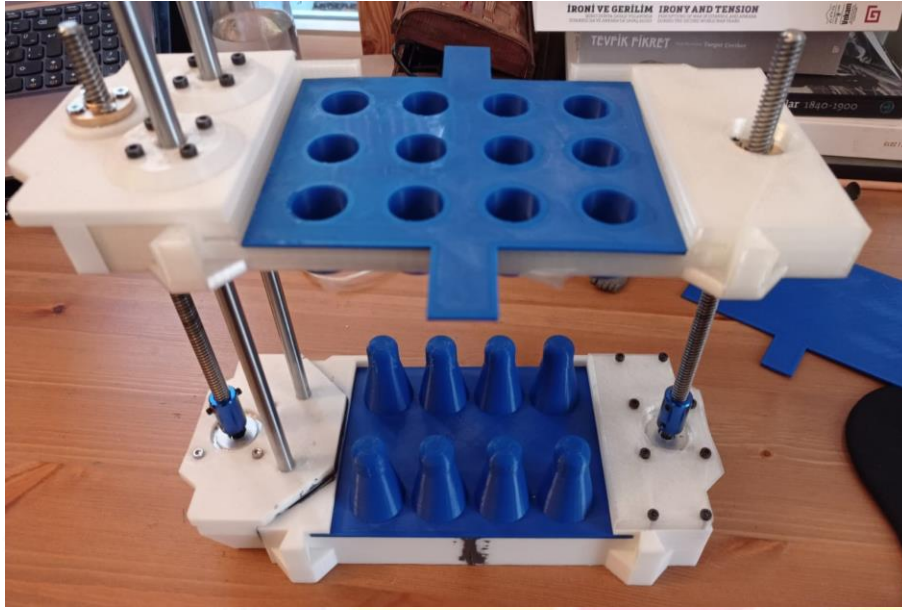
Şekil 5: Membranı montajlama görevine sahip plastik kapaklar



Şekil 6: Montaj tamamlandıktan sonra Well plate yapısının tabanı

Üst tabakada hücre kültürünün ekildiği 12 adet çukur vardır. Alt kısımda ise uyarımda bulunmak için 8 adet çıkıntı vardır. Uyarılmayan 4 hücre kültürü grubunu ise kontrol grubu olarak nitelendirebiliriz. Bu tasarım bize karşılaştırmalı sonuç çıkarma imkanı sunmuştur.

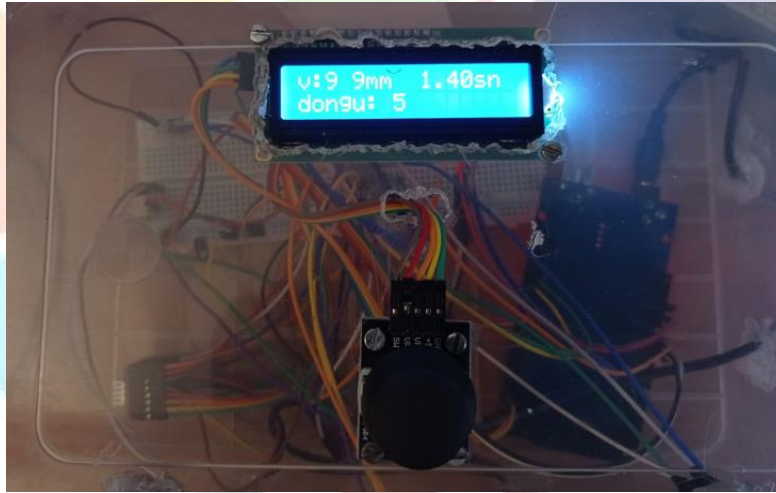




Şekil 7: Alt tabakada 8 adet stimülatör çıkıntı mevcuttur

Hareket, cihazının her iki tarafında yer alan step motorlar yardımı ile sağlanmıştır. Motorların sağa ve sola hareketinde dişli miller yardımıyla üst tabla yukarı ve aşağı hareket etmektedir. Aşağı yönde harekette alt tabakada yer alan çıkıntılar ile üst tabakada yer alan membran temas etmekte, bu temas membran üzerine ekili olan hücre kültürünün mekanik olarak uyarılmasını sağlamaktadır. Üst tabla yukarı yönde hareket ettiğinde ise temas kesilmekte, ardından tekrar aşağı yönde hareketle döngü devam etmektedir.

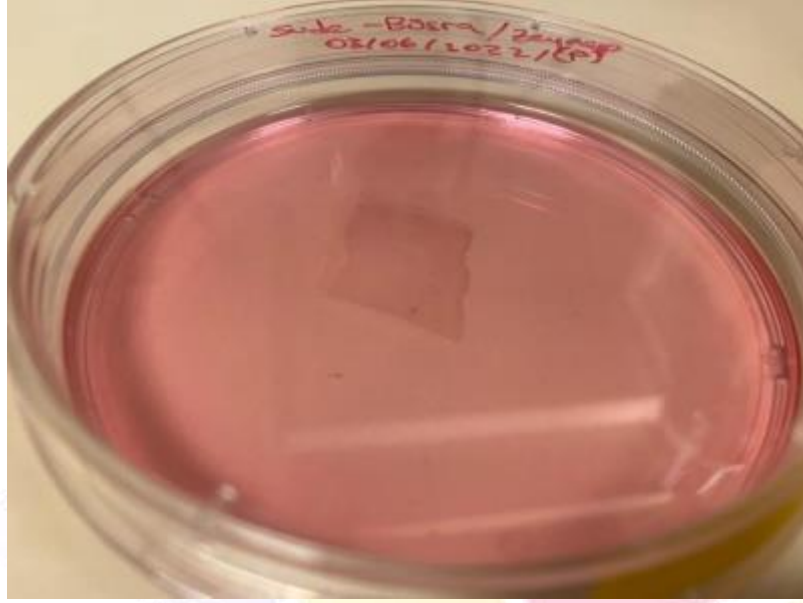
Step motorların hareketi elektronik devre ile kontrol edilebilmektedir. Bu sayede üst tablanın hızı, membrana kaç milimetre girdi olacağı ve döngünün tamamlanma süresi deney öncesi ayarlanabilmektedir. Bu durum, farklı girdilerle deneylerin yapılabilmesini sağlamaktadır.



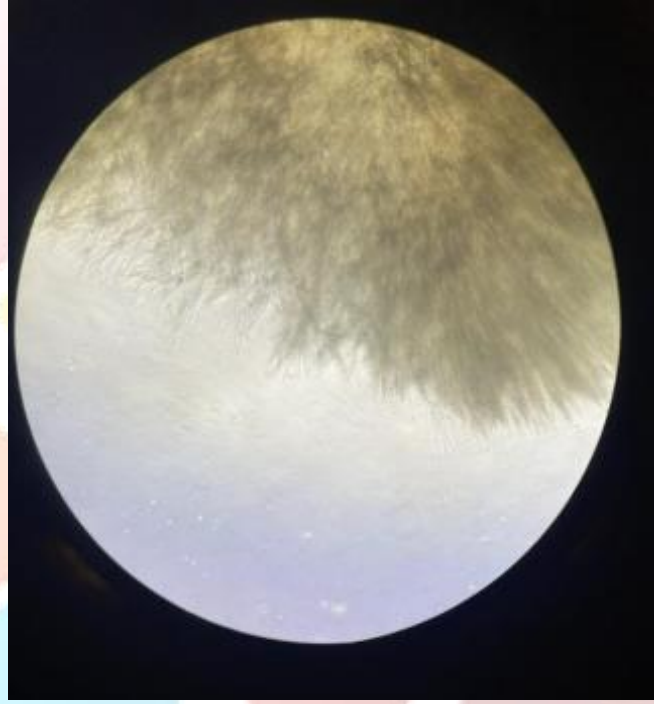
Şekil 8: Elektronik devre

Hücre ekimi yapılan membran malzemesi için tasarım kriterleri; hücre kültürünün yüzeye tutunabilmesi, oksitlenme yaşanmaması, malzemenin elastik olması ve sıvı geçirgen olmamasıdır. Bu doğrultuda kuzu bağırsağı ve doğum kontrolü ve cinsel yolla bulaşan hastalıkları engellemek için kullanılan kondom üzerlerine hücre ekilerek üç gün boyunca test edilmiştir. Kuzu bağırsağında ilk gün hücre çoğalması daha hızlı olsa da üç günün sonunda bakteri üremesi yaşanmış; kondom kullanılan petri kabında ise hücre büyümesi ve proliferasyonu pozitif olarak gözlemlendiğinden kondomun membran olarak kullanılmasına karar verilmiştir.





Şekil 9: Petri kabında kondom testi



Şekil 10: Kuzu bağırsağında bakteri üremesi

5. Bulgular

Çalışma, multidisipliner bir yapıya sahiptir ve iki önemli temel üzerine oturmaktadır. Bunlardan ilki cihazın mekanik tasarımının yapılması ve üretilmesi. Bu kısım mekanik arka plana sahip Makine Mühendisleri tarafından yapıldı ve geliştirildi. Diğer önemli kısım ise hücre ekilecek membranın üretilmesi ve geliştirilmesi ve de cihazın hücre kültürü ekilerek laboratuvarında test edilmesi idi. Bu kısımdaki sorumluluk ise Biyomühendislik öğrencileri tarafından üstlenilmiştir.

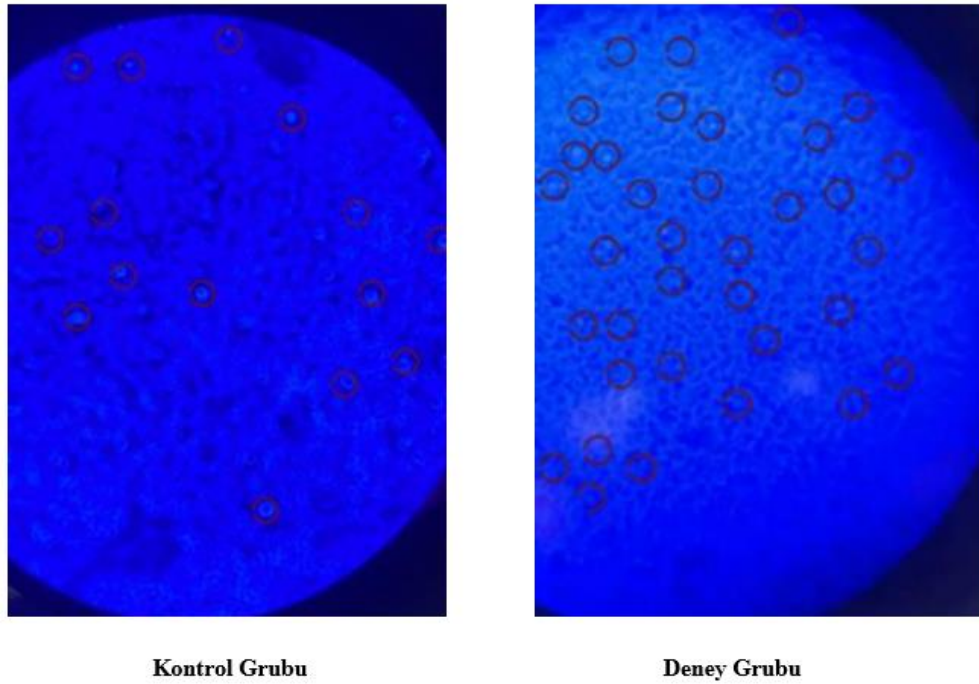
Cihaz tasarımı sırasında karşılaşılan en önemli problem step motorların senkronize çalışmamasına bağlı olarak üst tabakada eksen kayması yaşanmasıydı. Membran seçiminde ise yukarıda sayılan tasarım kriterlerini karşılayacak uygun malzemeyi tespit edebilmek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Test edilen malzemeler selüloz, PVA, kuzu bağırsağı ve kondomdur. Selüloz ve PVA darbe mukavemeti ve suya dayanımı düşük olduğu için, kuzu bağırsağı ise bakteri üremesine sebep olduğu için tercih edilmemiş, kondom kullanılmasına karar verilmiştir.



6. Sonuç

Deneyde cihaz 12 saat çalıştırıldı. Mekanik olarak uyarılmayan kontrol grubundaki hücreler ile mekanik olarak uyarılan deney grubundaki hücrelerin hücre büyüme hızları karşılaştırıldı. Deney grubunda hücre büyümesinin daha fazla olduğu gözlemlendi. Bu uyarımdan sonra hücre morfolojisinde herhangi bir değişiklik veya deformasyon tespit edilmedi. Hücre ve lateks zarın uyumlu olduğu gözlemlendi. Hücreyi sitotoksik olarak etkileyebilecek bir etkene rastlanmadı. Kondomun şeffaflığı sayesinde üst tabaka cihazdan ayrılarak inverted mikroskop ile gözlemlenebildi.

Hücre mekanik stimülasyon cihazının bir laboratuvar cihazına dönüştürülmesi hedeflenmekte ve bu doğrultuda optimizasyon çalışmalarına devam edilmektedir.



Şekil 11: Kontrol grubu ve deney grubu hücrelerin mikroskop görüntüleri

7. Kaynakça

- Bao, G., & Suresh, S. (2003). Cell and molecular mechanics of biological materials. In *Nature Materials*. <https://doi.org/10.1038/nmat1001>
- Brown, T. D. (2000). Techniques for mechanical stimulation of cells in vitro: A review. In *Journal of Biomechanics*. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(99\)00177-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(99)00177-3)
- Humphrey, J. D., Dufresne, E. R., & Schwartz, M. A. (2014). Mechanotransduction and extracellular matrix homeostasis. In *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. <https://doi.org/10.1038/nrm3896>
- Mouw, J. K., Ou, G., & Weaver, V. M. (2014). Extracellular matrix assembly: A multiscale deconstruction. In *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. <https://doi.org/10.1038/nrm3902>
- Wade, R. J., & Burdick, J. A. (2012). Engineering ECM signals into biomaterials. In *Materials Today*. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(12\)70197-9](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(12)70197-9)



BİR EMNİYET KAVRAMASI MODELİ

Burak Önder ¹, Ferit Simsaroglu ², Alp İmer ^{3*}, Volkan Yıkgeç ⁴

¹ Tirsan Kardan San. Ve Tic. A.Ş, Ar-Ge Merkezi

ORCID ID: 0000-0002-1978-3936, b.onder@tirsankardan.com.tr

² Tirsan Kardan San. Ve Tic. A.Ş, Ar-Ge Merkezi

ORCID ID: 0000-0003-2121-8650, f.simsaroglu@tirsankardan.com.tr

³ Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Bölümü ve Tirsan Kardan San. Ve Tic. A.Ş, Ar-Ge Merkezi, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-3921-7448, a.imer@tirsankardan.com.tr, 91190000357@ogrenci.ege.edu.tr

⁴ Tirsan Kardan San. Ve Tic. A.Ş, Ar-Ge Merkezi

ORCID ID: 0000-0002-6858-7624, v.yikgec@tirsankardan.com.tr

*** Sorumlu Yazar**

Özet

Günümüzde ticari, zirai veya endüstriyel araçlar; zaman, ekonomi, kullanım şartları gereği hafif ve yüksek dayanımlı, bununla birlikte daha uzun ömürlü komponentlerden oluşan sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Güç ve güç aktarma organları da bu sistemlerden olup, aktarma organlarını oluşturan elemanları da belirtilen özelliklerde olmalıdır. Bu nedenle, makalemize konu olan güç aktarma organlarının mevcut yüksek dayanımlı, daha uzun ömürlü komponentlerden oluşan yapısını daha da artıracak veya bu amaca hizmet edecek ek kavramların tasarımı veya uygulama çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Geline konumda elektrikli güç gruplarının ticari, zirai veya endüstriyel araçlarda devreye girmesiyle bu kapsamdaki çalışmaları daha da önemli kılmaktadır. Bu nedenle, ilave veya ana güç grubu olduğu elektrikli güç gruplarında veya konvensiyonel güç gruplarından oluşan sistemlerde dışarıdan veya sistem içinden kaynaklı ani tepe torklara ve hızlara dayanabilecek tasarımların yapılması gerekmektedir.

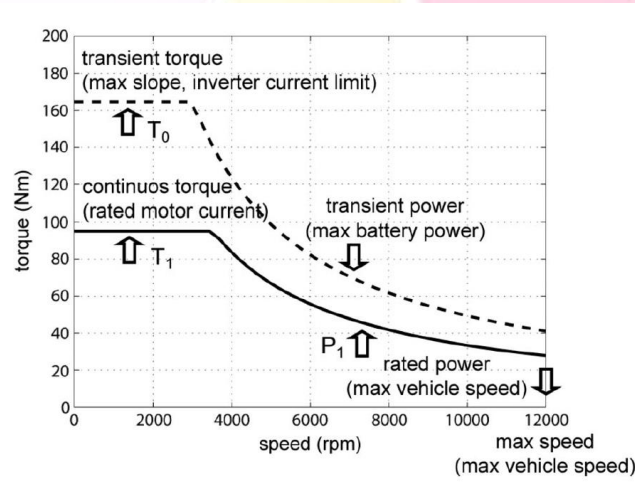
Bu çalışma, bir aracın motor çıkışı ile arka aks diferansiyel kutusu arasındaki güç aktarımını sağlayan bir kardan miline bağlanan, motorun ani tepe torkların kardan miline aktarılmasını engelleyen bir emniyet kavramasını içermektedir. Çalışma kapsamında bir emniyet kavramasının bilgisayar destekli tasarımı ve sonlu elemanlar analizleri ile de tasarım doğrulaması yapılmıştır. Bir araca ait yol verileri (hız (km/s), kardan milinin dönüş hızı (rpm) ve tork (N.m) değerleri) emniyet kavramasının tasarım girdisi olarak kullanılmış olup araçta kullanılacak bir kardan miline entegre edilebilecek biçimde emniyet kavramasının kavramsal tasarımı gerçekleştirilmiştir. Emniyet kavraması için tasarım parametreleri (sürtünme katsayısı, yay kuvveti, tork, dönüş hızı) belirlenmiş, tasarım parametrelerine göre analitik hesaplar ile bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, ani tepe torkların meydana geldiği zaman aralığında devreden çıkan emniyet kavramasının, tork değerlerinin normale dönmesiyle ayar gerektirmeden otomatik olarak devreye giren bir mekanik sistem elde edilmiştir. Elde edilen sistem ile motorun araç kalkış anında veya seyir halinde oluşturduğu ani tepe torklarında kardan mili ve güç aktarım organlarına zarar vermesini önlenebileceği öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Emniyet kavraması, Kardan mili, Tork sınırlandırıcı, Otomotiv, Ticari araçlar, Endüstriyel araçlar, Zirai araçlar.



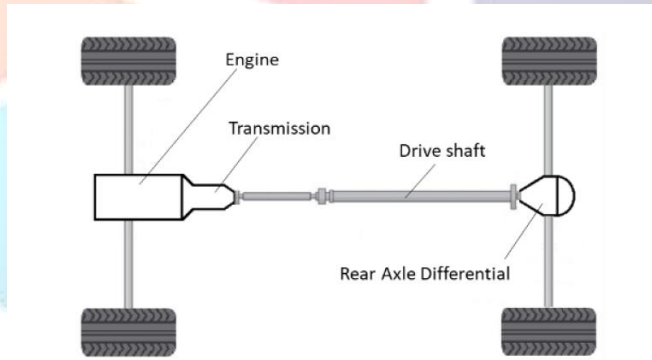
1. Giriş

Günümüzde artan çevre kirliliği ve enerji sorunları elektrikli araçlara olan ilgilinin giderek artmasına neden olmaktadır. Elektrikli araçlarda elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren güç ve güç aktarma organlarının yüksek verimlilik, yüksek tork yoğunluğu ve düşük maliyetli olması önemli bir konu haline gelmektedir [1,2]. Gelişen teknoloji ile elektrik motorlarının verimliliğinin artırılması için farklı motor tasarımları yapılmakta ve maksimum verimlilik hedeflenmektedir. Elektrik motorları, Şekil.1’de görüldüğü gibi düşük devirlerde yüksek sabit tork, yüksek hızlarda sabit güç uygulayacak şekilde nominal değerler içinde en yüksek verimle çalışır. Aracın şehir içi kullanımında, kalkış ve eğim tırmanma anında veya vites geçişlerinde motor anlık olarak tepe tork üretebilir [3]. Elektrik motorlarının tepe torkları, nominal tork değerlerinin 3 katına kadar çıkabilmektedir. Buna bağlı olarak güç aktarma organlarının diğer bileşenlerinin tasarımlarının en az 3 kat torka göre gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 1: Elektrikli araç tork-hız karakteristiği

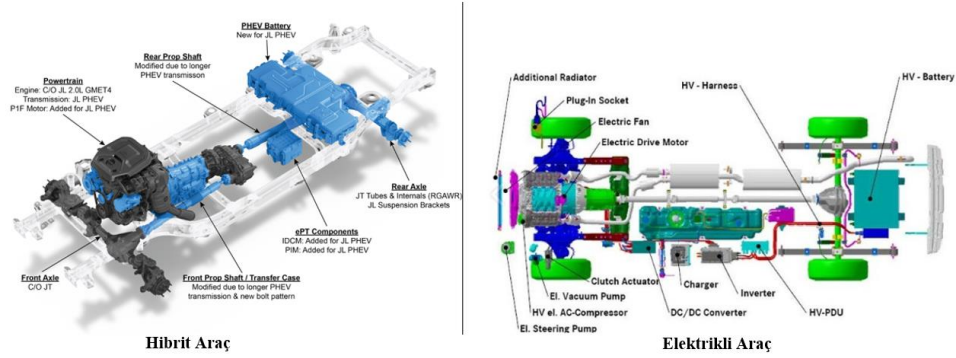
Arkadan çekişli araçlarda motorun hareketi diferansiyelde bulunan dişlilere Şekil.2’deki kardan milleri kullanarak aktarılır. Kardan millerinin eksenleri birbirinden kaçık olan yapılar arasında dönme hareketini iletir [4,5].



Şekil 2: Araç güç aktarım organları

Hibrit motorlu araçlarda, elektrik motorlu araçlara ilave olarak içten yanmalı motor bulunmaktadır. Hibrit araçlarda düşük devirlerdeki tork elektrik motorları tarafından uygulanarak kardan miller vasıtası ile akslara aktarılır. Şekil.3’te örnek 4x4 hibrit ve arkadan çekişli elektrikli araçlarda kardan mili yerleşimi gösterilmiştir. Elektrikli motorların kullanıldığı araçlarda elektrikli motor karakteristiklerinden kaynaklı anlık tepe torkların oluşması daha yüksek mukavemetli kardan millerinin kullanımını gerektirmektedir.





Şekil 3: Hibrit/Elektrikli araç güç aktarım organları

Endüstriyel ve zirai araçların güç aktarım uygulamalarında ise hassas makine ve ekipmanların tepe torklar nedeniyle oluşabilecek hasarları önleyebilmek için emniyet kavramaları kullanılmaktadır [6,7]. Endüstriyel ve zirai güç aktarım uygulamalarında kullanılan kavrama tipleri Tablo.1’de verilmiştir.

Mevcut uygulamalardaki radyal pimli, kamlı, kesme cıvatalı kavrama tipleri (Tablo.1) tepe tork sınırı aşıldığında devreden çıkan ve dış etki/müdahale ile tekrar devreye girebilen sistemlerdir. Devreden çıktıktan sonra otomatik olarak tekrar devreye girebilen sistemler ise sürtünmeli ve bilyeli tip kavramalardır.

Tablo 1: Emniyet Kavraması Tipleri

Kavrama Tipi	Türü	Enerji Dönüşümü	Artı Özellikleri	Eksi Özellikler
Radyal Pimli	Tork titreşimli	Yay	Tork değeri limitin altına indiğinde otomatik olarak yeniden devreye girer	Aşırı yüklemde güç iletimi kesilir
Kamlı	Tek yönlü	Yay ve açısal hareket	Maliyeti düşüktür	Aşırı yüklemde güç iletimi kesilir, iletimi tekrar sağlamak için yavaşlamak ve durmak gerekir
Kesme cıvatalı	Cıvatalı	Plastik deformasyon	Basit yapıdadır, Cıvata değişimi kolaydır	Yüksek torklara dayanım düşük, cıvata değişikliği zaman alıcı
Sürtünmeli	Balatalı-Devamlı çalışan	Yay ve Yüksek ısı	Güç aktarımı kesintiye uğramaz	Balata kaynaklı ısı, ses ve titreşim oluşur, kısa periyotlarda balataların değişimi
Bilyeli	Tek yönlü – Devamlı çalışan	Yay ve açısal hareket	Parça sayısı az ve birçok alanda tercih ediliyor	Üretim maliyeti ve tork/rpm ters orantısı

Zirai araçlarda kullanılan radyal pimli, kamlı, kesme cıvatalı ve sürtünmeli tip kavramalar ani tepe torkların düşük hızlarda oluşması sonucu devreden çıkmaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan bilyeli tip kavrama, ani tepe tork değerlerinin düşük hızlarda oluşmasıyla devreden çıkmakta ve tepe torkun nominal değere inmesiyle devreye girmektedir.

Otomotivde radyal pimli, kamlı ve kesme cıvatalı tip kavramalar müdahale olmadan tekrar devreye girmediği, sürtünmeli tip kavramalar ise sık disk değişimi gerektirmesi nedeniyle kullanılamamaktadır.

Mevcut bilyeli tip kavramalarda kavrama, yüksek tork düşük hız değerlerinde devreye girmektedir. Yüksek tork yüksek hız değerlerinde ise kavrama tekrar devreye giremeyerek hareket iletimini sağlayamamaktadır. Otomotivde gerekli olan yüksek dönüş hız yüksek tork değerlerinde kavramanın devreye girmesi sağlanamadığından otomotivde bu hali ile emniyet kavraması (tork sınırlandırıcı) olarak kullanılamamaktadır.



Yukarıda belirtilen mevcut durumdaki kullanım ve şartları nedeni ile ani tepe torkların oluştuğu durumlar için elektrikli/hibrit araçların güç aktarım organlarının tork ve hız değerlerine uygun, ani tepe tork oluşması durumunda anlık olarak devreden çıkarak ve otomatik olarak tekrar devreye giren bir emniyet kavraması gereksinimi doğmuştur.

Bu çalışma ile belirtilen emniyet kavraması gereksinimini karşılayacak bir emniyet kavraması tasarımı gerçekleştirilmektedir.

2. Materyal ve Metod

Teknik alanda sıklıkla kullanılan emniyet kavramaları lineer ya da radyal diziliimli bilye yuvalarına sahiptir. En çok kullanılan bilye yuvası şekilleri trapez, silindirik ve küreseldir. Diğer bilye yuva şekilleriyle karşılaştırıldığında küresel bilye yuvaları, yeniden kavrama anında darbeyi azaltabilecek temas yüzeylerine sahip olduğu için teknik olarak daha avantajlıdır [8,9,10].

Bu çalışmada elektrikli veya hibrit aracın güç aktarma organlarında emniyet kavraması olarak kullanılacak bilyeli tip kavrama geliştirilebilmesi için elektrikli bir aracın saha testlerinde ölçülen yol verileri incelenerek tasarım girdisi olarak kabul edilecek değerler tespit edilmiştir. Şekil.4'te verilen yol datasına göre, Elektrikli araç vites kutusunda ölçülen en yüksek torkun 1520 N.m olduğu belirlenmiş ve bu torkun ölçüldüğü en yüksek şaft dönme hızının 938 Rpm olduğu tespit edilmiştir.

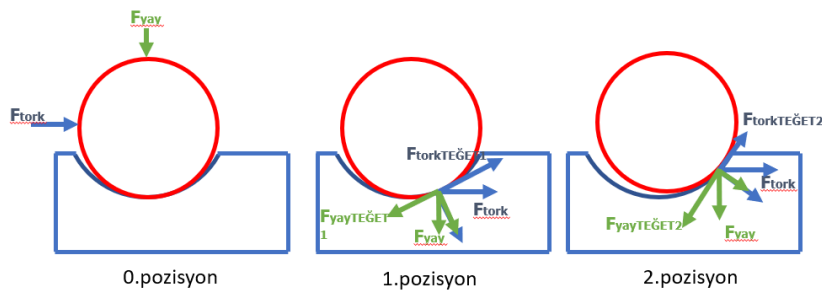
Kardan Mili Hızı (rpm)	Vasıta Hızı (km/h)	Yük Kullanımı (%)									
		Kardan Mili Torku (N.m)									
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1300-1520
0-313	0-10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	%0,58
313-625	10-20	...	...	...	...	...	...	...	...	...	%0,22
625-938	20-30	...	...	...	...	...	...	...	...	...	%0,39
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	NaN
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	NaN	NaN
...	...	...	...	...	...	...	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
...	...	...	...	...	...	...	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
...	...	...	...	...	...	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
...	...	...	...	...	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
...	...	...	...	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

... Değerleri gizlilik nedeniyle gösterilmemiştir.

Şekil 4: Araç Yol Verisi

2.1. Tasarım

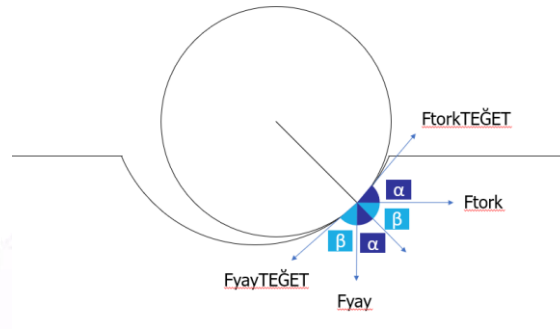
Şekil.5'te görüldüğü üzere, radyal yerleşimli küresel bilye yuvalarına sahip bir kavrama tasarımında, her bir bilyeye radyal yönde F_{tork} kuvveti uygulanmaktadır. Bilye F_{tork} etkisi ile yuva içinde hareket ettiğinde küresel yüzeydeki temas noktasının değişiminden dolayı $F_{torkTEĞET}$ kuvveti bilyeyi yuvadan çıkmaya zorlar. Bu durumda aksel olarak uygulanacak olan F_{yay} kuvvetinin temas noktasında oluşturduğu $F_{yayTEĞET}$ kuvveti ise bilyenin yuvada kalarak tork iletiminin devam etmesini sağlayacaktır.



Şekil 5: Bilye üzerine etkileyen kuvvetler



İstenilen tork ve dönme hızlarına uygun emniyet kavramasının tasarımı için, bilye dönme yarı çapı (rb), bilye çapı (db), bile yuva derinliği (ty), bilye yuva yarı çapı (ry) ve yay kuvveti (Fyay) parametreleri kritik tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir.



Şekil 6: Bilye-Bilye Yuvası Temas Noktası

$$F_{tork} = \frac{\text{Tork (N. mm)}}{r_y \text{ (mm)}} \quad (1)$$

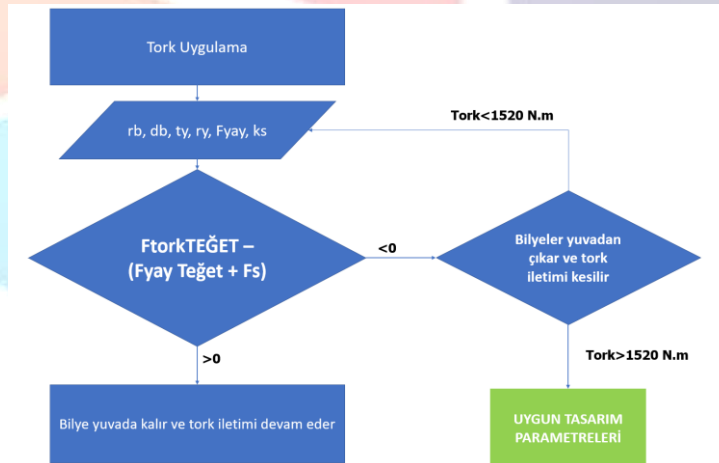
$$F_{torkTEĞET} = \cos(\alpha) * F_{tork} \quad (2)$$

$$F_{yayTEĞET} = \sin(\alpha) * F_{yay} \quad (3)$$

Denklem 1' kullanılarak hedef tork 1520 N.m için kavramanın için bilye dönme çapı ≈ 80 mm olarak kabul edilmiş ve F_{tork} kuvveti 18095 N olarak belirlenmiştir. Denklem 2 ve Denklem 3 'e göre, bilye yuva derinliği (ty) arttıkça α açısı artar (Şekil.6) ve $F_{torkTEĞET}$ istenilen torkun iletilmesi için gerekli F_{yay} kuvveti azalır. Yapılan hesaplarda bilye ve yuva arasındaki sürtünme kuvveti (Fs) de hesaba katılmış ve sürtünme katsayısının (ks) etkileri de hesaplanmıştır.

$$F_s = k_s * (\sin(\alpha) * F_{tork} + \cos(\alpha) * F_{yay}) \quad (4)$$

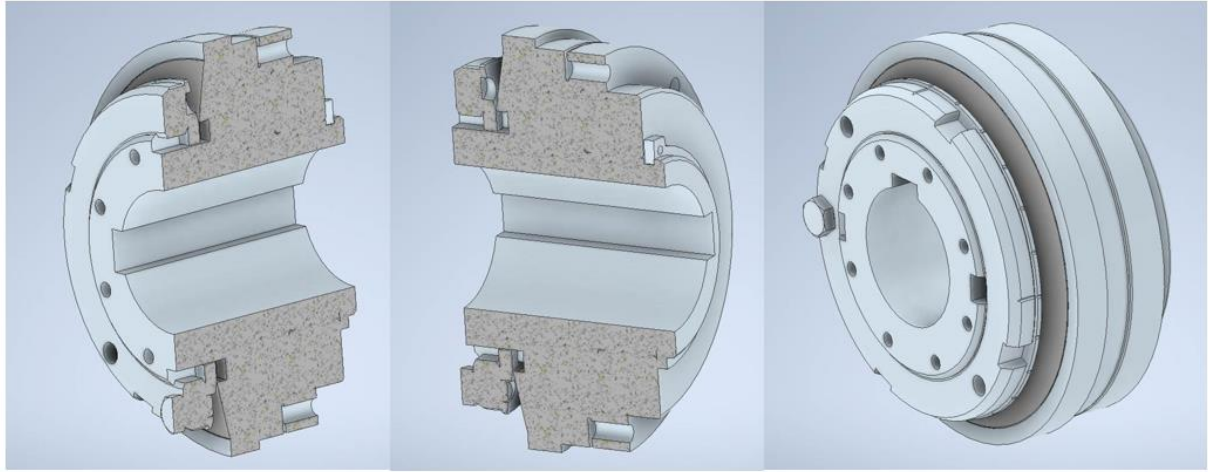
Yapılan çalışmada, üretilebilirlik ve maliyetler düşünülerek istenilen tork taşıma kapasitesine sahip kavrama için analitik hesaplar ile parametreler Şekil.7'deki gibi optimize edilmiş, oluşturulan taslak tasarım sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak doğrulanmıştır.



Şekil 7: Parametre Optimizasyonu

Elde edilen tasarım parametreleri doğrultusunda kavrama tasarımı üç boyutlu CAD modeli (Autodesk Inventor ve Dassault) oluşturulmuştur (Şekil.8). Elde edilen CAD modeli sonlu elemanlar analizi programı (Ansys) tasarım doğrulaması için kullanılmıştır.

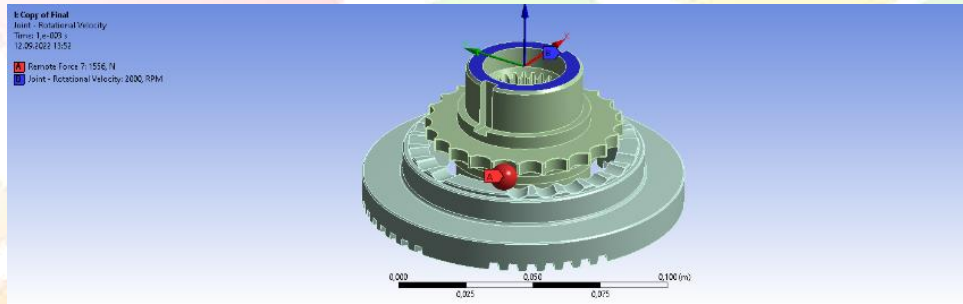




Şekil 8: Emniyet Kavraması 3D Model

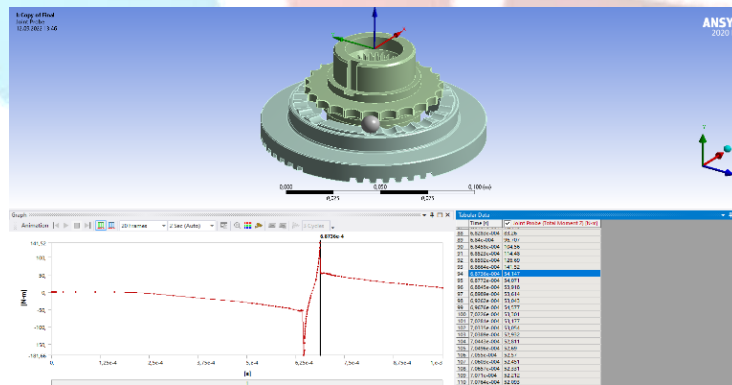
2.2. Analiz Çalışması

Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan CAD model tek bir bilyeye göbek dişli aracılığı ile etkiyen rijit dönme hareketi ve yay kuvvetini simüle edecek şekilde etkiyen eksenel kuvvet olarak sadeleştirilmiş ve analiz modeli Ansys programı ile Şekil.9'daki gibi kurulmuştur.



Şekil 9: Sonlu Elemanlar Analizi Sınır Şartları

Analiz sonuçlarında, bilyenin bilye yuvasında hareketi, bilyenin bilye yuvasındaki konumuna göre göbek dişlide oluşan tepki moment grafiği elde edilmiştir. Yapılan analizlerde girdi olarak kullanılan bilye yuva yarıçapı, bilye yuva derinliği, bilye çapı, bilye dönme çapı, yay kuvveti ve sürtünme kuvvetleri değiştirilerek elde edilen sonuçlar analitik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 10: Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Elde edilen analiz sonuçları bilyenin bilye yuvasına girişi anında bilye ve dişli göbek kütle ve açısal hızı nedeni ile oluşan çarpışma kuvvetlerinin de okunan tork değerini artırdığı görülmüştür



(Şekil.10). Yapılan analitik hesaplara çizgisel hız (V), kütle (G), ivme (a) parametreleri ile Denklem.5 kullanılarak çarpışmanın kuvveti (Fi) hesaplanmıştır. Elde edilen Fi'nin oluşturduğu tepki momenti (Ti), analitik olarak hesaplanan statik tepe tork (Ts) ile toplanarak dinamik tepe tork (Td) hesaplanmıştır.

$$Fi = \frac{V * G}{a} \quad (5)$$

3. Sonuçlar ve Tartışma

Tasarım parametreleri varyasyonları için analitik hesaplar ve sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve Tablo.2'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 2: Farklı Parametreler için Analitik Hesap ve Analiz Sonuçları Karşılaştırması

Yay Kuvveti (N)	Dönme Hızı (Rpm)	Ts Statik Tepe Tork (N.m)		Sapma Oranı (%)	Td Dinamik Tepe Tork (N.m)		Sapma Oranı (%)
		Analitik	Analiz		Analitik	Analiz	
14000	2000	477,5	468	1,98	2007	2034	1,34
28000	2000	1061	984,6	7,2	2537,6	2547	0,37
28000	1500	1061	1020,6	3,81	1702,4	1753,2	2,98
10000	1000	568	534,6	5,88	2187	2284,2	4,45
30000	2000	1950,7	1814,4	6,99	8162,6	8479,8	3,89
30000	3000	1950,7	1812,6	7,08	16171,4	17076,6	5,6

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde analitik hesaplamalar ve analiz sonuçları arasında en fazla %7'lik bir sapma olduğu, nihai tasarım için kabul edilecek parametrelerin analitik hesaplamalar ile elde edilebileceği görülmüştür.

Belirlenen tasarım kriterlerini karşılayabilecek emniyet kavramasının birim parça ve montaj tasarımı, analitik hesaplamalar ve analizlerin karşılaştırılmasında elde edilen %7'lik sapma oranı hesaba katılarak 1000 Rpm ve 1650 N.m sınır koşullarına göre gerçekleştirilmiştir. Uygun baskı yayı, bilye yuvası, bilye dönme eksen seçimleri yapılarak emniyet kavramasının tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, endüstriyel ve zirai uygulamalarda, güç ve güç aktarma organlarının aşırı yüklenme durumunda hasar görmesini engelleyen mekanik kavramalardan farklı olarak elektrikli/hibrit araçlarda, yüksek tork yüksek dönme hızlarında çalışabilen, önceden belirlenmiş anlık tepe torklarda devreden çıktığında müdahale gerektirmeden anlık tepe tork etkisi geçtiğinde tekrardan devreye giren bir emniyet kavramasının tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımın optimizasyonu için farklı hesap parametre varyasyonları hem analitik hesaplar hem de sonlu elemanlar analizleri için kullanılarak tasarım doğrulaması gerçekleştirilmiştir. İlgili tasarım, elektrikli/hibrit araçların en kritik elemanları olan güç ve güç aktarma gruplarının aşırı yüklere karşı korunabilmesine olanak sağlamaktadır. Gelecek çalışmalarda tasarımın daha da gelişmesi ile elektrikli/hibrit araç güç ve güç aktarma grupları tasarımında daha hafif ve daha uzun menzile sahip elektrikli/hibrit araçların üretilebilmesine katkı sağlanabilir.

4. Kaynakça

- [1] K. M. Rahman, B. Fahimi, G. Suresh, A. V. Rajarathnam, and M. Ehsani: Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues," IEEE Trans. Ind. Appl., sayı 36, no. 1, sayfa 111–121, 2000
- [2] X. Wang: Design of a wide speed range control strategy of switched reluctance motor for electric vehicles, Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, 2015, sayfa 294–299



- [3] G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi and B. Boazzo, "Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, sayı 59, no. 2, sayfa 803-811, 2012
- [4] Oh, S. J. and Woscek J.T. Analysis of rzeppa and cardan joints in monorail drive train system. *Int. J. Mech. Eng. Robotics Res.*, sayı 4, sayfa 1-11, 2015
- [5] Palma, P., Tiussi, G., Donadon, A., Raffaglio, Y., Luca, A.D., Leitner, M., Grün, F., Benasciutti, D. Fatigue assessment of universal cardan joint based on laboratory specimen tests. Part of the ABM Week, 2015, sayfa 396-408
- [6] R+W Coupling Technology. "Safety Couplings". <https://www.rw-couplings.com/products/precision-couplings/safety-couplings>, (Erişim Zamanı: Şubat 2022)
- [7] ComInTec, "Torque limiters". <https://www.comintec.com/en/project/torque-limiters> (Erişim Zamanı: Şubat 2022)
- [8] Chişu, E., Moldovean, Gh., Cuplaje mecanice intermitente. Editura Lux Libris, 1998
- [9] Jula, A., Mechanical couplings with mobile contacts, Editura Universităţii Transilvania, 2003
- [10] Moldovean, Gh., Study of the safety clutches with the intermittent load transmission, Doktora Tezi, Universitatea din Brasov, 1987



AKILLI SÜRDÜRÜLEBİLİR ATIK YÖNETİMİ STRATEJİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE BİR HİBRİT BULANIK AHP-TOPSIS UYGULAMASI

Bihter Gizem Demircan^{1*}, Kaan Yetilmezsoy²

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-5642-9688, gizem.demircan@std.yildiz.edu.tr

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, Türkiye

ORCID ID: 0000-0003-1478-9957, yetilmez@yildiz.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Akıllı şehirlerin önde gelen karakteristiklerinden biri çevresel sürdürülebilirlik olduğundan sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarında Bilgi İletişim Teknolojileri (BİT) ile Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinden yararlanılması giderek önem kazanan bir çalışma alanı haline gelmiştir. Söz konusu teknolojilerin atık yönetimine entegrasyonun doğal kaynakların verimli kullanılması, kirlilik yüklerinin azaltılması ve enerji ve zaman tasarrufu bakımından kentlerin çevresel sürdürülebilirlik stratejilerine katkı sağladığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Ancak akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejileri teknik, ekonomik, politik ve sosyal çok sayıda değişkene bağlıdır. Bu değişkenler birbirini etkiler ve değiştirir, yönetim süreçlerini daha da karmaşık hale getirir. Öte yandan, ilgili süreçlerde yer alan paydaşların sayısı da genellikle oldukça fazladır. Bu probleme bir çözüm olarak, hem bölge sakinlerinin istek ve ihtiyaçlarına cevap veren, hem de teknik, bilimsel ve ekonomik olarak uygulanabilir olan akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejileri belirleyebilmek için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden yararlanılabilir. Bu yöntem, bir probleme ait alternatiflerin, senaryoların ya da belirleyici/kısıtlayıcıların, önceden belirlenmiş bir dizi kritere bağlı olarak yapılan sübjektif uzman değerlendirmesi sonrasında yapılan çeşitli matematiksel işlemler ile sıralanması, karşılaştırılması ya da önceliklendirilmesidir. Zadeh (1965) tarafından ortaya konan Bulanık Kümeler teorisinin yer aldığı bulanık ÇKKV yöntemleri, çok sayıda farklı alan ile birlikte Çevre Mühendisliği'nde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemlerden yararlanan atık yönetimi çalışmalarının sayısı fazla olsa da, akıllı sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımlarının bulanık ÇKKV ile değerlendirilmesi literatürde henüz yeterli ilgiyi görmemiştir. Çalışmada, önerilen akıllı atık yönetimi alternatiflerinin hibrit bir bulanık ÇKKV yöntemi kullanılarak değerlendirilmesi ile literatürdeki bu boşluğa katkı sunmak amaçlanmıştır. Bunun için, her biri sahada veya literatürde yer alan ve iyi örnek sayılabilecek uygulamalardan yararlanılarak geliştirilmiş dört farklı akıllı atık yönetimi stratejisi, Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP)) ve Bulanık İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği (Fuzzy Technique For Order Preference By Similarity To Ideal Solution (TOPSIS)) birlikte uygulanarak sıralanmıştır. Toplam dört ana kriter (Çevresel kriterler, teknik kriterler, ekonomik kriterler ve sosyal kriterler) altındaki on beş alt kritere ait ağırlıklar, bulanık AHP yöntemi ile belirlenmiş, bu ağırlıkların Bulanık TOPSIS yönteminde kullanılması sayesinde de önerilen stratejilerin sıralanması gerçekleştirilmiştir. Karar verici görüşleri, akademi ve özel sektörde çevre mühendisliği ya da akıllı şehirler alanlarında görev yapan beş farklı uzmandan internet üzerinden hazırlanan anketler aracılığı ile alınmıştır. Hesaplamalar sonunda ikinci akıllı atık yönetimi alternatifi (A2, Blockchain'e dayalı Attığın Kadar Öde uygulaması) en yüksek yakınlık katsayısı (Ci) ile ilk sırada yer almıştır. Farklı kriter ve karar verici gruplarının sıralama üzerindeki etkisini analiz etmek için sekiz farklı senaryo ile duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. İkinci alternatif (A2) senaryoların üç tanesinde ilk sırada gelmiştir. Sonuçlar, farklı kriter veya karar verici grupları ile gerçekleştirilecek bulanık karar verme uygulamalarının alternatif sıralamasını değiştirdiğini ortaya koymuştur.



Anahtar Kelimeler: Akıllı şehirler, Sürdürülebilir atık yönetimi, Bulanık Çok Kriterli Karar Verme, TOPSIS, Analitik Hiyerarşi Prosesi

1. Giriş

Artan nüfus nedeni ile gün geçtikçe daha karmaşık ve dinamik hale gelen kentlerde, yerel otoriteler için kent sakinlerinin temiz suya erişim, barınma, ulaşım, eğitim ve sağlık gibi temel ihtiyaçlarını karşılarken mevcut doğal ve ekonomik kaynakları en verimli şekilde kullanıp çevresel olarak mümkün olan en az hasarı yaratabilmek gün geçtikçe zorlaşmaktadır. Kent hizmetlerinin sağlanması için yenilikçi ve teknolojik yaklaşımlara yönelmek her zamankinden daha önemli hale gelmiştir. Bu ihtiyaç ile birlikte 1990'lı yıllardan itibaren “Akıllı Şehir” olarak bilinen yeni bir kavram ortaya çıkmıştır. Akıllı Şehir, yaygın olarak kabul edilen tek bir tanıma sahip değildir. En genel haliyle, kentsel hizmetlerin daha hızlı, daha çevre dostu ve ekonomik olarak sunulması ve insanların ihtiyaçlarına daha iyi cevap verebilmek için Bilgi İletişim Teknolojilerinin (BİT) kullanıldığı şehir olarak açıklanabilir. Akıllı Şehir teknolojilerinin sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımları ile entegrasyonunun kaynakların verimli kullanılması, kirlilik yüklerinin azaltılması, enerji ve zaman tasarrufu açısından çevresel sürdürülebilirlik anlayışına katkı sağladığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Çevresel sürdürülebilirlik, akıllı şehirlerin temel karakteristiklerinden biri olduğundan, sürdürülebilir atık yönetimi için akıllı şehir teknolojilerinin kullanımının her geçen gün daha da yaygınlaşan geçerli bir eğilim olması oldukça anlaşılır bir durumdur.

Akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin hayata geçirilmesi ve sürdürülmesi, teknik, ekonomik, politik ve sosyal çok sayıda değişkene bağlıdır. Bu değişkenler birbirini etkiler ve değiştirir, yönetim süreçlerini daha da karmaşık hale getirir. Öte yandan, ilgili süreçlerde yer alan paydaşların sayısı da genellikle oldukça fazladır. Kamu otoritelerinin, özel sektör yöneticilerinin, araştırmacıların ve kent sakinlerinin kesintisiz ve birbirine bağlı bir yapı içinde koordineli ve uyumlu hareket etmesi çoğu zaman güçtür. Bu probleme bir çözüm olarak, hem bölge sakinlerinin istek ve ihtiyaçlarına cevap veren, hem de teknik, bilimsel ve ekonomik olarak uygulanabilir olan akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejileri belirleyebilmek için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden yararlanılabilir. Bu yöntem, bir probleme ait alternatiflerin, senaryoların ya da belirleyici/kısıtlayıcıların, önceden belirlenmiş bir dizi kritere bağlı olarak yapılan subjektif uzman değerlendirmesi sonrasında yapılan çeşitli matematiksel işlemler ile sıralanması, karşılaştırılması ya da önceliklendirilmesidir. Literatürde bu metotlardan yaralanan atık yönetimi çalışmaları, çoğunlukla aşağıdakileri hedeflemektedir [1]:

- Çeşitli alternatif atık yönetimi stratejileri (Düzenli depolama bertarafı, yakma, geri dönüşüm, yeniden kullanım vb.) arasında en uygun kararın verilmesi
- Atık yönetimi teknolojilerinin (Toplu yakma, piroliz, gazlaştırma, çimento fırınlarında plazma yakma, vb.). uygulanabilirliklerinin değerlendirilmesi
- Bir atık yönetimi tesisinin en uygun yer araştırın (Düzenli depolama, atık arıtma tesisi, geri dönüşüm tesisi, vb.).

Bulanık AHP-TOPSIS hibrit uygulamasından düzenli depo sahası yeri seçimi [2] için yararlanılmasının yanı sıra, atığı bir kaynak olarak gören anlayışın giderek popülerite kazanması ile birlikte atıktan enerji üretim tesisi yer seçimi için de bu yönteme başvuran çalışmalar [3] [4] mevcuttur.

Farklı atıksu arıtma teknolojilerinin değerlendirilmesi için yapılan güncel bir çalışmada [5], bir hibrit bulanık AHP-TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntemden yararlanan bir diğer çalışmada [6], Hindistan için sekiz farklı katı atık yönetimi senaryosu değerlendirilmiştir. Bazı araştırmacılar ise bu yöntemi daha spesifik atık türlerinin yönetimi çalışmaları için kullanmıştır. Pakistan’da yürütülen çalışmada [7], döngüsel ekonomiye



geçişte ülkedeki yemek atıklarının yönetiminde karşılaşılabilecek bariyerler, bu hibrit bulanık ÇKKV ile belirlenmiştir.

Görüldüğü üzere, özellikle Çevre Mühendisliği'ndeki güncel konulara dair yürütülen çalışmalarda ÇKKV yöntemlerinden sıklıkla faydalanılsa da, akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin söz konusu yöntem kullanılarak değerlendirilmesi literatürde henüz yeterli ilgiyi görmemiştir. Eskişehir Tepebaşı bölgesi için Bilgi İletişim Teknolojilerinden yararlanan dört farklı akıllı katı atık toplama alternatifinin önerildiği çalışmada [8] alternatifler, uzmanlarca belirlenmiş yedi kriterin varlığında Tip – 2 Bulanık TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmiştir. Güncel bir çalışmada [9] ise İstanbul, Türkiye'deki bir belediye için farklı akıllı atık toplama yöntemlerinin incelenmesinde hibrit bir ÇKKV (Aralık değerli q seviyeli bulanık kümeler altında modifiye edilmiş entropi ve CODAS (COmbinative Distance-based Assessment) metodu) kullanılmıştır. Ancak bu çalışma, hem atığın üretiminden bertarafına dek daha kapsamlı atık yönetimi stratejilerini içermesi bakımından, hem de Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS yöntemlerinden aynı anda yararlanması bakımından söz konusu iki çalışmadan ayrılmaktadır. Çalışmada, önerilen farklı akıllı atık yönetimi stratejilerinin hibrit bir bulanık ÇKKV yöntemi kullanılarak değerlendirilmesi ile literatürdeki bu boşluğa katkı sunmak amaçlanmıştır. Bunun için, her biri sahada veya literatürde yer alan ve iyi örnek sayılabilecek sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımları ile akıllı şehir teknolojilerinin kullanıldığı atık yönetimi uygulamalarından yararlanılarak geliştirilmiş dört farklı akıllı atık yönetimi stratejisi, Bulanık Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden olan Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP)) ve Bulanık İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği (Fuzzy Technique For Order Preference By Similarity To Ideal Solution (TOPSIS)) birlikte uygulanarak sıralanmıştır. Toplam beş ana kriter (Çevresel kriterler, teknik kriterler, ekonomik kriterler ve sosyal kriterler) altındaki on beş alt kritere ait ağırlıklar, bulanık AHP yöntemi ile belirlenmiş, bu Bulanık TOPSIS yönteminde kullanılması sayesinde de önerilen stratejilerin sıralanması gerçekleştirilmiştir. Karar verici görüşleri, akademi ve özel sektörde çevre mühendisliği ya da akıllı şehirler alanlarında görev yapan beş farklı uzmandan internet üzerinden hazırlanan anketler aracılığı ile alınmıştır.

Çalışmanın bundan sonraki bölümleri sırası ile şöyledir: 2. Bölümde ilk olarak Bulanık Fuzzy AHP ve Bulanık TOPSIS metotları açıklanacaktır. Daha sonra bu metotlar ile çözülecek problemde bahsedilecek ve hazırlık aşamasında izlenen adımlara ayrıntılı olarak yer verilecektir. Bu bölümde son olarak, ilgili iki metodun hibrit bir uygulaması ile ele alınan problemin çözüm aşamaları yer alacaktır. 3. Bölüm çalışmada elde edilen bulguları içermektedir. 4. Bölümde ise bulgulardan yararlanılarak yapılan çıkarımlar ve sonuç değerlendirmeler bulunacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Fuzzy AHP ve Fuzzy TOPSIS

Literatürde çok çeşitli Bulanık AHP metotlarının uygulandığı görülse de, bu çalışmada uygulama kolaylığını bakımından Chang'ın Genişletilmiş Analiz Yöntemi [10] seçilmiştir. Bu yöntemde mevcut ölçütlere mevcut hedeflere göre mertebe analizleri gerçekleştirilir. Elde edilen mertebe analiz değerleri Eşitlik (1)'deki gibi gösterilir:

$$M^1_{gi}, M^2_{gi}, \dots, M^m_{gi}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

Bu yöntemde izlenen adımlar şöyledir:

Adım 1: Ölçüt i'ye göre bulanık sentetik mertebenin değeri şöyle bulunur:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M^j_{gi} \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M^j_{gi} \right]^{-1} \quad (2)$$



Buradaki $\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$ değerini elde etmek için m mertbe analiz değerine Eşitlik (3)'teki gibi bulanık toplama işlemi uygulanır:

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \right) \quad (4)$$

Bir sonraki adımda, Eşitlik (4)'teki vektörün tersi bulunmalıdır:

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (5)$$

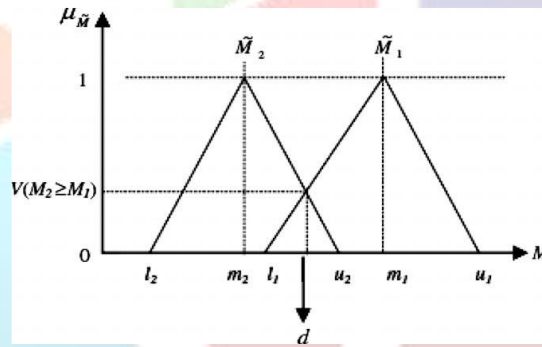
Adım 2: $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ 'in olabilirlik derecesi şu şekilde tanımlanır:

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup[\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))] \quad (6)$$

Ve denk olarak eşitlik (7)'deki gibi hesaplanır:

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } m_2 \geq m_1, \\ 0, & \text{eğer } l_2 \geq u_2, \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{diğer} \end{cases} \quad (7)$$

Denk şekilde $V(M_2 \geq M_1)$ 'i, d , M_1 ve M_2 arasındaki en yüksek kesişim noktası D 'nin ordinatı olmak üzere Şekil 1'de 'de görüldüğü gibi ifade edilebilir. M_1 ve M_2 'yi karşılaştırabilmek için hem $V(M_1 \gg M_2)$ hem $V(M_2 \gg M_1)$ değerlerine ihtiyaç vardır.



Şekil 1: M_1 ve M_2 arasındaki kesişim noktası

Adım 3: Bir konveks bulanık sayının k tane konveks bulanık sayıdan M_i ($i = 1, 2, \dots, k$) büyük olmasının olabilirlik derecesi şu şekilde tanımlanır:

$$V(M \gg M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \gg M_1) \text{ and } (M \gg M_2) \text{ ve } \dots \text{ ve } (M \gg M_k)]$$

$$\min V(M \gg M_i), i = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

$d'(A_i) = \min V(S_i \gg S_k)$ olduğunu varsayılırsa, $k = 1, 2, \dots, n$; k i için ağırlık vektörü aşağıda görüldüğü gibidir:



$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T, \quad (9)$$

Burada A_i ($i = 1, 2, \dots, n$) n sayısı kadardır.

Adım 4: Normalize edilmiş ağırlık vektörleri, (10)'daki gibidir. Burada W , bulanık olmayan bir sayıdır.

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T, \quad (10)$$

İlk olarak Hwang ve Yoon [11] tarafından ortaya atılan Bulanık TOPSIS yöntemi, tüm alanlarda yaygın olarak kullanılan bir ÇKKV örneğidir. Seçilen alternatifin pozitif-ideal çözüme en yakın ve negatif-ideal çözüme en uzak olduğu varsayımına dayanır. Çalışmada Chen vd. [12] tarafından geliştirilen Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin adımları aşağıdaki gibidir:

İlk adımda probleme dair uzmanlığı bulunan karar vericilerden (KV) bir grup oluşturulur. N tane karar vericiden oluşan küme, $E = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ şeklinde ifade edilir. Karar verici grup oluşturulduktan sonra, mevcut alternatifler $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ ve bu alternatifleri değerlendirmede kullanılacak olan kriterler $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ belirlenir. Bunu takiben, alternatiflerin değerlendirilmesinde ve kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılacak sözel değişkenler seçilir ve karar vericiler bu sözel değişkenler yardımıyla alternatif ve kriterleri değerlendirirler. Bu çalışmada seçilen kriter ağırlıklandırma ve alternatif değerlendirilmesinde seçilen ifadeler sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te görülmektedir:

Dilsel İfade	Sayı
Eşit Derecede Önemli	(1, 1, 1)
Biraz Daha Fazla Önemli	(2/3, 1, 3/2)
Kuvvetli Derecede Önemli	(3/2, 2, 5/2)
Çok Kuvvetli Derecede Önemli	(5/2, 3, 7/2)
Tamamıyla Önemli	(7/2, 4, 9/2)

Şekil 2: Kriter ağırlıklandırma için seçilen dilsel ifadeler ve karşılık gelen üçgen bulanık sayılar

Dilsel İfade	Sayı
Çok Kötü	(0, 0, 1)
Kötü	(0, 1, 3)
Biraz Kötü	(1, 3, 5)
Orta	(3, 5, 7)
Biraz İyi	(5, 7, 9)
İyi	(7, 9, 10)
Çok iyi	(9, 10, 10)

Şekil 3: Alternatif değerlendirme için seçilen dilsel ifadeler ve karşılık gelen üçgen bulanık sayılar

N tane karar vericiden oluşan grupta, x_{ij} karar vericilerin değerlendirdiği alternatifin kriter değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$x_{ij} = (a_j, b_j, c_j), \quad a_{ij} = \min(k) \{a_{ijk}\}, \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N b_{ijk}, \quad c_{ij} = \max(k) \{c_{ijk}\} \quad (11)$$

Probleme ait bulanık karar matrisi matrisi, A_i ($i = 1, \dots, m$) aralarından seçim yapılacak alternatifleri ve K_i ($i = 1, \dots, n$) göstermek üzere Şekil 4'teki gibi ifade edilebilir:



$$\begin{matrix} & K_1 & K_2 & & & K_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_2 & \tilde{x}_2 & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{x}_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{x}_m \end{bmatrix} \end{matrix},$$

Şekil 4: Probleme ait bulanık karar matrisi

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n] \quad (12)$$

Elde edilen bu bulanık karar matrisi normalize edilmelidir. Bu matris:

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (13)$$

ile sembolize edilir. Matristeki elemanlardan B ve C , fayda ve maliyet kriterlerini temsil ederse:

$$\tilde{r}_{ij} = (\frac{a_j}{c_{j*}}, \frac{b_j}{c_{j*}}, \frac{c_j}{c_{j*}}), \quad c_{j*} = \max(i)c_j, \quad j \in B \quad (14)$$

$$\tilde{r}_{ij} = (\frac{a_j^-}{c_j}, \frac{a_j^-}{b_j}, \frac{a_j^-}{a_j}), \quad a_j^- = \min(i)a_j, \quad j \in C \quad (15)$$

olarak bulunur. Burada, $r_{ij}, (\forall i, j)$, normalizasyondan sonra elde edilen üçgensel bulanık sayılardır.

Bu adımdan sonra, kriterlerin ağırlıklarının dahil edildiği ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi Eşitlik (16)'daki gibidir.

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

Elemanları ise:

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij}(\cdot) \tilde{w}_j \quad (17)$$

formülüyle hesaplanır. Ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi oluşturulduktan sonra, bulanık pozitif ideal çözüm (FPIS, A^*) ve bulanık negatif ideal çözüm (FNIS, A^-) Eşitlik (18) ve (19)'daki gibi bulunur:

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*) \quad (18)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) \quad (19)$$

Burada, $\tilde{v}_j^* = \max(i) \{v_{ij}\}$ ve $\tilde{v}_j^- = \min(i) \{v_{ij}\}$ 'dir.

Alternatiflerin pozitif ve negatif ideal çözümden uzaklıkları sırasıyla, $i = 1, 2, \dots, m$ olmak üzere:

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n dv(\tilde{v}_j, \tilde{v}_j^*) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$



$$d_i^- = \sum_{j=1}^n dv(\tilde{v}_j, \tilde{v}_j^-) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

ile hesaplanır. Burada $dv(\dots)$ bulanık sayılar arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Söz konusu uzaklıklar belirlenmesi ile alternatif sıralamasının elde edilmesi için yakınlık katsayıları C_i Eşitlik (22) yardımı ile hesaplanır.

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^- - d_i^*} \quad (22)$$

2.2. Akıllı Sürdürülebilir Atık Yönetimi Stratejilerinin Belirlenmesi

Çalışmada bir önceki bölümde yer alan ÇKKV yöntemlerinden yararlanarak seçilen dört farklı akıllı sürdürülebilir atık yönetim stratejisi alternatifinin değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi gerçekleştirilecektir. Her strateji en az bir adet akıllı teknolojiye dayanan bir atık yönetim uygulaması ile bir adet sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımını içermektedir. Önerilen akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejileri aşağıdaki gibidir:

Kayıt dışı atık toplama işçilerinin kooperatiflerin yer aldığı ve Bilgi ve İletişim Teknolojisi (BİT) araçlarının kullanıldığı kayıtlı atık toplama sistemine dâhil edilmesi (A1): İlegal atık toplama işçileri kurulacak kooperatif içinde örgütlenecek, yerel yönetim ile yapılacak protokol sayesinde işbirliği içinde geri dönüştürülebilir atık toplama faaliyetlerini sürdürecektir. Geri dönüştürülebilir atıklar, yalnızca mobil uygulama üzerinden planlanmış zamanlarda kooperatif üyelerince kapıdan teslim alınacaktır. Toplanan atık tipi ve miktarına göre atık üreticilerine ödüllendirme uygulanacaktır. Lokasyon tespiti için GIS, iletişim için 4G ve Wi-Fi teknolojilerinden yararlanılacaktır.

Blockchain teknolojisi ve Bilgi ve İletişim Teknolojisi (BİT) araçlarından yararlanan bir "Atığın Kadar Öde" (Pay As You Throw) uygulaması (A2): Seçilen bir sitedeki her konut binası için uygun hacimde bir konteyner tahsis edilecek ve bu konteynerler blockchain sistemine kaydedilecektir. Atık toplama araçlarının yaptığı her konteyner ziyareti, Blockchain sistemine yeni bir kayıt olarak girilecektir. Araçta bulunan ağırlık sensörü ile evsel atıkların ağırlığı ölçülecek ve ilgili veriler Blockchain'e aktarılacaktır. Toplanan geri dönüştürülebilir malzemenin cinsi belirlenecek ve kaynağında ayırma performansı operatör tarafından değerlendirilerek sisteme girilecektir. Sahada toplanacak her bir kilogram evsel atık için birim fiyat, ayrıca geri dönüşüm performans kriterleri, söz konusu atıkların toplanmasından sorumlu yerel yönetim tarafından belirlenecektir. İlgili konteynerden toplanan evsel atığın ağırlık verilerinin Blockchain'e aktarılması ile bu birim fiyatlar üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda konteyneri kullanan hane başına ödenecek ücret ortaya çıkacaktır. Site sakinleri atık toplanma süreçlerine dair bilgiler, ödemeleri gereken tutar ve geri dönüşüm performansları sayesinde kazandıkları tokenlar gibi verilere geliştirilen mobil uygulama üzerinden ulaşacaklardır.

Gönüllüler ve yerel yönetimler işbirliği ile yürütülecek ve Bilgi ve İletişim Teknolojisi (BİT) araçlarından yararlanan kompostlaştırma uygulaması (A3): Gönüllüler aracılığı ile toplanacak sebze meyve atıklarının belediye araçları ile bu işin ayrılan bölgelere taşınması ve akıllı kompostlaştırılması yapılacaktır. Sensörler aracılığı ile komposta ait sıcaklık ve nem verilerinin eş zamanlı alınması ile sistemin sürekli kontrolü mümkün olacaktır. IoT ağ geçidi sayesinde karıştırma, sulama, ısıtma ve soğutma gibi günlük görevler sisteme tanımlanacak ve günün belirli saatlerinde ve belirlenen periyotlarda motor ve pompaları çalıştıran aktüatörler sayesinde otomatik olarak yürütülecektir. Yapay sinir ağlarının deneysel veriler ile eğitilmesi sayesinde prosesteki aksaklıklara sistem otomatik olarak müdahale edebilecektir.

Bilgi ve İletişim Teknolojisi (BİT) araçlarından yararlanarak kanalizasyon ve yüzey sularına vidanjörler ile yapılan kaçak atıksu deşarjlarının önüne geçen uygulama (A4): Vidanjör tankına yerleştirilen sensörler ve GPS sistemi sayesinde tanktaki atıksuya ait sıcaklık, nem, basınç



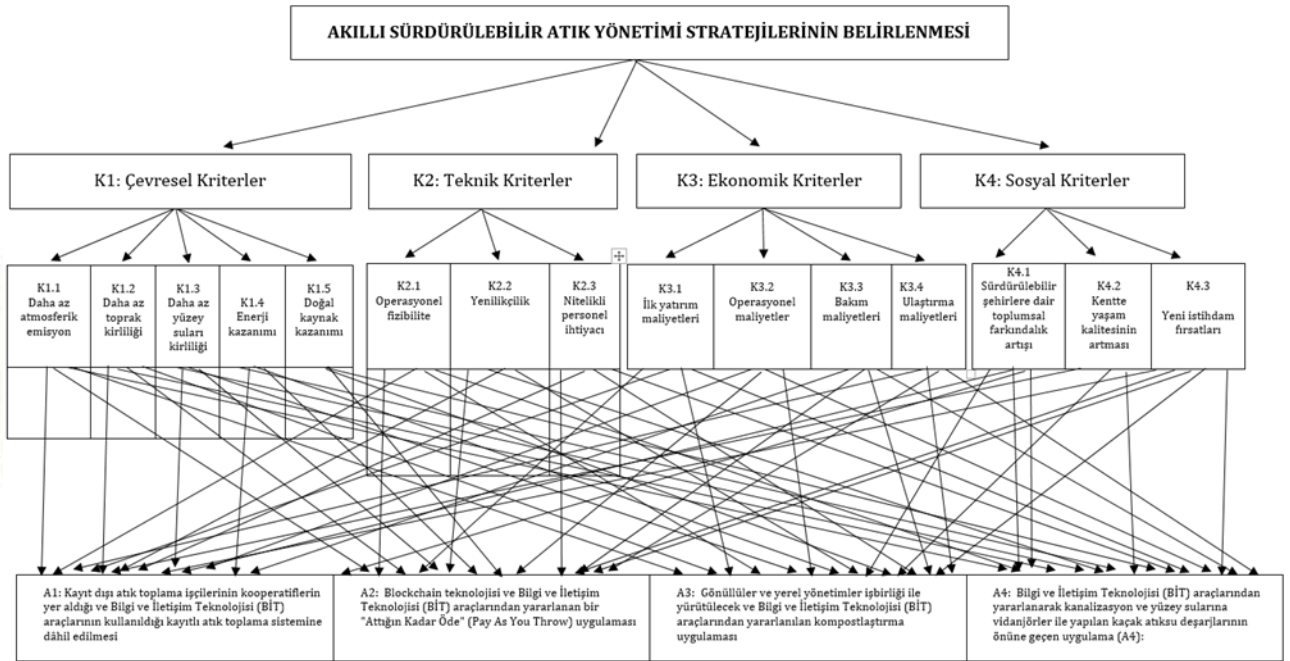
ve seviye verileri iki ayrı server aracılığı ile eş zamanlı olarak alınıp işlenecektir. Her vidanjörün ne zaman, nereye ve ne kadar atık su boşaltacağı önceden belli olduğu için, geliştirilen yazılım sayesinde beklenmedik bir durumda sistem alarm verecektir. Geliştirilen mobil uygulama ile kent sakinlerinin desteği ile kaçak deşarj ihbarı da mümkün olacaktır.

Çalışmada literatürden yararlanılarak oluşturulan on beş alt kriter ve dört ana kriter Şekil 5'teki gibidir:

1. Çevresel Kriterler (K1):	2. Teknik Kriterler (K2):	3. Ekonomik Kriterler (K3):	4. Sosyal Kriterler (K4)
Daha az atmosferik emisyon (K1.1)	Operasyonel fizibilite (K2.1)	İlk yatırım maliyetleri (K3.1)	Sürdürülebilir şehirlere
Daha az toprak kirliliği (K1.2)	Yenilikçilik (K2.2)	Operasyonel maliyetler (K3.2)	Kentte yaşam kalitesinin artması (K4.2)
Daha az yüzey suları kirliliği (K1.3)	Nitelikli personel ihtiyacı (K2.3)	Bakım maliyetleri (K3.3)	Yeni istihdam fırsatları (K4.3)
Enerji kazanımı (K1.4)		Ulaştırma maliyetleri (K3.4)	
Doğal kaynak kazanımı (K1.5)			

Şekil 5: Alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılacak kriterler

Buna göre, söz konusu probleme ait hiyerarşik yapı Şekil 6'daki gibi olur:



Şekil 6: Problem hiyerarşik yapısı

Çalışmada kriterlerin ağırlıklandırılması için Bulanık AHP, bu kriterler kullanılarak alternatiflerin sıralanması için Bulanık TOPSIS yönteminden yararlanılacaktır. Kriterlerin ağırlıklandırılması ve alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesi için çevre mühendisliği ya da akıllı şehirler alanlarında görev yapan beş farklı uzmandan Google Forms ile hazırlanan anketler aracılığı ile karar verici görüşleri alınmıştır. Anketlerde Tablo 1 ve Tablo 2'deki sözel ifadeler kullanılmıştır. Görüşleri alınan uzmanların üçü akademide, ikisi özel sektörde görev yapmaktadır. Hesaplamalar için Microsoft Excel 2016 programından yararlanılmıştır.

Beş ayrı uzman görüşü ile elde edilen sözel ifadelerin sayısal karşılıklarının geometrik ortalaması alınarak her bir ikili karşılaştırma için tek bir üçlü bulanık sayı elde edilmiştir. On beş kriter için işlemlerin gösterim fazla yer kaplayacağından, burada örnek olması bakımından teknik kriterler için kriter ağırlıklandırma işlemlerine yer verilmiştir. Aşağıdaki işlemler diğer üç ana kriter başlığı altındaki kriterler için de uygulanmıştır. Teknik kriterler için karar verici değerlendirmesi sonrası elde edilen ikili karşılaştırma matrisi Tablo 1'deki gibidir:



Tablo 1: Teknik kriterler için ikili karşılaştırma matrisi

TEKNİK KRİTERLER	Operasyonel fizibilite	Yenilikçilik	Nitelikli personel ihtiyacı
Operasyonel fizibilite	(1,00, 1,00, 1,00)	(1,28, 1,74, 2,26)	(1,08, 1,52, 2,04)
Yenilikçilik	(0,44, 0,57, 0,78)	(1,00, 1,00, 1,00)	(1,28, 1,74, 2,26)
Nitelikli personel ihtiyacı	(0,49, 0,66, 0,92)	(0,44, 0,57, 0,78)	(1,00, 1,00, 1,00)

Tablodan bulanık yapay büyüklük değerlerini elde etmek için:

$$S_{\text{operasyonel fizibilite}} = (3,36, 4,26, 5,30) \otimes (0,08, 0,10, 0,12) = (0,28, 0,43, 0,66)$$

$$S_{\text{yenilikçilik}} = (2,72, 3,32, 4,04) \otimes (0,08, 0,10, 0,12) = (0,23, 0,34, 0,50)$$

$$S_{\text{nitelikli personel ihtiyacı}} = (1,93, 2,23, 2,71) \otimes (0,08, 0,10, 0,12) = (0,16, 0,23, 0,34)$$

Bu vektörleri kullanarak teknik kriterler için $V(S_{\text{Kriter2}} \geq S_{\text{Kriter1}})$ değerleri aşağıdaki gibi bulunur:

$$V(S_{\text{operasyonel fizibilite}} \geq S_{\text{yenilikçilik}}) = 1,00$$

$$V(S_{\text{operasyonel fizibilite}} \geq S_{\text{nitelikli personel ihtiyacı}}) = 1,00$$

$$V(S_{\text{yenilikçilik}} \geq S_{\text{nitelikli personel ihtiyacı}}) = 1,00$$

$$V(S_{\text{yenilikçilik}} \geq S_{\text{operasyonel fizibilite}}) = 0,70$$

$$V(S_{\text{nitelikli personel ihtiyacı}} \geq S_{\text{operasyonel fizibilite}}) = 0,22$$

$$V(S_{\text{nitelikli personel ihtiyacı}} \geq S_{\text{yenilikçilik}}) = 0,50$$

Böylece teknik kriterler ağırlık vektörü $W_{\text{teknik kriterler}} = (0,52, 0,29, 0,12)^T$ olarak hesaplanır.

Aynı işlemler diğer üç ana kriter başlığı altındaki kriterler için de uygulandığında elde edilen tüm kriter ağırlıkları Tablo 2'deki gibi olur:

Tablo 2: Bulanık AHP ile elde edilen kriter ağırlıkları

Kriter no.	ÇEVRESEL KRİTERLER	(w)
K1.1	Daha az atmosferik emisyon	0,38
K1.2	Daha az toprak kirliliği	0,21
K1.3	Daha az yüzey suları kirliliği	0,28
K1.3	Enerji kazanımı	0,10
K1.4	Doğal kaynak kazanımı	0,03
	TEKNİK KRİTERLER	
K2.1	Operasyonel fizibilite	0,52
K2.2	Yenilikçilik	0,29
K2.3	Nitelikli personel ihtiyacı	0,12
	EKONOMİK KRİTERLER	
K3.1	İlk yatırım maliyetleri	0,54
K3.2	Operasyonel maliyetler	0,28
K3.3	Bakım maliyetleri	0,19
K3.4	Ulaştırma maliyetleri	0,00
	SOSYAL KRİTERLER	
K4.1	Sürdürülebilir şehirlere dair toplumsal farkındalık artışı	0,41
K4.2	Kentte yaşam kalitesinin artması	0,39
K4.3	Yeni istihdam fırsatları	0,20



Tablodan anlaşılacağı üzere en yüksek ağırlığa sahip kriter K3.1 İlk yatırım maliyetleri olmuştur. Kendisini K2.1 Operasyonel fizibilite izlemektedir. K3.4 Ulaştırma maliyetleri, diğer ekonomik kriterlere göre çok önemsiz kalmıştır.

Dört alternatifin on beş kriter gere beş karar verici tarafından değerlendirilmesi çok fazla yer tutacağından burada örnek olarak karar vericilerin A1, A2, A3 ve A4 alternatiflerinin K1.1 (Daha az atmosferik emisyon) kriterine göre yaptığı sözel değerlendirmelere yer verilecektir. Söz konusu değerlendirmeler ve sayısal karşılıkları Tablo 3'te yer almaktadır. Beş farklı karar verici görüşünden tek bir değerlendirme elde edebilmek değerlendirmelerin geometrik ortalamaları alınmıştır. Diğer on dört kriter için de aynı işlem tekrarlanmıştır.

Tablo 3: Alternatiflerin K1.1 kriterine göre değerlendirilmesi (KV: Karar verici)

Kriter	Alternatif	KV1	KV2	KV3	KV4	KV5	KV1	KV2	KV3	KV4	KV5
K1.1	A1	Orta	İyi	Çok İyi	Biraz İyi	Çok İyi	(3, 5, 7)	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)
	A2	Orta	Çok İyi	Biraz İyi	Biraz İyi	Çok İyi	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(9, 10, 10)
	A3	Biraz İyi	İyi	Çok İyi	İyi	Çok İyi	(5, 7, 9)	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)	(7, 9, 10)	(9, 10, 10)
	A4	Orta	Çok İyi	Çok İyi	Biraz İyi	Biraz İyi	(3, 5, 7)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)

K1.1 (Daha az atmosferik emisyon) için elde edilen bulanık karar matrisi Tablo 4'teki gibidir. Matristeki görünen değerleri elde etmek için, beş karar verici değerlendirmesinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Diğer on dört alt kriter için de aynı işlemler tekrarlanmıştır.

Tablo 4: K1.1 kriteri için bulanık karar matrisi

Alternatifler	K1.1
A1	(6,60, 8,20, 9,20)
A2	(6,20, 7,80, 9,00)
A3	(7,40, 9,00, 9,80)
A4	(6,20, 7,80, 9,00)

K1.1 bir fayda kriteri olduğu için normalizasyonda (14) numaralı eşitlikten yararlanılmıştır. Matristeki her eleman, matriste son sütunlarda yer alan en büyük değer olan 9,80'e bölünmüştür. Elde edilmiş normalize edilmiş bulanık karar matrisi Tablo 5'deki gibidir. Diğer on dört kriter için de aynı işlem tekrarlanmıştır.

Tablo 5: K1.1 kriteri için normalize edilmiş bulanık karar matrisi

Alternatifler	K1.1
A1	(0,67, 0,80, 0,94)
A2	(0,63, 0,80, 0,92)
A3	(0,76, 0,92, 1,00)
A4	(0,63, 0,80, 0,92)

K 1.1 için (17) numaralı eşitlikten yararlanarak elde edilmiş ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi Tablo 6'daki gibidir. Bunun için her terim, Tablo 4'teki Bulanık AHP ile elde edilmiş ve K 1.1'e ait olan 0,38 değeri ile çarpılmıştır. Kriterlerin fayda ya da maliyet kriteri olmalarına göre diğer on dört kriter için de aynı işlem tekrarlanmıştır.



Tablo 6: K 1.1 kriteri için ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi

Alternatifler	K1.1
A1	(0,26, 0,32, 0,36)
A2	(0,24, 0,31, 0,35)
A3	(0,29, 0,35, 0,38)
A4	(0,24, 0,31, 0,35)

(18) ve (19) eşitliklerden yararlanılarak elde edilen bulanık pozitif ideal çözüm (FPIS, A^+) ve bulanık negatif ideal çözüm (FNIS, A^-) şu şekilde bulunmuştur:

$A^+ = [(0,384, 0,384, 0,384), (0,211, 0,211, 0,211), (0,282, 0,282, 0,282), (0,095, 0,095, 0,095), (0,027, 0,027, 0,027), (0,520, 0,520, 0,520), (0,288, 0,288, 0,288), (0,115, 0,115, 0,115), (0,539, 0,539, 0,539), (0,275, 0,275, 0,275), (0,185, 0,185, 0,185), (0,000, 0,000, 0,000), (0,410, 0,410, 0,410), (0,390, 0,390, 0,390), (0,200, 0,200, 0,200)]$

$A^- = [(0,243, 0,243, 0,243), (0,131, 0,131, 0,131), (0,175, 0,175, 0,175), (0,052, 0,052, 0,052), (0,017, 0,017, 0,017), (0,302, 0,302, 0,302), (0,213, 0,213, 0,213), (0,076, 0,076, 0,076), (0,340, 0,340, 0,340), (0,193, 0,193, 0,193), (0,130, 0,130, 0,130), (0,000, 0,000, 0,000), (0,271, 0,271, 0,271), (0,273, 0,273, 0,273), (0,135, 0,135, 0,135)]$

3. Bulgular

(20) ve (21). Eşitlikler yardımıyla her bir alternatife FPIS ve FNIS'den uzaklığı bulunmuştur. Bu adımdan sonra, önerilen alternatiflere ait yakınlık katsayısı değerleri Eşitlik (22) yardımıyla hesaplanmıştır. İlgili sonuçlar Tablo 7'de gösterilmektedir. Tablodaki yakınlık katsayılarına göre, çalışmada önerilen akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin sıralanması $A2 > A1 > A3 > A4$ şeklinde olmuştur. İkinci alternatif, yani Blockchain teknolojisi ve Bilgi ve İletişim Teknolojisi (BİT) araçlarından yararlanan bir "Attığın Kadar Öde" (Pay As You Throw) uygulaması, seçilen kriterlere göre en yüksek performansa sahiptir. Öte yandan, dördüncü alternatif, yani Bilgi ve İletişim Teknolojisi (BİT) araçlarından yararlanarak kanalizasyon ve yüzey sularına vidanjörler ile yapılan kaçak atıksu deşarjlarının önüne geçen uygulama seçilen kriterlere göre en düşük performansı göstermiştir.

Tablo 7: Alternatiflerin uzaklık değerleri ve yakınlık katsayıları

Alternatifler	d_i^*	d_i^-	C_i
A1	0,71	1,21	0,548
A2	0,66	1,12	0,580
A3	0,76	1,38	0,528
A4	0,77	1,40	0,522

Çalışmada ayrıca farklı kriter ve karar verici gruplarının sıralama üzerindeki etkisini analiz etmek için Şekil 7'de görülen sekiz farklı senaryo ile duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir:



Senaryo	Karar Kriteri	Karar Vericiler
1	K1.1, K1.2, K1.3, K1.4 (Çevresel kriterler)	KV1, KV2, KV3, KV4, KV5
2	K2.1, K2.2, K2.3 (Teknik kriterler)	KV1, KV2, KV3, KV4, KV5
3	K3.1, K3.2, K3.3, K3.4 (Ekonomik kriterler)	KV1, KV2, KV3, KV4, KV5
4	K4.1, K4.2, K4.3 (Sosyal kriterler)	KV1, KV2, KV3, KV4, KV5
5	K1.1, K1.2, K1.3, K1.4, K2.1, K2.2, K2.3 (Çevresel kriterler ve teknik kriterler)	KV1, KV2, KV3, KV4, KV5
6	K1.1, K1.2, K1.3, K1.4, K3.1, K3.2, K3.3, K3.4 (Çevresel kriterler ve ekonomik kriterler)	KV1, KV2, KV3, KV4, KV5
7	K1.1, K1.2, K4.3	KV2, KV3
8	K1.1, K1.2, K4.3	KV1, KV5

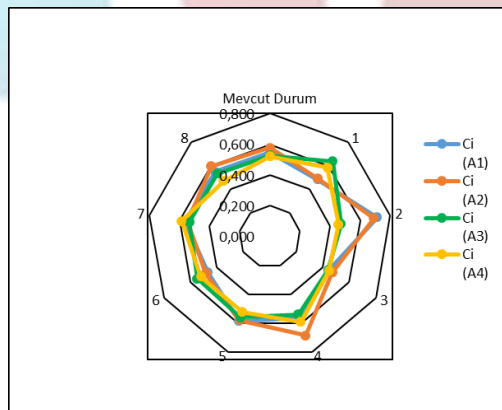
Şekil 7: Duyarlılık analizi için seçilen senaryolar

Duyarlılık analizi içi sekiz senaryoda farklı kriter ve karar verici gruplarından yararlanılmıştır. Buna göre alternatiflerin yakınlık katsayıları ve sıralamaları Tablo 8’deki gibi elde edilmiştir:

Tablo 8: Duyarlılık analizi sonuçları

Senaryo 1				Senaryo 2				Senaryo 3				Senaryo 4			
C _i (A1)	C _i (A2)	C _i (A3)	C _i (A4)	C _i (A1)	C _i (A2)	C _i (A3)	C _i (A4)	C _i (A1)	C _i (A2)	C _i (A3)	C _i (A4)	C _i (A1)	C _i (A2)	C _i (A3)	C _i (A4)
0,486	0,491	0,641	0,587	0,713	0,690	0,474	0,456	0,445	0,471	0,440	0,446	0,565	0,687	0,541	0,592
A3 > A4 > A2 > A1				A1 > A2 > A3 > A4				A2 > A4 > A1 > A3				A2 > A4 > A1 > A3			
Senaryo 5				Senaryo 6				Senaryo 7				Senaryo 8			
C _i (A1)	C _i (A2)	C _i (A3)	C _i (A4)	C _i (A1)	C _i (A2)	C _i (A3)	C _i (A4)	C _i (A1)	C _i (A2)	C _i (A3)	C _i (A4)	C _i (A1)	C _i (A2)	C _i (A3)	C _i (A4)
0,587	0,582	0,562	0,525	0,467	0,482	0,548	0,521	0,560	0,547	0,534	0,584	0,554	0,597	0,535	0,470
A1 > A2 > A3 > A4				A3 > A4 > A2 > A1				A4 > A1 > A2 > A3				A2 > A1 > A3 > A4			

Duyarlılık analizi sonuçlarına göre mevcut en iyi alternatif olan ikinci alternatif (A2), üç senaryoda daha en iyi performansı göstermiştir. Yine mevcut durumda en kötü performansa sahip dördüncü (A4) alternatif, üç senaryoda daha en son sırada yer almıştır. Alternatiflerin mevcut durumda ve sekiz senaryonun uygulanması ile elde edilen yakınlık katsayıları Şekil 8’deki radar grafiğinde yer almaktadır:



Şekil 8: Alternatiflerin yakınlık katsayıları (Ci)



4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada Akıllı Şehir konseptinin en önemli ayaklarından olan akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin Bulanık Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri kullanılarak değerlendirilmesinin yerel otoritelere karar verme süreçlerinde nasıl destek olabileceği araştırılarak bu alandaki literatür boşluğuna katkı sunmak hedeflenmiştir. Bunun için, literatürdeki ve pratikteki iyi örnek sayılabilecek sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımları ile akıllı atık yönetimi uygulamalarından yararlanılarak dört farklı akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejisi belirlenmiştir. Stratejilerin değerlendirilmesi için dört adet ana kriter başlığı altındaki on beş adet kriter literatürden seçilmiştir.

Seçilen kriterlerin ağırlıklandırılması için Bulanık AHP yöntemi uygulanmıştır. Daha az atmosferik emisyon, operasyonel fizibilite, ilk yatırım maliyetleri ve sürdürülebilir şehirlere dair toplumsal farkındalık artışı kriterleri, kendi gruplarında en yüksek ağırlık değerine sahip olarak öne çıkmışlardır. Kriter ağırlıklandırılmasından sonra, önerilen akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin ilgili kriterlere göre performansı Bulanık TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmiştir. Blockchain ve akıllı şehir teknolojilerinin kullanımını içeren bir Attığın Kadar Öde örneği bulunan ikinci strateji alternatifi (A2), en yüksek yakınlık katsayısı (C_i) ile en iyi performansı göstermiştir. Sensör ve izleme araçları kullanarak kaçak atıksu deşarjlarının önüne geçen uygulama (A4) ise en düşük yakınlık katsayısı (C_i) ile son sırada yer almıştır.

Farklı kriter ve karar verici gruplarının sıralama üzerindeki etkisini analiz etmek için sekiz farklı senaryo ile duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Önerilen ikinci akıllı atık yönetimi stratejisi (A2), senaryoların üç tanesinde ilk sırada gelmiştir. Sonuçlar, farklı kriter veya karar verici grupları ile gerçekleştirilecek bulanık karar verme uygulamalarının alternatif sıralamasını değiştirdiğini ortaya koymuştur.

Doğası gereği zaten oldukça karmaşık olan sürdürülebilir atık yönetimine akıllı teknolojilerin entegre edilmesi, özellikle uzmanlık ve bütçe gerekliliklerinin artması, ayrıca kent sakinlerince kabul görme bakımlarından atılacak her adımı daha da güçleştirmektedir. Öte yandan, bu yaklaşımın görece yeni olması nedeni ile pratikte elde edilmiş tecrübeler, karar verme aşamalarında yöneticilere henüz istenen düzeyde veri sağlamamaktadır. Böyle bir problemin varlığında, kümelerde kısmi üyeliğe izin vererek belirsiz ve kesin olmayan girdi veya bilgilerle çalışmayı mümkün kılan bulanık mantık temelli ÇKKV yöntemlerinden yararlanılması karar vericilerin işini kolaylaştıracaktır. Çalışmada yalnızca bir kısım kriter ya da karar verici gruplarının işlemlere dahil edilmesi, alternatiflerin sıralamasını değiştirmiştir. Bu nedenle farklı kriter ve karar verici grupları ile yapılacak denemeler, çalışmayı daha gerçekçi ve güvenilir hale getirebilir. Farklı kriter gruplarının belirlenmesi için yine anketler yolu ile uzman görüşlerine başvurulabilir. Son olarak, kamuda görev yapan uzmanlar da çalışmaya dâhil edilerek karar verici gruplarının artırılması ile çalışma zenginleştirilebilir.

5. Kaynakça

- [1] C. Achillas, N. Moussiopoulos, A. Karagiannidis, G. Banias, ve G. Perkoulidis, “The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review”, Waste Management & Research, 31, 115-129, 2013.
- [2] A. Beskese, H.H. Demir, H.K. Ozcan vd., “Landfill site selection using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS: a case study for Istanbul”, Environ Earth Sci, 73:3513–3521, 2015.
- [3] N. Van Thanh, “Optimal Waste-to-Energy Strategy Assisted by Fuzzy MCDM Model for Sustainable Solid Waste Management”, Sustainability, 14:6565, 2022.
- [4] K. Albayrak, “A hybrid fuzzy decision making approach for sitting a solid waste energy production plant”, Soft Comput, 26: 575–58, 2022.



- [5] S.J Kamble, A. Singh, ve M.G. Kharat, “A hybrid life cycle assessment based fuzzy multi-criteria decision making approach for evaluation and selection of an appropriate municipal wastewater treatment technology”, Euro-Mediterr J Environ Integr, say. 2, 2017.
- [6] A. Gaur, H. Prakash, K. Anand, vd., “Evaluation of Municipal Solid Waste Management Scenarios using Multi-Criteria Decision Making under Fuzzy Environment”, Process Integr Optim Sustain, 6:307–321, 2022.
- [7] Y. Ali Y, D.H Jokhio, A.A Dojki, O. Rehman, F. Khan, ve A. Salman A, “Adoption of circular economy for food waste management in the context of a developing country”, Waste Management & Research, 40:676–684, 2022.
- [8] M. Topaloglu F. Yarkin ve T. Kaya, “Solid waste collection system selection for smart cities based on a type-2 fuzzy multi-criteria decision technique”, Soft Computing, 22:4879–4890, 2018.
- [9] S. Seker, “IoT based sustainable smart waste management system evaluation using MCDM model under interval-valued q-rung orthopair fuzzy environment”, Technology in Society, say. 71, 2022.
- [10] B. Gülsün ve K.N. Erdoğan, “Bankacılık Sektöründe Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ve Bulanık TOPSIS Yöntemleri ile Finansal Performans Değerlendirmesi”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25(1): 1-15, 2021.
- [11] A. Taskin Gumus, “Evaluation of hazardous waste transportation firms by using two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology”, Expert Systems with Applications, vol. 36, pp. 4067–4074, 2009.
- [12] N.T. Çınar, “Kuruluş Yeri Seçiminde Bulanık TOPSIS Yöntemi ve Bankacılık Sektöründe Bir Uygulama”, KMÜ Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi, 12 (18): 37-45, 2010.



YERALTI OCAĞI GALERİLERDE OLUŞAN DRENAJ SULARININ KARAKTERİZASYONU VE ARITILMASI

Burcu Türkten ^{1*}, Mustafa Işık ²

¹ Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-6181-3473, burcut@gumustasmaden.com.tr

² Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-8440-2546, mustafaisik@aksaray.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Madencilik insanoğlunun vazgeçemediği endüstriyel faaliyetlerinden bir tanesidir. Bu faaliyet içerisinde drenaj suları oluşmakta ve yaygın su kirliliğine neden olmaktadır. Su kirliliğinin önüne geçebilmek için farklı seçenekler ve arıtım teknolojileri uygulanabilmektedir. Bu çalışmada altın, gümüş, kurşun, çinko yeraltı ocağı faaliyeti yapılan bir maden ocağında oluşan drenaj suyunun karakterizasyonu ve arıtılabilirliği çalışılmıştır. Belli periyotlarda alınan atıksular ilgili sektör parametreleri dikkate alınarak karakterize edilmiştir. AKM, KOI ve Serbest kükürt parametreleri alıcı ortam deşarj standartlarının üzerinde çıkmıştır. Bu parametreleri alıcı ortam deşarj standartlarına getirebilmek için jar testi uygulanarak optimum pH ve koagülant dozu tespit edilmiştir. Sırasıyla alüminyum sülfat, demir sülfat, ve anyonik polimer kullanıldığında optimum pH'lar; 9, 8, 4 olarak tespit edilmiştir. Daha sonra her bir koagülant için optimum pH'da optimum koagülant dozu sırasıyla; 15, 25, 0,16 mg/L olarak elde edilmiştir. En iyi giderim verimleri genel olarak Alüminyum Sülfat koagülantının, kullanılması durumunda AKM, serbest kükürt, KOI değerleri deşarj standartlarının altına düşürülerek elde edilmiştir. Maliyet açısından da karşılaştırıldığında anyonik polimer koagülantının uygulanması ekonomik olarak daha avantajlı olduğu değerlendirilmiştir. Arıtılabilirlik çalışması sonuçlarına göre maden ocağında oluşan drenaj atıksuları için bir arıtma sistemi akış şeması önerilmiş ve boyutlandırma hesapları verilmiştir. Çalışma sonucu halihazırda oluşan atıksular bölgedeki jeolojik formasyonların türüne ve işletme teknolojisine göre oluşan atıksuların karakteristiği değerlendirildiğinde çevresel açıdan çok fazla problemlili bir atıksu olmadığı ve kısmen basit bir arıtım işlemi ile alıcı ortam deşarj standartlarına getirileceği sonucuna varılmıştır..

Anahtar Kelimeler: Arıtılabilirlik, Drenaj suları, Madencilik

1. Giriş

Madencilik faaliyetleri yer kabuğundaki jeolojik hammaddelerin ekonomik olarak değer elde edilmesi amacıyla bulundukları yerden verimli ve güvenli bir şekilde çıkarılmasını kapsayan işlemlerdir. Ancak aynı zamanda çevre kirliliğinin önemli kaynaklarından biridir. (Mitchell, 2009). Sanayi devrimi çevre problemlerini artırmıştır. Madencilik faaliyetleri esnasında birtakım çevre problemleri oluşur.

Ülkemiz çok çeşitli ve büyük maden kaynaklarına ev sahipliği yapmaktadır. Altın-gümüş-kurşun-çinko gibi değerli madenlerin çıkarıldığı yer altı maden ocakları bulunmaktadır. Yer altı maden işletmelerinde en önemli çevresel sorunlardan birisi yeraltı ocağından gelmesi muhtemel kar suları, kaynak suları vs. suların alıcı ortama deşarj edilmesidir. Başta pirit olmak üzere sülfürlü metalik mineral içeren kömür, sülfür formundaki baz metaller, uranyum ve değerli metal içeren madenlerde görülen asit kaya/maden drenajı sülfürlü minerallerin nemli ortamda bazen de mikrobiyolojik organizmaların katkısıyla oksitlenmesi sırasında drenaj sularının asidik özellik kazanmalarına ve geçtikleri formasyonlar içerisindeki bazı ağır ve toksik elementleri çözerek drenaj suyuna karıştırmalarına asit kaya/maden drenajı denilmektedir (Anıl, 2014). Maden ocakları faaliyetlerini



sonlandırdıklarında ve terk edildiklerinde dahi drenaj sularının oluşum potansiyeli tehlikeyi daha da artırmaktadır (Ojonimi, Asuke, Onimisi, & Onuh, 2019). Günümüzde kömür madenlerinden asit drenajının büyük ölçekte başlatıldığında durdurulabileceğini gösterebilecek hiçbir teknolojinin bulunmadığını bildirilmiştir (Ojonimi et al., 2019).

Aktif ve özellikle terk edilmiş madenlerden drene edilen sular ve maden atıkları genellikle net asidiktir (bazen aşırı derecede). Bu tür sular, genellikle yüksek konsantrasyonlarda metal (demir, alüminyum ve manganez ve muhtemelen diğer ağır metaller) ve metaloidler (genellikle arsenik en büyük endişe kaynağı olan) içermeleri nedeniyle çevre için ek bir risk oluşturur (Johnson & Hallberg, 2005).

Asidik kükürt bakımından zengin atık sular, enerji santrallerinde galvanik işleme ve baca gazlarının temizlenmesi gibi çeşitli endüstriyel işlemlerin yan ürünleridir (Johnson, 2003). Bununla birlikte, bu tür atıkların ana üreticisi madencilik endüstrisidir (Johnson & Hallberg, 2005).

Madencilik, yeraltındaki maden cevherlerinin araştırılması, çıkarılması ve işletilmesiyle ilgili teknik ve yöntemlerin bütünüdür. Yer altından cevherin çıkarılması yer üstü ve/veya yer altı madenciliği yöntemleri kullanılarak iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Açık ocak madenciliği ya da diğer bir deyişle yerüstü madenciliği, cevherin yer yüzeyine yakın bulunduğu alanlarda, gerektiğinde maden üzerindeki örtü tabakasının (pasa) alınarak ekonomik şekilde çıkarılması için uygulanan üretim şeklidir. Yüzeye yakın olan cevherin yayılımı ve boyutu açık ocak madenciliğinin de kendi içinde çeşitlenmesini sağlamıştır. Yer altı madenciliği ise cevherin derinde ve açık ocak yöntemiyle ekonomik olarak çıkarılamaması durumunda galeri ve/veya kuyular oluşturularak madenin çıkartıldığı üretim şeklidir (Anonim, 2022).

Yer altı madenciliğinde en önemli sorunlardan biri galerilerde oluşan yer altı sularıdır. Yer altı ocaklarında galerilerde çıkarılan cevherlerin üretimi esnasında derin kotlara inilmesinden dolayı yeraltı suyu problemi oluşmaktadır. Ocak içerisinde gelen suları büyük çapta depolamak mümkün değildir. Yer altı ocağında oluşan sular uygun şekilde dışarıya verilmezse galerilerde su baskınına neden olabilir. Bu yüzden yer altı ocağında oluşan suların galerilerden atılması gerekmektedir. Galerilerden deşarj edilen sular alıcı ortama verilmeden önce Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Tablo7.1' e göre deşarj standartlarını sağlaması gerekmektedir. Aksi halde, galerilerden deşarj edilen sular, alıcı ortamın su kalitesini bozarak, sucul ekosisteme ve çevreye zarar verebilir.

Maden ocaklarında oluşan suların karakteristiklerini tespit etmek ve kontrol altına almak çevresel açıdan önem taşımaktadır. Ülkemizde 31.12.2004 Tarih ve 25687 Sayılı Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Madde 4 j bendi gereğince (Resmi Gazete, 2004): “Atık suların arıtılmadan alıcı ortama verilmesi yasak olup, arıtılmış atık suyun verileceği alıcı ortam için belirlenmiş kalite standartlarının olumsuz yönde etkilenmemesi esastır”. Hükmü yer almaktadır.

Yer altı sularının arıtımı konusunda literatüre bakıldığında çok fazla kaynak bulunmamaktadır. Ülkemizde madencilik faaliyetlerinin gelişmesiyle birlikte yer altı sularının arıtımı önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında Gümüştaş Madencilik ve Tic. A.Ş. firmasına ait yer altı ocağında oluşan drenaj sularının karakterizasyonu ve arıtılabilirliği ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

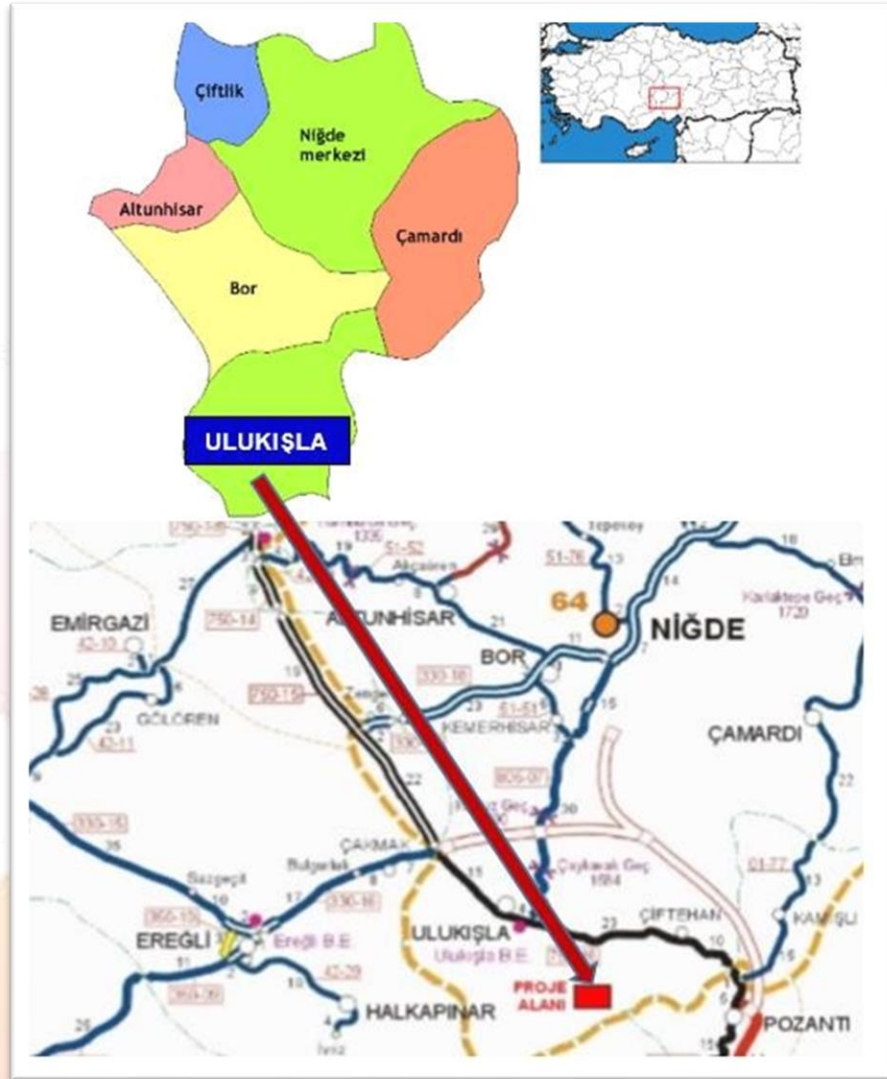
2.1. Maden Sahasının Tanıtımı

2.1.1. Maden Sahasının Yeri

Gümüştaş Madencilik ve Ticaret A.Ş.'ye ait 541-64789 sicil no'lu ruhsat sahasındaki yeraltı “altın - gümüş - kurşun - çinko - pirit” maden ocağı, Niğde İli, Ulukışla İlçesi, Madenköy mevki sınırları içerisinde bulunmakta olup, maden ocağı Niğde İli'ne yaklaşık 77 km, Tepeköy'de bulunan tesise 40 km, Ulukışla İlçesine 28 km, Çiftehane İlçesine 19 km ve Madenköyü'ne ise 800 metre mesafede bulunmaktadır. 1/25000 ölçekli Niğde n33-a1 ve n33-a2 paftaları içerisinde bulunmaktadır. Çalışma alanı Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de gösterilmektedir.

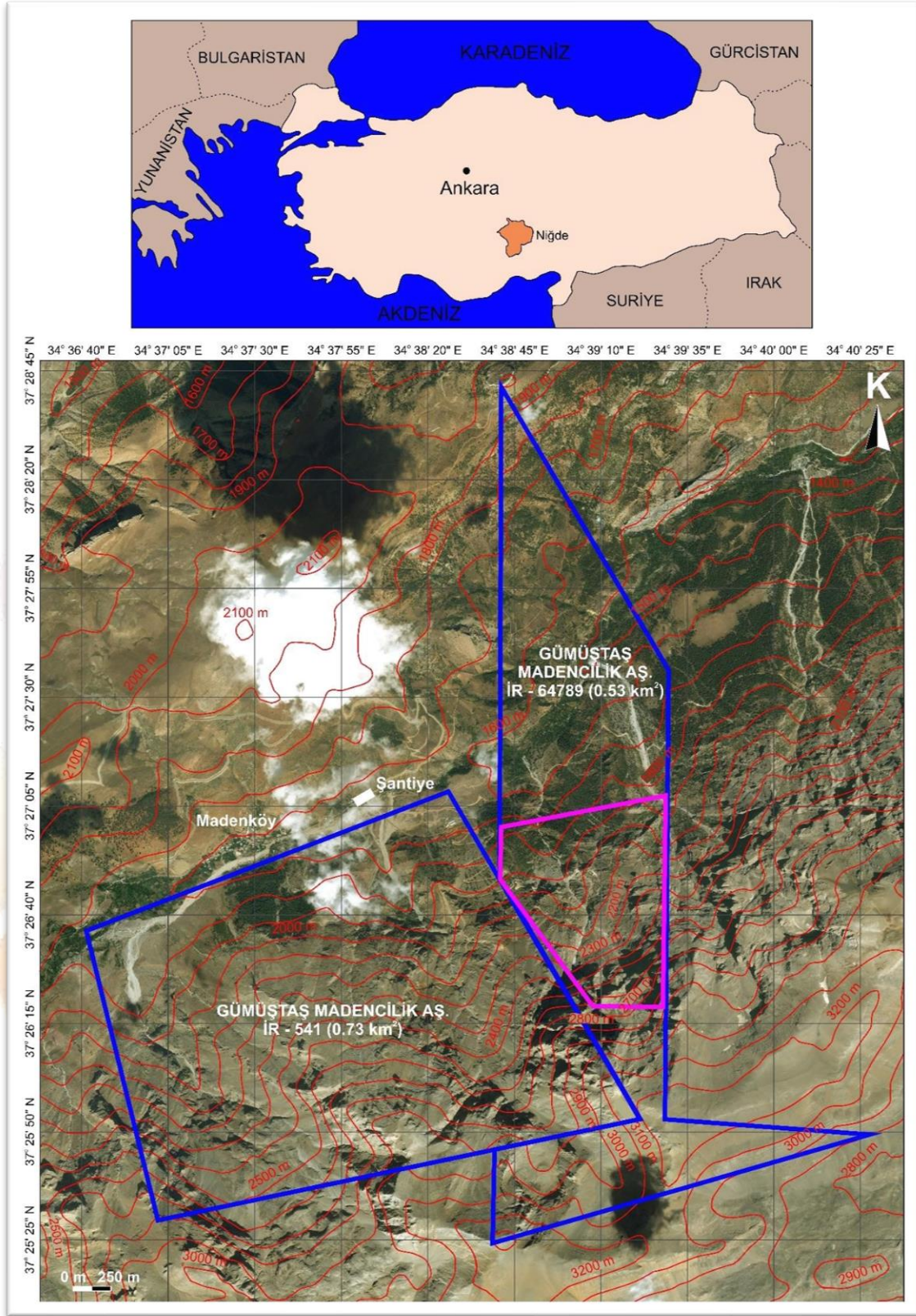


Niğde ilinde en fazla bulunan madenler; demir, pomza, diyatomit, mermer ve jips'tir. Ulukışla İlçesinde bulunan madenler; jips, demir, altın, gümüş, bakır-çinko-kurşun'dur. Ulukışla ilçesi, Madenköy mevkiinde altın, gümüş, kurşun, çinko'nun çıkarılması ve işlenmesi amacıyla Gümüştaş Madencilik ve Tic. A.Ş. tarafından yeraltı ocağı kurulmuştur.



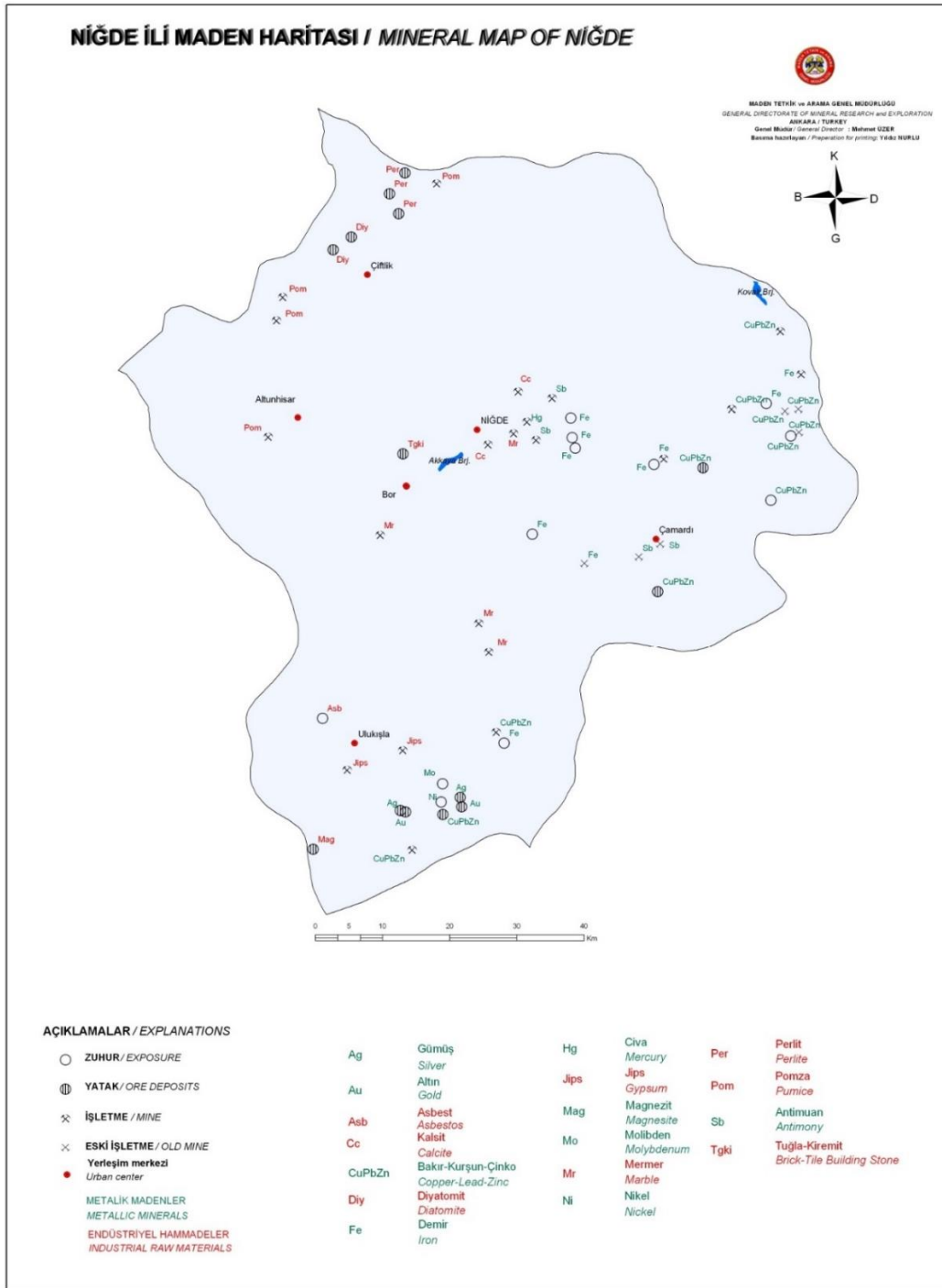
Şekil 2.1. Çalışma alanı yer bulduru haritası





Şekil 2.2. İşletme izin sahasının 1/25000 ölçekli Niğde n33-a2 paftasındaki konumu





Şekil 2.3. Niğde ili maden haritası

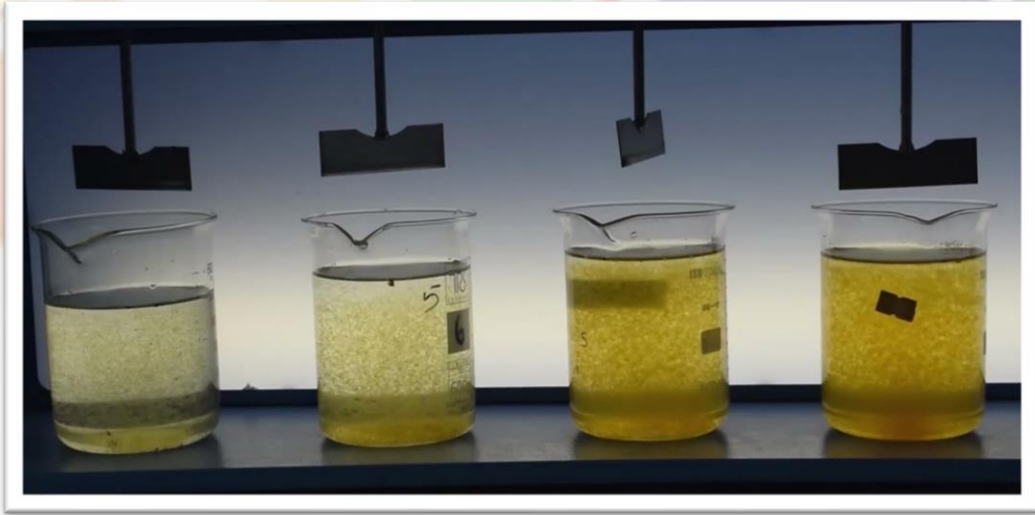
2.2. Arıtım Çalışmaları

Jar testi arıtılabilirlik çalışmalarında kullanılan yaygın bir test olmakla birlikte, testin amacı, kullanılan koagülant türü, kirleticiler gibi faktörlere bağlı olarak test şartlarında bazen kısmi farklılıklar olabilmektedir (ASTM, 1995; Driscoll & Kartik, 2008; Eckenfelder, Ford, & Engle, 2009). Bu çalışmada test aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir.

- Atık suyu temsil edecek şekilde örnekleme yapılır.
- Ham atıksuyun ilgili askıda katı madde (AKM), KOİ, BOİ, katyon, anyon, pH, iletkenlik ve alkalinite gibi parametreleri ölçülür.
- Test örneği öncelikle gerçek işletme şartlarını sağlayacak bir pH değerine ayarlanır.
- Test kimyasalları tekil ya da çoklu kombinezonlarda düşükten yüksek derişimlere doğru gerçek ölçekli işletim şartları dikkate alınarak eklenir.



- Test beheri test kimyasallarının reaksiyonunu hızlı bir şekilde başlatılması için $G=1500-5000 \text{ s}^{-1}$ değerleri sağlanacak şekilde karıştırılır.
- Kimyasal çökeleklerin veya koagüle olan katı maddelerin floklaşması için test ortamı $G=10-75 \text{ s}^{-1}$ değerlerinde karıştırılır.
- Arıtılmış suyu oluşana çökelekler veya floklardan ayırmak için 30-60 dakika arası çöktürme ya da daha kısa bir sürede filtrasyon işlemi uygulanır.
- Elde edilen arıtılmış suda ilgili analizler gerçekleştirilir.
- Prosedür Eckenfelder et al. (2009) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir.
- 200 ml örnek kullanılarak nötrale yakın pH değerlerinde artan dozlarda koagülant ilave edilir, her ilaveden sonra 1 dakika hızlı karıştırma, ardından 3 dakika yavaş karıştırma gerçekleştirilir. Görünür bir flok oluşuncaya kadar bu işleme devam edilerek sonraki adımda kullanılacak doz belirlenir.
- Buradan elde edilen doz kullanılarak, en az 6 adet 1000 mL örnek beherlere konur.
- Kullanılan koagülantın türüne de bağlı olarak (koagülantların işlev gösterdiği farklı tipik pH aralıkları vardır) mümkün olan en fazla sayıda asit veya baz ilavesi ile farklı pH değerlerinde (pH=4,0, 5,0, 6,0, 7,0, 8,0, 9,0) örnekler hazırlanır. Koagülant ilavesinden sonra pH'nın istenilen pH'da sağlanması için tamponlama ajanı (Sodyum bikarbonat gibi) ilave edilebilir.
- 3 dakika hızlı karıştırmayı (100 rpm 1 dakika (Spellman, 2020)) takiben 12 dakika yavaş karıştırma (floklaşma) (30 rpm 20 dakika (Spellman, 2020)) uygulanır.
- Floklar çöktükten sonra (20-30 dakika (Spellman, 2020)) ya da filtrasyonla elde edilen duru suda giderimi araştırılan parametreler analizlenir.
- pH a karşı giderilen parametre grafiğe geçirilir ve optimum pH değeri grafikten bulunur.
- Optimum pH değerinde farklı koagülant dozlarında jar testleri tekrarlanır.
- Koagülant dozuna karşı % giderim grafiğe geçirilerek optimum koagülant dozu bulunur.
- Eğer floklaşma yardımcı olarak polielektrolit kullanılacaksa testler tekrarlanır, polielektrolitin farklı dozları hızlı karıştırma adımından sonra ilave edilir.



Şekil 2.4. Jar testi düzeneği

İçme sularında ve atık sularda kolloid halde maddeler istenmez. Kolloid maddeler ($1\mu\text{m}$, $0.1\mu\text{m}$) çökeltilecek veya filtre edilerek uzaklaştırılmazlar bu nedenle, bu tür kolloidlerin sudan çöktürülme ile uzaklaştırılması için kimyasal maddelere gerek duyulmaktadır. Bu arıtım yönteminde kullanılan kimyasal maddelere koagülant adı verilmektedir. Koagülantlar suya ilave edildiğinde kolloidal taneciklerin stabiliteelerini değişik şekillerde bozarlar ve bir araya gelerek büyümelerini kolaylaştırırlar. Bu şekilde bir araya gelen taneciklerin boyutları büyür ve daha kolay çökebilir bir yapı kazanır. Suyu koagülant madde ilavesi işlemine ise koagülasyon adı verilmektedir.



Koagülasyondan sonraki aşama, su içerisinde stabiliteleri bozulmuş olan taneciklerin bir araya gelerek flok adı verilen daha büyük yapılara dönüştürülmesi için birbirleriyle temas ettirilme kısmıdır. Bu işlem suyun yavaş karıştırılması ile gerçekleştirilir ve flokülasyon olarak adlandırılır. Kolloidlerin stabilitelerinin bozulması aşağıdaki 4 şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

- Çift tabakanın sıkıştırılması
- Adsorbsiyon ve yük nötralizasyonu
- Çökelek içine hapsetme
- Adsorbsiyon ve tanecik arasında köprü kurma

Zeta Potansiyeli: Kolloidler bulundukları sıvı ortam içinde daima bir elektrik yüküne sahiptirler. Partikül yüzeyinde zıt iyonların konsantrasyonu çok büyüktür. Yüzeyden uzaklaştıkça zıt iyon derişimi azalır. Bu yüzden tanecik yüzeyi ile sıvı çözelti arasında bir elektriksel potansiyel oluşur. Tanecik yüzeydeki bu potansiyele zeta potansiyeli denir.

Bu potansiyel kolloid süspansiyonun kararlılığı ile ilgili bir potansiyeldir. Kolloidlerin uzun süre yapıların korumaları, dengeli olduklarını gösterir. Bu dengeli hal kolloidlerin çöktürülmesi açısından istenmeyen bir durumdur. (Anonim, 2016)

Koagülasyon – flokülasyon çalışmalarında kullanılan kimyasalların listesi verilmiştir.

2.2.1. Kullanılan Kimyasalları

Deneysel çalışmalarda kullanılan kimyasallar Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kullanılan Kimyasallar

Sıra	Kimyasal	Marka	Açıklama
1	Alüminyum Sülfat(Alum) $Al_2(SO_4)_3$	LAPİS	Yoğunluk: 1.65 – 1.7 g/cm ³ Su arıtma kimyasallarında, maddenin sentez olarak bir proses kimyasalı olarak kullanılmasında, Ara madde olarak kullanılmasında, pH düzenleyiciler, topaklayıcılar, çöktürücüler, nötralizasyon ajanları gibi ürünlerde kullanılır.
2	Demir Sülfat $FeSO_4$	NES Madencilik	İçerik %92 Flotasyon madenciliği için su arıtma uygulamalarında koagülant olarak kullanılır.
3	Flopam AN 923 SH	SNF	Bağıl yoğunluk: 0.6-0.9 (Suda) Anyonik polimer kütle yoğunluğu :0.80
4	Sülfürik Asit	Hicri Ercili	%98 yoğunluk:1,835 g/cm ³ pH ayarlayıcı olarak kullanılmaktadır.
5	Sodyum Hidroksit NaOH	Eti Soda	pH düzenleyici olarak kullanılmaktadır.

2.3. Analiz Yöntemler

Çalışmada kullanılan yöntemler ve ekipmanlar verilmektedir. Çizelge 2.2’de verilmektedir.

Çizelge 2.2. Karakterizasyonda kullanılan yöntemler ve ekipmanlar

Parametreler	Yöntem	Cihaz/ekipman
pH	TS EN ISO 10523	Hach HQ 40 D Multimetre
Askıda Katı Madde (AKM)	TS EN 872	Vakum Filtrasyon Seti, Etüv
KOİ	SM 5220 B	Termo Reaktör, Titrasyon Seti
Kurşun (Pb)	EPA 200.7	Mikrodalga Fırın ve ICP-OES
Toplam Siyanür (CN ⁻)	SM 4500 CN C E	Ön işlem Isıtıcı cam set ve Spektrofotometre
Demir (Fe)	EPA 200.7	Mikrodalga Fırın ve ICP-OES
Çinko (Zn)	EPA 200.7	Mikrodalga Fırın ve ICP-OES
Serbest Kükürt (S)	İşletme İçi Metot	ICP-OES
Balık Biyodeneyi (ZSF)	TS 5676	Akvaryum setleri ve Deney Balıkları
Civa (Hg)	EPA 200.7	Mikrodalga Fırın ve ICP-OES/AAS
Kadmiyum (Cd)	EPA 200.7	Mikrodalga Fırın ve ICP-OES
Bakır (Cu)	EPA 200.7	Mikrodalga Fırın ve ICP-OES
Toplam Krom (Cr)	SM 3030 D-K	Mikrodalga Fırın ve ICP-OES



3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Atık Su Karakterizasyonu

Maden sahasında atık suyun olduğu galerilerinden elde edilen örneklerde gerçekleştirilen analizlerin sonuçları Çizelge 3.3’de verilmektedir.

Çizelge 3.3. Galerilerin içerisinde son çöktürme havuzunda oluşan atık suyun özellikleri

Parametre-Birim	09.12.2020	17.06.2021	10.12.2021	10.12.2021	Standart sapma	Ortalama değer	Bu çalışma 15.04.2022	SKKY tablo7.1 kompozit numune 2 saat
pH	8,45	8,33	8,29	7,98	0,17	8,3	7,74	6-9
KOİ (mg/L)	89	137	505	206	162	234,3	268	80
AKM (mg/L)	1591	4972	1154	6811	3632	2356	4961	70
Bakır (mg/L)	0,005	0,0039	<0,002	0,0082	0	0	0	5
Cıva (mg/L)	0,0007	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0	<0,0005	-
Çinko (mg/L)	0,066	0,140	0,078	<0,001	0,1	0,03	<0,001	3
Demir (mg/L)	0,128	0,032	0,274	0,042	0,1	0,10	0,783	3
Kadmiyum (mg/L)	0,00008	<0,001	0,0036	<0,001	0,00184	0	<0,001	-
Krom (mg/L) (Toplam)	0,0005	0,012	0,0029	0,0059	0,005	0,004	0,031	2
Kurşun (mg/L)	0,0005	<0,005	0,007	0,009	0,005	0,003	0,027	0.5
S.Kükürt (mg/L)	-	76,35	15,42	10,33	34	29	44,80	15
Toplam Siyanür (mg/L)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0,005	<0,005	0,1
Renk (Pt-Co)	0,5	13	83	<5	32,2	36,31	21	280
Balık Biyodeneyi (ZSF)	-	<4	<4	<4	0	4	-	4

Çizelge 3.4. Galerilerde kaynak noktasında oluşan atık sellikleri

Parametre-Birim	09.12.2020	17.06.2021	10.12.2021	Standart sapma	Ortalama değer	SKKY tablo7.1 kompozit numune 2 saat
pH	8,13	7,81	8,13	0,15	8,02	6-9
KOİ (mg/L)	<10	<10	10	0	10	80
AKM (mg/L)	28,5	-	28,5	0	28,5	70
Bakır (mg/L)	0,0005	0,0022	0,5	0,23	0,17	5
Cıva (mg/L)	0,00007	<0,0005	0,07	0,02	0,03	-
Çinko (mg/L)	0,001	0,0021	<0,001	0,0005	0,001	3
Demir (mg/L)	0,021	0,019	<0,01	0,016	0,005	3
Kadmiyum (mg/L)	0,00008	<0,001	<0,001	0,0006	0,0004	-
Krom (mg/L) (Toplam)	0,0005	0,0099	<0,002	0,004	0,004	2
Kurşun (mg/L)	0,0005	<0,005	<0,005	0,0035	0,0021	0.5
S.Kükürt (mg/L)	-	28,74	15,78	22,6	6,48	15
Toplam Siyanür (mg/L)	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0	0.1
Renk (Pt-Co)	0,5	-	<5	0,5	0	280
Balık Biyodeneyi (ZSF)	-	-	<4	<4	0	4





Şekil 3.1. Galerideki su numuneleri

Elazığ ilinde bir maden sahası galeri suyunun Han Çayına olası etkisi çalışmasında galeriden deşarj edilen suyun karakterizasyonu belirlenmeye çalışılmış, SKKY Tablo 7.1’de belirtilen parametrelere göre izleme çalışması yapılmıştır. İzleme çalışmasında galeri suyunun pH, AKM ve krom değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Galerideki suyun pH değeri 12, AKM konsantrasyonu 188 mg/L, en yüksek krom konsantrasyonu ise 5,2 mg/L olarak tespit edilmiştir. Yapmış olduğumuz tez çalışmamızda ise galeri ocağından alınan su numunelerinde pH değeri 8 civarında olup, SKKY Tablo 7.1’de belirtilen (6-9) sınır değeri sağlamaktadır. AKM konsantrasyonu yapmış olduğumuz tez çalışmasında da SKKY Tablo 7.1’de belirtilen (70 mg/L) sınır değer üzerinde kalmakta olup, benzer özellik göstermektedir. Yapmış olduğumuz tez çalışmasında yapılan analizlerde Krom değerinin SKKY Tablo 7.1’de belirtilen (2 mg/L) sınır değerinin altında kaldığı görülmekte olup, Krom parametresi yönünden benzerlik göstermemektedir. Yapmış olduğumuz tez çalışmasında KOI değeri SKKY Tablo 7.1’de belirtilen (80 mg/L) sınır değerinin üzerinde kalmakta olup, KOI parametresi yönünden daha önce yapılan tez çalışmasından farklılık göstermektedir. Cevher çıkarımının yapıldığı maden ocaklarındaki jeolojik formasyonların farklı olmasından dolayı oluşan drenaj sularının karakterizasyonu farklı olmaktadır.

Bölgenin jeolojik yapısından dolayı kireçtaşı (Bolkar Mermeri) olmasından dolayı atık su özellikleriyle kıyaslandığında tipik asit kaya maden drenajı özelliği taşımamaktadır.

3.2. Alüminyum Sülfat Arıtım Çalışmaları

Maden ocağından son çöktürme havuzundan alınan su numunelerinde optimum koagülantın belirlenmesi amacıyla jar testleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle stok çözeltisi hazırlanmıştır. 100 mg alüminyum sülfat hassas terazide tartılarak, 50 ml’lik balon jojeye saf su eklenerek 2 g/l’lik alüminyum sülfat stok çözeltisi hazırlanmıştır. 600 ml’lik behere 200 ml’lik atık su konularak pH metre ile atık suyun pH değeri 7,80 olarak ölçülmüştür. 200 ml örnek kullanılarak nötrala yakın pH değerlerinde artan dozlarda koagülant ilave edilmiştir. Her ilaveden sonra 1 dakika 100 rpm’de hızlı karıştırma, ardından 3 dakika 30 rpm’de yavaş karıştırma gerçekleştirilmiştir. Görünür bir flok oluşuncaya kadar bu işleme devam edilerek 60 dakika çöktürmeye bırakılmıştır. Sonraki adımda kullanılacak kaba koagülant alüminyum sülfat dozu 20 mg/L olarak belirlenmiştir.

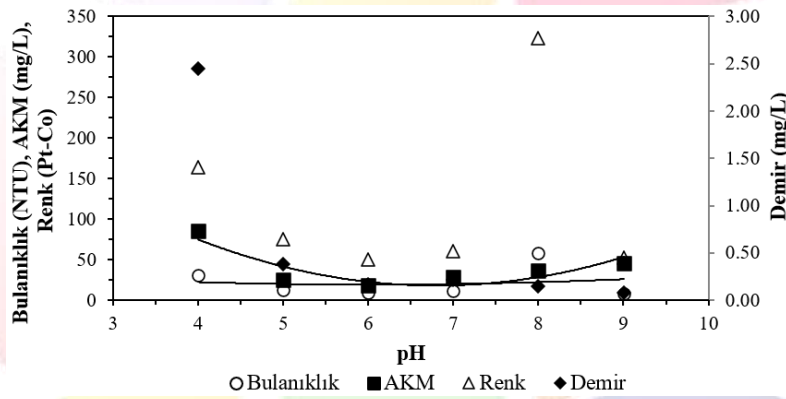
Koagülant dozu 20 mg/L alüminyum sülfat olacak şekilde, pH’ı 7,80 olan atık suya 1N’lik sülfürik asit ve 1N’lik sodyum hidroksit çözeltilerinden ilave edilerek pH’ları sırasıyla 4,5,6,7,8, 9 olacak şekilde 400’er mL’lik örnekler hazırlanmıştır. Örnekler koagülant ilave edildikten sonra 1 dakika 100 rpm’de hızlı karıştırma, ardından 3 dakika 30 rpm’de yavaş karıştırma gerçekleştirilmiş, daha sonra 60 dakika çöktürmeye bırakılmıştır. Çöktürme işleminden sonra üst duru sudan alınan örneklerde bulanıklık, AKM, KOI, renk, ve demir parametreleri analizi sonucunda elde edilen



sonuçlar Çizelge 3.5 ve Şekil 3.4’de gösterilmektedir. Sonraki adımda optimum pH düzeyi belirlenir. Optimum pH değeri 9 olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.5 ve Şekil 3.4’de görüleceği üzere farklı pH değerlerinde farklı bulanıklık değerleri elde edilmiştir. pH 9’da bulanıklık değeri 8,2 NTU ölçülmüştür. Ekonomik olarak pH’ın değişmesi maliyetli olacağından ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Tablo 7.1 deşarj standartlarını pH 9’da sağladığı görülmekte olup, optimum pH değeri 9 olarak belirlenmiştir. Alüm ile yapılan koagülasyon çalışmalarında uygun pH aralığı yaklaşık olarak 5,5-7,7 arası, bazı durumlarda ise 5-9 arası bildirilmektedir.

Çizelge 3.5. Alüminyum sülfat optimum pH değerinin belirlenmesi

Behar No	pH	Renk (Pt-Co)	Demir (mg/L)	AKM (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	COD (mg/L)
1	4	164	2,45	85	30,9	<10
2	5	75	0,38	25	12,3	<10
3	6	50	0,17	18	9,2	<10
4	7	60	0,22	29	11,9	<10
5	8	323	0,15	36	57,6	<10
6	9	52	0,08	46	8,2	<10



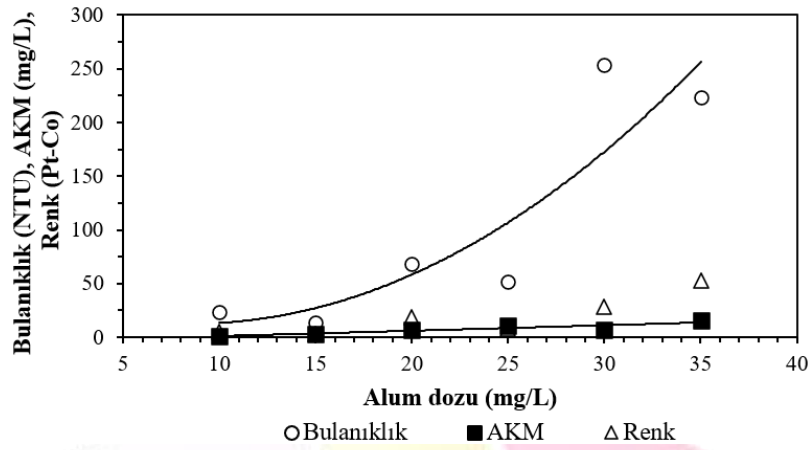
Şekil 3.4. Alüm ile farklı pH değerlerinde jar testi sonuçları

Optimum koagülant dozunun belirlenmesi amacıyla 6 adet behere 400 ml atık su numunesinden ilave edilmiştir. 6 adet atık su numunesinin pH'ı 9'a ayarlanmıştır. Suyun pH'ı 7,80 'lerde olduğu için pH ayarlamak için hazırlanan 1N'lik sülfürik asit ve 1N'lik sodyum hidroksit çözeltilerinden ilave edilerek pH'lar ayarlanmıştır. 400 ml örnek kullanılarak 6 adet atıksu numunesinde belirtilen pH 9'a ayarlanarak artan dozlarla sırasıyla 10,15,20,25,30,35 mg/L koagülant ilave edilmiştir. 1 dakika 100 rpm'de hızlı karıştırma, ardından 3 dakika 30 rpm'de yavaş karıştırma gerçekleştirilmiş olup, görünür bir flok oluşuncaya kadar bu işleme devam edilerek 60 dakika çöktürmeye bırakılmıştır. Sonraki adımda optimum koagülant dozu belirlenmiştir. Çizelge 3.6 ve Şekil 3.5 'de görüleceği üzere 15 mg/L koagülant dozunda SKKY tablo 7.1'de verilen deşarj standartlarını sağlamakta olup, 15 mg/L koagülant dozunda renk 3,33 Pt-Co, bulanıklık 14 NTU olarak ölçülmüştür. Optimum alüminyum sülfat için koagülant dozu 15 mg/L olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.6. Optimum alüminyum sülfat koagülant dozunun belirlenmesi

Behar No	pH	Koagülant Dozu (mg/L)	Renk (Pt-Co)	Demir (mg/L)	AKM (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	COD (mg/L)
1	9	10	5,38	<0,01	1,33	24	<10
2	9	15	3,33	<0,01	2,66	14	<10
3	9	20	18,5	<0,01	6,66	68	<10
4	9	25	8,07	<0,01	11,3	52	<10
5	9	30	28,3	<0,01	7,33	254	<10
6	9	35	53,1	<0,01	15,3	223	<10





Şekil 3.5. Farklı alum dozları parametre değişimleri



Şekil 3.6. Jar testi düzeneği arıtım çalışmaları örnekler

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada altın, gümüş, kurşun, çinko yeraltı ocağı faaliyeti yapılan bir maden ocağında oluşan drenaj suyunun karakterizasyonu ve arıtılabilirliği çalışılmıştır. Su kirliliğinin önüne geçebilmek için farklı teknolojiler, seçenekler uygulanabilmektedir.

Yer altı madencilğinde en önemli sorunlardan biri galerilerde oluşan yer altı sularıdır. Yer altı ocaklarında galerilerde çıkarılan cevherlerin üretimi esnasında derin kotlara inilmesinden dolayı yeraltı suyu problemi oluşmaktadır. Ocak içerisinde gelen suları büyük çapta depolamak mümkün değildir. Yer altı ocağında oluşan sular uygun şekilde dışarıya verilmezse galerilerde su baskınına neden olabilir. Bu yüzden yer altı ocağında oluşan suların galerilerden atılması gerekmektedir. Galerilerden deşarj edilen sular alıcı ortama verilmeden önce Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Tablo7.1' e göre deşarj standartlarını sağlaması gerekmektedir. Aksi halde, galerilerden deşarj edilen sular, alıcı ortamın su kalitesini bozarak, sucul ekosisteme ve çevreye zarar verebilir. O yüzden bu suların çevreye zarar vermemesi için kontrol altına alınması gerekmektedir. Bu çalışmada oluşan atık sular basit bir fiziksel, kimyasal işlemle mevzuatın ön görmüş olduğu standart değerlere getirilmiştir. Belli periyotlarda alınan atık sular ilgili sektör parametreleri dikkate alınarak karakterize edilmiştir. Mevzuata uygun olmayan AKM, KOI ve Serbest Kükürt değerleri sırasıyla ortalama olarak; 2356 mg/L, 234 mg/L ve 29 mg/L'dir. Bu parametreler alıcı ortam deşarj standartlarının üzerinde çıkmıştır.



Bu parametreleri alıcı ortam deşarj standartlarına getirebilmek için jar testi uygulanarak optimum pH ve koagülant dozu tespit edilmiştir. Sırasıyla alüminyum sülfat, demir sülfat, ve anyonik polimer kullanıldığında optimum pH'lar; 9, 8, 4 olarak tespit edilmiştir. Daha sonra her bir koagülant için optimum pH'da optimum koagülant dozu sırasıyla; 15, 25, 0.16 mg/L olarak elde edilmiştir. En iyi giderim verimleri genel olarak alüminyum sülfat koagülantının, kullanılması durumunda AKM, Serbest Kükürt, KOI değerleri düşürülerek elde edilmiştir.

Maliyet açısından da karşılaştırıldığında Anyonik polimer koagülantının uygulanması ekonomik olarak daha avantajlı olduğu değerlendirilmiştir. Arıtılabilirlik çalışması sonuçlarına göre maden ocağında oluşan drenaj atık suları için bir arıtma sistemi akış şeması önerilmiş ve boyutlandırma hesapları verilmiştir. Çalışma sonucu halihazırda oluşan atık sular bölgedeki jeolojik formasyonların türüne ve işletme teknolojisine göre oluşan atık suların karakteristiği değerlendirildiğinde çevresel açıdan çok fazla problemli bir atık su olmadığı ve kısmen basit bir arıtım işlemi ile alıcı ortam deşarj standartlarına getirileceği sonucuna varılmıştır.

Ekonomik olarak arıtım için ileri oksidasyon yöntemine gerek kalmaksızın deşarj standartları sağlanmıştır. Bu suyun yeniden proseste, sondaj vs. kullanım suyu olarak değerlendirilmesi için ileri arıtım teknolojileri kullanılması tavsiye edilebilir.

5. Kaynakça

Anıl, M. (2014). Parajenezlerinde Sülfürlü Mineraller İçeren Maden Yataklarında Oluşabilecek Asit Kaya (Maden) Drenajlarının Çevresel Etkileri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1), 1-26.

Anonim. (2016). Jar testi deney föyü Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü.

Anonim. (2022). Madencilik Faaliyetleri, Sektörel Uygulama Kılavuzu, https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler//22_madenc-l-k-faal-yetler--20200103075114.pdf, Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.

ASTM. (1995). Standard practice for coagulation– flocculation jar test of water E1–1994 R (1995), D 2035–80. In: ASTM, West Conshohocken.

Driscoll, T., & Kartik, J. (2008). Industrial Wastewater Management, Treatment and Disposal. *WEF Manual of Practice No. FD-3rd*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 474-489.

Eckenfelder, W. W., Ford, D. L., & Englande, A. J. (2009). *Industrial Water Quality*: McGraw-Hill Education.

Johnson, D. B. (2003). Chemical and microbiological characteristics of mineral spoils and drainage waters at abandoned coal and metal mines. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 3(1), 47-66.

Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the total environment*, 338(1-2), 3-14.

Mitchell, J. W. (2009). An assessment of lead mine pollution using macro-invertebrates at Greenside Mines, Glenridding. *Earth & E-nvironment*, 4, 27-57.

Ojonimi, C. T. I., Asuke, F., Onimisi, M. A., & Onuh, C. (2019). Acid Mine Drainage (AMD): an environmental concern generated by coal mining. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 6(4), 1875-1881.

Spellman, F. R. (2020). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*: CRC Press.



GELENEKSEL MOONWASH YÖNETİMİNİN ÖRME KUMAŞLAR ÜZERİNDEKİ DEFORMASYONUNU AZALTMAK AMACIYLA ALTERNATİF YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Buse Mert ¹, Ali Sevim ², Funda Sever ³

¹ Akar Tekstil A.Ş., Türkiye

busemert@akartextile.com

² Akar Tekstil A.Ş., Türkiye

alisevim3@gmail.com

³ Akar Tekstil A.Ş., Türkiye

fundasever@akartextile.com

* Sorumlu Yazar

Özet

Tekstil sektörü sürekli yaşayan ve gelişen bir sektör olup kullanılan teknolojiler ve tasarımlar devamlı gelişim göstermektedir. Son yıllarda eskitilmiş ve boyası solmuş görüntüsü kazanan ürünler yoğun ilgi görmektedir. (Hacı et al., 2015) Bu görüntüyü elde edebilmek için renk açıcı teknikler ve yıkama teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknik yoğun olarak denim ve örme kumaşlar üzerinde kullanılmaktadır. (Technical Bulletin, 2000)

Bu çalışmada örme kumaştan mamul ürünler üzerinde AKR001 ile ağartma yöntemi denenerek enerji maliyetleri, işçilik süreleri ve tekstil atıklarının azaltılması hedeflenerek sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Geleneksel moonwash yöntemi yerine geliştirilen bu alternatif çalışmada sağlanan avantajlar metnin sonuçlar kısmında detaylı şekilde yorumlanmaktadır. Geliştirilen yeni proses çevre duyarlılığı ve verimlilik bakımından sektörün sürdürülebilirlik anlamında ki değişimine katkıda bulunacaktır.

Anahtar Kelimeler: Ağartma, Eskitme, Sürdürülebilirlik, Ponza Taşı, ZDHC, Parça boyama, Toz Asit

1. Giriş

Sanayi sektörünün büyümesiyle birlikte, sanayi atıklarından çevre büyük oranda kirlenmekte ve zararlı kimyasallarla çalışanların sağlık durum olumsuz etkilenmektedir. Bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için büyük markalarda üstlerine düşen sorumluluğun farkındadırlar. Modaya yön veren birçok büyük marka, çevre üstünde büyük etkisi olan zararlı kimyasallara kısıtlamalar getirmiş ve bu kimyasalların kullanımı azaltmaya yönelik çalışmalar yapmaya başlamışlardır. (Sökümünde et al., 2017)

Tekstil sektörü sürekli yaşayan ve gelişen bir sektör olup kullanılan teknolojiler ve tasarımlar devamlı gelişim göstermektedir. Son yıllarda eskitilmiş ve boyası solmuş görüntüsü kazanan ürünler yoğun ilgi görmektedir. (Hacı et al., 2015) Bu görüntüyü elde edebilmek için renk açıcı teknikler ve yıkama teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknik yoğun olarak denim ve örme kumaşlar üzerinde kullanılmaktadır. (Technical Bulletin, 2000)

Kumaşın indirgen ya da yükseltgen maddelerle doğal renklerinden arındırılıp beyazlatılması işlemine ağartma denir. Pamuklu kumaşların ağartılmasında, boya sökmede oksidasyon maddesi olarak kullanılan potasyum permanganat tekstil sektöründe sıklıkla kullanılan fakat zararlarından dolayı yasaklanması sürekli gündeme gelen kimyasallar arasındadır. (Öner, 2019) Genel formülü



KMnO₄'tür ve molekül ağırlığı 158,032 g'dır. Permanganatlar dayanıksız bir asit olan mangan oksidin tuzlarıdır.(Birgül, 2006)

Ağartma işleminde taş yıkama, enzim yıkama, random yıkama ve reçine yıkama gibi yöntemler kullanılmakla birlikte en yaygın yöntem ponza taşı ile yıkama yöntemidir. (Başaran & Aksel, 2017) Bu yöntemde kullanılan ponza taşı tek başına ağartma görevi göremediğinden, içerisine permanganat emdirilerek ağartma işlemi gerçekleştirilir. Bu nedenle doğal bir maden olan ponza taşının permanganat ilavesi görmesinden dolayı taş yıkama yönteminin gün geçtikçe kısıtlanmakta ve alternatifinin arayışı gündeme gelmektedir. (Şahiner & Eroğlu, 2020)

Ponza taşı Nevşehir taraflarında doğal madenlerden elde edilen farklı boyutlara sahip bir üründür. Örme kumaşları ağartma işleminde genelde 2-4 cm gömlek taşı olarak tabir edilen ponza taşı kullanılır. Taş boyutunun küçülmesi kumaşı deformasyonunu minimize etse de taşın makine parçalarına zarar vermesi ve su giderlerinin tıkanmasına sebep olmasını önleyememektedir. (Özkan & Tuncer, n.d.)

Taş yıkama yöntemi denim kumaşlarda sıklıkla tercih edilen başarılı bir yöntem olmasına rağmen örme kumaşlardaki başarısı farklılık göstermektedir. Örme kumaşlar denim kumaşlara kıyasla daha hassas ve dayanımı düşük kumaşlardır. (Agrawal, 2017)Ponza taşı ile yıkama durumunda kumaşta kısmi delinmeler ve dikiş kısımlarında yıpranmalar olabilmektedir. Fire sayısının artması hem maliyetleri artırmakta hem de tekstil atıklarının oluşmasına sebep olmaktadır. (Roy Choudhury, 2019)

Ponza taşının tüm bu olumsuzluklarını gidermek amacıyla alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu çalışmada AKR001 ile ağartma yöntemi denenerek enerji maliyetleri, işçilik süreleri ve tekstil atıklarının azaltılması hedeflenerek sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışma örme kumaşlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu kumaşlara AKR001 adı verilen toz asit uygulanarak kumaşlar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

ZDHC (zero Discharge of Hazardous Chemicals) 2011 yılında tehlikeli atıkların sıfır deşarjı programını oluşturmak üzere kurulmuş uluslararası bir vakıftır. Program, tekstil, deri ve ayakkabı sektöründe, sanayiye çevre bilinci kazandırmak amacıyla oluşturulmuştur. Küresel bir program olan ZDHC ile tekstil sektöründeki üreticilerin, üretim aşamasında kullanılan kimyasallar sonrası oluşan atık suyun minimize edilmesini hedeflemektedir.

Kimyasalın tekstil sektöründe geçerli olan ZDHC platformunda 1. Seviyede de yer alması, kullanılan bu kimyasalın çevre için zararsızdır.

2.1. Materyal

Çalışma aşamasında anyonik karakterli ıslatıcı, NaCl, Na₂CO₃, aşındırılabilir direkt boya grupları, Asetik Asit, polimer bazlı kırık önleyici, AKR001 (toz asit), reaktif sabun, anyonik yumuşatıcı ve taş enzim kullanılmıştır.

Islatıcı: Parça boyama aşamasının başlangıcında ürün liflerini açarak boyaların liflere işlenmesini sağlar.

Tuz: Boya gruplarının liflere olan ilgisini artırarak boyarmadde moleküllerinin liflere bağlılığını arttırırken soda ise boyarmadde moleküllerinin liflerinin yüzeyine homajen şekilde dağılmasını sağlamaktadır.

Direk boya: aşındırma işlemi görecektürüne Van der waals kuvvetleriyle bağlanan direk boya grupları kullanılır, boyanın aşındırma sırasında daha kolay üründen ayrılması sağlanır.



Tampon asit : Parça boyama banyosunda Ph'ı dengeleyerek ürün üzerindeki Ph'ın sabit değerde kalmasını sağlar. Ph'ın sabit değerde kalması ürün üzerine yapılan asidik işlemin etkinliğini artırarak , üründe istenilen efektin sağlanmasına yardımcı olur.

Kırık önleyici : Ürün üzerindeki kırık oluşumunu engelleyerek efektlerin gözle görünüm açısından düzgünlüğünü sağlar.

Toz asit : Ürün üzerinde ağartma efekti sağlar , bu efekti sağlarken ürünün yıpranmamasını ve fire oluşmamasını sağlar.

Sabun : Üründe ağartma sonrası oluşan yüzeyin temizlenmesini sağlar.

Taş enzim : Ürünlere vermek istediğimiz efektin daha homojenize olmasını sağlar.

2.2. Metot

AKR001 toz asidi kullanım yöntemiyle ağartılan kumaşları kıyaslayabilmek adına, yaygın olarak kullanılan geleneksel taş yıkama yöntemiyle numuneler elde edilmiştir. Sonrasında AKR001 toz asidi kullanılarak ağartma işlemi gerçekleştirilmiş ve kıyaslamaya gidilmiştir.

Gelen parça ürünler tartılarak yıkama-boyama makinesine alınır. Boyama aşaması tamamlanan ürünler sıkma makinasında 5 dakika sudan arındırılarak kurutma makinasına alınır. Kurutma makinesinde 60 derece sıcaklıkta %20 nemli kalacak şekilde kurutulur. Kuruyan ürünler verilmek istenen efektte göre yıkanacak mamulün kg miktarı üzerinden belirlenen yüzdede toz asit ile muamele edilmek üzere kapalı tambur tarzı yıkama makinasına alınır. Kapalı tambur ağartma makinasına konulan ürünlerin üzerine toz asit serpilerek ağartma işlemine başlanır. Toz asit miktarı ve ağartma işlemi süresi elde edilmek istenilen ürün efektine göre değişiklik gösterir. Ponza taşı kullanılmadan gerçekleştirilen işlem sonrasında makine boşaltılır ve ekstradan taş ve kum temizliği yapılmasına gerek kalmaz.

Ağartma işlemi biten ürün durulama banyosuna alınır. Öncelikli olarak sabun ile işlem gören ürünün yüzeyinin kimyasal fazlalığından temizlenmesi sağlanır. Daha sonra banyoya taş enzim eklenerek ürünlere vermek istediğimiz efektin daha homojenizasyonu sağlanır.

Son olarak ürünler yumuşatma ile istenilen yumuşaklığı getirilerek kurutma makinalarına alınır.

3. Bulgular ve Sonuç

Tekstil sektöründe önemli bir yer alan ağartma işlemini geliştirmek için yapılan bu çalışmada birçok avantaj sağlanmıştır. Ponza taşı yönteminde makinada ponza taşları aşınarak kum yapısına dönüşmekte ve ürünlerin arasına dolmaktadır. Makinaları ve ürünleri aşındırmamak için bu taşların silkelenerek üründen uzaklaştırılması gerekmektedir. Ayrıca makinaya her aşamada aşındırma işlemini gerçekleştirmek için KMnO4 ilavesi gerekmektedir bu da ekstra zaman ve enerji kaybına yol açmaktadır. Airwash (toz asit) yönteminde Tablo 1'de de görüldüğü üzere elektrik tüketimi konusunda moonwash geleneksel yöntemine kıyasla ön işlem gerektirmemesi ve makine işlem süresinin daha kısa olması sebebiyle %39,6 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Tablo 1: Moonwash ve Airwash yöntemlerinin elektrik tüketimini kıyaslama tablosu

	MOONWASH (10 KG ÜRÜN İÇİN)	AIRWASH (10 KG ÜRÜN İÇİN)
KMNO4 İLAVE TAŞ İLAVE	10 DK	YOK
OPERASYON SÜRESİ	15 DK	15 DK
TOPLAM MAKİNE ÇALIŞMA SÜRESİ	25 DK	15 DK
ELEKTRİK TÜKETİMİ (2,56 KWH/1SAAT)	1,06 KWH	0,64 KWH %39,62 REDUCE

Öncelikle AKR001 toz asidiyle çalışılan Airwash sisteminde, çalışan sağlığını korumaya yönelik avantajlar sağlanmıştır. Ponza taşıyla ağartma yönteminde 25-35 kg lık taş miktarıyla çalışılmakta,



yeni sistem Airwash yıkama yönteminde ise 2-4 kg arası toz asit kullanılarak çalışılmaktadır. Moonwash yönteminde taş tek başına aşınma efekti vermeye yardımcı olmaz, bu nedenle taşta permanganat ilave edilmekte ve taşta homejenize bir şekilde yayılması için ekstra 10 dakika makinenin ürünsüz çalıştırılması gerekmektedir. Her turda yapılması gereken bu işlem ekstra zaman ve enerji kaybı yaratır. Moonwash yönteminde taşla muamele olan ürünler makineden çıkarılırken tek tek makinede aranmakta ve silkelenerek taşlardan arındırılmaktadır. Fakat airwash yönteminde işlem bitiminde ürün direk olarak makineden alınır ve durulama adımına geçirilir. Airwash yönteminde her bir aşındırma adımında toz asit ilavesi yapılmakta moonwash yönteminde ise makineye 2-3 aşındırma işleminde bir taş ilavesi yapılmaktadır. Buna rağmen taş ağırlığı ve toz asit ağırlığı arasındaki büyük fark airwash yönteminin daha kolay uygulanabilir ve verimli olmasını sağlar. Çalışma süresini etkileyen bir diğer etken de moonwash yönteminde makinenin altında biriken taş tozu atıklarının çuvalanarak atık alanına götürülmesi işlemidir. Airwash yönteminde bu taşıma işlemi ve depolama alınından tasarruf sağlanmaktadır. Bu da çalışanların yük taşıma ve yük kaldırma süreçlerini ortadan kaldırmıştır. Bu prosesteki iyileştirme toplam adam saatte %57 oranında tasarruf sağlamıştır.

Tablo 2: Moonwash ve Airwash yöntemlerinin işçilik süresini kıyaslama tablosu

	MOONWASH (10 KG ÜRÜN İÇİN)	AİRWASH (10 KG ÜRÜN İÇİN)
KMNO ₄ İLAVE TAŞ İLAVE	10 DK	YOK
OPERASYON SÜRESİ	15 DK	15 DK
SİLKELEME SÜRESİ	10 DK	YOK
TOPLAM ÇALIŞMA SÜRESİ	35 DK	15 DK
TOPLAM ADAM SAAT	26,25 TL	11,25 TL %57 REDUCE

Ponza taşıyla ağartma sisteminde deformasyonu azaltmak için 2-4 cm lik gömlek taşı kullanılmasına rağmen örme kumaşlarda birçok fireyle karşılaşmaktadır. Bunun sebebi ise makinede dönen taşların kısa sürede birbirlerine ve makine çeperlerine çarparak aşınması ve kenarlarının sivrileşmesidir. Aşınan taşlar ürünle dönerken ürün üzerine sürterek ürüne zarar vermekte ve birçok yerinde küçük delikler oluşmasına sebep olmaktadır. Fakat airwash yönteminde sadece toz asit kullanılması sebebiyle ürün üzerinde hasar yaratacak bir etken yoktur. Bunun sonucunda toz asit yönteminde aşındırma esnasında ürün firesi ortadan kalkmış olur.

Tablo 3: Moonwash ve Airwash yöntemlerinin fire oranlarını kıyaslama tablosu

		DİKİM ADETİ	FİRE ORANI
MOONWASH	2138275 AUSTİN MODEL	11880 AD.	4395 AD. %37
	2127171 NİRVANA MODEL	6648 AD.	1861 AD. %28
AİRWASH	2171810 SOFİNE TATTOO	6400 AD.	YOK
	2171194 PİNK RETRO	10755 AD.	YOK

Moonwash ve airwash yöntemlerinde aynı oranda aynı kimyasal kullanımı gerçekleştirilse de en büyük fark permanganatın prostenen çıkarılmış olmasıdır. Basit mangan oksit tuzu olan permanganatın insan sağlığı ve çevre için zararları yadsınamayacak kadar fazladır. İlave olarak permanganat çözeltisi hazırlamak için gerekli süreden de tasarruf edilmiştir. Airwash yönteminde permanganatın ortadan tamamen kaldırılması en büyük avantajdır. Permanganat kullanılmayan bu yöntemin devamında permanganatı nötürlemek için kullanılan sodyum metabisülfid kullanımına da gerek kalmamıştır.



Tablo 4: Moonwash ve Airwash yöntemlerinde kullanılan kimyasal oranlarını kıyaslama tablosu

	MOONWASH (10 KG ÜRÜN İÇİN)	AİRWASH (10 KG ÜRÜN İÇİN)
KMNO ₄ (potasyum permanganat)	0,02%	
airwash kimyasalı		30%
dispergator	1%	1%
sodyum metabisülfid	2%	
tüy enzim	1%	1%
nötr asit	1%	1%
fiksator	2%	2%
sabun		2%
yumuşatıcı	4%	4%

3.1. Sonuçlar

Geleneksel moonwash yöntemi yerine geliştirilen bu alternatif çalışmada sağlanan avantajlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Çalışanların yük taşıma yük kaldırma süreçleri minimize edilerek proses geliştirilmiştir.
- Ponza taşı hacimli bir ürün olduğundan ve kimyasala kıyasla hacmen yaklaşık 8 kat daha fazla yer kapladığından depolama alanlarından tasarruf edilmiştir
- Ponza taşının aşınarak ortaya çıkarttığı atık ortadan kalkmış bu sayede hem daha çevreci bir proses geliştirilmiş hem de çalışma süresinden tasarruf sağlanmıştır.
- Airwash yönteminde ürünlerin yıpranmış ponza taşıyla muamelesinden ortaya çıkan firelerin önüne geçilmiş ve firelerden %28-%37 aralığında tasarruf edilmiştir.
- Moonwash yönteminde taşa emdirilmesi gereken permanganat çözeltisinin hazırlanması airwash yönteminde gerek duyulmayan bir süreçtir.
- Her yeni üründe taşa eklenmesi gereken permanganatın taşa homejenize dağılması için makine ürünsüz 10 dakika dönmektedir. Airwash yönteminde bu adıma gerek duyulmaması her döngüde 10 dakika kazanç sağlamaktadır.

Çalışmada sağlanan avantajlar göz önünde bulundurulduğunda Airwash tekniği olarak adlandırılan toz kimyasal yöntemi bir çok yönden geleneksel Moonwash yönteminden daha avantajlı durumundadır.

4. Kaynakça

- [1] Agrawal, B. J. (2017). Bio-Stoning Of Denim- An Environmental-Friendly Approach. Current Trends In Biomedical Engineering & Biosciences, 3(3). <https://doi.org/10.19080/Ctbeb.2017.03.555612>
- [2] Başaran, H., & Aksel, H. (2017). Reaktif Baskılı Veya Boyalı Kumaşların
- [3] Birgül, A. (2006). Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Endüstrisi Atıksu Arıtımında İleri Oksidasyon Proseslerinin Kullanımı Aşkın Birgül Yüksek Lisans Tezi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Bursa-2006. <https://acikerisim.uludag.edu.tr/handle/11452/4882>
- [4] Hacı, N., Veli, B., Mühendislik, Ü., Fakültesi, M., & Bölümü, J. M. (2015). 2015 Pomza Araştırma Ve Uygulama Merkezi Fizibilite.
- [5] Öner, F. (2019). Boyanmış Selülozik Kumaşlarda Özel Yıkama Teknikleri Ve Görsel Etkileri. <https://www.proquest.com/openview/ca13b79124826e4e818ea7546687bd29/1?pq-origsite=gscholar&cbl=44156>
- [6] Özkan, Ş. G., & Tuncer, G. (N.D.). Pomza Madencilğine Genel Bir Bakış



[7] Roy Choudhury, A. K. (2019). Enzyme Applications In Textile Chemical Processing. In Sustainable Technologies For Fashion And Textiles (Pp. 91–115). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102867-4.00005-0>

[8] Şahiner, M., & Eroğlu, G. (2020). Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü.

Sökümünde, B., Gazi, O., Sanayiye, K., Araştırılması, U., & Kicik, H. B. (2017). Reaktif Baskılı Veya Boyalı Kumaşların.

[9] Technical Bulletin. (2000).



ELEKTRONİK AYGITLARIN GELENEKSEL ARIZA-FİZİĞİ METODU VE HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA SİMÜLASYON VERİLERİ İLE GÜVENLİ KULLANIM ÖMÜRLERİNİN BELİRLENMESİ

Celal Aslan ^{1*}, Aytülü Akbaşlı ²

¹ TD Elektronik Sanayi ve Dış Ticaret A.Ş. , Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-0001-7537, celalaslan@tdelektronik.com

² TD Elektronik Sanayi ve Dış Ticaret A.Ş. , Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-0986-9197, aytuluakbasli@tdelektronik.com

* Sorumlu Yazar

Özet

Elektronik ürünler, performansı ve güvenilirliği artırmak için sürekli olarak geliştirilmekte ve yeniden tasarlanmaktadır. Bu ürünler, müşterinin tüm güvenilirlik gereksinimlerini karşılayacak niteliklere sahip olmalıdır. Geleneksel olarak; ürünlerin güvenilirliği, zaman alıcı olabilen ve ürün tanıtımı veya teslimatını geciktiren tasarım değişikliği yinelemeleriyle sonuçlanabilen fiziksel testlerle sağlanmaktadır. Elektronik aygıtlar kullanıldığı tüm alanlarda oldukça önemli komponentlerdir. Bu yüzden bu parçaların kontrolü, tasarımı, üretimi, kullanımı ve özellikle de kullanım süreleri oldukça büyük önem arz etmektedir. Son yıllarda artan elektronik devre üretimi doğrultusunda da hızlandırılmış ömür testleri alanındaki araştırmalara duyulan ihtiyaç doğru orantılı olarak artmıştır.

Pazara sunma süresini azaltmak, güvenilirliği ve ürün geliştirme maliyetlerini minimize etmek için fiziksel testleri tekrarlayabilen simülasyon teknikleri kullanılabilmektedir. Ayrıca simülasyon; ürünün beklenen kullanım ve test koşullarına tepkisinin değerlendirilmesinin yanı sıra, tahmini arıza süresi de dahil olmak üzere arıza mekanizmalarının ve arıza bölgelerinin tanımlanmasını da tanımlı hale getirebilmektedir.

Yapılan makale çalışması, elektronik devrelerin hızlandırılmış ömür testlerini laboratuvar ortamında gerçekleştirerek arıza-fiziği metodu ile analizini ve aynı testlerin simülasyon verileri ile karşılaştırılmasını içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Arıza fiziği metodu, Hızlandırılmış yaşlandırma simülasyonu, Kullanım ömrü belirlenmesi

1. Giriş

Elektronik devre üreticilerinin en önemli problemlerinden biride ürün ömrünün ve garanti süresinin belirlenmesidir. Son yıllarda elektronik ürünlere talep hızla artmakta, bu da ürünün daha hassas testlerden daha hızlı geçirilmesini ve daha hızlı tasarımdan pazara sürülmesini gerektirmektedir. Tüm bu zorluklar ürün güvenirliliği hesaplarının daha kesin ve doğru olması ile aşılabılır.

Yaşlanma nedeni ile oluşacak parametrik kusurları hızlandırılmış testler ile ortaya çıkartmak için kullanılacak arıza fiziği metodolojisi aşağıdaki adımları içermektedir.

Arızaya yol açan kimyasal, elektriksel, fiziksel, mekanik, yapısal veya termal işlemler gibi olası arıza mekanizmalarını ve her cihazdaki arıza bölgeleri belirlenmektedir.

Arızanın baskın kök nedenini bulmak için ürün yüksek oranda hızlandırılmış streslere maruz bırakılmaktadır.

Baskın arıza mekanizması en zayıf halka olarak belirlenmektedir.



Baskın mekanizma modellenmektedir, Yani arıza ne ve neden gerçekleşir sorusuna cevap aranmaktadır.

Hızlandırılmış testlerden ve istatistiksel dağılımlardan toplanan veriler birleştirilmekte ve bir dağılım eğrisi elde edilmektedir.

Sahadaki baskın arıza mekanizması ve bunun ortalama arıza süresi (MTTF) için bir denklem geliştirilmektedir.

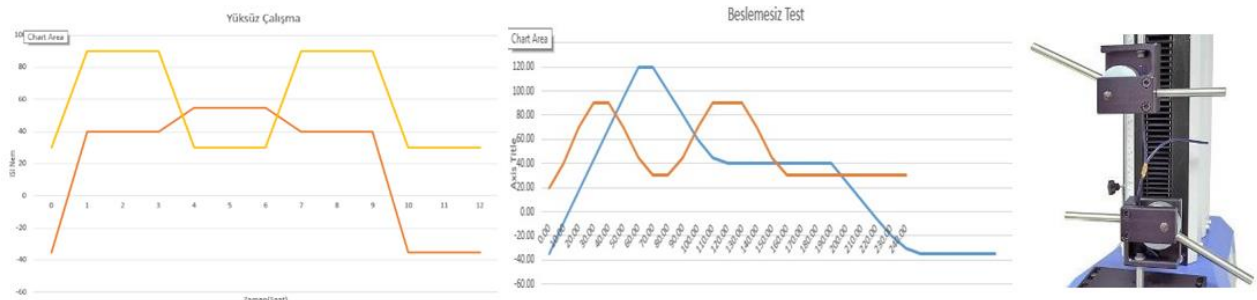
2. Arızaya Yol Açan Olası Mekanizmaların Belirlenmesi

Öncelikle firmada üretilmekte olan elektronik devrelere ait aşağıdaki parametrelerin yaşlandırma testinden sonra standartlara uygun toleranslar içinde kalması hedeflenmiştir.

Test No	Parametre	Yaşlandırma Test Öncesinde	Y.T.Ö. Sonuç	Yaşlandırma Test Sonrasında	T.S. Sonuç	Test Standardı
1	Elektriksel İzolasyon	Girişler ve çıkışlar kendi arasında kısa devre edilerek giriş çıkış uçlarına 1600V uygulanır.	Herhangi bir atlatma veya delinme olmaması gerekir	Aynı test	Aynı Sonuç	IEC 61851-1 / 12.7 Dielektrik Voltajı IEC 62752 / 9.5.3 Ana devrenin yüksek gerilim dayanımı
2	Enclosure isolation	Girişler ve çıkışlar kendi arasında kısa devre edilir. Kutu bağlantıları ile giriş ve çıkışa 1600V uygulanır.	Herhangi bir atlatma veya delinme olmaması gerekir	Aynı test	Aynı Sonuç	IEC 62752 / 9.4 Elektrik şoklarına karşı ana devrenin doğrulanması
3	Ripple Testi	Fluke osiloskop ile AC modunda DC gerilimlerdeki dalgalanmalar ve DC modunda DC gerilim ölçülür	DC gerilimler belirlenen nominal gerilimlerden %10 dan daha fazla, Vripple/Vnom değeri hesaplanır. $V_{pp} = I / (2 \cdot f \cdot C)$	Aynı test	DC gerilimler test önceki değerlerden en fazla %5, Vripple/Vnom değerleri %2 sapmalıdır	
4	Açma Kapama Testi	Kaçak akım oluştuğunda açma zamanı standarda uyum olmalıdır	Açma zamanı 200 mS yi aşmayacak şekilde kayıt edilir	Aynı test	Açma zamanı 200 mS yi aşmayacak şekilde olmalıdır.	IEC 62752 / 5.3.11 Delinme süresinin belirlenmesi
5	Yüksek gerilim Testi	Cihaz tam yükte iken 10 dakika 220VAC girişte, 10 dakika 165VAC de ve 265VAC de 10 dakika çalışabiliyor olması gerekir.	Herhangi bir deformasyon olmaması gerekir	Aynı test	Aynı Sonuç	IEC 62752 / 8.15 Besleme geriliminin kesilmesi durumunda davranış Testler, IC-CPD'nin sınıflandırmaya göre voltaj aralığında çalıştığını doğrulamalıdır.
6	Alçak gerilim testi	Cihaz tam yükte iken 10 dakika 220VAC girişte, 10 dakika 165VAC de ve 265VAC de 10 dakika çalışabiliyor olması gerekir.	Herhangi bir deformasyon olmaması gerekir	Aynı test	Aynı Sonuç	IEC 62752 - 9.14 Besleme geriliminin kesilmesi durumunda IC-CPD'nin davranışının doğrulanması 9.14.1 Minimum çalışma geriliminde (Ux) doğru çalışmanın doğrulanması IC'nin herhangi iki akım yoluna Ue'ye eşit bir gerilim uygulanır -CPD rastgele seçilir ve voltaj kademeli olarak Ux'e düşürülür ve ardından otomatik açılma gerçekleşene kadar kademeli olarak yaklaşık 5 V/s oranında düşürülür. Açma voltajı ölçülür. Her numunede beş ölçüm yapılır. Ölçülen tüm açma gerilimi değerleri, varsa minimum beyan geriliminin 0,85 katını geçmemeli ve Ux'ten yüksek olmalıdır.
7	Yükte çalışma testi	Cihaz tam yükte iken 10 dakika 220VAC girişte, 10 dakika 165VAC de ve 265VAC de 10 dakika çalışabiliyor olması gerekir.	Herhangi bir deformasyon olmaması gerekir	Aynı test	Aynı Sonuç	IEC 62752 - 9.15 Aşırı akım koşullarında çalışma dışı akımın sınır değerlerinin doğrulanması. IC-CPD, 4 In'e eşit bir akıma karşılık gelen büyük ölçüde endüktif olmayan bir yükte normal kullanım için olduğu gibi bağlanır. IC-CPD'ler, hat tarafında nominal gerilimle (veya ilgiliyse, nominal gerilim aralığında herhangi bir değere sahip bir gerilimle) beslenir. Yük, iki kutuplu bir test anahtarı tarafından açılır ve 1 s sonra kapatılır. IC-CPD açılmayacaktır. Test üç kez tekrarlanır, birbirini izleyen iki kapatma işlemi arasındaki aralık en az 1 dakikadır. İlgiliyse, entegre bir sigorta bir bakla ile değiştirilebilir.
8	Enerji metre kalibrasyonu	Fluke osiloskop ile akım ölçülerek enerji metre kalibrasyonu yapılır.	Enerji metrenin kalibrasyon ile çalışması yük altında doğrulanır.	Aynı test	Kalibrasyon sapması %2 yi geçmemesi gerekir.	Bu standartlarda yer almayan bir testtir. Ancak EPDK kurallarına göre doğrudur. %2 kabul edilebilir bir sapmadır.
9	Konnektör bağlantıları	Test öncesinde bağlantı fotoğrafı çekilir. Çekerek kopma kuvveti ölçülür.	kabul edilebilir seviyede	Aynı test	Çekme kuvveti %20 den fazla düşmemesi gerekir.	IEC 62752 / 9.25 Yeniden bağlanamayan IC-CPD'nin esneme testi Kablo veya kordon, uygulanan kuvvetin olduğu gibi bir kütle ile yüklenir. - Nominal kesit alanı 2,5 mm ² 'yi aşmayan kablolar veya kordonları olan IC-CPD'ler için 20 N; - Nominal kesit alanı 2,5 mm ² 'yi aşan ancak 6 mm ² 'yi geçmeyen kablolar veya kordonları olan IC-CPD'ler için 25 N.

Şekil 1: Üretilen elektronik devrelerin standartlara uygunluğu

3. Üründe Arıza Oluşturabilecek Yüksek Oranda Hızlandırılmış Streslerin Belirlenmesi



Şekil 2: Belirlenen testler



Hızlı yaşlandırma için belirlenmiş olan testler Şekil 2’de verilmiştir. Sıcaklık ve nem testleri özel koşullandırılmış test kabininde, konektör kopma testleri çekme test cihazında yapılmıştır. Test sonuçları aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

	Cihaz No	Test Adı: Yaşlandırma Testi Test Edilen Ürün Adı: Portable Test Edilen Ürün Sayısı: 10								Durumu
		TEST1	TEST2	TEST3	TEST4	TEST5	TEST6	TEST7	TEST8	
YTÖ	1	4.073MΩ	High	+12V / 100mV / 18,93V -12V / 1mV / -24,65 V 3V3 / 140mV / -6,02 V	36 ms	9A10 Dk. 255V	1A10 Dk. 200V	9,9A10 Dk.	Değer : 8,84 A Akım Probu: 10 A	
YTS	1	4.101MΩ	High	+12V / 100mV / 18,01V -12V / 190mV / -23,57 V 3V3 / 250mV / -5,62 V	26,40 ms			8,95A10 Dk.	Değer : 8,82 A Akım Probu: 8,95 A	
YTÖ	2	4.073MΩ	High	+12V / 100mV / 18,61V -12V / 0V / -24,17 V 3V3 / 240mV / -5,90 V	28,80 ms	A10 Dk. 255V	1A10 Dk. 200V	8,8A10 Dk.	Değer : 9,93 A Akım Probu: 10 A	
YTS	2	4.063MΩ	High	+12V / 100mV / 18,23V -12V / 240mV / -23,76 V 3V3 / 120mV / -7,35 V	28,80 ms			8,88A10 Dk.	Değer : 8,81 A Akım Probu: 8,88 A	
YTÖ	3	4.058MΩ	High	+12V / 100mV / 18,99V -12V / 1mV / -24,52 V 3V3 / 110mV / -7,66 V	26,40 ms	A10 Dk. 255V	1A10 Dk. 205V	10A10 Dk.	Değer : 8,84 A Akım Probu: 10 A	
YTS	3	4.053MΩ	49515 MΩ	+12V -12V 3V3					Değer : Akım Probu	FAULT
YTÖ	4	4.076MΩ	High	+12V / 100mV / 18,96V -12V / 0V / -24,41 V 3V3 / 120mV / -7,59 V	37,60 ms	9A10 Dk. 255V	1A10 Dk. 202V	8,9A10 Dk.	Değer : 8,86 A Akım Probu: 10 A	İk Yaşlandırma testinde konformal kaplaması iyi olmadığı için kart üzerinde tahribat oluşmuştur. Ürün yaşlandırma testinden sonra sirke yardımı ile temizlenip, tekrar konformal kaplama yapılmıştır.
YTS	4	4.071MΩ	High	+12V / 100mV / 19,02V -12V / 0V / -23,70 V 3V3 / 250mV / -5,85 V	27,20 ms			8,99A10 Dk.	Değer : 8,85 A Akım Probu: 10 A	Yaşlandırma testinden sonra elektrik testleri yapıldığında konformal kaplamanın iyi olmamasından dolayı nem ile temas eden mavi led anızalanmıştır. Cihazın çalışmasında problem yoktur.
YTÖ	5	4.070MΩ	High	+12V / 100mV / 18,90V -12V / 1mV / -24,48 V 3V3 / 120mV / -7,61 V	37,60 ms	9A10 Dk. 255V	1A10 Dk. 202V	9,9A10 Dk.	Değer : 8,89 A Akım Probu: 10 A	
YTS	5	4.070MΩ	High	+12V / 100mV / 18,42V -12V / 0mV / -23,88 V 3V3 / 120mV / -7,41 V	27,20 ms			8,92A10 Dk.	Değer : 8,83 A Akım Probu: 8,92 A	
YTÖ	6	4.050MΩ	High	+12V / 100mV / 18,80V -12V / 0V / -24,33 V 3V3 / 110mV / -7,55 V	28 ms	8A10 Dk. 252V	1A10 Dk. 202V	7,9A10 Dk.	Değer : 8,89 A Akım Probu: 10 A	
YTS	6	4.039MΩ	High	+12V / 100mV / 18,10V -12V / 0V / -23,56 V 3V3 / 250mV / -5,71 V	26,80 ms			8,94A10 Dk.	Değer : 8,80 A Akım Probu: 8,94 A	
YTÖ	7	4.059MΩ	High	+12V / 100mV / 18,93V -12V / 0V / -24,65 V 3V3 / 110mV / -7,57 V	28,80 ms	8A10 Dk. 247V	1A10 Dk. 202V	10,6A10 Dk.	Değer : 8,94 A Akım Probu: 10 A	
YTS	7	4.055MΩ	High	+12V / 100mV / 18,20V -12V / 0V / -23,75 V 3V3 / 110mV / -7,57 V	28,40 ms			8,90A10 Dk.	Değer : 8,81 A Akım Probu: 8,90 A	
YTÖ	8	4.067MΩ	High	+12V / 100mV / 18,86V -12V / 1mV / -24,24 V 3V3 / 250mV / -5,92 V	28 ms	8A10 Dk. 245V	1A10 Dk. 200V	7,9A10 Dk.	Değer : 8,97 A Akım Probu: 10,1 A	
YTS	8	4.061MΩ	High	+12V / 100mV / 18,36V -12V / 0mV / -23,81 V 3V3 / 260mV / -5,79 V	36,80 ms			8,93A10 Dk.	Değer : 8,82 A Akım Probu: 8,93 A	
YTÖ	9	4.093MΩ	High	+12V / 110mV / 18,74V -12V / 0V / -24,30 V 3V3 / 110mV / -7,51 V	28 ms	8A10 Dk. 244V	1A10 Dk. 204V	10,6A10 Dk.	Değer : 9,91 A Akım Probu: 10,1 A	
YTS	9	4.080MΩ	High	+12V / 100mV / 17,96V -12V / 0V / -23,58 V 3V3 / 110mV / -7,51 V	28 ms			8,95A10 Dk.	Değer : 8,80 A Akım Probu: 8,95 A	
YTÖ	10	4.050MΩ	High	+12V / 100mV / 18,86V -12V / 1mV / -24,42 V 3V3 / 110mV / -7,56 V	24,80 ms	8A10 Dk. 244V	1A10 Dk. 205V	8A10 Dk.	Değer : 8,99 A Akım Probu: 10,1 A	
YTS	10	4.059MΩ	High	+12V / 400mV / 18,27V -12V / 205mV / -23,79 V 3V3 / 310mV / -5,73 V	25,60 ms			8,93A10 Dk.	Değer : 8,89 A Akım Probu: 8,93 A	

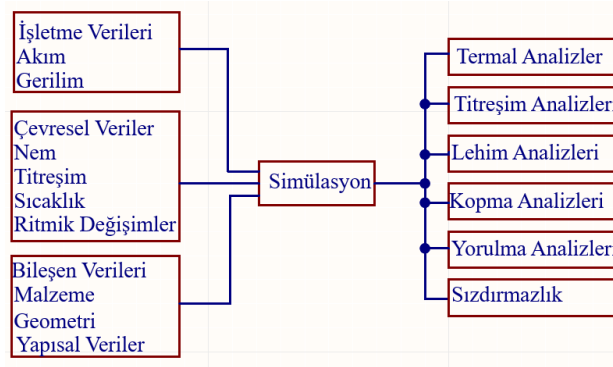
Şekil 3: Test sonuçları

Şekil 3’ten görüleceği üzere konformal kaplamanın açılması, ledlerin bozulması ve kondansatör tepe dalgalanma voltajlarının yükselmesi gibi 3 ana kök neden tespit edilmiştir.

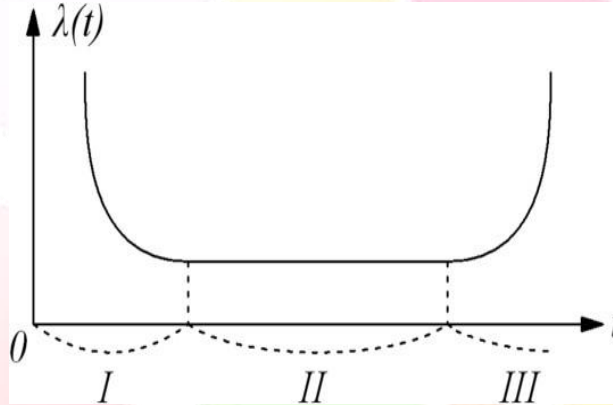
4. Arızaların Modellenmesi ve Bir Dağılım Eğrisinin Elde Edilmesi

Ürün güvenilirliği, simülasyon programları (CALCE, FaRBS, IBM RaMPS) Şekil 4’teki blok şemada gösterildiği üzere girilen test verilerinin istatistiksel yaklaşımlarla nümerik çözümlemesini içermektedir.





Şekil 4: Simülasyon programları blog şeması



Şekil 5: Elektronik devre güvenilirliği

Elektronik devrenin güvenilirliği, $\lambda(t)$ ile gösterilen arıza yoğunluğu oranı ile karakterize edilmekte ve bu arıza koşullu olasılık yoğunluğu Şekil 5'te verilen banyo küveti benzeri bir eğriye yaklaşmaktadır.

Şekil 5'teki I numaralı alan bebek ömrü, II numaralı alan normal ömür, III numaralı alan ise yıpranma bölümü olarak adlandırılmaktadır. Eğrinin bebek ömürleri bölümü için $(0,t)$ aralığında eksponansiyel bir fonksiyonla (1) numaralı formül kullanılmaktadır.

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Eğrinin yıpranma (III) bölümü ise biraz daha karmaşık görünen eksponansiyel fonksiyonların integrallerinin bölümü şeklinde (2) numaralı formül ile ifade edilebilir.

$$P(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t-T_0}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-T_0}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx} \quad (2)$$

Burada T_0 ortalama ömür, σ ise arıza momenti olarak isimlendirilmektedir.

Eğrinin II numaralı normal ömür bileşeni ise az sayıda örnek ile kısıtlı zamanda yapılan fiziksel testlerden elde edilen veriler ışığında güvenilirlik süresinin hesaplanmasını ifade eder. Bu bölümün matematiksel ifadesi ise (3) numaralı formüldür.

$$T_\gamma = \frac{2 N \tau A_f \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)}{x^2(P^*, 2n+2)} \quad (3)$$

Burada T_γ arıza süresi, N test edilen cihaz sayısı, τ test süresi, $2n+2$ serbestlik derecesi, P^* güvenlik seviyesi, A_f seçilen hızlandırma katsayısı, $x^2(P^*, 2n+2)$ chi-kare dağılım katsayısı ve n arıza sayısı olarak tanımlanmıştır.



5. Ortalama Arıza Süresinin (MTTF) Bulunması

Test edilen cihaz sayısı $N=10$,

Arıza sayısı $n = 3$ ve $2n+2 = 6$, (3 ana kök neden belirlenmişti.)

Güvenlik seviyesi $P^* = \%90$,

Hızlandırma katsayısı $A_f = \%50$,

Cihaz başına test süresi $\tau = 150$ saat,

Arıza olasılık yoğunluğu $Y = 95$ olmak üzere

$T_{95} = 2 \cdot 10 \cdot 150 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 0.05 / 4.605 = 610$ gün olarak hesaplanmaktadır. Daha düşük güvenilirlik seviyelerinde daha uzun ömürler elde edilebilmektedir.

6. Bulgular ve Sonuçlar

Arıza fiziki metodolojisi yaklaşımı ile simülasyon çıktılarına benzeyen matematiksel denklemlerden faydalanarak, standartlara uygun deneysel test sonuçları birleştirilmiş ve bu model ile elektronik ürünlerin güvenli kullanım süreleri hesaplanmıştır.

Hesaplanan ortalama ömür süresinin beklenenin tersine 2 yıllık garanti süresini sağlamadığı tespit edilmiştir. Arıza fiziki metodolojisinin gerektirdiği hızlandırılmış stresli testler bu durumu ortaya çıkartmaya yardımcı olmuştur.

Yaşlandırma testleri sonucunda baskın kök neden olarak tespit edilen; konformal kaplamanın açılması, ledlerin bozulması ve kondansatör tepe dalgalanma voltajlarının yükselmesi konularında iyileştirmeler yapılmasına karar verilmiştir.

Sonuç olarak arıza fiziki metodolojisi, simülasyon sonuçları ve hızlı yaşlandırma test sonuçları kullanarak elektronik cihazların güvenli ömür süreleri modellenilebilmekte ve model elektronik aygıtların ömür sürelerinin hesaplanmasında pratik matematiksel bir denklem oluşturmak için kullanılabilmektedir.

7. Kaynakça

- [1] Koulibaba A. , Krasnov M. and Prischepova S. , “An approach to accelerated life tests of electronic components”, JSC “Russian Space Systems”, jarsunny@rambler.ru
- [2] Baturin A.V. , “Determining reliability indicators of electronic components”, Petersburg Journal of Electronics,
JSC “RNII “Elektronstandart”, Petersburg, 2010
- [3] White M. , “Microelectronics reliability: physics-of-failure based modeling and lifetime evaluation”, Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2008.
- [4] <https://stattrek.com/online-calculator/chi-square>
- [5] Das, J. C. , Power Analysis Handbook: Short-Circuits in AC and DC Systems: ANSI/IEEE and IEC Standards, CRC Press, 2017



ENDÜSTRİYEL ROBOT KOL SİSTEMLERİ VE UYGULAMALARI

Denizcan Gökulp

S2 Otomasyon A.Ş., Tasarım Merkezi, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-0022-240X, denizcan.gokalp@s2otomasyon.com

Özet

Her daim gelişim gösteren üretim sistemleri içerisinde, tüm bileşen ürünlerin, hassas alımı, yerleştirilmesi ve bazı durumlarda yapılan hareketlerin aynı biçimde tekrarlanmasının tutarlılık oranının yüksek olması önemlidir. Endüstriyel robot kolları ile geliştirilen sistemler tüm bu süreçlerin eksikliklerini karşılayabilmektedir. Ürünlerin ya da parçaların istenildiği gibi operasyona sokulabilmesi ve çıkan ürünlerin paketlenmesi, paletlenmesi ve depolaması gibi faaliyetlerde sıklıkla kullanılmaya başlanılmıştır.

Endüstriyel robot kol sistemlerinin kullanım alanının geniş ve etkili olması yanı sıra, piyasada farklı birçok marka altında üretilmesi, yapılacak operasyona uygun biçimde entegre edilebilmesi, ürünün türüne, çalışacağı alana göre boyut seçiminin oluşu gibi esnekliklere sahiptir. Bu esneklik endüstriyel robot kol sistemi uygulamalarına yönelimi artırmıştır. Bu endüstriyel robot kol sistemleri mekanik işlemler, al-yerleştir, kaynak, tıraşlama, montaj, besleme, lazer operasyonlar gibi birçok işlemlerde kullanılabilmektedir.

Robot Kollar Scara, Kartezyen, Silindirik, Küresel ve Eklemlili gibi birden fazla farklı çeşitlere sahiptir. Tüm bu çeşitlerin uygulama alanları farklılık gösterebilirken aynı zamanda ortak bir sistemde de birlikte haberleşerek çalışabilmektedirler. Tüm bu etkenler göz önünde bulundığında endüstriyel robot kolların seri üretimde, kalite standart ölçüsünü tutturarak, gerekliliğe göre operatörsüz ya da operatör ile iş birliği içerisinde çalışarak sanayinin birçok alanında kendilerine yer edinmiştir.

Bu yazıda endüstriyel robot kol sistemleri uygulamalarında rol alan robot kollar, bu kolların çalışma prensibi, çalışacağı alan ve gerçekleştireceği operasyona göre seçimi, robot kollar ile gerçekleştirilebilecek sistemler, robot kolların birlikte çalışabilme mantığı, kullanım alanlarına örnekler ve tüm bu süreçlerin geliştirilebilmesi için fikir önerileri paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Robot Kol Uygulamaları, Yüksek Tutarlılık, Seri Üretim, İş Birlikçi Çalışma, Haberleşme

1. Giriş

Robotik uygulamalar geçmişten günümüze sağlık, lojistik, sanayi gibi birçok alanda giderek daha fazla önem kazanarak kullanılmaktadır. El bileği model alınarak geliştirilen, yüksek hassasiyetli robotik kollar sayesinde günümüzde cerrahide hem hasta hem doktor açısından sayısız kolaylık getirmektedir. Ameliyat prosedürlerinin daha kolay uygulanabildiği robotik kol ile gerçekleştirilen operasyonlarda yüksek hassasiyet, küçük kesiler, çabuk iyileşme süresi ve daha birçok avantajı bulunmaktadır. Andrew ve arkadaşı 2020 yılında yayınladıkları bir çalışmada robotik cerrahinin geleceğini incelemektedir. Geliştirilen teknolojiler ve bürokratik kurallar çerçevesinde çeşitli cerrahi alanlarında robotik sistemlerin geliştiricileri, özellikleri ve klinik kullanımları verilmektedir. Gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda robotik cerrahinin mümkün olan sınırları zorlayarak sürekli gelişim içinde olacağı öngörülmektedir [1]. Sanayi alanında ise özellikle Endüstri 4.0 devrimiyle birlikte kullanımı yaygınlaşmaktadır. Endüstriyel robotlar bir operatöre yardımcı ya da tek başına çalışabilen, tekrar programlanabilir makinelerdir. İlk robot kol 1959 yılında Devol ve Englerberg tarafından yapılarak, ismi Unimate olarak belirlenmiştir. 1961 yılında Devol tarafından patenti alınmıştır. Devol ve Engelberger dünyada ki ilk robot şirketini kuran isimlerdir. İlk Robot New Jersey eyaletinde bulunun General Motors fabrikasında sıcak kalıp dökme makinesine yardımcı olmak için kullanılmıştır [2]. Günümüzde kullanımı sıklığı hızlı bir artış gösteren, hemen



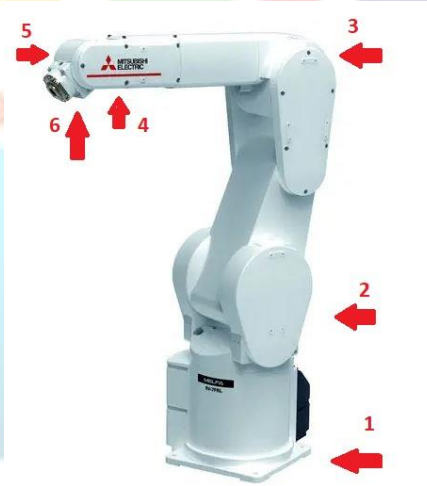
hemen alanda rol almaya başlayan endüstriyel robot kollar, basit, zorlu, hızlı gerçekleştirilmesi gereken, hatta tehlikeli işlerde insan faktörüne kıyasla daha iyi, daha kaliteli, daha hızlı ve en önemlisi daha az hata yüzdesiyle iş yapabilme kapasitesine sahiptir. Bu olanak üretimde bulunan bütün aşamalarında kullanılmalarına ve bu sayede para ve zaman kazancı yaratmaktadır. Günümüzde teknolojinin gelişmesi, eylem algoritmalarının, servo motorlar gibi sürücülerin ayrıca da daha birçok mekanik ve elektronik donanımların gelişmesiyle birlikte endüstriyel robot kolların sistemlerinin uygulama alanları gelişmiştir. Ayrıca birçok Robot Kol üretimi yapan firmaların ürettikleri Robot Kollar için hazırladıkları programlar sayesinde gerçek zamanla bire bir simülasyonlar yapıp ön çalışma ile sistemin nasıl gerçekleşeceğini gözlemlemek mümkündür. Bu programlara özellikle Mitsubishi Electric “RT Toolbox3”, ABB “Robotstudio”, Omron Robotics “Sysmac”, Hyundai Robotics “HRSpace3_eng”, Kuka “Kuka.sim” örnek verilebilir. Bu programların en belirgin avantajları kullanıcıların hayata geçirmek istedikleri operasyonları simüle edebilmesi, gerek duyduklarında kendi oluşturdukları ya da hazır olarak elde ettikleri katı cisimleri (konveyör, döner tabla, ürün selesi, raf, tutucu, çalışılacak ürün...) , kolaylıkla programın içine yükleyip, gerçek çalışma ortamına birebir ya da en yakın biçimiyle çalışma yapılabilmesi, aynı zamanda yapılan çalışmanın endüstriyel robot kola kolaylıkla yüklenebilmesi, ayrıca da en önemlisi kişinin programın içerisinden kendi sisteminde kullanmak için hangi endüstriyel robot kola ihtiyaç duyduğunu belirleyip onu seçebilmesidir. Tüm bu süreçte diğer önemli konulardan bir tanesi de tatbikîde sisteme entegre edilecek olan endüstriyel robot kolun seçilmesidir. Endüstriyel robot kol çeşitliliğin yüksek olması bazı durumlarda seçim işini zorlaştırır da göz önünde bulundurulacak birkaç basit soru ile bu zorluk kolayca giderilebilir. Bu soruların temelinde “Hangi endüstriyel görevi otomatikleştirmek isteniyor?”, “Neyi başarmak hedefleniyor? Kaliteyi artırmak, rekabet avantajı oluşturmak, verimliliğin ve kârın artırılması, işçilik maliyetinin azaltılması, üretim süresinin hızlandırılması.”, “Uygulamanın teknik parametreleri neler olacaktır? Yük parametresi, görevi gerçekleştirmek için gereken serbestlik derecesi (eksen sayısı), çalışma alanı, tekrarlanabilirlik ve konumlandırma doğruluğu (ne kadar hassas olmaları gerektiği), döngü süresi (görevi tamamlamak için ne kadar hızlı hareket etmeleri gerektiği), Endüstriyel robot kolun diğer makineler ve operatörler ile nasıl etkileşime gireceği, koruma seviyesi (IP derecesi), “Sizin için ne önemli?, Robot kolun bir çalışma hücreğini kontrol etmesi mi, koruma olmadan çalışması mı, operatörlerle çalışması mı?”, “Ya istersek? Robot başka yerde çalışabilir mi, farklı bir uygulamada kullanılmak istenilebilir mi? [2]. Tüm bunlar ile birlikte Robot Kolların en çok görev aldığı sektörlerin içerisinde otomotiv, paketlenme, elektronik, metal işler gibi geniş bir alan vardır. Endüstriyel robot kollarda bir önemli diğer konu ise güvenlik protokolleridir. Operatörler ile birlikte çalışma gösterebilen iş birlikçi endüstriyel robot kollarda eğer ki gerekli güvenlik protokolleri uygulamaz ise iş kazaları olması kaçınılmazdır. İş birlikçi endüstriyel robot kollar, bir diğer adı ile Kobotlar, diğer geleneksel hale gelmiş endüstriyel robot kollara nispeten daha kolay çalışabilmesi amaçlanarak insan ile iş kazası tehlikesi yaratmadan çalışabilecek biçimde tasarlanmıştır. Kobotlar birçok küçük ve orta ölçekli işletmelerde bulunan yüksek miktarda farklı parçaların üretimi için tasarlanmış olup gene de diğer küçük ve orta ölçekli işletmelerin dışında birçok işletmede kullanıma uygundur. Kobotların kullanım alanları için montaj, tut ve yerleştir, kalite kontrol, yükleme ve benzeri diğer hafif yüklü uygulamalar örnek gösterilebilir. Buralarda Kobotlar, rota takibi, uzun süreli otonom çalışma, yüksek oranda tutarlılıkla aynı hareketi tekrarlama, parçaların hareket etmesi, rota takibi, ürün kalitesinin ve üretkenliğin artırılması gibi birçok olanak sağlamaktadır [4]. Buhl ve ekibi geleceğin akıllı fabrikaları için çift kollu robot sistemini açıkladıkları çalışmalarında karmaşık sökme görevlerinin yerine getirilmesi için geliştirilen sistemin detaylarını ve faydalarını incelemektedir. Sistemin iki koldan, ikili takımdan ve gelişmiş görüşten kaynaklanan artan insan benzeri yetenekleri hem robot kollarının hem de ürün bileşenlerinin eşzamanlı kontrolüne ve senkronize hareketine olanak tanıyan gelişmiş el becerisi sağlamaktadır. Tasarım hususları, genel donanım ve yazılım mimarisi ile veri iletişimi, hareket planlama, 3D görüş ve kontrol için ara katman yazılımları hakkında bilgiler sunulmaktadır [5]. Prakash ve ekibi uzaktan kontrol edilebilen altı eksenli robotik kol çifti üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Robot, uzak bir cihaz kullanılarak otomatik olarak veya manuel olarak kontrol edilen karmaşık bir dizi eylemi



gerçekleştirmek için tasarlanmış bir makinedir. Hareket teknolojisini kullanarak kablosuz hareket kontrollü, çift altı eksenli ve gezici olarak tasarlanan robotik kollar ulusal savunma sisteminde, sınır gözetleme, kritik alanlarda onarım çalışmaları, mayın tespiti ve dağıtma için kullanılabilir. Robot, butonlar ile birlikte sadece el hareketleri kullanılarak tüm işlemlerin gerçekleştirilebileceği şekilde tasarlanıp ve monte edilebilmektedir [6]. Lee ve arkadaşları artan endüstriyel otomasyon ihtiyacına yanıt olarak bir paralel tip robot, bir portal tipi robot ve iki altı eksenli seri robot dahil olmak üzere yaygın olarak kullanılan üç endüstriyel robot geliştirmişlerdir. Altı eksenli robot kolu, Kinematik yöntemi kullanılarak kontrol edilebilir. Ayrıca, sürekliliği sağlamak için her eklemdeki ivmeleri ve hızı sınırlamak için beşinci dereceden bir polinom yöntemi kullanılır. Robotik kolun yay yolu, üç noktalı yay enterpolasyonu ile elde edilebilir. Bu nedenle, yapıştırma yolu planlaması için yörüngeler başarıyla oluşturulmaktadır. Ayrıca, lazer kazıma işleminden sonra iş parçalarını incelemek için görüş cihazları kullanılmaktadır. Geliştirilen sistem depolama prosedürleri, demonte ve bitmiş iş parçalarının depolanmasını işlemleri de gerçekleştirebilmektedir [7]. Malzeme taşıma uygulamaları için geliştirilen mafsallı robot kolunun modellenmesi ve analizini ele alan bir çalışmayı Jain ve arkadaşları açıklamaktadır. Eklemli Robot Kol, yüksek hassasiyetle çalışması ve ağır görevleri yerine getirmedeki kolaylığı nedeniyle endüstrilerde büyük öneme sahiptir. Malzeme taşıma kısıklı mafsallı robot kolunun tasarımı ve simülasyonu açıklanmaktadır. Modelleme sürecinde sonlu elemanlar analizi ile tasarım güçlü ve zayıf yönleri tespit edilmektedir. Farklı malzemeler ve çeşitli yükleme koşulları ile bir robot kol modeli incelenebilmekte, analiz sonuçlarından yararlanılarak en iyi malzeme seçimi ve robot kolunun fizibilitesi çıkarılabilmektedir [8].

2. Metodoloji

Robot kollar ile gerçekleştirilen otomasyon uygulamalarında, ürün alma ve bırakma, kaynak, tıraşlama, kalite kontrol, paketlenme, montaj gibi farklı birçok işlemi yerine getirilebilmektedir. Üzerinde çalışılan operasyona uygun olarak, operasyon süresince çalışacakları yük, operasyonu gerçekleştirmek için ihtiyaç duydukları serbestlik derecesi gibi etmenlere uygun olarak, Kobot, Scara, Articulated gibi modellerden seçilebilir. Şekil 1 üzerinde 13 kg yük taşıma kapasitesine sahip Articulated Robot Kol resmi görülmektedir.



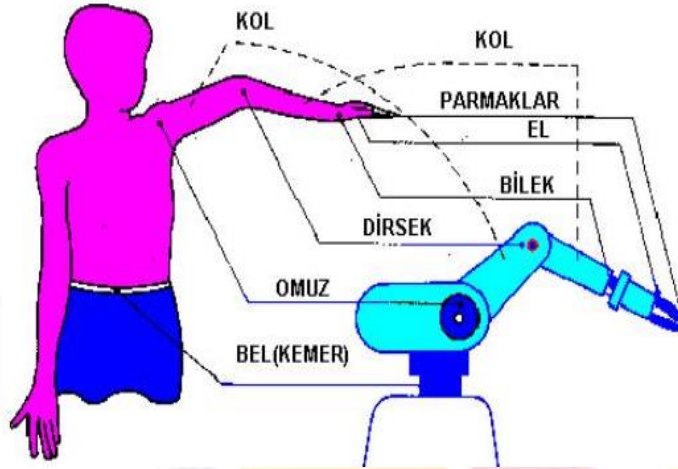
Şekil 1: Mitsubishi Electric 13 kg yük taşıma kapasiteli 6 Eksenli Articulated Robot Kol genel görünümü

- 1-J1: Robot Kolun, Soldan sağa sağdan solo hareket eksenli, taban
- 2-J2: İleri geri eksen hareketi sağlayan hareket eksenli, alt kol
- 3-J3: Yukarı kaldıran, aşağıya indiren hareket eksenli, üst kol
- 4-J4: Bilek döndürme ve dairesel hareket eksenli
- 5-J5: Yukarı ve aşağı eğilim sağlayan hareket eksenli, bilek kısmı



6-J6: Bilek, tutucu döndürme ve dairesel hareket eksen

Endüstriyel robot kol sisteminin tasarımında insan koluna benzerliği göz önüne alınmıştır. Bu göz önünde bulundurulmuş benzerlik şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2: İnsan kolu ve robot kol benzerliği

Tasarlanan endüstriyel robot kol sistemde göz önünde bulunan detaylar şunlardır:

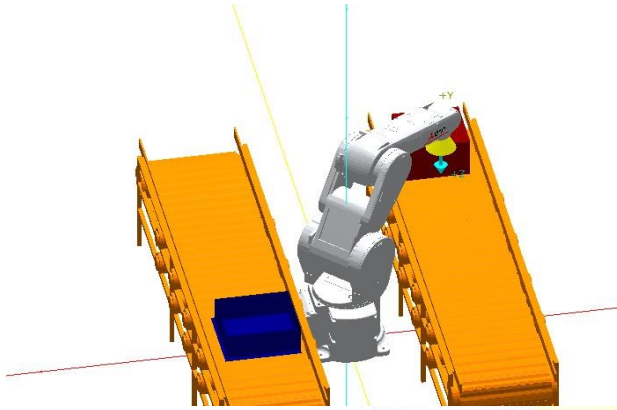
Uygulamanın gerçekleştiği alanda elektrik tetiklemesiyle çalışan mekanik olan bir kol, bu çalışan mekanizmayı da kontrol etmek için uygulamanın gerçekleştiği alandan uzakta bulunan mekanik kola benzer bir geometriye benzerlik gösteren ve operatörün kullanacağı bir manipülatör bulunmaktadır. Operatörün her bir yaptığı hareket, endüstriyel robot kolun üzerinde eklemlerde dönüştürülmekte ve mekanik kola aktarılmakta böylece de Robot kol operatörünün yaptığı eylemlerin aynısını tekrardan yapabilmektedir. Böyle bir düzenekte birden fazla serbestlik derecesi mevcuttur. Bu sayede uzay düzleminde rastgele bir parçanın bilinmek istenen yer ve istenilen konumda tutulması mümkün olmaktadır [9]. Tüm sistem göz önünde bulunduğunda temel olarak bahsedilen eksenler endüstriyel robot kolun operasyon gerçekleştireceği konuma güvenli ve tutarlı bir biçimde yönelmesi için gerekli ortak çalışmayı gösterir. Ayrıca bu çalışmada bir önemli diğer konuda endüstriyel robot kolun kendi ağırlığıdır. Kaldırma kapasitesi 5-7 kilogram arası olan bir endüstriyel robot kolun kendi ağırlığı ortalama 3000 kilogramdır. Özellikle ikinci eksen motoru, robotun toplam ağırlığının %70-75'ini taşır. Robot kollarının yüksek ivmesi düşünüldüğünde daha güçlü bir motor kullanmak daha doğru olacaktır. Bu nedenle, daha az motor yükü elde etmek için aynı mukavemete sahip farklı bir malzeme seçmek veya aynı malzemenin geometrik yapısını değiştirmek önemlidir [10].

3. Uygulama Örnekleri

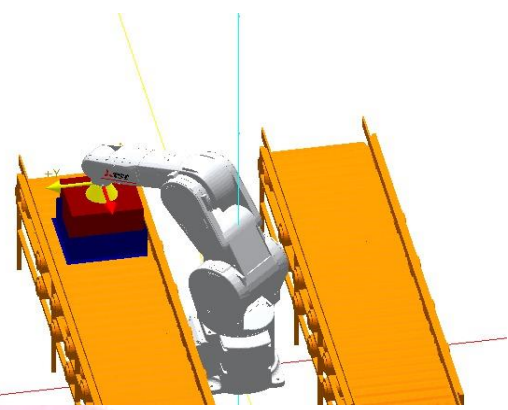
3.1. Pick and Place

Taban(base), J1 eksen: Robot kolun gövdesinin +360 -360 derece dönebilmesi ve tutucunun işlem gerçekleştireceği ürünün ya da yüzeyin konumuna denk gelmesini sağlar. Robot kol operasyon gerçekleştireceği konuma geçmek ve operasyon süreci için hemen hemen tüm eksenlerini kullanır. Mesela iki adet sekron konveyör hattında olan Robot kolun ürünü bir konveyörden alıp diğer konveyörde bulunan kasata koyması J1 ekseninin, yani taban kısmının çalışmasına örnek verilebilir. Şekil 3 ve 4 de Mitsubishi Electric Rt Toolbox3 programında bu eylem gösterilmiştir.



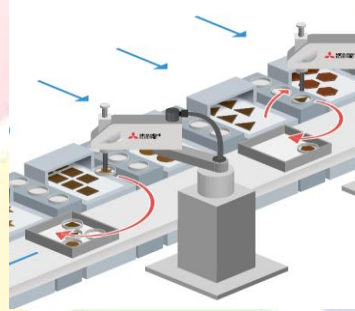


Şekil 3: Robot kolun ürünü alışı



Şekil 4: Ürünün kasaya bırakılması

Tut ve yerleştir eylemlerinde ürünün sıklığı, ağırlığı, şekli ve daha bunun gibi birçok madde göz önünde bulundurularak eylemi gerçekleştirmek için gerekli Robot Kol seçilebilir. Yukarıda gösterilen örnekten farklı olarak, daha hızlı, daha hafif ve daha dar bir alanda çalışılacağını düşünürsek Endüstriyel Robot Kol yerine Scara Robot Kol tercih edilebilir. Basitçe Scara Robot Kollar daha hızlı, daha dar ve daha hafif yüklü uygulamalar için daha iyi bir tercihtir. Şekil 5'te Scara uygulaması örnek verilmiştir.



Şekil 5: Scara Robot ile Pick and Place uygulaması

Tablo 1 üzerinde Mitsubishi Electric Articulated RV-20FRM-D ve Scara RH-6FRH5520ND Robotlarının karşılaştırmaları yer almıştır.

Tablo 1: Scara ve Articulated karşılaştırması

ROBOT KOL	ARTICULATED RV-20FRM-D	SCARA RH- 6FRH5520ND
EKSEN	6 EKSEN	4 EKSEN
ÇALIŞMA ARALIĞI J1	380°	340°
ÇALIŞMA ARALIĞI J2	240°	290°
ÇALIŞMA ARALIĞI J3	167,5°	X
ÇALIŞMA ARALIĞI J4	400°	720°
ÇALIŞMA ARALIĞI J5	240°	X
ÇALIŞMA ARALIĞI J6	700°	X
YÜK	20 Kg	6 Kg
ERİŞİM MESAFESİ	1094 mm	550 mm
HIZ	4200 mm/s	8300 mm/s
Devir Süresi	0.7	0,29 s
Tekrarlanabilirlik	0.05	0,012 mm

3.2. CNC Besleme

Cnc makinalarında Robot kol kullanımı günümüzde firmalar tarafından çokça tercih edilmeye başlamıştır. Cnc makinalarında işlem gören parçanın işlenmesi bittiği zaman ölçüm yapılır, bu yapılan ölçüme göre de takım aşınmasına karşı elzem olan toleransın sağlanması için Cam programı üzerinden olması gereken OFF SET verilir ve ayar sağlanır. Genel olarak bu süreç içerisinde Cnc



makinesinin beslenmesi için operatörler ürünü bir kasadan alarak aynaya, aparata parçayı referanslı bir biçimde tutturur, sonrasında ise Cnc işleme operasyonunu başlatır. Tüm bu süreç bir Kobot ile rahatça tekrar edilebilir. Sürecin başında ürünler kasa içerisinde dağınık olsalar bile Kobot alacağı parçayı konumlandırarak alır ve Cnc'nin içine konumlandırma eylemi ile ürünü yerleştirir. Kobot ürünü bırakıp Cnc kapısından çıkınca makine ile haberleşip operasyonu başlatır. Çalışmanın sonunda ortaya çıkan bitmiş ürünün standartları istenilen parametreler ile kıyaslanır. Bu süreçte Kobotun faydaları öncelikle olarak, insanlarla aynı ortamda yan yana çalışmaya uygun güvenlik sistemine sahiptir, herhangi temas gerçekleşmesi kendilerini durdururlar. Ayrıca Kobotların taşınması ve kurulumu hızlıdır, kolay programlanabilirler ve geniş bir alan kaplamazlar. Makinelerde kobotların kullanımı hem üretim hızını hem de miktarını artırır. Şekil 6 üzerinde Cnc makinesi ile birlikte çalışan kobot sistemi gösterilmiştir.



Şekil 6: Cnc makinesinde kobot sistemi

3.3. Paketleme

Ürünlerini seri üretim sistemi ile gerçekleştiren işletmelerde üretim süresi gibi paketleme süreleri de çok önemlidir. Paketleme süreci hızlı ve hatasız bir biçimde olmalıdır ki aynı zamanda üretim hattında herhangi bir sıkışma gerçekleşmesin. Seri üretimden gelen ürünler duruma göre kutu, koli ya da paketlere yerleştirilir. Bu operasyon için genelde Delta Robotlar en sık kullanılan robot tipidir. Delta Robotlar kısa bir süre içinde yüksek hıza ulaşabilir ve ayrıca da pozisyon hassasiyetleri de yüksektir. Üretim hattı üzerinde gelen ürünlerin bulundukları pozisyonlar genel de düzensiz ve dağınık olduğu için robotun ürünü alabilmesi için gerekli konumlar konveyör üzerinde yerleştirilen kameralar ile robota aktarılır. Bu operasyonda Delta robotun tavana düzgün montajlanması ve kameralardan gelen veri akışının kesilmemesi çok önemlidir. Paketleme sürecinin hızlı bir biçimde gerçekleşmesi için robotun ürünleri de tutma ve bırakma sürelerinin de hızlı olması önemlidir. Genelde hızlı bir süreç için tutucularda vakum sistemi kullanılır. Duruma göre de pnömatik tutucularda kullanılabilir ancak böyle bir durumda tutucuların açılıp kapanma sürelerine de dikkat edilmelidir. Tüm bunlar göz önünde bulunduğunda üretim hattının sonuna eklenen bir Delta robot ile hızlı paketleme gerçekleştirilebilir. Şekil 7 de ABB IRB 360 FlexPicker robot ve şekil 8 de ABB IRB 360 FlexPicker robot ile gerçekleştirilen paketleme sistemi örnek gösterilmiştir.





Şekil 7: IRB 360 FlexPicker



Şekil 8: IRB 360 FlexPicker paketlenme sistemi

4. Sonuç

Bu çalışmada robot kolların çalışma alanları ve çalışma prensipleri genel hatlarıyla açıklanmaktadır. Birbirinden farklı tasarımlar üzerinden uygulama örnekleri ile paylaşılan endüstriyel robot kollar ile birlikte ihtiyaca en uygun, esnek proses ve hızlı üretim basamakları tasarlanabilir ve gerçekleştirilebilir olduğu açık bir biçimde gösterilmektedir.

Yukarıda verilmiş olan uygulama örneklerinde de görülebildiği üzere aynı otomasyon tasarımı üzerinden tut ve yerleştir, besleme, paketlenme ve bunların dışında da kalite kontrol, lazer markalama, kaynak operasyonları, paletleme, kutulama ve montaj proseslerinin tamamı gerçekleştirilebileceği gibi ihtiyaç doğrultusunda daha farklı tasarımların yapılması ya da yeni proseslerin eklenmesi mümkündür. Anlatılanlar doğrultusunda bir kartezyen robotu ile belirlenen bir ürünü doğrusal bir besleme yolu üzerinden alıp, ürün için oluşturulmuş magazine yerleştirdiği uygulamada elde edilen sonuçlar tablo 2’de görülmektedir.

Veriler sayılacak ürün yelleştirilebilen ürünler olarak belirlenmiştir ve her bir magazin üzerinde 10 adet olması planlanmıştır. Yanlış yerleştirilen veya yerleştirilemeyen ürünler hata olarak sayılmıştır. Ayrıca kartezyen robotunu 1000 adet ürünü magazine yerleştirmek için geçirdiği süre kayıt edilmiştir. Kartezyen Robotu yerleştirme sistemi ile yerleştirilen ürünlerin sayımı gerçekleştirildi ve süre kaydı alındı. Tablo 2’ de elde edilen sayım sonuçları aynı operasyonun manuel yöntem ile operatörler tarafından gerçekleştirildiğinde elde edilen verilerle karşılaştırılmaları ve oranları



görülmektedir. Tablo 3'te ise operasyon tamamı için geçen sürenin kartezyen robotu ve manuel operatörler tarafından sonuçları için karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Tablo 2: Ürün yerleştirme hata oranı karşılaştırılması

Deneme No	Ürün Sayısı (Adet)	Kartezyen Robot Ürün Yerleştirme Sayısı (Adet)	Manuel Ürün Yerleştirme Sayısı	Kartezyen Robot Hata Oranı (%)	Manuel Hata Oranı (%)
1	1000	3000	2999	0	0,1
2	1000	3000	3000	0	0
3	1000	3000	2997	0	0,3
4	1000	3000	3000	0	0

Tablo 3: Ürün Yerleştirme Süresi Karşılaştırılması

Deneme No	Ürün Sayısı (Adet)	Kartezyen Robot Ürün Yerleştirme Süresi "sn"	Manuel Ürün Yerleştirme Süresi "sn"
1	1000	3000	3500
2	1000	3000	3470
3	1000	3000	3600
4	1000	3000	3580

Uygulama örneklerin her biri için besleme kapasitesi 10 adet olan 100 adet magazin kullanılarak test gerçekleştirilmiştir. Testler göstermektedir ki endüstriyel robotların aynı hareketi yüksek miktarda tekrarlayabilmesi ve bu sayede hem konumunu kaybetmemesini hem de hızlı operasyon gerçekleştirebilmesini sağlıyor. Ayrıca bu çalışmada görüldüğü gibi robot kolların operatörlere kıyasla daha hızlı ve daha doğru çalışma imkânı vardır. Operatörler de ürünü ters koyma, direk yerleştirememesi ve bunun benzeri hataları düzeltirken ciddi bir zaman kaybı da gözlemlenmiştir. Ayrıca ileri süreçlerde ürün değiştiği zaman operatörlerin yeni ürüne alışma süreci olduğu da gözlemlenmiştir. Endüstriyel robotlarında burada sahip olduğu avantaj ise çeşitliliktir. Üzerine çalışılacak ürüne göre tutucu, ağırlığa, eksenlere göre endüstriyel robot değişimi yapılabilir. Değişiklikler yapıldığında ise en basit seviyede endüstriyel robota çalışacağı konumların öğretilmesi, aynı operasyonun farklı robot ile devam etmesi için yeterli olacaktır.

5. Kaynakça

- [1] Andrew, B., Nikhil, V., "The future of robotic surgery", The Annals of The Royal College of Surgeons of England, vol.100, pp.4-13, 2018.
- [2] Universal Robot, <https://www.universal-robots.com/tr/ur-hakkinda/news-centre/cobot-tarihcesi/>.
- [3] Mitsubishi Electric Automation, Inc., "How to Hire an Industrial Robot", 2022.
- [4] Karacıgan, A., O., "İş Birlikçi Endüstriyel Robotlarda İş Güvenliği ve Risk Analizi Yaklaşımları", İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı, İş Sağlığı ve Güvenliği Yüksek Lisans Tezi, 2021.
- [5] Buhl, J., F., Grønhøj, R., Jørgensen, J., K., Mateus, G., Pinto, D., Sørensen, J., K., Bøgh, S. and Chrysostomou, D., "A Dual-arm Collaborative Robot System for the Smart Factories of the Future", Procedia Manufacturing, vol.38, pp.333-340, 2019.
- [6] Prakash, P., Dhanasekaran, C., Surya, K., Pius, V., K., Vishal, A. and Kumar, S., V., "Wireless motion controlled dual six axis robotic arms with Rover", Materials Today: Proceedings, vol.21, pp.465-469, 2020.
- [7] Lee, J., D., Li, W., C., Shen, J., H., Chuang, C., W., "Multi-robotic arms automated production line", 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), pp.26-30, 2018.



- [8] Jain, R., Zafar, M., N. and Mohanta, J., “Modeling and Analysis of Articulated Robotic Arm for Material Handling Applications”, I OP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol.691, 2019.
- [9] Kazık S., D., Özdemir S., C., Özbey, E., “6 Eksenli Robot Kol ile Lazer Kesim ve Markalama İşlemi”, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü Lisans Bitirme Tezi, 2019.
- [10] Buğday, M. and Karalı, M., “Design optimization of industrial robot arm to minimize redundant weight”, Engineering Science and Technology, an International Journal, vol.22, pp.346-352, 2019.



2 ZAMANLI BENZİNLİ BİR MOTOSİKLET MOTORUNDA TERMAL BARIYER KAPLAMANIN MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Fadel Alhamado Alchehabi ^{1*}, M. Akif Kunt ², Haluk Güneş ³

¹ Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya

ORCID ID: 0000-0001-7872-3098, abomahmud1991@gmail.com

² Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Kütahya

ORCID ID: 0000-0001-5710-7253, mehmetakif.kunt@dpu.edu.tr

³ Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Kütahya

ORCID ID: 0000-0002-0915-0924, haluk.gunes@dpu.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Bu çalışmada tek silindirli buji ile ateşlemeli 2 zamanlı bir motorun yanma odasına termal bariyer kaplaması yapılmış ve motor performans değişimi incelenmiştir. 500 µm kalınlığında Yitriya Stabilize Zirkonya (8Y₂O₃-ZrO₂) malzemesi yanma odası çeperlerine kaplanmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, TB (Termal Bariyer) kaplamalı ve TB kaplamasız deney motoru tam yükte 4500-6000 d/d motor hızı aralığında test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre TB kaplamalı motorda yanma veriminin artmasına bağlı olarak motor gücü %6.23, motor momenti % 6.02, ve efektif verimi % 8.37 artmıştır. Aynı zamanda (ÖYT) özgül yakıt tüketimi %8.346 oranında azalmıştır.

Anahtar kelimeler: 2 zamanlı motor, termal bariyer, motor performansı, (ÖYT) özgül yakıt tüketimi, efektif verim.

1. Giriş

Enerji ihtiyatlı kullanılması gereken sınırlı bir kaynaktır. Enerji, eksikliğinin yanı sıra çıkarıldığında ve kullanıldığında çevre üzerinde oluşturduğu etki de oldukça önemlidir [1]. Sera Gazları (GHG) emisyonunun azaltılması ve iklim felaketlerinin önlenmesi dünyadaki tüm ülkeleri için büyük önem taşımaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) verilerine göre, atmosfere atılan CO₂ emisyonlarının kontrol altına alınmaması durumunda bu emisyon 2050 yılına kadar iki katından fazla artacak ve bu durum fosil yakıt talebini artıracaktır [2]. Yakıt maliyetlerindeki hızlı artma yüksek kaliteli yakıtların piyasaya arzının azalmasına sebep olacaktır [3]. Bu nedenle günümüz ülkelerinin en önemli amaçlarından birisi her alanda kullanılan toplam enerji miktarını azaltmaktır [4]. İçten yanmalı motorlarda enerji tasarrufu ve verimlilik her zaman bu konuda çalışma yapan mühendislerin hedefi olmuştur. Benzinli motorlarda yakıtın ısı enerjisinin yaklaşık üçte biri soğutma sisteminden ve yaklaşık üçte biride egzoz sisteminden atılmakta ve kalan üçte biri ise motorda faydalı güce dönüşmektedir. Motordan atılan ısı miktarının azaltılması motorun termik verimini artırmaktadır. Motor soğutma sistemindeki soğutucu akışkanın sıcaklığının azalması silindir kapağı ve motor silindirinin soğumasını sağlar. Bu durum motor parçalarının aşınmasını azaltmak, dayanımını ve kullanım ömrünü artırmak bakımından faydalı olsa da soğutma sıvısına geçen akışkan enerji miktarını artırmaktadır. Soğutma sistemine geçen enerji miktarının artması sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklığının azalmasına, fren ortalama efektif basıncın azalmasına ve yakıt tüketiminin artmasına neden olur [5-6]. Ayrıca içten yanmalı motorun yanma odasını teşkil eden silindir gömleği, supaplar, piston ve piston kafası gibi elemanların yüzeylerinde yanma reaksiyonları ve eksik yanma sonucu yanmamış yakıtın aniden yanması sonucunda termal şoklar, kimyasal aşınmalar, performans azalmaları ve emisyon değerlerinde artmalar meydana gelmektedir.



Çevreye atılan ısı kayıpları azaltılmış motor teknolojisi TB kaplama ile sağlanmaktadır [12]. Termal bariyer kaplama (TBK) içten yanmalı motordan daha yüksek bir yanma verimi ve termal verim elde edilmesini, emisyonların azaltılmasını sağlar [3]. TB kaplama işlemi motor tasarım geometrisine bağlı olarak yanma odasının tüm yüzeylerine, piston tepesi veya supaplara uygulanabilir [7]. TBK'nın temel amacı genişleme stroku sırasında yüzey sıcaklıklarını yükselterek ısı transferini, silindir duvarı ile yanmış gazlar arasındaki sıcaklık farkını azaltmaktır. TBK ile silindir içinde kalan ısı enerjisinin motor gücü ve verimini artırmaktadır. Ayrıca TBK egzoz gazı sıcaklıklarını artırarak bir atık ısı geri kazanım alternatifi olan termoelektrik jeneratör kullanımı ile daha fazla enerji geri kazanımı sağlamaktadır [3]. Egzoz atılan ısının geri kazanımı ile ilgili olarak, termoelektrik jeneratör (TEJ) teknolojisi dışında Termoiyonik jeneratör, turbo şarj, turbo bileşik, Organik Rankine çevrimi (ORC) ve Stirling çevrimi gibi başka alternatifler de bulunmaktadır [8].

1.1. Literatür Taraması

Dünya çapında fosil yakıt tüketimi günde 92,6 milyon varilin üzerine çıkarken [9] son yıllarda teknolojik gelişmelere paralel olarak yakıt tüketimini azaltmak ve yanma erimlerini artırmak amacıyla gaz türbini ve pistonlu motor araştırmaları oldukça artmıştır. Termal bariyer kaplama (TBK), çoğunlukla uçak motorları, gaz türbinleri ve yüksek çalışma sıcaklıklarına maruz kalan denizaltı motorları ve diğer araç motorlarının sıcak parçalarını yüksek sıcaklık ve oksidasyondan korumak için kullanılmıştır [10-11]. İçten yanmalı motorun yanma odası elemanlarının TB malzemelerle kaplanması pek çok çalışma yapılmıştır. Gurbuz ve Gokkaya, yanma odası elemanlarını yalıtım için (Alüminyum oksit-Zirkonyum oksit) (% 20-% 80) ve (Alüminyum oksit-Titanyum oksit) (% 87-% 13) malzemeleri kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda CO ve HC emisyonlarının azaldığı, egzoz gaz sıcaklığının arttığı ve yakıt sarfiyatında % 11 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir. ($Al_2O_3-TiO_2$) (% 87-%13) kaplamanın ($(Al_2O_3-ZrO_2)$ (% 20-%80)) kaplamaya göre daha verimli sonuçlar verdiği ifade edilmiştir [12]. Ciniviz ve Haşimoğlu dizel bir motorda supaplar ve silindir kapağını TB malzeme (Yitriya Stabilize Zirkonya) ile kaplayarak ısı kayıpları ve motor performansı değişimlerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre tam yükteki motor gücü TB kaplama ile % 1- % 3 arasında ve motor momenti ise % 1,5- % 2,5 arasında artmıştır [13]. Vural ve Özel, deneysel çalışmada içten yanmalı tek silindirli dört zamanlı dizel motorda piston ve supap yüzeylerine Cr_2O_3 , $Cr_2O_3 + \% 25Al_2O_3$, $Cr_2O_3 + \% 50 Al_2O_3$ ve $Cr_2O_3+75 \% Al_2O_3$ seramik tozları plazma püskürtme yöntemi ile kaplamışlardır. Deney sonuçlarına göre $Cr_2O_3+\%75 Al_2O_3$ tozu ile kaplanmış motorda % 10,01 oranında egzoz gaz sıcaklık artışı ölçülmüştür. Motorların egzoz emisyon değerleri karşılaştırıldığında $Cr_2O_3+\%75 Al_2O_3$ tozu ile kaplanmış motorda HC emisyonlarında % 18,33, CO_2 emisyonlarında % 24,32 ve duman emisyonlarında % 9,05 oranında azalma ölçülmüştür. [14]. Jena ve diğerleri piston tepesi ve supap yüzeylerinde Yitriya Stabilize Zirkonya (YSZ) kaplama yaparak tek silindirli bir dizel motorun motor performansı ve emisyon karakteristiklerinin değişimi konusunda araştırma yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre dizel motorda $FeCl_3$ YSZ kaplama kullanılması kaplamasız motora göre fren termal verimliliğini % 2,7 artırmış ve frene özgü yakıt tüketimi ise % 8,3 azaltmıştır. TB kaplama emme havasının daha verimli kullanımı sağlayarak yanmayı iyileştirmiştir [15].

2. Termal Bariyer Kaplama

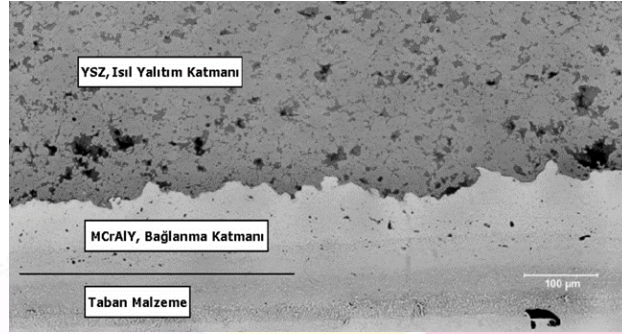
TB kaplama metalik bağlayıcı katman ve seramik katman adı verilen en az iki tabakadan meydana gelmektedir. Taban malzemesi en altta olup bu parçanın üzerine bağlanma katmanı adı verilen bir tabaka daha kaplanmaktadır. Bağlanma tabakasının sistemde üç önemli görevi üstlenmektedir;

- I. Yüksek oksidasyon ve korozyon direnci ile taban malzemenin korunması
- II. Seramik üst tabakanın ana malzemeye uyumlu bir şekilde yapışması.
- III. Termal genleşme katsayıları (α) büyük bir fark olan seramik tabaka ile taban malzeme arasında uyumlu bir geçiş bölgesi oluşturması

Bağlayıcı malzemenin çalışma sıcaklıklarında oksitlenme ve korozyon direnci yüksek olmalıdır. Bu özelliklere sahip MCrAlY alaşımı türbin kanatları için bağlayıcı olarak tasarlanmıştır [16-18]. Pt ve

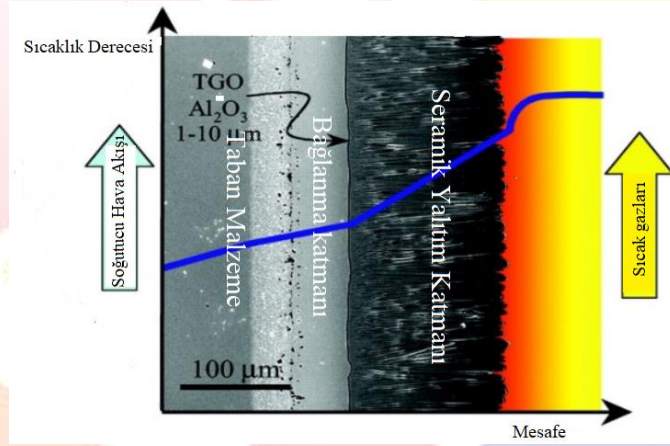


Al gibi metalik bağlayıcı tabakalar difüzyon kaplama ile de üretilmektedir. MCrAlY bağlayıcı tabaka termal sprey veya fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemleri ile üretilmektedir. Şekil 1'de Atmosferik Plazma Spreyi (APS) yöntemi ile üretilmiş bir TBK mikro yapısı ve katmanları gösterilmiştir.



Şekil 1: Standart formda TBK'ya ait kesit görüntüsü. [17]

Seramik üst tabaka ise düşük ısı iletkenliğe, nispeten yüksek termal genişleme katsayısına (α) sahip tetragonal ve kübik fazların kararlılığı için magnezyum oksit (MgO), itriyum oksit (Y_2O_3), kalsiyum oksit (CaO) gibi oksitlerden meydana gelmekte olup mekanik streslere karşı dayanıklıdır [18-20].



Şekil 2: Standart bir TBK'ya ait şematik gösterim [19]

Şekil 2 'de şematik olarak gösterilen yüksek ısı akışına karşı malzemeyi korumak için kullanılan TB kaplama soğutucu akışkana geçen ısı akışını azaltarak motorun daha yüksek sıcaklıklarda çalışmasını sağlayarak motor verimini artırmaktır. YSZ iyi bir ısı yalıtkanıdır ve iletkenliği üretim yöntemine bağlı olarak 1-2 W/mK arasında değişmektedir. TBK' ler alt tabakaya bir bağlayıcı tabaka olmadan uygulanamaz. Bağlayıcı tabaka alt malzemeyi oksidasyondan korur ve seramik kaplama ile alt tabaka arasındaki termal genişleme katsayıları arasındaki farkı dengeler [18-21].

3. Materyal ve Metot

3.1. Yanma Odası Elemanı Termal Bariyer ile Kaplanması

TB kaplama yapılacak yanma odası elemanı (silindir kapağı) orijinal yedek parça olarak temin edilmiştir. TB kaplama işleminden önce silindir kapak contasının yüzeyine maskeleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra silindir kapağının sabitleme işlemi yapılarak iş parçası üniteye sabitlenmiştir. Kaplama işleminde homojen bir görünümün elde edilmesi için robot kollu bir plazma sprey tabancası kullanılmıştır. Bağ tabakası olarak NiCrAlY alaşımı kullanılmıştır. Alaşımda yer alan Y malzemesi Yitria-İtriyum karışımıdır. Bağ tabakasının kaplanmasından sonra 2 dakika beklenmiş daha sonra hava üfleme işlemi ile bağ tabakası yüzeyinde soğutma yapılmıştır. Soğutma işlemi sonrasında TB kaplama işlemi yapılmıştır. TB kaplama malzemesi olarak Metco 204NS kodlu kaplama malzemesi kullanılmıştır. Termal sprey kaplama üretim parametreleri Tablo 1'de



gösterilmiştir. 5'erli 8 paso şeklinde kaplama işlemi yapılmıştır. Her kaplama işlemi sonrasında 2 dakika bekleme süresi uygulanmıştır.

Tablo 1: Termal sprey kaplama üretim parametreleri

Parametreler	
Plazma tabancasının adı	Metco AMDRY 962
Bağlayıcı toz tabakası kalınlığı	150 μm
Püskürtme mesafesi	150 mm
Toz besleme miktarı	45 g/d
Bağlayıcı toz tabakası robot kol hareket hızı	500 mm/s
Bağlayıcı tabaka Argon besleme hızı	45 l/d
Bağlayıcı tabaka Hidrojen besleme hızı	12 l/d
Bağlayıcı tabaka disk hızı	% 15
Seramik tabakası kalınlığı	350 μm
Seramik tabakası robot kol hareket hızı	250 mm/s
Seramik tabaka Argon besleme hızı	55 l/d

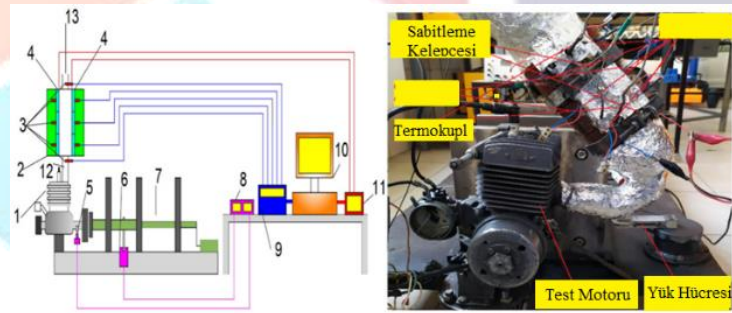
3.2. Deney Motoru ve Özellikleri

Deney motoru olarak hava soğutmalı, tek silindirli ve buji ateşlemeli 2 zamanlı bir benzin motoru kullanılmıştır. Motorun teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Deneyde kullanılan benzin motorun teknik özellikleri.

Motor Hacmi	49 cc
Motor gücü	2,5 HP
Silindir sayısı	1
Strok sayısı	2 zamanlı
Silindir çapı	42,50 mm
Strok uzunluğu	34,54 mm
Giriş ve çıkış süreci	Port
Soğutma sistemi	Hava

3.3. Deney Düzeneği



Şekil 3. Deney düzeneğinin şematik ve fotoğraf görünümü [8]

Motor performans deneylerinde dinamometre olarak küçük güçteki motorların test edilebilmesi için tasarlanıp imalatı yapılmış balatalı tip (prony freni) bir dinamometre tercih edilmiştir. Bu dinamometrenin doğruluğu 0,003 Nm [22-23] dir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3’te gösterilmiştir. Deneylerde efektif fren kuvveti ölçümlerinde Esit BB-20kg-C3 yük hücresi (load cell) kullanılmıştır. Yük hücresinin teknik özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

(1) Test motoru, (2) geri kazanım sistemi, (3) termokupl, (4) termoelektrik jeneratör (TEG), (5) hız sensörü, (6) yük hücresi, (7) dinamometre, (8) motor gücü ölçümü, (9) sıcaklık veri kaydedicisi,



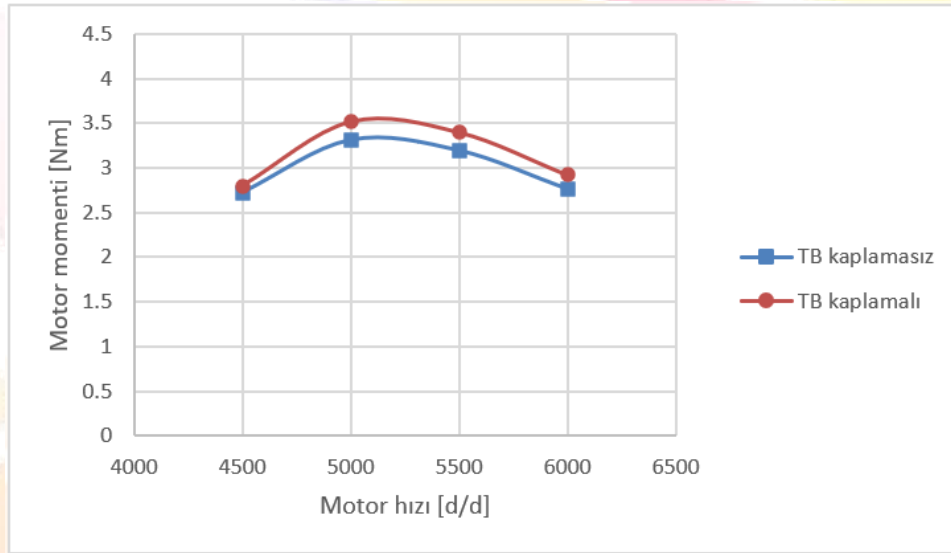
(10) bilgisayar, (11) doğru akım elektronik yükü, (12) egzoz giriş borusu ve (13) egzoz çıkış borusu.

Tablo 3. Yük hücresinin teknik özellikleri [23].

Çalışma gerilimi (maksimum)	15 V
Kapasite (maksimum)	20 kg
Toplam hata	$<\pm$
Giriş direnci	$385 \pm 20 \Omega$
Çıkış direnci	$350 \pm 3 \Omega$

4. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

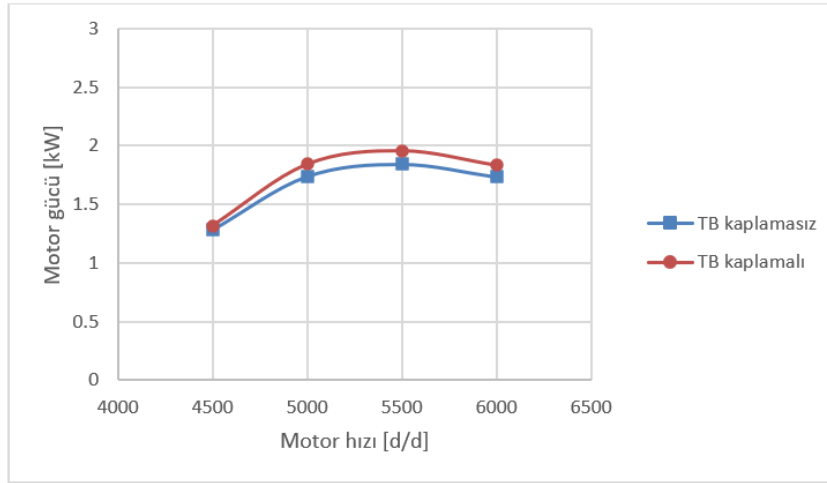
TB kaplamasız ve TB kaplanmalı deney motorunun motor devrine bağlı olarak motor momenti karşılaştırması Şekil 4'te verilmiştir. Grafiğe göre TB kaplama ile maksimum motor momenti artışı 5000 d/d motor hızında % 6,024 oranında meydana gelmiştir. Bu artışın nedeni TB kaplama sonucunda soğutma sistemine kaybedilen ısı transferinin azalması ve yanma veriminin yükselmesidir. Grafiğe göre tüm motor hızlarında TB kaplama ile motor momenti artmaktadır.



Şekil 4. TB Kaplamasız ve kaplamalı motor tam yükte motor hızına bağlı olarak motor momenti değişimi gösterilmiştir.

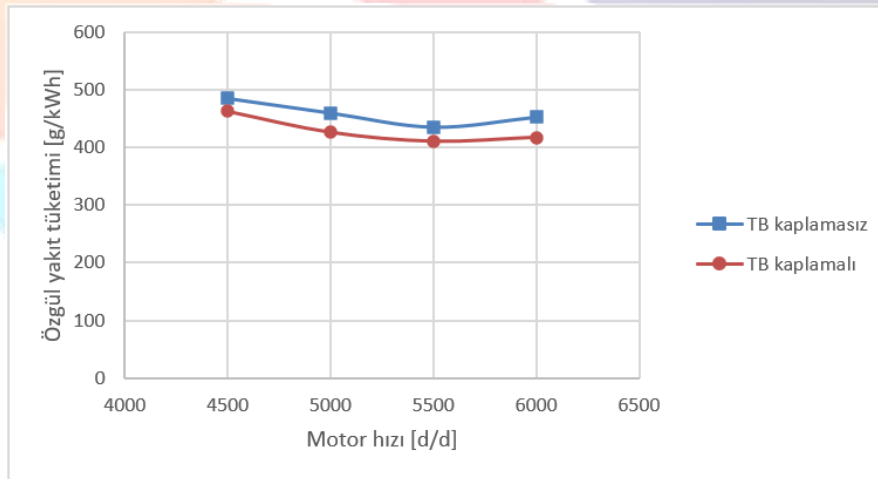
TB kaplamasız ve TB kaplanmalı deney motorunun motor devrine bağlı olarak motor gücü karşılaştırması Şekil 5'te verilmiştir. Deney sonuçlarına göre TB kaplamalı motorun TB kaplamasız motora göre 5500 d/d motor hızında motor gücü maksimum % 6,23 oranında artmıştır. Motor gücündeki minimum değişim ise 4500 d/d' da % 2,96 olarak tespit edilmiştir. Bu artışın nedeni, seramik kaplama sonucunda ısı kayıplarının azalması ve yanma veriminin artmasıdır.





Şekil 5. TB Kaplamasız ve kaplamalı motor tam yükte motor devrine bağlı olarak motor gücü değişimi gösterilmiştir.

Şekil 6'da TB kaplamasız ve TB kaplamalı deney motorunda tam yük şartları ve farklı motor hızlarında özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değişimi görülmektedir. İçten yanmalı motorlarda özgül yakıt tüketimi (ÖYT) önemli bir parametredir. TB kaplama ÖYT' nin azalması amaçlanmıştır. Deney sonuçlarına göre TB kaplamasız motorun tüm motor hızlarında ÖYT değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Düşük devirlerde motorlarda ısı kaybının yüksek olması, yanma koşullarının motor devri olarak optimum yanma bölgesinden uzak olması ve düşük devirlerde motor gücünün düşük olmasından dolayı bu beklenen bir sonuçtur. TB kaplamalı ve kaplamasız arası ÖYT en yüksek değişim farkı 6000 d/d da %8,34 orarı tespit edilmiştir. TB kaplamalı motorun ve TB kaplamasız motorun 5500 d/d ÖYT'nin minimum değerlere ulaşmaktadır. 5500 d/d' dan sonraki yüksek devirlerde her iki motorlarda ÖYT' nin arttığı görülmektedir. Motor devri yükseldikçe yakıtların yanması için gerekli zamanın azalması sebebiyle tam yanma gerçekleşmemektedir. Bu durumun ÖYT' nin artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Deney hızlarının tamamında ÖYT değerinin azalmasının sebebinin yanma odası üzerindeki termal yalıtımdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yanma sonu sıcaklığının yükselmesinin kimyasal tepkime veriminin artmasına neden olduğundan ÖYT değerlerinde bir düşüş meydana geldiğini görülmüştür.

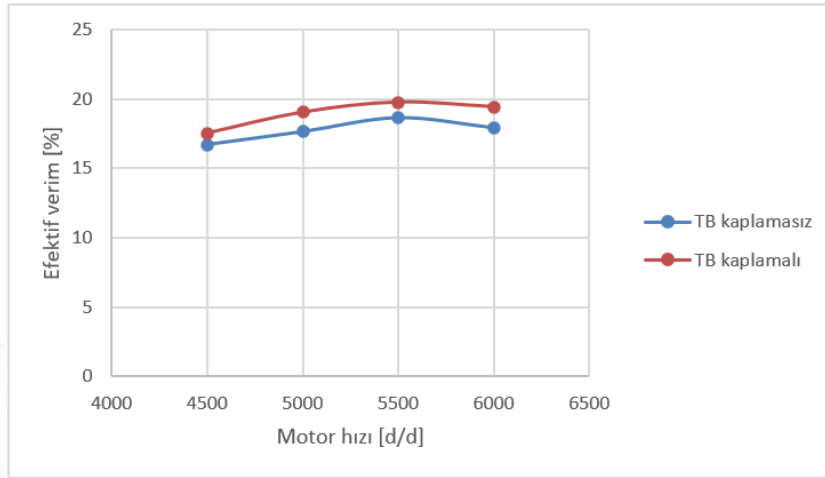


Şekil 6. TB Kaplamasız ve kaplamalı değişik motor devrelerine bağlı olarak elde edilen özgül yakıt tüketimi gösterilmiştir.

Şekil 7'de TB kaplamasız ve TB kaplamalı motorlarda farklı motor devreleri için elde edilen efektif verimi değişimi gösterilmiştir. TB kaplamalı motorun TB kaplamasız motora göre tüm devir aralılarında efektif verimde iyileşmeler gözlenmiştir. Efektif verimdeki maksimum iyileşme 5500 d/d motor hızında elde edilmiştir. TB kaplamalı ve kaplamasız arası efektif verimi en yüksek



değişim farkı 6000 d/d da %8,37 oranı tespit edilmiştir. TB kaplama sonucunda motor parçalarının normal çalışması için soğutma sisteminde olan ısı kayıplarının en aza indirilmesi, soğutma sistemi yükünü ve buna harcanan gücü azaltması, faydalı enerjiyi artıracak ve dolayısıyla motor verimini artıracaktır.



Şekil 7. TB kaplamasız ve TB kaplamalı motorlarda farklı motor için elde edilen efektif verimi değişimi

5. Sonuçlar ve Değerlendirme

Tek silindirli, buji ateşlemeli ve 2 zamanlı bir benzinli motorun yanma odası elemanı olan silindir kapağının TB bir malzeme ile kaplanmasıyla bu motorun soğutmaya harcanan enerji ve ısı transfer kayıpları azalmıştır. Yanma odasının TB kaplanması silindir içi yanma sıcaklığını arttırdığı için yanma tepkimesi de iyileşmektedir. Bu şekilde yanmamış hidrokarbonların tepkimeye katılması sağlanarak egzoz sıcaklıkları yükselebilmektedir.

Yapılan çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- TB kaplama ile motor kapağı izolasyonu sağlanmıştır.
- TB kaplamalı motorda yanmanın iyileşmesiyle motor gücü, motor momenti ve efektif verimi bir artmıştır.
- TB kaplanmış motora ait maksimum motor momenti TB kaplamasız motora göre % 6,024 oranında bir artmıştır.
- TB kaplamalı motorun TB kaplamasız motora göre 5500 d/d motor hızında motor gücü % 6,23 oranında artmıştır.
- TB kaplamalı ve TB kaplamasız motorların özgül yakıt tüketimi (ÖYT) 5500 dd da en düşük değerleri tespit edilmiştir.
- TB kaplamalı TB kaplamasız motorların arası en yüksek ÖYT değişim farkı ise 6000 d/d da %8,34 elde edilmiştir.
- TB kaplamalı TB kaplamasız motorların efektif verimin maksimum ulaştığı değerler 5500 d/d da tespit edilmiştir.
- TB kaplamalı TB kaplamasız motorların arası en yüksek efektif verim değişim farkı ise 6000 d/d da %8,37 elde edilmiştir.

6. Kaynakça

[1] Shawwaf, A. (2010) Optimization of the electric properties of thermoelectric generators, Master Thesis, Lund University, Department of Automatic Control.



- [2] Daniel Vargas Carmona D. (2014). Thermal barrier coatings for efficient combustion, Master Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Degree project in Materials Science and Engineering, Stockholm, Sweden.
- [3] Agwan, P. F., & Pande, S. A. (2015). An Experimental Investigation of Piston Coating on Internal Combustion Engine. In IJSRD-International Journal for Scientific Research & Development, 3(8).
- [4] Jeon, H. (2022). CO2 emissions, renewable energy, and economic growth in the US. *Electricity Journal*, 35(7). <https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107170>
- [5] Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A., İçten Yanmalı Motorlar, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Cilt 1, Ankara, 1995.
- [6] Topgül, T., Çınar, C., “İçten Yanmalı Motorlarda Soğutma Suyu Sıcaklığının Motor Performansına Etkileri Üzerine Deneysel Bir Araştırma” Selçuk-Teknik Online Dergisi, ISSN: 1302-6178, Cilt: 2, Sayı: 1, 2001.
- [7] Shailesh Dhomne, M., Mahalle, A. M., Mohammad, M., & Afsar, A. (2014). Experimental and Computational Investigations on Piston Coated Externally Scavenged S.I. Engine. In IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN. 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X ,PP 81-85
- [8] Kunt, M. A., & Gunes, H. (2022). An experimental study on design and performance of a waste heat recovery system with a thermoelectric generator to be used in exhaust systems of motorcycle engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(3), 779–789. <https://doi.org/10.1177/09544089211042524>
- [9] Saravanan, S., Ramesh Kumar, C., Pugazhendhi, A., & Brindhadevi, K. (2020). Role of thermal barrier coating and porous medium combustor for a diesel engine: An experimental study. *Fuel*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118597>
- [10] Cihan, Ö., Temizer, İ., Gök, M. G., & Karabaş, M. (2020). Investigation of the effect of rare earth doped $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ based thermal barrier coating on performance and combustion characteristics of DI diesel engine. *Surface and Coatings Technology*, 403. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126437>
- [11] Venkadesan, G., & Muthusamy, J. (2019). Experimental investigation of $\text{Al}_2\text{O}_3/8\text{YSZ}$ and $\text{CeO}_2/8\text{YSZ}$ plasma sprayed thermal barrier coating on diesel engine. *Ceramics International*, 45(3), 3166–3176. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.218>
- [12] Gurbuz, H., & Gokkaya, H. (2014). An experimental study on the effects of the thermal barrier plating over engine fuel consumption exhaust temperature and emissions. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 20(1), 15–19. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.04695>
- [13] Ciniviz, M., Haşımoğlu, C., Örs, İ., Ve Sahir, S. M. (2008). BİR DİZEL MOTORUNDA SERAMİK KAPLAMANIN MOTOR PERFORMANS VE ISI KAYIPLARINA ETKİSİ. *e-Journal of New World Sciences Academy*. 3(4): A0102. <https://bdf5a0aa044dcccce8704afa360dba814c775552.vetisonline.com/tr/download/article-file/187408>
- [14] Vural, E., & Özel, S. (2019). Dizel Bir Motorda Al_2O_3 İlaveli Cr_2O_3 Termal Bariyer Kaplamaların Egzoz Emisyonlarına Etkisi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 308-318.
- [15] Jena, S. P., Acharya, S. K., Das, H. C., Patnaik, P. P., & Bajpai, S. (2018). Investigation of the effect of FeCl_3 on combustion and emission of diesel engine with thermal barrier coating. *Sustainable Environment Research*, 28(2), 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.10.002>
- [16] O.A. Zubacheva. (2004). Plasma-Sprayed and Physically Vapor Deposited Thermal Barrier Coatings: Comparative Analysis of Thermoelastic Behavior Based on Curvature Studies, Von der



Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen,

[17] Khan, A. & Lu, Jiatian & Liao, Hanlin. (2003). Effect of residual stresses on air plasma sprayed thermal barrier coatings. Surface and Coatings Technology. 168. 291-299.

[18] Geçkinli, A. E. (1992). İleri Teknoloji Malzemeleri. İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul.

[19] Kulkarni, Anand., Vaidya, A., Goland, A., & Herman, H. (2003). Processing Effects on Porosity-Property Correlations in Plasma Sprayed Yttria-Stabilized Zirconia Coatings. Materials Science and Engineering: A. 359. 100-111.

[20] Zhao, L., Parco, M., & Lugscheider, E. (2004). High velocity oxy-fuel thermal spraying of a NiCoCrAlY alloy. Surface and Coatings Technology. 179. 272-278.

[21] Cao, X., Vassen, R., & Stoeber, D. (2004). Ceramic Materials for Thermal Barrier Coatings. Journal of the European Ceramic Society. 24. 1-10.

[22] Kunt, MA. (2016). Transformation of a piston engine into a compressed air engine with rotary valve. SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME). 3(11),1-5.

[23] Okur, M., & Sahin, F. (2014). Turbo döngüsel bir motorda döner valf ve elektromanyetik valf uygulamalarının türbin gücüne etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 28, 51-58.



GENİŞLETİLMİŞ DOĞAL GRAFİT (ENG) MALZEMESİNİN HİDROJEN DEPOLAMAYA ETKİSİ

Gamze Atalmış^{1*}, Kurshod Sattarkhanov², Rüveyda N. Kaplan³, Yüksel Kaplan⁴

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-2392-7672, gamzee_umudum@hotmail.com

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-9825-9074, kurshod.sattarkhanov@gmail.com

³ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-1234-4308, ruveydank9@gmail.com

⁴ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-0186-6063, ykaplan@ohu.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Bu çalışmada hidrojen depolama malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Hidrojen şarj/deşarj işlemlerini ivmelendirmek ve ihtiyaç duyulan hidrojeni kısa sürede ve istenilen debilerde alabilmek için depolama malzemelerinin termal iletkenliği iyileştirilmiş ve depolanan hidrojen miktarları ölçülmüştür. Deneysel olarak yapılan çalışmalar kapsamında ENG katkılı LaNi₅ malzemelerinin termal iletkenlik katsayıları %1200 civarında artırılmıştır. Hidrojen depolama malzemelerinin yapıları XRD ve SEM ile karakterize edilmiş ve termal iletkenlik katsayıları Hot Disk Thermal Constants Analyser cihazı ile ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: ENG (Genişletilmiş Doğal Grafit), Termal İletkenlik, Hidrojen Depolama

1. Giriş

Küresel ısınma ve iklim değişiklikleri, dünyadaki CO₂ emisyonundaki artış sonucu, gelecekte ortaya çıkacak olan enerji kaygılarının aşılmasında, hidrojen enerjisi alternatif yakıt olarak görülmektedir [1]. Hidrojen depolama amacıyla birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlar kompozit silindirlerde gaz olarak, sıvılaştırılmış olarak, cam mikro kürelerde, karbon nanotüplerde, metal hidrürler, sodyum bor hidrür ve yer altı mağaralarında depolama gibi uygulamalardır. Bunlar içerisinde ağırlık olarak en yüksek hidrojen depolama kapasitelerine sahip olmaları nedeniyle metal hidrürlerde ve sodyum bor hidrür içerisinde kimyasal olarak depolama yöntemleri ön plana çıkmaktadır [2]. Metal hidrürler, hidrojen molekülünün metal yüzey üzerinde ayrışması ve ardından hidrojen atomlarının kristal kafese göç etmesi ile oluşur [3]. Metal hidrürlerin başlıca dezavantajları, düşük gravimetrik yoğunlukları, yüksek çalışma sıcaklıklarıdır. Metal hidrür reaktörlerin ısı transfer problemleri, daha önce yapılan birçok çalışmada araştırılmıştır. Deneysel araştırmalar genel olarak metal hidrür/dehidrür kinetiğine odaklanılmıştır [4-5]. Metal hidrür reaktörlerin etkili termal iletkenliğini artırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri de metal alaşım tozlarına genişletilmiş doğal grafitin eklenmesidir [6-7]. Sanchez vd. [8], metal hidrür tozlarının ısı iletkenliği ve metal hidrür toz yatakları ile reaksiyon yataklarının cidarları arasındaki ısı transfer katsayılarının genellikle düşük olduğunu bildirmişlerdir. Pratik uygulamalarda metal hidrür tozları kullanıldığında, genellikle ısı transferini artırma tekniklerinin



uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Burada, yüksek etkili bir termal iletkenliğe sahip olan genişletilmiş doğal grafit / metal hidrür kompaktları tarif edilmektedir. Ayrıca, genişletilmiş doğal grafit pelletler ile çevreleyen çelik borunun iç yüzeyi arasındaki ısı transfer katsayısı araştırılmıştır. Hesaplanan ve deneysel veriler, ENG / MH kompaktlarının hidrojen depoları ve MH reaksiyon yatakları için verimli bir çözüm olduğunu açıkça göstermektedir. Özellikle düşük gözenekliliklerde mükemmel bir etkili termal iletkenliğe sahiptirler. Kim vd. [9], metal hidrürlerin ısı iletkenliğini arttırmak için burada yeniden sıkıştırılmış genişletilmiş grafit tekniği (REGT) olarak adlandırılan yeni bir teknik önermektedir. Bu yeni teknikte, homojen bir şekilde metal hidrüre karıştırıp daha sonra bunları küçük parçalar halinde sıkıştırmak için, bağlayıcı olarak genişletilmiş grafiti kullanmışlardır. Yeniden sıkıştırılmış genişletilmiş grafit tekniği), LaNi_5 'in ısı iletkenliğini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Üretilen metal hidrürün termal iletkenliği 3-6 W/mK aralığında olduğunu belirtmişlerdir. Lototsky vd. [10], $\text{C}_{14}/\text{MgZn}_2$ tipi AB_2 intermetalik metal hidrür malzemesini kullanmışlar ve hidrürleme sırasında termal iletkenliğin artırılması için kütlece % 1 oranında genişletilmiş doğal grafit (ENG) eklemişlerdir. Çalışmalarında sıcaklığın 60°C altında ve basıncın 50 bar'ın üstünde şarj edildiğinde kütlece % 1,4 hidrojen depolama kapasitesine ulaştıklarını bildirmişlerdir.

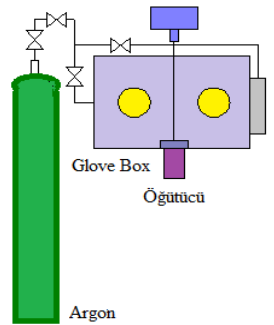
Bu çalışmada ise hidrojen depolama malzemeleri ENG katkısı ile termal iletkenlikleri iyileştirilmiş ve hidrojen depolama malzemelerinin yetileri incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Numunenin Öğütülmesi

Deneyde aşağıdaki işlem sırası takip edilmiştir.

- LaNi_5 alaşımı 5 saat öğütülmüştür. Her öğütme işleminde 65 g depolama alaşımı öğütülmüştür. Öğütme işlemi glove-box içinde ve azot gazı altında çapı 60 mm, yüksekliği 80 mm olan öğütücüde yapılmıştır. Öğütücü devri ise 515 d/d olarak belirlenmiştir.
- Öğütülen depolama alaşımı ile öğütücüde kullanılan çelik bilyelerin ağırlıkça oranı ise 10/1 olarak alınmıştır.

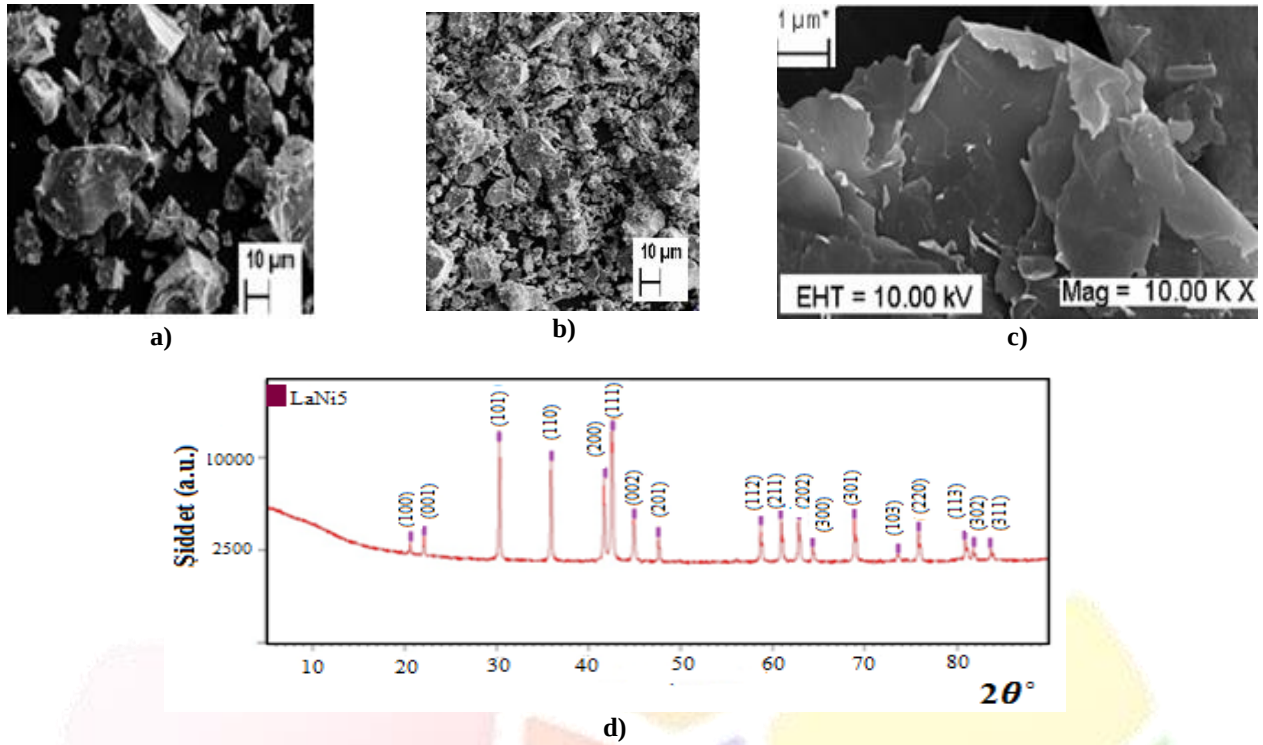


Şekil 1: Numunenin öğütülme işleminin şematik olarak gösterilişi

2.2. Depolama Malzemelerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Depolama malzemesi LaNi_5 'in SEM ve XRD analiz sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir. XRD, LaNi_5 tozunun piklerini safsızlık olmadan göstermiştir. XRD veri analizine dayalı olarak, alaşımın kafes parametreleri hesaplanmış ve Şekil 2c'de gösterilmiştir. LaNi_5 tozu 5 saat öğütülmüştür. Öğütme işlemi Glove Box cihazında (Şekil 1) gerçekleştirilmiştir. LaNi_5 yoğunluğu 7.935 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Öğütülen LaNi_5 'in yoğunluğu 7.8625 g/cm^3 olarak ölçülmüştür.





Şekil 2: Mikro yapı görüntüleri a) LaNi₅, b) 5 saat öğütülmüş LaNi₅, c) Genişletilmiş Doğal Grafit (ENG), XRD görüntüsü d) LaNi₅ tozunun

Yaklaşık 60 gram LaNi₅ alaşımına %1 ve %20 oranlarında ENG malzemesi eklenerek pellet haline getirilmiş ve termal iletkenlikleri ölçülmüştür (Şekil 3).



Şekil 3: a) %20 ENG kalkılı pellet, b) ENG katkı depolama malzemelerinin termal iletkenliklerinin ölçülmesi

5 saat öğütülmüş LaNi₅ farklı oranlarda (% 1, % 20) ENG ile karıştırılıp 12x10⁴ N kuvvet altında pelletler haline getirilmiş ve termal iletkenlikleri Hot Disk Termal İletkenlik cihazıyla ölçülmüştür (Şekil 3). Ticari olarak satın alınan LaNi₅ alaşımının termal iletkenliği ürün kataloğunda da belirtilen 1.2 W/mK olarak ölçülmüştür. Çalışmalar kapsamında geliştirilen hidrojen depolama malzemesinin termal iletkenliği yaklaşık olarak % 1200 oranında arttığı deneysel olarak ölçülmüştür.

Tablo 1: ENG katkı depolama malzemelerini hazırlamak için kullanılan parametreler ve termal iletkenlik değerleri

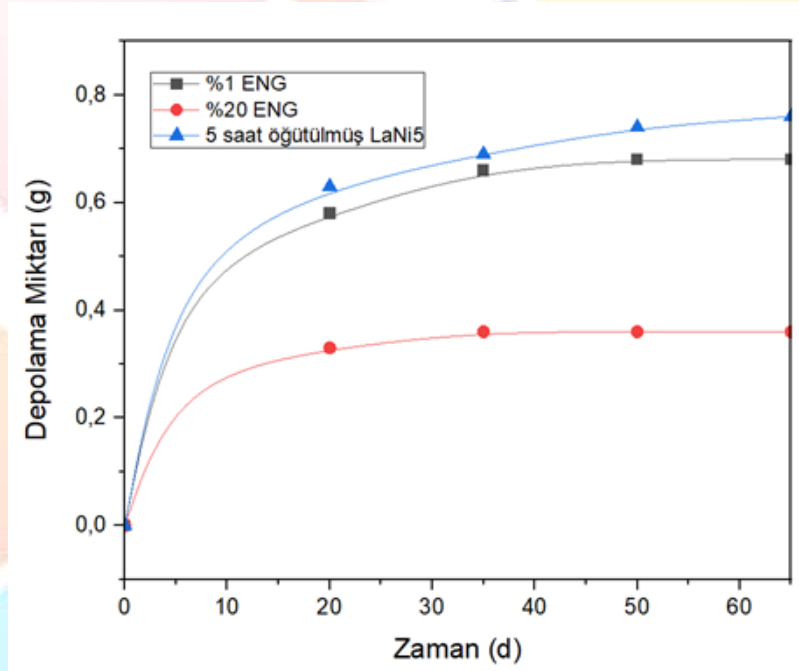
Öğütme Süresi	Metal Hidrür Miktarı	ENG Miktarı	Presleme Kuvveti	Termal iletkenlik (W/mK)
5 saat	99%	1%	12x10 ⁴ N	1.342
5 saat	80%	20%	12x10 ⁴ N	13.82





Şekil 4: Metal Hidrür Reaktörün genel görünüşü

Çalışmada 304 paslanmaz çelikten imal edilmiş bir reaktör tasarlanıp imal edilmiştir. Reaktör 60 g ENG katkılı depolama malzemeleriyle ayrı ayrı doldurulmuştur. Deney 10 bar şarj basıncında 4000 s boyunca yapılmıştır. Aktivasyon işleminin tam olarak gerçekleşebilmesi için reaktör vakum altında (10^{-4} mmHg), yaklaşık 200 °C sıcaklığa altında 2 saat süresince ısıtılmış ve oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Oda sıcaklığına kadar soğutulan reaktöre 10 bar basınçta, hidrojen 1 saat süre ile şarj edilmiştir. Bu ısıtma ve soğutma işlemi en az 5 defa tekrar edilmiştir. Reaktörde 5 saat öğütülmüş olan LaNi_5 , %1 ENG katkılı LaNi_5 ve %20 ENG katkılı LaNi_5 'in hidrojen depolama miktarları sırasıyla 0.75 g, 0.68 g ve 0.36 g olarak ölçülmüştür (Şekil 5).



Şekil 5: Reaktörde basınca göre depolanan hidrojen kütlesinin zamana göre değişimi

3. Sonuçlar

Bu çalışmada hidrojen şarj/deşarj işlemlerini ivmelendirmek için metal hidrür pelletler oluşturularak hidrojen depolama malzemelerinin ENG ile termal iletkenlik katsayıları iyileştirilmiştir. %20 ENG katkılı depolama malzemesinin termal iletkenliği yaklaşık olarak %1200 oranında arttığı deneysel olarak ölçülmüştür. %1 ENG katkılı depolama malzemesinin termal iletkenliği 1.342 W/mK ve 0.68 g hidrojen depoladığı ölçülmüştür. 5 saat öğütülmüş LaNi_5 0.75 g hidrojen depolarken %20 ENG katkılı LaNi_5 oldukça hızlı depolama yapmasına rağmen, hidrojen depolama miktarı neredeyse yarı yarıya düşüş göstermiştir. Bunun sebebi depolama malzemesinin azalmasıdır.



4. Kaynakça

- [1] Noyan, Ö.F., "Hidrojenin Özellikleri", II.Ulusal Hidrojen Kongresi, 9 Temmuz 2003, Ankara, 41-55, 2003.
- [2] Kayfeci M. , Bedir F., Kurt H., “Experimental investigation of the effects of vessel design and hydrogen charge pressure on metal hydride based hydrogen storage parameters”, Journal of Thermal Science and Technology, 34 (83-90), 2014.
- [3] D. Chandra, J. J. Reilly, and R. Chellappa, “Metal Hydrides for Vehicular Applications: The State of the Art,” 1-7, 2006.
- [4] Liu , J., Yang, Y., Yu, P., Li, Y., Shao, H., “Electrochemical Characterization of $\text{LaNi}_{5-x}\text{Al}_x$ ($x = 0.1-0.5$) in the Absence of Additives”, Journal of Power Sources, 161, 1435-1442, 2006.
- [5] Park, C.N., Luo, S., Flanagan, T.B., “Analysis of sloping plateaux in alloys and intermetallic hydrides: I. Diagnostic features”, Journal of Alloys and Compounds, 384, 203–207, 2009.
- [6] Wang, L., Fu, X., Chang, E., Wu, H., Zhang, K., Lei, X., Zhang, R., Qi, X., Yulin, Y., “Preparation and Its Adsorptive Property of Modified Expanded Graphite Nanomaterials”, Hindawi Publishing Corporation Journal of Chemistry, 3, 1-5, 2014.
- [7] Palla, S., Kaisare, N.S., “Evaluating the impact of pellet densification and graphite addition for design of on- board hydrogen storage in a fixed bed of MOF-5 pellets” International Journal of Hydrogen Energy ,45, 25875-25889, 2020.
- [8] Sanchez, A.R., Klein, H.P., Groll, M., “Expanded graphite as heat transfer matrix in metal hydride beds”.International Journal of Hydrogen Energy, 28, 515-527, 2003.
- [9] Kim, K.J., Montoya, B., Razani, A., Lee, K. H., “Metal hydride compacts of improved thermal conductivity”, International Journal of Hydrogen Energy, 26, 609–613, 2001.
- [10] Lototsky, M. V., Davids, M. W., Tolj, I., Klochko, Y. V., Sekhar, B. S., Chidziva, S., Pollet, B. G., “Metal hydride systems for hydrogen storage and supply for stationary and automotive low temperature PEM fuel cell power modules”, International Journal of Hydrogen Energy, 40, 11491–11497, 2015.

Teşekkür

Yazarlar, 121M529 numaralı sözleşme kapsamındaki mali destek için Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür eder. İlk yazar, Gamze ATALMIŞ, 100/2000 Doktora Burs Programı için Yükseköğretim Kurulu'na (YÖK) teşekkür eder.



KOMPLEKS HİDRÜRLERİN HİDROJENASYON ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Kurshod Sattarkhanov ¹, Gamze Atalmış ^{2*}, Yüksel Kaplan ³

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-9825-9074, kurshod.sattarkhanov@gmail.com

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-2392-7672, gamzee_umudum@hotmail.com

³ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-0186-6063, ykaplan@ohu.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Kompleks hidrürler, sahip oldukları yüksek gravimetrik hidrojen depolama kapasiteleri nedeniyle taşıtlarda katı halde hidrojen depolama için umut vaat eden bileşiklerdir. Fakat, hidrojeni desorbe edebilmeleri için yüksek sıcaklıklar gerektirmeleri, onları pratik uygulamalardan uzak kılmaktadır. Bu sorunun çözümüne yönelik olarak, kompleks hidrürlerin termodinamik ve kinetik özelliklerinde değişiklikler yapmayı sağlayan yöntemler ve uygulamalar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, en çok üzerine akademik araştırma yapılan kompleks hidrür malzemeler olan lityum alanat, sodyum alanat, lityum borhidrür ve sodyum borhidrür incelenmiş ve onların dehidrojenasyon özelliklerini iyileştirme üzerine yapılan çalışmalar kısaca özetlenmiş ve elde ettikleri veriler ışığında hangi malzeme grubu için hangi yaklaşım ve tekniklerin daha iyi sonuç verdiği çıkarımı yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen Depolama, Kompleks Hidrürler, Alanat, Borhidrür.

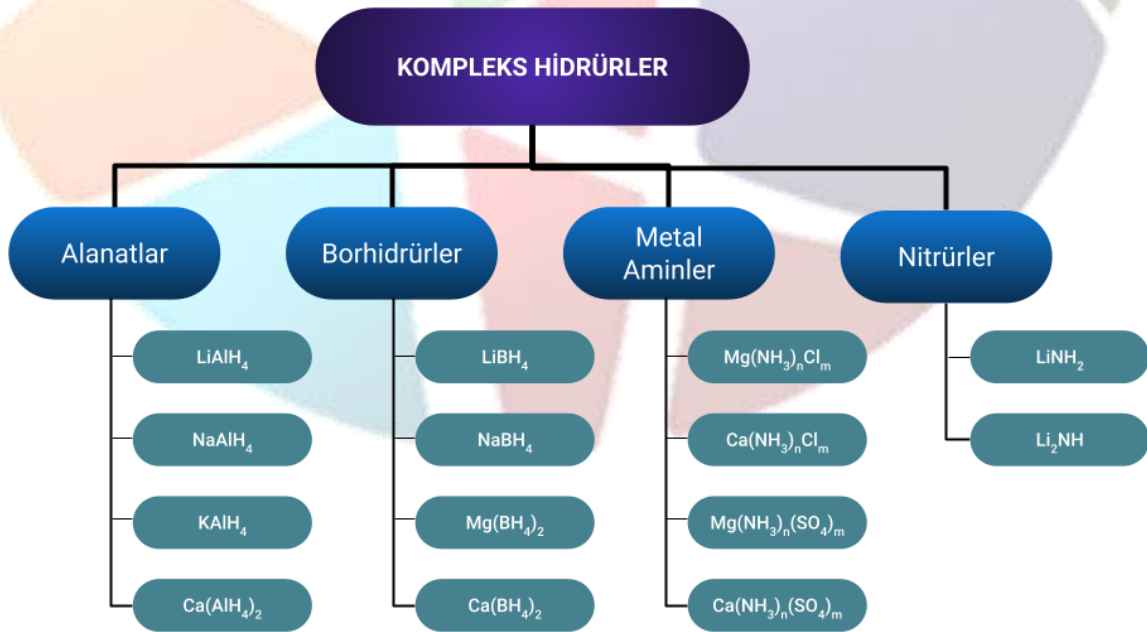
1. Giriş

Fosil yakıt miktarının kısıtlı ve bir gün tükenecek olması, hidrokarbonların üretiminin ve tüketiminin çevreye verdiği zararlar ile ilgili kaygılar ve modern dünya ekonomisinin bu sonsuz olmayan enerji kaynaklarına olan yüksek bağımlılığı, dünya çapında birçok ülkeler ve kurumları yeni, yenilenebilir ve güvenli bir enerji kaynağı ve taşıyıcısı arayışına itmiştir. Temiz enerji sorununa çözüm olacağı düşünülen hidrojen hem yakıt hem de enerji taşıyıcısı olarak ön plana çıkmaktadır ve birçok araştırma kurumu çalışmalarını hidrojen teknolojisinin günlük hayatımızda yer edinmesi için bu yöne yoğunlaştırıyor. 1974'te Miami, ABD'de düzenlenen Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansından ve onu takip eden "Hidrojen Hareketi"nden bu yana fosil yakıt temelli ekonominin yerini hidrojen temelli ekonominin alacağı fikri güç kazanmaktadır [1]. Bu düşüncenin doğmasına sebep olan, hidrojenin fosil yakıtlara göre sahip olduğu üstün özelliklerdir. Bunlar içinde, hidrojenin gravimetrik enerji yoğunluğunun petrol türevi yakıtlar ve yanıcı gazlardan en az 3 kat fazla olması, hidrojenin yanma ve/veya yakıt hücresinde elektrokimyasal tepkimesi sonucu atık ürün olarak sadece su buharı üretmesi, elektrolizin tersinir bir işlem olması sebebiyle yenilenebilir olması, hidrojenin saf bir şekilde dünyada bulunmamasıyla beraber hidrokarbonlar ve su gibi bileşiklerin içinde bolca bulunması vb. özellikler sayılabilir. Bu üstün özelliklere sahip olmasına rağmen hidrojenin bugüne kadar tüketici bazında hidrokarbonların yerini almamasının sebebi onun en önemli eksikliği olan düşük yoğunluğu (0 °C ve atmosferik basınç altında yaklaşık 0.09 kg/m³'tür) ve dolayısıyla düşük hacimsel enerji yoğunluğudur (0.003 kWh/L) [2]. Düşük yoğunluk beraberinde depolamada sıkıntılar getirmektedir ve bu sorunu gidermek için bugüne kadar birkaç yöntem denenmiştir. En yaygın ve en bilinenleri, mekanik



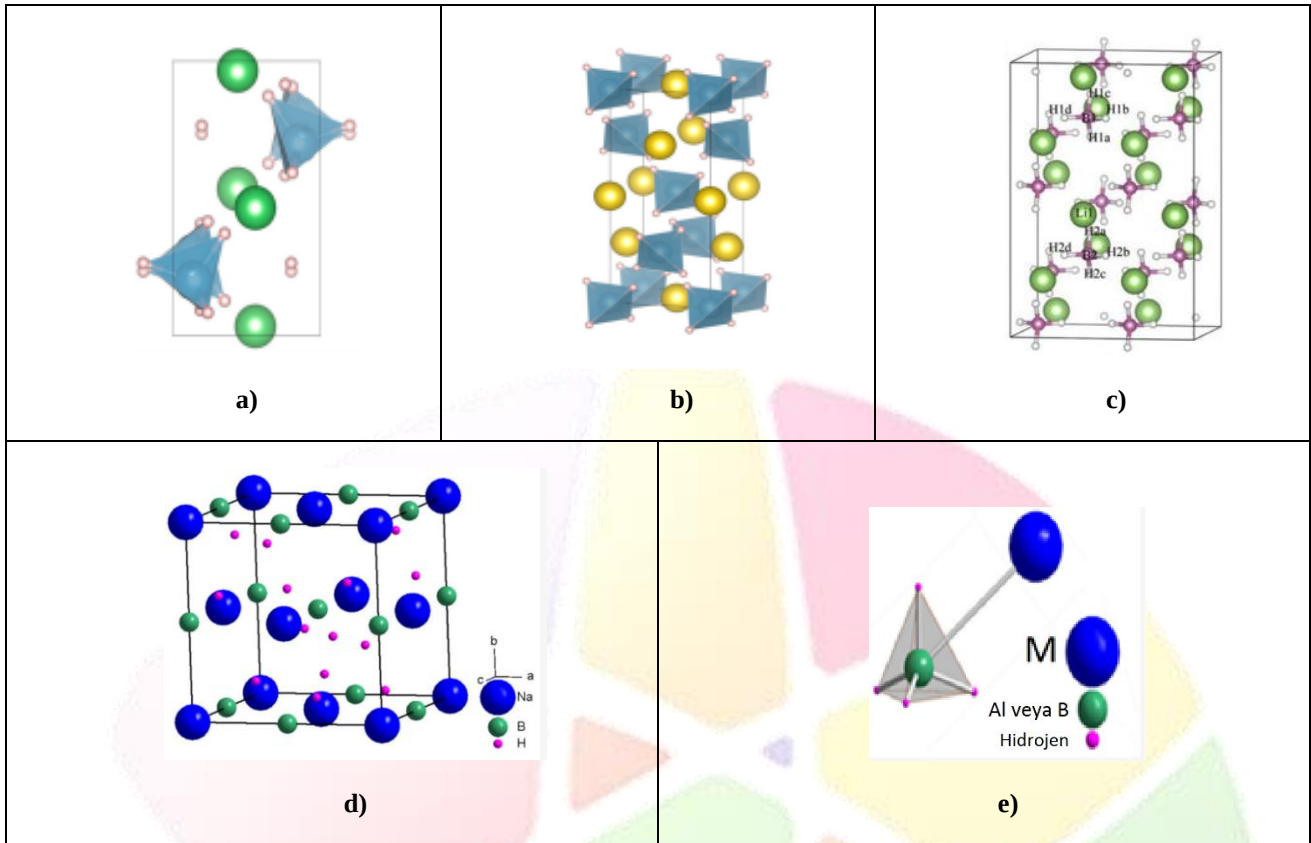
depolama yöntemleri diye adlandırabileceğimiz yüksek basınçlarda gaz şeklinde saklama, kriyojenik sıcaklıklarda sıvı halde saklama ve/veya bu ikisinin birleşimi olan kriyo-sıkıştırılmış halde yine sıvı olarak saklama yöntemleridir. Bunlar içinde en yüksek yoğunluğu 81 kg/m^3 ile sağlayan yöntem kriyo-sıkıştırma [3]. Öte yandan, hidrojeni bu yöntemlerin aksine katı halde depolamayı sağlayan metal hidrür ve/veya kompleks hidrürlerin içeriğinde depolama yönteminde, 150 kg/m^3 'a kadar hidrojen yoğunluğu yakalanabilmektedir (örneğin, Mg_2FeH_6 ve $\text{Al}(\text{BH}_4)_3$) [4]. Ek olarak, katı formda depolama genellikle patlama riskini önlediği için, gaz ve/veya sıvı halde depolamadan daha güvenlidir. Oldukça yüksek hidrojen depolama kapasiteleri sağlamaları nedeniyle, kompleks hidrürler, hidrojen ekonomisine geçişi mümkün kılacak olan, yüksek potansiyele sahip bir depolama teknolojisi olarak görülmektedirler.

Kompleks hidrürler, Al, N veya B gibi negatif yüklü anyonlara kovalent olarak bağlanan hidrojen atomlarının sırasıyla oluşturdukları tetrahidroalüminat (AlH_4), amonyak (NH_3) veya tetrahidroborat (BH_4) anyonların bir metal katyona iyonik olarak bağlanması sonucu oluşur [5-6]. Kompleks hidrürlerin çeşitleri ve sınıflandırması Şekil 1'de gösterilmiştir. Kompleks hidrürlerde genelde hidrojen atomları, merkezinde Al veya B bulunan bir tetrahedronun köşelerinde yer almaktadırlar (Şekil 2e) [4]. En çok ilgi çeken ve üzerine çalışma yapılan kompleks hidrürler alanatlar (MAlH_4 , $\text{M} = \text{Li, Na, Mg}$) ve borhidrürler (MBH_4 , $\text{M} = \text{Li, Na, Mg}$). Bu bileşikler termodinamik açıdan oldukça kararlı oldukları için, dehidrojenasyonu başlatıp içeriklerindeki hidrojeni açığa çıkartmak için metal hidrürlere kıyasla daha yüksek sıcaklıklar ($400\text{-}500^\circ\text{C}$ 'leri bulan) gerekmektedir. Bu yüzden, desorpsiyon sıcaklığını düşürüp, kompleks hidrürleri yakıt hücreli araçlarda kullanılabilir hale getirmek için çeşitli çalışmalar yapılmakta ve yeni yöntemler geliştirilmektedir. Kompleks hidrürlerin yüksek kararlılığını bozmak için kristal yapıda farklı yöntemler ile dislokasyon en çok başvurulan yöntemler arasındadır. Kristal yapıyı etkilemek için genellikle geçiş metalleri, Ti-bazlı alaşımlar, metal hidrürler, vb. malzemeler kompleks hidrürlere eklenmektedir. Bu da çoğunlukla mekanik alaşımlama işlemi ile gerçekleşmektedir. Bu işlem sonucunda tane boyutları küçülür, metal kafeste deformasyonlar oluşur ve özgül yüzey alanı artar. Bu da hidrojenin difüzyon hızını artırarak hidrojenasyon/dehidrojenasyon kinetiğine olumlu katkıda bulunur [7]. Hafif metal (Li, Mg, Na vs.) temelli kompleks hidrürlerin desorpsiyon karakteristiklerini geliştirmede kullanılan bir diğer yöntem, kompleks hidrür nanoparçacıklarını hapsedme işlemidir.



Şekil 1: Kompleks hidrürlerin sınıflandırılması [2].





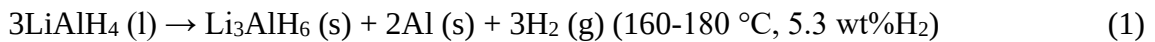
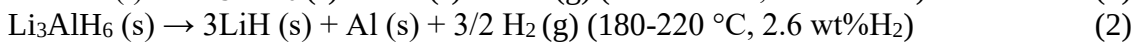
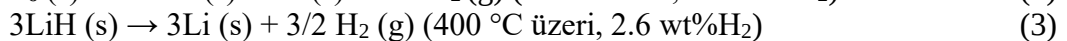
Şekil 2: a) α -LiAlH₄ kristal yapısı, b) NaAlH₄'ün kristal yapısı, c) LiBH₄'ün kristal yapısı, d) α -NaBH₄ kristal yapısı, e) [AlH₄]⁻ veya [BH₄]⁻ tetrahedronların yapısı [5], [21], [31].

Bu çalışmada, kompleks hidrürler olan LiAlH₄ (lityum alanat), NaAlH₄ (sodyum alanat), NaBH₄ (sodyum borhidrür) ve LiBH₄ (lityum borhidrür) incelenmiştir, düşük kinetik özelliklerini iyileştirmeye ve yüksek desorpsiyon sıcaklıklarını düşürmeye yönelik yapılan çalışmalar ve geliştirilen yöntemler özetlenmiştir.

2. Alanatlar

2.1. Lityum Alanat

LiAlH₄, pozitif bir Li⁺ iyonu ve içinde hidrojen ile alüminyumun kovalent olarak bağlandığı bir [AlH₄]⁻ anyonundan oluşan kompleks bir metal hidrürdür. LiAlH₄'ün α -LiAlH₄ (α -LiAlD₄) kristal yapısı Şekil 2a'da gösterilmiştir. LiAlH₄, yüksek gravimetrik ve hacimsel hidrojen yoğunluğu, kolay sentezlenebiliyor olması ve uygun katalizörlerin varlığında düşük desorpsiyon sıcaklığına ihtiyaç duyması, toksik olmaması gibi üstün özellikleri nedeniyle son yıllarda araştırma odağı olmuştur. Üstelik alüminyumun ucuz ve bol bulunan bir metal olması, LiAlH₄'ü hidrojen depolama uygulamaları için cazip bir aday yapar. LiAlH₄'ün tam dehidrojenasyonu farklı sıcaklık düzeylerinde gerçekleşen 3 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamaları ifade eden tepkimeler, bu tepkimelerin gerçekleşmesi için gereken sıcaklık değerleri ve her bir aşamada açığa çıkan hidrojen miktarı aşağıda ifade edilmiştir [8]:



LiAlH₄ toplamda 10.5 wt% hidrojen kapasitesi sergilese de bu kapasitenin 2.6 wt%'lık kısmı ancak 400 °C ve üzeri sıcaklıklarda pratik bir fayda sağlıyor. Asıl pratik uygulamalarda anlamı olan birinci ve ikinci desorpsiyon kademesi sıcaklıklarında LiAlH₄'ün açığa çıkardığı hidrojenin teorik miktarı 7.9 wt%'dur. LiAlH₄'ün yüksek depolama kapasitesi olmasına rağmen, geniş uygulamasının önündeki engellerden biri yavaş desorpsiyon kinetiğidir [7]. Bu nedenle, LiAlH₄'ün dehidrojenasyon özelliklerini (çalışma sıcaklığı ve reaksiyon kinetiği gibi) iyileştirmek için uygun



katalizörler geliştirmeyi amaçlayan bir dizi çalışma yapılmıştır. Son yıllarda, LiAlH_4 'ün kinetik ve termodinamik özellikleri, saf metaller (çoğunlukla V, Ti, Fe gibi geçiş metalleri), alaşımlar (örn. Ti-bazlı alaşımlar), metal halojenürler (NbF_5 , TiCl_3 vs.), metal oksitler, metal hidrürler, karbon temelli malzemeler (grafit, grafen, karbon nanotüp vs.) gibi bir dizi katkı maddesi yardımıyla önemli ölçüde geliştirilmiştir [9,10]. Katkı maddelerinin eklenmesi yaygın olarak bilyeli öğütme ile gerçekleşmektedir. Bir katkı maddesinin katalitik etkisi genellikle parçacık boyutuyla ilgilidir. Bilyeli öğütme, nano boyutlu parçacıklar elde etmek için kolay ve etkili bir yöntem olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, birçok yeni yüzey alanı ve kristal yapıda kusur oluşturulabilir ve katalitik etkiyi arttırmak için oldukça faydalıdır [11].

Katkı maddesi olarak metal oksit kullanmak oldukça yaygın bir uygulamadır. Sazelee ve ark. [12], 10 wt% $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ katkılı LiAlH_4 'ün 95 °C'de desorbe olmaya başladığını rapor etmişlerdir. Elde ettikleri deneysel verilere göre, katkısız LiAlH_4 90 °C sıcaklıkta 2.5 saat sonunda 1 wt %'den daha az miktarda hidrojen desorbe ederken, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ katkılı LiAlH_4 aynı şartlarda 4.2 wt% hidrojen desorbe etmektedir. Dragojlović ve ark. [7], geçiş metali oksit katkı maddelerinin kataliz sürecindeki etkilerini anlamak için LiAlH_4 'e Fe_2O_3 eklenmesiyle dehidrojenasyon özelliklerinde meydana gelen değişimleri deneysel ve teorik olarak araştırmışlardır. İncelenen numune yüksek enerjili bilyeli öğütücüde öğütülmüş LiAlH_4 + 5 wt% Fe_2O_3 şeklinde hazırlanmıştı. Saf LiAlH_4 'e göre LiAlH_4 + 5 wt% Fe_2O_3 'te desorpsiyon özelliklerinde önemli bir iyileşme görülmektedir. LiAlH_4 + 5 wt% Fe_2O_3 'te birincil desorpsiyon kademesi 143 °C'de ve ikincil kademe de 154 °C'de başlarken, saf LiAlH_4 'te bu değerler 150 °C ve 210 °C arasındadır. Hazırlanan kompozitin, 7.3 wt% miktarında hidrojeni desorbe ettiği görülmüştür. Sulaiman ve İsmail [13], metal oksit katkı olarak $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ kullanmış ve LiAlH_4 'ün hidrojen depolama özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ varlığı dehidrojenasyon performansında önemli ölçüde iyileşmeye yol açtı. Katkılı LiAlH_4 'te katkısız olana kıyasla başlangıç desorpsiyon sıcaklıkları birinci reaksiyon aşamasında 140 °C'den 80 °C'ye ve ikinci reaksiyon aşamasında 180 °C'den 135 °C'ye düşmüştür. LiAlH_4 + 10 wt% $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ kompoziti, 130 °C sıcaklıkta 20 dakika sonunda 5.54 wt% hidrojen desorbe ederken, katkısız öğütülmüş LiAlH_4 aynı şartlar ve süre içinde sadece 0.3 wt% kadar hidrojen serbest bırakmıştır.

LiAlH_4 'ün hidrojen depolama özelliklerini değiştirmek için diğer bir etkili strateji, geçiş metalleri ekleyerek LiAlH_4 'ün kimyasal bağını değiştirmektir. Ti bazlı alaşımlar, tuzlar, oksitler (TiO_2), hidrürler (TiH_2) ve genel olarak geçiş metali içeren bileşikler katalizör olarak sıkça başvuru alan malzemelerdir. Li ve ark. [14], TiN katalizörünün LiAlH_4 'e yüksek enerjili bilyeli öğütücüde beraber öğütülerek eklendiğinde dehidrojenasyon özelliklerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Deneyler sonunda, TiN katalizörünün LiAlH_4 'ün dehidrojenasyon kinetiğini arttırdığı ve desorpsiyon sıcaklığını düşürdüğü anlaşılmıştır. %2TiN- LiAlH_4 kompozitinin desorpsiyon başlangıç sıcaklığı LiAlH_4 'e göre 151 °C'den 90 °C'ye inmiş ve dehidrojenasyon hızı 137.2 °C'de maksimuma ulaşmıştır. Ayrıca, %2TiN- LiAlH_4 130 °C'de 7.1 wt% kadar hidrojeni desorbe etmiştir. Liu ve ark. [11], LiAlH_4 için katalizör olarak bilyeli öğütülen nano boyutunda aktif TiH_2 (nano- TiH_2) tozu kullanmışlardır. Yapılan çalışmaya göre, öğütme işlemi görmemiş TiH_2 'ye kıyasla nano- TiH_2 'in kullanılması LiAlH_4 'ün dehidrojenasyonu üzerinde üstün bir katalitik etki göstermektedir. Nano- TiH_2 katkılı LiAlH_4 için desorpsiyon 75 °C'de tetiklenmektedir, 6.3 wt% kadar hidrojen 100 °C sıcaklık ve 800 dakikalık bir sürede veya 120 °C ve 150 dakikalık bir sürede izotermal olarak desorbe olmaktadır.

Etkili katalizörlerden bir diğerleri, karbon nano fiber (CNF), tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) gibi karbon nano malzemelerdir [8]. Tan ve Tsai [8], yaptıkları çalışmada kimyasal indirgeme yöntemi kullanarak Pd ve Pt nano parçacıkları ile dekore ettikleri çok duvarlı karbon nanotüpleri (MWCNT), LiAlH_4 'ün desorpsiyon özelliklerini iyileştirmek amacıyla bir katalizör olarak kullanmışlardır. Farklı oranlarda (0, 5, 10, 20 wt%) MWCNT/Pt veya MWCNT/Pd ile karıştırılan LiAlH_4 'ün dehidrojenasyon davranışı, termal gravimetrik analiz (TGA) ve XRD yardımıyla incelenmiştir. Hem MWCNT/Pd hem de MWCNT/Pt'nin LiAlH_4 'ün dehidrojenasyonu üzerinde katalitik etkileri gözlenmiştir. İzotermal



TGA testleri, MWCNT/Pd'nin veya MWCNT/Pt'nin LiAlH₄'ün deşarj hızını saf MWCNT'lere göre 2 kat arttırdığını ortaya koymuştur. 20 wt% MWCNT/Pd eklenmesinin LiAlH₄'ün dehidrojenasyon başlangıç sıcaklığını 171 °C 'den 143 °C'ye düşürebileceği gösterilmiştir. Bununla birlikte, 5 wt% ve 10 wt% oranlarında ilave edilen MWCNT/Pd ve/veya MWCNT/Pt için tam tersi bir etki görülmüş ve dehidrojenasyon başlangıç sıcaklığı 190-200 °C'ye yükselmiştir.

Li ve ark. [10], 10 wt% kadar Co doplanmış karbon (Co@C) malzemesinin LiAlH₄'e yüksek enerjili bilyeli öğütücüde beraber öğütülerek eklenmesinin hidrojen depolama özellikleri üzerinde olan etkilerini incelemişlerdir. Co@C ilavesinin, dehidrojenasyon kinetiğini önemli ölçüde iyileştirdiği ve desorpsiyon sıcaklığını azalttığı bulunmuştur. Co@C- LiAlH₄ kompozit malzemesi 100 °C sıcaklıkta desorpsiyona başlamıştır ve bu, katkısız LiAlH₄'e göre 51 °C daha düşük bir sıcaklığı ifade etmektedir. Co@C- LiAlH₄ malzemesi 130 °C sıcaklık altında 4.58 wt% kadar hidrojeni desorbe etmiş, katkısız LiAlH₄ ise aynı koşullar altında sadece yaklaşık 1 wt% kadar hidrojeni serbest bırakabilmiştir. 150 °C'de ise kompozitlenmiş LiAlH₄ 7.05 wt% kadar hidrojeni desorbe etmiştir.

Geçiş metali halojenürleri çoğunlukla LiAlH₄'ün hidrojen depolama özelliklerini geliştirmek için katkı maddesi olarak kullanılır, ancak nispeten yüksek moleküler ağırlıkları ve LiAlH₄ ile reaksiyona girmeleri nedeniyle hidrojen kapasitesi kaybına neden olurlar. Geçiş metal halojenürleri, LiAlH₄'ün dehidrojenasyon sıcaklığını düşürmede en iyi performansı göstermiştir. Ancak bu halojenürler nispeten ağırdır ve ayrıca lityum halojenürler üretmek için LiAlH₄ ile kolayca reaksiyona girerler. Bu faktörler kaçınılmaz olarak hidrojen kapasite kaybına yol açar [11]. Tena-García ve ark. [30] ise, LiAlH₄ için katalizör olarak Ti tuzlarını (TiH₂, TiF₃ ve TiCl₄) tercih etmişlerdir. Kısa öğütme süreleri ve sıvı nitrojenli soğutma kullanarak farklı oranlarda bir dizi karışımlar üretmişlerdir. %5 mol TiCl₄ eklenmiş LiAlH₄'te ve 3LiAlH₄ + TiF₃ stokiometrik karışımında dehidrojenasyon sıcaklığında önemli bir düşüş gözlemlendi (sırasıyla 37 °C ve 55 °C desorpsiyon başlangıç sıcaklıkları). Bu karışımlardan salınan toplam hidrojen miktarı sırasıyla 6.7 wt% ve 4.5 wt% olmuştur. Bu çalışma ile yazarlar, soğutma altında bilyeli öğütmenin kullanılması ve bilyeli öğütme sırasında karışımlara verilen enerjinin öğütme süresi ve çalkalama frekansı aracılığıyla dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi durumunda dehidrojenasyon özelliklerini iyileştirmek için uzun öğütme sürelerinin her zaman gerekli olmadığını tespit etmişlerdir.

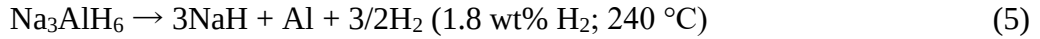
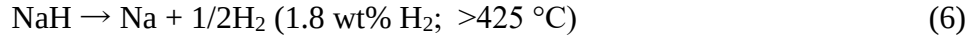
Kinetik ve termodinamik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılan bir diğer teknik ise, kompleks hidrür nanoparçacıklarını aktif gözenekli bir çerçeve içerisine emprenye etme suretiyle hapsedme işlemidir. Wahab ve Beltramini [9], LiAlH₄ moleküllerini in-situ yöntemiyle sentezlenen Ni içerikli mezo-gözenekli karbon (Ni-MCS) çerçevesi içerisine katalitik nano hapsedme metoduyla hapsedmek suretiyle LiAlH₄'ün dehidrojenasyon karakteristiklerini iyileştirmede ciddi ilerleme kaydettiklerini raporlamışlardır. LiAlH₄, Ni-MCS çerçeveye ve ayrıca Ni içermeyen saf mezo-gözenekli karbon çerçeveye (MCS) emprenye edildi. LiAlH₄-Ni-MCS, LiAlH₄-MCS ve/veya LiAlH₄ ile kıyaslandığında önemli ölçüde daha iyi hidrojen desorpsiyonu sergilemiştir. LiAlH₄-Ni-MCS 66 °C'de dehidrojenasyona başlayarak saf LiAlH₄'e kıyasla 84 °C daha düşük bir sıcaklıkta bunu gerçekleştirmiştir. LiAlH₄-Ni-MCS malzemesinden desorpsiyon sonucu salınan hidrojen miktarı 6.19 wt% olarak tespit edilmiştir.

2.2. Sodyum Alanat

1990'ların sonunda keşfedilen sodyum tetrahidroalüminat (NaAlH₄), 7.3 wt% hidrojen içermesi sebebiyle dikkat çeken hidrojen depolama bileşiklerinden biridir. Bununla birlikte, bu depolama kapasitesinin 1.8 wt%'lik kısmı ancak 425 °C gibi yüksek bir sıcaklığın üzerinde etkinleşiyor. Bu yüzden, pratik bir uygulama için erişilebilir kapasite 5.5 wt% civarındadır [15, 16].

NaAlH₄'ün tam dehidrojenasyonu farklı sıcaklık düzeylerinde gerçekleşen 3 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamaları ifade eden tepkimeler, bu tepkimelerin gerçekleşmesi için gereken sıcaklık değerleri ve her bir aşamada açığa çıkan hidrojen miktarı aşağıda ifade edilmiştir:





NaAlH₄'ün kristal yapısı, bozulmuş kare antiprizmatik geometri içerisinde 8 adet [AlH₄]⁻ tetrahedron ile çevrili Na atomundan oluşmaktadır [5] (Şekil 2b). Alüminyum ve hidrojen atomları arasındaki güçlü kovalent bağ nedeniyle, hidrojenin absorpsiyonu ve desorpsiyonu zorluk kazanır. Zayıf tersinirlik, yüksek desorpsiyon sıcaklığı ve düşük kinetik hız, NaAlH₄'ün çoklu döngü kabiliyetine sahip hidrojen depolama uygulamalarında kullanımını engeller [17]. Öte yandan, sodyum alanatın termodinamik özellikleri, katalizör eklenerek büyük ölçüde geliştirilebilir. Katkı malzemeleri ve uygulanma teknikleri LiAlH₄ ile benzerlik göstermektedir. Geçiş metali oksitlerinin katalizör olarak uygulanması bunlardan biridir. Khan ve Jain [15], bilyeli öğütücüde parçacık boyutu ufaltılmış TiO₂ tozunu katalizör olarak kullanarak, sodyum alanatın desorpsiyon kinetiğini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. TiO₂ desorpsiyon sıcaklıklarını düşürmede olumlu bir etki sergilemiş, ayrıca hidrojen depolama miktarının artmasını da sağlamıştır. TiO₂ katkılı NaAlH₄'ün, 250 °C sıcaklıkta 5.1 wt% hidrojeni katkısız olana göre daha hızlı desorbe ettiği gözlemlenmiştir.

Bir diğer ilave malzeme, aynı LiAlH₄ için olduğu gibi, geçiş metali halojenürleridir. Cheng ve ark. [18], NaAlH₄'ün termal kararlılığını azaltmak ve aynı zamanda dehidrojenasyon kinetiğini arttırmak için yol haritası olarak mezo-gözenekli karbon malzeme CMK-3 ile beraber niyobyum pentaflorür NbF₅'i katalizör maddeler olarak sodyum alanata ilave etmeyi seçmişlerdir. Ağırlıkça eşit miktarda NbF₅ ve CMK-3, ikisi toplamda 10 wt% olacak şekilde kompozit oluşturmak için bilyeli öğütülmüş sodyum alanata eklenmiştir, elde edilen kompozit malzeme 85 °C sıcaklıkta hidrojen salmaya başlamıştır.

NaAlH₄'ün dehidrojenasyon özelliklerini iyileştirmek amacıyla karbon malzemeler ve nano hapsedme tekniği de yine kullanılan yöntemler arasındadır. Buna göre, Fan ve ark. [19], farklı gözenek boyutlarına (4 nm, 30 nm, 60 nm, 200 nm) sahip 4 adet ayrı karbon malzemesi sentezlemiş ve NaAlH₄ nano parçacıklarını bu karbon gözeneklere hapsederek NaAlH₄ desorpsiyon sıcaklıklarını düşürmeyi amaçlamışlardır ve deneyler sonucunda gözenek boyutunun hidrojen desorpsiyon sıcaklıklarına doğrudan etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Buna göre, en iyi sonuç 30 nm'lik gözeneklere sahip karbonda görülmüştür: NaAlH₄ 100 °C sıcaklıkta deşarja başlamış ve tepe noktasını 172 °C'de görmüştür. Zheng ve ark. [16], sodyum alanat ve bazı katkı maddelerini içeren çeşitli kompozitleri iki aşamalı mekanik alaşımlama yöntemi ile oluşturmuşlardır. Toplamda 4 farklı kompozit üretmişlerdir: Ce katkılı; birkaç katmanlı grafen (FLG) içeren; Ce ve FLG'yi beraber bulunduran; ve son olarak da CeH_{2.51}'in yer aldığı kompozitler. Seryum ve FLG'yi beraber içeren kompozit tek başına Ce veya FLG içeren malzemelere göre tüm karakteristiklerde daha üstün bir performans sergilemiştir. Ce ve FLG ilaveli NaAlH₄, 85 °C'de dehidrojenasyona başlamış ve 200 °C'de 5.06 wt% kadar hidrojeni serbest bırakmıştır, ayrıca depolama kapasitesi, 8 döngü sonunda birinci döngüdeki kapasitenin %95 kadardır.

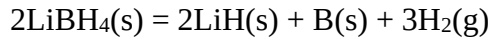
3. Borhidrürler

3.1. Lityum Borhidrür

LiBH₄, çok yüksek gravimetrik hidrojen kapasitesi nedeniyle mobil uygulamalar için bir hidrojen depolama malzemesi olarak büyük araştırma ilgisi çekmiştir. LiBH₄'ün gravimetrik ve hacimsel hidrojen depolama miktarı sırasıyla 18.5 wt.% ve 121 kg H/m³'tür [20]. LiBH₄'ün kristal yapısı Şekil 2c'de gösterilmiştir [21]. LiBH₄'ün dehidrojenasyon süreci toplamda 4 adet endotermik seviyeden ibarettir. İlk seviyede 105-112 °C sıcaklıkta yalnızca 0.1 wt% kadar az miktarda hidrojen salınımı gerçekleşir. Bu seviyede LiBH₄ faz yapısını ortorombikten altıgen yapıya dönüştürür. İkinci desorpsiyon seviyesi, lityum borhidrürün erime noktası olan 275-278 °C sıcaklıklarda 0.5-1.0 wt% gibi az miktarlarda hidrojenin serbest kalmasıyla sonuçlanır. Üçüncü seviyede en fazla hidrojenin açığa çıktığı düzeydir ve 9.0 wt% hidrojen 400 °C ile 680 °C sıcaklık aralarında ortaya çıkar. Son aşamada ise, 680 °C üzerindeki sıcaklıklarda 8.5 wt% hidrojen LiBH₄'den ayrışır. Bu yüksek sıcaklık düzeyleri yüksek kararlılığa sahip LiH'nin ayrışmasını sağlar ve son hidrojen atomlarını da serbest bırakır. Eğer pratik nedenlerden dolayı son desorpsiyon aşaması kapsam dışı



tutulup LiBH_4 'ün genel ayrışması bir denklem ile ifade edilecek olsa, süreç aşağıdaki tepkime ile gösterilebilir [21]:



Borhidrürler ile alantılar arasında uygulanan iyileştirme teknikleri bakımından benzerlik vardır. Nano hapsetme yöntemi genel olarak borhidrürler için de uygulanır. Sun ve ark. [22], LiBH_4 'ü mezo-gözenekli silika SiO_2 (SBA-15) çerçevesine hapsetmişlerdir. Düzenli gözeneklere sahip silikalar (örn. SBA-15, MCM-41, MSU-X), kimyasal kataliz çerçevesi olarak dikkat çekici malzemelerdir. SBA-15'in diğer alternatif silikalara göre sahip olduğu üstün gözenekli yapısının nano çerçeve olarak kullanılmasının LiBH_4 'ün dehidrojenasyon performansını iyileştirmesi düşünülmüştür ve gerçekten de oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. LiBH_4 /SBA-15 sistemi, 45 °C gibi düşük bir sıcaklıkta dehidrojenasyona başlamış ve 105 °C'de 10 dakika içinde sadece LiBH_4 kaynaklı olarak (silika hesaba katılmadan) 8.5 wt% kadar hidrojeni desorbe etmiştir. Burada, LiBH_4 ile SiO_2 arasında gerçekleşen tepkime ve ek olarak nano hapsetmenin gerçekleşmiş olması LiBH_4 'ün kararsızlaşmasına neden olmuştur. Bir diğer çalışmada, Guo ve ark. [23], LiBH_4 nanoparçacıklarını kimyasal emprenye yöntemiyle gözenekli TiO_2 çerçevesine dahil etmiş ve elde edilen kompozitin desorpsiyon özelliklerini test etmişlerdir. Ağırlıkça eşit miktarda lityum borhidrür ve titanyum dioksit içeren malzeme 220 °C'de dehidrojenasyona başlamış ve desorpsiyon tepe noktasına 330 °C'de ulaşmıştır. LiBH_4 / TiO_2 mükemmel desorpsiyon kinetiği sergileyerek 300 °C sıcaklık altında 3 saat içinde LiBH_4 'ten 11 wt% H_2 desorbe etmiştir. Xu ve ark. [24], gözenekli metal oksit $\text{ZnO}/\text{ZnCo}_2\text{O}_4$ (ZZCO)'nun lityum borhidrürün desorpsiyon özelliklerini iyileştirmede katalitik bir rol oynayabileceğini düşünerek, kimyasal emprenye yöntemiyle LiBH_4 'ü ZZCO nanoparçacıkları içine hapsetmek suretiyle $\text{LiBH}_4@x\text{ZZCO}$ ($x = 0.5, 1, 2$) şeklinde çeşitli mol oranlarında kompozitler sentezlemişlerdir. En çok gelişme $\text{LiBH}_4@2\text{ZZCO}$ kompozitinde görülmüştür. $\text{LiBH}_4@2\text{ZZCO}$ hidrojen deşarjına 169 °C'de başlamış ve hidrojen salınımının çoğunu 275 °C'de tamamlamıştır. Hidrojen salınımı 500 °C'nin altında 8.7 wt%'yi bulmuştur.

Desorpsiyon sıcaklığının düşürmek amacıyla geçiş metali halojenür ilavesi de katalizör olarak düşünülmüş ve denenmiştir. Kou ve ark. [25], LiBH_4 'e katalizör olarak çeşitli mol oranlarında niyobyum pentaflorür NbF_5 katılmasının absorpsiyon/desorpsiyon üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Test numuneleri $x\text{LiBH}_4\text{-NbF}_5$ ($x = 1, 5, 10, 20, 40$) oranlarında hazırlanmış, LiBH_4 ile NbF_5 bir bilyeli öğütücüde 400 rpm hızda ve argon gazı altında 1 dakika boyunca öğütülmüşlerdir. NbF_5 varlığının LiBH_4 'ün dehidrojenasyon ve tersinirlik özelliklerini önemli derecede geliştirdiği görülmüştür. $5\text{LiBH}_4\text{-NbF}_5$ karışımının 60 °C'de dehidrojenasyona başladığı ve 255 °C'ye ulaşana kadar 4 wt% H_2 desorbe edebildiği tespit edilmiştir. $20\text{LiBH}_4\text{-NbF}_5$ karışımı 400 °C'de yaklaşık 7 wt% H_2 serbest bırakmış, buna karşın saf LiBH_4 ise yaklaşık 0.7 wt% ile 10 kat daha az hidrojen desorbe etmiştir. Ayrıca, $20\text{LiBH}_4\text{-NbF}_5$ karışımı beşinci döngü sonunda hala 4.4 wt% civarında hidrojen desorbe edebilmiştir.

3.2. Sodyum Borhidrür

Borhidrürler arasında sodyum borohidrür (NaBH_4), 10.8 wt% gibi yüksek gravimetrik kapasitesi ve 113 kg/m³'lük yüksek hacimsel hidrojen yoğunluğu, düşük maliyeti, yüksek saflıkta hidrojen salımı, düşük toksisitesi ve ayrıca oksidasyona karşı dayanıklılığı nedeniyle potansiyel bir hidrojen depolama malzemesi adayı olarak ilgi görür. Bununla birlikte, 108 kJ/mol H_2 civarında olan ayrışma entalpisi, NaBH_4 'ün atmosferik basınç altında 530 °C ve üzerinde dehidre olmasına neden olur [6, 26]. Normal şartlar altında NaBH_4 'ün kararlı kristal yapısı NaCl 'nin kübik yapısına benzeyen $\alpha\text{-NaBH}_4$ 'tür (Şekil 2d).

NaBH_4 'ün dehidrojenasyon özelliklerini iyileştirmek için, katalizör ilavesi, nano hapsetme ve reaktan kararsızlaştırma dahil olmak üzere çok sayıda yöntem denenmiştir. Reaktan destabilizasyonu, hidroliz (hidrojen üretimi) elde etmek için metal amidler, metal hidroksitler veya su ekleyerek NaBH_4 'teki B-H bağının kararsız hale getirilmesini amaçlar. NaBH_4 'ün hidrolizi, ortam sıcaklıkları altında su ve NaBH_4 'ün aktif reaktivitesi nedeniyle son yıllarda geniş çapta araştırılmıştır.



Literatürde bildirildiği gibi, katalizörlerin NaBH_4 'ün hidroliz reaksiyonunda önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. Bu nedenle, hidrojen üretim hızını artırmak için çeşitli katalizör türleri araştırılmıştır. Tipik olarak sulu bir NaBH_4 sisteminde, NaBH_4 'ün sulu çözünürlüğü dikkate alındığında, hidrojen depolama kapasitesi teorik olarak tahmin edilen ağırlıkça %10.8'den ağırlıkça %7.5'e düşecektir [27]. Liu ve ark. [27], su ile NaBH_4 hidrolizi uygulaması için hidroliz hızını arttıracak bir kobalt temelli katalizör geliştirmeye karar vermişlerdir. Bunun için, IR-120 kehribar reçinesi taneciklerini Co^{2+} iyonları içeren bir çözeltiye daldırıp şelasyon tepkimesi oluşmasını sağlamışlardır ve daha sonra iyonları yakalayan reçine taneciklerini çözeltiden çıkartarak ve kurutarak katalizörü hazır hale getirmişlerdir. Daha sonra bu elde ettikleri Co-bazlı katalizörü (Co^{2+} /IR-120) 12.5 wt% olacak şekilde NaBH_4 tozu ile birlikte yüksek enerjili bilyeli öğütücüde karıştırmış, ufaltmış ve homojen bir katı kompozit haline getirmişlerdir ve nihai tozu pelet biçimine presleme yaparak getirmişlerdir. 1,14 g NaBH_4 ve 0,1425 g Co^{2+} /IR-120 katalizörü içeren pelete özel geliştirilen deney düzeneğinde 2.0 gram su şırınga yardımıyla kontrollü bir şekilde enjekte edilmiş ve hidroliz sonucu gelişen hidrojen salınımı takip edilmiştir. Sonuç olarak, NaBH_4 - Co^{2+} /IR-120 peleti 6.7 wt% kadar hidrojen depolamayı başarmıştır.

Katalizör kullanımı yaklaşımında ise, uygun malzemeler olarak, yine karbon temelli malzemeler, metal halojenürler gibi bileşikler ön plana çıkmaktadır. Yang ve ark. [6], LiBH_4 ve NaCl arasında bilyeli öğütücü içinde gerçekleşen metatez (çift yer değiştirme) tepkimesi ile elde ettikleri NaBH_4 nanoparçacıklarını, grafit, grafen oksit ve karbon nanotüpler gibi çeşitli karbon destekleyici malzemeler üzerine biriktirmişlerdir. NaBH_4 'ün grafit üzerindeki parçacık boyutu ve dağılımının grafen oksit ve CNT üzerindekiyle daha büyük ve geniş olduğu görüldü. Karbon destekler üzerinde biriken NaBH_4 'ün hidrojen deşarjı 130 °C'de başlamıştır ki bu saf NaBH_4 'e göre oldukça düşük bir sıcaklık değeridir. Açığa çıkan hidrojen miktarı bakımından grafen oksit 12.3 wt%, CNT 9.8 wt%, grafit ise 5.7 wt% gibi bir performans sergilemiştir.

Yuan ve ark. [28], farklı miktarlarda (30, 40, 50 wt%) NdF_3 içeren $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ - NaBH_4 kompozitlerini mekanik alaşımlama yöntemi ile üretmiş ve NdF_3 'ün $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ - NaBH_4 kompozit malzemesinin hidrojen depolama özellikleri üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Çalışmanın sonucu olarak, NdF_3 'ün bir katalizör olarak NaBH_4 - $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ kompozit malzemesinin hidrojen desorpsiyon kinetiğini önemli ölçüde iyileştirdiği anlaşılmıştır. Kompozitlerin hidrojen desorpsiyon başlangıç sıcaklığı yaklaşık 89 °C'dir. $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ - NaBH_4 -0.5 NdF_3 250 °C'de 5.2 wt% hidrojeni 30 dakika içinde deşarj etmiştir ve bu bağlamda dehidrojenasyon kapasitesi olarak NdF_3 'ün olmadığı $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ - NaBH_4 kompozitlerden daha üstündür.

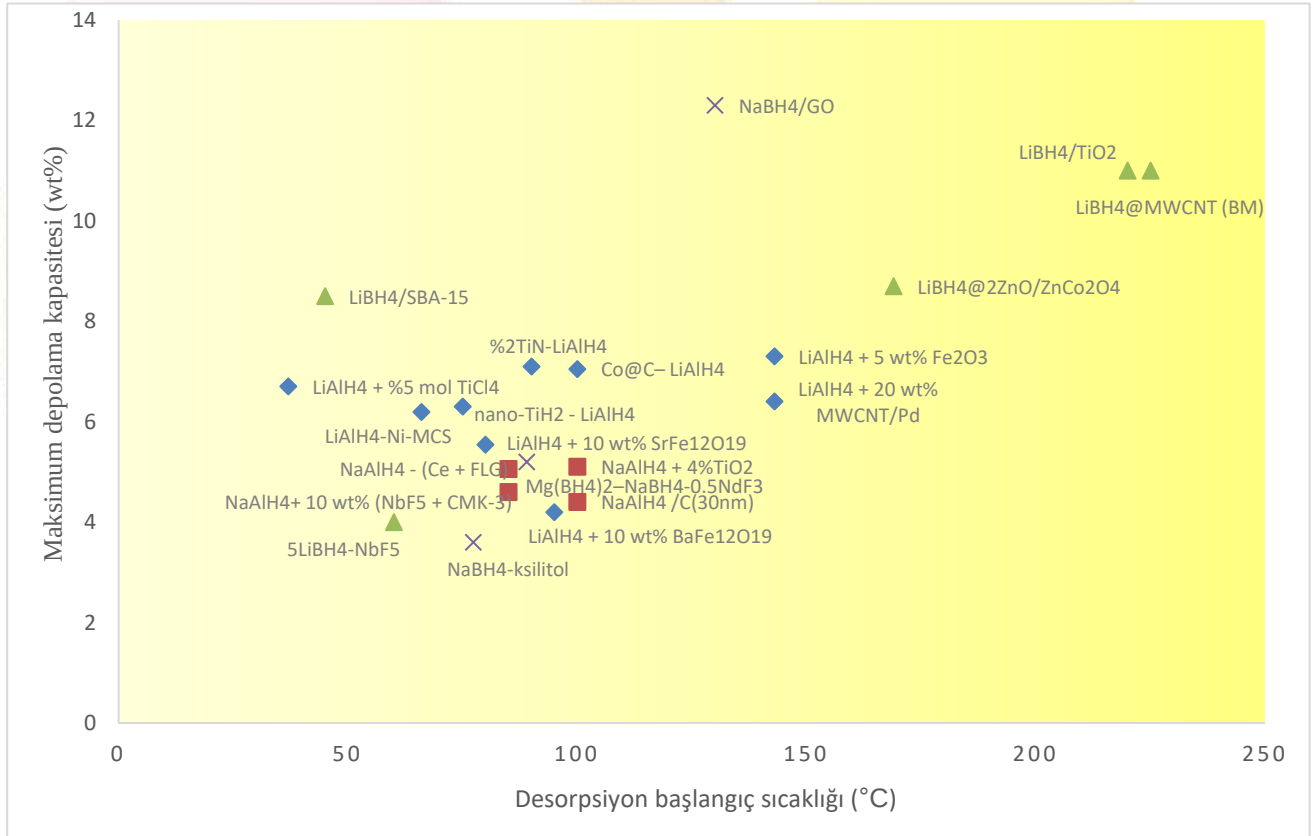
Zheng ve ark. [29], NaBH_4 'ü kararsızlaştırmak için multi-hidroksil ksilitole ($\text{C}_5\text{H}_7(\text{OH})_5$) başvurmuşlardır. $\text{C}_5\text{H}_7(\text{OH})_5$, ekonomik ve üretimi kolay karbon bazlı bir multi-hidroksil alkol çeşididir ve insan sağlığına hiçbir zararı yoktur. Diğer alkollerin aksine ksilitolün ortam şartlarında katı halde bulunması, onu basit bir manuel öğütme işlemi yardımıyla sodyum borhidrür ile birlikte katı bir çözelti oluşturmak için uygun kılmaktadır. Çalışma kapsamında NaBH_4 -ksilitol karışımı farklı molar oranlarda (1:1, 1:2, 2:1, 2:3, 5:4) hazırlanmıştır. Tüm bu katı çözeltiler içinde hem desorpsiyon başlangıç sıcaklığı hem de depolama kapasitesi olarak en optimum değerleri 1:1 molar oranına sahip NaBH_4 -ksilitol kompoziti sergilemiştir: 77.3 °C'de desorpsiyona başlamış ve 200 °C'ye kadar toplamda 3.6 wt% hidrojeni serbest bırakmıştır. 80 °C'de bile, söz konusu karışım 2 wt% kadar hidrojeni desorbe edebilmiştir. Bu karışımlardan salınan hidrojenin yüksek derecede saflığa sahip olduğu belirtilmiştir.

4. Sonuç

Kompleks hidrürler, intermetalikler gibi diğer katı hal hidrojen depolama malzemelerine göre daha üstün gravimetrik depolama kapasitesi sergileyerek mobil taşıtlarda kullanım potansiyeline sahip olmalarına karşın yüksek termodinamik kararlılıkları yüzünden, ayrılarak hidrojen açığa çıkartmaları için yüksek sıcaklıklar gerekmektedir. Kompleks hidrürlerde karşılaşılan bu sorunu farklı katalizör malzemeleri ve onları uygulama yöntemleri ile desorpsiyon sıcaklığını mobil taşıtlarda kullanım için uygun düzeye düşürerek çözmek mümkündür. Buna yönelik olarak son



senelerde gerçekleştirilen çalışmalar bu çalışmada incelenmiş olup, elde ettikleri başarıları Şekil 3'teki görselde kıyaslamaya olanak tanıyacak biçimde sunulmuştur. Buna göre, lityum alanat (LiAlH_4) için desorpsiyon başlangıç sıcaklığını düşürmede en etkili katkı maddesi, geçiş metali halojenürü (TiCl_4) olmuştur. TiCl_4 ilavesi 37°C gibi muazzam bir desorpsiyon başlangıç sıcaklığına ulaşmasının yanında, depolama kapasitesini de oldukça yukarıda tutmuştur ve en yüksek depolama göstergesi sergileyen metal oksitten (Fe_2O_3) yalnızca $0.6\text{ wt}\%$ kadar daha az hidrojen depolamıştır. Sodyum alanat (NaAlH_4) için ise desorpsiyon sıcaklığını en çok aşağıya çekmeyi başaran katalizörler arasında yine içeriğinde geçiş metali halojenürü (NbF_5) barındıran karışım ile nadir toprak elementi (Ce) ve grafen içeren kompozit malzeme yer almaktadır. İkisinin de dehidrojenasyon başlangıcı 85°C 'de başlaması ile beraber Ce içeren kompozit $0.46\text{ wt}\%$ kadar daha fazla hidrojen depolamayı başarmıştır. Beklendiği gibi, en yüksek depolama kapasiteleri genel olarak borhidrürlerde görülmüştür. En yüksek kapasiteye $12.3\text{ wt}\%$ hidrojen miktarı ile grafen oksit üzerine biriktirilen sodyum borhidrür (NaBH_4) ulaşmıştır. NaBH_4 -ksilitol karışımı NaBH_4 kümesi içinde en düşük desorpsiyon sıcaklığına erişmiş olsa da, kapasiteden de bir o kadar kaybetmiştir. Borhidrürler içinde en düşük sıcaklığa ulaşan malzeme silika çerçeve gözenekleri içine hapsedilen lityum borhidrür (LiBH_4) olmuştur. 45°C gibi oldukça düşük bir sıcaklıkta desorpsiyona başlayabilen $\text{LiBH}_4/\text{SBA-15}$, aynı zamanda oldukça tatmin edici bir depolama kapasitesi sergilemiştir.



Şekil 3: Bu çalışmada kapsamında anlatılan çalışmalardaki maksimum depolama kapasitesi ve desorpsiyon başlangıç sıcaklığı bağlamında elde edilen sonuçların kıyaslamalı gösterimi.

5. Kaynakça

- [1] Veziroğlu, T.N., "Twenty years of the hydrogen movement 1974–1994", International Journal of Hydrogen Energy, 20, 1-7, 1995.
- [2] Hassan I.A, Ramadan H.S, Saleh M.A, Hissel D., "Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 149, 111311, 2021.



- [3] Ahluwalia, R.K., Peng, J. K., Hua, T.Q., “5 - Cryo-compressed hydrogen storage”, In: Woodhead Publishing Series in Energy, Compendium of Hydrogen Energy, Woodhead Publishing, 119-145, 2016.
- [4] Züttel, A., “Materials for hydrogen storage”, *Materials Today*, 6, 24-33, 2003.
- [5] Suarez-Alcantara, K., Tena-García, J.R., Guerrero-Ortiz, R., “Alanates, a Comprehensive Review”, *Materials*, 12, 2724, 2019.
- [6] Yang, H., Lombardo, L., Luo, W., Kim, W., Züttel, A., “Hydrogen storage properties of various carbon supported NaBH_4 prepared via metathesis”, *International Journal of Hydrogen Energy*, in press, 2018.
- [7] Dragojlović, M., Milanović, I., Gradišek, A., Kurko, S., Mitrić, M., Umićević, A., Radaković, J., Batalović K., “Mechanochemical modification of LiAlH_4 with Fe_2O_3 – A combined DFT and experimental study”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 13070-13081, 2021.
- [8] Tan, C.Y., Tsai, W.T., “Catalytic and inhibitive effects of Pd and Pt decorated MWCNTs on the dehydrogenation behavior of LiAlH_4 ”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 10185-10193, 2015.
- [9] Wahab, M.A., Beltramini, J.N., “Catalytic nanoconfinement effect of in-situ synthesized Ni-containing mesoporous carbon scaffold (Ni-MCS) on the hydrogen storage properties of LiAlH_4 ”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 18280-18290, 2014.
- [10] Li, L., Wang, Y., Jiao, L., Yuan, H., “Enhanced catalytic effects of Co@C additive on dehydrogenation properties of LiAlH_4 ”, *Journal of Alloys and Compounds*, 645, s468-s471, 2015.
- [11] Liu, S.S., Li, Z.B., Jiao, C.B., Si, X.L., Yang, L.N., Zhang, J., Zhou, H.Y., Huang, F.L., Gabelica, Z., Schick, C., Sun, L.X., Xu, F., “Improved reversible hydrogen storage of LiAlH_4 by nano-sized TiH_2 ”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 2770-2777, 2013.
- [12] Sazelee, N.A., Yahya, M.S., Ali, N.A., Idris, N.H., Ismail, M., “Enhancement of dehydrogenation properties in LiAlH_4 catalysed by $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ”, *Journal of Alloys and Compounds*, 835, 155183, 2020.
- [13] Sulaiman, N.N., Ismail, M., “Catalytic effect of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ on the hydrogen storage properties of LiAlH_4 ”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 19126-19134, 2017.
- [14] Li, L., Qiu, F., Wang, Y., Xu, Y., An, C., Liu, G., Jiao, L., Yuan, H., “Enhanced hydrogen storage properties of TiN-LiAlH_4 composite”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 3695-3701, 2013.
- [15] Khan, J., Jain, I.P., “Kinetics study of sodium alanate with catalyst TiO_2 ”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 504-507, 2015.
- [16] Zheng, H.Y., Ding, Z.Q., Xie, Y.J., Li, J.F., Huang, C.K., Cai, W.T., Liu, H.Z., Guo, J., “Cerium hydride generated during ball milling and enhanced by graphene for tailoring hydrogen sorption properties of sodium alanate”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 4168-4180, 2021.
- [17] Zhao, L., Xu, F., Zhang, C., Wang, Z., Ju, H., Gao, X., Zhang, X., Sun, L., Liu, Z., “Enhanced hydrogen storage of alanates: Recent progress and future perspectives”, *Progress in Natural Science: Materials International*, 31, 165-179, 2021.
- [18] Cheng, H., Xu, L., Fan, X., Huang, X., Liu, J., Yan, K., Zhang, Y., “Synergistic effects played by CMK-3 and NbF_5 co-additives on de/re-hydrogenation performances of NaAlH_4 ”, *International Journal of Hydrogen Energy*, in press, 2018.



- [19] Fan, X., Xiao, X., Shao, J., Zhang, L., Li, S., Ge, H., Wang, Q., Chen, L., “Size effect on hydrogen storage properties of NaAlH₄ confined in uniform porous carbons”, *Nano Energy*, 2, 995-1003, 2013.
- [20] Orimo, S., Nakamori, Y., Kitahara, G., Miwa, K., Ohba, N., Towata, S., Züttel, A., “Dehydriding and rehydriding reactions of LiBH₄”, *Journal of Alloys and Compounds*, 404–406, 427–430, 2005.
- [21] Ding, Z., Li, S., Zhou, Y., Chen, Z., Yang, W., Ma, W., Shaw, L., “LiBH₄ for hydrogen storage - New perspectives”, *Nano Materials Science*, 2, 109–119, 2020.
- [22] Sun, T., Liu, J., Jia, Y., Wanga, H., Sun, D., Zhu, M., Yao, X., “Confined LiBH₄: Enabling fast hydrogen release at w100 °C”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 18920-18926, 2012.
- [23] Guo, L., Jiao, L., Li, L., Wang, Q., Liu, G., Du, H., Wu, Q., Du, J., Yang, J., Yan, C., Wang, Y., Yuan, H., “Enhanced desorption properties of LiBH₄ incorporated into mesoporous TiO₂”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 162-168, 2013.
- [24] Xu, X., Zang, L., Zhao, Y., Zhao, Y., Wang, Y., Jiao, L., “Hydrogen storage behavior of LiBH₄ improved by the confinement of hierarchical porous ZnO/ZnCo₂O₄ nanoparticles”, *Journal of Power Sources*, 359, 134-141, 2017.
- [25] Kou, H., Sang, G., Zhou, Y., Wang, X., Huang, Z., Luo, W., Chen, L., Xiao, X., Yang, G., Hu, C., “Enhanced hydrogen storage properties of LiBH₄ modified by NbF₅”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 11675-11682, 2014.
- [27] Liu, C.H., Kuo, Y.C., Chen, B.H., Hsueh, C.L., Hwang, K.J., Ku, J.R., Tsau, F., Jeng, M.S., “Synthesis of solid-state NaBH₄/Co-based catalyst composite for hydrogen storage through a high-energy ball-milling process”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 4027-4040, 2010.
- [28] Yuan, J., Chen, J., Huang, H., Lv, Y., Liu, B., Li, Z., Zhang, B., Lv, W., Wu, Y., “Enhanced hydrogen storage properties of NaBH₄–Mg(BH₄)₂ composites by NdF₃ addition”, *Progress in Natural Science: Materials International*, in press.
- [29] Zheng, J., Liu, M., Wu, F., Zhang, L., “Enabling easy and efficient hydrogen release below 80 °C from NaBH₄ with multi-hydroxyl xylitol”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 28156-28165, 2021.
- [30] Tena-García, J.R., Poiré de la Cruz, R.D., Suárez-Alcántara, K., “On the dehydrogenation of LiAlH₄ enhanced by Ti salts and cryogenic ball-milling”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 19431-19439, 2020.
- [31] Dragan, M., “Hydrogen Storage in Complex Metal Hydrides NaBH₄: Hydrolysis Reaction and Experimental Strategies”, *Catalysts*, 12, 356, 2022.

Teşekkür

Yazarlar, 121M529 numaralı sözleşme kapsamındaki mali destek için Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür eder. Yazarlardan, Gamze ATALMIŞ, 100/2000 Doktora Burs Programı için Yükseköğretim Kurulu'na (YÖK) teşekkür eder.



INTERMETALİK METAL HİDRÜRLERDE HİDROJEN DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Kurshod Sattarkhanov ¹, Gamze Atalmış ^{2*}, Yüksel Kaplan ³

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-9825-9074, kurshod.sattarkhanov@gmail.com

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-2392-7672, gamzee_umudum@hotmail.com

³ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde

ORCID ID: 0000-0002-0186-6063, ykaplan@ohu.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

İntermetalik bileşiklerin düşük sıcaklık ve basınç değerlerinde tersinir bir şekilde hidrojen sorpsiyonu gerçekleştirmeleri onları taşıtlarda ve mobil şarj ünitelerinde kullanıma yönelik aday göstermektedir fakat yine de taşıtlarda hidrojen depolama malzemesi olarak yerlerini alabilmeleri için yeterli düzeyde gravimetrik depolama kapasitesi ve uzun dönem çevrim dayanımına ihtiyaçları vardır. Bu özellikleri iyileştirmenin literatürde çeşitli yolları vardır. Bunlar arasında alaşımlama diye adlandırılan, kristal yapıda safsızlıklar ve çoklu fazlar yaratarak malzemenin özelliklerini ayarlamaya yarayan birincil içeriğe ilave element eklenmesi yöntemi en çok başvurulan yöntemlerden birisi olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, son yıllarda alaşımlama tekniği kullanılarak malzeme özelliklerinin geliştirilmesini hedeflemiş çalışmalar özetlenip, belli özelliklerin iyileştirilmesi için hangi elementlerin hangi oranlarda ve hangi alaşımlama tekniği kullanarak uygulanmasının daha etkili olduğu gösterilmiştir.

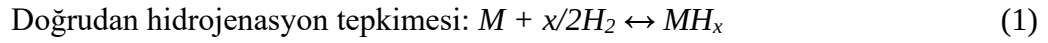
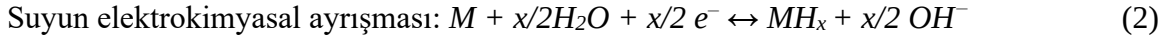
Anahtar Kelimeler: Hidrojen Depolama, Metal Hidrür, İntermetalikler, Alaşımlama

1. Giriş

Hidrojenin gravimetrik enerji yoğunluğu 120 MJ/kg ile 142 MJ/kg arasında olup, petrolün enerji yoğunluğunun yaklaşık üç katına denk gelmektedir, ancak hacimsel enerji yoğunluğu geleneksel yakıtlara göre oldukça düşüktür [1]. Hidrojen yenilenebilir, dünya üzerindeki su ve farklı hidrokarbon kaynakları sayesinde çevrede bol miktarda mevcut olan, fosil yakıtların aksine yanma sonucu atık olarak çevreye hiçbir zararlı emisyon gazı salınımı gerçekleştirmeyen temiz bir yakıt çeşididir [2]. Ayrıca, hidrojen bir enerji depolama ve taşıma aracı ve ortamı olarak da değerlendirilebilir. Hidrojenin depolanması sorunu, bu yakıt türünün diğer hidrokarbon bazlı yakıtlar ile rekabet etmesini kısıtlamaktadır. Bugüne kadar geliştirilen mevcut depolama teknolojileri arasında hidrojeni katı halde depolama güvenlik kaygıları nedeniyle daha çok rağbet görmektedir. Katı halde depolamayı mümkün kılan belirli malzemeler mevcuttur. Bazı metaller ve intermetalik adı verilen metal alaşımlar, nispeten düşük sıcaklık ve basınç koşullarında hidrojeni absorbe edebilen, metal hidrür diye adlandırılan tersine çevrilebilir katı metal-hidrojen bileşiklerini oluştururlar [3]. Hidrojen, metaller ve metal alaşımları ile kimyasal olarak etkileşime girerek metal hidrürler oluşturur. Hidrojen, 5 adımda metal/alaşımlarda depolanır: hidrojen gazı moleküllerinin fiziksel olarak soğutulması (fizisorpsiyon); hidrojen moleküllerinin kimyasal emilimi (kemisorpsiyon) ve atomlara ayrışması; hidrojen atomlarının yüzey penetrasyonu; hidrojen atomlarının hidrür oluşturan metale nüfuz etmesi ve yayılması (difüzyon); ve metal kafesin ara yüzeylerine hidrojen atomlarının çekilmesiyle gerçekleşen hidrür oluşumu. Metalin tümüyle hidrüre



dönüşmesi durumunda hidrür oluşumu (hidrojenasyon) sonlanır ve difüzyon artık metal hidrür üzerinden devam eder [4]. Söz konusu kimyasal absorpsiyon, metal kafesin orijinal hacminin yaklaşık %20-30'una kadar genişlemesine neden olabilir [5]. Hidrür oluşumu ya hidrojenin metal ile doğrudan kemisorpsiyon tepkimesine girmesi sonucu ya da su molekülünün elektrokimyasal olarak ayrışması ile gerçekleşir [6]. İki reaksiyonun da işleyiş mekanizması aşağıda gösterilmiştir [7]:



Burada, M metali veya alaşımı ifade ediyor.

Metal hidrürlerde, hidrojen, sıkıştırma ve/veya sıvılaştırma gibi onu mekanik olarak depolayan yöntemlere kıyasla daha yüksek hacimsel yoğunlukta depolanabilir [8]. Hidrojeni metal hidrürlerde katı halde depolamak, eğer absorpsiyon ve desorpsiyon basınçları arasında kabul edilebilir bir fark var ise, yüksek enerji verimliliği gibi bir avantaja sahiptir, çünkü metal hidrür temelli sistemler çalışma prensipleri sebebiyle sadece ısıl yönetimde kullanılan soğutma teçhizatı için enerji harcarlar. Ek olarak, katı formda depolama genellikle patlama riskini önlediği için, yüksek basınçlı veya kriyojenik bir tanktan daha güvenlidir. Metal hidrürlerde gerçekleşen desorpsiyon yani hidrojen salınımı işlemi endotermiktir ve dolayısıyla dışarıdan metal hidrüre ısı verilerek sıcaklık artışı yaratılıp ve/veya bulunduğu haznenin basıncı düşürülerek tetiklenebilir. Bu yüzden, hidrojen desorpsiyonu için gereken entalpi, ihtiyaç olduğu zaman PEM yakıt hücresinin atık ısısından elde edilebilir ve metal hidrür temelli hidrojen depolama sistemleri yine kendi çalışma şartlarına yakın şartlarda çalışan PEM yakıt hücreleri ile birlikte araç üzerinde kullanılabilir [9].

Metal hidrür oluşturan ana alaşımlar intermetalik bileşiklerdir (AB_5 , AB_2 , AB_3 ve AB tipi). İntermetalikler genellikle A_mB_n şeklinde ifade edilir, buradaki A nispeten kararlı bir hidrür oluşturan bir elementtir, B ise hidrür oluşturmeyen bir elementtir. $LaNi_5$, $FeTi$ gibi yaygın bilinen ve üzerlerine birçok araştırma yapılan intermetalikler düşük gravimetrik depolama kapasitesine sahip oldukları için mobil uygulamalardan ziyade daha çok hidrojen kompresörleri gibi sabit uygulamalar için kullanılmaları daha etkin olur. Ayrıca, literatürde yer alan çalışmalarda vanadyum ve magnezyum bazlı alaşımlara da oldukça yaygın rastlanmaktadır [10]. Metal hidrürlerin ve genel olarak hidrürlerin sınıflandırması Şekil 1'de gösterilmiştir. İntermetalik metal hidrürlerde, hidrojen metal kristal kafesinin boş ara yüzlerini işgal eder. Hidrür genellikle metalik karakterde kalır. İntermetalikler, hidrojen depolama uygulamaları için geniş çapta incelenmiştir çünkü pek çoğu, makul sıcaklık ve hidrojen basıncı koşulları altında hidrojeni emer ve desorbe eder. Kompleks hidrürler yüksek kapasiteye sahip olmalarına karşın düşük tersinirlik sorunundan muzdarip oldukları için çoklu ve uzun süreli kullanım için uygun değildirler. Tüm hidrürler arasında, LiH , MgH_2 gibi hafif hidrürler ve kompleks hidrürler, 7–18.5 wt% gibi yüksek gravimetrik kapasitelere ulaşabilmektedirler [11]. Hafif element temelli ve kompleks hidrürler oldukça yüksek hidrojen kapasitesine sahip olmalarına karşın iki ciddi sorun barındırmaktadırlar. Birincisi, bu bileşiklerdeki güçlü kovalent/iyonik bağ kaynaklı ortaya çıkan yüksek kararlılık ve bu yüksek kararlılığın neden olduğu yüksek çalışma sıcaklığı (200 °C üzeri) [12].

Birçok avantaj sunmalarına rağmen, çoğu metal hidrürler düşük gravimetrik hidrojen depolama yoğunluğuna sahip oldukları için mobil araçlar üzerinde hidrojen depolama için kullanıldıklarında toplam sistem için fazladan ağırlık oluşturma gibi bir dezavantaja sahiptirler [13]. Metal hidrürlerde yüksek desorpsiyon sıcaklığı, yavaş reaksiyon kinetiği ve düşük tersinirlik gibi iyileştirilme ihtiyacı duyan bir dizi özellik vardır. Bahsi geçen özelliklerde daha iyi göstergelere sahip metal hidrürleri geliştirmek ve üretmek için yoğun çalışmalar yapılmaktadır [14]. İdeal bir hidrojen depolama malzemesi şu gereksinimleri sağlamalıdır: birim kütle ve birim hacim başına yüksek hidrojen kapasitesi, düşük hidrojenasyon/dehidrojenasyon sıcaklığı, düşük veya orta hidrojenasyon/dehidrojenasyon basıncı, hidrojen desorpsiyonu için gerekli enerjiyi en aza indirmek için düşük oluşum ısısı, tam tersinirlik, hidrojenin şarj ve deşarjı sırasında sınırlı enerji kaybı, hızlı tepkime kinetiği, uzun çevrim ömrü için oksijene ve neme karşı yüksek dayanıklılık, döngüsellik ve yüksek güvenlik [15]. Hidrojeni yakıt olarak kullanan araçların yaygınlaşması ve kullanıcıların bu



tür araçları tercih etmesi için bu araçlarda kullanılacak olan depolama malzemesinin maliyetinin de uygun olması gerekir. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı, 2025 yılına kadar ve nihai olarak geliştirilmesi hedeflenen, taşıtlarda kullanılacak olan hidrojen depolama sistemlerinin sahip olması gereken teknik özellikleri ve standartları açıklamıştır, buna göre örnek sistem Tablo 1’de gösterilen gereksinimleri karşılamalıdır.

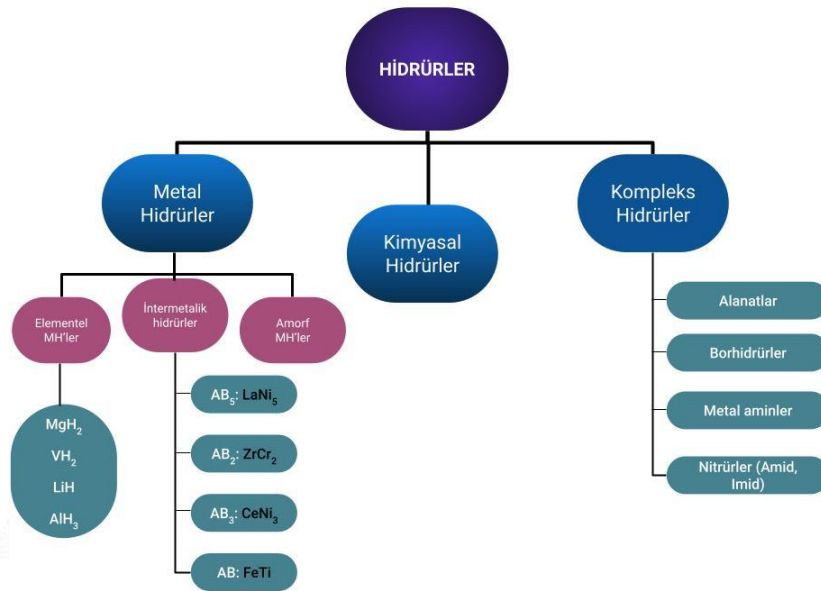
Tablo 1. ABD Enerji Bakanlığının taşıtlarda kullanılacak hidrojen depolama sistemleri için belirlediği teknik hedefler [16].

Teknik Özellik	Birim	2025 Hedefi	Nihai Hedef
Gravimetrik hidrojen kapasitesi (sistem birim ağırlığı başına)	wt %	5.5	6.5
Volümetrik hidrojen kapasitesi (sistem birim hacmi başına)	kg H ₂ /L	0.040	0.050
Gravimetrik enerji yoğunluğu (sistem birim ağırlığı başına)	kWh/kg	1.8	2.2
Volümetrik enerji yoğunluğu (sistem birim hacmi başına)	kWh/L	1.3	1.7
Çalışma sıcaklığı aralığı	°C	(-40) – 85	(-40) – 85
Çalışma basıncı aralığı	bar	5-12	5-12
Döngüsel ömür (şarj/deşarj)	döngü	1500	1500
Ekonomik maliyet (Depolanan hidrojenin birim ağırlığı başına)	1. \$/kg H ₂	300	266

Hidrojen depolama malzemelerinin termodinamik ve kinetik özelliklerinde optimizasyon amaçlı değişiklikler uygulamayı mümkün kılan bir dizi yöntem araştırılmış ve geliştirilmiştir. Bunlar arasında stokiometrik olmayan bileşikler oluşturma (alaşımlama), nanoyapılı malzemelerin sentezi ve metal oksit gibi katalizör görevi görecektir olan katkı maddelerinin kullanılması en çok başvurulan yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Metal hidrür malzeme ile birlikte katalizör kullanımı, aktivasyon eşiğini düşürmede ve/veya hidrojen absorpsiyon/desorpsiyon hızını arttırmada yardımcı olabilmektedir [17]. Tüm hidrojen depolama özelliklerini belirleyen kristal yapıda değişikliklere yol açan alaşımlama yöntemi ile nominal bileşimin değiştirilmesi, malzemenin depolama özelliklerini isteğe göre modifiye etmeyi sağlamaktadır. Örneğin, intermetalik malzemenin mevcut elementlerinin atomik yarıçapından daha büyük bir atomik yarıçapa sahip bir elementin alaşıma dahil edilmesi, kristal kafesin genişlemesine ve bunun bir sonucu olarak depolama kapasitesinin artmasına ve plato basıncının düşmesine neden olur. Alaşımlama ile depolama kapasitesi dışında diğer özellikler de düzenlenebilir. Kristal yapıdaki arayüz bölgelerindeki boşluğun boyutunun değişimine bağlı olarak sorpsiyon entalpisi ayarlanabilir ve hidrür oluşum sıcaklıkları düşürülebilir [18].

Bu çalışmada, son yıllarda örnek ve bilindik intermetalik malzemelerin depolama kapasitesi, uzun dönem performansı, şarj süresi, sorpsiyon sıcaklıkları gibi özelliklerini alaşımlama yöntemini kullanarak iyileştirmeyi hedefleyen çalışmalar derlenmiş ve özetlenmiş, elde ettikleri sonuçlar sıralanmıştır.

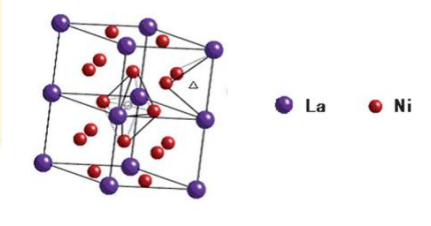




Şekil 1: Hidrürlerin sınıflandırılması ve çeşitleri [19].

2. AB₅ Alaşımlar

Nadir toprak elementi AB₅ tipi alaşımlar, hidrojen depolama, hidrojen sıkıştırma, Ni/MH piller vb. gibi birçok alanda geniş bir uygulama beklentisine sahiptir. En temel AB₅ tipi alaşım, LaNi₅ ikili alaşımıdır. Nispeten zayıf hidrojen depolama özelliklerine ve çevrim performansına sahip olmalarına karşın, aktive edilmeleri daha kolaydır. AB₅ alaşımları genellikle CaCu₅ kristal yapısına sahiptir.



Şekil 2: LaNi₅'in CaCu₅ tipi kristal yapısı [20].

Chen ve ark. [21] yaptıkları çalışmada, LaNi₅ malzemesinde Ni yerine kısmi olarak Mn yerleştirilmesinin nihai LaNi_{5-x}Mn_x (x = 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1) alaşımların yapısı ve uzun dönem hidrojen depolama performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Manganez atomunun nikelere göre daha büyük olması, Mn katkılı alaşımlarda kristal kafes arayüzlerinin genişlemesine neden olmuştur. Ayrıca, nikelin Mn ile kısmi olarak değiştirilmesinin, alaşımların kristal yapısını hidrojen şarj/deşarjına karşı stabilize ettiği ve böylece uzun dönemde depolama kapasitesinde gerçekleşen kayıpları azalttığı anlaşılmıştır. Buna göre, alaşımların 1000 şarj/deşarj döngüsü sonunda baştaki depolama kapasitelerini muhafaza etme oranları alaşım içeriğinde Mn miktarı arttıkça artış göstermiştir: hiç Mn bulunmayan alaşımda bu oran %83.2 iken, x sayısı 0.75 olan alaşımda bu oran %94.0'e çıkmıştır. Burada istisna x sayısının 1'e eşit olduğu durumdur (LaNi₄Mn) çünkü düşük plato basıncından dolayı tersinirlik azalması kapasitede de hafif bir düşüşü beraberinde getirir.

Zhu ve ark. [22] ise, birincil alaşım olarak LaNi₅ yerine LaNi₄Co üzerinde çalışma yapmayı seçmişler ve bu alaşımda lantanyumu kısmi olarak ayrı ayrı olmak üzere Ce ve Y elementleri ile değiştirip toplamda 4 adet alaşım elde etmişlerdir: La_{5-x}Ce_xNi₄Co (x = 0.4, 0.5) ve La_{5-y}Y_yNi₄Co (y = 0.1, 0.2); ve bu alaşımlarının mikroyapısını ve uzun vadede hidrojen absorpsiyon/desorpsiyon özelliklerini incelemişlerdir. Tüm alaşımların altıgen CaCu₅-tipi tek faz yapıda oldukları görülmüştür. Ce ve/veya Y'nin eklenmesinin söz konusu alaşımların tozlaşma direncini ve yapısal stabilitesini arttırdığını tespit etmişlerdir. Tüm elde edilen alaşımlarda hücre hacimleri azalmış ve



dolayısıyla plato basınçları artmıştır. Hidrojen depolama kapasitesine olan etkileri bakımından Ce ve Y birbirine ters etkiler göstermektedirler: Ce içeren alaşımlarda kapasitenin arttığı gözlenirken, Y içeren alaşımlarda azalma görülmüştür. Uzun vadeli depolama bakımından $\text{La}_{4.5}\text{Ce}_{0.5}\text{Ni}_4\text{Co}$ alaşımı, diğer 3 alaşıma göre oldukça üstün bir performans göstermiştir: diğer 3 alaşım 1000 döngünün sonunda baştaki kapasitelerinin %67-77'si kadar hidrojen depolayabilir iken, $\text{La}_{4.5}\text{Ce}_{0.5}\text{Ni}_4\text{Co}$ için bu gösterge %96 civarına ulaşmıştır.

Bu çalışmada [23], Sn elementinin LaNi_5 malzemesinde kısmi olarak Ni yerine geçmesinin $\text{LaNi}_{5-x}\text{Sn}_x$ ($x = 0, 0.25, 0.50, 0.75$ ve 1) alaşımlarının yapısal değişimine ve döngüsel performansı üzerine olan etkileri detaylıca araştırılmıştır. Ni yerine Sn yerleştirilmesinin farklı hücre parametrelerine sahip çoklu CaCu_5 faz yapısının oluşumuna neden olduğu ve bu çoklu yapının döngüsel kararlılığı artırabileceğini ve histerezisi azaltabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, bu işlemin mikro gerilimi azaltmada ve kristal yapıyı stabilize etmede yarar sağladığını dile getirmişlerdir. 1000 döngü sonunda yapılan ölçümlerde alaşımların baştaki depolama kapasitelerini koruma oranının alaşım içeriğindeki Sn oranı arttıkça ciddi ölçüde arttığı gözlemlenmiştir: Hiç Sn bulunmayan alaşımda bu oran %83.2 iken, $\text{LaNi}_{4.25}\text{Sn}_{0.75}$ alaşımı için %95.8'e çıkmıştır.

Liu ve ark. [24], nikel yerine kısmi olarak alüminyumun yerleştirilmesi ile elde edilen $\text{LaNi}_{5-x}\text{Al}_x$ ($x = 0, 0.25, 0.5$) alaşımlarının uzun dönem döngüsel performansını takip etmişlerdir. Alüminyumun varlığı, alaşımların yüksek döngü sayılarında bile etkili bir şekilde birincil depolama kapasitelerini korumalarını mümkün kılmıştır. Buna göre, $\text{LaNi}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$ alaşımı 1000 döngü sonunda baştaki kapasitesinin %98.2'sine erişmiştir, diğer taraftan, saf LaNi_5 için bu oran %89.2'de kalmıştır.

Oldukça benzer bir çalışmaya bu kez Zhu ve ark. [25] imza atmıştır, fakat bu sefer kısmi yer değiştirme için alüminyum değil de Co kullanmışlardır. Ürettikleri $\text{LaNi}_{5-x}\text{Co}_x$ ($x = 0, 0.25, 0.50$ ve 0.75) alaşımlarının uzun vadeli döngüsel ve kinetik özelliklerini incelemişlerdir. Alaşımların 5 dakika içerisinde hidrojeni tamamen absorbe edebiliyor oluşu birincil LaNi_5 'in kinetik özelliklerinin bileşiğe Co dahil edilmesinden sonra önemli ölçüde geliştirildiğini göstermektedir. Absorpsiyon hızını kobaltın alaşıma eklenmesi dışında bir de gerçekleşen döngü sayısı da arttırmaktadır. Diğer taraftan, döngüsel performans bakımından da alaşım formülüne kobaltın dahil edilmesi olumlu sonuçlar vermiştir. Buna göre, 10 bar basınç ve 343 K sıcaklık altında gerçekleşen 1000 döngü sonunda LaNi_5 birincil depolama kapasitesinin %83'ünü korurken, $\text{LaNi}_{4.25}\text{Co}_{0.75}$ alaşımı için bu oran %88.7'ye çıkmış bulunmaktadır.

Pęska ve ark. [26], depolama özelliklerini geliştirme amacıyla birincil LaNi_5 bileşiğinde nikeli değil de onun yerine lantanyumu kısmi olarak değiştirmeyi ve stokiyometrik alaşımdan çıkarılan La kadar seryum eklemeyi tercih etmişlerdir. Depolama özellikleri dışında nihai $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Ni}_5$ ($x = 0, 0.09, 0.25$ ve 0.5) alaşımlarının yapılarında meydana gelen değişiklikler ile de ilgilenmişlerdir. LaNi_5 alaşımına Ce eklenmesinin metal kafeste büzümeye neden olduğunu ve dolayısıyla denge basınçlarını arttırdığını tespit etmişlerdir. 40 °C sıcaklık altında LaNi_5 için absorpsiyon ve desorpsiyon denge basınçları sırasıyla 4.09 ve 2.91 bar iken, $\text{La}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}\text{Ni}_5$ için bu değerler sırasıyla 48.74 ve 14.26 bar olarak ölçülmüştür. Alaşım içeriğinde Ce miktarı arttıkça hidrürün daha kararsız hale gelmesi nedeniyle hidrür oluşum entalpisinde bir azalma gözlemlenir.

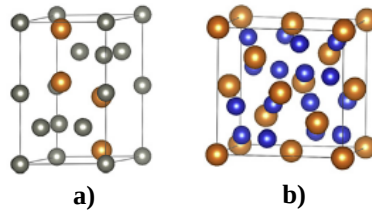
3. AB₂ Alaşımlar

AB₂ bileşiğinde A elementi hidrür oluşturan bir element iken, B ise onun aksine gibi hidrür oluşturmeyen elementlerdendir. A elementi genelde grup 4 metalleri (Ti, Zr ve Hf) veya lantanoidler (La, Ce ve Pr) tarafından oluşmaktayken, B ise V, Cr ve Fe gibi geçiş metallerinden oluşmaktadır. AB₂ alaşımları, altıgen C14 veya kübik C15 yapıları Laves fazında kristalleşirler (Şekil 3).

ZrFe₂, en çok bilinen AB₂ alaşımıdır. Son derece yüksek hidrojen basıncı altında hidrojen ile tersinir şekilde reaksiyona girer. ZrFe₂, yüksek hidrojen depolama kapasitesi ve kolay aktivasyon avantajları sunar, ancak absorpsiyon/desorpsiyon basıncı pratik uygulama için çok yüksektir. ZrFe₂ yüksek basınçlı hidrojen depolama ve kompresör uygulamaları için uygundur. C15 Laves faz



yapısına sahip $ZrFe_2$, oda sıcaklığında sırasıyla 690 atm ve 325 atm absorpsiyon ve desorpsiyon basınçları ve 1.7 wt% hidrojen depolama kapasitesi sergiler [27].



Şekil 3: a) C14 Laves fazı, b) C15 Laves fazı [28].

Qin ve ark. [29], birincil $ZrFe_2$ intermetalik bileşiğine Al ve Ga alaşımlamış ve metal söndürme işlemi uygulayarak tek C15 Laves faz yapısına sahip $ZrFe_{2-x}Al_x$ ve $ZrFe_{2-x}Ga_x$ ($x = 0.1, 0.2$) alaşımlarını üretmişlerdir. İlave elementlerin (Ga ve Al) $ZrFe_2$ 'nin içeriğinde var olmasının $ZrFe_2$ 'nin mikro yapısı ve hidrojen depolama özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yazarlar, metal söndürme işlemi uygulanmamış olan alaşımlarda ikinci faz olarak Zr_2Fe 'nin oluşmasının kapasite düşüşünden sorumlu olduğunu tespit etmiş, buna dayalı olarak da tek fazlı yapıda üretilen alaşımların yüksek depolama kapasitelerini koruyacaklarını öngörmüşlerdir. Söndürme uygulanmış $ZrFe_{1.9}Al_{0.1}$ alaşımı 1.79 wt% maksimum hidrojen depolama kapasitesine ulaşmıştır, $ZrFe_{1.9}Ga_{0.1}$ için bu miktar 1.64 wt% olmuştur. $ZrFe_{2-x}Ga_x$ alaşımlarının, $ZrFe_{2-x}Al_x$ alaşımlarından nispeten daha yüksek bir denge basıncına sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, $ZrFe_{1.9}Ga_{0.1}$ ve $ZrFe_{1.9}Al_{0.1}$ alaşımlarının desorpsiyon basınçlarının 298 K sıcaklıkta sırasıyla 166 bar ve 132 bar olduğu bulunmuştur.

Banerjee ve ark. [30], benzer bir çalışmada bulunmuş ve saf $ZrFe_2$ bileşiğine Fe yerine kısmi olarak vanadyumun dahil edilmesinin hidrojen depolama kapasitesini iyileştirilmesini amaçlamışlardır. $ZrFe_{2-x}V_x$ ($x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) alaşımların yapısını ve farklı sıcaklıklardaki hidrojen şarj/deşarj özelliklerini incelemişlerdir. $ZrFe_2$ aslen C15 kübik faz yapısına sahip olmasına rağmen, yapıda belirli miktarda V bulunması C14 altıgen fazının baskın olmasına sebep olmuştur. Vanadyum miktarının artmasıyla metal kafesin C15 yapısından C14 yapısına doğru dönüştüğü bulunmuştur. Yapılan testler, birincil alaşıma Fe yerine kısmi olarak V ilave edilmesinin hidrojen depolama kapasitesinde artışa sebep olduğunu ortaya koymaktadır. Buna göre, $ZrFe_{1.4}V_{0.6}$ ve $ZrFe_{1.2}V_{0.8}$ alaşımları sırasıyla 1.77 wt% ve 1.85 wt% civarında hidrojen depolama kapasitesi sergilemişlerdir.

Koultoukis ve ark. [31], aynı Banerjee ve ark.'nın çalışmasında olduğu gibi $ZrFe_2$ 'de Fe yerine kısmi olarak V yerleştirmişlerdir ve ayrıca aynı işlemi Cr kullanarak da yapmışlardır. $ZrFe_{1.8}V_{0.2}$ ve $ZrFe_{1.8}Cr_{0.2}$ olmak üzere iki adet alaşımı argon gazı altında yüksek frekanslı indüksiyon-levitasyon ergitme fırını yardımı ile sentezlemişlerdir ve farklı sıcaklıklardaki (20, 60 ve 90 °C) hidrojen depolama karakteristikleri ile mikroyapılarını incelemişlerdir. Her iki bileşiğin de kübik C15 Laves fazında kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. İki alaşımda da birincil $ZrFe_2$ alaşımına kıyasla daha düşük plato basınçları gözlemlenmiştir. $ZrFe_{1.8}V_{0.2}$ 145 bar basınç ve 20 °C sıcaklıkta 1.42 wt% hidrojen depolama kapasitesine ulaşmışken, $ZrFe_{1.8}Cr_{0.2}$ 193 bar basınç ve 20 °C sıcaklıkta 1.33 wt% depolama kapasitesi sergilemiştir. Cr içeren alaşımda ciddi bir histerezis saptanırken, V içeren de ise neredeyse hiç histerezis gerçekleşmemiştir.

Benzer bir araştırmada, Jaina ve ark. [32], argon atmosferinde ark eritme yöntemi ile oluşturulan $ZrFe_{2-x}Ni_x$ ($x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) alaşımlarında Fe yerine Ni ilave edilmesinin nihai alaşımların farklı sıcaklıklardaki (303 K, 323 K, 343 K, 373 K) absorpsiyon ve yapısal özelliklerinde nasıl değişikliklere yol açacağını incelemişlerdir. Üretilen alaşımların kübik C15 Laves faz yapısına sahip oldukları ve birim hücre hacimlerinin nikel miktarı arttıkça azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi, nikelin demire göre daha küçük atomik yarıçapa sahip olmasıdır. Küçülen birim hücre hacmi plato basıncının artmasına sebep olmuştur. Diğer taraftan, azalan birim hücre hacmi depolama kapasitesinin de azalmasına sebep olmuştur. Buna göre, Ni içeriği artan alaşımlarda kapasitede düşüş gözlemlenmiştir. $ZrFe_{1.8}Ni_{0.2}$ alaşımı 50 bar basınç ve 303 K sıcaklıkta 1.57 wt%,



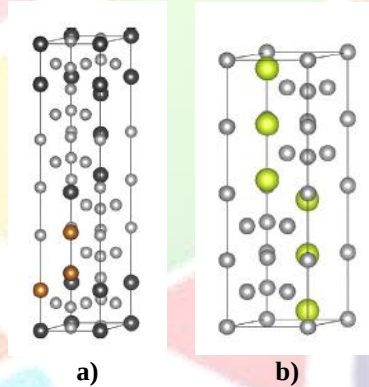
düzeyinde hidrojen depolamışken aynı şartlarda $ZrFe_{1.2}Ni_{0.8}$ 'in sergilediği depolama kapasitesi 1.44 wt% olmuştur. Ni varlığı, daha az kararlı hidrürlerin oluşumuna neden olmuştur.

Qin ve ark. [33], $ZrFe_2$ 'de bu sefer demiri değil de zirkonyumu kısmi olarak değiştirmeye karar vermişlerdir ve onun yerini alacak element olarak itriyumu seçmişlerdir. 5 gün boyunca 1200 °C sıcaklıkta tavlama işlemi uyguladıkları $Zr_{1-x}Y_xFe_2$ ($x = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4$) alaşımların mikroyapısını ve hidrojen depolama özelliklerini araştırmışlardır. Tavlama işleminin sonucu olarak tüm alaşımlarda tek bir C15 Laves faz yapısı elde etmişlerdir. İçerikteki Y miktarı arttıkça hücre hacminin de arttığı ve bundan kaynaklı olarak denge basıncının azaldığı görülmüştür. Alaşımlarda Y miktarı arttıkça hidrojen depolama kapasitelerinde de artış gözlemlenmiştir. $Zr_{0.6}Y_{0.4}Fe_2$, 243 K ve 19 bar basınçta 1.77 wt% ile araştırılan bileşikler içerisinde en yüksek hidrojen absorpsiyon kapasitesini sergileyen alaşım olmuştur.

4. AB₃ Alaşımlar

Son yıllarda en çok incelenen AB₃ alaşımları, A olarak bir nadir toprak elementi, B olarak da Ni bulunduran alaşımlar olmuştur. Bunlar arasında en çok $LaNi_3$ ve $GdNi_3$ öne çıkmıştır. AB₃ alaşımları, ortak elektrolizörlere ve yakıt hücrelerine bağlanmak için gereken uygun sıcaklık ve basınç koşullarını sağlamaktadırlar. AB₃ alaşımlarının önemli bir avantajı, şu anda mevcut olan AB₅ alaşımlarının (kolay aktivasyon) ve AB₂ alaşımlarının (yüksek hidrojen depolama kapasitesi ve daha düşük maliyet) en iyi özelliklerini bir araya getirmeleridir.

AB₃ bileşiklerinin çoğu $PuNi_3$ yapısına sahiptir (Şekil 4a), ancak bazıları $CeNi_3$ yapısına (Şekil 4b) sahiptir. AB₃ alaşımları normalde çok fazlıdır. $CaCu_5$ tipi (örn. $LaNi_5$), $MgNi_2$ tipi (örn. $LaNi_2$) ve Ce_2Ni_7 tipi (örn. La_2Ni_7) fazlar yaygın olarak görülen safsızlıklardır.



Şekil 4: a) $PuNi_3$ yapısı, b) $CeNi_3$ yapısı. [34]

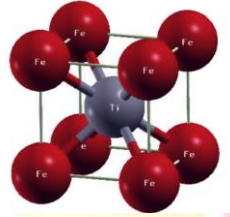
Iwase ve ark. [35], $PrNi_3$ 'te Pr yerine kısmi olarak Mg yerleştirilmesinin hidrojen depolama üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. $PrNi_3$ 'ün maksimum hidrojen depolama kapasitesi 261 K sıcaklıkta gerçekleşen ilk absorpsiyonda 1.79 wt% olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, ilk tam desorpsiyondan sonra absorbe edilen hidrojenin yalnızca %32'si salınabilmiştir ve bu da $PrNi_3$ 'ün tersinir hidrojen kapasitesini 0.58 wt% kılmaktadır. $Pr_{0.68}Mg_{0.32}Ni_{3.04}$ ise birincil alaşıma göre daha düşük maksimum hidrojen kapasitesi (1.53 wt%) sergilemesine rağmen, $PrNi_3$ 'ten farklı olarak tüm absorbe ettiği hidrojeni serbest bırakabilmiştir, ve ayrıca bunu ortam sıcaklığında (30 °C) yapmıştır.

Yine Iwase ve ark. [36] bir başka çalışmada, bu kez farklı bir AB₃ intermetaliti üzerine araştırma yapmış ve $GdNi_3$ 'te Ni yerine kısmi olarak alaşıma Co dahil edilmesinin nihai $GdNi_{3-x}Co_x$ 'ün ($x = 0, 0.2, 1.0$) bileşiklerinin hidrojenasyon özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. $GdNi_3$ 'ün maksimum hidrojen depolama kapasitesi 1.15 wt% olarak ölçülmüşken, tersinir hidrojen depolama kapasitesi azami kapasitenin yalnızca %40'ını oluşturarak 0.46 wt% olmuştur. Tersinir hidrojen depolama kapasitesi $GdNi_{2.0}Co_{1.0}$ alaşımında ise birincil $GdNi_3$ 'e kıyasla artmıştır ve 1.1 wt% olmuştur. Uzun dönem döngüsel performans bakımından da içeriğinde en çok Co barındıran alaşım daha iyi göstergelere sahip olmuştur. 100 döngü sonunda $GdNi_3$ ve $GdNi_{2.0}Co_{1.0}$ için başlangıç kapasitelerini koruma oranları sırasıyla %75 ve %92 olarak tespit edilmiştir.



5. AB Alaşımlar

Bilinen en eski hidrojen depolama malzemelerinden biri olan titanyum-demir (TiFe), teorik olarak 1.8 wt%'e kadar hidrojen depolayabilir [37]. Ortam şartlarına yakın koşullarda sorpsiyon özelliği ve içeriğini oluşturan maddelerin dünyadaki bolluğu nedeniyle diğer hidrojen depolama malzemelerine göre tercih edilir. Ancak FeTi, oksidasyona oldukça yatkındır. Yüzeyinde oluşan oksit katman, hidrojen moleküllerinin ayrışmasını ve H atomlarının adsorpsiyonunu engeller. TiFe kristali CsCl-tipi kübik yapıya sahiptir (Şekil 5).



Şekil 5: TiFe'nin kübik yapısı [38].

Yang ve ark. [39], TiFe bileşiğine Cr, Mn ve Y elementlerini $\text{TiFe}_{0.9}\text{Cr}_{0.1}$, $\text{TiFe}_{0.9}\text{Cr}_{0.1}\text{Y}_{0.05}$, $\text{TiFe}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}$ ve $\text{TiFe}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Y}_{0.05}$ olmak üzere 4 adet farklı alaşım olacak şekilde ark eritme yöntemi ile dahil etmişlerdir ve elde edilen alaşımların mikroyapısını, hidrojenasyon kinetiği ve termodinamiğini ayrıntılı olarak araştırmışlardır. Tüm alaşımlar 30 bar basınç ve 3 farklı sıcaklık değeri (10, 30 ve 50 °C) altında absorpsiyona maruz bırakılarak hidrojen depolama miktarları ve hızları ölçüldü. Buna göre, en çok hidrojen depolayan alaşım 10 °C sıcaklıkta 1.55 wt% ile $\text{TiFe}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Y}_{0.05}$ olurken, 50 ° sıcaklıkta 1 dakika içerisinde azami depolama kapasitesinin %92.9'una ulaşan $\text{TiFe}_{0.9}\text{Cr}_{0.1}\text{Y}_{0.05}$ alaşımı ise en hızlı absorbe olma özelliği gösteren alaşım oldu.

Leng ve ark. [40], $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_x$ ($x = 0, 0.05, 0.10, 0.15$) ve $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2-y}\text{Co}_y$ ($y = 0.05, 0.10$) alaşımlarının mikro yapılarını ve hidrojenasyon özelliklerini incelemişlerdir. $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_x$ alaşımlarındaki Co içeriğinin artmasıyla birlikte $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.05}$ ve $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.10}$ alaşımlarının maksimum hidrojen depolama kapasiteleri azalmış, ancak etkin hidrojen kapasiteleri artmıştır. 298 K sıcaklık ve 40 bar basınç altında $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}$ azami olarak 1.752 wt% hidrojen depolarken, $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.05}$, $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.10}$ ve $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.15}$ için bu miktar Co içermeyen alaşıma göre sırasıyla 4%, 13% ve 26% oranında azalma göstermiştir. Etkin hidrojen depolama kapasitesi ise Co içermeyen alaşım için 1.205 wt% iken, içerikteki Co artış sırasına göre diğer alaşımlar için sırasıyla 1.289 wt%, 1.252 wt% ve 1.013 wt% olmuştur. $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2-y}\text{Co}_y$ alaşımları, daha zor bir aktivasyon gerektirmelerine karşın etkin hidrojen depolama kapasitelerini önemli ölçüde arttırmışlardır. Yine aynı basınç ve sıcaklık değerleri altında (40 bar ve 298 K), $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.15}\text{Co}_{0.05}$ ve $\text{TiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.10}\text{Co}_{0.10}$ alaşımların maksimum hidrojen depolama kapasiteleri Co içermeyen alaşıma göre sırasıyla 3% artış ve 14% azalma sergilemiştir. Etkin hidrojen depolama kapasiteleri ise sırasıyla 1.467 wt% ve 1.271 wt% olmuştur.

Shang ve ark. [41], $\text{Ti}_{1.1-x}\text{Fe}_{0.7}\text{Ni}_{0.1}\text{Zr}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Pr}_x$ ($x = 0.02, 0.04, 0.08$) alaşımları hazırlamış ve alaşımlarda nadir toprak elementi olan praseodim (Pr) varlığının mikroyapı, aktivasyon özelliği, absorpsiyon/desorpsiyon kapasitesi ve kinetik üzerine olan etkilerini belirlemek için bir araştırma yürütmüşlerdir. Alaşımların hidrojen depolama kapasiteleri 313 K sıcaklıkta Pr_0 , $\text{Pr}_{0.02}$, $\text{Pr}_{0.04}$ ve $\text{Pr}_{0.08}$ içeren alaşımlar için ağırlıkça sırasıyla %1.177, 1.438, %1.363 ve %1.336 olmuştur. En hızlı reaksiyon kinetiği $\text{Pr}_{0.02}$ içeren alaşımda gözlemlenmiştir.

Zhang ve ark. [42], vakum-indüksiyon eritme yöntemiyle $\text{Ti}_{1.1-x}\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.1}\text{Zr}_{0.1}\text{Mn}_{0.2}\text{Sm}_x$ ($x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08$) nominal bileşimlerine sahip alaşımlar hazırlayıp, Sm varlığının alaşımların mikroyapısına ve hidrojen depolamaya olan etkilerini incelemişlerdir. Tüm 4 alaşımın da yaklaşık olarak 1.4 wt% civarında maksimum depolama kapasitesine sahip olduğu rapor edilmiştir. Öte yandan, kinetik performans bakımından alaşımlar incelendiği zaman, $\text{Ti}_{1.08}\text{Fe}_{0.6}\text{Ni}_{0.1}\text{Zr}_{0.1}\text{Mn}_{0.2}\text{Sm}_{0.02}$ alaşımının 313 K sıcaklıkta absorpsiyon tepkimesinin ilk 100 saniyesinde maksimum depolama kapasitesinin 86%'sına ulaştığı, 373 K sıcaklıkta ise bu değer 96%'ya vardığı görülmüştür. Diğer



üç alaşım için bu oranlar şu şekildedir: $Ti_{1.06}Fe_{0.6}Ni_{0.1}Zr_{0.1}Mn_{0.2}Sm_{0.04}$ için 313 K sıcaklıkta 88%, 373 K sıcaklıkta 98%; $Ti_{1.04}Fe_{0.6}Ni_{0.1}Zr_{0.1}Mn_{0.2}Sm_{0.06}$ için 313 K sıcaklıkta 89%, 373 K sıcaklıkta 98%; $Ti_{1.02}Fe_{0.6}Ni_{0.1}Zr_{0.1}Mn_{0.2}Sm_{0.08}$ için 313 K sıcaklıkta 92%, 373 K sıcaklıkta ise 98%.

Benzer bir şekilde Han ve ark. [43], vakum-indüksiyon eritme uygulaması sonucunda $Ti_{1.1-x}Zr_{0.1}Y_xFe_{0.6}Ni_{0.3}Mn_{0.2}$ ($x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08$) formüllü alaşımlar üretilip depolama üzerine gözlemler yapmışlardır. Y elementinin alaşımlara dahil edilmiş olması, 150 °C ve 30 bar hidrojen basıncında alaşımların tek seferde tamamen aktive olmasını mümkün kıldı. $Ti_{1.08}Zr_{0.1}Y_{0.02}Fe_{0.6}Ni_{0.3}Mn_{0.2}$ alaşımı, 70 °C'de 1.704 wt% maksimum absorpsiyon kapasitesine ulaşmıştır. Ayrıca, bu alaşım ilk 100 saniyede maksimum kapasitesinin %92'sini absorbe ederek diğer alaşımları geride bırakmıştır. Dört alaşım içerisindeki bir diğer üstün tarafı ise 0.837 wt% kadar hidrojen desorbe ederek en büyük desorpsiyon kapasitesine ulaşmış olmasıdır.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, dört intermetalik grubuna ait alaşımların zayıf özelliklerini malzemenin saf moleküler yapısına belirli oranlarda ilave element yerleştirilerek iyileştirmeye yönelik çalışmalar incelenmiştir. Çalışmaların sonuçları en uygun uygulamayı bulmak için karşılaştırılmıştır (bu çalışmada bahsi geçen tüm alaşımların özelliklerinin karşılaştırması Tablo 2'de verilmiştir). Buna göre, $LaNi_5$ ve benzeri nadir toprak elementi temelli AB_5 intermetaliklerin uzun dönemde zayıf olan döngüsel performansının, Mn, Sn veya Al elementlerinden birisinin alaşıma dâhil edilmesiyle ciddi oranda iyileştirilebileceği anlaşılmıştır. $ZrFe_2$ için V, Al ve Y hidrojen depolama kapasitesini arttırmada etkili olmuştur. $PrNi_3$ ve $GdNi_3$ alaşımlarının düşük olan tersinirlik oranları sırasıyla Mg ve Co eklenerek neredeyse %100'e çıkartılmıştır. TiFe'nin absorpsiyon kinetiği Y ve Sm elementlerinin eklenmesi ile önemli ölçüde artırılmıştır.

Tablo 2: Bu çalışmada yer alan alaşımların özelliklerinin karşılaştırması.

Alaşım	Hazırlanma yöntemi	Kristal yapı	Sıcaklık [K]	Depolama kapasitesi [wt%]	Uzun dönem kapasite koruma oranı (1000 döngü) [%]	Absorpsiyon basıncı [MPa]	Desorpsiyon basıncı [MPa]	Kaynak
$LaNi_{4.75}Mn_{0.25}$	Argon altında ark eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	383	1,389	87.8	1.145	0.873	[21]
$LaNi_{4.50}Mn_{0.50}$	Argon altında ark eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	383	1,371	90.6	0.727	0.470	[21]
$LaNi_{4.25}Mn_{0.75}$	Argon altında ark eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	383	1,359	94.0	0.249	0.196	[21]
$LaNi_4Mn$	Argon altında ark eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	383	1,350	92.9	0.148	0.093	[21]
$La_{4.6}Ce_{0.4}Ni_4Co$	Argon altında indüksiyonlu eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	313	1,536	85.3	1.138	0.954	[22]
$La_{4.5}Ce_{0.5}Ni_4Co$	Argon altında indüksiyonlu eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	313	1,544	96.0	1.946	1.745	[22]
$La_{4.5}Y_{0.1}Ni_4Co$	Argon altında indüksiyonlu eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	313	1,543	77.1	0.229	0.200	[22]
$La_{4.8}Y_{0.2}Ni_4Co$	Argon altında indüksiyonlu eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	313	1,498	88.1	0.361	0.332	[22]
$LaNi_{4.75}Sn_{0.25}$	Argon altında ark eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	343	1,329	94.0	0.540	0.426	[23]
$LaNi_{4.50}Sn_{0.50}$	Argon altında ark eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi AB_5 yapısı (P6/mmm)	363	1,082	91.9	0.254	0.245	[23]
$LaNi_{4.25}Sn_{0.75}$	Argon altında ark eritme	altigen $CaCu_5$ -tipi	383	0,918	95.8	0.179	0.164	[23]



		AB ₅ yapısı (P6/mmm)						
LaNi₄Sn	Argon altında ark ergitme	altıgen CaCu ₅ -tipi AB ₅ yapısı (P6/mmm)	383	0,604	97.7	0.083	0.069	[23]
LaNi_{4.75}Al_{0.25}	Argon altında ark ergitme	altıgen CaCu ₅ -tipi AB ₅ yapısı (P6/mmm)	343	1,460	95.4	0.430	0.318	[24]
LaNi_{4.50}Al_{0.50}	Argon altında ark ergitme	altıgen CaCu ₅ -tipi AB ₅ yapısı (P6/mmm)	343	1,360	98.2	0.114	0.094	[24]
LaNi_{4.75}Co_{0.25}	Argon altında ark ergitme	altıgen CaCu ₅ -tipi AB ₅ yapısı (P6/mmm)	343	1,545	83.8	0.892	0.7136	[25]
LaNi_{4.50}Co_{0.50}	Argon altında ark ergitme	altıgen CaCu ₅ -tipi AB ₅ yapısı (P6/mmm)	343	1,556	86	0.751	0.593	[25]
LaNi_{4.25}Co_{0.75}	Argon altında ark ergitme	altıgen CaCu ₅ -tipi AB ₅ yapısı (P6/mmm)	343	1,561	86.5	0.623	0.483	[25]
La_{0.91}Ce_{0.09}Ni₅	Vakum indüksiyonlu ergitme	altıgen CaCu ₅ -tipi AB ₅ yapısı (P6/mmm)	308	1,4	-	5,56	3,29	[26]
La_{0.75}Ce_{0.25}Ni₅	Vakum indüksiyonlu ergitme	altıgen CaCu ₅ -tipi AB ₅ yapısı (P6/mmm)	318	1,4	-	17.30	7,22	[26]
La_{0.5}Ce_{0.5}Ni₅	Vakum indüksiyonlu ergitme	altıgen CaCu ₅ -tipi AB ₅ yapısı (P6/mmm)	308	1,22	-	43.21	11,52	[26]
ZrFe_{1.9}Ga_{0.1}	Argon altında ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	223	1,76	-	34.95	13.52	[29]
ZrFe_{1.8}Ga_{0.2}	Argon altında ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	223	1,53	-	13.48	9,48	[29]
ZrFe_{1.9}Al_{0.1}	Argon altında ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	223	1,79	-	26.92	8,88	[29]
ZrFe_{1.8}Al_{0.2}	Argon altında ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	223	1,71	-	14.43	8,62	[29]
ZrFe_{1.8}V_{0.2}	Argon altında ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	-	1,3	-	-	-	[30]
ZrFe_{1.6}V_{0.4}	Argon altında ark ergitme	altıgen C14 Laves fazı	-	1,6	-	-	-	[30]
ZrFe_{1.4}V_{0.6}	Argon altında ark ergitme	altıgen C14 Laves fazı	-	1,77	-	-	-	[30]
ZrFe_{1.2}V_{0.8}	Argon altında ark ergitme	altıgen C14 Laves fazı	-	1,85	-	-	-	[30]
ZrFe_{1.8}V_{0.2}	Argon altında yüksek frekanslı levitasyon- indüksiyonlu ergitme	altıgen C14 Laves fazı	293	1,42	-	22,5	22,5	[31]
ZrFe_{1.8}Cr_{0.2}	Argon altında yüksek frekanslı levitasyon- indüksiyonlu ergitme	kübik C15 Laves fazı	293	1,35	-	104.9	49.9	[31]
Zr_{0.9}Y_{0.1}Fe₂	Vakum ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	243	1,2	-	22.41	18.17	[33]
Zr_{0.85}Y_{0.15}Fe₂	Vakum ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	243	1,54	-	12,45	10,06	[33]
Zr_{0.8}Y_{0.2}Fe₂	Vakum ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	243	1,58	-	7,39	5,98	[33]
Zr_{0.75}Y_{0.25}Fe₂	Vakum ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	243	1,64	-	3	2,37	[33]
Zr_{0.7}Y_{0.3}Fe₂	Vakum ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	243	1,7	-	1,09	0,68	[33]
Zr_{0.6}Y_{0.4}Fe₂	Vakum ark ergitme	kübik C15 Laves fazı	243	1,77	-	0,22	0,1	[33]
TiFe_{0.8}Mn_{0.2}	Argon altında ark ergitme	TiFe/Laves fazı	298	1.752	-	-	-	[40]
TiFe_{0.8}Mn_{0.2}Co_{0.05}	Argon altında ark ergitme	TiFe/Laves fazı	298	1.681	-	-	-	[40]
TiFe_{0.8}Mn_{0.2}Co_{0.1}	Argon altında ark ergitme	TiFe/Laves fazı	298	1.518	-	-	-	[40]
TiFe_{0.8}Mn_{0.2}Co_{0.15}	Argon altında ark ergitme	TiFe/Laves fazı	298	1.304	-	-	-	[40]
TiFe_{0.8}Mn_{0.15}Co_{0.05}	Argon altında ark ergitme	TiFe/Laves fazı	298	1.806	-	-	-	[40]
TiFe_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}	Argon altında ark ergitme	TiFe/Laves fazı	298	1.516	-	-	-	[40]
Ti_{1.08}Fe_{0.7}Ni_{0.1}Zr_{0.1} Mn_{0.1}Pr_{0.02}	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/Ti ₂ Fe	373	1,45	-	0.0182	-	[41]
Ti_{1.06}Fe_{0.7}Ni_{0.1}Zr_{0.1} Mn_{0.1}Pr_{0.04}	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/Ti ₂ Fe	373	1,48	-	0.0159	-	[41]



$Ti_{1.02}Fe_{0.7}Ni_{0.1}Zr_{0.1}Mn_{0.1}Pr_{0.08}$	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/Ti ₂ Fe	373	1,48	-	0.0146	-	[41]
$Ti_{1.08}Fe_{0.6}Ni_{0.1}Zr_{0.1}Mn_{0.2}Sm_{0.02}$	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/Ti ₂ Fe	373	1,4	-	0.2183	0.0620	[42]
$Ti_{1.06}Fe_{0.6}Ni_{0.1}Zr_{0.1}Mn_{0.2}Sm_{0.04}$	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/Ti ₂ Fe	373	1,35	-	0.0694	0.0557	[42]
$Ti_{1.04}Fe_{0.6}Ni_{0.1}Zr_{0.1}Mn_{0.2}Sm_{0.06}$	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/Ti ₂ Fe	373	1,42	-	0.0694	0.0247	[42]
$Ti_{1.02}Fe_{0.6}Ni_{0.1}Zr_{0.1}Mn_{0.2}Sm_{0.08}$	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/Ti ₂ Fe	373	1,24	-	0.0767	0.0512	[42]
$Ti_{1.08}Zr_{0.1}Y_{0.02}Fe_{0.6}Ni_{0.3}Mn_{0.2}$	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/C14 Laves	343	1,6	-	-	-	[43]
$Ti_{1.06}Zr_{0.1}Y_{0.04}Fe_{0.6}Ni_{0.3}Mn_{0.2}$	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/C14 Laves	343	1,7	-	-	-	[43]
$Ti_{1.04}Zr_{0.1}Y_{0.06}Fe_{0.6}Ni_{0.3}Mn_{0.2}$	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/C14 Laves	343	1,65	-	-	-	[43]
$Ti_{1.02}Zr_{0.1}Y_{0.08}Fe_{0.6}Ni_{0.3}Mn_{0.2}$	Vakum indüksiyonlu ergitme	BCC TiFe/C14 Laves	343	1,52	-	-	-	[43]

7. Kaynakça

- [1] Barthelemy, H., Weber, M., Barbier, F., “Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives”, International Journal of Hydrogen Energy, 42, 7254-7262, 2017.
- [2] Valenti, G., “Chapter 2: Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage”, In: Gupta, R.B., Basile, A., Veziroğlu, T.N., ed. “Compendium of Hydrogen Energy”, Woodhead Publishing Series in Energy, 27-51, 2016.
- [3] Prabhukhot, R., Wagh, M., Gangal, C., “A Review on Solid State Hydrogen Storage Material”, Advances in Energy and Power, 4, 11-22, 2016.
- [4] Jain, A., Agarwal, S., Ichikawa, T., “Catalytic Tuning of Sorption Kinetics of Lightweight Hydrides: A Review of the Materials and Mechanism”, Catalysts, 8, 651, 2018.
- [5] Zhang, J., Yan, S., Qu, H., “Stress/strain effects on thermodynamic properties of magnesium hydride: A brief review”, International Journal of Hydrogen Energy, 42, 16603-16610, 2017.
- [6] Usman, M.R., “Hydrogen storage methods: Review and current status”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167, 112743, 2022.
- [7] Zhang, F., Zhao, P., Niu, M., Maddy, J., “The survey of key technologies in hydrogen energy storage”, International Journal of Hydrogen Energy, 41, 14535-14552, 2016.
- [8] Young, K., “Metal Hydrides”, In: “Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering”, Elsevier, 2018.
- [9] Lototsky, M., Tolj, I., Pickering, L., Sita, C., Barbier, F., Yartys, V., “The use of metal hydrides in fuel cell applications”, Progress in Natural Science, 27, 3-20, 2017.
- [10] Zhang, J., Zhu, Y., Yao, L., Xu, C., Liu, Y., Li, L., “State of the art multi-strategy improvement of Mg-based hydrides for hydrogen storage”, Journal of Alloys and Compounds, 782, 796-823, 2019.
- [11] Jain, I.P., Jain, P., Jain, A., “Novel hydrogen storage materials: A review of lightweight complex hydrides”, Journal of Alloys and Compounds, 503, 303-339, 2010.
- [12] Bellosta von Colbe, J.M., Lozano, G., Metz, O., Bücherl, T., Bormann, R., Klassen, T., Dornheim, M., “Design, sorption behaviour and energy management in a sodium alanate-based lightweight hydrogen storage tank”, International Journal of Hydrogen Energy, 40, 2984-2988, 2015.
- [13] Shafiee, S., McCay, M.H., “Different reactor and heat exchanger configurations for metal hydride hydrogen storage systems – A review”, International Journal of Hydrogen Energy, 41, 9462-9470, 2016.



- [14] Rusman, N.A.A., Dahari, M., “A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 12108-12126, 2016.
- [15] Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., Hirscher, M., “Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 1121-1140, 2007.
- [16] Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, “DOE Technical Targets for Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Vehicles”, *Energy.gov*, Accessed November 4, 2022. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-onboard-hydrogen-storage-light-duty-vehicles>
- [17] Yan, N., Lu, X., Lu, Z., Yu, H., Wu, F., Zheng, J., Wang, X., Zhang, L., “Enhanced hydrogen storage properties of Mg by the synergistic effect of grain refinement and NiTiO_3 nanoparticles”, *Journal of Magnesium and Alloys*, in press, 2021.
- [18] Lundin, C.E., Lynch, F.E., Magee, C.B., “A correlation between the interstitial hole sizes in intermetallic compounds and the thermodynamic properties of the hydrides formed from those compounds”, *Journal of the Less Common Metals*, 56, 19-37, 1977.
- [19] Hassan I.A., Ramadan H.S, Saleh M.A, Hissel D., “Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111311, 2021.
- [20] Liu, Y., Pan, H., Gao, M., Wang, Q., “Advanced hydrogen storage alloys for Ni/MH rechargeable batteries”, *Journal of Materials Chemistry*, 21, 4743-4755, 2011.
- [21] Chen, X., Xu, J., Zhang, W., Zhu, S., Zhang, N., Ke, D., Liu, J., Yan, K., Cheng, H., “Effect of Mn on the long-term cycling performance of AB₅-type hydrogen storage alloy”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 21973-21983, 2021.
- [22] Zhu., Z., Zhu, S., Zhao, X., Cheng, H., Yan, K., Liu, J., “Effects of Ce/Y on the cycle stability and anti-plateau splitting of $\text{La}_{5-x}\text{Ce}_x\text{Ni}_4\text{Co}$ ($x = 0.4, 0.5$) and $\text{La}_{5-y}\text{Y}_y\text{Ni}_4\text{Co}$ ($y = 0.1, 0.2$) hydrogen storage alloys”, *Materials Chemistry and Physics*, 236, 121725, 2019.
- [23] Jie Xu, J., Chen, X., Zhu, W., Zhang, W., Cui, H., Zhu, S., Liu, J., Liu, H., Yan, K., Cheng, H., “Enhanced cycling stability and reduced hysteresis of AB₅-type hydrogen storage alloys by partial substitution of Sn for Ni”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 22495-22509, 2022.
- [24] Liu, J., Li, K., Cheng, H., Yan, K., Wang, Y., Liu, Y., Jin, H., Zheng, Z., “New insights into the hydrogen storage performance degradation and Al functioning mechanism of $\text{LaNi}_{5-x}\text{Al}_x$ alloys”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 24904-24914, 2017.
- [25] Zhu, Z., Zhu, S., Lu, H., Wu, J., Yan, K., Cheng, H., Liu, J., “Stability of $\text{LaNi}_{5-x}\text{Co}_x$ alloys cycled in hydrogen – Part 1 evolution in gaseous hydrogen storage performance”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 15159-15172, 2019.
- [26] Pęska, M., Dworecka-Wójcik, J., Płociński, T., Polański, M., “The Influence of Cerium on the Hydrogen Storage Properties of $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Ni}_5$ Alloys”, *Energies*, 13, 1437, 2020.
- [27] Zotov, T., Movlaev, E., Mitrokhin, S., Verbetsky, V., “Interaction in $(\text{Ti,Sc})\text{Fe}_2\text{-H}_2$ and $(\text{Zr,Sc})\text{Fe}_2\text{-H}_2$ systems”, *Journal of Alloys and Compounds*, 459, 220-224, 2008.
- [28] Liu, W., Webb, C.J., Gray, E.M., “Review of hydrogen storage in AB₃ alloys targeting stationary fuel cell applications”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 3485-3507, 2016.
- [29] Qin, C., Wang, H., Jiang, W., Liu, J., Ouyang, L., Zhu, M., “Comparative study of Ga and Al alloying with ZrFe_2 for high-pressure hydrogen storage”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 13409-13417, 2022.



- [30] Banerjee, S., Kumar, A., Pillai, C.G.S., “Improvement on the hydrogen storage properties of $ZrFe_2$ Laves phase alloy by vanadium substitution”, *Intermetallics*, 51, 30-36, 2014.
- [31] Kouloukakis, E.D., Makridis, S.S., Pavlidou, E., De Rango, P., Stubos, A.K., “Investigation of $ZrFe_2$ -type materials for metal hydride hydrogen compressor systems by substituting Fe with Cr or V”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 21380-21385, 2014.
- [32] Jaina, A., Jaina, R.K., Agarwala, S., Ganesanb, V., Lallab, N.P., Phaseb, D.M., Jain, I.P., “Synthesis, characterization and hydrogenation of $ZrFe_{2-x}Ni_x$ ($x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) alloys”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 3965-3971, 2007.
- [33] Qin, C., Wang, H., Liu, J., Ouyang, L., Zhu, M., “Tuning hydrogen storage thermodynamic properties of $ZrFe_2$ by partial substitution with rare earth element Y”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 18445-18452, 2021.
- [34] Liu, W., Webb, C.J., Gray, E.M., “Review of hydrogen storage in AB_3 alloys targeting stationary fuel cell applications”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 3485-3507, 2016.
- [35] Iwase, K., Terashita, N., Mori, K., Tashiro, S., Yokota, H., Suzuki, T., “Effects of Mg substitution on crystal structure and hydrogenation properties of $Pr_{1-x}Mg_xNi_3$ ”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 12773-12777, 2014.
- [36] Iwase, K., Shitou, Y., Mori, K., “Effect of Co substitution on hydrogenation behavior of $GdNi_{3-x}Co_x$ ($x = 0, 0.2, 1.0$) and crystal structure of its hydride phases”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 3961-3971, 2022.
- [37] Padhee, S.P., Roy, A., Pati, S., “Role of Mn-substitution towards the enhanced hydrogen storage performance in $FeTi$ ”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 9357-9371, 2022.
- [38] Mohammadi, L., Daoudi, B., Boukraa, A., “Ab-initio structural and electronic properties of the intermetallic compound $TiFeH_2$ ”, *Computational Condensed Matter*, 2, 11-15, 2015.
- [39] Yang, T., Wang, P., Xia, C., Liu, N., Liang, C., Yin, F., Li, Q., “Effect of chromium, manganese and yttrium on microstructure and hydrogen storage properties of $TiFe$ -based alloy”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 12071-12081, 2020.
- [40] Leng, H., Yu, Z., Luo, Q., Yin, J., Miao, N., Li, Q., Chou, K.C., “Effect of cobalt on the microstructure and hydrogen sorption performances of $TiFe_{0.8}Mn_{0.2}$ alloy”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 19553-19560, 2020.
- [41] Shang, H., Zhang, Y., Li, Y., Gao, J., Zhang, W., Wei, X., Yuan, Z., Ju, L., “Effect of Pr content on activation capability and hydrogen storage performances of $TiFe$ alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 890, 161785, 2021.
- [42] Zhang, Y., Shang, H., Gao, J., Zhang, W., Wei, X., Yuan, Z., “Effect of Sm content on activation capability and hydrogen storage performances of $TiFe$ alloy”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 24517-24530, 2021.
- [43] Han, Z., Yuan, Z., Zhai, T., Feng, D., Sun, H., Zhang, Y., “Effect of yttrium content on microstructure and hydrogen storage properties of $TiFe$ -based alloy”, *International Journal of Hydrogen Energy*, in press.

Teşekkür

Yazarlar, 121M529 numaralı sözleşme kapsamındaki mali destek için Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür eder. Yazarlardan, Gamze ATALMIŞ, 100/2000 Doktora Burs Programı için Yükseköğretim Kurulu'na (YÖK) teşekkür eder.



AKILLI EV TEKNOLOJİLERİNİN KABULÜ VE YENİLİKÇİ TÜKETİCİ DAVRANIŞLARININ DEĞERLENDİRİLMESİNDE ANKETLER

H. Nurgül Durmuş Şenyapar

Gazi Üniversitesi Rektörlüğü, Ankara

ORCID ID: 0000-0003-0927-1643, nurguld@gazi.edu.tr

Özet

Son yıllarda akıllı ev sistemlerinde kullanılan aygıtların mağazalarda, internet satış sitelerinde pazar bulduğu ve günlük hayatımızda yer almaya başladığı görülmektedir. Diğer birçok ürün ve hizmette olduğu gibi akıllı ev sistemlerinde kullanılan aletlerin de pazardaki durumu ve yenilikçi tüketici davranışı olarak tüketiciler üzerindeki etkilerinin görülebilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, akıllı ev sistemleri üzerine yapılacak anketler hazırlanırken dikkat edilmesi gereken hususlar belirlenmiştir. Tüketicilerin bu konudaki tutumları, duygu, düşünce ve önerilerini tespit etmek üzere geliştirilecek anketlerde sorgulanabilecek faktörler teknoloji kabul modeli ile önerilmiştir. Özellikle, ülkemizde yenilikçi tüketici davranışlarının ölçülebilmesi için akıllı ev teknolojileri örneği üzerinde araştırma yapmak isteyen araştırmacılar ve sektörde yatırım yapmayı planlayan işletmelerin risklerini minimuma indirmesi adına tüketicilerin akıllı ev teknolojileri kullanımına yönelik kabulünü artıracak unsurların belirlenmesi kapsamında hazırlanacak anketlerin niteliğinin artırılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Ev Sistemleri, Anket, Nesnelerin İnterneti, Teknoloji Kabul Modeli, Yeniliklerin Kabulü.

1. Giriş

Akıllı ev teknolojisi kavramı, tüketiciler için yönetim, rahatlık, enerji tasarrufu ve enerji yönetimi gibi faydalar sağlayacak bir ortam olarak tanımlanmaktadır. Bu özelliklere sahip olan ürün veya hizmetler ile tüketicilerin kabulü sağlanmaya çalışılmaktadır. Otonom teknolojiler, kullanıcılarına sağladıkları kolaylık sayesinde günlük yaşamımızda önemli bir etkiye sahiptir. Son dönemde akıllı evler ve uygulamaları, kullanıcının konfor ve güvenli yaşama ihtiyacı doğrultusunda ortaya çıkmış ve oldukça popüler hale gelmiştir [1].

İnternet ağının gelişmesi, akıllı ev sistemlerinin yaygınlaşmasındaki en önemli unsurlardan biridir. Akıllı ev, basitçe birbiriyle haberleşen ve sahibi tarafından minimum çabayla kolayca kontrol edilebilen bir dizi elektronik cihaz olarak tanımlanabilir [2]. Geleneksel evlerde, elektrik hatlarına bağlı aydınlatma cihazları, ısıtıcılar ve buzdolapları gibi bileşenler sadece kullanıcı ihtiyacına göre çalıştırılmaktadır. Bu işlem, cihazların güç tüketimi hakkında herhangi bir bilgi olmadan manuel veya yarı otomatik olarak gerçekleştirilir. Akıllı evlerde ise kullanıcıların mobil cihazlarına veya bilgisayarlarına yüklenen yazılımlar ile enerji kontrol modülleri etkileşimli çalışarak uzaktan veya otomatik çalıştırma işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte, tüketici davranışlarını ve psikolojisini doğrudan etkileme olanağı da kazandırılabilir [3]. Doğrudan etkileşim donanımsal olarak Raspberry Pi, Arduino, programlanabilir tümleşik devre ve programlanabilir mantık denetleyicisi gibi mikrodenetleyicilerin çeşitli yazılım uygulamaları aracılığı ile sağlanmaktadır. Programlanan cihazlar bir dizi sensör ve kablolu/kablosuz haberleşme aracılığıyla ev cihazlarına bağlanmaktadır. Kablosuz RF (radyo frekansı) haberleşme standartlarından Bluetooth, Zigbee, Zwave ve WIFI yaygın olarak kullanılmaktadır. Kablolu olarak ise KNX gibi çeşitli bina otomasyon standartları ile haberleşen dağıtıcılar ve cihazlar aracılığı ile haberleşme sağlanmaktadır. Fakat sisteme yeni bir cihaz eklendiğinde, iç tesisatta fiziksel değişikliklere ihtiyaç duyulduğundan, bu tip kontrole sahip ev cihazlarının kurulumu zaman alıcı ve maliyeti yüksek olmaktadır [4].

Günümüzde yaygın olarak kullanılan akıllı ev teknolojileri; iklimlendirme üniteleri, güvenlik cihazları, akıllı perdeler, ses ve görüntü sistemleri, buzdolapları, bulaşık makineleri, çamaşır



makinaları, robot süpürgeler, elektrik prizleri ve aydınlatma cihazlarıdır. Bu cihazların kontrolü kullanıcının ev içinde veya dışarıda olmasına bakılmaksızın akıllı ev bileşenleriyle sağlanabilmektedir [5]. Erişilebilirliğin yanı sıra, akıllı ev sistemleri zamandan, emekten ve paradan tasarruf sağlayarak yaşam kalitesinin artmasına yardımcı olur [6]. Ayrıca, kullanıcı profiline bağlı olarak bilgiler toplayıp analiz eden ve düzenleyen özellikleri sayesinde yaşamı kolaylaştırma konusunda oldukça işlevsel hale gelmektedir [7]. Yeni çıkan ve doğrudan mevcut akıllı sistemlere dahil olabilen elektronik ürünlerle birlikte çalışabilirlikleri ise akıllı ev teknolojilerini kullanıcı dostu sistemler haline getirmiştir [8]. Ayrıca insanlara günün her anında gelen mesajlara bakma, bildirimleri okuma ve birtakım dijital verilere erişim kolaylığı, hatırlatma gibi farklı özellikler de sunmaktadır. Tüm bu özellikler akıllı ev teknolojilerinin talep görmesinde etkin bir rol oynamaktadır. Akıllı ev cihazlarına ulaşılabilirliğin kolaylaşması ve artan talep, mevcut elektronik pazarındaki payının güç geçtikçe artmasına neden olmuştur. Bu durum akıllı ev teknolojilerini firmalarının odak noktası haline getirmiş ve yapılan yatırımların da artmasına neden olmuştur.

Literatürde akıllı ev teknolojilerine farklı açılardan bakan çalışmalar yer almaktadır. Genel olarak farklı kullanım senaryoları, güvenlik, haberleşme, farklı cihaz kontrolleri, verim, ölçüm, izleme gibi çalışmalar odak noktası olmuştur. [9]'da sunulan çalışmada, enerji verimliliği, evde bakım mimarileri ve genel uygulama alanlarına odaklanılmıştır. Güvenlik senaryoları üzerine yapılan çalışmada, kimlik doğrulama yöntemleri hakkında hiçbir ayrıntı verilmemiştir. [10]'da akıllı ev uygulamalarının kullanıcı tipi ve gereksinimlerine göre sınıflandırılması sunulmuştur. Akıllı ev uygulamaları standart, yardımcı ve konforlu olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Her grup için hiyerarşik bir yapı ve bunun avantaj ve dezavantajları ile nasıl kullanılabileceği sunulmuştur. [11]'de ise akıllı ev sistemlerinin temelini oluşturan nesnelerin interneti (*Internet of Things* -IoT) uygulamalarıyla ilgili yöntemler incelenmiş ve evleri IoT'ye bağlamanın avantajları, dezavantajları ve sınırlamalarına üzerine özet bir çalışma sunulmuştur. [12]'de tüketicilerin yeni ürün olarak akıllı evleri satın alma niyetlerinin teknoloji kabul modeli çerçevesinde incelenmiştir.

Akıllı evlerin sosyal açıdan bir statü göstergesi olması, evlerde kullanım maliyetlerinin azalması, konfor gibi özelliklerinden dolayı katma değeri yüksek evlerin satışına olanak tanımaktadır. Birçok özelliği bir arada barındıran, hayatı kolaylaştırarak konforu artıran akıllı evler, yeni nesil bir yaşam tarzı olarak da değerlendirilebilmektedir [13]. Yukarıda verilen literatürden görüleceği üzere akıllı ev cihazları, nesnelerin interneti (IoT) pazarının önemli bir bölümünü oluşturur ve enerji verimliliği, konfor, kolaylık gibi faydalar sağlayabilir. Ancak bu cihazlar veri toplayarak çalıştığı için potansiyel gizlilik ve güvenlik riskleri de vardır.

Literatürden de görüleceği üzere özellikle akıllı ev teknolojilerinin sadece bu teknolojilere sahip olan tüketiciler için değil, aynı zamanda bu cihazlar aracılığıyla sağlanan güvenlik tehditlerinden etkilenen kuruluşlar ve diğer ev sahibi kullanıcılar için de risk oluşturduğu görülmektedir. Bilgi güvenliği uzmanlarınca güvenlik risklerine ilişkin tüketici tereddütlerinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Ayrıca literatürde tüketici kabulünü etkileyecek pozitif unsurların yanında risklerin de ele alınarak gerçekleştirilecek bir anket çalışmasının, tüketicinin yeni teknolojileri kabullenmesini objektif olarak ortaya koyacağı değerlendirilmiştir.

Bu çalışma ile özellikle yenilikçi tüketici davranışları için hazırlanacak anketlerde doğru ilerlemek adına akıllı ev teknolojileri ile ilgili bir literatür taraması yapılarak anket hazırlanması sürecinde dikkat edilmesi gereken hususlara yer verilecektir.

2. Yenilikçi Tüketici Davranışı İçin Anket Hazırlanması

Anketler bir insan grubunun özellikleri, eylemleri veya görüşleri hakkında sözlü veya yazılı olarak bilgi toplamak için kullanılan bir araçtır [14]. Özellikle yeni ürün ve hizmetler tüketiciye sunulmadan önce veya sunulduktan sonra anketler ile hedef kitleden veri toplanarak önerilen hipotezin kanıtlanmasına veya çürütülmesinde kullanılan bir anketler uygulanır. Anketlerin bilimsel yaklaşımla hazırlanması gerekmektedir. Bu tip anketler pazarlama, fikir ve siyasi anket türlerinden farklıdır. Bilimsel anket hazırlanırken araştırma ve anket hedeflerine katkıda bulunabilecek ölçülebilir faktörlere dönüştürülmelidir [15].



Anketler özellikle kullanıcı profilleri ve tercihlerini elde etmek için gerekli bilgiye ulaşmanın en etkili yöntemlerinden biridir. Ulaşılmak istenilen veriler gözlem ve deney gibi yöntemlerle toplanamıyorsa veya mevcut veriler yeterli/güncel değilse anket yöntemi gerekli görülebilmektedir [16]. Amacı ve sınırları doğru şekilde belirlenmiş, katılımcıyı uygulamaya teşvik eden ve oluşabilecek tereddütleri gideren etkili bir sunuş metniyle uygun örneklem grubuna uygulanan anketler, tüketici tercih ve önceliklerinin belirlenebilmesinde şüphesiz önemli sonuçlar ortaya koyabilecektir.

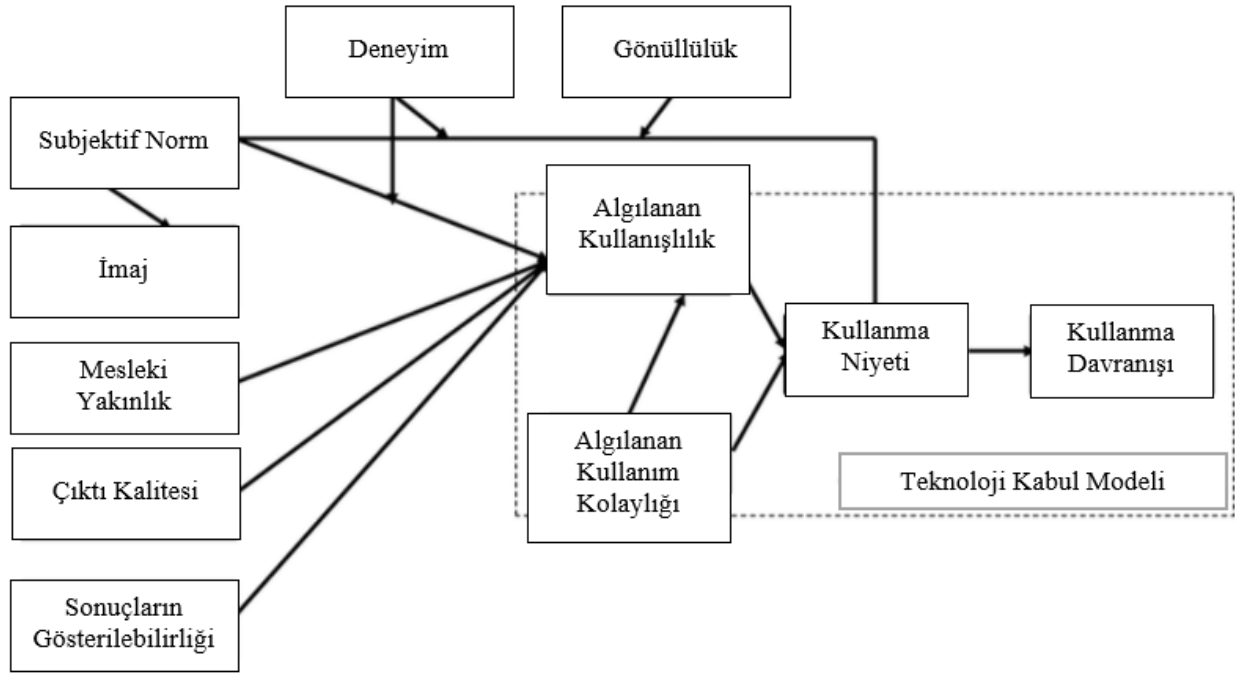
Anket yöntemlerinde elde edilen verilerin doğruluğu anket içeriği ve katılımcı sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Anket sonucunu doğrudan etkileyebilecek yaş, cinsiyet ve coğrafi konum gibi ayrıntılar ankette tanımlanmalıdır. Demografik veriler diye adlandırılan bu kısım değişkenler arasındaki ilişkileri görmemizi sağlayacak kadar detaylı, ancak katılımcıyı bıktırmayacak ya da kimliğinin açığa çıkması tedirginliğiyle samimi cevaplar vermesini önleyecek kadar da kısa olmalıdır. Ankette gereksiz sorulara yer verilmemeli, sonuçlarda doğru olmayan veya şüpheye düşülen yanıtlar somut bir araştırma yararı sağlamıyor ise dikkate alınmamalıdır. Hazırlanan sorular olabildiğince basit, kısa ve anlaşılması kolay olmalıdır. Uzun olabilecek sorular bölünmeli, ayrı ayrı oluşturulmalıdır. Yanıtlarının birbirinden farklı olabileceği göz önünde bulundurularak aynı soruda iki ayrı konu sorgulanmamalıdır. Sorular belirsizliklerden uzak olmalı ve sonuçlar spesifik olarak değerlendirilmelidir. Soruları yanıtlayan kitle, sorulan sorularda yeterli bilgiye sahip olmalıdır. Katılımcıların özellikleri göz önünde bulundurularak anlamayacakları ya da yanlış anlayabilecekleri sorular ankete konmamalıdır. Bilgi gerektiren, hedef kitlenin bir bölümünün yanıtlayabileceği sorularda yanıtlayıcının soruyu bilip bilmediğini açıklayan ekstra sorular eklenmelidir. Ayrıca katılımcıların muhtemel cevabı olmayan anket sorularında “bilmiyorum/fikrim yok” seçeneği sunulmalıdır. Aynı şekilde yüksek katılımlı anketlerde de benzer seçeneğin sunulması, doğru bilginin edinilmesi ve analizi açısından önemlidir. Soru sayısı yanıtlamaya engel olacak ya da katılımcının anketi yarıda bırakmasına sebep olacak şekilde gereğinden fazla artmasına sebep oluyorsa anketleri bölerek uygulama seçeneği değerlendirilmelidir. Sorularda katılımcıların göreceli değerlendirebileceği “düzenli olarak”, “bazen” ve “sık sık” gibi ifadelerden kaçınılmalıdır. Anket hazırlarken yanıtlar olabildiğince benzer, açık ve belirgin olmalıdır. Hatırlanması ya da açıklanması zor sorular yöneltmemelidir. Mümkünse ankette ölçüm birimleri uzmanlar tarafından geliştirilmeli, sonuçlar yanıt verenlerin görüş ve deneyimlerini yansıtabilir nitelikte ve katılımcılara tutarlı bir şekilde uygulanabilir olmalıdır [17]. Yanıt seçenekleri belirlenirken kullanıcı için birden fazla doğru seçeneğin arasında kararsız kalmasına sebep olacağından birbiri ile çakışan yanıt şıkları bulunmamasına özen gösterilmelidir. Açık uçlu sorulardan olabildiğince kaçınılmalıdır. Bu tip sorular, yanıtlayanların yorulmasına neden olabileceği gibi ayrıca veri toplama, analiz etme açısından sorunlara yol açabilir. Tercihen kapalı uçlu yani seçenekleri önceden belirlenmiş olan sorular kullanılmalı, yorumlama için gerekliliği değerlendirilerek yarı kapalı uçlu veya açık uçlu sorulara yer verilmelidir. Anket katılımcılarına anketlerini kolaylıkla tamamlayabilecekleri süreler verilmeli, anketler katılımcılara sunulmadan, varsa mevcut danışman tarafından incelendikten sonra küçük bir test grubu ile test edilmelidir [18]. Daha sonra istenilen konuyla ilgili hitap eden kitleye yönelik hazırlanan ve sunulan anket formu, geçerli ve güvenilir verilerin analizi ve raporlaştırılması ile amaçlanan araştırma hedeflerine ulaşılmış olacaktır.

3. Akıllı Ev Teknolojilerinin Kabullenilmesi ve Benimsenmesi

Tüketicilerin akıllı ev teknolojilerini kullanma motivasyonunu incelemek için teknolojinin kabullenilmesinin ve benimsenmesinin anlaşılması çok kritiktir. Teknolojinin kabullenilmesinde öne çıkan ve yenilikçi teknolojik cihazlar için en uygun çerçeveyi sunan yaklaşımlardan biri, Fred Davis tarafından geliştirilen Teknoloji Kabul Modelidir (*Technology Acceptance Model – TAM*). Davis, algılanan kullanışlılık ve algılanan kullanım kolaylığının, tüketicilerin yeni teknolojileri kabul etme ve kullanma konusundaki davranışsal niyetini birlikte etkileyebilecek iki faktör olarak ortaya koymuştur [19]. Bu model, algılanan kullanışlılık ve algılanan kullanım kolaylığı faktörlerine bağlı olarak kullanmaya yönelik tutum, davranışsal niyet ve kullanım aşamalarından geçerek tüketicinin yeniliği kabul ettiğini öne sürer. Farklı değişkenleri göz önünde bulunduran



TAM2 Modeli (Genişletilmiş Teknoloji Kabul Modeli); imaj, öznel norm, deneyim, gönüllülük ve bilişsel araçsal süreç değişkenlerini algılanan kullanışlılık ve algılanan kullanım kolaylığı aşamalarını etkileyen unsurlar olarak sıralar. Genişletilmiş Teknoloji Kabul Modeline ait blok diyagram Şekil 1’de verilmiştir [20].



Şekil 1: Genişletilmiş Teknoloji Kabul Modeli

Bu çerçeveden bakıldığında akıllı ev teknolojilerinin kabulüne yönelik tüketici tercihlerinin belirlenmesi açısından geliştirilecek anketlerde:

- Performans beklentisi,
- Edinmek veya kullanmak için gereken çaba,
- Sosyal etki, kolaylaştırıcı koşullar,
- Teknoloji tedirginliği,
- Algılanan güven,
- Algılanan maliyet,
- Uzman tavsiyesi

aşamalarının sorgulanması önem taşıyacaktır.

Akıllı ev teknolojilerinin kabulünde:

- Sistemin güvenilirliği,
- Kontrol edilebilirlik,
- Güvenlik,
- Teknolojilerin birbiri ile olan bağı,
- Eğlence

gibi unsurların önemli olduğu değerlendirilmektedir. Aynı zamanda ekonomik fayda, sosyal katkı, çevreye duyarlılık ve yenilikçilik ile birlikte davranışsal niyet de diğer sorgulanması önerilen hususlardır. Kullanıcıların bu faktörlere yönelik değerlendirmelerini alacak şekilde geliştirilecek



anketler, bu alandaki teknolojilerin geliştirilmesi, pazarlanması ve benimsenmesinde etkili olacak unsurların değerlendirilmesi açısından faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

4. Sonuç

Tüketiciler, akıllı ev teknolojilerini günlük yaşamlarında giderek daha fazla kullanmaya başlamıştır. Bu kullanımın ilerleyen dönemde gelişen teknoloji ve benimsenme düzeyinin yükselmesiyle birlikte daha da artacağı tahmin edilmekle birlikte süreci hızlandıracak unsurların neler olacağı, anketler aracılığıyla kısmen belirlenebilir. Bu kapsamda özellikle akıllı ev teknolojilerin tüketici için getireceği çeşitli fayda ve risk faktörlerinin bireylerin bu teknolojileri benimseme niyetini etkilediği bulgusundan hareketle, akıllı ev teknolojilerinin kabulüne ilişkin hazırlanacak anketlerde özellikle bu hususlara yer verilmesi önerilmektedir. Akıllı ev teknolojilerini kullanma niyeti, performans beklentisi, kullanıcı dostu olması, uyumluluk, tüketici imajı gibi hususların, teknolojinin kullanımını olumlu yönde etkilediği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte gizlilik riski, güvenlik riski akıllı ev cihazları kullanmanın olumsuz yönde etkileyen hususlar olarak ön plan çıkmıştır. Yapılan çalışma ile özellikle tüketici kabulünün daha doğrudan bilişsel öncüllerinin belirleyicileri olarak algılanan olumlu yönler ve riskler ön plan çıkmaktadır.

Literatürde verilen çalışmalardan da görüleceği üzere, algılanan güvenlik riskinin, tüketicilerin akıllı ev cihazlarını kullanma niyeti ve kabulü üzerinde etkili bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Ayrıca akıllı ev teknolojilerin kabulünde yaş ve eğitimin rolünün önemli olduğu görülmektedir. Yüksek eğitilmiş insanların kendi kararlarını alma ve tüketici kabulü olasılıklarının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Tüketicilerin akıllı ev teknolojilerini kullanma niyetlerini etkilemekte olan algılanan güvenlik riski rolü göz önüne alındığında, tüketicilerin ihtiyaç duydukları bilgi ve becerileri geliştirmelerini sağlayan, etkileyen ve yönlendiren etkenlerdir. Değerlendirmelerden de görüldüğü üzere yenilikçi tüketici davranışlarının anlaşılmasında anketlerin önemli bir araç olduğu, çalışmamızda yer verilen hususlar dikkate alınarak uygulanacak anketin tüketicilerin kabullenme seviyesinin ölçülmesinde önemli bir araç olacağı değerlendirilmiştir.

5. Kaynakça

- [1] Krishna, I. ve Lavanya, K. “Intelligent Home Automation System using BitVoicer,” *11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 14–20, 2017.
- [2] Deore, R. K. , Sonawane, V. R. ve Satpute, P. H. , “Internet of Thing Based Home Appliances Control,” *International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, 898–902, 2015.
- [3] Sequeiros, H., Tiago O., ve Manoj A. T. “The impact of IoT Smart Home Services on Psychological Well-Being,” *Information Systems Frontiers*, 24.3, 1009-1026, 2022.
- [4] Mahmud, S., Ahmed, S., ve Shikder, K., “A Smart Home Automation and Metering System Using Internet of Things (IoT),” *1st International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, 451–454, 2019.
- [5] Mittal, Y. vd. “A voice-controlled multi-functional Smart Home Automation System,” *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 1– 6, 2015.
- [6] Pan, M.S. ve Chen, C.-J., “Intuitive Control on Electric Devices by Smartphones for Smart Home Environments,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 11, 1-14, 2016.
- [7] <https://emlakkulisi.com/akilli-ev-sistemleri-ev-hayatini-kolaylastiriyor/294855> (Erişim 20.11.2022)
- [8] <https://www.haberler.com/yerel/akilli-ev-hayati-kolaylastiriyor-4579331-haberi/> (Erişim 18.11.2022)
- [9] Bădică, C., Brezovan, M. ve Bădică, A. “An overview of smart home environments: architectures, technologies and applications,” *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 1036, 78–85, 2013.



- [10] Hamernik, P. , Tanuska, P. ve Mudroncik, D. “Classification of Functions in Smart Home” *International Journal of Information and Education Technology*, vol. 2, no. 2, 149-155, 2012.
- [11] Alaa, M. Z. vd. “A Review of Smart Home Applications Based on Internet of Things,” *Journal of Network and Computer Applications* Vol.97, 48- 65, 2017.
- [12] Bektaş, E “Yeni Ürün Olarak Akıllı Evler: Tüketicilerin Satın Alma Niyetlerinin Teknoloji Kabul Modeli Çerçevesinde Araştırılması”, *Yayınlanmamış Doktora Tezi*, Bursa: Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2016.
- [13] <https://emlakkulisi.com/buyukyalida-akilli-ev-sistemleri-ile-yeni-nesil-yasam-alani-sunuluyor/663011> (Erişim 19.11.2022)
- [14] Pinsonneault, A., ve Kraemer, K. L. “Survey Research Methodology in Management Information Systems: An Assessment”, *Journal of Management Information Systems*, 10, 75-105, 1993.
- [15] Salant, P., ve Dillman, D. A., *How to Conduct Your Own Survey*, New York: John Wiley and Sons, 1994.
- [16] Arıkan, R., “Anket Yöntemi Üzerinde Bir Değerlendirme.” *Haliç Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* 1.1 , 97-159, 2018.
- [17] Fowler, J. ve Floyd J. *Improving Survey Questions: Design and Evaluation*, Vol. 38, Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 1995.
- [18] Levy, P. S., ve Lemeshow, S., *Sampling of Populations: Methods and Applications*. 3rd ed., New York: John Wiley and Sons, 1999.
- [19] Davis F. D. “Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology”, *MIS Quart*, 13:319-339, 1989.
- [20] Venkatesh V ve Davis, F.D. “A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies”. *Management Science*, 46(2):186-204, 2000.



YERE NÜFUZ EDEN RADAR SİSTEMİNDE ANTEN POLARİZASYONU YARDIMIYLA HEDEF CİSİMLERİN GEOMETRİK NİTELİKLERİNİN KESTİRİMİ

Merve Nur Dutğun^{1*}, Ahmet Serdar Türk²

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Türkiye

ORCID ID:0000-0001-7719-3523, nur.dutgun@std.yildiz.edu.tr

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Türkiye

asturk@yildiz.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Bu makalede, Yere Nüfuz eden Radar (YNR) sisteminde anten polarizasyonu ve hedef cisim geometrisi arasındaki ilişki incelenmiştir. YNR sisteminde boyutsal uzunlukları birbirine yakın (küp, kare, vb.) ya da ince silindirik (tel, boru, vb.) yapıları gömülü nesnelerin radar polarizasyonu kullanılarak geometrik açıdan ayırt edilebilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda öncelikle, 3-boyutlu CST Studio Suite (student ed.) elektromanyetik benzetim yazılımı kullanılarak toprak altı bistatik YNR kurgusu tasarlanmıştır. Tasarım dört farklı şekilsel boyuttaki (ince uzun dikdörtgen prizma, silindir, küp ve küre) gömülü hedef nesne ile güncellenerek her biri için benzetim sonuçları elde edilmiştir. Ardından, polarizasyon ile hedef şekli arasındaki ilişkiyi analiz edebilmek adına gömülü hedef nesne yapısı için hedef nesne doğrultusunun ve anten tarama doğrultusunun radar polarizasyon yönüne paralel ve dik olduğu iki farklı senaryo incelenmiştir. Dört farklı geometrik boyuttaki gömülü cismin her birine dair iki farklı senaryoda elektromanyetik benzetimi sonucunda kaydedilen A-tarama verileri derlenerek, polarizasyon ve gömülü nesne şekli arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yere nüfuz eden radar, Işıma polarizasyonu, Geniş bantlı Bow-tie anten.

1. Giriş

YNR (Yere Nüfuz Eden Radar, Ground Penetrating Radar, GPR) sistemi elektromanyetik (EM) dalga yayılımı kullanılarak yer altında gömülü ya da yüzey arkasında görünmeyen nesnelerin tespiti için kullanılan, yakın menzilli bir RADAR (Radio Detection and Ranging) sistemidir [1]. EM dalgalar ilerlediği ortamda, farklı bir elektriksel geçirgenlik ya da iletkenlik ile karşılaştığında yansır veya saçılır. YNR sistemi EM dalgaların bu davranış şekline dayanarak yeraltı veya yüzey arkasındaki elektriksel geçirgenlik ve iletkenlik gibi ortam parametrelerinin değişimine neden olan hedef nesnenin varlığını, şeklini ve konumunu tespit etmeye çalışır [2]. Bu yöntemler EM dalgalarını kullanarak herhangi bir kazı ya da delme sürecini içermediği için tahribatsız muayene (Non-Destructive Testing, NDT) tekniği olarak sınıflandırılır [3]. Günümüzde YNR sistemleri, yolların ve tünellerin kalite analizi, binaların ve yapıların tahribatsız muayenesi, yer altı askeri ve jeolojik incelemeler (kara mayınları, boru ve kabloların tespiti v.b.) olmak üzere geniş uygulama alanına sahiptir [2].

YNR sisteminde EM dalgayı üretme ve yansıyan-saçılan dalgaları algılama işleminin tek noktada bir anten ile sağlandığı kurgu monostatik yöntem olarak adlandırılır. Verici ve alıcı olarak farklı noktalarda konuşlu iki antenin kullanılması durumu ise, bistatik yaklaşımdır [3]. YNR sistemi ile hedef tespitinde incelenecek alan, antenler ile taranarak bölgenin yüzey altı görüntüsü elde edilmeye çalışılır. Bu süreçte A-tarama, B-tarama ve C-tarama olarak adlandırılan üç tür tarama verisi toplanır. Yansıyan ve saçılan EM dalgalar alıcı anten tarafında alınarak menzil profili çıkarılır. Menzil profili antenin bulunduğu konumdaki yüzeyin arkasına dair ipuçları taşıyan 1-boyutlu sinyaldir ve A-tarama görüntüsü olarak adlandırılır. Ardından antenlerin konumları düz bir hat boyunca adım adım ilerletilerek 1-boyutlu A-tarama işareti oluşturulur. Tarama eksenini boyunca

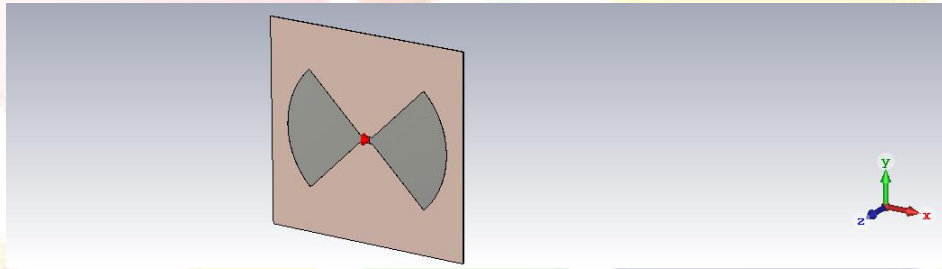


toplanan A-tarama görüntüleri, antenlerin ilerletildiği hat doğrultusu boyunca yan yana getirilerek 2-boyutlu B-tarama (radargram) görüntüsüne ulaşılır. B-tarama grafiği ölçümü yapılan alanın uzay-zaman görüntüsüdür. Yerin altında gizlenmiş dielektrik sabiti veya iletkenliği, ortamdan farklı olan nesnelerden kaynaklanan yansımalar 2-boyutlu B-tarama ekranında tespit edilebilir. Örneğin; yer altı katmanları düz çizgi şeklinde iken, gömülü cisimler (boyut ve derinliğiyle orantılı yayvanlıkta) parabolik çizgiler biçiminde görülür. 3-boyutlu veri olan C-tarama görüntüsü ise, 2-boyutlu B tarama işaret matrislerinin arka arkaya sıralanması ile ortaya çıkarılır [2], [4-5].

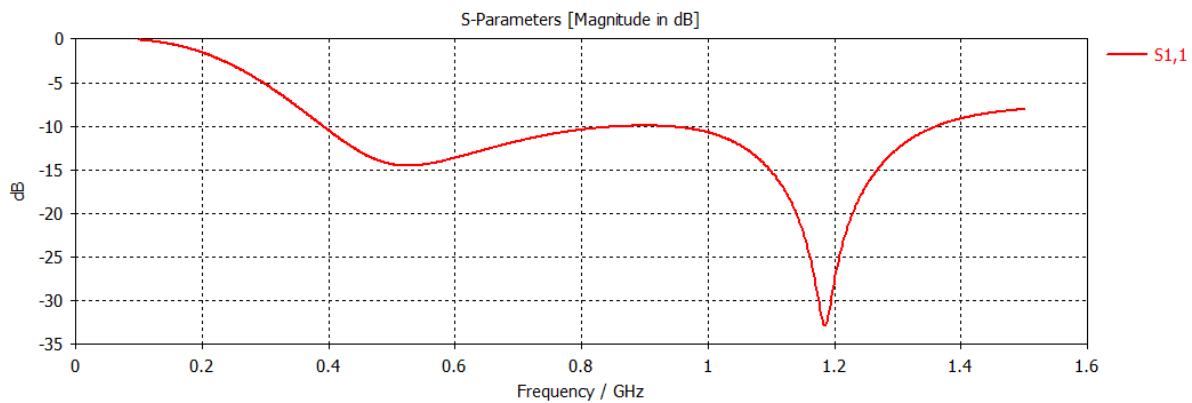
2. Bistatik YNR Sistemi Tasarımı

Bu çalışmada, YNR sisteminde radar polarimetrisi özelliğinden yararlanılarak ince-uzun silindirik ve toparlak küre-küp yapısında gömülü hedeflerin ayırt edilebilmesi amacıyla CST yazılımı vasıtasıyla bistatik YNR kurgusu tasarlanmış ve EM analizler gerçekleştirilmiştir. Dört farklı geometrik boyuttaki gömülü hedef nesnenin eklenmesi ile her hedef nesne için benzetim sonuçları elde edilmiştir.

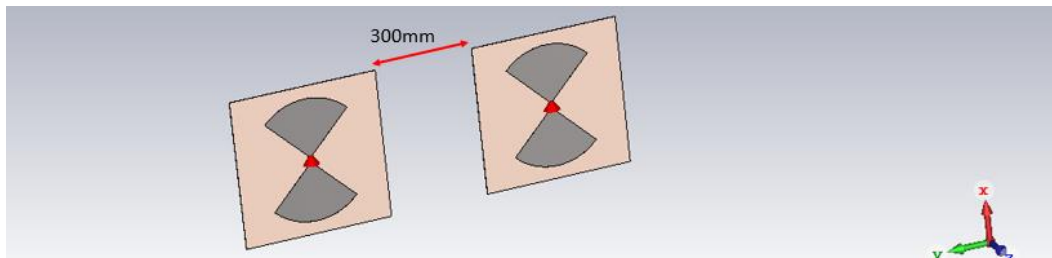
Bistatik YNR sistemi tasarımı için özdeş iki adet geniş bantlı bowtie anten kullanılmıştır. Kullanılan anten yapısı ve antene ait S_{11} grafiği Şekil 1 ve Şekil 2’de yer almaktadır. Bistatik yöntemden faydalanmak amacıyla alıcı anten görevini üstlenecek ikinci bir antenin eklenmesi sonucu elde edilen YNR kurgusu ve antenlere ait S_{11} (giriş geri yansıma) ile S_{21} (iletim kuplajı) grafikleri Şekil 3 ve Şekil 4’ de verilmektedir. Verici ve alıcı antenler arasındaki uzaklık 300 mm’dir.



Şekil 1: Bowtie anten geometrisi

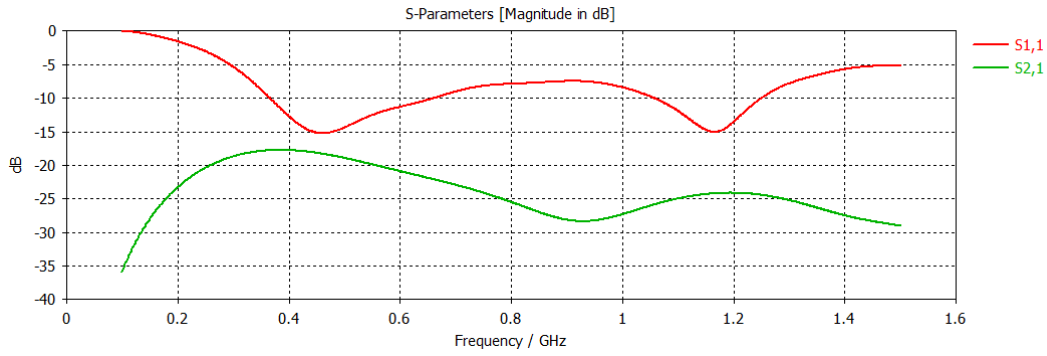


Şekil 2: Bowtie antenin S_{11} giriş geri yansıma karakteristiği



Şekil 3: YNR sistemi verici ve alıcı anten dizilimi



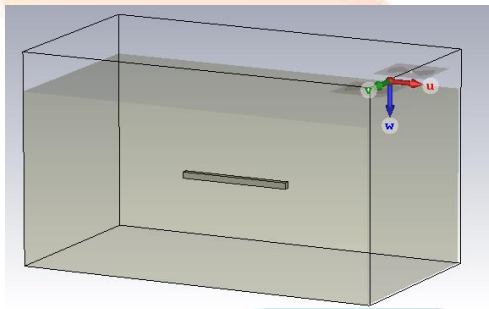


Şekil 4: YNR sistemi anten tasarımına ait S_{11} ve S_{21} parametreleri

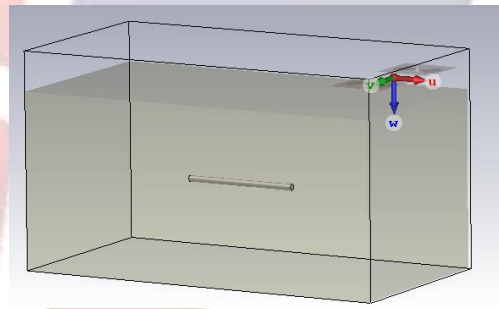
Tasarlanan YNR sisteminde hedef nesnenin gömülü olduğu tarama bölgesi malzemesi kuru kum (dry sandy soil) olarak seçilmiştir. Antenler tarama bölgesinin yüzeyinden 200 mm yukarıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Kuru kum havuzu uzunluk, genişlik ve yükseklik olarak sırasıyla 3m x 1.6m x 1.4m boyutlarındadır. Kuru kum havuzunun ortam dielektrik geçirgenliği $\epsilon_r = 2.53$ 'tür.

Gömülü hedef nesneler 1400 mm derinliğe sahip kuru kum havuzun yüzeyinden 700 mm derilikte yer almaktadır. Gömülü hedef nesneler mükemmel iletken (perfect electric conductor, PEC) olarak seçilmiştir. Analiz edilen dört farklı geometrik şekildeki gömülü hedef nesneler ve bu nesnelere ait boyutsal bilgiler aşağıda listelenmiştir.

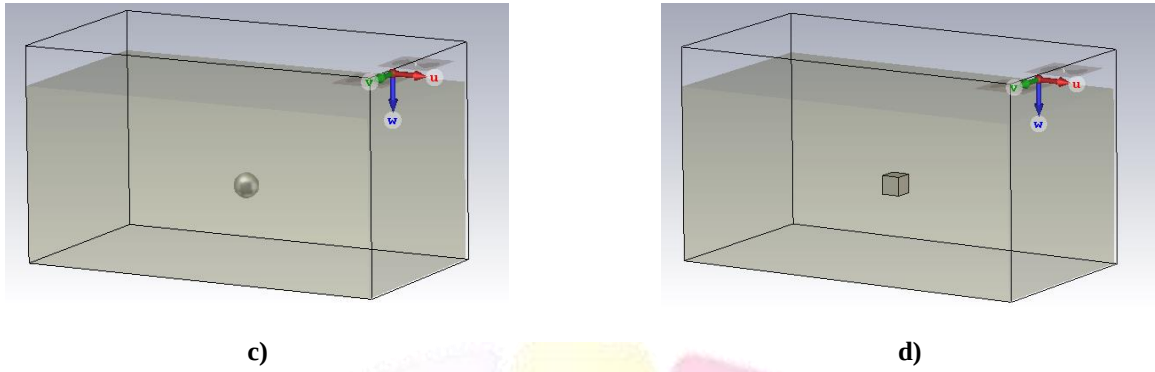
- Dikdörtgen prizma şekilli gömülü hedef nesne olarak boyutları uzunluk, genişlik ve yükseklik olarak sırasıyla 900mm x 600mm x 400mm ölçülerinde metal çubuk kullanılmıştır (bkz. Şekil 5(a)).
- Silindir yapıli gömülü hedef nesne olarak uzunluğu 900 mm çapı 50 mm metal boru kullanılmıştır (bkz. Şekil 5(b)).
- Dairesel kesitli gömülü hedef nesne için çapı 200 mm olan metal küre kullanılmıştır (bkz. Şekil 5(c)).
- Kare kesitli gömülü hedef nesne için boyutları uzunluk, genişlik ve yükseklik olarak sırasıyla 150mm x 150mm x 150mm ölçülerinde metal küp kullanılmıştır (bkz. Şekil 5(d)).



a)



b)



Şekil 5: YNR sistemi benzetim kurgusu; (a) İnce uzun dikdörtgen kesitli çubuk (b) Dairesel kesitli silindirik boru (c) Metal küre (d) Metal küp

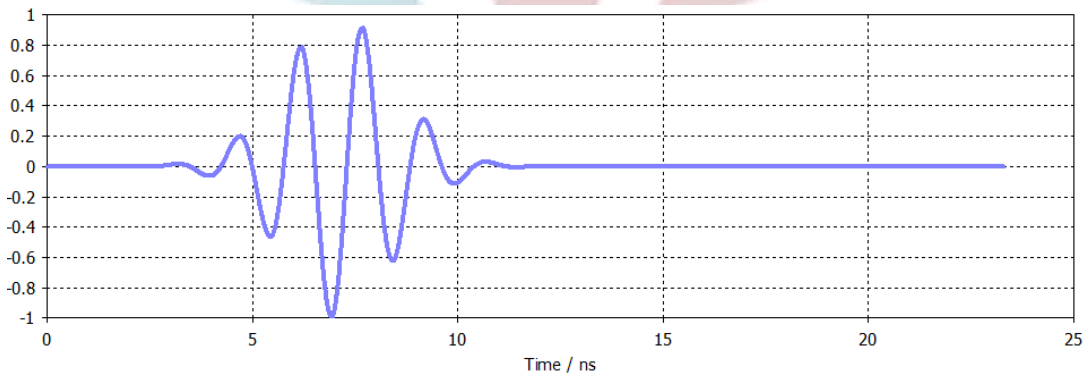
3. Bulgular ve Tartışma

YNR sisteminde polarizasyon ile hedef şekli arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek amacıyla, her bir gömülü hedef yapısı için hedef cismin doğrultusunun anten polarizasyon yönüne paralel ve anten polarizasyon yönüne dik olduğu iki farklı senaryo tasarlanmıştır. YNR sisteminde gömülü hedef nesne ilk olarak anten polarizasyonuna uyumlu, polarizasyon yönüne paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır. Antenler de bu yöne paralel olacak şekilde tarama bölgesini adım adım taramaları sonucu polarizasyon yönüne paralel gömülü hedef tespiti simülasyonu tamamlanmıştır. Tasarlanan bistatik YNR sisteminde kullanılan bowtie anten yatay (horizontal, H) polarizasyona sahiptir. Bu sebeple birinci senaryo için antenler yatay polarizasyonda tarama yapmaktadır. Daha sonra, antenler 90 derece döndürülerek polarizasyon yönü, gömülü hedef nesnenin doğrultusuna ve tarama yönüne dik olacak biçimde güncellenmiştir. Bu sayede ikinci senaryo olan anten polarizasyon yönüne dik gömülü hedef tespiti simülasyonu tamamlanmıştır, yani antenler dikey (vertical, V) polarizasyonda tarama yapmaktadır.

Dört farklı fiziksel yapıdaki gömülü hedef nesnelerin her biri için iki senaryonun da EM benzetimi yapılmak suretiyle, VV ve HH polarizasyonları ile hedef şekli arasındaki ilişkinin temel analizi gerçekleştirilmiştir.

Antenler 3000 mm uzunluğundaki kuru kum havuzunu 100 mm'lik adımlar ile tarayarak gömülü hedef nesneyi tespit etmeye çalışmaktadır. Her bir adımda elde edilen benzetim sonucu 1-boyutlu işaretler ve A-tarama görüntüsü olarak kaydedilir. CST ile gerçekleştirilen bistatik YNR sistemi simülasyonu 28 adet A-tarama görüntüsü hesaplanarak tamamlanmıştır. Anten tarama konumunun adım adım ilerletilmesi ile elde edilen 1-boyutlu A-tarama sonuçları birleştirilip yeniden düzenlenerek 2-boyutlu YNR radargramı (B-tarama görüntüsü) oluşturulmuştur.

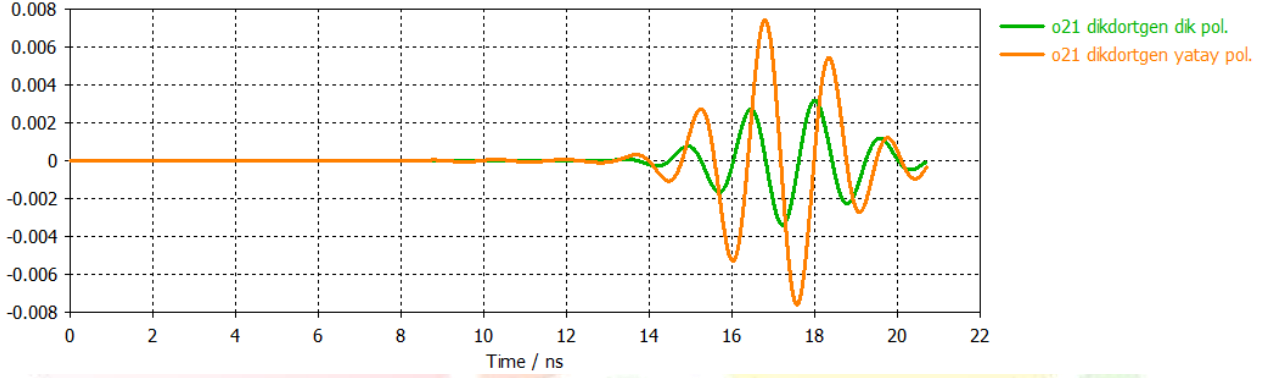
0.4 GHz ile 0.9 GHz bandında gerçekleştirilen benzetimlerde giriş sinyali olarak 1 W nominal tepe güç değerine sahip Gaussian dürtü (impulse) dalga formu kullanılmıştır. Verici anten tarafından ışınan Gaussian dürtü işareti Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6: Verici antenden ışıyan dürtü işareti

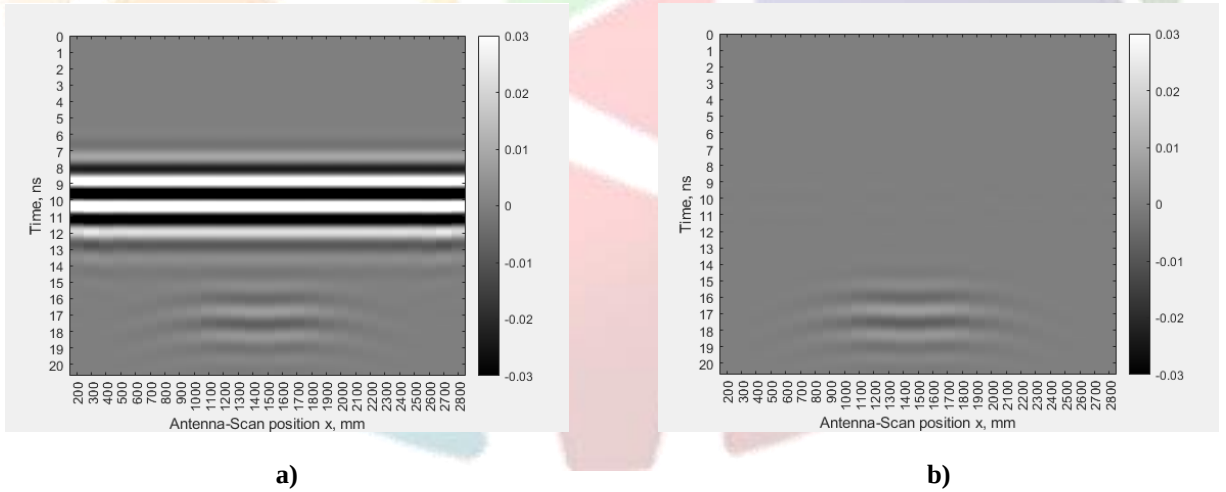
3.1. Dikdörtgen Kesitli Uzun Prizma Yapılı Gömülü Hedef Nesneye Ait Benzetim Sonuçları

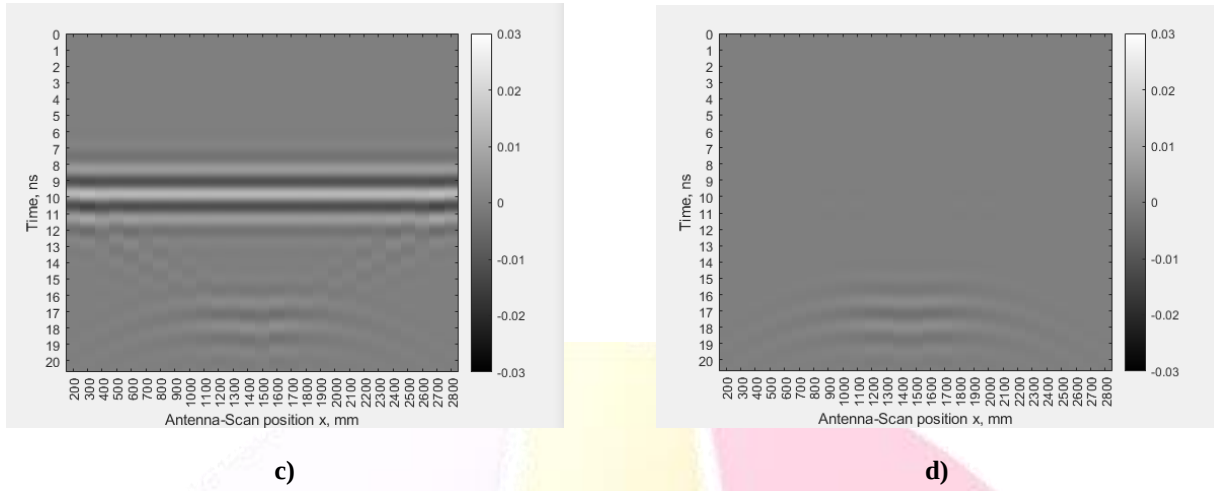
Gömülü hedef nesnenin dikdörtgen kesitli prizma formundaki metal uzun çubuk olduğu bu tasarımda, hedef nesnenin anten polarizasyon yönüne paralel olduğu yatay polarizasyonda tarama ve hedef nesnenin anten polarizasyon yönüne dik olduğu düşey polarizasyonda tarama olmak üzere iki farklı senaryonun benzetimi yapılmıştır. Simülasyon sonucunda, cismin tam üzerinde iken alınan A-tarama verileri (vericiden alıcıya iletilen) Şekil 7’de sunulmaktadır. Elde edilen A-tarama verilerinin birleştirilmesi sonucu oluşan B-tarama görüntüleri ise, *surface* formatında Şekil 8’de çizilmiştir.



Şekil 7: Gömülü hedef nesnenin metal çubuk yapıda olduğu durumda A-tarama VV ve HH benzetim sonuçları

Uzun metal çubuk olan hedef nesne için antenin yatay ve düşey polarizasyonlarda yaptığı taramanın benzetimleri sonucunda elde edilen A-tarama verileri incelendiğinde, ince metal çubuğun anten polarizasyon yönüne paralel olduğu yani antenin yatay polarizasyonda tarama yaptığı durumda gömülü ince metal çubuktan yaklaşık 2.5 kat daha güçlü (düşeye nispeten) yankı (echo) sinyalleri alındığı görülmektedir.



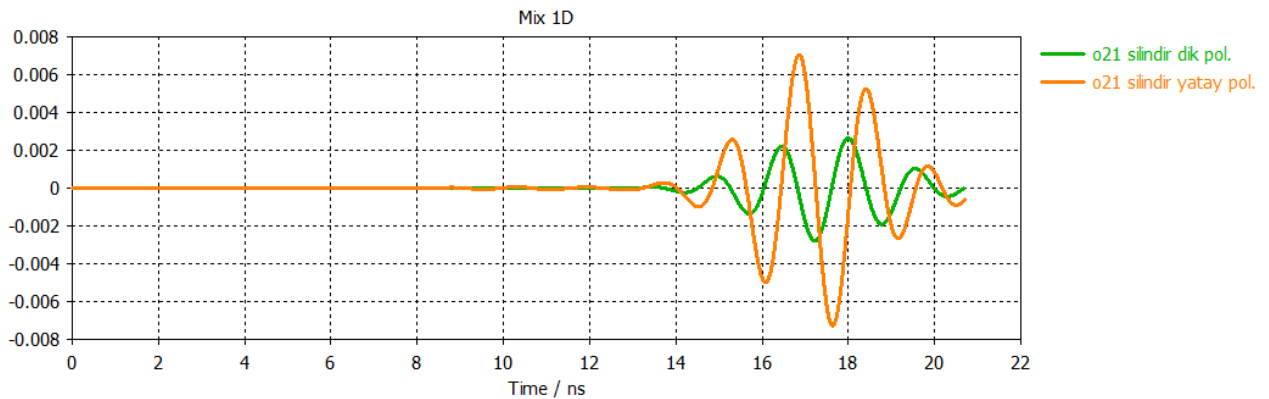


Şekil 8: Gömülü hedef nesnenin dikdörtgen prizma formda olduğu bistatik YNR sistemi için; (a) Anten sisteminin yatay polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsü (b) Anten sisteminin yatay polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsüne arka plan çıkarma işlemi uygulanması (c) Anten sisteminin dikey polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsü (d) Anten sisteminin dikey polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsüne arka plan çıkarma işlemi uygulanması

3.2. Dairesel Kesitli Silindir Yapılı Gömülü Hedef Nesneye Ait Benzetim Sonuçları

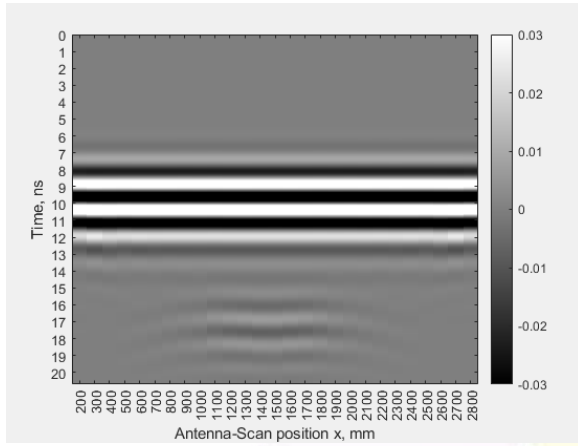
Gömülü hedef nesnenin silindirik yapıdaki ince metal çubuk olduğu bu durum için, hedef nesnenin anten polarizasyon yönüne paralel olduğu yatay polarizasyonda tarama ve hedef nesnenin anten polarizasyon yönüne dik olduğu dikey polarizasyonda tarama olmak üzere iki farklı senaryonun benzetimi yapılmıştır. Simülasyon sonucunda, cismin tam üzerinde iken alınan A-tarama verileri (vericiden alıcıya iletilen) Şekil 9’da sunulmaktadır. Elde edilen A-tarama verilerinin birleştirilmesi sonucu oluşan B-tarama görüntüleri ise, *surface* formatında Şekil 10’da çizilmiştir.

A-tarama verileri incelendiğinde, gömülü metal silindir çubuğun anten polarizasyon yönüne paralel olduğu yatay polarizasyon taramasında gömülü cisimden 3 katı aşkın daha güçlü (dikeye nispeten) yankı sinyalleri alındığı görülmektedir.

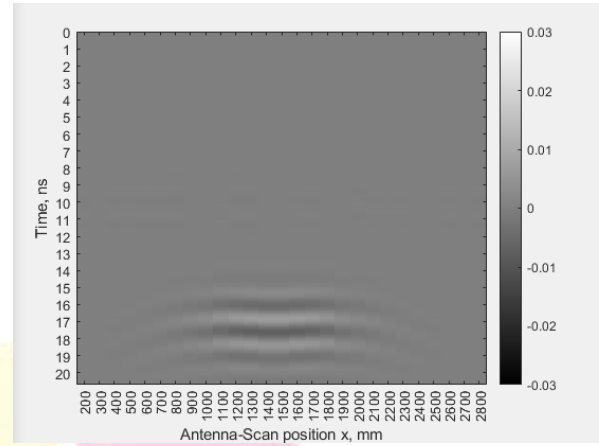


Şekil 9: Gömülü hedef nesnenin ince metal silindir olduğu durumda A-tarama VV ve HH benzetim sonuçları

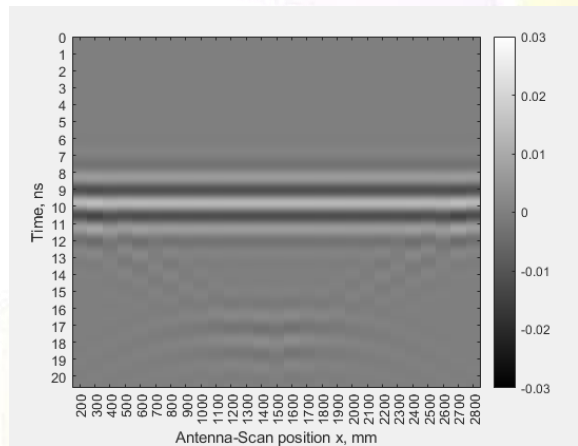




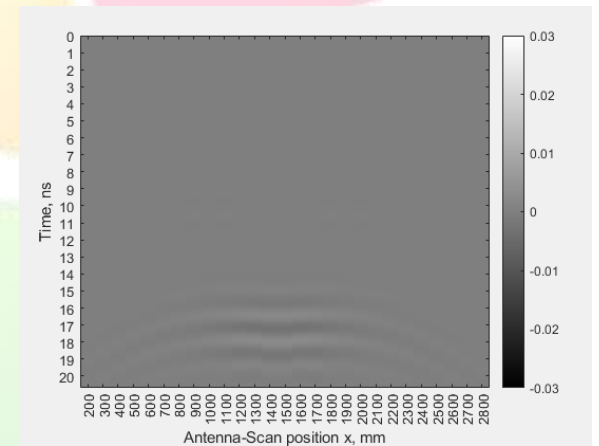
a)



b)



c)

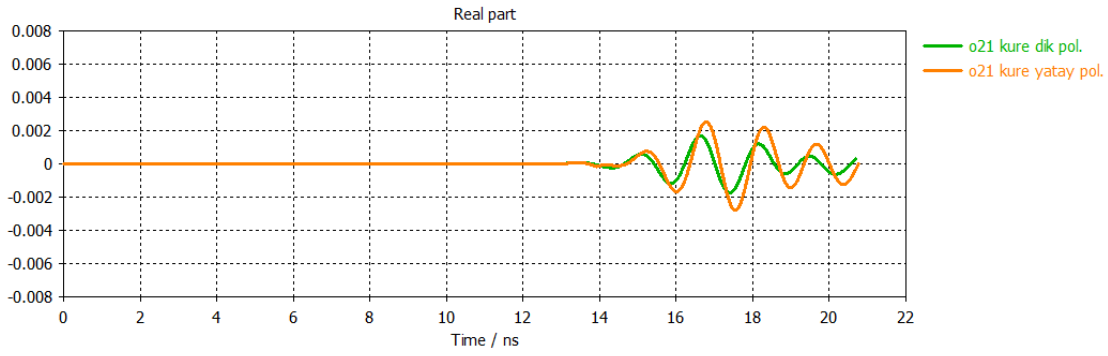


d)

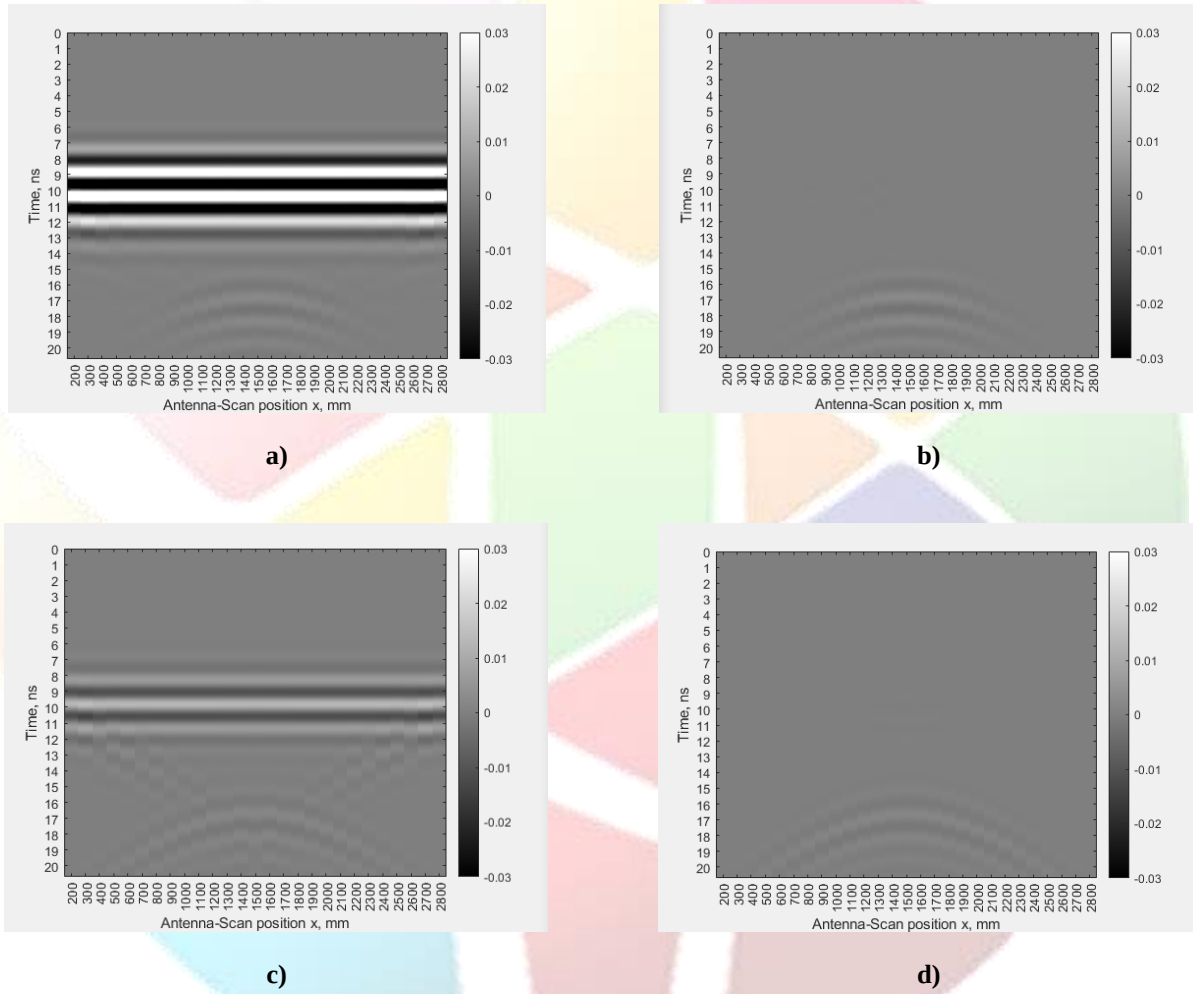
Şekil 10: Gömülü hedef nesnenin silindirik formda olduğu bistatik YNR sistemi için; (a) Anten sisteminin yatay polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsü (b) Anten sisteminin yatay polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsüne arka plan çıkarma işlemi uygulanması (c) Anten sisteminin dikey polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsü (d) Anten sisteminin dikey polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsüne arka plan çıkarma işlemi uygulanması

3.3. Küre Yapılı Gömülü Hedef Nesneye Ait Benzetim Sonuçları

Bu tasarımda gömülü hedef nesne metal küredir. Kürenin hacimsel boyutları birbirine eşit olması sebebiyle konumu ne olursa olsun anten polarizasyonu açısından kayda değer bir fark beklenmemektedir. Hedef cisim için anten tarama yönünün anten polarizasyon yönüne paralel ve dik olduğu iki farklı senaryonun benzetimi yapılmıştır. Simülasyon sonucunda, cismin tam üzerinde iken alınan A-tarama verileri (vericiden alıcıya iletilen) Şekil 11’de sunulmaktadır. Elde edilen A-tarama verilerinin birleştirilmesi sonucu oluşan B-tarama görüntüleri ise, *surface* formatında Şekil 12’de çizilmiştir. Antenin yatay ve dikey polarizasyonlarda taraması sonucu elde edilen A-tarama verileri incelendiğinde, gömülü metal küreden alınan yankı sinyallerinin birbirine çok yakın seviyede (<1.3 kat) olduğu görülmektedir.



Şekil 11: Gömülü hedef nesnenin metal küre olduğu durumda A-tarama VV ve HH benzetim sonuçları

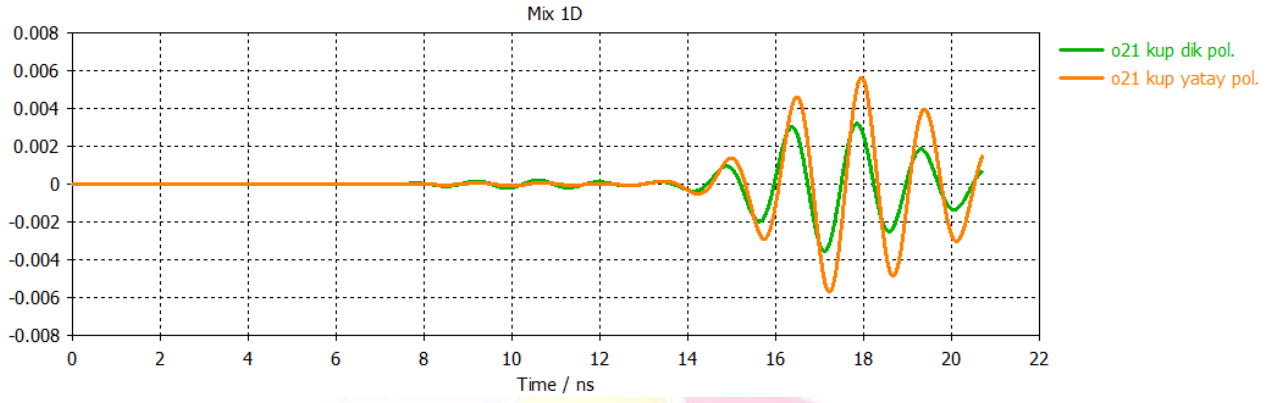


Şekil 12: Gömülü hedef nesnenin küre formda olduğu bistatik YNR sistemi için; (a) Anten sisteminin yatay polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsü (b) Anten sisteminin yatay polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsüne arka plan çıkarma işlemi uygulanması (c) Anten sisteminin dikey polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsü (d) Anten sisteminin dikey polarizasyonda tarama yapması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsüne arka plan çıkarma işlemi uygulanması

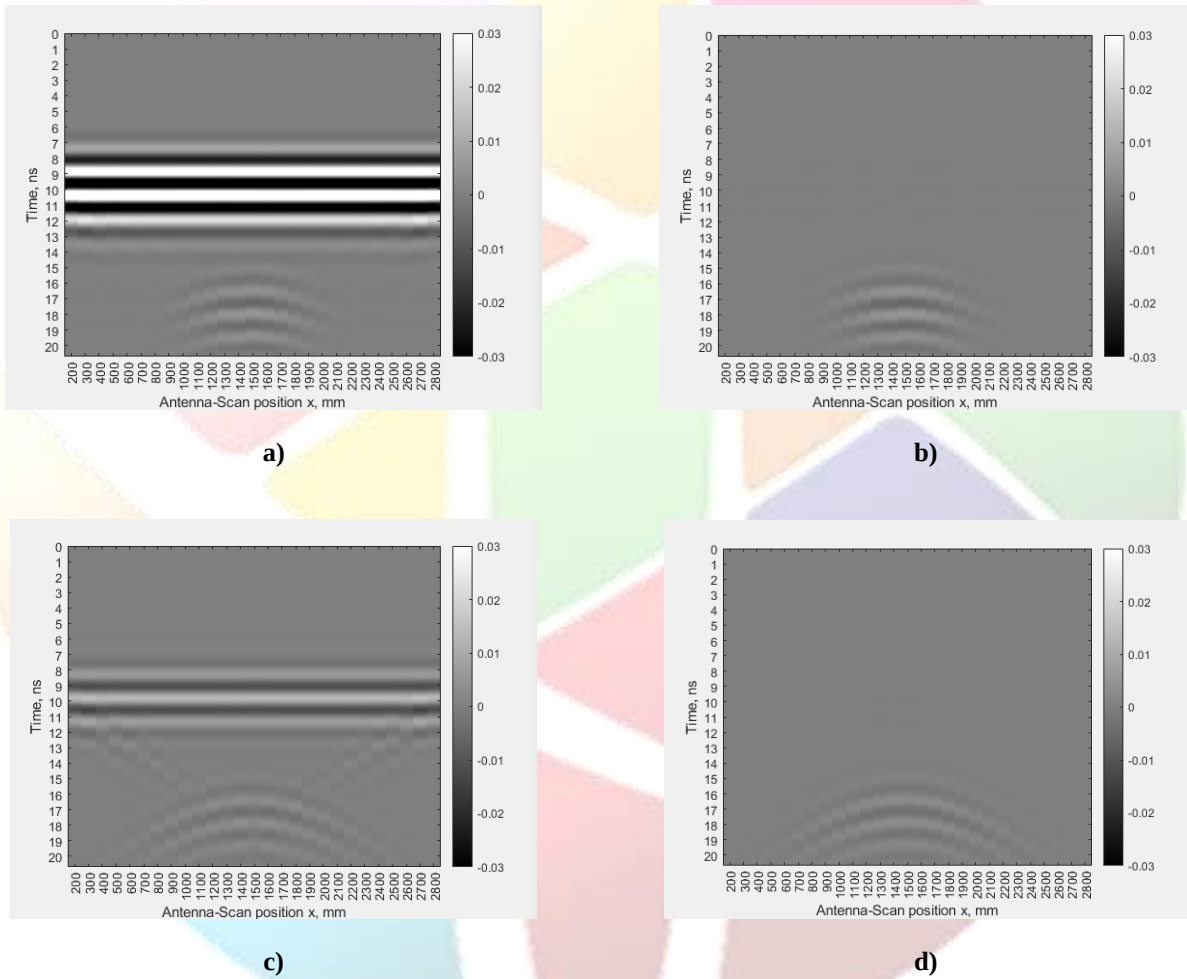
3.4. Küp Yapılı Gömülü Hedef Nesneye Ait Benzetim Sonuçları

Bu tasarımda gömülü hedef nesne metal küptür. Gömülü hedef nesne için anten tarama yönünün anten polarizasyon yönüne paralel ve dik olduğu iki farklı senaryonun simülasyonu sonucu, cismin tam üzerinde iken alınan A-tarama verileri Şekil 13'te sunulmaktadır. Elde edilen A-tarama verilerinin birleştirilmesi sonucu oluşan B-tarama görüntüleri Şekil 14'te çizilmiştir.





Şekil 13: Gömülü hedef nesnenin metal küp olduğu durumda A-tarama VV ve HH benzetim sonuçları



Şekil 14: Gömülü hedef nesnenin küp formda olduğu bistatik YNR sistemi için; (a) Anten sisteminin yatay polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsü (b) Anten sisteminin yatay polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsüne arka plan çıkarma işlemi uygulanması (c) Anten sisteminin düşey polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsü (d) Anten sisteminin düşey polarizasyonda taraması sonucu elde edilen ham B-tarama görüntüsüne arka plan çıkarma işlemi uygulanması

Metal küp en ve boy kesiti eşit geometride bir cisim olması sebebiyle, kürede de karşılaşıldığı gibi anten polarizasyonu açısından büyük farklar beklenmemektedir. Antenin yatay ve düşey polarizasyonlarda taraması sonucu elde edilen A-tarama verileri incelendiğinde, gömülü metal küreden alınan yankı sinyallerinin birbirine yakın seviyede (yaklaşık 1.5 kat) olduğu görülmektedir. Bir miktar fark çıkmasının sebebinin yatay ve düşey konumlu Bowtie antenlerin huzme

genişliklerindeki eşitsizlik olduğu düşünülmektedir. Zira, CST benzetim ortamında hesap süresi nedeniyle çözüm uzayı (toprak ortam) metrik boyutları kısıtlı tutulmuştur.

4. Sonuç

Bu çalışmada YNR sisteminde polarizasyon ile gömülü hedef nesne şekli arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Farklı hacimsel forma sahip dört adet gömülü hedef nesne için CST Studio Suite yazılımı kullanılarak bistatik YNR sistemi tasarlanmış ve anten polarizasyonunun cismin doğrultusuna paralel ve dik olduğu iki senaryo için benzetim gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, anten polarizasyonu değişmesi sonucu gömülü küresel hedef nesneden alınan radar yankı sinyalinin çok değişmediği, elde edilen verilerde kayda değer bir polarimetrik fark oluşmadığı gözlenmiştir. Dolayısıyla, YNR sisteminde polarizasyonun değiştirilmesi, geometrik yatay/düşey kesitleri biri birine eşit olan gömülü hedef nesnelerin tespitinde ayırt edici bir özellik değildir.

Bununla birlikte, hacimsel boyutları ince-uzun yapıda olan gömülü hedefler için, anten polarizasyonunun değişmesi durumunda nesnelerden alınan radar yankı işaretlerinin büyüklüklerinde önemli farklar gözlemlenmiştir. İnce-uzun silindirik cisimlerin doğrultularının anten polarizasyon yönü ile paralel olacak şekilde konumlandırılması halinde yaklaşık 3 kat daha farklı polarimetrik yankı sinyalleri alındığı görülmektedir. Bu durumda, YNR sisteminde çift polarizasyonlu tasarımın, ince-uzun yapıdaki gömülü hedef nesneler ile kare-daire kesitli cisimlerin ayırt ediciliği konusunda üstünlük sağlayacak bir özellik olduğu değerlendirilmektedir.

5. Kaynakça

- [1] Razali, M., Joret, A., “Simulation Study for Underground Object Detection Using Pulse Ground-Penetrating Radar (GPR) System”, *IEEE Student Conference on Research and Development*, Malaysia, September 2020.
- [2] Öztürk, E., “Yere Nüfuz Eden Radar Sisteminin Zaman Uzayında Sonlu Farkla Yöntemi ile Modellenmesi”, *Gebze İleri Teknoloji Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 2020.
- [3] Joret, A., Abdullah, M., “Simulation of Gpr System Design Using Cst Microwave And Matlab”, *Yanbu Journal of Engineering and Science*, Vol. 14, June 2017.
- [4] Türk, A.S., Hocaoglu, A. K., *Subsurface Sensing*, John Wiley & Sons, Inc., USA., 2011.
- [5] Orhan, M., “Çok Geniş Bantlı Radar ile Gizlenmiş Hedef Tespit ve Takibi İçin Görüntüleme Algoritmalarının Geliştirilmesi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2016.

Teşekkür

Bu çalışmada Dr. Öğr. Üyesi Alper ÇALIŞKAN’a sağladıkları destekten ötürü teşekkür ederiz.



HAFİFLETİLMİŞ MODÜLER ROBOT TUTUCU TASARIMI

Murat Onat ^{1*}, Enes Korkut ², Ortaç Akdikmen ³

¹ Toyotetsu Otomotiv Parçaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-9602-3893, onatm@toyotetsu.com.tr

² Toyotetsu Otomotiv Parçaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Türkiye

ORCID ID: 0000-0001-5867-7442, korkute@toyotetsu.com.tr

³ Toyotetsu Otomotiv Parçaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-3068-4277, akdikmeno@toyotetsu.com.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

İmalat endüstrisinde çeşitli proseslerde yer alan ve üretim sürelerine doğrudan etki eden malzeme taşıma ve aktarma işlemleri, işi yapacak operatörler için oldukça zorlu bir görev olabilmektedir. Bu zorluğun çözülmesinde robot destekli tutucuların kullanılması, operatörler tarafından sarf edilen fiziksel eforun ortadan kaldırılarak, prosese uygun ekipman tasarımı ile birlikte üretim verimliliğinin ve çalışan güvenliğinin artmasını sağlamaktadır. Ancak araç sistematigi ile birlikte değişime uğrayan iş parçaları, dinamikleşen endüstriyel üretim sistemlerinin de gelişmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle seri üretim hatlarında çalışan robotların taşıma kapasiteleri göz önüne alındığında, robot tutucu ekipmanların mümkün olduğunca hafif ve dayanıklı olması, üretim verimliliğini artırmanın yanı sıra yüksek kapasiteye sahip robot ihtiyacının da azalmasında büyük rol oynayarak, proses sürelerini olumlu etkileyecek ve üretimde verimliliğin artmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada, aynı anda iki parçayı tek bir robot tutucu ile taşıyabilecek sistemin tasarımı üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda, robot taşıma kapasitelerinin dışına çıkmadan proses gerekliliğini yerine getirebilecek robot tutucu için hem literatür araştırmaları yapılmış hem de sektörel bilgi birikiminden faydalanılarak yeni bir tasarım ortaya konulmaya çalışılmıştır. Çeşitli analizler yapılarak, tasarımda kullanılacak farklı özelliğe sahip materyaller kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalarda, başta hafiflik ve dayanıklılık olmak üzere kolay montajlanabilirlik ve prosese uygunlukları da karşılaştırılarak, optimum tasarımsal çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda bir tasarım ortaya koyulmuş ve prosese olan etkisi irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robot Tutucu, Modüler Tasarım, Hafiflik, Üretim Verimliliği

1. Giriş

Bu bağlamda tutucular, ekipman ile iş parçası arasında köprü görevi görerek bir nevi prodesteki kavrama organı olarak görev yapan aktif bağlantı elemanları olarak adlandırılabilir. Üretim ve imalat sektöründe kullanılan robot destekli tutucular, proseslerin bütünü göze alındığında tasarım çeşitliliği bakımından en fazla değişkenlik gösterebilen ekipmanların başında gelmektedir. Bunun başlıca nedenleri arasında ise prosese ait çok sayıda farklı gereksinim, çeşitli iş parçası için kullanılabilirlik ve üretim sürelerine doğrudan etki ediyor oluşu gösterilebilir. [1]

Otomotiv endüstrisi göz önüne alındığında ise, sürekli artan bir hızda yeni ürün geliştirme yarışı, seri üretim verimliliğinde hedeflenen oranların ve rekabetçi unsurların artışı, artan maliyetler karşısında üretim proseslerinde yer alan esnek ekipman sistemi tasarımının önemi artıran önemli unsurlardan bazılarıdır. [2] Yapılan bazı araştırmalarda, malzeme taşıma proses maliyetinin, toplam üretim maliyetlerine oranının %20'ye kadar ulaşabildiği görülmüştür. Bu sebeple üretim



endüstrisinin maliyetler konusunda oluşturduğu baskı, üretici firmaların maliyetleri düşürmek için sürekli geliştirici çözümler üretmesini gerekli kılmaktadır. [3]

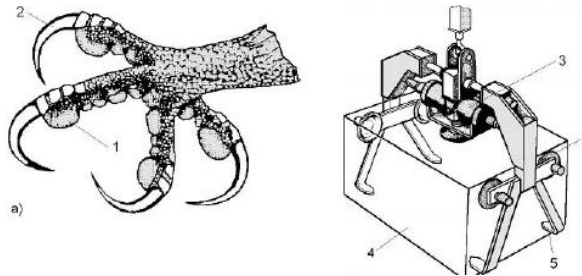
Bu bağlamda özellikle süreç planlaması dahilinde göz önüne alınacak olan tutucular, aynı zamanda mevcut ve öngörülebilir sac parçaları taşımak için yeterli esnekliği sağlamalı, montaj işlemlerinde geliştirilmiş toleranslara katkıda bulunmanın yanı sıra sık kalibrasyon ihtiyacını önemli ölçüde azaltarak ortadan kaldırmayı hedeflemeli ve artan üretim kapasitesi oranına katkıda bulunmalıdır. [2] Böylece, malzeme taşıma ekipmanlarının efektif, stabil ve malzeme taşıması sırasında zaman kazancı yaratması beklenmektedir. Bu sistemlerinin elektromekanik arayüzü incelendiğinde ise, elektronik olarak daimi geri beslemeler ile birlikte mekanik açıdan güvenilirliği ve stabilizasyonu sağlaması gerekmektedir. [4]

Otomotiv endüstrisinde pek çok fikstür ve iş parçası, robotlar tarafından proses dahilinde taşınabilmektedir. Robotları, taşıma işinde operatörler ile kıyaslandığı zaman süre bakımında çok daha efektif ve güvenli yapan etmenler olmasına rağmen, üzerinde taşıdığı ağırlık miktarının da üretim verimliliğine doğrudan etki etmesi, proses planlamasında mutlaka dikkate alınması gereken bir nitelik olmaktadır. İş parçasının ve robot tutucusunun ağırlığı doğrudan parça üretim sürecini etkilemektedir. Daha hafif tutucular parça üretim sürelerinin azalmasına olumlu katkı sağlarken, daha küçük boyutta ve görece daha ucuz robot kullanımına da imkan sağlamaktadır. Bu nedenle, robot tutucu fikstürlerinde pek çok açıdan esneklik sağlayan özel ekipmanların kullanımı önem taşımaktadır.[2]

1.1. Parça Tutucu Ekipmanların Tarihçesi ve Gelişim Aşaması

Parça tutma ve taşıma işlemi için kullanılan ekipmanların mekanik gelişim süreci incelendiğinde, 1800'lü yıllarda doğadan esinlenilerek oluşturulan mekanizmaların önemli rol oynadığı bilinmektedir. 1829 yılında F.Reuleaux tarafından hayvanlarda görülen bazı hareketlerin mekanik olarak analizi yapılmıştır.

Bunlara balıkların ağızları ve kavrama görevlerini yerine getirmek için kullanılan kuş gagaları da dahildir. Emme yoluyla kısıtlayıcı güç kullanımı da doğada yeni bir şey değildir. Bu tür teknikler fauna tarafından emme ayağı olarak kullanılır, örn. kafadanbacaklılarda. Dalış böceğinin (*Dytiscus marginalis*) erkeğinin ön ayaklarında saplı vantuz vardır. Bunları bir yüzeye uygulamak, hassas kenarlarında ince ince, yarı küresel başlıkların yayılmasına neden olur. Bunları geri çekmek, daha sonra yapışma etkisini üreten basınçta bir azalmaya neden olur. Kertenkelelerin ayak parmaklarında, yüzey pürüzlülüklerini kullanarak cam plakaları geçmelerini sağlayan yapışma lamelleri (kuru yapışma) bulunur. Aslında, örneğin boya püskürtmede veya bir nesneyi kuşatmada, kinematik ilkeleri Kuş gagaları veya fil hortumlarıyla yakından ilişkili olan birçok robot tutucu vardır. Kırılgan nesneleri tutmak için, kalamar dokunaçlarının kaslı hidrostatlarını taklit eden kavrayıcılar kullanılmıştır. Böceklerin kavrama ve çiğneme organları da etkili kavrayıcılara benzer. Balıkçığı ele alırsak (Şekil 1.1), biyolojik evrim sürecinde “karmaşık koşullar altında kavrama” sorununun çok ilginç bir şekilde çözüldüğünü görebiliriz. Balıkçıl, uçuş sırasında yüzeyleri son derece düşük sürtünme katsayılarına sahip nesneleri kavrayabilir.[1]



Şekil 1.1: Balıkçıl kuşu ve robot tutucu örneği[1]



2. Çalışmanın Amacı ve Tasarım Süreci

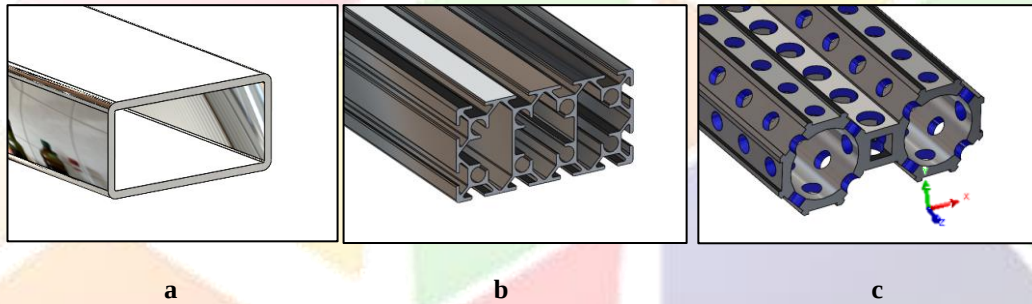
Bu çalışmada, hafifletilmiş modüler bağlantı ekipmanları ve elektropnömatik bileşenler kullanılarak, proses süresine ve maliyetine pozitif katkı sağlayacak robot tutucu tasarımı gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefin belirlenmesindeki en büyük etkenleri, robot taşıma kapasitesine bağlı olarak değişkenlik gösteren robot çalışma hızları ve buna bağlı olarak değişen robot maliyetleri olmuştur. Proses içerisinde mevcut alanın en verimli şekilde kullanılması ve gereksiz imalatın önüne geçilmesi amacıyla da, robot tutucularında esneklik sağlayan yapının tasarlanması üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Robot tutucularında esneklik ifadesi, genel anlamda “adapte olabilen yapıya sahip olan” anlamında kullanılmaktadır. Farklı boyut ve geometrideki başka iş parçalarına da adapte olabilmesi, temel anlamda bu tür robot tutucuların tasarlanmasına neden olan temel ihtiyacı doğurmuştur. Literatür çalışmaları incelendiğinde, çok farklı yapıda, farklı boyutlarda ve farklı malzemelerle robot tutucuların tasarlandığı görülmektedir. [5]

Yapılan bu araştırmalar robot tutucu olarak kullanılacak olan ekipmanın düşük maliyetli, iş parçasını deforme etmeden, ezmeden ve belirlenen kıstaslar doğrultusunda iş parçasını kavrayan verimli bir tasarıma sahip olması gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

2.1. Profil Seçimi

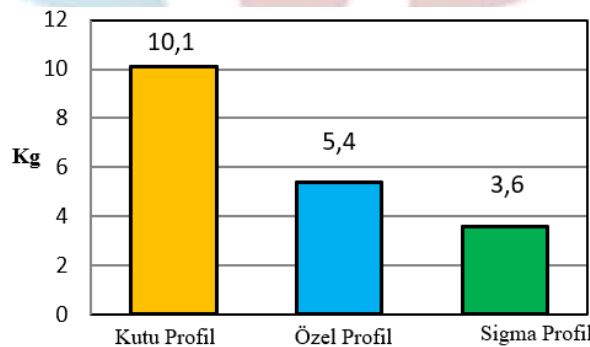
Aşağıdaki resimde yer alan görsellerde robot tutucularında kullanılan profil yapıları gösterilmiştir. Kutu profil(a), çoklu kanala sahip sigma profil(b) ve modüler özel profil (c) birbirleriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.1: Profil yapıları (a: kutu profil, b:sigma profil, c: özel profil)

Bu karşılaştırmanın yapıma amacı, istenilen dayanımda, hafif, güvenilir olduğu kadar ayar imkanı konusunda geniş tolerans sağlayacak profili bulmaktır. Bu kapsamda çalışmaya profil ağırlıklarının analiz edilmesiyle başlanılmıştır. 60x120x770 mm ebatlarında üç farklı profil türü çalışmaya dahil olmuştur. Kutu profil malzemesi olarak St37, sekiz oluklu sigma profil malzemesi olarak 6063-T5 Alüminyum alaşımı ve modüler delikli profil içinse 6063-T66 alüminyum malzeme seçilmiştir. Bu değerler imalatçı kataloglarından alınmıştır.

Tablo 2.1: Profil Ağırlık Karşılaştırması

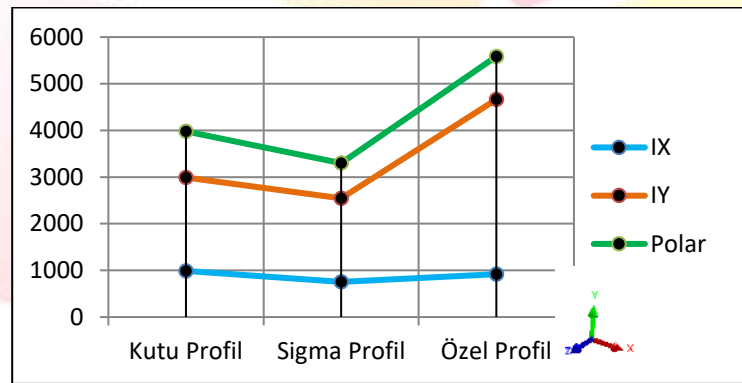


Yapılan hesaplamalar, kutu profille kıyaslandığında sigma profilin %65 modüler özel profilin ise %47 daha hafif olduğunu göstermiştir. Montaj güvenilirliği bakımından değerlendirildiğinde ise sigma profillerden, hassas konumlama yapılması gereken iş parçalarında yeterince güvenilir ve uzun soluklu sonuçlar elde edilmediği görülmektedir. Bu profillerin oluklu oluşu ve bağlantıların bu oluklardan gerçekleştirilmesi yapıda zamanla gevşeme problemleri oluşmasına, konumlama için kullanılan datum elemanlarının ise mevcut konumunu yeterince stabil bir şekilde ve süreklilik içinde koruyamamasına sebep olmaktadır. Bu sebeple, bu tür profil yapılarıyla tasarlanan robot tutucularda kalitesel devamlılık büyük risk teşkil etmektedir. Özellikle farklı parçaları aynı anda taşıyabilecek, gerektiğinde spot atmaya imkan tanıyarak zaman ve alan tasarrufu sağlaması gereken prosesler için %100 verimli olmadığı bilinmektedir.

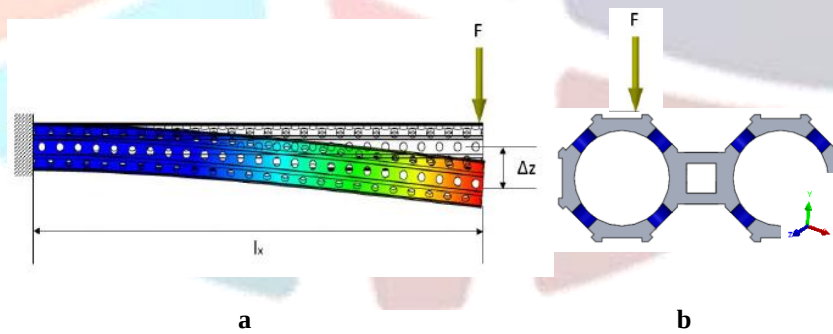
Robotlu kaynak işlemlerinden sonra proses stabilizasyonunun ve proses akışının daima sağlıklı bir şekilde sağlanması ve proste verimliliğin sürdürülebilir olmasında robot tutucu ekipmanların çok yönlülük, işlevsellik ve verimlilik gibi faktörlere sahip olması büyük önem arz etmektedir. [6]

Bu kapsamda kullanılacak olan profil seçiminde belirleyici rol üstlenmesi amacıyla kutu, sigma ve özel profil üzerinde statik analizler yapılarak dayanımları ve sehim miktarları karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.2: Profil Kesit Atalet Moment Karşılaştırması

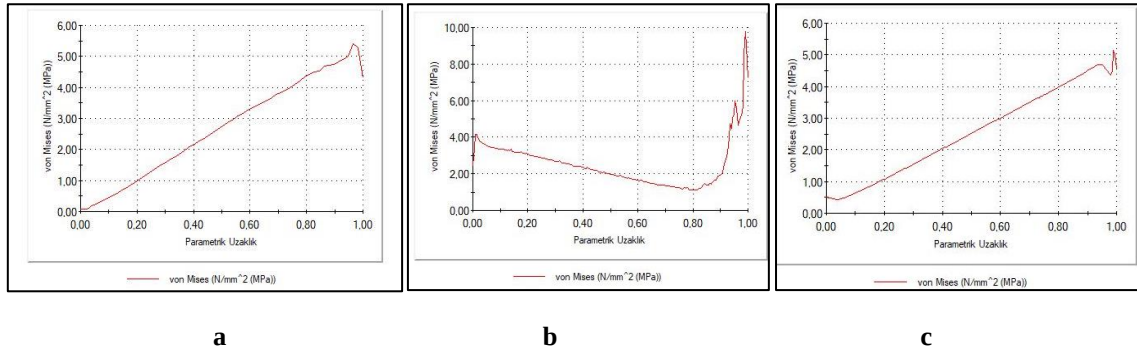


Yukarıdaki tablo 2.2’de profillere ait kesit atalet momentlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Elde edilen veriler I_x atalet değeri göz önüne alındığında yanal kuvvet moment dayanımının özel profil ve kutu profilde benzer olduğu görülmektedir. I_y atalet momenti incelendiğinde ise özel profil yapısına ait atalet momentinin kutu profile oranla yaklaşık 1,5 kat daha yüksek olduğu görülmektedir.



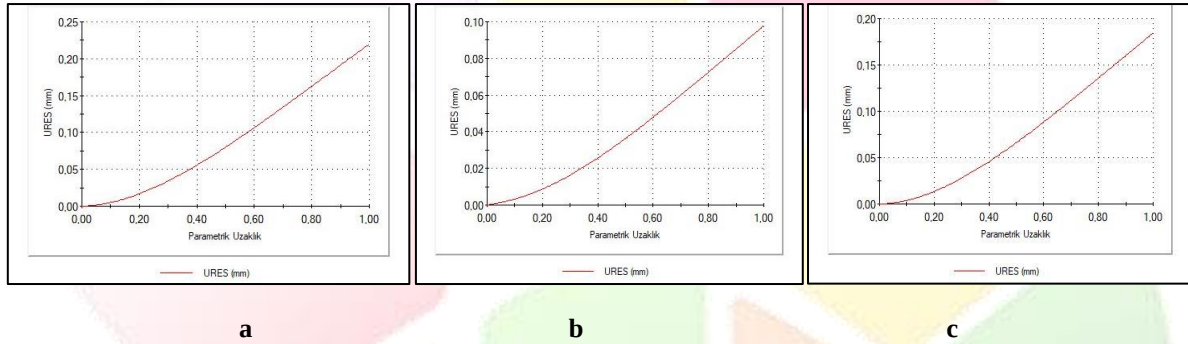
Şekil 2.2: Statik analiz uygulama görseli (a:Yan Görünüm, b:Ön Görünüm) [7]

Düşey eksen(Y) kuvvet analizleri, 770mm uzunluğuna sahip 40x120 mm ölçülerinde profiller üzerine 20kg kuvvet uygulanarak yapılmıştır.



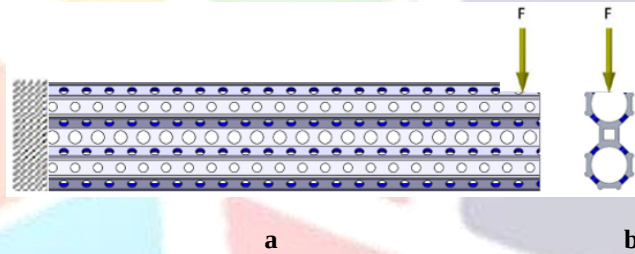
Şekil 2.3: Profil stress grafikleri (a: sigma profil, b: kutu profil, c: özel profil)

Yukarıdaki grafik incelendiğinde sigma profil üzerinde 5,5Mpa, kutu profil üzerinde 10Mpa ve özel profil üzerinde ise 4,8Mpa stress değeri oluştuğu görülmüştür.



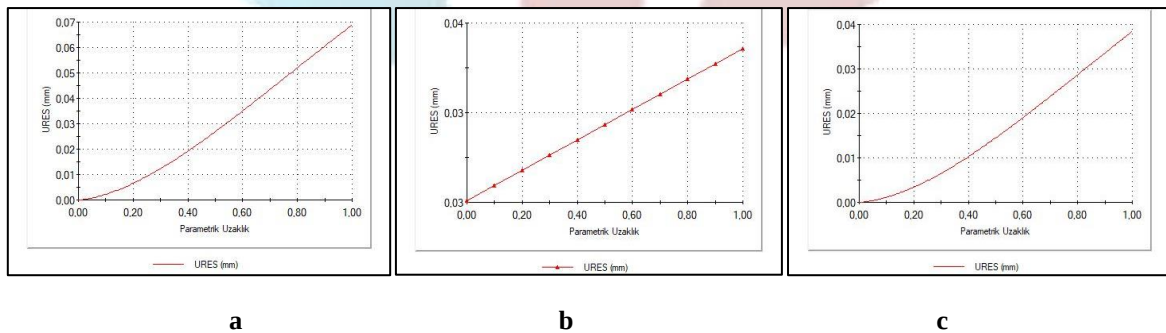
Şekil 2.4: Y eksenı profil yer değıştirme miktarı. (a: sigma profil, b: kutu profil, c: özel profil)

Uygulanan kuvvetler göz önüne alındığında, profiller üzerinde oluşan yer değıştirmenin, sigma profilde 0,28mm, kutu profilde 0,109 mm ve özel profilde 0,185mm olduğu görülmüştür.



Şekil 2.5: Yatay eksen kuvvet analizi örnek görseli (a:Yan Görünüm, b:Ön Görünüm)

Aynı metod ile bu kez yatay eksen(X) kuvvet analizleri, profil üzerine 20kg kuvvet uygulanarak tekrarlanmıştır.



Şekil 2.6: X eksenı profil yer değıştirme miktarı. (a: sigma profil, b: kutu profil, c: özel profil)



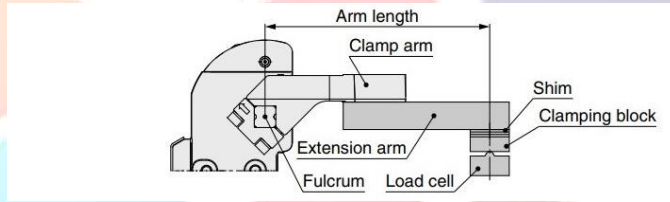
Uygulanan kuvvetler göz önüne alındığında, profiller üzerinde X eksenini doğrultusunda oluşan yer değiştirmenin, sigma profilde 0,07mm, kutu profilde 0,037 mm ve özel profilde 0,039mm olduğu görülmüştür.

Bu bağlamda yapılan araştırmalarda özellikle otomotiv imalat sektöründe kullanıma uygun, hem sigma profillerin hafiflik avantajını hem de çelik profillerin sağlamlığını bünyesinde barındırarak hassas konumlama yapabilecek yeni profil yapıları irdelenmiştir. Yukarıdaki görselde yer alan özel delikli profilin alüminyum(6063-T66) yapısı, özellikle çelik profillerle kıyaslandığında %47'lik bir hafiflik avantajı sağladığı görülmüştür. Ayrıca profil üzerinde yer alan ve hassas konumlamaya yardımcı olacak H7 toleranslı sabitleme deliklerinin varlığı ile kanallı yapısı, tasarımda esnekliğin sağlanmasında en büyük yardımcı etkenlerin başında gelmektedir. Çelik kutu profil ile kıyaslandığında yer değiştirme miktarlarında aralarında bulunun %2'lik farkın, hat kapasiteleri göz önüne alındığında problem yaratmayacak olması ekstra bir avantaj olmuştur. Özellikle aynı üretim hattı içerisinde farklı bir parça koyulması veya tasarımsal anlamda yeni ihtiyaçları karşılama gerekliliği oluşması durumunda ise, delikli özel profilin sahip olduğu modülerlik özelliği, ihtiyaçların karşılanıp sisteme adapte edilmesinde büyük avantaj sağlamaktadır. Montaj konusunda sunmuş olduğu esneklik avantajı ise, üretim endüstrisinde sürekli iyileştirme çalışmaları kapsamında pozitif adımların atılmasını da sağlamıştır. Bu kapsamda çalışmalara delikli profil yapısına adapte olarak çalışabilecek kenet grubu tasarımlarıyla devam edilmiştir.

2.2. Kenet Mekanizması Tasarımı ve Silindir Seçimi

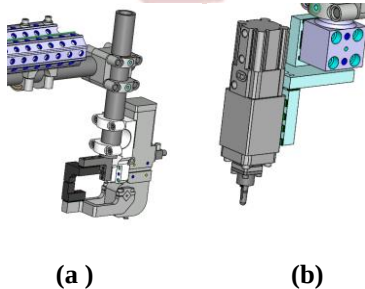
Endüstriyel uygulamalarda “Power Clamp” olarak bilinen kenetleme mekanizmaları, günümüzdeki otomotiv imalat endüstrisinde sıklıkla tercih edilen unsur haline gelmiştir. Değişen araç çeşitliliğiyle birlikte doğru orantılı olarak gelişen parça tasarımları göz önüne alındığında ise kaynaklı fiktür uygulamalarında minimum alandan maksimum verim elde edecek kenetleme mekanizmalarının kullanımı önem kazanmıştır. Bu bağlamda pnömatik bir şekilde tahrik edilen mekanizmanın kinematik hareketi, rijid gövdesi ve tasarım kolaylığı, iş parçasının kaynak fiktürü üzerine emniyetli ve düzgün bir şekilde konumlandırılmasını sağlamaktadır. [8]

Mekanizmanın dinamikleri incelendiğinde ise, silindirin içinde yer alan mekanik hizalama gergileri sayesinde aynı kenetleme silindiri, yapılacak olan ayarlar sayesinde farklı kaynak fiktürü ve parça tasarımlarına da uygun hale getirilebilmektedir. [9]



Şekil 2.6: Açı ayarla kenetleme silindiri örneği [10]

Açı ayarlı kenetleme silindirinin genel yapısı şekil 2.6’da gösterilmiştir. Silindir, dönme merkezine bağlı bir kenetleme kolu ve baskının son noktada iş parçasına iletileceği bir ayarlı blok içermektedir.



Şekil 2.7: Kenet silindirlerinin tasarıma entegrasyonu (a: açılı ayarlı kenet silindiri, b: pim kenetleme silindiri)

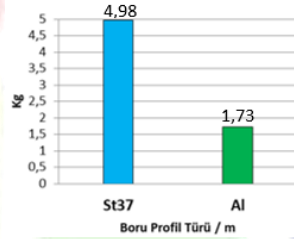
Yukarıdaki Şekil 2.7.'de, delikli alüminyum profil yapısına entegre edilen silindirler yer almaktadır. İlk görselde yer alan silindir açılı ayarlı kenetleme silindiri olarak, robot tutucu üzerinde parçanın sabit bir şekilde tutulmasını sağlamaktadır. B görselinde yer alan silindir ise pim kenetleme silindiri olarak kullanılmaktadır. Özellikle parça üzerinde hem merkezleme hem de kenetleme yapılması gereken yerlerde, hem ağırlığı azaltmak hem de kompakt bir tasarım yapısı oluşturmak için bu silindir tiplerinden tasarımda kullanılmıştır. Bu kenetleme mekanizmaları, 6063-T66 alüminyum boru ve kelepçe bileşenleri kullanılarak, delikli profile entegre edilmiştir.

2.3. Tasarım Emniyet Kontrolü

Yapılan hafifletilmiş prototip tasarımda, hem kullanılan ekipmanları netleştirmek hem de sistemin rijitliğinin robotun ani ivmelenmeli duruşları karşısında da güvenlik sınırları içinde çalışıp çalışmayacağını görmek için bazı emniyet kontrolleri yapılmıştır. Bu kapsamda sistem iki aşamalı olarak ele alınmıştır.

2.3.1. Kenet Bağlantılarının Emniyet Kontrolü

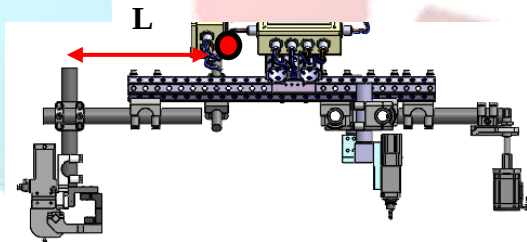
Kenet bağlantı yapıları, sistem içerisine hafifletilmiş 6mm et kalınlığına sahip Al boru kullanılarak entegre edilmiştir. Yapılan tasarımda 40mm çapında silindirik bağlantı profilleri yer almıştır. Bu bağlantı profilleri ağırlık avantajı bakımından standart çelik profiller ile kıyaslanmış ve aşağıdaki tabloya aktarılmıştır.



Şekil 2.8: St37 ve Al boru profil ağırlık karşılaştırması

Yukarıdaki şekil 2.8'e göre tasarımda kenet bağlantısı olarak kullanılan Al boru profillerin metre başına %65,2 daha hafif olduğu görülmüştür.

Ardından analizlere kenet grubunun moment analizi ile devam edilmiştir. Bu kapsamda tasarımda yer alan en uzak kenet silindir bağlantılarının aşırı ivmelenme kapsamında emniyetli olup olmayacağı araştırılmıştır.



Şekil 2.9 Prototip hafifletilmiş robot tutucu görseli

$$a = 41 \frac{m}{s^2}$$

$$m = 6,5 \text{ kg}$$

$$L_1 = 0,358 \text{ m}$$

$$F_A = m \times g = 6,5 \times 9,81 = 63,765 \text{ N}$$



$$F_G = m \times a = 6,5 \times 41 = 266,5N$$

$$M_{TOP} = (F_A + F_G) \times L = (63,765 + 266,5) \times 0,358 = 118,25 Nm$$

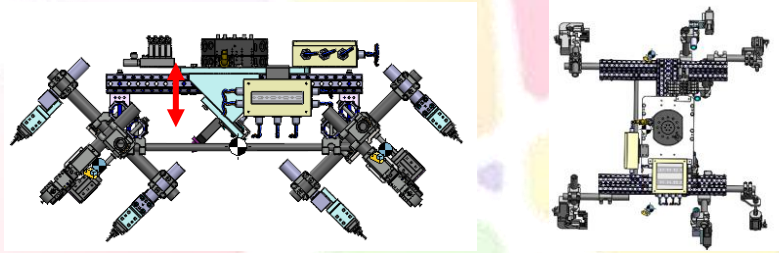
$$M_{TOP} \leq M_{MAX}$$

$$118,25Nm \leq 400Nm$$

Bu hesaplamalarda yer alan a ivme değeri, endüstriyel robotların ani duruşları sırasında oluşan ivme değeri olarak kabul edilmiştir. F_A ve F_G değerleri ise sırasıyla ağırlığın ve ivmenin yaratmış olduğu kuvvet değerleridir. Merkez eksenine göre moment alındığında, M_{MAX} değerinden küçük gelmesi gerekmektedir. Bu değer, profile ait üretici firma kataloglarında sistemin çözülmemesi için belirtilen maksimum değerdir.

2.3.2. Sistemin Emniyet Kontrolü

Sayısal hesaplamaların son kısmında, tasarımın toplam ağırlığının etkisi irdelenmiştir. Robot tutucusunun, robot ile bağlantı noktası merkez kabul edilmiş, sistemin rijitliği incelenmiştir.



Şekil 2.10 Prototip robot tutucu görseli

$$a = 41 \frac{m}{s^2}$$

$$m = 118 kg$$

$$L_2 = 0,257 m$$

$$F_A = m \times g = 118 \times 9,81 = 1157,58N$$

$$F_G = m \times a = 118 \times 41 = 4838N$$

$$M_{TOP} = (F_A + F_G) \times L = (1157,58 + 4838) \times 0,257 = 1540,86 Nm$$

$$W_{PROFİL} = 25727 mm^3$$

$$P_{ADET} = 1 Adet Profil$$

$$\sigma_{TOP} = \frac{M_{TOP}}{P_{ADET} \times W_{PROFİL}} = \frac{1540,86 \times 1000}{1 \times 25727} = 59,9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{TOP} \leq \sigma_{MAX} = 59,9 \frac{N}{mm^2} \leq 200 \frac{N}{mm^2}$$

Yapılan hesaplamalar, tasarımın emniyetli sınırlar içerisinde kaldığını göstermiştir.

3. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, hem gerekli olan dayanımı hem de hafifliği içerisinde barındıran delikli profil yapısının robot tutucularında uygun bir tasarım ile birlikte kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Yapılan çalışmalar sonucu aynı tasarımın, çelik profiller ve bağlantı elemanları yerine, delikli alüminyum profiller ile yapılması, tüm yapıyı yaklaşık %30 oranında hafiflettiği belirlenmiştir. Bu bağlamda, mevcut koşullarda parça ağırlığı dahil 118kg olan tasarımın, çelik ekipmanlar kullanıldığında üçte biri oranında artabilir oluşu göz önüne alındığında, özellikle robot kapasitelerinde de artışını zorunlu kılacaktır.



Yapılan bu tasarım ve analizler sayesinde, özellikle otomotiv endüstrisindeki seri üretim koşulları ve proses hızlandırma çalışmaları göz önüne alındığında, sistemin veriminin artmasına katkı sağlandığı görülmektedir.

4. Kaynakça

- [1] M., Gareth, H., Steinmann, R., Schunk, (2007). Robot Grippers. Robot Grippers. 1-452. 10.1002/9783527610280.
- [2] D., Motte, H., Petersson, M., Eriksson, R., Bjarnemo, (2016). Development of a computer-aided fixture design system for lightweight grippers in the automotive industry. International Journal of Design Engineering. 6. 237. 10.1504/IJDE.2016.079032.
- [3] P. D. M. S. P. Prof. A.V. Gaur, ‘AGV Based Material Handling System: A Literature Review’’, IJRSI ISSN 2321 - 2705, vol. Volume III, no. Issue IA, 2016.
- [4] C., Cronin, A., Awasthi, A., Conway, D., O’Riordan, (2020). Design and Development of a Material Handling System for an Autonomous Intelligent Vehicle for Flexible Manufacturing, 30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2021), Procedia Manufacturing. 51. 493-500. 10.1016/j.promfg.2020.10.069.
- [5] V., Patil, T., Narnaware, N., Gangwani, N.R. Raykar, (2020)., Development of flexible universal gripper for handling light weight parts of arbitrary shape, Materials Today: Proceedings, Volume 28, Part 4, Pages 2591-2598, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.705.008>
- [6] C., Castillo-Rodriguez, R., Jimenez-Moreno, (2021), Flexible Gripper, Design and Control for Soft Robotics. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)., Vol. 9, No. 4, December 2021, pp. 966~972, ISSN: 2089-3272, DOI: 10.52549/ijeel.v9i4.3325
- [7] TÜNKERS Modular Gripper System guideline. https://www.tuenkers.com/publish/binarydata/Aktuelles/2009/ENG/Modular_Gripper_Systems.pdf, (18.11.2022 Tarihinde alındı.)
- [8] C., Keller, M., Putz. (2016). Force-controlled Adjustment of Car Body Fixtures – Verification and Performance of the New Approach. Procedia CIRP. 44. 359-364. 10.1016/j.procir.2016.02.162.
- [9] R., Fritzsche, A., Richter, M., Putz. (2018). Product Flexible Car Body Fixtures with Position-dependent Load Balancing Based on Finite Element Method in Combination with Methods of Artificial Intelligence. Procedia CIRP. 67. 452-457. 10.1016/j.procir.2017.12.241.
- [10] https://ca01.smcworld.com/catalog/PowerClamp-en/mpv/PowerClamp-CKZT40_en/index.html#target/page_no=9, (18.11.2022 Tarihinde alındı.)



KAYNAKLI ÜRETİM HATTI ALTERNATİF FİKSTÜR TASARIMI

Murat Onat ^{1*}, Enes Korkut ², Ortaç Akdikmen ³

¹ Toyotetsu Otomotiv Parçaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-9602-3893, onatm@toyotetsu.com.tr

² Toyotetsu Otomotiv Parçaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Türkiye

ORCID ID: 0000-0001-5867-7442, korkute@toyotetsu.com.tr

³ Toyotetsu Otomotiv Parçaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-3068-4277, akdikmeno@toyotetsu.com.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

İmalat endüstrisinin geçtiğimiz yıllar içerisinde teknolojik, ideolojik ve rekabetçilik açısından yaşamış olduğu değişimler göz önüne alındığında ise günümüzdeki dinamik üretim şartlarının, ticari kuruluşlar üzerinde daha yüksek taleplerin oluşmasına sebebiyet verdiği görülmektedir. Bu değişim firmaları, esnekliklerini kaybetmeden artan taleplere rekabetçi bir çerçevede yanıt verebilecek yeni çözümler aramaya itmiştir. Bu çözümler ise üretim sistemine ait süreçlerde sürekli iyileştirmelerin ve geliştirmelerin yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Son yıllarda ise değişkenlik gösteren araç pazarı, özellikle artan araç ihtiyacı ve araç çeşitliliği düşünüldüğünde, elektrikli ve alternatif otonom araç talepleri doğrultusunda daha esnek bir üretime ihtiyaç duymaktadır.

Bu çalışmayla birlikte, endüstriyel üretim alanlarında kaynak fikstürü uygulamalarında kullanılabilecek alternatif ekipmanların ve fikstür kalitesini artırmak için uygulanabilecek olan yöntemlerin araştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve otomotiv endüstrisinde hızla değişim gösteren parça şekilleri değerlendirildiğinde, değişen ihtiyaçlara cevap olabilmesi için kompakt yapıdaki kenetleme gruplarının tasarımlarda kullanılarak ihtiyaçlara yönelik çözümler üretilmesi sağlanmıştır. Nominal ergonomik çalışma koşulları, literatür araştırmalarıyla irdelenerek, seri üretim hattındaki sınırlar kapsamında ergonomik açıdan çalışan sağlığını etkilemeyecek sistemin tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımların imalat süreçlerinde ve sonrasındaki seri üretim koşullarında uzun yıllar verimliliğini devam ettirebilmesi amacıyla da, korozyona karşı kaplama yöntemlerinin araştırılması, yapılan bu çalışmanın diğer araştırma basamağını oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fikstür Tasarım, Ergonomi, Kenetleme Grubu, Kompakt Silindir

1. Giriş

Fikstürler, üretimde parçayı doğru konumda tutmak için kullanılan mekanizmalar olarak adlandırılmaktadır. Üretim sanayisinde geniş kullanım alanı bulunan fikstürler, parça kalitesine, üretim maliyetlerine ve parçanın üretilebilirliğine doğrudan etki etmektedir. [1] Fikstür tasarımı konusunda son yıllarda gözle görülebilir bir ilerleme gerçekleşmiştir. Özellikle tasarım evrelerinin de yer aldığı araştırma çalışmaları, üretim verimliliğinin artması konusunda bilgisayar destekli tasarım programlarının kullanılmasında ve yaygınlaşmasında öncülük etmiştir. Bu kapsamda fikstürler, yüksek üretim adetlerine sahip seri üretim hatları da dahil olmak üzere, yüksek kalitede ve varyasyonsuz parça üretimini gerçekleştiren ekipmanlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Başlangıçta fikstürlerin büyük çoğunluğu, yalnızca bir iş parçası için imal ediklerinden, özel fikstürler olarak kabul görmekteydi. Fikstürler sahip olduğu yüksek rijitlik ve istenilen kalitesel toleransı temin edebilme konusunda pek çok avantaja sahip olsalar da maliyetleri oldukça yüksek ekipmanlardı. Ancak zaman içinde değişen ve gelişen üretim sistemleri ve özellikle esnek üretim metodlarının yaygınlaşmaya başlamasıyla birlikte fikstürler, bu değişikliğe adapte olup istenilen nitelikleri karşılayabilecek ekipmanlar olarak yaygın bir kullanım alanı bulmaya başlamıştır.[2]



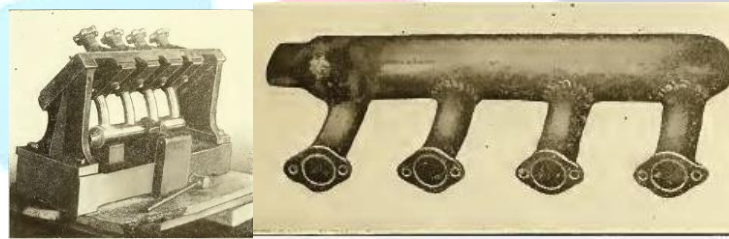
Bir ürünü optimize etmek için ürün tasarımı kadar süreç tasarımı da önemlidir. Proses sonrasında elde edilen ürünün kabul edilebilir olması için geometri değeri, boyut, tolerans vb. açılardan istenilen toleranslar dahilinde olması gerekir. Bu beklentiler göz önüne alındığında ve standartlaştırılmış üretim metodlarıyla birlikte üretim endüstrisinde artan rekabet koşulları düşünüldüğünde üretimde otomasyonel sistemlerin kullanılması önemli bir unsur haline gelmiştir. Ancak artan ürün çeşitliliği düşünüldüğünde, tek başına otomasyonel sistemlerin yeterince etkili olamaması, üretimde esneklik sağlayacak ekipmanların ön planda tutulmasını sağlamıştır. [3] Bu kapsamda, özellikle otomotiv endüstrisinde kaynak fikstürleri, otomobil kaynak hatları için kilit rol oynayarak, üretimsel unsurlara ve kalitesel sonuçlara doğrudan etki etmektedir. Pek çok fikstürün birbirine göre farklı sayıda bileşen içermesine ve farklı otomasyonel ihtiyaçları olmasına karşın, matematiksel modelleme anlamında birbirleriyle benzerlik gösteren fikstürler, üretimde özelleştirme ve ardından standartlaştırma süreçleri göz önüne alındığında çok farklı şekillerde ve ihtiyaca yönelik çözümlerle karşımıza çıkabilmektedir. [4]

2. Çalışmanın Amacı ve Tasarım Süreci

Bu çalışmaya konu olan elektrikli araç batarya parçasının boyutları, yapısal gereklilikleri ve montajlı halde içinde barındırdığı parça adetleri düşünüldüğünde standart boyutlarda ve standart ekipmanlar ile fikstür tasarlanmasına imkan tanımamaktadır. Parça üretimi için daha fazla alan ihtiyacı doğarken, proses sayıları göz önüne alındığında fikstür üzerinde konumlandırılacak kenetleme mekanizmaları ve sabitleme elemanlarının tasarımında kompakt yapıya olan ihtiyaç da artmıştır. Mevcut proje kapsamında büyüyecek olan fikstür ebatlarını ve ağırlığını karşılayarak, prosesin sorunsuzca çalışmasında kilit rol oynayacak döner tablanın da tasarımı yapılacaktır.

2.1. Fikstür Kavramı ve Tarihsel Süreci

Kaynak fikstürü temel tabiriyle, kaynağı yapılacak parçaları uygun ve doğru bir pozisyonda, kaynak süresince sabit bir şekilde tutmayı sağlayan pozisyonlama ve merkezleme işlemlerini yapan tutturma aparatlarının tümüne verilen isimdir. Özellikle otomotiv endüstrisinde kaynak fikstürü, kaynaklı üretim hatları için kilit rol oynayan unsurların başında gelmektedir [5]. Talaşlı işlem, kaynaklı birleştirme ve montaj işlemleri sırasında, ilgili parça veya parçaların işlenmesi veya bir araya getirilmesinde fikstürler kullanılmaktadır. Fikstürler, farklı şekillerde olan iş parçalarını istenilen konumlarda sabit tutarak, imalatla standart üretimi sağlamaktadır [6]. 20. yüzyılın başlarında sanayileşmenin ortaya çıkışı ile birlikte, üretimde kullanılan adama olan ihtiyaç da artmaya başlamıştır [7]. Bu doğrultuda kalitesel anlamda istenilen adetlerde üretimi karşılayabilmek için de 1900'lü yılların başından itibaren fikstür kullanımı imalat sektöründe yaygınlaşmaya başlamıştır [8].



Şekil 2.1: 1900'lü Yıllarda Kullanılan Endüstriyel Fikstür [9]

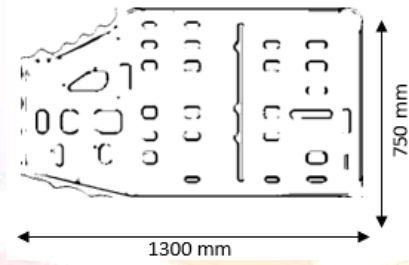
İmalat endüstrisinin geçtiğimiz yıllar içerisinde teknolojik, ideolojik ve rekabetçilik açısından yaşamış olduğu değişimler göz önüne alındığında ise günümüzdeki dinamik üretim şartlarının, ticari kuruluşlar üzerinde daha yüksek taleplerin oluşmasına sebebiyet verdiği görülmektedir. [5]. Bu değişim firmaları, esnekliklerini kaybetmeden artan taleplere rekabetçi bir çerçevede yanıt verebilecek yeni çözümler aramaya itmiştir. Bu çözümler ise üretim sistemine ait süreçlerde sürekli iyileştirmelerin ve geliştirmelerin yapılmasını zorunlu hale getirmiştir [10]. Geliştirme çalışmaları kapsamında fikstür üzerinde, otomatik sistemler ile birlikte entegre çalışabilecek daha efektif çözümler sunan yapılar kullanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda ise değişkenlik gösteren araç pazarı,



özellikle artan araç ihtiyacı ve araç çeşitliliği düşünüldüğünde, elektrikli ve alternatif otonom araç talepleri doğrultusunda daha esnek bir üretime ihtiyaç duymaktadır.[11] Bu doğrultuda kaynak işleminde kullanılacak olan fikstürün, iş parçasına ait nominal konumu ve emniyeti korumayı sunarken kolay kullanılabilirliği ve üretkenliği artırıp imalat maliyetlerini azaltacak etkilere sahip özellikte olması gerekmektedir [12].

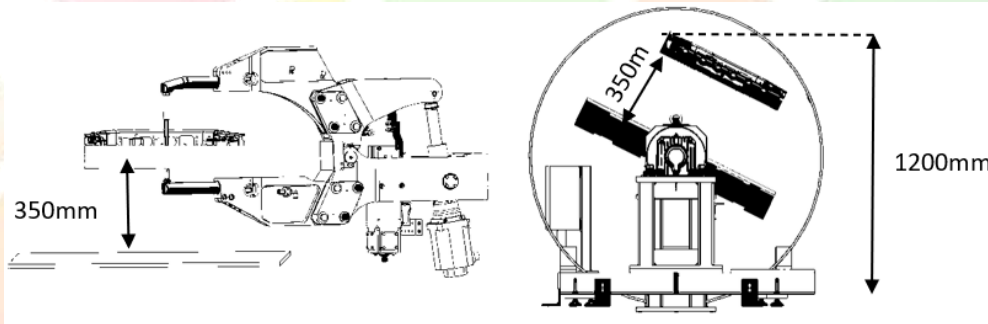
2.2. Tabla ve Taşıyıcı Profil Analizi

Elektrikli araç projesi kapsamında tasarımı yapılacak olan fikstürün boyutsal analizlerinin yapılması, proses tasarımını da doğrudan etkileyecek bir unsur olmuştur. Bu kapsamda özellikle parça boyutunun ve ergonomik çalışma koşullarının oluşturduğu sınırlamalar, minimum alandan maksimum verim elde etmeyi ve kaliteli parça üretiminde süreklilik sağlamayı gerekli kılmıştır.



Şekil 2.2: Pil kutusu boyutları

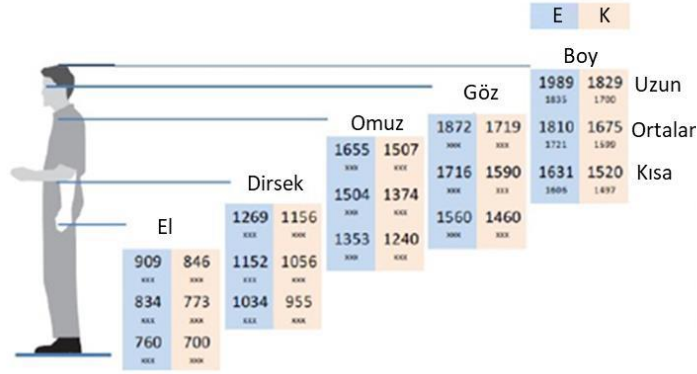
Şekil 2.2’de gösterilen parça boyutları ile birlikte kaynak yapılacak olan diğer bağlantı parçaları göz önüne alındığında, fikstür boyutlarının ergonomik sınırlar içinde kalacak şekilde ancak daha büyük olması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 2.3: Spot robotu ve set yükseklik ilişkisi

Şekil 2.3’de seri üretim hattında kullanılan spot robotu ve iş parçası birlikte resmedilmiştir. İş parçasında yer alan spotlar ve konumları sebebiyle, iş parçasının fikstür tablasından en az 350mm yukarıda konumlanması gerektiği saptanmıştır. Bu konumlama ile birlikte iş parçasının set yüksekliğinin, pozisyoner 30 derece açı ile durduğunda 1200mm olacağı öngörülmüştür. Yukarıda yapılan mevcut durum analizlerinde, kenetleme mekanizmasına ait kullanılabilecek olan alanın 350mm ile sınırlandırılması gerektiğini görülmektedir. Özellikle standart kenetleme silindirleri ile yapılan tasarımlar ve iş parçasına kaynaklanacak parçaların adedi göz önüne alındığında, standart olarak kullanılan kenetleme silindirleri yerine, kompakt yapıdaki alternatif silindirlerin tasarımda kullanılmasının hem alan hem de set yüksekliği bakımından avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmalar kavramsal tasarıma yön veren unsurların başında gelmektedir. Mekanik tasarım ve yapıya uygun kompakt silindir seçimi öncesinde kavramsal tasarıma literatür araştırmalarıyla da destek verilerek standart çalışma yüksekliği irdelenmiştir.





Şekil 2.4: Ergonomik çalışma yüksekliği antropometrik veri [13]

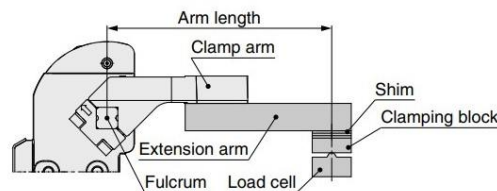
Yapmış olduğumuz araştırmalar, 165cm-185cm boy ölçüsüne sahip yetişkin bir insanın ayakta hafif ağırlık altında çalışma yaparken, çalışma yüksekliğinin 95cm-120cm olması gerektiğini göstermiştir. Yukarıdaki şekil 2.4'te ortalama insan bedenine ait uzunluk ölçüleri yer almaktadır. Bu görsele göre hafif yükte standart çalışma yüksekliği, kişinin dik durumdayken dirsek mesafe yüksekliği kadar olmalıdır. Bu ölçülerin veya standart çalışma koşullarının dışına çıkıldığında ergonomik çalışma kavramından uzaklaşmaktadır. Yapılan bu çalışmalar sayesinde kavramsal tasarım sürecine yön veren ergonomik çalışma yüksekliği, literatür araştırmalarıyla birlikte desteklenmiş ve mekanik tasarım aşamasına geçilmiştir.

2.3. Kenet Mekanizması Tasarımı ve Silindir Seçimi

Mekanik tasarım aşamasının başlangıcını, parçayı sabitleyecek olan kenet mekanizmalarının tasarım evresi oluşturmaktadır. Özellikle fiktür üzerinde çok fazla bileşen için gerekli olan kenet mekanizmaları ve spot yüzeylerinin sayısı, tasarlanacak olan kenet mekanizmalarının ve kullanılacak olan silindir seçiminin önemi artıran önemli bir unsur olmaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda "Power Clamp" olarak bilinen kenetleme mekanizmaları, günümüzdeki otomotiv imalat endüstrisinde sıklıkla tercih edilen unsur haline gelmiştir. Değişen araç çeşitliliğiyle birlikte doğru orantılı olarak gelişen parça tasarımları göz önüne alındığında ise kaynaklı fiktür uygulamalarında minimum alandan maksimum verim elde edecek kenetleme mekanizmalarının kullanımı önem kazanmıştır. Bu bağlamda pnömatik bir şekilde tahrik edilen mekanizmanın kinematik hareketi, rijid gövdesi ve tasarım kolaylığı, iş parçasının kaynak fiktürü üzerine emniyetli ve düzgün bir şekilde konumlandırılmasını sağlamaktadır. [14]

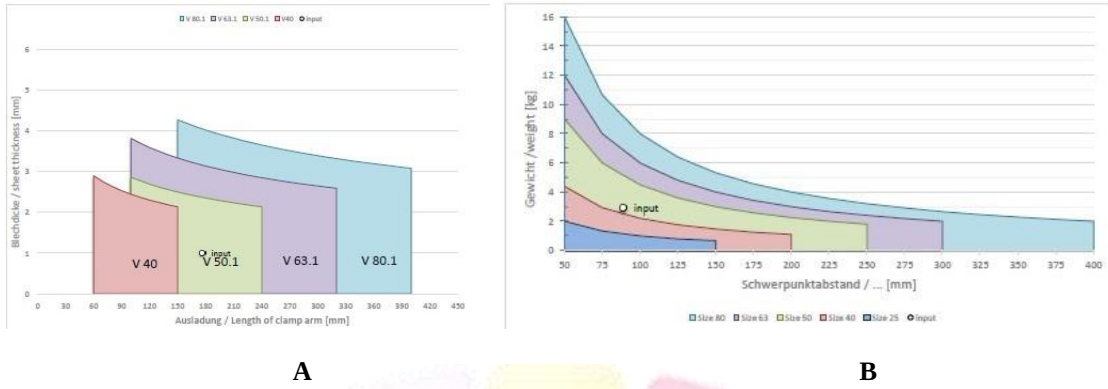
Mekanizmanın dinamikleri incelendiğinde ise, silindirin içinde yer alan mekanik hizalama gergileri sayesinde aynı kenetleme silindiri, yapılacak olan ayarlar sayesinde farklı kaynak fiktürü ve parça tasarımlarına da uygun hale getirilebilmektedir. [15]



Şekil 2.5: Açı ayarla kenetleme silindiri örneği [16]

Açı ayarlı kenetleme silindirinin genel yapısı şekil 2.6'da gösterilmiştir. Silindir, dönme merkezine bağlı bir kenetleme kolu ve baskının son noktada iş parçasına iletileceği bir ayarlı blok içermektedir.





Şekil 2.6: Power klemp seçim grafikleri [17]

Bu projede gerçekleştirilen üç boyutlu tasarım uygulamalarında, parçaya uygun kenetleme mekanizmasının seçiminde ve tasarlanmasında yukarıdaki Şekil 3'te yer alan teknik standartlardan faydalanılmıştır. Şekil 2.6'da yer alan A görseli, iş parçasının kalınlığı ve tasarlanan kenetleme kolunun uzunluğu baz alınarak oluşturulmuş bir grafiği içermektedir. B görselinde yer alan grafikte ise kenetleme kolunun ağırlığı ve ağırlık merkezinin dönme merkezine olan mesafesi baz alınmıştır. Bu projede kullanılan kenetleme sistemleri, bu iki grafikte yer alan verilerin birbiriyle harmanlararak tasarlanmasıyla oluşturulmuştur. Özellikle parça üzerinde hem merkezleme hem de kenetleme yapılması gereken yerlerde, hem ağırlığı azaltmak hem de kompakt bir tasarım yapısı oluşturmak için bu silindirler tasarımda kullanılmıştır.

2.4. Bloklara Kaplama Uygulaması

Yapılan imalatların ardından paslanma olmaması adına ekstra uygulama adımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Parçaların oksijen ile temasının önüne geçerek kalitesel anlamda devamlılığı sağlamak adına çeşitli uygulamalar, endüstriyel üretim alanlarında uygulanmaktadır. Yapılacak olan işlem, uygulamaya özgü ihtiyaçlar doğrultusunda belirlenmelidir. Özellikle kaynak fişstürleri göz önüne alındığında vernik uygulamalarının yaygın olduğu bilinmektedir. Ancak vernik işlemi, komponentlerin karışım miktarına, uygulama yöntemine ve işlemi yapacak olan operatöre göre oldukça farklılık gösterebilmektedir. Düzgün uygulanmadığı takdirde vernik işlemi, başarılı bir yüzey kaplaması oluşturamamaktadır.

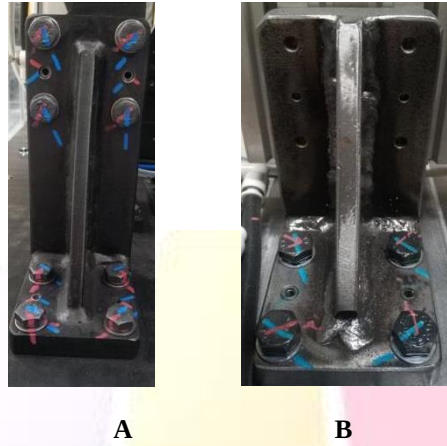


Şekil 2.7: Başarısız yüzey vernik uygulaması ve paslanma başlangıcı

Özellikle parça toleranslarının önem kazandığı uygulamalarda vernik işleminin, uygulamaya bağlı olarak çok çeşitli kalınlıklarda yüzey katmanı oluşturması, hassasiyet gerektiren bölgeler için uygulanabilir olmamaktadır. Bu sebeple yeni yüzey kaplama yöntemi olarak siyah kaplama araştırılmıştır. Siyah kaplama mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan bir yüzey kaplama işlemidir. Demir ve oksijen moleküllerinin birbirleriyle oluşturduğu Fe_3O_4 bileşiği, siyah kaplama olarak adlandırılmaktadır. 80 yılı aşkın süredir çeşitli ticari uygulamalarda uygulandığı parçadaki yüzey korozyonunun önlenerek yüzey kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlaması amacıyla kullanılmaktadır. [18] Diğer kaplama yöntemlerinin aksine siyah oksit kaplama uygulamasında, oksijen molekülleri yüzey materyali ile etkileşime geçerek kimyasal olarak yeni bir yüzey



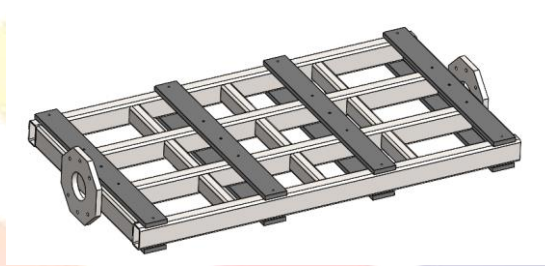
oluşmasını sağlar. Bu uygulamanın en büyük avantajı ise kaplama yapılan parçalarda herhangi bir şekilde parça toleransına olumsuz etki oluşturmamasıdır. Uygulama işlemi sonrasında yüzeyin 1-2 mikron aralığında bir kalınlığa sahip olduğu bilinmektedir. [19]



Şekil 2.8 Siyah kaplama(A) ve vernik uygulama(B) görselleri

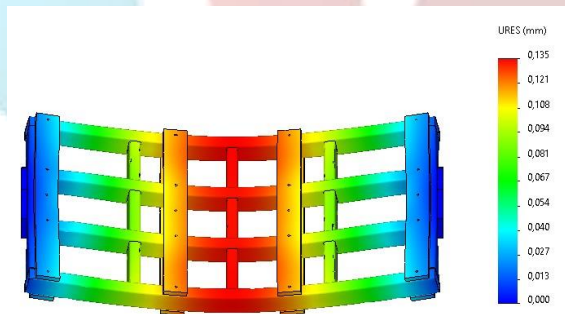
2.5. Tabla Konstrüksiyon Tasarımı ve Analizi

Tasarım aşamasının son kısmını, fikstürün montajlanacağı profil yapısının tasarımı ve üzerine koyulacak fikstür ağırlıkları gözetilerek gerçekleştirilen statik analiz hesabı oluşturmaktadır. Bu kapsamda kaynak hatlarında yaygın olarak kullanılan fikstür montaj konstrüksiyonu, ihtiyaç duyulan boyutlara göre genişletilerek, proje kapsamında talep edilen ihtiyaca uygun tasarım yapılmıştır.



Şekil 2.9 Konstrüksiyon tasarımı

Fikstür tasarımları incelendiğinde, bitmiş haldeki fikstürün maksimum 450kg'lık bir ağırlığa sahip olacağı görülmektedir. Tasarımı yapılan konstrüksiyon yapısının, özellikle altlı üstlü iki adet fikstürü taşıyıp taşıyamacağı, yapılan analizler ile birlikte netliğe ulaşmıştır.



Şekil 2.10 Konstrüksiyon tasarımı sehim analizi



Analiz süresince elde edilen geribildirimler sayesinde konstrüksiyon yapısı geliştirilerek maksimum 0,14mm'lik sehim oluşturacak yapının tasarlanmıştır. Bu sayede fiktür ve konstrüksiyon arasındaki uyum sağlanarak imalat aşamasına geçilmiştir.

3. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, endüstriyel üretim alanlarında kaynak fiktürü uygulamalarında kullanılabilecek alternatif ekipmanların ve fiktür kalitesini artırmak için uygulanabilecek olan yöntemlerin araştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve otomotiv endüstrisinde hızla değişim gösteren parça şekilleri değerlendirildiğinde, değişen ihtiyaçlara cevap olabilmesi için kompakt yapıdaki kenetleme gruplarının tasarımlarda kullanılmasına dair önemin artacağı ön görülmektedir. Yapmış olduğumuz çalışmalarda, aynı fiktür üzerinde parça boyutlarında ve/veya kaynaklı parça adetlerinde meydana gelen artışların, ergonomik olduğu kadar kaynaklanabilirlik bakımından da uygunluğu analiz edilmiştir. Ergonomik çalışma sınırları ve bu sınırların çalışanlar üzerindeki olumsuz etkileri araştırılarak tasarımlar sırasında bu literatür verilerinden faydalanılmıştır. Yapılan bu çalışmayla birlikte, seri üretim hattının dinamiklerine uygun, istenilen ihtiyaçlara cevap olabilecek olan kaynak fiktürü tasarlanmıştır. Nominal ergonomik çalışma koşullarına, fiktür kenetleme grubu tasarımlarında açılar ayarlı kenetleme silindirleri kullanılarak ulaşılmıştır. Yapmış olduğumuz siyah kaplama uygulamaları sayesinde ise fiktür üzerindeki parçaların oksijen ile teması önlenerek parçanın paslanmasının önüne geçilmiş ve imal edilen fiktürün kalitesel değerinin artması sağlanmıştır.

Yapılan bu tasarım ve analizler sayesinde, özellikle otomotiv endüstrisindeki seri üretim koşulları ve proses hızlandırma çalışmaları göz önüne alındığında, sistemin veriminin artmasına katkı sağlandığı görülmektedir.

4. Kaynakça

- [1] H., Wang, Y., Rong, H., Li, P., Shaun, (2010). Computer aided fixture design: Recent research and trends. Computer-Aided Design. 42. 1085-1094. 10.1016/j.cad.2010.07.003.
- [2] M. Mhaske,. M. Metkar,. D. Hiwase. (2015). Design and Analysis of Welding Fixture for Tacking and Welding of Inner Boom of Loadall Handler. IJRMET Vol. 5, Issue 2, 94-98.
- [3] M., Vural, H.F., Muzafferoglu, U.C., Tapici. (2007). The effect of welding fixtures on welding distortions. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 20.
- [4] Sha, Z. H., Chen, C. C., Zhang, S. F., Liu, Z., & Mao, J. F. (2010). Study on Automobile Welding Jig Rapid Design System Based on Parametric Technology. Advanced Materials Research, 156–157, 396–399. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.156-157.396>
- [5] Shaa, Z., Chen, C., Zhangb, S., Liu, Z. Ve Mao, J., (2010) Study on Automobile Welding Jig Rapid Design System Based on Parametric Technology - Advanced Materials Research ISSN: 1662-8985, Vols. 156-157, sf 396-399
- [6] M. Koca, “Bilgisayar destekli fiktür tasarımı ve analizi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [7] K. Venkataraman, Design of jigs, fixtures and press tools. West Sussex, İngiltere: John Wiley & Sons, 2015, ss. 19-239.
- [8] C. Karahasanoğlu ve B. Altınok, “Kaynak işleminde kullanılan ilave donatılar – kaynak teknolojisi,” Kaynak Teknolojisi 3. Ulusal Kongresi, İstanbul, Türkiye 2001, ss. 321-331.
- [9] E. Vial, Gas torch and thermit welding, 1. baskı, New York, Amerika Birleşik Devletleri: McGraw-Hill, 1921, ss. 221-230.
- [10] Ünlükal, E.,(2007).” Otomotiv Sanayinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Kalitesinin Artırılması”,İstanbul Teknik Üniversitesi Malzeme ve İmalat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, sf. 6-9



- [11] A. Kampker, G. Bergweiler, A. Hollah, K. Lichtenthäler, ve S. Leimbrink, “Design and testing of the different interfaces in a 3D printed welding jig,” 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, c. 81, ss. 45–50, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.03.009.
- [12] M. Vural, H. F. Muzafferoglu, ve U. C. Tapici, “The effect of welding fixtures on welding distortions,” Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, c. 20, ss. 511–514, 2007.
- [13] Volvo Group, 2017. Volvo Ergonomics Directive. Gothemburg: Volvo Group.
- [14] C., Keller, M., Putz. (2016). Force-controlled Adjustment of Car Body Fixtures – Verification and Performance of the New Approach. Procedia CIRP. 44. 359-364. 10.1016/j.procir.2016.02.162.
- [15] R., Fritzsche, A., Richter, M., Putz. (2018). Product Flexible Car Body Fixtures with Position-dependent Load Balancing Based on Finite Element Method in Combination with Methods of Artificial Intelligence. Procedia CIRP. 67. 452-457. 10.1016/j.procir.2017.12.241.
- [16] https://ca01.smcworld.com/catalog/PowerClamp-en/mpv/PowerClamp-CKZT40_en/index.html#target/page_no=9, (18.11.2022 Tarihinde alındı.)
- [17] Tünkers Modular Gripper System guideline. https://www.tuenkers.com/publish/binarydata/Aktuelles/2009/ENG/Modular_Gripper_Systems.pdf, (18.11.2022 Tarihinde alındı.)
- [18] R.W., Farrell. Blackening of ferrous metals. Met Finish. 2007;105(10):390–396.
- [19] S., Ooi, P., Yan, R., Vegter. (2018). Black oxide coating and its effectiveness on prevention of hydrogen uptake. Materials Science and Technology. 35. 1-14. 10.1080/02670836.2018.1530425.



ND; YAG DARBELİ LAZER İLE AA7075 KAYNAK PROSES GELİŞTİRİLMESİ

O. N. Asan ^{1*}, F. Turgut ², B. Erdoğan ³

¹ Logos Kimya Teknolojileri Ar-Ge Merkezi, Ankara, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-0272-100X, orkunasen@logoskimya.com

² Logos Kimya Teknolojileri Ar-Ge Merkezi, Ankara, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-9101-5288, furkan@logoskimya.com

³ Logos Kimya Teknolojileri Ar-Ge Merkezi, Ankara, Türkiye

barise@logoskimya.com

* Sorumlu Yazar

Özet

Bu araştırma çalışması, düşük yoğunluk yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde savunma ve havacılık sanayisi uygulamalarının önemli yapısal malzemelerinden olan AA7075'in darbeli lazer kaynak yöntemi ile başarılı bir şekilde kaynaklanabilirliğinin parametre çalışmasını belirleme amacı ile hazırlanmıştır. Geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilen alüminyum alaşımlar, lazer kaynak ile birleştirilenlere göre daha düşük bağlantı mukavemetine sahip olan yüksek ısıdan etkilenen bölge (IEB) çatlaması gibi olumsuzluklar içermektedir. Bunun nedeni alaşımı oluşturan ağırlıkça toplam %8 Mg ve Zn elementlerin kaynak işlemi gerçekleşirken kaynak bölgesinden buharlaşarak uzaklaşmakta olmasıdır. Lazer kaynağının ana avantajı, geleneksel kaynak yöntemlerine kıyasla düşük ısı girdisidir. Özellikle darbeli lazer kullanımı, düşük ısı girişi ve yüksek kaynak hızları avantajını sağlamaktadır ve bu nedenle çatlak oluşumu ve mukavemet kaybını ortadan kaldıran başarılı kaynak dikişleri oluşturulabilmektedir. Bu nedenle, parametre belirleme sürecinde en aza indirilmiş ortalama güç yaklaşımı kullanılarak bir kaynak işlemi geliştirmiştir. Deneyler 3 mm kalınlığında AA7075-T6 malzeme kullanılarak öncelikle alın kaynağı gerçekleştirilerek ardından 0.6 mm kalınlığında ER4043 dolgu teli kullanılarak kaynak dikiş bölgesi sağlamlaştırılmıştır. Deneyler sırasında, lazer ışın çapı, kaynak hızı, lazer gücü, lazer darbe süresi ve darbe frekansı gibi lazer kaynak parametreleri değiştirilerek kaynaklar yapılmıştır. Lazer ışın çapı büyüdükçe lazer penetrasyon derinliği azaldığı gözlemlenmiştir. Kaynak hızı arttıkça katılma çatlaklarının arttığı ve lazer darbe süresine bağlı olarak gözenekliliğin arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek darbe frekansı ile ortalama enerji girişi azaltılarak homojen kaynak dikişleri, daha az alaşım kaybı ile oluşturulmuştur. Deneyler sonrasında kaynak dikişleri metalografik olarak incelenmiştir. Radyografik muayene sonuçlarına bakılarak kaynak birleşimi, optik mikroskopik yöntemler ile çatlak oluşumları incelenmiştir. Sıvı penetren testleri ile kaynak bölgesindeki gözeneklilik ve süreklilik ve mekanik özelliklerini değerlendirme amacı ile çekme testleri gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar kaydedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum alaşım, Kaynak metali, Darbeli lazer, Işın çapı, Gözeneklilik,

1. Giriş

Alüminyum alaşımlarını kaynağı için Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW) gibi katı hal kaynağı, Metal İnert Gaz (MIG), Tungsten İnert Gaz (TIG) ve Direnç Punta Kaynağı (RSW) gibi geleneksel ark kaynakları kullanılmaktadır [1]. Havacılık ve uzay sanayisinin gelişmesi ile kaynak teknolojileri de ihtiyaçlar doğrultusunda gelişmektedir. Lazer kaynak teknolojisi endüstriyel ihtiyaçları karşılamak için büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Günümüzde Karbon Dioksit (CO₂) ve Fiber Lazer kaynaklarına ek olarak Diyot Neodimyum katkılı İtiryum Alüminyum Garnet (Nd:YAG), gibi endüstrilerde kullanılan birkaç lazer türü vardır [3]. Bunlardan Nd:YAG lazer kaynaklı birleştirme proses çalışmamızda kullanacağımız ana aracımız olacaktır.



Alüminyum alaşımların yoğunluğu çeliğin yoğunluğunun 1/3'ü kadar olmasına rağmen güçlü mekanik özelliklere sahiptir [1]. Düşük yoğunluğun yanında korozyon direnci ve yüksek mukavemet gibi üstün özellikleri alüminyum alaşımların endüstriyel kullanımındaki itici gücüdür. Bu nedenle alüminyum alaşımları, endüstriyel birleştirme yöntemlerinden olan 'kaynaklama' ile başarılı bir şekilde birleştirilmesi gelişen teknolojiler açısından büyük öneme sahiptir [9, 10]. Özellikle havacılık ve savunma alanında yaygın olarak kullanılan AA7075'in darbeli lazer kaynak makinesi kullanılarak kaynaklanması konusunda çok fazla literatürde çalışma olmaması ve var olan çalışmalarından halen birçok problemle karşı karşıya olması bizi bu çalışmayı hazırlamaya iten motivasyondur. Literatürdeki araştırmaların birçoğunda, 2 mm ve altındaki kalınlıklara sahip metalleri birleştirmek için yüksek güçlü, sürekli dalga modunda lazerler kullanılmaktadır. Önceki araştırmacılar tarafından yapılan bir çalışmada, AA7075'in birleştirmesinin kaynağında 2200 Watt maksimum güce sahip Nd:YAG lazer ve başka bir çalışmada da 4000 Watt maksimum güce sahip fiber lazer kullanılmıştır [5,6]. 7000 serisi, alüminyum alaşımlardan AA7075-T6'ya yüksek mukavemet kazandıran kimyasal elementler Al-Mg-Zn-Cu'dur. Fakat kaynak prosesi sırasında Mg-Zn elementleri kaynak bölgesinden buharlaşarak uzaklaşması ciddi mukavemet kayıplarına neden olmaktadır [4]. Daha az element kaybı için ortalama düşük güç girişi ve lazer ışınlarının penetrasyonuna bağlı kaynak mukavemeti ilişkisi bu çalışmada elde edilecek sonuçlardandır. Ayrıca, sağlamlığa katkıda bulunmak için kullanılan dolgu metalinin hızlı ergitilmesi gibi avantajları sayesinde, bu yöntem geleneksel kaynak yöntemlerinin yerini alabilir [5].

Alüminyum alaşımlarının lazer kaynağı, demir katkılı metaller ile kıyaslandığında yüksek yansıtma ve ısı iletkenliği gibi özelliklerinden dolayı zor olmaktadır [11]. Fakat lazer ışın çapı, Gauss dağılımına (1/e²) eşdeğer bir lazer ışığının enerjiyi kaynak bölgesine aktardığı bilinmektedir [11]. Buda lazer güç yoğunluğunu ışın çapı değiştirilerek bölgesel ergitme yapılabileceğini ve bu durum, lazer kaynağında yüksek ısıdan etkilenen bölgenin (IEB) daha küçük olduğu ve güçlü bir kaynak bağlantısı oluşturabilen bir anahtar deliği penetrasyon profili oluşturacaktır [7]. Bu çalışma, alüminyum alaşımlarını kaynaklamak için bir fizibilite çalışması olarak düşük güçlü Nd:YAG lazer kullanan kaynaklı AA7075-T6'nın penetrasyon derinliği, penetrasyon tipi ve mikro yapısı üzerindeki kaynak modunun, lazer darbe etkilerini belirlemektedir.

2. Lazer Işığı Malzeme Etkileşimi

Lazer ışığa maruz kalan bir malzeme üç şekilde reaksiyona girebilir: absorpsiyon, yansıma ve iletim. Nd:YAG ve CO₂, lazer ışığı elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesindedir ve bu dalga boyundaki ışık metallerde yalnızca iki atomik çapa kadar nüfuz eder [12]. Bu nedenle metaller bu radyasyona opak kabul edilebilir, bu da iletimin göz ardı edilebileceği anlamına gelir. Bu nedenle, metal bir yüzeye yönlendirilen bir kızılötesi lazer ışını yalnızca emilecek ve yansıtılacaktır. Metallerin optik davranışı genellikle iki değerle tanımlanır: kırılma indeksi (n) ve sönme katsayısı (k). Optik sabitler n ve k, belirli bir dalga boyundaki ışığın ne kadarının normal gelişte bir malzeme tarafından soğurulduğuna ilişkin bir değer olan emilimi hesaplamak için kullanılabilir. Gelen ışığın açısına göre belirli bir malzemenin absorpsiyonu, Fresnel formülünün bir yaklaşımı kullanılarak belirlenebilir [13].

$$A_{par} = \frac{4ncos\theta}{(n^2 + k^2)cos^2\theta + 2ncos\theta + 1} \quad (1)$$

$$A_{dik} = \frac{4ncos\theta}{n^2 + k^2 + cos^2\theta + 2ncos\theta} \quad (2)$$

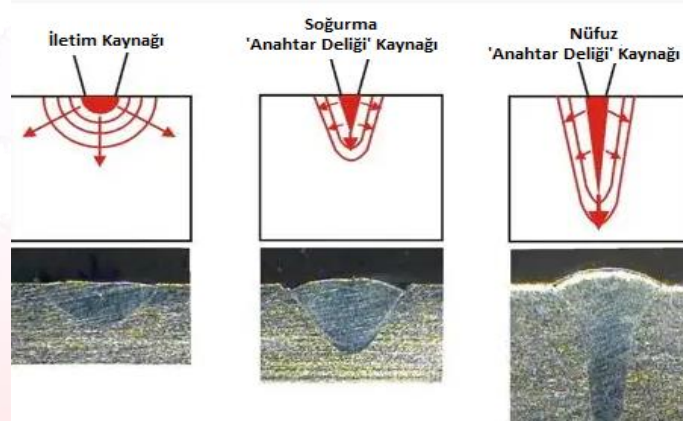
Burada, A_{par} = ışığın paralel polarizasyonla soğurulması, A_{dik} = dikey polarizasyon ile ışığın soğurulması, n = malzeme kırılma indisi ve k = malzeme sönme katsayısıdır. Denklem 1 ve 2'de gösterildiği gibi soğurma, paralel polarizasyon ışığı ve dikey polarizasyon ışığı olarak ikiye ayrılır. Lazer ışığı dairesel kullanıldığından, nihai absorpsiyonu elde etmek için denklem 1 ve 2'nin ortalaması hesaplanır. Kızılötesi lazer ışığının oda sıcaklığında metal bir yüzey üzerindeki soğurma özelliği genellikle düşüktür [12]. Alüminyumdaki Nd:YAG ışığı, yaklaşık %10 ve CO₂, ışığın



yaklaşık %5'lik bir emiciliğe sahiptir [13]. Çelikteki soğurma değerleri bunun yaklaşık iki katıdır [13,14]. Bununla birlikte, düşük soğurma değeri, lazer kaynağında bir sorun değildir, çünkü emilen enerji miktarı, daha sonra açıklanacağı gibi bir anahtar deliği oluşumu ile hızla artar [12].

2.1. Kaynağın Başlatılması

Lazer ışığı metal bir yüzeye gönderildiğinde, emilen enerji kaynak bölgesini yüzeyi ısıtmaya başlar. Isı elektronların hareketiyle birlikte yarı küresel olarak malzemeye iletilir [12]. Lazer ışınının yoğunluğuna bağlı olarak yüzeydeki sıcaklık malzemenin erime noktasına ve hatta kaynama noktasına ulaşabilir. Kaynama noktasının altında kaynak yapılırsa, kaynağa sınırlı iletim denir [12]. Bu, TIG ve MIG gibi geleneksel kaynak işlemleri için normal bir durumdur ancak ısı kaynağı olarak bir lazer ile de meydana gelebilir [12].



Şekil 1: Anahtar Deliği Profili

Metalin kaynama noktası aşılsa, süreç, şekilde gösterilen anahtar deliği kaynağı adı verilen bir şeye dönüşür. Metalin kaynama noktasına ulaşıldığında absorpsiyon hızla artar [12]. Anahtar deliği adı verilen, ışını hapseden ve ışının anahtar deliği duvarlarındaki her yansıması için enerjiyi emen, gazla dolu derin bir delik oluşturulur [12]. Anahtar deliği kelimesi, özellikle çelikte lazer kaynağı için elde edilen tipik derin ve dar anahtar deliği şekli nedeniyle kullanılır. Alüminyum kaynak yapılırken anahtar deliği daha sık ve daha geniştir ancak anahtar deliği işleminin temel özellikleri aynıdır [12]. Kaynak işlemi kararlı olduğunda, anahtar deliğindeki metal eriyik ve gaz dengededir. Bu durum sonucunda anahtar deliğinin önünde ve yanında üretilen eriyik, etrafından akar ve daha sonra katılaşır [12]. Alüminyumda bir anahtar deliği başlatmak için çelikten daha yüksek bir güç yoğunluğu gereklidir. Sözde eşik yoğunluğunun 5 ila 25 kat daha yüksek olduğu öne sürülmüştür [16].

$$I \propto \frac{T_b k}{A} \quad (3)$$

Burada, $I = [W/m^2]$ cinsinden yoğunluk, $T_b = [^{\circ}K]$ cinsinden kaynama noktası, $k = [W/m^{\circ}K]$ cinsinden termal iletkenlik ve $A =$ emicilik katsayısıdır. Nd:YAG lazerleri için alüminyumdaki eşik yoğunluğu $1-2 \text{ MW/cm}^2$ ve CO_2 lazerleri için $2-3 \text{ MW/cm}^2$ 'dir. Yoğunluk aralığı, kaynak hızına ve alaşım içeriğine bağlıdır. Yüksek miktarda magnezyum içeren alaşımlar düşük yoğunluk aralığındadır [12].

2.2. Analitik Model

Deneysel kaynak yapıldığında, yalnızca güç, hız vb. gibi normal işlem parametreleri değiştirilebilir. Deneylere dayanarak ulaşılan sonuçlar incelenir ve analizler yapılır. Analitik modelleri kullanarak, belirli parametrelerin hiçbir etkisinin olmadığını önceden göstermek mümkündür. Böylece bazı parametreler deneylerin dışında bırakılabilir ve zaman kazanılır. Deney süresinden tasarruf etmenin bir başka yolu da belirli bir sıcaklığa veya belirli bir kaynak derinliğine ulaşmak için gücün ve hızın ne olması gerektiğini önceden hesaplamaktır [12,19].



Analitik modeller, kaynak sürecini daha iyi anlamak için de kullanılabilir. Analitik olarak cevaplanan tipik kaynak soruları şunlardır: kaynağın tepesindeki genişlemenin nedenleri, ısı deformasyonunun nasıl en aza indirileceği ve kaynağın boyutlarının tahmin edilmesi. Analitik kaynak modellerinin temeli, üç boyutlu ısı iletimi için Fourier'nin sabit durum kanunu tarafından belirlenir [12].

$$q = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

Denklem x, y ve z yönlerindeki q, ısı akışının bu yönlerdeki sıcaklık gradyanı ile orantılı olduğunu belirtir. Orantılılık sabiti k, malzemenin termal iletkenliğidir. Denkleme dayanarak sabit ısı kaynakları ve hareketli ısı kaynakları için analitik modeller türetilmiştir. Sürekli bir sabit nokta kaynağı, malzemenin yüzeyine etki eden sonsuz küçük bir kuvvet, malzemeyi kaynağının sabit kaldığı bir sıcaklığa kadar ısıtacaktır [12,17,18].

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\alpha r} \operatorname{erfc} \left(\frac{r}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \quad (5)$$

Burada, $\alpha = [k/pC_p] = [m^2/s]$ cinsinden termal yayılım, $p = [kg/m^3]$ cinsinden malzemenin yoğunluğu ve $C_p = [J/kg \text{ } ^\circ K]$ cinsinden özgül ısıdır. Denklem 5'te sıcaklık, r uzaklığının ve t süresinin bir fonksiyonudur. Isı kaynağı uzun süre çalıştığında sonsuza gider [17,18]. Denklem 5 şuna indirgenir:

$$T(r) = \frac{q}{4\pi\alpha r} \quad (6)$$

Bu, yalnızca r'nin bir fonksiyonu olan sabit bir sıcaklık alanıdır. Sıradan bir metal malzemede kararlı duruma ulaşmak için gereken süre birkaç saniye mertebesinde.

Lazer ışını bir nokta kaynağı olmadığı ve genellikle ışın boyunca bir Gauss enerji dağılımına sahip olduğu için, sürekli sabit bir Gauss yüzey kaynağı için bir model elde etmek üzere nokta kaynak modelinin bir alan üzerinde entegre edilmesi gerekir [12, 19].

$$T(0,0,t) = \frac{2qA}{n\pi Dk\sqrt{\pi}} \arctan \left(\frac{2\sqrt{\alpha t}}{D} \right) \quad (7)$$

Burada $D = [m]$ cinsinden ışın çapı, $A =$ emicilik katsayısıdır. Zaman sonsuza gittiğinde denklem sabit ifadeye indirgenir.

$$T(0,0) = \frac{qA}{Dk\sqrt{\pi}} \quad (8)$$

Rosenthal, nokta kaynak çözümünü için hareketi simüle ederek $x = (x_0 + vt)$ kaynak denklemlerini geliştirdi. Kalın malzemede iletim sınırlı kaynak veya anahtar deliği kaynağı için uygun denklem, hareketli nokta kaynak denklemidir. Üç boyutlu ısı iletimine dayalıdır ve şeklinde yazılabilir [12, 19].

$$T = T_r + \frac{qv}{4\pi k\alpha} \frac{e^{(-Pe_x - \sqrt{Pe_x^2 + Pe_y^2 + Pe_z^2})}}{\sqrt{Pe_x^2 + Pe_y^2 + Pe_z^2}} \quad (9)$$

Burada $T_r = [^\circ K]$ cinsinden oda sıcaklığı $Pe_x = vx/2\alpha$ Peclet sayısıdır. İnce bir malzeme boyunca bir anahtar deliği kaynağı için sıcaklık alanını hesaplarken, hareketli hat kaynağı denklemiyle sonuçlanan iki boyutlu ısı iletimi varsayılır [19].

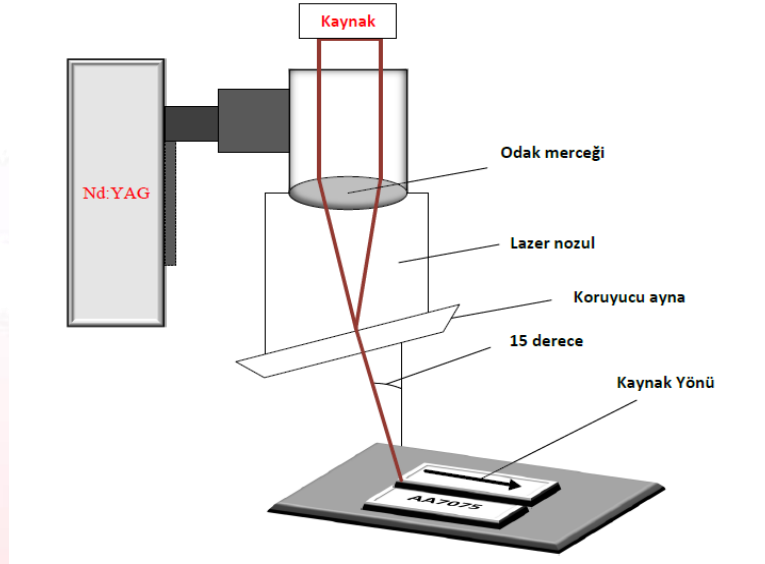
$$T = T_r + \frac{q}{\sqrt{8\pi k\delta}} \frac{e^{(-Pe_x - \sqrt{Pe_x^2 + Pe_y^2})}}{\sqrt{Pe_x^2 + Pe_y^2}} \quad (10)$$



Burada $\delta = [m]$ cinsinden iş parçasının kalınlığıdır.

3. Deneysel Kurulum

Kaynak prosesleri Şekil 2’de şematığı verilen 1064 dalga boyunda ALM 250 serisi Nd:YAG alfa darbeleri lazer makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lazer makinesinin maksimum ortalama gücü 200 watt, maksimum tepe gücü 9 kW watt, maksimum darbe enerjisi 90 jule, darbe süresi 0.5-20 ms arasında, darbe frekansı 0-100 Hz, lazer ışın çapı 0.2-2 mm ve lazer hareket hızı 0-25mm/s arasındadır.



Şekil 2: Nd:YAG lazer Kaynak Kurulumu

3.1. Deneysel Prosedür

Kullanılan ana alaşımın 7075T6’nın termal iletkenliği: $k=130 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, öz ısı kapasitesi: $C_p= 960 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$, yoğunluğu: $p=2800 \text{ kg/m}^3$, termal yayılımı: $\alpha=48.36 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, ve erime sıcaklığı: $477-635^\circ\text{C}$ arasındadır. Ayrıca 7075-T6’nın çekme mukavemeti 410-540 MPa ve akma mukavemeti 300-475 MPa arasında olup uzama yüzdesi %5-11 aralığındadır. Kullanılan dolgu teli Er4043’ün erime sıcaklığı $674-632^\circ\text{C}$ arasında olup çekme dayanımı 150N/mm^2 , akma dayanımı 80N/mm^2 ve uzama yüzdesi %12dir [2].

Kaynak plakaları alüminyum alaşım 7075 malzemeden 3 mm kalınlığında ve 50 x 100 boyutlarında plakalar şeklinde kestirilmiştir. Alüminyum alaşım 7075’in kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir [1,2,5]. Kullanılan dolgu teli 0.6 mm kalınlığındaki Er4043’ün kimyasal kompozisyonu tablo 2’de verildiği gibidir [12].

Tablo 1: AA7075 Kimyasal Kompozisyonu

Element	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
Ağırlıkça %	87.1-91.4	0.18-0.28	1.2-2	0.5	2.1-2.9	0.3	0.4	0.2	5.1-6.1

Tablo 2: ER4043 Dolgu Teli Kimyasal Kompozisyonu

Element	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
Ağırlıkça %	92.5-94	-	0.30	0.80	0.05	0.05	4.5-6.0	0.20	0.10

Önceden belirlenmiş boyutlarda, AA7075 malzemeden kestirilen plakaların kesim noktaları zımparalanarak yüzey matlaştırılmış ve oksit tabakaları çıkarıldıktan sonra alkol ile temizlenmiştir. Kullanılan dolgu teli Er4043 kaynaktan önce alkol ile temizlenmiştir.



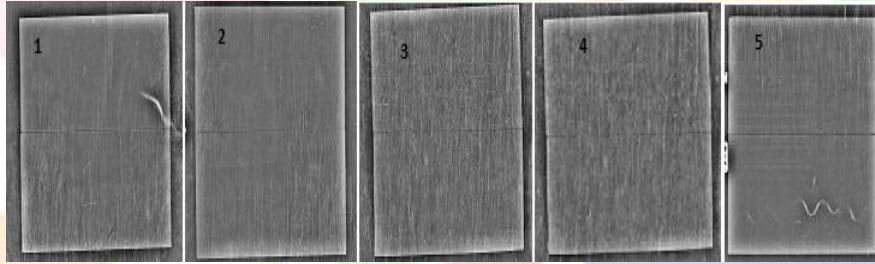
3.2. Deneyin Yapılışı

Kaynaklı birleştirmelerin yapılacağı yüzeyler temizlendikten sonra alınları birbirine değecek şekilde Şekil 1 çizimi verilen tabla üzerine yerleştirilmiştir. Ardından üç noktadan Nd:YAG lazer kullanılarak punto atılıp kaynak prosesi sırasında ortaya çıkabilecek kaymaların önüne geçilmiştir. Kaynak yapılırken kullanılan soğutma gazı argonun yüzey ile yaptığı açı deneyler boyunca 45° derece olup akış hızı dakikada 10 NL ye ayarlanmıştır. Alın kaynağı yapılırken lazer ışınlarının kaynak yüzeyi ile yaptığı açı 15° de sabit tutulmuştur. Alın kaynağından sonra, dolgu teli ile kaynak yapılırken lazer gelme açısı yüzeye 90° olarak ayarlanmıştır ve dolgu telini kaynak bölgesine yaymak için lazer ışın çapı 0.9 mm'ye ayarlanmıştır.

Deneyler sırasında; lazer gücü, lazer ışın çapı darbe süresi ve darbe frekansı gibi parametreler değiştirilerek kaynak kalitesine olan etkisi incelenmiştir. İlk olarak Tablo 3'te verilen lazer parametreleri denenmiş ve Şekil 3'te verilen radyografi sonuçları alınmıştır sonuçlara göre kaynak yüzeysel gerçekleşmiş lazer ışını malzemeye nüfus etmemiştir.

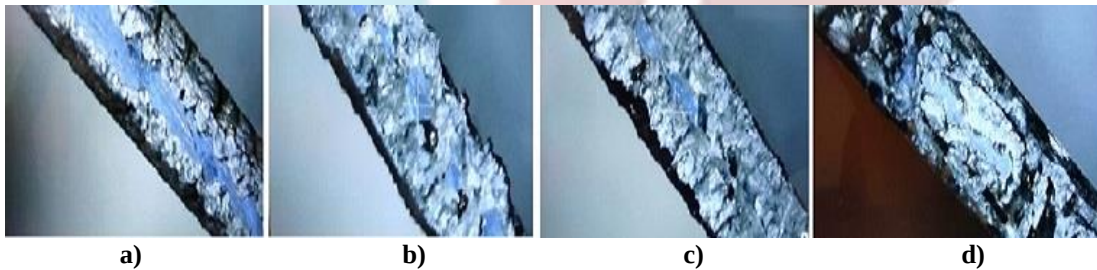
Tablo 3: İlk Kaynak Denemeleri

Parametre/No	P.NO 1	P.NO 2	P.NO 3	P.NO 4	P.NO 5
Ortalama güç (W)	158.8	165	165	122.2	85.4
Darbe süresi (ms)	4	5	5	5	5
Tekrarlama oranı (Hz)	14	13.5	13.5	10	10
Işın çapı (R mm)	0.7	0.8	0.5	0.5	0.5
Kaynak hızı (mm/s)	1	1	1	0.5	0.5



Şekil 3: İlk Kaynak Denemelerin Radyografi Sonuçları

Lazer ışını penetrasyon derinliği kaynaklı kesitten ve kaynak genişliği yüzeyden ölçülüp mikroyapı optik mikroskopla gözlemlendi. Şekil 4'te verilen görseller kaynaklı hattının lazer güç yoğunluğuna göre kaynak penetrasyon derinliği değişimini göstermektedir. Lazer ışın çapı sabit tutularak ortalama lazer gücü artırılmış ve Şekil 4'a) görselinde numune penetrasyon derinliği 1 mm iken d) görselinde 3 mm lazer penetrasyon derinliği elde edilmiştir. Fakat mikroyapıda bol miktarda gözenekliliğin ve çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir.

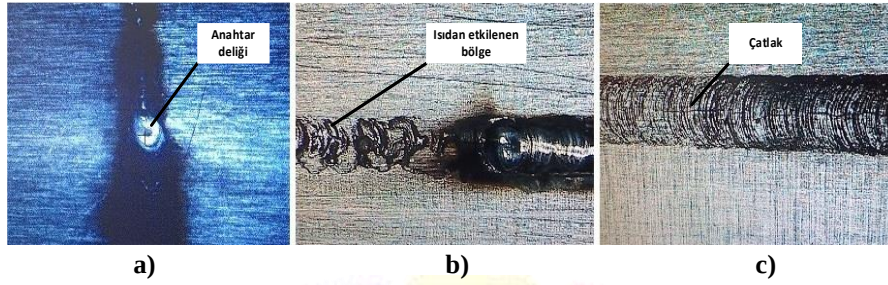


Şekil 4: Lazer ortalama güç yoğunluğuna bağlı penetrasyon derinliği

İkinci aşamada ortalama lazer gücü sabit tutularak ışın çapı değiştirilmiştir. Küçük lazer çapı ile yapılan kaynaklama işlemlerinde penetrasyon derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Fakat kaynak işlemi sırasında kaynak genişliğinin önceki denemelere kıyasla kısa olduğu fark edilmiştir. Bu durum, düşük mukavemet yaratacağı bilindiğinden optimum ortalama lazer gücü ve ışın çapı



belirlendikten sonra lazer tekrarlama oranı ve lazer darbe süresi değiştirilerek kaynaklama işlemlerine devam edilmiştir.



Şekil 5: Kaynak Görselleri a) Anahtar deliği, b) dolgu teli kullanımı, c) çatlak oluşumu

Şekil 5'te görselli verilen kaynak fotoğraflarında, a) görselinde kaynak sırasında anahtar deliği oluştuğu gözlemlenmiştir bu durum alaşımın eriyik oluşturduğunu göstermektedir. B) görselinde ön yüzeye yapılan kaynak işleminden sonra arka yüzüne dolgu teli ile yapılan kaynağın fotoğrafı verilmiştir. Bu lazer ışınlarının 3 mm alüminyum içerisine nüfus ettiği ve uygulanan gücün yeterli olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca görselde görülen siyah çökelti buharlaşan Mg-Zn elementlerinin yüzeyde bıraktığı kalıntılardır. Son görselde kaynak sırasında soğuk katılma gerçekleştiği ve sonucunda çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6'a)dan anahtar deliği profilinin, numune kalınlığı olan 3 mm'nin 1/4'ü olan 0,75 mm derinlikte üretildiği görülmektedir. Bununla birlikte, kaynak işlemi sırasında eriyik havuzunu koruyamadığı gözlemlenmiştir. Şekil 6 b) görselinde Üretilen kaynağa göre iyi kaynak görünümü üretildiği görülmüştür. Bunun nedeni, odak uzaklığına bağlı lazer ışın çapının küçültülmesi ve cm^2 'ye düşen lazer tepe gücünü azaltmak için lazer tekrarlama oranı arttırılmıştır. Bu da metal yüzeyinde odak noktasına ve lazer ışın çapına bağlı olarak daha yüksek enerji emilimi sağlamıştır.



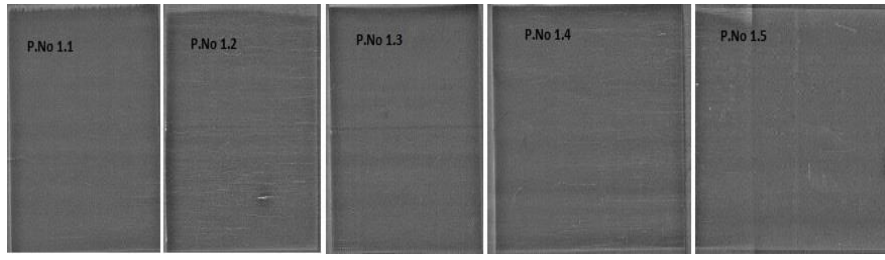
Şekil 6: İkinci Kaynak Denemelerin Radyografi Sonuçları

Ardından Tablo 4'te verilen kaynak parametreleri denenmiş, deneyler sırasında kaynak kalitesini etkileyen olguların Şekil 3'te görseli verilen fotoğrafları kaydedilmiştir. Kaynaklı birleştirmeler oluşturulduktan sonra radyografi testi gerçekleştirilmiştir ve Şekil 7'de verilen radyografi sonuçları elde edilmiştir sonuçlara göre P1.1, P1.4 ve P1.5 numaralı plakaların temas noktaları eriyik oluşturarak birleşmiş ve boşluk oluşturmamıştır. Bunun nedeni lazer tekrarlama oranının lazer gücü ile orantılı artırılması sonucu elde edilen ortalama güç yoğunluğunun malzemeye nüfuz etme süresidir ve durum farklı enerjiler üretir. En büyük kaynak genişliği ve penetrasyon derinliği, 0,7 mm ışın çapı ve 180 watt ortalama güçte elde edilmiştir.

Tablo 4: İkinci Kaynak Denemeleri

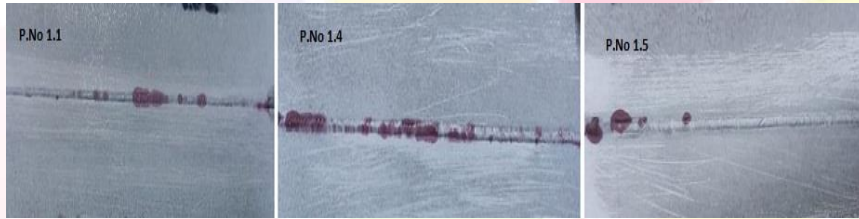
Parametre/No	P.NO 1.1	P.NO 1.2	P.NO 1.3	P.NO 1.4	P.NO 1.5
Ortalama güç (W)	183.4	135	170	139.3	214.9
Darbe süresi (ms)	1	1.3	1	1	4
Tekrarlama oranı (Hz)	35	35	35	35	10
Işın çapı (R mm)	0.7	0.4	0.8	0.7	0.8
Kaynak hızı (mm/s)	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8



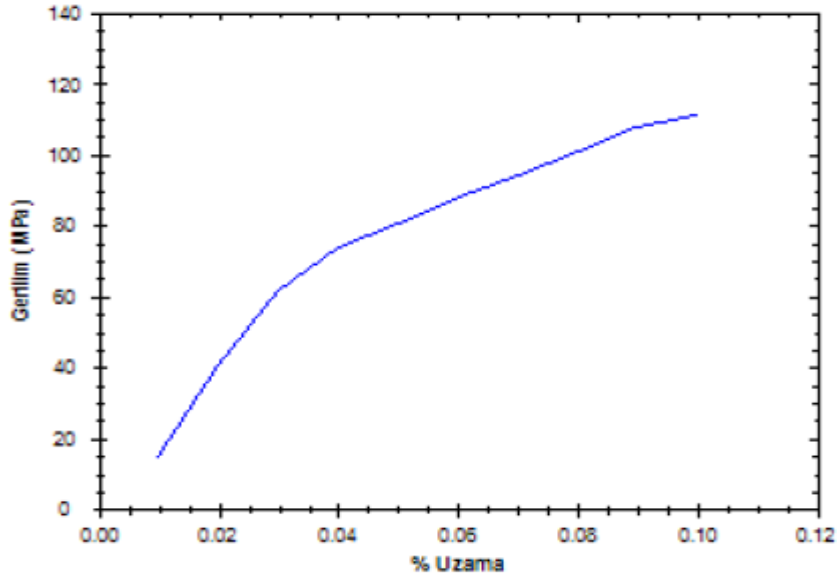


Şekil 7: İkinci Kaynak Denemelerin Radyografi Sonuçları

İkinci denemeler de P1.2 ve P1.3 kaynaklı palankaların birleşmediği gözükmemektedir. Bunun nedeni bu iki plakanın kaynaktan önce 45°'lik açı ile 1 mm kadar her iki yüzeyden pah açılarak kaynak ağzı oluşturmak istenmiş ve deneyler bu işlemten sonra gerçekleştirilmiştir. Radyografiden geçen P1.1, P1.4 ve P1.5 numaralı plakalara sıvı penetrasyon testleri gerçekleştirilmiş ve Şekil 8'de görseli verilen sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlara göre çatlak P1.5 numaralı kaynak plakasında daha az çatlak oluşumu olduğu gözlemlenmiştir. Ve bu üç numuneden P1.5 mekanik çekme testine maruz bırakılmıştır ve Şekil 9'da görseli verilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 8: İkinci Kaynak Denemelerin Sıvı Penetrasyon Sonuçları



Şekil: Gerilim % Uzama Grafiği

4. Sonuçlar

Genel olarak bu çalışma, lazer ışın gücü, ışın çapı, darbe süresi, darbe frekansı ve kaynak hızı gibi kaynak parametrelerinin etkisini araştırmıştır. Deney sürecinde kaynak geometrisi, kaynak yönü, lazer ışını gelme açısı ve soğutma gazı akış açısı sabit tutulup ilk önce alın kaynağı ardından ER4043 dolgu teli kullanılarak ardışık çift taraflı lazer kaynağı yapıldı. İlk kaynak denemelerinde lazer ortalama gücüne bağlı olarak mikroyapılarda bir miktar sıvılaşma çatlama gözlemlenmiştir. İkinci kaynak dikişinde birinci kaynak dikişine göre daha fazla makro gözeneklilik oluştuğu



gözlemlenmiştir. Gözenekliliği azaltmak için ortalama güç girişi azaltılma yoluna gidilmiş bunun içinde darbe frekansı artırılıp lazer ışın çapı küçültülmüştür. Kaynak prosesleri tamamlandıktan sonra kaynaklı metaller bir dizi gözlemsel teste tabi tutulup en sonunda çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme testindeki çekme yükü, lazer gücünden ve lazer ışını çapından etkilendiği gözlemlenmiştir. Makro gözeneklilik, çekme testleri sırasında kırılma başlangıcında önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Gözeneklilik ve sıvılaşma çatlaması çekme test numunesinin kırılma moduna doğrudan etki ettiği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmadan, AA7075 malzemenin kaynak birleştirmesinin özellikle anahtar deliği profili ile düşük güçlü Nd:YAG lazer kullanılarak üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Daha az kusurlu daha iyi kaynak bağlantı dikişleri için koruyucu gaz ve lazer ışınının geliş açısı gibi parametreler değiştirilerek uygulanabilir. Bu yöntem ile üretilen kaynaklı birleştirmeler havacılık ve savunma sanayinde başarılı bir şekilde uygulamaya konulabilir. Bu alaşım havacılık parçalarında gövde paneli için kullanılan geleneksel çeliğin yerini alabilir. Özet olarak, alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi, bilim ve endüstri için bir zorluk teşkil etmektedir. Pek çok durumda geleneksel kaynak yöntemleri gibi yüksek ısı girişi gerektiren birleştirme yöntemlerinin gelecekte yerini daha uygun maliyetli ergitme kaynak işlemlerine bırakacağı öngörülebilir. Alüminyumun lazer kaynağının süreç hakkında bilgi arttıkça otomatik fabrikalarda giderek daha fazla kullanılacaktır. İnce kesitli alüminyum levhaların yüksek hızda kaynaklanacağı durumlarda lazerlerin baskın olması muhtemeldir.

5. Kaynakça

- [1] Salleh, M.M.M. Ishak, M. Romlay, F.R.M. & Aiman, M.H., (2016). A study on bead-on-plate welding of AA7075 using low power fiber laser. 26600 Pekan, Pahang, Malaysia: Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)
- [2] Paleocrassas, A.G. & TU, J.F., (2007). Low-Speed Laser Welding of Aluminum Alloy 7075-T6 Using a 300-W, Single-Mode, Ytterbium Fiber Laser. North Carolina State University: Welding Journal
- [3] Assunção, E. Quintino, L. & Miranda R., (2009). Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology
- [4] Fukuda, T., (2012). Weldability of 7000 series aluminium alloy materials. Welding International.
- [5] Enz, J. Riekehr, S. Ventzke, V. Sotirov, & N. Kashaev, N., (2014). Laser welding of high-strength aluminium alloys for the sheet metal forming process. Procedia CIRP
- [6] Wang JT, Zhang YK, Chen JF, Zhou JY, Ge MZ, Lu YL, et al. (2015). Effects of laser shock peening on stress corrosion behavior of 7075 aluminum alloy laser welded joints. Materials Science and Engineering
- [7] Kerstens, N.F.H., (2002). Nd:YAG laser welding of AA7075 high strength aluminium, Delft University of Technology Faculty of Applied Sciences Ouden Laboratory of Materials Science and Engineering Section Joining Technology
- [8] Ola, O.T. & Doern, F.E., (2015). Fusion weldability studies in aerospace AA7075-T651 using high-power continuous wave laser beam techniques. Winnipeg, MB R3H 0J9, Canada: Elsevier Ltd.
- [9] Hirose, A. & Todaka, H., (1997) Kobayashi KF.CO2 laser beam welding of 6061-T6 aluminium alloy thin plate, Metall Mater Trans A28A2657-2664.
- [10] Hirano, M. Kobayasi, K. & Tonda, H., Effect of the additional element on the weldability of high-strength
- [11] Kawahito, Y. Matsumoto, N. Abe, Y. & Katayama. S., (2012). Laser absorption of aluminium alloy in high brightness and high power fibre laser welding. Welding International.



- [11] M. N. M. Salleh, M. Ishak, L. H. Shah & S. R. A. Idris., (2016). The effect of ER4043 and ER5356 filler metal on welded Al 7075 by metal inert gas welding. Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, Malaysia.
- [12] Forsman T., (1998). Nd:YAG Laser Welding of Aluminium Alloys. Division of Materials Processing Depaitnient of Materials and Manufacturing Engineering Luleå University of Technology
- [13] PALIK, E, D. Handbook of optical constants. Academic press, Orlando (1985).
- [14] WEAVER, J, H, KRAFKA, C & LYNCH, D, W. Optical properties of metals. Fachinformationszentrum Energie Physik Mathematik, Karlsruhe (1981).
- [15] PROKHOROV, A, M, KONOV, V, I, URSU, I & MIHAILESCU, I, N. Laser heating of metals. Adam Hilger, Bristol (1990) 16.
- [16] DAUSINGER, F, RAPP, J, HOHENBERGER, B & HÜGEL, H. *Laser beam welding of aluminum alloys: State of the art and recent developments*. IBEC'97 Advanced technologies & processes (1997) 38-45.
- [17] STEEN, W, M. (1991). *laser material processing*. Springer-Verlag, London
- [18] POIRIER, D, R & GEIGER, G, H. (1994). Transport phenomena in *materials processing*. TMS
- [19] ROSENTHAL, D. (1941). Welding journal. 20 220s.



HAVAYOLU İŞLETMELERİNDE OPERASYONEL PERFORMANSIN SWARA-TOPSIS MODELİ İLE ANALİZİ

Rabia Demir Güven ^{1*}, Emin Başar Baylan ²

¹ İstanbul Ticaret Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-0875-9391, rabiad00@gmail.com; rabia.demir@istanbulticaret.edu.tr

² Piri Reis Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Türkiye

ORCID ID: 0000-0003-4581-2478, ebbaylan@pirireis.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Performans değerlendirmesi hem finansal hem de operasyonel açıdan işletmeler için önem arz etmektedir. Bu değerlendirmelerin sonuçlarını işletmeler kendi içlerinde bir değerlendirme ölçütü olarak kullanmaktayken; yatırımcılar da bu sonuçlardan yola çıkarak gerekli gördükleri yatırımları gerçekleştirmektedir. Bu çalışmada 4 ABD'den, 3 Çin'den ve 3 Avrupa'dan (İngiltere, Türkiye ve Almanya) toplamda 10 adet havayolu işletmesinin operasyonel performans analizi Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çalışmada kullanılacak kriterler literatür taraması ve havacılık yönetimi uzmanlarının uzman görüşleri alınarak belirlenmiştir. Belirlenen 10 adet kriterin ağırlıklandırılması uzmanlarla çalışılarak SWARA yöntemiyle oluşturulmuştur. 2021 yıl sonu verileri ile yapılan analiz sonuçlarına TOPSIS yöntemiyle ulaşılmıştır. Yöntemin sonuçlarına göre 10 adet havayolu işletmesi performansına göre sıralanmış ve sırasıyla Southwest Airlines, Turkish Airlines ve Delta Air Lines ilk 3'te yer almıştır.

Anahtar Kelimeler: Performans Analizi, Havayolu İşletmeleri, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), SWARA, TOPSIS

1. Giriş

Yaşanan pandemi sonrasında havayolu işletmeleri 2021 yılını tekrardan yükseliş dönemi olarak yaşamıştır. Bu nedenle 2021 yılı verileri performans ölçümü için önem arz etmektedir. İşletmelerin sene sonu paylaştıkları senelik raporlarından yola çıkarak bu çalışma hazırlanmıştır. Çalışmada uzman görüşleri kriter seçimi, ağırlıklandırılması ve analiz sonucu aşamalarında alınmıştır.

Havayolu işletmelerinin 2021 pazar değerine göre; Aralık ayında senelik raporlarını yayınlayan 10 havayolu analiz için seçilmiştir. Turkish Airlines'ın ilk 10'da yer almamasına rağmen değerlendirmeye alınması uygun görüldüğünden ötürü listeye eklenmiştir. Seçilen işletmeler ve pazar payları ekli tabloda gösterilmiştir (companiesmarketcap.com, erişim tarihi:21.06.2022).

Tablo 1: Havayolu Listesi

Sıralama	Havayolu	Pazar Değeri (\$ B)
1	Southwest Airlines	25,35
2	Delta Air Lines	25,01
3	Air China	17,45
4	China Southern Airlines	16,1
5	United Airlines Holdings	14,17
6	China Eastern Airlines	13,04
7	American Airlines	11,63
8	International Consolidated Airlines	9,54
9	Lufthansa Group	8,36
10	Turkish Airlines	2,07



2. Materyal ve Yöntem

10 adet havayolu işletmesine ait 2021 yılı yıl sonu raporlarından elde edilen verilerden yola çıkarak çalışma tamamlanmıştır. Çalışmada öncelikle kullanılacak kriterler uzman görüşleri ve literatür taraması ile belirlenmiş ve sonrasında belirlenen 10 adet kriter uzmanlar yardımıyla SWARA ile ağırlıklandırılmıştır.

2.1. SWARA Yöntemi

SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) yöntemi ilk defa Keršuliene, Zavadskas ve Turskis (2010) tarafından tanımlanmış ve kendi çalışmalarında uygulanmıştır. Yöntemin ana özelliği, ağırlıklarının belirlenmesi sürecinde kriterlerin önem oranları hakkında uzmanların veya ilgi gruplarının görüşlerini tahmin etme olasılığıdır (Kabak, 2020).

Yöntemde ilk olarak karar vericiler ve kriterler belirlenmektedir. Problemden n tane kriter ve l tane de karar verici olduğu varsayılmaktadır. Bu aşamadan sonra yöntemin işleyişi aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Bardakçı, 2020).

Adım1: Önem derecelerinin sıralanması: Her karar verici kriterleri kendi deneyim ve bilgisi ile değerlendirmektedir. Her karar verici kriterleri en iyiden en kötüye doğru sıralamaktadır. Sonrasında ise önem dereceleri (p_j) karar verici tarafından belirlenmektedir. Karar vericinin en önemli belirlediği kriter 1,0 puanını almakta ve diğer kriterlere puan atanması en önemli kritere göre gerçekleştirilmektedir. Puanlar 0 ile 1 arasında olacak şekilde 5 ve 5'in katları olarak atanmaktadır.

Matematiksel gösterim (1) nolu eşitlikteki gibidir:

$$p_j^k ; j=1, \dots, n; k=1, \dots, l; 0 \leq p_j \leq 1 \quad (1)$$

Adım2: Göreli ortalama önem puanının hesaplanması: $\bar{p}_j$ değeri aşağıdaki (2) nolu eşitlikle hesaplanmaktadır:

$$\bar{p}_j = (\sum_{k=1}^l p_j^k) / l \quad j=1, \dots, n \quad (2)$$

Adım3: Karşılaştırmalı önem değerinin hesaplanması: Kriterler $\bar{p}_j$ değerine göre büyükten küçüğe göre sıralanır ve ardışık farklar alınarak s_j değerleri elde edilir. Bu değer yöntem sahiplerince ortalama değerin karşılaştırmalı önemi olarak isimlendirilmiştir.

Adım4: Katsayı değerinin hesaplanması: c_j katsayı değerleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır. En önemli kriterin katsayısı 1 olarak atanmaktadır.

$$c_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ s_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad j=1, \dots, n \quad (3)$$

Adım5: Düzeltilmiş ağırlıkların hesaplanması: w_j düzeltilmiş ağırlık değeri en önemli kriter için 1'dir. Diğer kriterler için hesaplama aşağıdaki eşitlikle yapılır.

$$w_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{w_{j-1}}{c_j}, & j > 1 \end{cases} \quad j=1, \dots, n \quad (4)$$

Adım6: Nihai ağırlıkların hesaplanması: Son aşamada ise bir önceki aşamada hesaplanan w_j değerleri, toplam w_j değerlerine bölünerek her bir kriter için q_j değeri hesaplanmaktadır.

$$q_j = \frac{w_j}{\sum w_j} \quad j=1, \dots, n \quad (5)$$

2.2. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi, çok kriterli bir karar verme tekniğidir ve Hwang & Yoon tarafından (1981) yılında geliştirilmiştir. Yöntem uzaklık hesabı yaptığı için; temeli pozitif ideal çözüme en yakın veya diğer bir tabirle; negatif ideal çözüme



en uzak alternatife seçilmesine dayanmaktadır (Ishizaka, Nemery, 2013). TOPSIS yönteminin altı aşaması aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Altan ve Atan, 2020).

1. Adım: Karar Matrisinin (A) Elde Edilmesi: A matrisi bir karar matrisidir. Matrisin satırları alternatifler, sütunları ise değerlendirme kriterlerinden oluşmaktadır. Bir karar matrisi örneği aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A_{ij} matrisinde m alternatifleri, n ise kriter sayısını belirtmektedir.

2. Adım: Normalize Edilmiş Karar Matrisinin (R) Elde Edilmesi: 2 numaralı formül yardımıyla elde edilmektedir:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum x_{ij}^2}} \quad (2)$$

R matrisi aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

($i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n$)

3. Adım: Ağırlıklı Normalize Edilmiş Karar Matrisinin (V) Oluşturulması: Bu adımda ağırlık değerleri (w_i) belirlenmektedir. Kriterlerin ağırlık değerleri toplamı alındığında 1 olmalıdır.

R matrisindeki elemanlar kendisine ait ağırlık değeri (w_i) ile çarpılarak bir ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi (V) yapısı oluşturulur. V matrisi aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$V_{ij} = w_i r_{ij}$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. Adım: Pozitif (A^*) ve Negatif İdeal (A^-) Çözümlerinin Elde Edilmesi: Pozitif ideal çözüm için, V matrisinin sütunda yer alan değerlerinin ilgili değerlendirme kriteri maksimize ise en büyüğü, minimize ise en küçüğü seçilmektedir.

Pozitif çözüm seti 5 numaralı formül ile bulunmaktadır.

$$v_i^* = \{ \max (v_{ij}) \text{ eğer } j \in J ; \min (v_{ij}) \text{ eğer } j \in J' \} \quad (5)$$

(5) formülü yardımıyla $A^* = \{ v_1^*, \dots, v_n^* \}$ olarak bir set elde edilir.

Negatif ideal çözüm için, V matrisinin sütunda yer alan değerlerinin ilgili değerlendirme kriteri maksimize ise en küçüğü, minimize ise en büyüğü seçilmektedir.

Negatif ideal çözüm seti 6 numaralı formül ile bulunur.

$$v_i' = \{ \min (v_{ij}) \text{ eğer } j \in J ; \max (v_{ij}) \text{ eğer } j \in J' \} \quad (6)$$

(6) formülü yardımıyla $A' = \{ v_1', \dots, v_n' \}$ olarak bir set elde edilir.

Her iki formülde de J fayda, J' ise kayıp değerini ifade etmektedir. Her iki ideal çözüm seti de m elemandan meydana gelmektedir.

5. Adım: Ayırım Ölçülerinin Hesap Edilmesi: Euclidian uzaklık yaklaşımı kullanılarak her bir alternatifle alakalı değerlendirme kriter değerinin iki ideal çözümden sapmaları hesap edilmektedir. Sapma değerleri ise pozitif ideal ayırım (S_i^*) ve negatif ideal ayırım (S_i^-) ölçüsü ile temsil edilmektedir. Pozitif ideal ayırım (S_i^*) ölçüsünün hesaplanması (7) , negatif ideal ayırım (S_i^-) ölçüsünün hesaplanması ise (8) nolu formülde gösterilmiştir.

$$S_i^* = \sqrt{ \left[\sum (v_i^* - v_{ij})^2 \right] } \quad i = 1, \dots, m \quad (7)$$



$$S_i' = \sqrt{[\sum (v_j' - v_{ij})^2]} \quad i = 1, \dots, m \quad (8)$$

6. Adım: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesap Edilmesi: Bir önceki adımda hesaplanan pozitif ve negatif ideal ayırım ölçülerinden faydalanarak hesap edilmektedir. İdeal çözüme göreli yakınlık değerine (C_i^*) (9) nolu formüldeki hesaplama ile ulaşılmaktadır.

$$C_i^* = \frac{S_i'}{(S_i^* + S_i')} \quad 0 < C_i^* < 1 \quad (9)$$

3. Sonuç

Uygulama için 3 havacılık yönetimi uzmanı ile çalışılmıştır. Kriterlerin belirlenmesi, ağırlıklandırılması ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarında uzman görüşlerine başvurulmuştur.

3.1. SWARA Yöntemi Uygulama

Literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda uzmanlarla 10 adet kriter belirlenmiştir. Belirlenen kriterler 2 nolu tabloda yer almaktadır. Uygulamada uluslararası kriter başlıkları kullanılmıştır. Kriterlerin min max fayda durumları da benzer şekilde uzmanlarla belirlenmiştir.

Tablo 2: Belirlenen Kriter Listesi

Kriter	Uluslararası Kriter Başlık
Ortalama Uçak Yaşı	<u>Fleet Age</u>
Arz Edilen Koltuk-Km Başına Düşen Maliyet	Cost per ASK - <u>CASK (\$)</u>
Arz Edilen Koltuk-Km Başına Düşen Gelir	Revenue per - <u>RASK (\$)</u>
Kar Marjı	<u>Operating Margin</u>
Yolcu Doluluk Oranı	Load Factor - <u>LF</u>
Uçak Sayısı / Çalışan Sayısı	<u>Fleet / Employee</u>
Yolcu Sayısı / Uçuş Sayısı	<u>Passenger / Flight</u>
Yolcu Sayısı / Çalışan Sayısı	<u>Passenger / Employee</u>
Uçuş Sayısı / Çalışan Sayısı	<u>Flight / Employee</u>
Başabaş Yolcu Doluluk Oranı	Break Even Load Factor - <u>BELF</u>

Belirlenen kriterler her uzman tarafından SWARA adımlarına uygun şekilde değerlendirilmiştir. Karar vericilerin sıralaması ve verdiği önem dereceleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Uygulama adımlarında da belirtildiği gibi; her karar verici kendi deneyim ve bilgisiyle ilgili tabloyu doldurmuştur, tabloda da görüleceği üzere her karar verici farklı en önemli kriter belirlemiştir.

Tablo 3: Karar Verici Kararları

Kriter	Uzman1		Uzman2		Uzman3	
	Sıralama	Ağırlık	Sıralama	Ağırlık	Sıralama	Ağırlık
Fleet Age	5	0,50	10	0,40	6	0,60
CASK (\$)	1	1,00	5	0,70	3	0,90
RASK (\$)	4	0,70	2	0,90	2	0,95
Operating Margin	2	0,95	1	1,00	5	0,70
LF	6	0,40	3	0,85	1	1,00
Fleet / Employee	9	0,10	9	0,45	10	0,40
Passenger / Flight	8	0,20	8	0,50	8	0,50
Passenger / Employee	7	0,30	6	0,60	7	0,55
Flight / Employee	10	0,05	7	0,55	9	0,45
BELF	3	0,90	4	0,80	4	0,85

SWARA yöntemine göre oluşan ağırlıklar aşağıdaki tabloda belirtilmiştir. Operating Margin ve CASK (\$) değerleri sırasıyla 1 ve 2. sırada yer alarak en çok ağırlık verilen kriterler olmuştur. Fleet/Employee oranı ise en az ağırlık verilen kriter olmuştur. Uzman görüşü alınarak oluşturulan bu ağırlıklandırma TOPSIS uygulamasında kullanılacaktır. Böylelikle eşit ağırlıklandırma veya matematiksel ağırlıklandırma yöntemleri kullanılmamıştır.



Tablo 4: SWARA ile Bulunan Ağırlıklandırma

Kriter	Ağırlık
Operating Margin	12,45%
CASK (\$)	12,25%
BELF	12,05%
RASK (\$)	12,05%
LF	10,95%
Fleet Age	8,76%
Passenger / Employee	8,62%
Passenger / Flight	7,96%
Flight / Employee	7,58%
Fleet / Employee	7,33%

3.2. TOPSIS Yöntemi Uygulama

Bu aşamada SWARA ile bulunan ağırlıklar kullanılmıştır. Seçilen havayolu işletmeleri, kriterler ve kriter değerlerinin yer aldığı TOPSIS karar matrisi aşağıdaki gibidir.

Tablo 5: Karar Matrisi

Havayolu / Kriter	Fleet Age	CASK (\$)	RASK (\$)	Operating Margin	LF	Fleet / Employee	Passenger / Flight	Passenger / Employee	Flight / Employee	BELF
Southwest Airlines	13,00	0,066	0,074	0,109	0,785	0,013	115,5	2237,4	19,4	0,699
Delta Air Lines	14,00	0,090	0,096	0,063	0,690	0,010	70,5	1239,8	17,6	0,649
Air China	8,23	0,098	0,077	- 0,281	0,686	0,008	120,7	781,1	6,5	0,879
China Southern Airlines	8,00	0,085	0,075	- 0,145	0,713	0,009	116,8	1004,1	8,6	0,816
United Airlines Holdings	16,50	0,089	0,086	- 0,041	0,722	0,010	81,5	1237,6	15,2	0,752
China Eastern Airlines	7,70	0,085	0,071	- 0,185	0,677	0,009	104,6	984,8	9,4	0,802
American Airlines	11,30	0,090	0,087	- 0,035	0,753	0,007	90,8	1342,6	14,8	0,780
International Consolidated Airlines	11,20	0,092	0,069	- 0,327	0,645	0,011	112,2	773,8	6,9	0,856
Lufthansa Group	12,70	0,143	0,116	- 0,236	0,616	0,007	102,1	445,9	4,4	0,761
Turkish Airlines	8,50	0,065	0,084	0,221	0,679	0,006	125,4	753,2	6,0	0,528

Ağırlıklar ve min max değerleri aşağıdaki tabloda yer almaktadır. Min ve max değerleri uzman görüşü alınarak belirlenmiştir.

Tablo 6: Ağırlık ve Min Max Tablosu

	Fleet Age	CASK (\$)	RASK (\$)	Operating Margin	LF	Fleet / Employee	Passenger / Flight	Passenger / Employee	Flight / Employee	BELF
Max/Min	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Min
Ağırlık	0,088	0,122	0,120	0,125	0,110	0,073	0,080	0,086	0,076	0,120

TOPSIS sonucuna göre sıralama ve en iyi havayolu işletmesi aşağıdaki tabloda yer almaktadır. Southwest Airlines 1.sırada yer almakta, onu Turkish Airlines ve Delta Air Lines takip etmektedir.



Tablo 7: TOPSIS Sonucu

Havayolu / Kriter	Si+	Si-	Ci	Sıra
Southwest Airlines	0,0336	0,1114	0,768	1
Delta Air Lines	0,0483	0,0918	0,655	3
Air China	0,1163	0,0334	0,223	8
China Southern Airlines	0,0880	0,0536	0,379	6
United Airlines Holdings	0,0678	0,0707	0,510	5
China Eastern Airlines	0,0951	0,0482	0,336	7
American Airlines	0,0644	0,0728	0,531	4
Int. Con. Airlines	0,1248	0,0304	0,196	10
Lufthansa Group	0,1150	0,0312	0,213	9
Turkish Airlines	0,0494	0,1218	0,711	2

Pazar değerine göre belirlenen listeyi TOPSIS sonuçları ile karşılaştırdığımızda aşağıdaki tabloda görüldüğü üzere; Southwest Airlines yerini korumuş, Turkish Airlines ise 8 sıra yükselerek 2. sırada yer almıştır. Bu değişiklikte etkili olan en önemli kriter Operating Margin değeridir. Çünkü bu değer, 3 havayolunda pozitif (+), diğerlerinde negatif (-) değer almakta yani sadece 3 işletme kar pozisyonunda bulunmaktadır. Bu etki de Turkish Airlines'ın pazar değeri düşük olsa da operasyonel açıdan verimli olduğunu göstermektedir. En iyi havayolu olan Southwest Airlines hem pazar payına göre hem de operasyonel açıdan 1.sırada yer almaktadır.

Tablo 8: Analiz Sonucu

Havayolu / Kriter	Sıralama	TOPSIS Sıralama	Durum
Southwest Airlines	1	1	0
Delta Air Lines	2	3	-1
Air China	3	8	-5
China Southern Airlines	4	6	-2
United Airlines Holdings	5	5	0
China Eastern Airlines	6	7	-1
American Airlines	7	4	3
International Consolidated Airlines	8	10	-2
Lufthansa Group	9	9	0
Turkish Airlines	10	2	8

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri kullanıcılara karar verme adımında yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada SWARA tabanlı TOPSIS uygulaması yapılarak 10 adet havayolu işletmesi operasyonel açıdan analiz edilmiştir. Havayolu analizinde havacılık sektörü kriterleri kullanılması analizin sektöre uyumlu olmasını ve bu sayede sektörece kullanılabilir olmasını sağlamıştır. İleriki çalışmalarda ek kriterler de eklenip daha fazla yöntemle analiz sonuçları kıyaslanabilir veya düşük maliyetli / tam hizmet sunan havayolları ayrı analizlerde olacak şekilde çalışılabilir.

4. Kaynakça

- Altan, Ş., Atan, M. (2020). *Örnek Uygulamalarla Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri*. Gazi Kitabevi.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Methods for Multiple Attribute Decision Making*. In *Multiple Attribute Decision Making*. Springer.
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-criteria Decision Analysis: Methods and Software*. John Wiley & Sons.
- Kabak, (2020). *Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri: MS Excel® Çözümlü Uygulamalar*. Nobel Akademik.



Keršulienė, V., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). *Selection of Rational Dispute Resolution Method by Applying New Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA)*. Journal of business economics and management, 11(2), 243-258.

Bardakçı, S. (2020). *Çok Kriterli Karar Verme Problemlerinde Kriter Ağırlıklandırma Yöntemleri*. Nobel Akademik Yayıncılık.

<https://companiesmarketcap.com/airlines/largest-airlines-by-market-cap/> Erişim tarihi: 21.06.2022



ISI KALKANI ÜRETİMİNDE KULLANILAN KALIBIN ÇELİK ALAŞIMINDAN ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Ramazan Toygun Kızıl ^{1*}, Duygu Kaplan ², Rabia Şevval Akan ³, Muhammet Uludağ ⁴

¹ Pruva Automotive, Türkiye

toygun.kizil@pruvaautomotive.com

² Pruva Automotive, Türkiye

ORCID ID:000-0001-7881-2437,duygu.kaplan@pruvaautomotive.com

³ Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Türkiye

ORCID ID: 0000-0003-3622-632X, sevvakan@gmail.com

⁴ Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Türkiye

muhammet.uludag@btu.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Otomotiv sektöründe otomobil iç aksam bileşenlerinin aşırı ısınması gibi problemler ile karşılaşılabilir. Aşırı ısınma sonucunda otomobil parçalarının kullanımı tehlike arz etmektedir. Bu nedenle, ısı kalkanı olarak adlandırılan elemanlar kullanılmaktadır. Isı kalkanı olarak kullanılan saclar alüminyum alaşımlarından üretilmektedir. Bunun yanı sıra, çelik, paslanmaz çelik, kompozit gibi malzemelerin ısı kalkanı için kullanımı da araştırılmaktadır. Çalışma kapsamında ısı kalkanı gofrelili paslanmaz çelik sac malzemeden üretilmektedir. Parçanın üretilmesi için kullanılan kalıbın tasarlanması ve prototip olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Parçayı meydana getiren kalıp TiCN kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında kullanılan kalıp malzemesi üzerine incelemeler gerçekleştirilmiştir. TiCN Kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere parçalara mekanik testler ve mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak üretilen kalıp kullanılarak şekil verilen ürün üzerinde de inceleme yapılmıştır. Şekil verilmiş parça üzerinde sertlik testi ve mikroyapı analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde kaplama sonrası kalıp malzemesinin sertlik değerinde artış meydana geldiği görülmüştür. Üretilen kalıbın ısı kalkanı ürününün üretilmesinde kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isı kalkanı, 304 Çelik Alaşımı, Mikroyapı, Mekanik özellikler

1. Giriş

Sac metal şekillendirme prosesi otomotiv endüstrisinde sıklıkla tercih edilen önemli bir proses olarak bilinmektedir. Otomotiv imalatında sac metal, otomobilin birçok farklı bölgelerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu doğrultuda sac metalde ağırlık azaltımı ile verimliliğin artırılması, maliyetin azaltılması ve kaynak tasarrufu gibi avantajlar elde edilmesi amacıyla çalışmalar yürütülmektedir. İnce levhaların kullanımı düşük rijitlik ve mukavemet gibi problemlere neden olmaktadır. Ek olarak sac kalınlığının azalması ile şekillendirilebilirlik özelliği de azalmaktadır [1,2]. Bunun yanı sıra otomotiv sektöründe dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli konu da otomobil bileşenlerinin ısınmasıdır. Isınmanın meydana gelmesi engellenemez bir durumdur. Bu nedenle, ısı kalkanı olarak adlandırılan elemanlar kullanılmaktadır. Meydana gelen ısının aracın iç kısımlarına dağılmasını engelleyen ısı kalkanları, sıcaktan olumsuz etkilenecek parçaların hasar görmesini önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bir ısı kalkanı, düşük termal iletkenlik, yüksek emisyon gücü, iyi termal kararlılık, dayanıklılık ve korozyon direnci gibi özelliklere sahip olmalıdır [1].



Otomotiv sektöründe içten yanmalı motorların neden olduğu yüksek miktarlardaki ısı nedeniyle, motorların çoğunda bileşenleri ve üst yapıyı ısı hasarından korumak amacıyla ısı kalkanı kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, etkili ısı kalkanları kaput altı sıcaklıkların düşürülmesine fayda sağlamaktadır. Böylece giriş sıcaklığının da düşmesine ve performans avantajı elde etmeye olanak sağlamaktadır. Ek olarak, ısı kalkanları motor montaj havalandırma deliklerinin soğutulması amacıyla da kullanılmaktadır. Oluşan fazla ısınmadan kaynaklı olarak meydana gelebilecek kırılma ve aşınma gibi deformasyonların önlenmesi amacıyla tercih edilen bu saclar alüminyum alaşımlarından üretilmektedir. Bunun yanı sıra, çelik, paslanmaz çelik, kompozit gibi malzemelerin ısı kalkanı için kullanımı da araştırılmaktadır [3-5].

Isı kalkanları için ağırlığın hafifletilmesi amacıyla ince levhalar kullanılmaktadır. İnce metal levhalar oluşturulurken kalınlık azalmasının bir sonucu olarak rijitlik ve şekillendirilebilirliğin azalması gibi problemler meydana gelebilmektedir. Bu doğrultuda, ısı kalkanlarının şekillendirilmesi sırasında meydana gelebilecek problemlerin azaltılması için gofrajlama işlemi uygulanmaktadır. Kabartma olarak da bilinen gofrajlama işleminde, sac metal zımba ile şişirilmektedir. Ardından, kabartmalı hale getirilen sac merdaneler arasında sıkıştırılmaktadır. Bu işlemler sonucunda, kesit modülünü artıran metal şeklinin pürüzlülüğü ve saca kısmen verilen iş sertleştirme etkisi sayesinde rijitlik ve mukavemet artmaktadır. Isı kalkanı üretimi sacın kabartılması ve ardından otomobilde ısıdan korunması istenilen bileşene benzer bir form aldırılmasıyla gerçekleştirilmektedir [1,6,7].

Isı kalkanı parçasının üretilirliğinde, bu parçayı oluşturmak için kullanılacak kalıbın büyük önemi bulunmaktadır. İstenilen formda parçanın meydana getirilmesi amacıyla kalıp bileşenlerinin tasarlanması ve mühendislik hesaplamalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında paslanmaz gofrajlı sac ısı kalkanı kalıp tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kalıp ile şekillendirilen sac üzerinde ve kalıp malzemesi üzerinde incelemeler yapılmıştır.

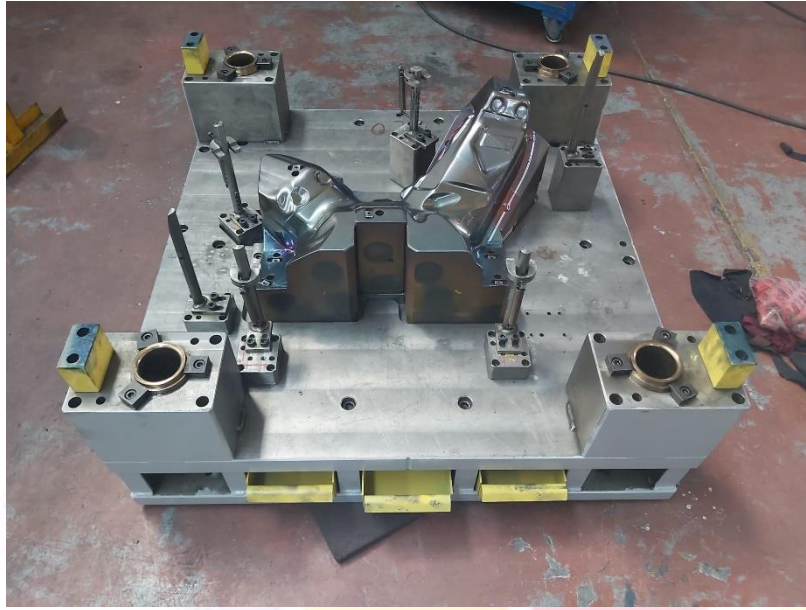
2. Deneysel Çalışmalar

Çalışma kapsamında kalıp tasarımı ve üretimi için prosesler gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta fizibilite çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ön çalışma sonrasında kalıp tasarımı için proses çalışmaları yapılmıştır. Kalıp üretimi için gerekli operasyon sayıları belirlenmiştir. Kalıp tasarımı aşamasına geçildiğinde kalıpların alt ve üst gruplarının tasarımı yapılmıştır. Tasarım aşamasında Catia programı kullanılmıştır. Tasarım sürecinde kalıp bileşenleri için mühendislik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Prototip üretim aşamaları ise, talaşlı imalat, çelik işleme, ara montaj, 3D işleme ve montaj kısımlarından oluşmaktadır.

Gerçekleştirilen proses çalışmaları sonucunda bir tasarım planı belirlenmiştir. Bu tasarım planı baz alınarak kalıbın 3D CAD tasarımı gerçekleştirilmiştir. Prototip üretime verilmeden önce üretimdeki kalitenin artırılması ve zaman kaybının azaltılması amacıyla tasarım üzerinden testler gerçekleştirilmiştir. Gama Inspect Simülasyon programı yardımı ile kalıp tasarımlarının doğruluğu kontrol edilmiştir. Proses veri çıktıları kullanılarak gerçekleştirilen tasarımlar doğrultusunda kesim-büküm, kaynaklı imalat ve montaj aşamaları yapılmıştır. Üretilen prototip kalıp görseli Şekil 1’de verilmektedir.

Kalıp SV21 Çelik malzemesi kullanılarak üretilmiştir. SV21 Çelik malzemesinin kimyasal içeriği Çizelge 1’de verilmektedir. Üretilen kalıplara 1030-1050 °C aralığında ısı işlem uygulanmıştır. Isıl işlem prosesinde üç menevişleme işlemi uygulanmıştır ve yaklaşık 24 saat işlem süresi bulunmaktadır. Isıl işlem sonrası kalıba kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama prosesi PVD yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kalıba TiCN (Titanyum Karbonitrür) kaplaması yapılmıştır. Tasarım baz alınarak üretilmiş olan sac metal kalıbın pres altında sac basma denemeleri yapılmış, sac parçanın nihai uygunluğuna bakılmıştır. Üretilen prototip kalıp ile gofrajlı paslanmaz çelik sac şekillendirilmiş ve ısı kalkanı parçası oluşturulmuştur.





Şekil 1: Üretilen prototip kalıp görseli

Çizelge 1: Kalıp malzemesinin (SV21) kimyasal bileşimi

C	Cr	Si	Mo	Mn	V
% 1,55	% 11,30	% 0,30	% 0,80	% 0,40	% 0,80

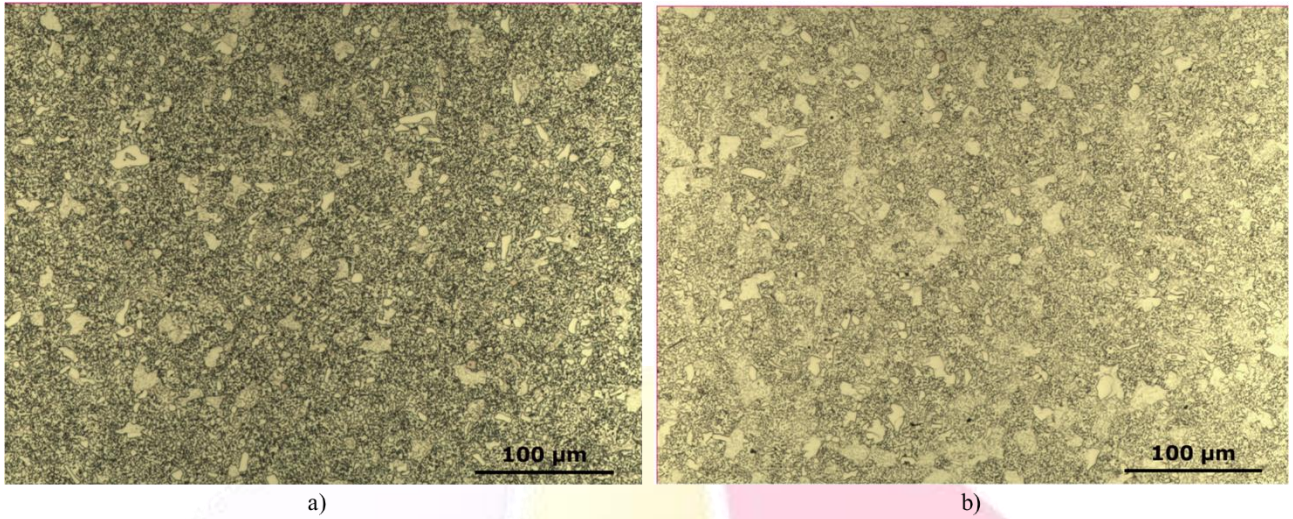
Üretilen kalıp ve deneme basımından elde edilen şekillendirilmiş gofranlı paslanmaz çelik ısı kalkanı üzerinden numune alımı gerçekleştirilmiştir. Kalıptan alınan numuneler çekme, mikrosertlik ve mikroyapı analizine, ısı kalkanı üzerinden alınan numuneler ise mikrosertlik testine tabi tutulmuştur. Çekme testi için 4 tekrar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Mikrosertlik testi ise E 384-89 (1997) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizleri için numuneler metalografik numune hazırlama adımlarına tabi tutulmuştur. İlk olarak yüzey zımparalama işleminin düzgün bir şekilde yapılabilmesi amacıyla numuneler bakalite alınmıştır. Ardından farklı grid numaralarında zımpara kağıtları kullanılarak yüzey düzeltme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında parlatma solüsyonları yardımıyla numune yüzeyleri parlatılmış ve mikroyapı analizine hazır hale getirilmiştir. Son olarak kalıp malzemesinden alınan numunelere %3'lük Nital dağlama ajanı kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi sonrasında görüntü analiz programı kullanılarak numunelerin mikroyapı analizi gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mikroyapı Analizi

Tasarımı yapılan ve prototip olarak üretilen kaplamalı ve kaplamasız kalıp malzemesinden alınan numunelere mikroyapı analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de kalıp malzemesinden alınan numunenin kaplamalı ve kaplamasız olarak mikroyapı görüntüleri verilmektedir.





Şekil 2: SV21 Çelik malzemesinin mikroyapı görüntüsü a) Kaplamalı parça, b) Kaplamasız parça

Şekil 2 incelendiğinde martenzit matris içinde karbür parçacıklarından meydana gelen mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Martenzitik mikroyapı çeliğe yüksek sertlik sağlamaktadır [8]. Kaplamalı ve kaplamasız olarak incelendiğinde kaplamalı parçada kaplama yüzeyinde karbür oluşumunun daha yoğun olduğu görülmektedir. Karbürlerin martenzit yapı ile birleşimi sonucunda daha sert bir malzeme olduğu gözlenmiştir.

3.2. Mekanik Test Sonuçları

Kalıp malzemesinden alınan parçalara çekme ve mikrosertlik testi uygulanmıştır. Şekillendirilen ısı kalkanı parçasından alınan numunelere mikrosertlik testi uygulanmıştır. Çekme testi sonucunda kalıp malzemesi olan SV21 çeliğinin mekanik değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2: SV21 Çeliğinin mekanik değerleri

Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	%Uzama
710,83	445,45	12,17

Test edilen malzeme olan SV21 soğuk iş çeliği yüksek basınç dayanımı, sertleşmeden sonra yüksek yüzey sertliği, iyi sertleşme özellikleri ile karakterize edilmektedir [9]. Malzemenin çekme test sonuçlarına bakıldığında ise 710,83 MPa çekme mukavemeti, 445,45 MPa akma mukavemeti ve %12,17 uzama gösterdiği görülmektedir.

Kalıp malzemesinin kaplamalı ve kaplamasız numuneleri, ısı kalkanı numunesinin mikrosertlik değerleri Çizelge 3’te verilmektedir. SV21K kaplamalı malzemeyi, SV21 kaplamasız malzemeyi, IK ısı kalkanı malzemesini temsil etmektedir.

Çizelge 3: Numunelerin mikrosertlik değerleri

Numune Adı	Mikrosertlik Değerleri (HV)
SV21	280,0
SV21K	307,8
IK	277,0

Çizelge 3’te verilen değerler incelendiğinde kaplama işlemi sonrasında sertlikte artış meydana geldiği görülmektedir. Kaplama işlemi sertlik değerini yükseltici yönde bir etki yapmıştır. Bu durum kaplama işleminin uygun olduğunu göstermektedir. Gofrajlı paslanmaz çelik saçtan üretilen ısı kalkanı parçasının şekillendirme sonrası sertlik değeri 277 HV olarak tespit edilmiştir. Isı kalkanı 304 paslanmaz çelik kullanılarak elde edilmiştir. 304 Paslanmaz çeliğinin standartta mikrosertlik



değeri yaklaşık olarak 227 HV (215 BSD)'dir [10,11]. Yapılan şekillendirme işlemi sonrasında sertlik değerinin yükseldiği görülmektedir. Bu durumda kalıbın şekillendirme işlemi için kullanılabilir olduğu yorumu yapılabilmektedir.

4. Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışmada ısı kalkanı parçasının üretilebilmesi amacıyla kullanılacak kalıp tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kalıp parçası ve üretilen ısı kalkanı parçası üzerinde test ve analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde;

- TiCN kaplamalı malzemenin kaplamasız malzemeye kıyasla daha sert olduğu görülmektedir.
- Kaplamalı parçanın yüzeyinde kaplamasız yüzeye kıyasla daha yoğun karbür oluşumu gözlenmiştir.
- Isı kalkanı parçasından alınan numune sertliği standartta bulunan sertlik değerinden daha yüksek elde edilmiştir.
- Gerçekleştirilen çekme testi sonucunda kalıp malzemesinin çekme mukavemeti 710,83 MPa, akma mukavemeti 445,45 MPa ve uzama değeri %12,17 olarak elde edilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde tasarlanan ve prototip olarak üretilen kalıbın ısı kalkanı şekillendirme işleminde kullanılabilir olduğu söylenebilmektedir.

5. Kaynakça

- [1] Guler, H., & Ozcan, R. (2012). Effects of the rotary embossing process on mechanical properties in aluminum alloy 1050 sheet. *Metals And Materials International*, 18(2).
- [2] Yamaguchi, K., & Mellor, P. B. (1976). Thickness and grain size dependence of limit strains in sheet metal stretching. *International Journal of Mechanical Sciences*, 18(2), 85-90.
- [3] Park, D. H., Kwon, H. H., & Seo, J. H. (2020). Heat Shields Fused with Embossed and Press Formed Al Alloy Sheets for Automobiles. 29(4), 274-280.
- [4] Moretti, J. P., Mancini, S. D., Antunes, M. L. P., & de Paiva, J. M. F. (2015). Recycling scrap automotive heat shield insulation material. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(1), 33-41.
- [5] Mağdala, M. Ö. (2009). Isı kalkanları için kalıplanabilir karbon fenolik kompozit üretimi ve karakterizasyonu (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [6] Güler, H., & Özcan, R. Yenileme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi Üzerine Bir Araştırma Research Into The Effect Of The Restoration Process On The Mechanical Properties.
- [7] Namoco, C. S. (2010). Improving the rigidity of sheet metal by embossing and restoration technique. *Mindanao Journal of Science and Technology*, 8.
- [8] Ozay, C., Altug, M., & Ballikaya, H. (2021). A New Optimization Technique in Examining the Machinability of Sverker 21 Steel: Gray Relational Analysis-Based Genetic Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(12), 11783-11795.
- [9] The Uddeholm. "Uddeholm Sverker 21", erişim: 14 Aralık 2022, <https://www.uddeholm.com/uk/en/products/uddeholm-sverker-21/>
- [10] Matmatch. "Stainless Steel 304", erişim: 14 Aralık 2022, <https://matmatch.com/materials/salo0057-stainless-steel-304>
- [11] Uzman Çelik. "Sertlik Dönüşüm Tablosu", erişim 14 Aralık 2022, <http://www.uzmancelik.com/pdf/sertlik-donusum-tablosu.pdf>



2018 TBDY'YE GÖRE MEVCUT BİNALARIN LİNER OLMAYAN YÖNTEMLERLE PERFORMANS ANALİZİNİN YAPILMASI

Recep Delibaş^{1*}, Emin Hökelekli²

¹ Bartın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Türkiye

recepakilbas@gmail.com

² Bartın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Türkiye

ehokelekli@bartin.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Bu çalışmanın amacı, mevcut bir yapının depreme karşı davranışları performans kavramına bağlı olarak incelenmiş, lineer olmayan bir analiz yöntemi olan “Statik İtme” yöntemi kullanılarak yapıların deprem etkisi altında güvenilirliği ve yapılabilecek güçlendirme çalışmaları değişik kriterler altında değerlendirilmiştir. Ayrıca, 1975 Deprem Yönetmeliği şartlarına göre 1982 yılında inşa edilmiş 3 katlı betonarme bir yapının taşıyıcı sistemi ayrıntılı bir şekilde incelenerek, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre, Statik İtme yöntemiyle deprem dayanıklılık analizi yapılmış ve gerekli güçlendirme çalışması ile beraber konunun örnek çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmanın 1. bölümünde deprem hakkında dünya ve Türkiye ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde deprem yönetmeliğine göre performans kavramı ayrıntılı olarak incelenmiş, yapısal ve yapısal olmayan yapının performans düzeyleri, yapı performans düzeyleri ve yer hareketlerinin sınıflandırılması konuları incelenmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde Nonliner Analiz ve bu analizde kullanılan “Kapasite Spektrum Yöntemi” detaylıca anlatılmış, konuyla ilgili kavramların açıklamaları yapılmıştır. Dördüncü bölümde Statik İtme Analizi için kullanılabilen, çalışmalarda büyük kolaylık sağlayan bilgisayar desteğini sağlayabilmek amacıyla geliştirilmiş STA4CAD yapısal analiz programı hakkında bilgi verilmiş, hesap yöntemleri ve programları kullanmaya yönelik genel esaslar tanımlanmıştır. Beşinci bölümde ise nonliner analiz ile güvenliği belirlenecek 3 katlı mevcut bir betonarme yapı incelenmiş, 1975 deprem yönetmeliği şartları göz önüne alınarak gerekli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre mevcut yapıya güçlendirme yapılması ihtiyacı meydana gelmiş, güçlendirme yapılarak yapının deprem dayanıklılığı sağlanmıştır. Altıncı bölümde ise mevcut binanın durumu ve güçlendirilmiş binanın analiz neticeleri karşılaştırmalı tablolarla aktararak sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nonliner Yöntem, Mevcut Yapılar, Performans Analizi, Pushover, Statik itme

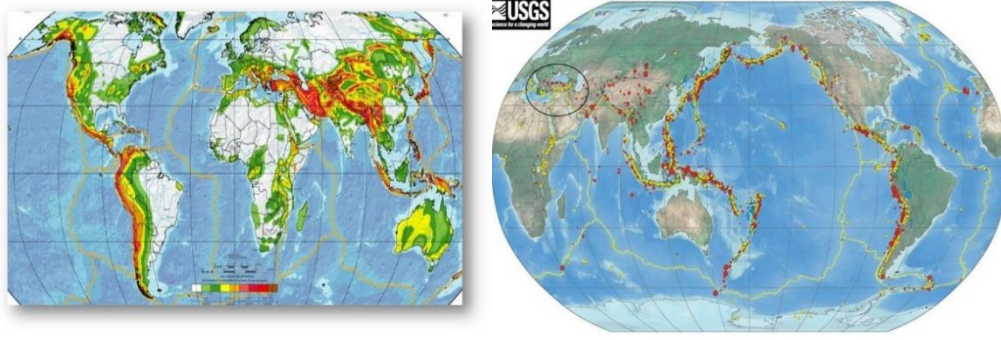
1. Giriş

Mevcut yapılarda veya yeni yapıların statik durumunun tespiti ve tahkiki için yapının performan analizi yapılarak durum tespiti sağlanmış olur.

2. Deprem

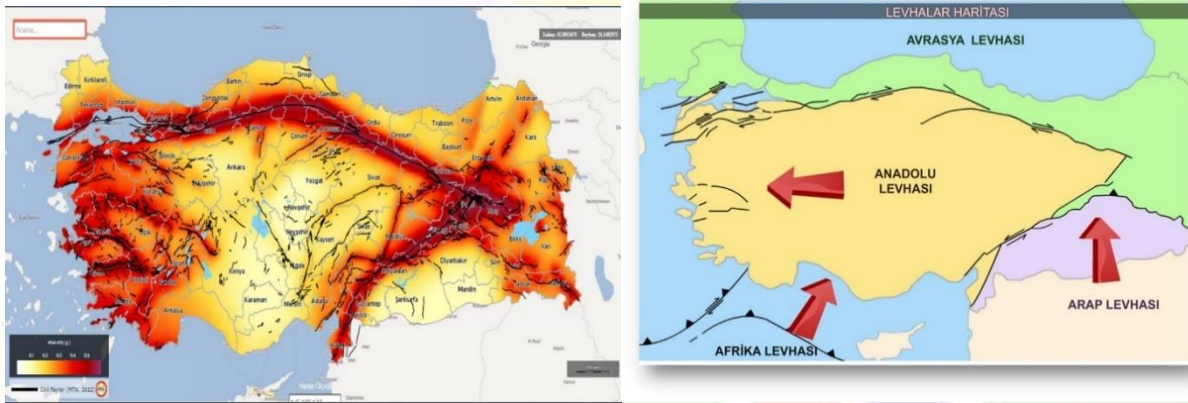
Bu bölümünde deprem hakkında dünya ve Türkiye ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Deprem: yer kabuğunda tektonik hareketler ile biriken potansiyel enerji sonucunda meydana gelen sismik dalgalanmalar ve bu dalgaların yeryüzünü sarsması olayıdır. Fay: Yer kabuğundaki bu hareketli kesimlere denir. Dünya’da 2 ana deprem kuşağı var. 1. Himalaya Akdeniz Deprem Kuşağı 2.Pasifik Deprem Kuşağı olarak meydana gelmektedir.





Şekil 1: Dünya Deprem Haritası

Türkiye'deki aktif deprem kuşaklarını içerisinde bulunmasından dolayı deprem ülkesi, aktif olan Anadolu levhası ortalama her sene 2,5 santimetre batıya doğru kayıyor.



Şekil 2: Türkiye Deprem ve Levha Haritası

3. Performans Düzeyi Değerlendirme

Bu bölümde deprem yönetmenliğine göre performans kavramı ayrıntılı olarak incelenmiş, yapısal ve yapısal olmayan yapının performans düzeyleri, yapı performans düzeyleri ve yer hareketlerinin sınıflandırılması konuları incelenmiştir.

Ön tasarımı yapılan bina taşıyıcı sistemi bu kez DD-1 deprem yer hareketinin etkisi altında yönetmenliğin Tablo 3.4(a)'da İleri Performans Hedefi olarak tanımlanan Kontrollü Hasar (KH) performans hedefini ve ayrıca DD-3 depremi altında Sınırlı Hasar (SH) performans hedefini sağlamak üzere yönetmenliğin Bölüm 5'e göre Şekildeğiştirmeye Göre Değerlendirme ve Tasarım (ŞGDT) yaklaşımı ile değerlendirilecek ve gerekli olması durumunda tasarım hedeflenen performans sağlanacak şekilde tekrarlanacaktır.

Tablo 1: 2018 TBDY'ye göre yeni yapılacak veya mevcut binalar (BYS=1)

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1, 2, 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-4	KK	DGT	—	—
DD-3	—	—	SH	ŞGDT
DD-2	KH	DGT ⁽³⁾	KH	DGT ^(3,4)
DD-1	GÖ	ŞGDT	KH	ŞGDT



Deprem tasarım sınıflarına göre yeni yapılacak veya mevcut binalar için performans hedefleri ve uygulanacak değerlendirme/tasarım yaklaşımları 2018 TB DY'ye göre yeni yapılacak veya mevcut binalar (BYS=1) verilen şartlara göre yapılmaktadır. (Tablo 1)

Tablo 2: 2018 TB DY'ye göre deprem yalıtımı yapılarak güçlendirilecek mevcut binalar-üst yapı

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1, 2, 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-2	KH	DGT	SH	DGT
DD-1	—	—	—	—

Deprem tasarım sınıflarına göre deprem yalıtımlı binalar için performans hedefleri ve uygulanacak değerlendirme/tasarım yaklaşımları 2018 TB DY'ye göre deprem yalıtımı güçlendirilecek mevcut binalar-üst yapı tablosunda verilen şartlara göre yapılmaktadır. (Tablo 2)

3.1. Bina Ferforan Düzeyleri

3.1.1. Kesintisiz Kullanım (KK) Performans Düzeyi

Bu performans düzeyi bina taşıyıcı sistem elemanlarında yapısal hasarın meydana geldiği veya hasarın ihmal edilebilir ölçüde kaldığı duruma karşı gelmektedir.

3.1.2. Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi

Bu performans düzeyi bina taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği diğer deðişle doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı hasar düzeyine karşı gelmektedir.

3.1.3. Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi

Kontrollü hasar performans düzeyi can güvenliği sağlamak üzere bina taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve depremden sonra genellikle onarılma imkanı olan kontrollü hasar düzeyine denk gelmektedir.

3.1.4. Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi

Bu performans düzeyi bina taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği göçme öncesi duruma gelmektedir. Binanın kısmen veya tamamen göçmesi önlenmiştir

3.2. Deprem Yer Hareket Düzeyleri

3.2.1. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1)

DD-1 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu çok seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, gözönüne alınan en büyük deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.(2475 yıllık deprem, olabilecek en büyük deprem)

3.2.2. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2)

DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.(475 yıllık deprem, statik tasarım depremi)

3.2.3. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3)

DD-3 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %50 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 72 yıl olduğu sık deprem yer hareketini nitelemektedir. (72 yıllık deprem, sık depremi)



3.2.4. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4 (DD-4)

DD-4 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %68 (30 yılda aşılma olasılığı %50) ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 43 yıl olduğu çok sık deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, servis deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.(43 yıllık deprem, servis deprem)

Japonya Depremi 9.0 büyüklüğünde ve Şili Depremi 8.8 büyüklüğünde meydana gelen deprem sınıfı; Deprem yer hareket düzeyi-1 (DD-1) sınıfıdır.

Düzce’de 7.2 büyüklüğünde olan deprem sınıfı; deprem yer hareket düzeyi-2 (DD-2) sınıfıdır.

Elazığ Depremi 6.8 büyüklüğünde ve Van Depremi 6.6 büyüklüğünde meydana gelen deprem sınıfı; Deprem yer hareket düzeyi-3 (DD-3) sınıfıdır.

Manisa Depremi 4.6 büyüklüğünde ve Tekirdağ Depremi 4.2 büyüklüğünde meydana gelen deprem sınıfı; Deprem yer hareket düzeyi-4 (DD-4) sınıfıdır.

4. Mevcut Yapının Değer Tespiti

Bu bölümde performans analizi yapılacak yapı hakkında genel bilgi verilmiştir. Yapıdan alınan beton karot numune değerlendirmesi neticesinde katlara göre beton dayanımları belirlenmiştir. Bodrum katın beton basınç dayanım ortalaması 15.62 N/mm², Zemin katın beton basınç dayanım ortalaması 7.97 N/mm², Birinci katın beton basınç dayanım ortalaması 9.55 N/mm², İkinci katın beton basınç dayanım ortalaması 11.22 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3: Bodrum kat karot sonuçları

Karotu Alan				Karot Adedi			
Karot Alınma Tarihi				Deney Tarihi		18.07.2021	
KAROT NO	AİT OLDUĞU YAPI ELEMANI (Blok,Kat/Kot,Aks,Kolon/Kiriş/Perde)	KAROT		KIRILMA YÜKÜ	BASINÇ DAYANIMI		
		ÇAPI (d)	YÜKSEKLİĞİ (h)				
		(mm)	(mm)	(kN)	N/mm ²		
1	BODRUM KAT KOLON	100.0	100.0	133.6	17.0		
2	BODRUM KAT PERDE	100.0	100.0	127.2	16.2		
3	BODRUM KAT KOLON	100.0	100.0	107.1	13.6		
4		0.0	0.0	0.0	0.0		
5		0.0	0.0	0.0	0.0		
6		0.0	0.0	0.0	0.0		
7		0.0	0.0	0.0	0.0		
8		0.0	0.0	0.0	0.0		
9		0.0	0.0	0.0	0.0		
KAROT ORTALAMA DEĞERİ		15.62					



Tablo 4: Zemin kat karot sonuçları

Karotu Alan				Karot Adedi			
Karot Alınma Tarihi				Deney Tarihi		18.07.2021	
KAROT NO	AİT OLDUĞU YAPI ELEMANI (Blok,Kat/Kot,Aks,Kolon/Kiriş/Perde)	KAROT		KIRILMA YÜKÜ	BASINÇ DAYANIMI		
		ÇAPI (d)	YÜKSEKLİĞİ (h)				
		(mm)	(mm)				
1	ZEMİN KAT KOLON	100.0	100.0	62.9	8.0		
2	ZEMİN KAT KOLON	100.0	100.0	85.6	10.9		
3	ZEMİN KAT KOLON	100.0	100.0	39.4	5.0		
4		0.0	0.0	0.0	0.0		
5		0.0	0.0	0.0	0.0		
6		0.0	0.0	0.0	0.0		
7		0.0	0.0	0.0	0.0		
8		0.0	0.0	0.0	0.0		
9		0.0	0.0	0.0	0.0		
KAROT ORTALAMA DEĞERİ			7.97				

Tablo 5: Birinci kat karot sonuçları

Karotu Alan				Karot Adedi			
Karot Alınma Tarihi				Deney Tarihi		18.07.2021	
KAROT NO	AİT OLDUĞU YAPI ELEMANI (Blok,Kat/Kot,Aks,Kolon/Kiriş/Perde)	KAROT		KIRILMA YÜKÜ	BASINÇ DAYANIMI		
		ÇAPI (d)	YÜKSEKLİĞİ (h)				
		(mm)	(mm)	(kN)	N/mm ²		
1	1. KAT KOLON	100.0	100.0	38.9	5.0		
2	1. KAT KOLON	100.0	100.0	93.9	12.0		
3	1. KAT KOLON	100.0	100.0	92.1	11.7		
4		0.0	0.0	0.0	0.0		
5		0.0	0.0	0.0	0.0		
6		0.0	0.0	0.0	0.0		
7		0.0	0.0	0.0	0.0		
8		0.0	0.0	0.0	0.0		
9		0.0	0.0	0.0	0.0		
KAROT ORTALAMA DEĞERİ			9.55				



Tablo 6: İkinci kat karot sonuçları

Karotu Alan		Karot Adedi			
Karot Alınma Tarihi		Deney Tarihi		18.07.2021	
KAROT NO	AİT OLDUĞU YAPI ELEMANI (Blok,Kat/Kot,Aks,Kolon/Kiriş/Perde)	KAROT		KIRILMA YÜKÜ	BASINÇ DAYANIMI
		ÇAPI (d)	YÜKSEKLİĞİ (h)		
		(mm)	(mm)	(kN)	N/mm ²
1	2. KAT KOLON	100.0	100.0	104.4	13.3
2	2. KAT KOLON	100.0	100.0	86.6	11.0
3	2. KAT KOLON	100.0	100.0	73.2	9.3
4		0.0	0.0	0.0	0.0
5		0.0	0.0	0.0	0.0
6		0.0	0.0	0.0	0.0
7		0.0	0.0	0.0	0.0
8		0.0	0.0	0.0	0.0
9		0.0	0.0	0.0	0.0
KAROT ORTALAMA DEĞERİ		11.22			

Yapıda yerinde yapılan incelemelere göre kullanılan donatı değerleri belirlenmiştir. Donatı tespiti yapılırken; yapının betonarme projesindeki donatılar göz önünde bulunarak ve röntgen yardımıyla donatı değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen beton değerleri ve donatı miktarına göre yapının performans analizi yapılmıştır.

Tablo 7: Performans analizi veri ve sonuçları

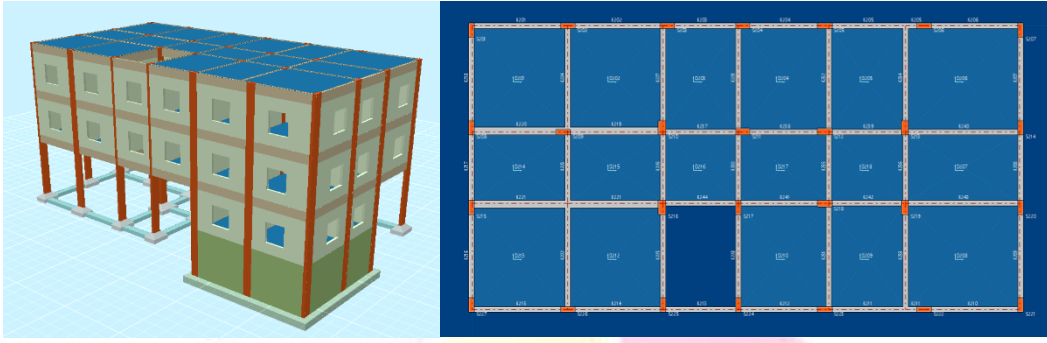
BİNA KULLANIM AMACI	YURT
Bina Kullanım Sınıfı	BKS=1
Bina Önem Katsayısı (I)	1.5
Deprem Tasarım Sınıfı	2a
Sds	0.72
Enlem / Boylam	40.49527 /32,461
Zemin Sınıfı	ZC
Zemin Taşıma Gücü	14 t/m ²
Zemin Yatak Katsayısı	2000 t/m ³
Beton Sınıfı	C7-C10-C12
Donatı Sınıfı	S220 (Nervürlü Donatı)
Kolon-kiriş Donatı Girişi, Etriye, Çap Ve Aralıkları	Paspayı sıyırma yapılmıştır.
Perde Durumu	Deprem perdesi bulunmamaktadır.
Kalıp Planları	Yerinde incelemeler sonucu yapılmıştır.
Temel Sistemi	Münferit Temel
Bina Yükseklik Sınıfı	BYS=6
Bina Bilgi Düzeyi Kat Sayısı	1
Korozyon Durumu	Korozyon yok.
Drenaj Ve Yalıtım Durumu	Binada drenaj ve su izolasyonu bulunmamaktadır.
Performans Tasarımı	Şekil değiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım
Bina Performans Hedefi (DD-1 Depreminde)	Kontrollü hasar performans hedefi sağlanmadı.
Bina Performans Hedefi (DD-3 Depreminde)	Sınırlı hasar performans hedefi sağlanmadı.
Taşıyıcı Sistem Türü	Betonarme Karkas ve Plak Döşeme
Çatlak Durumu	Bazı kiriş ve döşemelerde çatlaklar mevcuttur.

5. Yapının Performans Analizi

Dördüncü bölümde Statik İtme Analizi için kullanılabilen, çalışmalarda büyük kolaylık sağlayan bilgisayar desteğini sağlayabilmek amacıyla geliştirilmiş STA4CAD yapısal analiz programı



hakkında bilgi verilmiş, hesap yöntemleri ve programları kullanmaya yönelik genel esaslar tanımlanmıştır.



Şekil 3: Mevcut bina statik 3D modeli ve statik planı

5.1. Mevcut Durum Performans Analizi Sonuçları

Hesaplar deprem seviyesi 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan (DD-1) , 2475 yıl dönüş periyotlu maksimum deprem için “Kontrollü Hasar” performans kriterine göre yapılmıştır.

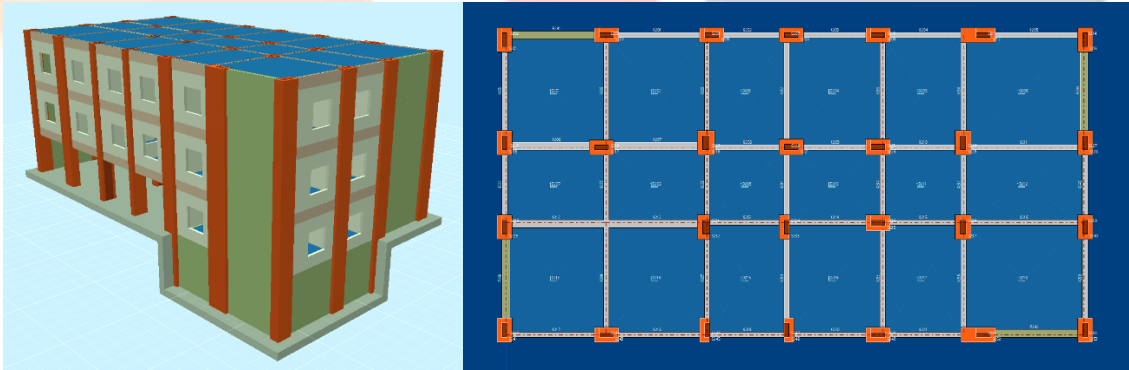
Yapı DD-1 depreminde kontrollü hasar performans seviyesini sağlamamıştır, göçme durumu çıkmıştır.

Hesaplar deprem seviyesi 50 yılda aşılma olasılığı %50 olan (DD-3), 72 yıl dönüş periyotlu sık deprem için “Sınırlı Hasar” performans kriterine göre yapılmıştır.

Yapı DD-3 depreminde sınırlı hasar performans seviyesini sağlamamaktadır. Yapı DD-3 depreminde sınırlı hasar performans seviyesini sağlamamıştır, göçmenin önlenmesi durumu çıkmıştır.

6. Güçlendirme

Beşinci bölümde ise nonliner analiz ile güvenliği belirlenecek 3 katlı mevcut bir betonarme yapı incelenmiş, 1975 deprem yönetmeliği şartları göz önüne alınarak gerekli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre mevcut yapıya güçlendirme yapılması ihtiyacı meydana gelmiş, güçlendirme yapılarak yapının deprem dayanıklılığı sağlanmıştır



Şekil 4: Güçlendirme halinde statik 3D modeli ve statik planı

7. Sonuçlar

Altıncı bölümde ise mevcut binanın durumu ve güçlendirilmiş binanın analiz neticeleri yorumlanmıştır

7.1. Güçlendirme Yapıldıktan Sonraki Analiz sonuçları

Hesaplar deprem seviyesi 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan (DD-1), 2475 yıl dönüş periyotlu maksimum deprem için “Kontrollü Hasar” performans kriterine göre yapılmıştır.



Yapı DD-1 depreminde kontrollü hasar performans seviyesini sağlamıştır, kesintisiz kullanım durumu çıkmıştır.

Hesaplar deprem seviyesi 50 yılda aşılma olasılığı %50 olan (DD-3), 72 yıl dönüş periyotlu sık deprem için “Sınırlı Hasar” performans kriterine göre yapılmıştır.

Yapı DD-3 depreminde sınırlı hasar performans seviyesini sağlamaktadır. Yapı DD-3 depreminde sınırlı hasar performans seviyesini sağlamaktadır, kesintisiz durumu çıkmıştır.

DD1 YER HAREKETİ DÜZEYİNDE, BINA PERFORMANS SONUCU:

Kesintisiz kullanım, Kontrollü Hasar performansı sağlanmıştır ✓
Kiriş Belirgin Hasar oranı= $\%0.0 \leq \%20$ Kesintisiz kullanım ✓
Kontrollü hasar bölgesi yeterlilik kontrolü:
Kiriş Hasar oranı=(IH= $\%0.0 \leq \%35$ ✓), (GB= $\%0$ ✓)
Kolon Hasar oranı=(IH= $\%0.0 \leq \%20$ ✓), (GB= $\%0$ ✓)
Ust kat Vc oranı=(IH= $\%0.0 \leq \%40$ ✓), (GB= $\%0$ ✓)
Plastiklesen kolon Vc oranı=(IH+GB= $\%0.0 \leq \%30$ ✓

DD3 YER HAREKETİ DÜZEYİNDE, BINA PERFORMANS SONUCU:

Sınırlı Hasar performansı sağlanmıştır ✓
Kiriş Belirgin Hasar oranı= $\%0.0 \leq \%20$ Kesintisiz kullanım ✓
Sınırlı hasar bölgesi yeterlilik kontrolü:
Kiriş Hasar oranı=BH= $\%0.0 \leq \%20$ ✓
Kolon Hasar oranı=(BH+IH+GB)= $\%0.0=0$ ✓

8. Kaynakça

2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

Applied Technology Council, ATC -40. Kasım 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, V 1 Redwood City, California/USA

Federal Emergency Management Agency, FEMA 273/356, 1996a. Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, V 1 Redwood City, California/USA

Celep, Z. Ve Kumbasar, N., 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul

Celep, Z. ve Kumbasar, N., 1998. Betonarme Yapılar, Beta Dağıtım, İstanbul

Celep, Z. ve Kumbasar, N., 2001. Yapı Dinamiği, Beta Dağıtım, İstanbul

Celep, Z., 2001. Deprem Etkisinde Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesinde Performans Kavramı, Meslek İçi Eğitim Semineri, IMO Bursa Şubesi, Aralık

TS-498, 1987. Yapılar hesaplarında kullanılacak yükler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS-500, 2000. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, ABYYHY1997. Bayındırlık Bakanlığı, Ankara

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, ABYYHY1975. İmar ve İskan Bakanlığı, Ankara

Girgin, K., 1996. Betonarme Yapı Sistemlerinde İkinci Mertebe Limit Yükün ve Göçme Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Bir Yük Artım Yöntemi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU İLE BUĞDAY KURUTMAYA YÖNELİK İNCE TABAKALI KURUTMA MODELLERİNİN İNCELENMESİ

Alper Doğan ¹, Senem Şentürk Lüle ^{2,*}

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-7885-8870, alper00dogan@gmail.com

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-6632-5831, senturklule@itu.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Kurutma üzerine yapılan araştırmalar genellikle, kurutma süresinin bir fonksiyonu olarak son ürünlerdeki nem oranını tahmin etmek için en iyi ince tabaka kurutma modelinin belirlenmesine odaklanılır. Bu çalışmada, referans bir akışkan yatak kurutucunun buğday kurutmada kullanılması sonrasında kurutmayı en iyi ifade eden ince tabaka matematiksel modelinin belirlenmesi üzerine bir inceleme yapılmıştır. Farklı yatak yüksekliği ve giriş hızına sahip yedi deneysel sonucu değerlendirmek için literatürden on model dikkate alınmıştır. Regresyon analizi sonuçları, kullanılan on matematiksel model arasında Midilli modelinin deneysel verilere en iyi yaklaşımı sağladığını göstermiştir. Akışkan yatak hidrodinamiğinin kurutma performansını dolayısıyla matematik modeller kullanarak yapılan tahminleri önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gıda kurutma, akışkan yatak kurutucu, ince tabaka kurutma modelleri.

1. Giriş

Kurutma, kimya, kağıt, mineral, ilaç, seramik, tekstil, polimer, gıda ve tarım endüstrilerinde kullanılan en eski ve en yaygın işlemdir. Gıdaların uzun süreli, temiz ve güvenli bir şekilde saklanmasını sağlayan teknolojik gelişmelerden önce bile güneşte kurutma tüm toplumlarda kullanılıyordu. Uygun olmayan kurutma koşulları üründe kimyasal, fiziksel ve biyolojik hasarlara neden olmakta ve bunun sonucunda ürünün dokusu, rengi, aroması ve besin içeriği etkilenmektedir.^[1] Çeşitli gıda ürünleri için endüstriyel kurutma ihtiyaçları, çeşitli kurutma yöntemlerinin geliştirilmesine neden olmuştur.^[2] Akışkan yataklı kurutucular, çeşitli kimyasallar, gıda maddeleri, karbonhidratlar, biyomalzemeler, çeşitli içecekler, seramikler, toz ve sıkıştırılmış ilaçlar, pestisitler, boya pigmentleri, deterjanlar, gübreler, polimerler ve reçineler gibi malzemelerin işlenmesinde kullanılabilen kurutuculardan biridir.^[3,4,5]

Kurutma, karmaşık ve anlaşılması zor ısı, kütle ve momentum aktarım mekanizmalarının aynı anda ve birlikte gerçekleştiği bir süreçtir. Kurutma sırasında aynı anda iki işlem gerçekleşir. Partikül yüzeyindeki nem, sıcak ortamdan ısı transferi nedeniyle buharlaşırken, partikülde bulunan nem partikül yüzeyine doğru yayılır.^[2,6] Ampirik ve yarı teorik matematiksel kurutma modelleri, Fick'in 2. kanununu uygulayarak bu işlemleri basitleştirir böylece ısı ve nem transferi, kuruma hızı matematiksel olarak modellenir ve kurutulan malzemenin kuruma eğrisi oluşturulur.^[7] Bu tür matematiksel modellere “ince tabaka kurutma modelleri” denir. Bu modelleri kullanmak için, kuruma süresi boyunca nem değişimi hakkında bilgi sağlamak için deneysel verilere ihtiyaç vardır. Deneysel veriler, regresyon yöntemleri kullanılarak kuruma eğrisine dönüştürülür.^[8] Literatürde rağı^[9], pirinç^[10], buğday^[11], fil elması^[12], kahve meyvesi^[13], tütün^[14], sago atığı^[15] ve kanola^[16] gibi birçok farklı ürün türünün kurutma davranışının modellenmesinde ince tabaka kurutma modelleri kullanılmıştır. Farklı gıda ürünlerinin kuruma eğrisini elde etmek için tepsili kurutucu^[17-18], halojen kurutucu^[19], mikrodalga kurutucu^[20] ve konveksiyonlu kurutucu^[21] kullanan deney düzenekleri mevcutken akışkan yataklı kurutucular^[22-30] da kullanılmaktadır. Deneysel çalışmaların yanı sıra deneysel ve simülasyon çalışmalarını birleştiren birçok çalışma da mevcuttur.^[9, 14, 15, 16, 31, 32]



Bu çalışmada, akışkan yatak bir kurutucuda buğday kurutma için yapılan deneylerin^[33] sonuçları kullanılarak kurutmayı en iyi ifade eden ince tabaka matematiksel modelin tespiti üzerinde durulmuştur. Deneylerde 3 kg, 6 kg ve 9 kg yaş buğday sırasıyla 0,1 m, 0,2 m ve 0,3 m yatak yüksekliği oluşturacak şekilde kurutucuya yüklenmiş farklı gaz giriş hızları için kurutma yapılarak zamana bağlı nem değişimi elde edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada kullanılan katı malzeme 0,004 m çapında, 1300 kg/m³ başlangıç yoğunluğuna sahip buğdaydır. Deneysel çalışmada^[33], %98 nem içeriğine sahip yarı haşlanmış buğday tanecikleri, akışkan yatak kurutucuda 70 °C sıcaklıkta hava ile kurutulmuştur. Kurutma sırasında nem içeriği ve yatak basınç ölçümleri yapılmış ve Tablo 1'de gösterilen tüm durumlar için kuruma eğrisi elde edilmiştir. Tablo 1'de gösterildiği gibi, yatak yüksekliği ve giriş hızının kuruma eğrisi üzerindeki etkisini belirlemek için farklı gaz giriş hızları ve yatak yükseklikleri dikkate alınmıştır. Kurutma 1,5 saat boyunca yapılmıştır.

Tablo 1: Deneysel veri seti

Yatak Yüksekliği (m)	Hava Giriş Hızı (m/s)
0,1	1,9
	2,3
	3,0
0,2	2,4
	3,2
0,3	2,5
	3,2

Tablo 2'de gösterilen 10 farklı ince tabaka kurutma modelinden deneysel verilere en uygun olan ince tabaka matematiksel kurutma modelini bulmak için Denklem 1'de gösterilen formül ile nem oranları hesaplanmıştır.

$$MR = \frac{MC - MC_e}{MC_0 - MC_e} \quad (1)$$

burada MR nem oranını, MC tahılın herhangi bir andaki nem içeriğini, MC_e dengedeki nem içeriğini ve MC_0 ıslak tahılın ilk nem içeriğini ifade etmektedir.

Doğrusal olmayan regresyon sırasında, deneysel verilere göre regresyonun kalitesini ifade eden korelasyon katsayısı (R^2) ve Denklem 2'de gösterilen ve deneysel veriler ile matematiksel modelden elde edilen veriler arasındaki hatayı ifade eden SSE (sum of square error) dikkate alınmıştır. Regresyon için EXCEL'de iç içe geçmiş döngüler hazırlanmıştır. En yüksek R^2 ve en düşük SSE değerleri ile en uygun matematiksel modelin seçilmesi amaçlanmıştır.

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (2)$$

burada $MR_{exp,i}$ ve $MR_{pre,i}$ sırasıyla deney ve tahminden elde edilen nem oranını temsil ederken N regresyon için kullanılan veri noktalarının sayısıdır.



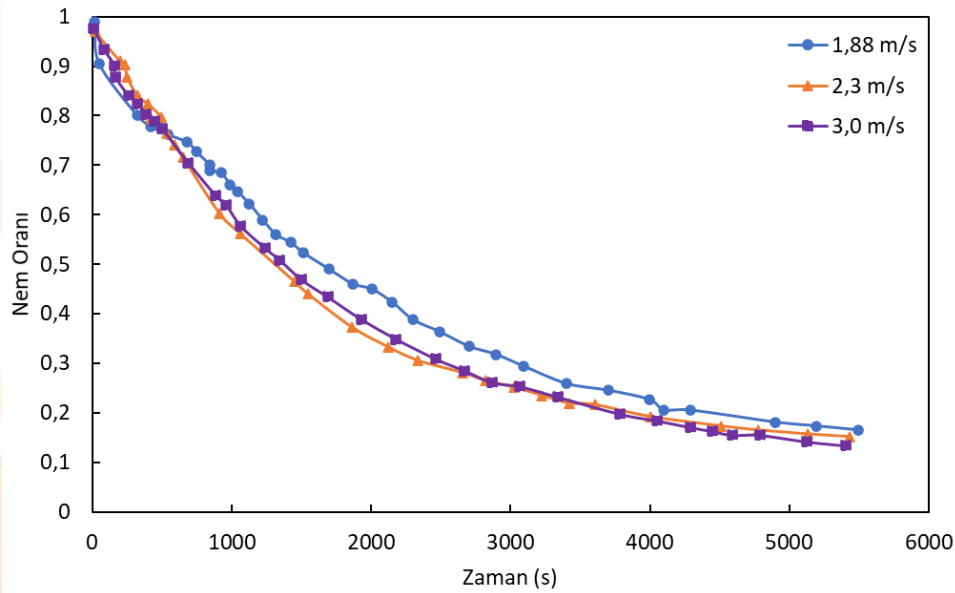
Tablo 2: Regresyon analizinde değerlendirilen matematiksel ince tabaka modelleri

No	Model Adı	Matematiksel İfade
1	“Newton”	$“MR = e^{-kt}”$
2	“Page”	$“MR = e^{-kt^n}”$
3	“Henderson & Pabis”	$“MR = a \times e^{-kt}”$
4	“Logarithmic”	$“MR = a \times e^{-kt} + c”$
5	“Two-Term”	$“MR = a \times e^{-bt} + c \times e^{-dt}”$
6	“Two-Term Exponential”	$“MR = a \times e^{-kt} + (1 - a) \times e^{-kat}”$
7	“Diffusion Approach”	$“MR = a \times e^{-kt} + (1 - a) \times e^{-kbt}”$
8	“Verma”	$“MR = a \times e^{-kt} + (1 - a) \times e^{-gt}”$
9	“Modified Henderson & Pabis”	$“MR = a \times e^{-kt} + b \times e^{-gt} + c \times e^{-ht}”$
10	“Midilli”	$“MR = a \times e^{-kt^n} + b \times t”$

k, a, b, n, c, h, ve g sabit sayılardır.

3. Bulgular ve Değerlendirme

Deneyden alınan bir örnek kuruma eğrisi Şekil 1’de gösterilmektedir. Şekil 1, nem oranının zamanla üstel olarak 1’den 0,1’e düştüğünü göstermektedir.



Şekil 1: Farklı giriş hızlarında 0,1 m yatak yüksekliği için deneysel kurutma eğrileri.

Deneysel veriler için en iyi ince tabaka matematiksel modelin belirlenmesi için üç farklı strateji ele alınmıştır. İlk yaklaşımda, Tablo 1’deki 7 durum ayrı ayrı ele alınmıştır ve 70 ayrı regresyon analizi yapılmıştır. İkinci yaklaşımda, aynı yatak yüksekliğine sahip durumlar giriş hızına bakılmaksızın birleştirilmiş ve toplamda üç farklı yatak yüksekliğinin her biri için ayrı ayrı olmak üzere üç regresyon analizi yapılmıştır. Son olarak, tüm durumların verileri yatak yüksekliği ve giriş hızı farklılıkları gözetenmeden birleştirilmiş ve tek bir regresyon çalışması yapılmıştır.

Tablo 2’de numaralandırılmış olan on matematiksel ince tabaka modeli kullanılarak yapılan regresyon hesaplamaları sonucunda elde edilen R^2 ve SSE değerleri Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5’de verilmiştir. Tablo 3’de verilen 7 farklı deneyin on farklı matematiksel model kullanımı ile hesaplanan R^2 ve SSE değerlerine göre Midilli modeli en iyi matematiksel model olarak gözükülmektedir. Bununla birlikte “0,1 m yatak yüksekliğinde hava giriş hızının 3,0 m/s olduğu durumda Logarithmic model Midilli modeli kadar iyi bir tahmin yapmıştır.



Tablo 3: 7 farklı deneyin on farklı matematiksel model ile hesaplanan R^2 ve SSE değerleri

No	“H= 0,1 m”						“H= 0,2 m”				“H= 0,3 m”			
	V=1,9 m/s		V=2,3 m/s		V=3,0 m/s		V=2,4 m/s		V=3,2 m/s		V=2,5 m/s		V=3,2 m/s	
	“ R^2 ”	“SSE”	“ R^2 ”	“SSE”	“ R^2 ”	“SSE”	“ R^2 ”	“SSE”	“ R^2 ”	“SSE”	“ R^2 ”	“SSE”	“ R^2 ”	“SSE”
1	0,995	0,034	0,991	0,034	0,997	0,028	0,997	0,011	0,997	0,013	0,989	0,036	0,998	0,006
2	0,993	0,012	0,988	0,029	0,994	0,014	0,995	0,019	0,997	0,012	0,995	0,011	0,997	0,006
3	0,994	0,039	0,989	0,028	0,995	0,014	0,997	0,011	0,996	0,013	0,988	0,028	0,998	0,005
4	0,995	0,008	0,998	0,004	0,999	0,002	0,997	0,007	0,998	0,007	0,992	0,018	0,998	0,005
5	0,994	0,012	0,988	0,028	0,995	0,014	0,997	0,011	0,996	0,013	0,988	0,028	0,998	0,005
6	0,994	0,013	0,989	0,028	0,998	0,006	0,997	0,011	0,996	0,013	0,990	0,037	0,998	0,005
7	0,995	0,009	0,998	0,004	0,998	0,004	0,997	0,011	0,996	0,013	0,996	0,001	0,998	0,006
8	0,995	0,009	0,998	0,004	0,999	0,004	0,997	0,011	0,997	0,013	0,996	0,001	0,997	0,006
9	0,994	0,012	0,989	0,028	0,995	0,014	0,997	0,011	0,997	0,013	0,988	0,028	0,998	0,005
10	0,996	0,008	0,998	0,003	0,999	0,002	0,999	0,002	0,999	0,003	0,999	0,003	0,999	0,002

Tablo 4'te görüldüğü gibi, yatak yüksekliğine göre gruplama yapıldığında en iyi matematiksel model yine Midilli modeli olmuştur.

Tablo 4: 7 farklı deneyin yatak yüksekliği temel alınarak birleştirildiği durum için on farklı matematiksel model ile hesaplanan R^2 ve SSE değerleri

No	“H= 0,1 m”		“H= 0,2 m”		“H= 0,3 m”	
	“ R^2 ”	“SSE”	“ R^2 ”	“SSE”	“ R^2 ”	“SSE”
1	0,988	0,133	0,993	0,047	0,969	0,159
2	0,988	0,078	0,993	0,045	0,971	0,151
3	0,986	0,094	0,993	0,046	0,969	0,159
4	0,990	0,065	0,995	0,036	0,971	0,151
5	0,986	0,093	0,993	0,046	0,969	0,159
6	0,987	0,090	0,993	0,047	0,969	0,159
7	0,987	0,091	0,993	0,047	0,972	0,149
8	0,987	0,091	0,993	0,047	0,972	0,149
9	0,986	0,094	0,993	0,046	0,969	0,159
10	0,990	0,063	0,996	0,027	0,974	0,135

Tablo 3 ve Tablo 4 karşılaştırıldığında yatak yüksekliği temel alınarak gruplandırma yapıldığında R^2 değerlerinin düştüğü ve SSE değerlerinin arttığı gözlenmektedir. Regresyon analizinde daha fazla veri kullanılmasına rağmen tahminin kötüleşmesi akışkan yatak sistemlerde giriş hava hızının değişimi ile akışkanlaşmada oluşan değişimdir. Akışkanlaşmanın iyi olduğu durumda buğday tanelerinin sıcak hava ile teması daha etkin olacaktır. Minimum akışkanlaşma hızından yüksek pnömatik transfer hızından düşük olmak kayıpla hava giriş hızının mümkün olduğunca yüksek olması gerekmektedir. Bu nedenle aynı yatak yüksekliğinde aynı hava giriş sıcaklığında bile çalışılsa farklı hava giriş hızı sonuçlarının birleştirilerek analiz edilmesi regresyonun kalitesini düşürmüştür.

Tüm deney verilerinin birleştirildiği veri seti ile regresyon yapıldığında, SSE'de artış ve R^2 'de düşüş gerçekleşmiş (Tablo 5) ve bu durum yatak yüksekliği bazında yapılandırma gruplandırmadan daha kötü tahminlerle sonuçlanmıştır. Akış hidrodynamicinin etkisi açıkça gözükmemektedir.



Tablo 5: 7 farklı deneyin tüm verilerinin birleştirildiği durum için on farklı matematiksel model ile hesaplanan R^2 ve SSE değerleri

No	Tüm veriler	
	" R^2 "	"SSE"
1	0,924	1,508
2	0,988	0,078
3	0,986	0,094
4	0,990	0,065
5	0,986	0,093
6	0,987	0,090
7	0,987	0,091
8	0,987	0,091
9	0,986	0,094
10	0,990	0,063

Akosman^[11] buğdayın kuruma davranışını tepsili kurutucu için 4 farklı matematik model kullanarak incelemiş ve kurutma davranışının en iyi Page ve Logaritmik modellerin ifade ettiği sonucuna varmıştır. Bu çalışmada, sistemde kullanılan hava hızının çok düşük olması ve partiküllerin hareketliliği sonuçların değişkenlik göstermesine neden olmuştur. Benzer şekilde Yoğurtçu^[20] yarı haşlanmış buğday ile yaptığı çalışmada farklı hava sıcaklıklarını kullanan laboratuvar tipi halojen lambalı kurutucu ile çalışmıştır. Elde ettiği sonuçları 5 farklı model üzerinde uygulamış ve haşlanmış buğdayın kuruma davranışını en iyi ifade eden modelin Weibull olduğunu belirtmiştir. Buğday cinsinin yanı sıra farklı kurutma yöntemleri ve parametreleri kurutma davranışını etkilemekte ve matematiksel modeller için farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Akışkan yatak hidrodinamiği bu yöntemi kullanan kurutucuların performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Yatak yüksekliği ve hava giriş sıcaklığı parametrelerinin düzgün bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada buğday kurutmak için tasarlanmış bir akışkan yatak kurutucu için ince tabaka matematiksel model kullanımı incelenmiştir.

Deneysel çalışmadan elde edilen nem-zaman verilerini en iyi temsil eden ince tabaka modelini bulmak için literatürde yaygın olarak kullanılan on farklı matematiksel model için doğrusal olmayan regresyon analizi yapılmıştır. Her bir yatak yüksekliği ve giriş hızı kombinasyonu ayrı ayrı ele alındığında en uygun modelin Midilli modeli olduğu bulunmuştur. Yatak yüksekliği temelinde ve tüm deneysel veriler temelinde veri gruplandırması yapıldığında en iyi model yine Midilli modeli olmuştur. Ancak gruplama arttıkça regresyon kalitesinin düştüğü görülmüştür. Akışkan yatak hidrodinamiği bu yöntemi kullanan kurutucuların performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

5. Kaynakça

- [1] Dinçer, İ.; Zambirescu C. *Drying Phenomena: Theory and Application*; WILEY Press: Ontario Canada, 2016.
- [2] Mujumdar, A. S. *Handbook of Industrial Drying Fourth Edition*; CRC Press: Newyork, 2014.
- [3] Valentas, K. J.; Rotstein E.; Singh, R. P. *Food Engineering Practice*; CRC Press: New York, 1997.
- [4] Kunii, D.; Levenspiel, O. *Fluidization Engineering, 2nd*; Heinemann, 1991.
- [5] Cocco, R.; Karri, S. R.; Knowlton, T. *Introduction to fluidization*; American Institute of Chemical Engineers, 2014.
- [6] Prakash, O.; Kumar, A. *Solar Drying Technology*; Springer: Singapore, 2017.



- [7] Delgado, J.; Barbarose de Lima A. G. *Drying and Energy Technologies*; Springer Press: Switzerland, 2016.
- [8] Çakmak, H; Kumcuoğlu S.; Tavman, Ş. Mathematical Modeling and thin layer drying of chicken meat enriched baguette bread slices. *GIDA*, 2014, 39, pp 131-138. DOI:10.5505/gida.65265
- [9] Srinivasakannan, C.; Balasubramaniam N. An experimental and modeling investigation on drying of ragi. *Drying Technology*, 2006, 24, pp 1683-1689. DOI: 10.1080/07373930601031588
- [10] Kahveci, K; Hacıhafızoğlu, O.; Cihan, A; Modeling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of Food Engineering*, 2006, 79, pp 293-298. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.057
- [11] Akosman, C.; Kalender, M. Thin Layer Drying Characteristics of Parboiled Wheat to Produce Bulgur. *Turkish Journal of Science&Technology*, 2011, 7, pp 75-83. DOI:N/A
- [12] Nag, S.; Dash Kumar, K. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics and moisture diffusivity study of elephant apple. *International Food Research Journal*, 2016, 23-6, pp 2594-2600.
- [13] Correa, P. C.; Resende, O.; Ribeiro, D. M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 2006, 8, pp 1-10. DOI: 10.15871/1517-8595/rbpa.v8n1p1-10
- [14] Geng, F., Xu, D.; Yuan, Z.; Yan, Y.; Luo, D.; Wang, H.; Li, B.; Chyang, C. Numerical simulation on fluidization characteristics of tobacco particles in fluidized bed dryers. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 150, pp 581-592. DOI: 10.1016/j.cej.2009.03.035
- [15] Rosli, M. I.; Abdul Nasir, A. M.; Takriff, M. S.; Chern, L. P. Simulation of a fluidized bed dryer for the drying of sago waste. *Energies*, 2018, 11, pp 1-13. DOI: 10.3390/en11092383
- [16] Gazor, H. R.; Mohsenimanesh, A. Modelling the drying kinetics of canola in fluidized bed dryer. *Czech Journal of Food Science*, 2010, 28, pp 531-537. DOI: 10.17221/256/2009-CJFS
- [17] Kalender C.; A. M.; Thin Layer Drying Characteristics of Parboiled Wheat to Produce Bulgur. *Turkish Journal of Science & Technology*, 2011, 7, pp 513-518. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023
- [18] Carteri Coradi, P.; De Casrto Melo, E.; Pereira Da Rocha R. Mathematical modeling of the drying kinetics of the leaves of lemon (*Cymbopogon citratus* Stapf) and its effects on quality. *Idesia*, 2014, 32, pp 43-45. DOI:10.4067/S0718-34292014000400006.
- [19] Rayaguru, K.; Routay, W. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices. *International Food Research Journal*, 2012, 19, pp 1503-1510. DOI: N/A
- [20] Yoğurtçu, H. Investigation of drying characteristics of parboiled wheat kernel in a halogen lamp dryer and its modelling. *International Journal of Pure Applied Sciences*, 2016, 2, pp 34-39. DOI: N/A
- [21] Karaarslan S. Determination of suitable drying model for combined microwave-fan assisted convection drying of strawberry. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 2014, 2, pp 2062-2067. DOI: N/A
- [22] Mohapatra, D.; Rao, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, 2004, 66, pp 513-518. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023
- [23] Assawarachan, R. Drying kinetics of coconut residue in fluidized bed. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 2013, 2, pp 263-266. DOI: N/A



- [24] Meziane, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. *Energy Conversion and Management*, 2010, 52, pp 1644-1649. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.10.027
- [25] Rafiee, S.; Jafari, A.; Hashemabadi, S. H.; Khanali, M. Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice. *Journal of Agricultural Technology*, 2012, 8, pp 795-810. DOI: N/A
- [26] Srinivasakannan, C.; Balansubramanian, N. An investigation on drying of millet in fluidized beds. *Advanced Powder Technology*, 2008, 20, pp 298-302. DOI: 10.1016/j.appt.2008.10.010
- [27] Mohammadpour, V.; Hamed Mosavian, M. T.; Etemadi, A.; Determination of effective diffusivity coefficient and activation energy of shelled pistachio by using fluidized bed dryer. *SID*, 2007, 3, pp 1-12. DOI: N/A
- [28] Zielinska, M.; Markowski, M. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2010, 49, pp 212-218. DOI: 10.1016/j.cep.2009.12.005
- [29] Madhiyanon, T.; Phila, A.; Soponronnarit, S. Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29, pp 2849-2854. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.02.003
- [30] Yogendrasasidhar, D.; Setty, Y. P. Experimental studies and thin layer modeling of pearl millet using continuous multistage fluidized bed dryer staged externally. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22, pp 428-438. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.10.010
- [31] Jang, J.; Arastoopour, H. CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales. *Powder Technology*, 2014, 263, pp 14-25. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.04.054
- [32] Verma, M.; Sinha, A. N.; Chandra, P. Numerical simulation of 2-D bubbling fluidized bed dryer using sawdust as bed material. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 2017, 3, pp 1466-1475. DOI: N/A
- [33] Erçetin, Ü. Tanecikli Gıda Maddelerinin Akışkan Yatakta Kurutulması. Ph.D. Dissertation, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Turkey, 2007.



AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU AKIŞ HİDRODİNAMİĞİNİN BUĞDAY KURUTMA İÇİN HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ

Alper Doğan ¹, Senem Şentürk Lüle ^{2,*}

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-7885-8870, alper00dogan@gmail.com

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-6632-5831, senturklule@itu.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Akışkan yatak sistemler gübre, ilaç hammaddeleri, çeşitli kimyasallar, tarım ve gıda ürünlerinin kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile modelleme kurutucunun geliştirilmesinde hem ekonomik hem de zaman anlamında büyük tasarruflar sağlamaktadır. Bu çalışmada buğday kurutma amacıyla kullanılan referans bir akışkan yatak kurutucunun akış hidrodinamiği HAD yöntemi ile incelenmiştir. Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu sürüklenme modellerinin akış dinamiği simülasyonları üzerine etkileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca taneciklerin çarpışma elastikliğini ifade eden restitüsyon katsayısının farklı değerlerinin simülasyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tüm bunlara ek olarak simülasyonların 2 veya 3 boyutlu yapılmasının yarattığı farklılıklar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gıda kurutma, akışkan yatak kurutucu, hesaplamalı akış dinamiği.

1. Giriş

Akışkan yatak kurutucular endüstride tanecikli malzemelerin, bulamaç ve lapa halindeki malzemelerin kurutulmasında kullanılmaktadırlar. Yaygın olarak, çeşitli kimyasallar, gıda maddeleri, karbonhidratlar, biomalzemeler, çeşitli içecekler, seramik, toz ve sıkıştırılmış haldeki ilaçlar, tarım ilaçları ve kimyasalları, boya pigmentleri, deterjan, gübre, polimer ve reçine gibi malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadırlar^[1]. Akışkan yatak sistemler kurutmanın dışında kömür gazlaştırmada, ergitilmiş malzemenin soğutulup tanecikli hale getirilmesinde, birçok farklı kaplama işleminde, fischer-tropsch sentezinde, ağır hidrokarbonların kırılmasında, koklaştırma işleminde, kömürün akışkanlaştırılarak yakılmasında, katı endüstriyel atıkların bertaraf edilmesinde ve gazlaştırılmasında kullanılmaktadır^[2].

Literatürde akışkan yatak kurutma farklı gıda ürünlerinin kurutulmasında kullanılmaktadır. Meziane^[3] zeytin posası için yaptığı deneysel çalışmada, başlangıçta ıslak bazda %48,6 nem oranına sahip olan deney malzemesini akışkan yatak kullanarak sırasıyla 50 °C, 60 °C, 70 °C ve 80 °C sıcaklıklarda ve her bir sıcaklıkta akışkan yatağı sırasıyla 41, 52 ve 63 mm yüksekliğine kadar doldurarak sabit hızda kurutmuştur. Khanali vd. (2012)^[4] laboratuvar tipi akışkan yatak ünitede 50 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklıklar, her sıcaklık için 2,3 m/s, 2,5 m/s ve 2,8 m/s kurutma hava hızı, 0,66 kg ve 1,32 kg'lık pirinç yüklemesi ile parametrik bir kurutma deneyi yapmışlardır. Srinivasakannan vd. (2006)^[5] darı tahılının kurutma kinetikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada öncelikle kabuklarını soydukları darıyı akışkan yatak bir kurutucu ile sırasıyla 40 °C, 50 °C ve 65 °C hava sıcaklıklarında ve 1,69 m/s ve 2,25 m/s hava hızlarında kurutmuşlardır. Mohammadpour vd. (2007)^[6] kabuklu Antep fıstığının efektif yayılım katsayısını ve aktivasyon enerjisini belirlemek üzere fıstığı akışkan yatak kurutucuda kurutmuşlardır. Kurutma deneyini 4 farklı sıcaklıkta (25 °C, 30 °C, 45 °C ve 60 °C) ve 3 farklı hava hızında (6, 8 ve 10 m/s) yapmışlar ve deney esnasında fıstığın belirli zaman aralıklarında nem miktarını ölçerek nem-zaman grafiğini elde etmişlerdir. Zielinska vd. (2009)^[7] yılında yaptıkları çalışmada kenar ölçüsü yaklaşık 1 cm olan küp halindeki havuçlar için kuruma kinetiklerini belirlemişlerdir. Deneyde kurutucu ünite olarak püskürtmeli



akışkan yatak kullanmışlardır. Öncesinde şokladıkları havuç tanelerini sırasıyla 60 °C, 70 °C, 80 °C ve 90 °C sıcaklıklarda kurutmuşlar ve taneciklerin zamana göre nem değişimlerini ve boyutlarındaki değişimleri gözlemişlerdir. Madhiyanon vd. (2009)^[8] hindistan cevizinin kurutulması ile ilgili yaptıkları çalışmada bir parçalayıcı yardımı ile ufaladıkları Hindistan cevizini laboratuvar ölçeğindeki bir akışkan yatak kurutucuda kurutmuşlardır. Hava hızının sabit 2,5 m/s olduğu deneyde hava sıcaklığını 60-120 °C aralığında değiştirmiş ve Hindistan cevizini kuru bazda %105 nemden %3 neme kadar kurutmuşlardır. Yogendrasasidhar vd. (2019)^[9] kademeli akışkan yatak kurutucu ile hint darısının kuruma davranışlarını ölçmüşlerdir. Kurutma deneyinde elde ettikleri sonuçlara bakıldığında kullanılan farklı duvar sıcaklıklarının kuruma hızını ve denge nem miktarını etkilediğini gözlemişlerdir. Sıcaklığın yüksek olduğu durumda kurumu hızının daha yüksek ve denge nem miktarının daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, hızla ve yükseklikle kuruma süresinin azaldığını belirlemişlerdir. Gazor vd. (2010)^[10] kanolanın akışkan yatak kurutucudaki kuruma davranışları üzerinde çalışma yapmışlardır. 30-100 °C aralığında farklı giriş sıcaklıkları denemişlerdir. Nem difüzyon katsayısını her sıcaklık değeri için hesaplamışlar ve bu sayının sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini belirlemişlerdir.

Rosli vd. (2018)^[11] bir çeşit palmye ağacı olarak bilinen sago ağacının işlendikten sonra çıkan atıklarını bir akışkan yatak kurutucuda kurutmuşlardır. Eulerian-Eulerian çok fazlı akış modelini seçerek başlangıç koşulları olarak hava hızını 1,3 m/s, tane çapını 2000 µm ve hava sıcaklığını 50 °C olarak girmişlerdir. İlk olarak 0,6, 1,0, 1,3, 1,8 ve 2,2 m/s gibi farklı hava hızları kullanarak taneciklerin akışkanlaşma esnasında gösterdiği davranışı incelemişlerdir. 1,0 ile 2,2 m/s aralığındaki tüm hızların akışkanlaşma için uygun olduğunu fakat kuruma davranışında herhangi bir değişiklik görmemişlerdir. Jang vd. (2014)^[12] ilaç yapımında kullanılan toz halindeki maddenin laboratuvar ölçeğindeki akışkan yatak kurutma deneyini sonlu hacimler yöntemi ile incelemişlerdir. Eulerian-Eulerian tipi çift fazlı akış modelinin kullanıldığı simülasyonda nem yayılım katsayısı 2×10^{-12} m²/s, tane çapı 287 µm, yoğunluk 1200 kg/m³ ve gaz giriş hızı 0,28 m/s olarak girilmiştir. Akış laminar ve tanecikler küresel olarak kabul edilmiştir. Akışkan yatağın gaz çıkış sıcaklığı değerleri ile laboratuvar ölçekli sistemdeki verilerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Verma vd. (2017)^[13] ağaç talaşının akışkan yatak bir kurutucuda modellenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. 600 µm çapında ve 600 kg/m³ yoğunluğa sahip talaş taneciklerini 40 cm boyundaki yatak geometrisi içine 15 cm'lik bir kısmı dolduracak şekilde yerleştirmişlerdir. Eulerian-Eulerian tipi çok fazlı akış modelinin seçildiği çalışmada akışın k-epsilon tipi türbülanslı olduğunu belirtmişlerdir. Geng vd. (2009)^[14] tütün tanelerinin bir akışkan yatak kurutucuda akışkanlaşma karakteristiklerini incelemek adına sonlu hacimler yöntemi ile simülasyonunu yapmışlardır. Eulerian-Eulerian tipi çok fazlı modelinin kullanıldığı çalışmada tütün taneleri küresel olarak kabul edilmiş, ısı ve kütle transferi ise ihmal edilmiştir. Tütün tanesi ile eşdeğer hacimdeki kürenin hacmi hesaplanarak tane çapı 0,002 m olarak belirlenmiştir. Taneciklerin hacimsel dağılımının incelendiği çalışmada, taneciklerin duvara yakın olduğu kısımlarda yer yer aşağı doğru yönlendiği ve bu esnada aşağıdan gelen tanecikler ile tekrar buluştuğu ve girdap oluşturduğu bulunmuştur. Loha vd (2014)^[15] kabarcıklı akışkan yatak ile yaptıkları HAD çalışmasında restitüsyon katsayısının katının akışkanlaşma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 530 µm çapında taneciklerin kullanıldığı çalışmada 1, 0,99, 0,95, 0,90 ve 0,85 restitüsyon katsayılarını hazne duvarlarının tam kaygan ve kayganlık katsayısının 0,6 olarak girildiği iki durum için incelemişlerdir.

Bu çalışmada kurutma amacıyla kullanılan akışkan yatak kurutucularda^[16] yatağın hidrodinamik analizi hesaplamalı akış dinamiği yöntemi ile incelenmiştir. Bunun için ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle simülasyonların 2 veya 3 boyutlu yapılmasının yarattığı farklılıklar irdelenmiştir. Ardından, sürüklenme katsayısının akışkanlaşma üzerindeki etkisini gözlemek amacı ile gaz-katı sistemlerde kullanılan Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modelleri karşılaştırma yapmak amacıyla seçilmiştir. Buğday tanelerinin akışkanlaşma esnasında özellikle başlangıç halinde nem oranı yüksek olduğundan taneciklerin birbiri ile ve hazne duvarları ile yapacağı çarpışmaların etkisini gözlemek adına çarpışmaların etkisini ifade eden esneklik katsayısı (restitution coefficient) sırasıyla 0,9 ve 0,6 olarak farklı simülasyonlarda denenmiştir.



2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada kullanılan katı malzeme 0,004 m çapında, 1300 kg/m³ başlangıç yoğunluğuna sahip buğdaydır. Deneyisel çalışmada^[16], %98 nem içeriğine sahip yarı haşlanmış buğday tanecikleri, akışkan yatak kurutucuda 70 °C sıcaklıkta hava ile kurutulmuştur. Kurutma sırasında nem içeriği ve yatak basınç ölçümleri yapılmış ve Tablo 1'de gösterilen tüm durumlar için kuruma eğrisi elde edilmiştir. Tablo 1'de gösterildiği gibi, yatak yüksekliği ve giriş hızının kuruma eğrisi üzerindeki etkisini belirlemek için farklı gaz giriş hızları ve yatak yükseklikleri dikkate alınmıştır.

Tablo 1: Deneyisel koşulları

Yatak Yüksekliği (m)	Hava Giriş Hızı (m/s)
“0,1”	1,9
	2,3
	3,0
0,2	2,4
	3,2
0,3	2,5
	3,2

Tablo 2’de simülasyonda kullanılan parametreler listelenmiştir.

Tablo 2: HAD modelinin parametreleri

Parametre	Değer
Akış Modeli	Euler-Euler
Tane Çapı (m)	0,004
Başlangıç Tane Yoğunluğu (kg/m ³)	1300
Gaz Yoğunluğu (kg/m ³)	1,225
Gaz Giriş Sıcaklığı (K)	294
Başlangıç Nem Oranı (kuru bazda)	% 98
Yatak Çapı (m)	0,3
Hacimsel Oran	0,55

Buğdayın akışkan yatak kurutucuda sonlu hacimler yöntemi ile hidrodinamik olarak modellenmesi yapılırken genel korunumu denklemlerinden faydalanılmıştır. Kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

Momentumun korunumu^[17]:

Gaz fazı için

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \bar{v}_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g \bar{v}_g \bar{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \bar{g} - K_{gs}(\bar{v}_s - \bar{v}_g) \quad (1)$$

Burada;

$$\bar{\tau}_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \bar{v}_g + \nabla \bar{v}_g^T) - \frac{2}{3} \alpha_g \mu_g (\nabla \bar{v}_g) \bar{I} \quad (2)$$

Katı fazı için

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \bar{v}_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s \bar{v}_s \bar{v}_s) = -\alpha_s \nabla p + \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \bar{g} - K_{sg}(\bar{v}_g - \bar{v}_s) \quad (3)$$

Burada;

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \bar{v}_s + \nabla \bar{v}_s^T) - \alpha_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla \bar{v}_s \bar{I} \quad (4)$$



$$\lambda_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 \rho_{0,ss} \theta_s \quad (5)$$

$$\mu_s = \frac{4}{5} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} + \frac{\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (2e_{ss} - 1) \alpha_s \rho_{0,ss} \right] \quad (6)$$

Katı ve gaz fazları arasındaki etkileşim, akışkan yatağın hidrodinamik davranışları üzerinde oldukça önemli etkilere sahiptir. Eulerian-Eulerian tipi modelde katı ile gaz fazı arasındaki etkileşim sürüklenme kuvveti tarafından sağlanır. Bu çalışmada katı-gaz sistemler için kullanılan Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu teorileri aynı model üzerinde kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Syamlal-O'Brien modeli^[17]:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g}{v_{r,s}^2 d_s} C_d \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (7)$$

Burada $v_{r,s}$ katı fazı için terminal hızdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$v_{r,s} = 0,5(a - 0,06 Re_s + \sqrt{(0,06 Re_s)^2 + 0,12 Re_s (2B - A) + A^2}) \quad (8)$$

Burada;

$$A = \alpha_g^{4,14}$$

$$B = \begin{cases} \alpha_g \leq 0,85 \text{ için } 0,8 \alpha_g^{1,28} \\ \alpha_g > 0,85 \text{ için } 0,8 \alpha_g^{2,65} \end{cases} \quad (9)$$

Wen&Yu modeli^[17]:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} C_d \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2,65} \quad (10)$$

Burada:

$$C_d = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[1 + 0,15 (\alpha_g Re_s)^{0,687} \right] \quad (11)$$

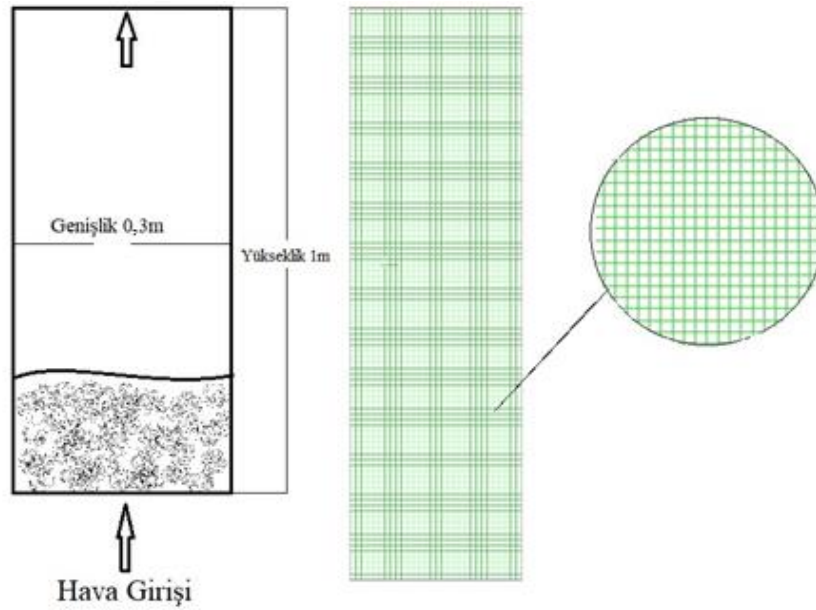
şeklinde ifade edilir.

3. Bulgular ve Değerlendirme

3.1. 3D ve 2D Geometrinin Etkisi

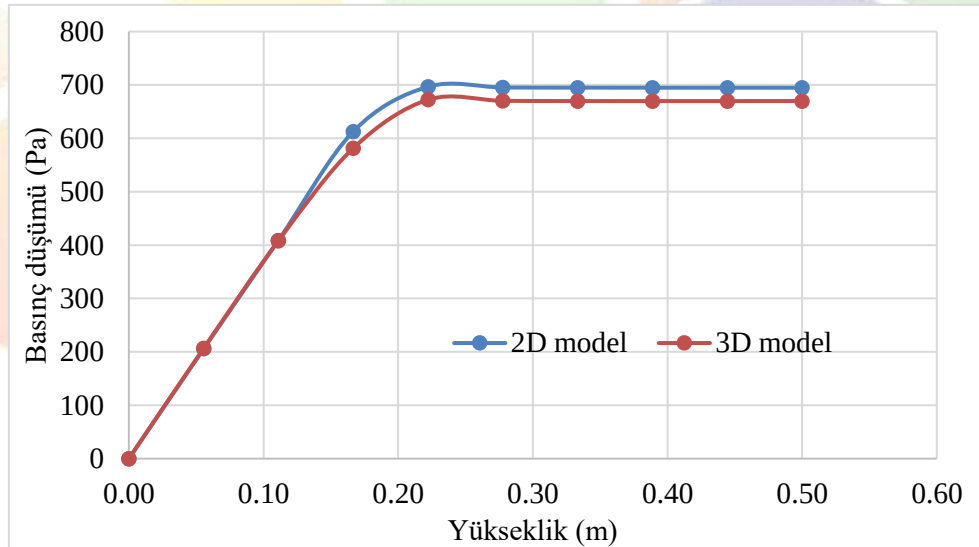
Deney düzeneğinin geometrik ölçüleri kullanılarak akışkan yatak birebir olarak ANSYS Fluent (versiyon 18.2) programının SpaceClaim modülü üzerinde modellenmiştir. 2 boyutlu ve 3 boyutlu iki farklı geometri oluşturulmuştur. Simülasyonun yapılabilmesi için gerekli olan mesh oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçları mesh ile oluşturulan elemanların tipi, kalitesi ve sayısı ile doğrudan bağlantı olduğundan mesh bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Yapılan mesh bağımsızlık çalışması sonucu iki boyutlu modelde toplamda 3000 eleman ve 3 boyutlu modelde ise 48300 eleman bulunmaktadır. Örnek bir mesh Şekil 1'de gösterilmiştir.





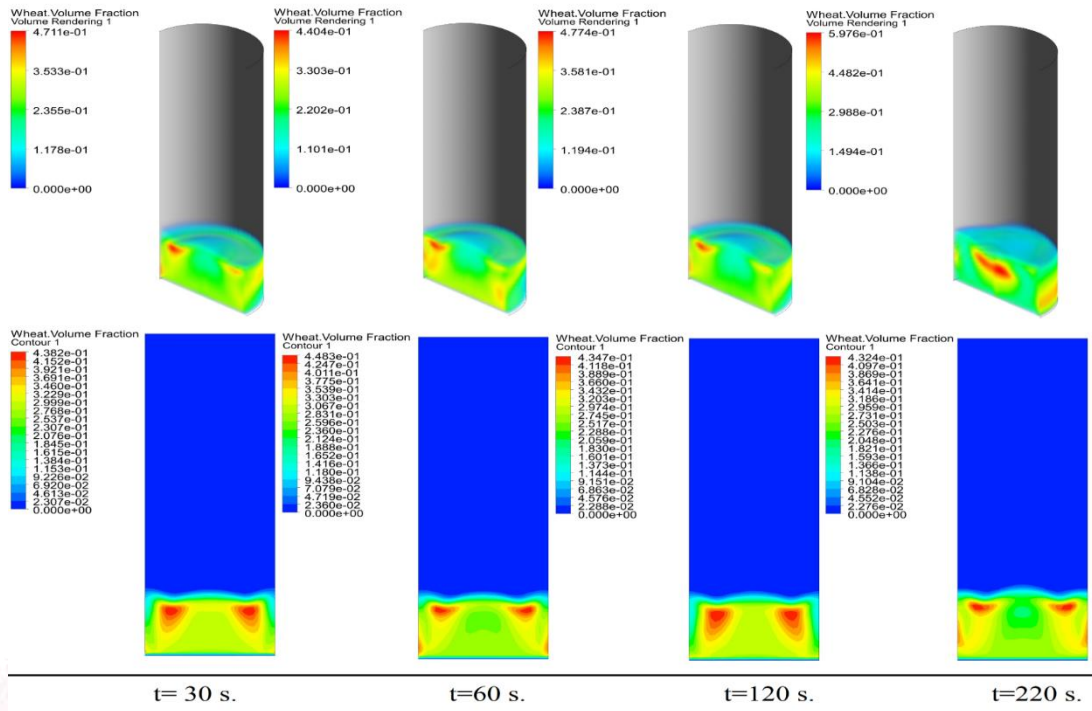
Şekil 1: 2 boyutta mesh (hesap ağı) ve akışkan yatak geometrisi detayları.

Çalışmanın bu kısmında 3 boyutlu (3D) veya 2 boyutlu (2D) geometri kullanmanın akışkan yatak hidrodinamik davranışı ve yatak boyunca olan basınç düşümü açısından oluşturabileceği farklılıklar incelenmiştir. Çalışmada 3 m/s gaz hızı, Syamlal-O'Brien modeli, 0,1 m yatak yüksekliği durumu kullanılmıştır. Şekil 2'de 3D ve 2D geometrilerin simülasyonu sonucu elde edilen toplam basınç düşümü gösterilmiştir. Her iki durumda da ortaya çıkan basınç düşümü eğrileri birbirini oldukça yakın olmakla birlikte 2D modelde hesaplanan maksimum basınç düşümü 695 Pa iken 3D modelde bu değer 670 Pa seviyelerinde olmuştur. Bu da iki model arasında yaklaşık %3 lük bir fark vardır.



Şekil 2: 3D ve 2D modellerde basınç düşümünün aksenal değişimi

Şekil 3'de ise simülasyonun belirli zamanlarında alınan katının hacimsel oran kontürü gösterilmiştir.



Şekil 3: 3D ve 2D modele ait 30, 60 120 ve 220. saniyelerdeki katının hacimsel oran kontürü

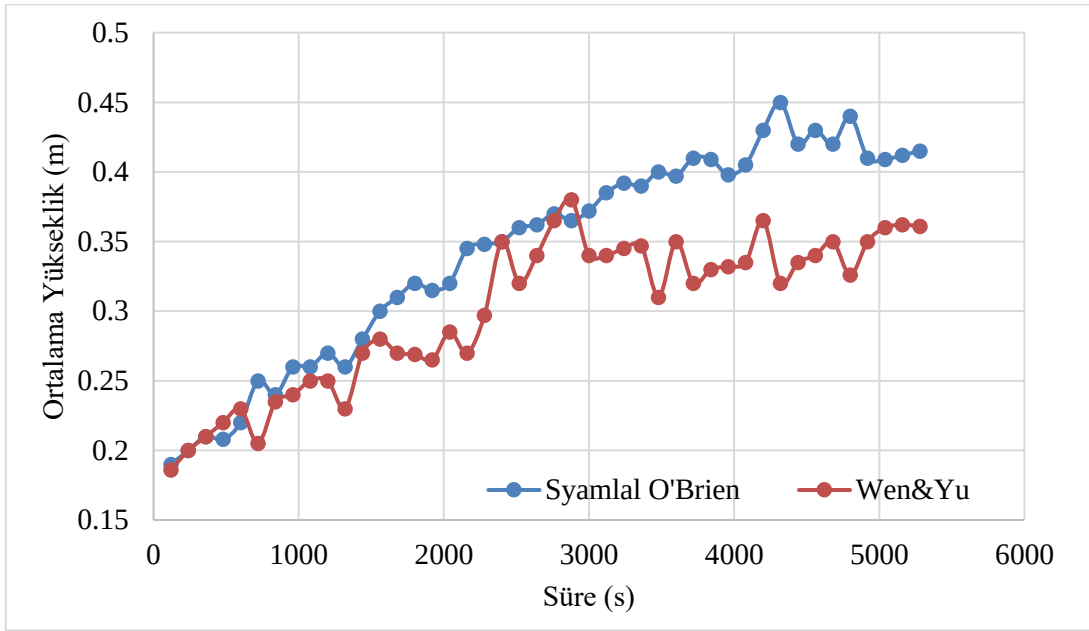
2D ve 3D asimülasyonlar arasındaki farklılık bu çalışmada yapılan araştırma sonuçlarını etkilemeyeceğinden, bundan sonraki çalışmalara iki boyutla devam edilmiştir.

3.2. Sürüklenme Modelinin Etkisi

Katı-gaz tipi akışkan yatak sistemlerde, ANSYS Fluent (versiyon 18.2) katı taneciklerin sürüklenme katsayılarının modellenmesinde akışkan yatakları için Syamlal-O'Brien, Wen&Yu ve Gidaspow olmak üzere toplamda 3 tane model seçeneği sunmaktadır. Bu modeller, akışkan yatağın hidrodinamik davranışı üzerindeki etkisini gözlemek ve deneysel verilerden elde edilen basınç düşümü verileri üzerinden karşılaştırma yapmak amacıyla bu çalışmada konu edilmiştir. Bu amaçla değişken yoğunluk, 3m/s gaz hızı, 0,1 m yatak yüksekliği ve 0,9 restitüsyon katsayısı durumu seçilmiştir. Çalışma kapsamında yukarıda bahsedilen modellerden Gidaspow modeli, yoğun yatak modelleri için kullanılması uygun olduğundan ve deney parametrelerinin normal yatak ile gevşek yatak arasında bir bölgede olduğundan yapılan simülasyon denemelerinde başarılı bir sonuca ulaşamamıştır. Bu nedenle sonuç kısmına dâhil edilmemiş ve sadece Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modellerinin karşılaştırmaları yapılmıştır.

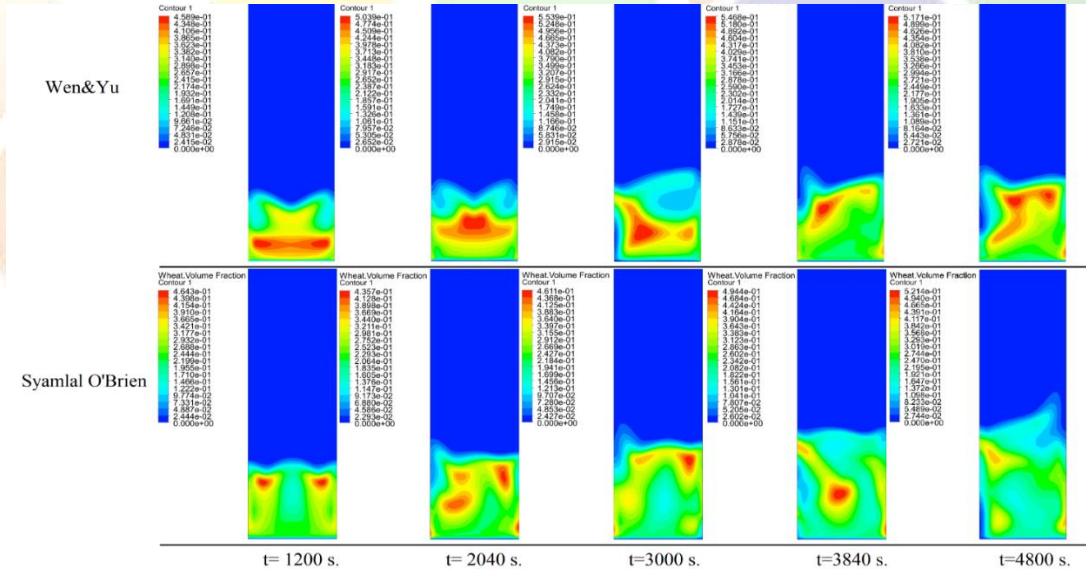
Şekil 4'de iki sürüklenme modeli için 5400 saniyelik simülasyon süresinde ortalama yatak yüksekliğinin zamanla değişimi verilmiştir. Yoğunluğun düşmesi ile birlikte her iki modelde de yatak yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Ancak 3000 saniye sonrasında Wen&Yu modelinde yatak yüksekliği 0,3 m ile 0,32 m aralığında değişmekle birlikte sabit kalmıştır. Syamlal-O'Brien modelinde ise aynı süreden itibaren artmaya devam etmiş ve maksimum 0,46 m yüksekliğe kadar ulaşmıştır. Simülasyon sonlarına doğru ise 0,4 m'nin üzerinde kalmaya devam etmiştir.





Şekil 4: Farklı sürüklenme modelleri için yatak yüksekliğinin zamanla değişimi

Şekil 5’de Syamlal-O’Brien modeli ve Wen&Yu modeli için katının hacimsel oranının anlık görüntüleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde iki modelinde farklı akış dinamiklerine neden olduğu görülmektedir. Wen&Yu modelinde katının yatak içerisinde blok olarak hareket ettiği, yatağın zamanla ulaşılan yüksekliğin Syamlal-O’Brien modelinde Wen&Yu modeline göre daha fazla olduğu görülmüştür. Syamlal-O’Brien modeli daha homojen bir akışkanlaşma ile sonuçlanmıştır. Deneysel verilerde yatak yüksekliği belirtilmemekle birlikte homojen bir akışkanlaşma olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5: Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modelleri için katının hacimsel oranının anlık görselleri

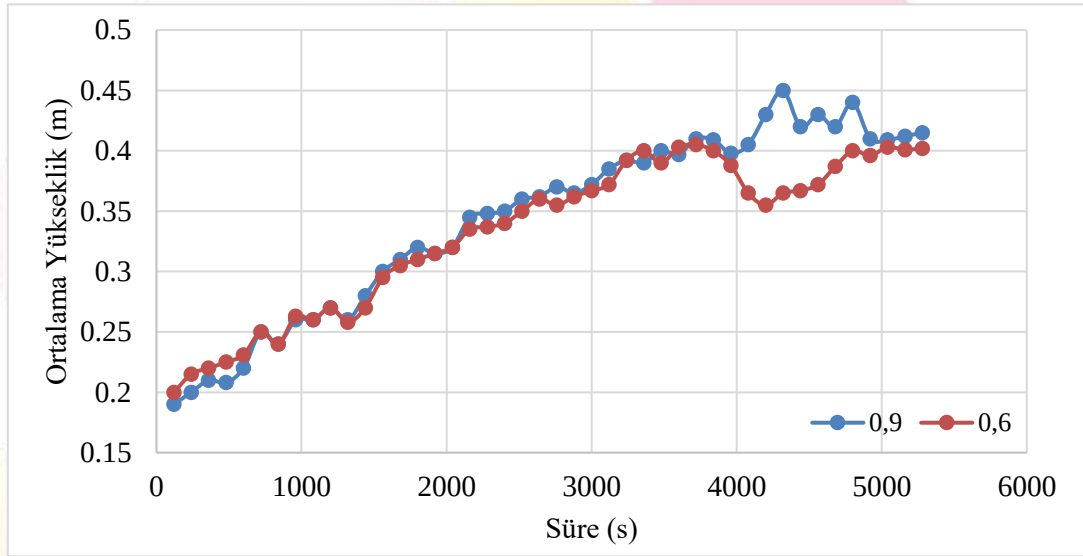
Syamlal-O’Brien modeli kullanılarak hesaplanan basınç düşümü değerleri deneyde ölçülen basınç düşümü değerlerinin altında kalırken, Wen&Yu modelinin kullanılmasıyla hesaplanan basınç düşümü değerleri kurutmanın 778. saniyesi için deneysel verilere oldukça yakın çıkarken 2238. saniyesi için deneysel verilerin altında kalmıştır.



3.3. Restitüsyon Katsayısının Etkisi

Katı-gaz tipi akışkan yatak sistemlerde, taneciklerin kendi arasında ve hazne duvarları ile yaptıkları çarpışmalardaki esneklik veya bir başka deyişle sahip oldukları kinetik enerjileri birbirlerine aktarmanın oranı restitüsyon katsayısı e_{ss} ile ifade edilir. Bu kısımda, 3m/s gaz hızı, Syamlal-O'Brien modeli ve 0,1 m yatak yüksekliği durumu için iki farklı restitüsyon katsayısının akışkan yatağın hidrodinamik davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

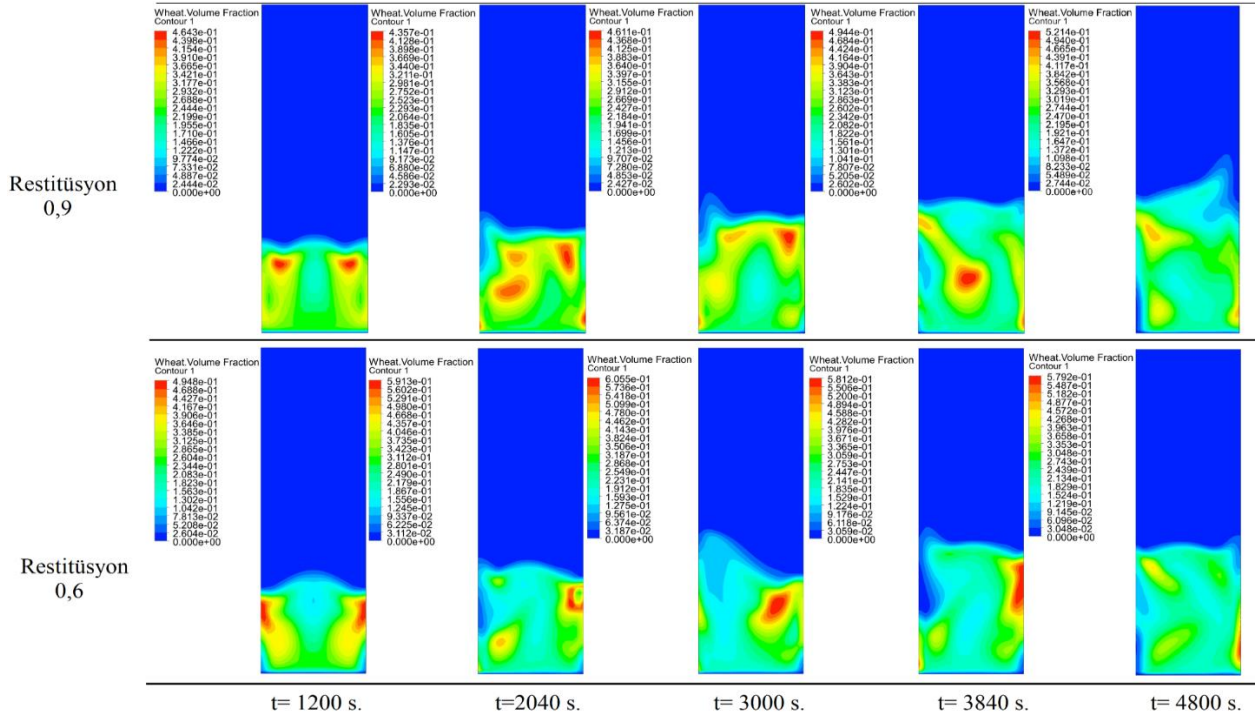
Şekil 6'da restitüsyon katsayısının 0,9 ve 0,6 olarak seçildiği iki farklı simülasyonda akışkan yatak yüzeyinin ortalama yüksekliğinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Her iki simülasyonda 4000. saniyelere kadar benzer yatak yüksekliklerine ulaşılmış, 4000 ile 5000. saniyeler arasında yatak yükseklikleri arasındaki fark açılmıştır. Fakat sonlara doğru yatak yükseklikleri tekrar eşitlenmiştir. Buradan anlaşılabileceği üzere restitüsyon katsayısının değişiminin ortalama yatak yüksekliği üzerinde etkisi olmamıştır.



Şekil 6: Değişik restitüsyon katsayıları için yatak yüksekliğinin zamanla değişimi

Şekil 7'de iki simülasyona ait farklı zamanlarda kaydedilmiş katının hacimsel olarak dağılımı gösterilmiştir. Restitüsyon katsayısının azalması ile taneciklerin birbirleri ile çarpışmaları elastığe yaklaşacağı için kaybettikleri momentumun artacağı bilinmektedir. Görseller incelendiğinde taneciklerin yaptıkları çarpışmadan sonra momentumunun azalmasıyla yapacakları yer değiştirme de azalacağından taneciklerin bir arada kalma eğilimine girdiği görülebilir. Yatak genelinde yüksek restitüsyon katsayısında katının dağılımı daha homojen iken katsayının 0,6 olması ile birlikte aynı anlık görüntüde bu homojenlik bozulmakta veya azalmaktadır.





Şekil 7: Farklı restitüsyon katsayıları için katının hacimsel oranının anlık görselleri

4. Sonuç

Bu çalışmada literatürden referans olarak alınan buğday kurutmada kullanılan bir akışkan yatak kurutuma sisteminin akış hidrodinamiği hesaplamalı akış dinamiği (HAD) simülasyonları ile incelenmiştir. Ayrıca, simülasyonlarda kullanılan farklı model ve parametrelerin etkileri irdelenmiştir.

HAD analizi yönteminde referans çalışmada kullanılan parametreler ve yatak geometrisi birebir olarak modellenmiştir. Simülasyonlarda giriş hava hızının 3 m/s ve yatak yüksekliğinin 10 cm olduğu durum kullanılmıştır. Hesap altyapısının yeterli olmadığı durumlarda 2 boyutlu analiz yapmanın uygunluğu gösterilmiştir.

Katı-gaz tipi sistemlerde kullanılan sürüklenme modellerinden Syamlal-O'Brien ve Wen&Yu modelleri değerlendirilmiştir. Referans çalışmada verilen basınç düşümü değerleri ile bahsi geçen modeller kullanılarak hesaplanan basınç düşümü değerleri farklılık göstermiştir. Syamlal-O'Brien modeli kullanılarak hesaplanan basınç düşümü değerleri deneyde ölçülen basınç düşümü değerlerinin altında kalırken, Wen&Yu modelinin kullanılmasıyla hesaplanan basınç düşümü değerleri kurutmanın 778. saniyesi için deneysel verilere oldukça yakın çıkarken 2238. saniyesi için deneysel verilerin altında kalmıştır. Katının yatak içerisinde dağılımı incelendiğinde Syamlal-O'Brien modeli uygulandığında dağılımın daha homojen, Wen&Yu modeli uygulandığında ise belirli noktalarda çok fazla yoğunlaştığı görülmektedir.

Katı taneciklerin yatak duvarları ve birbirleri ile yaptıkları çarpışmaların momentum transferinin ifadesi olarak kullanılan restitüsyon katsayısının 0,9 ve 0,6 olduğu durumların akışkanlaşma üzerindeki etkisi çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Her iki durum için sonuçlar karşılaştırıldığında, yatak boyunca oluşan maksimum basınç düşümünün ve gerçekleştiği yüksekliğin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Buradan restitüsyon katsayısının yataktaki basınç düşümü üzerinde büyük bir etkisi olmadığı söylenebilir. Öte yandan restitüsyon katsayısının 0,6 olduğu durumda meydana gelen çarpışmaların esnekliği daha düşük olduğundan katının belirli bölgelerde yoğunlaştığı gözlenmiştir.

5. Kaynakça

- [1] A. S. Mujumdar, (2015). Handbook of Industrial Drying Fourth Edition, CRC Press.



- [2] D. Kunii ve O. Levenspiel, (1991). Fluidization Engineering, Second Edition, Heinemann.
- [3] S. Mezziane, (2010). Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer, Energy Conversion and Management, 52.
- [4] S. R. A. J. S. H. M. Khanali, (2012). Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice, Journal of Agricultural Technology, 8.
- [5] C. Srinivasakannan ve N. Balasubramaniam, (2006). An experimental and modeling investigation on drying of ragi, Drying Technology, 24.
- [6] V. Mohammadpour, M. T. Hamed Mosavian ve A. Etemadi, (2007). Determination of effective diffusivity coefficient and activation energy of shelled pistachio by using fluidized bed dryer, SID.
- [7] M. Zielinska ve Markowski Marek, (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 49.
- [8] T. Madhiyanon, A. Phila ve S. Soponronnarit, (2009). Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut, Applied Thermal Engineering, 29.
- [9] D. Yogendrasasidhar ve Y. P. Setty, (2019). Experimental studies and thin layer modeling of pearl millet using continuous multistage fluidized bed dryer staged externally, Engineering Science and Technology, an International Journal, 22.
- [10] H. R. Gazor ve A. Mohsenimanesh, (2010.) Modelling the drying kinetics of canola in fluidized bed dryer,» Czech Journal of Food Science, 28.
- [11] M. I. Rosli, A. M. Abdul Nasir, M. S. Takriff ve L. P. Chern, (2018). Simulation of a fluidized bed dryer for the drying of sago waste, Energies, 11.
- [12] J. Jang ve H. Arastoopour, (2014). CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales, Powder Technology, 263.
- [13] M. Verma, A. N. Sinha ve P. Chandra, (2017). Numerical simulation of 2-D bubbling fluidized bed dryer using sawdust as bed material, Imperial Journal of Interdisciplinary Research, 3.
- [14] F. Geng, D. Xu, Z. Yuan, Y. Yan, D. Luo, H. Wang, B. Li ve C. Chyang, (2009). Numerical simulation on fluidization characteristics of tobacco particles in fluidized bed dryers, Chemical Engineering Journal, 150.
- [15] C. Loha, H. Chattopadhyay and P. K. Chatterjee, (2014). Effect of coefficient of restitution in Euler–Euler CFD simulation of fluidized-bed hydrodynamics, Particuology, 15.
- [16] Ü. Erçetin, (2007). Tanecikli Gıda Maddelerinin Akışkan Yatakta Kurutulması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Doktora Tezi.
- [17] J. Gao, X. Lan, Y. Fan ve G. Wang, (2009). CFD modeling and validation of the turbulent fluidized bed of FCC particles, Particle Technology and Fluidization, 10.1002.



ENTEGRE MAST YAPISININ GEMİ RADAR KESİT ALANI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Seyhan Çakal ^{1*}, Mustafa Helvacı ²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama, Türkiye

ORCID ID: 0000-0002-9449-0770, cakal20@itu.edu.tr

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama, Türkiye

ORCID ID:0000-0002-4049-8072, helvacim@itu.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Özet

Savaş gemileri gelişen radar teknolojilerinden faydalanarak, tehdit platformları kolaylıkla tespit edebilmektedir. Ancak roller değiştiğinde platformların yeni nesil radar sistemleri tarafından fark edilmeden hedefine ilerlemesi oldukça zordur. Gemiler üzerine yerleştirilen antenler, silah sistemleri ve birçok sensör platformların elektromanyetik enerjiyi yansıtıcılığının bir ölçütü olan radar kesit alanını artırmaktadır. Görülmeden gören platformlar geliştirmek için literatürde çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden nispeten maliyet etkin bir yöntem olan şekillendirme, gemilerin radar kesit alanı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Günümüzde, gemi üzerinde çeşitli mevkiilerde konuşlanmış radar sistemlerinin radar kesit alanı üzerindeki etkisinin azaltmak amacıyla geliştirilen entegre mast yapılarından faydalanılmaktadır. Bu çalışmada, platformlarda yerini almaya başlayan yeni nesil entegre mast yapılarının gemilerin radar kesit alanları üzerinde etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak, iki farklı mast yapısı tasarlanmış, gemi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 3 boyutlu gemi modeli oluşturulmuş ve son olarak her bir mastın etkisini incelemek amacıyla gemi üzerine konuşlandırılarak analizler koşulmuştur. Bahse konu analizlerde radar kesit alanı tahmin yazılımları tarafından sıklıkla kullanılan “fiziksel optik” yöntemi kullanılmış, elektromanyetik propagasyonda kaybın en düşük olduğu iki farklı frekans bölgesi seçilmiş ve yanca/yükselişte çeşitli açı değerleri seçilerek çalışmalar yapılmıştır. Analizler neticesinde; nispeten daha düz yüzeylerin geminin radar kesit alanı ne yönde katkı sağladığı ve tasarlanan iki farklı mast yapısının platformun radar kesit alanı üzerindeki etkisinin bakış açısına (yanca/yükseliş), polarizasyona ve frekansa bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Radar Kesit Alanı, Fiziksel, Optik, Entegre Mast, Radar Kesit Alanı Azaltım Yöntemleri.

1. Giriş

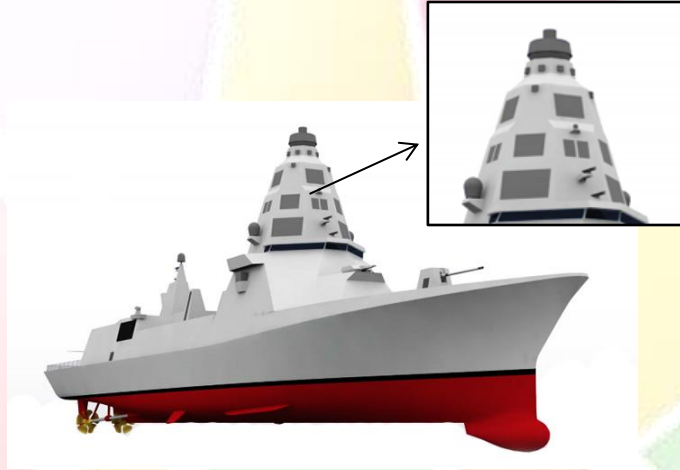
Düşük görünürlük (stealth) teknolojilerinde, uçar, yüzer ve kara platformlarının radar, kızılötesi ve sonar gibi algılayıcı sistemler tarafından tespitinin önlenmesi amaçlanmaktadır. Askeri açıdan bakıldığında düşük görünürlük kavramı, platform veya platforma ait alt sistemlerin düşman radar sistemleri tarafından tespit, teşhis ve takibine yakalanmadan ilerlemesi platformlara avantaj sağlamaktadır [1]. RADIO Detection And Ranging (radyo ile tespit etme ve menzil tayini) kısaca Radar, radyo dalgalarının yansımaları yardımıyla uzaktaki nesneleri ve bu nesnelerin hız, yön ve mesafesini tespit eden cihazdır. Temel olarak düşük görünürlük teknolojisi, platform yüzeyine çarpan elektromanyetik enerjiyi saptırarak radarın dönüş sinyallerini hassas bir şekilde almasını engellemektir. Bunun için, yüzey şekillendirme ve ilgili bölgeye radar soğurucu malzeme uygulanması gibi yöntemler sayılabilmektedir [2].

Düşük görünürlük kavramından bahsederken “Radar Kesit Alanı” kavramına değinmek gerekmektedir. Radar kesit alanı kavramı kabaca, hedefin elektromanyetik sinyali yansıtıcılığının bir ölçütü olarak tanımlanabilmektedir [3]. Platformun radar kesit alanını azaltmak, yalnızca



platformun radar tarafından geç algılanması engellememekte, aynı zamanda savaş gemilerinde yer alan modern silah sistemlerinin üzerinde yer alan radar sistemleri tarafından takip edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle radar kesit alanı savaş gemileri için önemli bir tasarım kavramı haline gelmektedir.

Savaş gemileri üzerinde birçok radar, anten ve sensör sistemi mevcuttur. Bu sistemler platformun radar kesit alanını önemli ölçüde artırmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte kullanılmaya başlanan Şekil 1'deki entegre mast yapılarından (Integrated Mast Module-IMM) faydalanılarak, platform üzerine dağınık bir şekilde konuşlandırılan sistem ve sensörlerin tek bir mast yapısı üzerinde toplanarak çoklu yansımaların önlenmesi amaçlanmıştır [4]. Bu yapıların nispeten daha büyük bir gövdeye sahip olduğu dikkate alınması gerektiğinden tasarım aşamalarından düşük radar kesit alanı konsepti göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 1: Entegre mast yapısı (Integrated Mast Module-IMM)

Kısaca bu çalışmada, entegre mast yapılarının gemilerin radar kesit alanı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için, 2 farklı mast yapısı ve basit bir gemi modeli bilgisayar destekli tasarım programlarından faydalanılarak tasarlanmış olup radar kesit alanı kavramının nelere bağlı olarak değiştiği ve şekillendirme kavramının etkileri üzerinde durulmuştur.

2. Radar Kesit Alanı

Radar kesit alanı, hedefin elektromanyetik enerjiyi radar alıcısı yönünde yansıtıcılığının bir ölçüsü olduğunu belirtmiştik. Bu kavramı matematiksel olarak ifade edersek [3],

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E^{\text{scat}}|^2}{|E^{\text{inc}}|^2} \quad (1)$$

σ =Hedefin Radar Kesit Alanı,

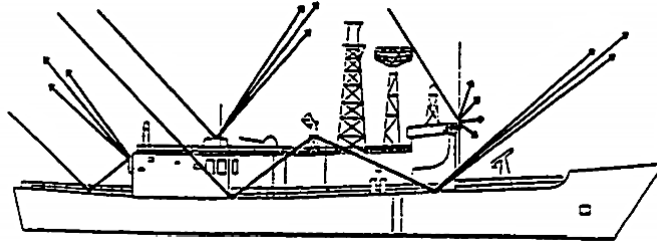
R = Radar ve hedef arasındaki mesafe,

E^{scat} = Hedeften radara saçılan elektrik alanın vektörel olarak gösterimi,

E^{inc} = Radardan hedefe gelen elektrik alanın vektörel olarak gösterimi

Gemilerin radar kesit alanlarının doğru bir şekilde hesaplanabilmesi maksadıyla elektromanyetik sinyalin saçılma karakteristiğini anlamak gerekmektedir. Matematiksel modelleri oluştururken, Şekil 2'de görülen platform üzerindeki çoklu yansımalar, köşe kaynaklı kırınım gibi etkilerinde dikkate alınması elzemdir.



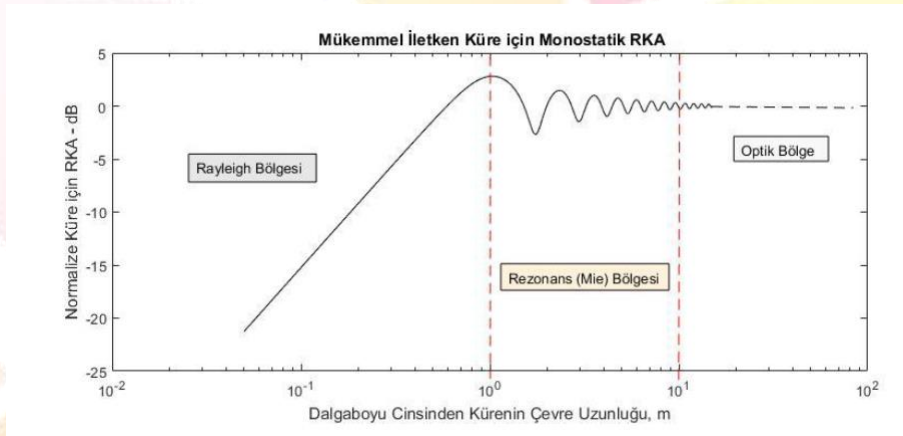


Şekil 2: Radar sinyalinin gemi üzerindeki saçılma mekanizmaları[2]

Radar kesit alanı, düşük görünürlük teknolojisine sahip platformların tasarım aşamasında önemli bir tasarım kriteri olduğu göz ardı edilmemelidir.

2.1. Radar Kesit Alanı Tahmin Yöntemleri

Radar kesit alanı tahmin yöntemleri genellikle, hedef cismin boyutunun radar tarafından gönderilen sinyalin dalga boyuna oranına bağlı olarak tanımlanmakta olup Şekil 3'te gösterilen 3 farklı frekans bölgesi için çözümler yapılmaktadır.



Şekil 3: Mükemmel iletken kürenin radar kesit alanı ve frekans bölgeleri [6]

Bu bölgelerden rayleigh ve rezonans bölgelerinde tam dalga çözümler yapılırken optik bölgede ise problemi yaklaşık olarak çözmeyi hedefleyen yüksek frekans teknikleri kullanılmaktadır [5]. Bu nedenle, radar kesit alanı hesaplanması istenen model için söz konusu bölgelere göre elektromanyetik problemin çözülmesi gerekmektedir. Literatürde yüksek frekans teknikleri incelediğimizde karşımıza geometrik optik (GO), fiziksel optik (PO), fiziksel kırınım teorisi (PTD), geometrik kırınım teorisi (GTD) gibi teoremler çıkmaktadır.

Burada radar kesit alanı tahmin yazılımları tarafından sıklıkla tercih edilen ve bu çalışmada da kullandığımız fiziksel optik yöntemine bakarsak kendine özgün avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Fiziksel optik yönteminde, elektriksel olarak büyük yapılar ($L \geq 10\lambda$) için iyi sonuçlar vermesinin yanı sıra hedefin uzak alanda olduğu ve mükemmel iletken bir yapıya sahip olduğu varsayımları da yapılmaktadır [3, 5]. Ek olarak bu yaklaşımda, aşağıdaki denklemde görüldüğü gibi hedef nesnenin yüzeyinde gelen sinyalle aydınlanan kısımlarında yüzey akımlarının var olduğu ancak gölgede kalan kısımlarda akımın sıfıra düştüğü varsayımı yapılmaktadır [6].

$$\vec{J}_s \approx \begin{cases} 2\vec{n} \times \vec{H}_i, & \text{aydınlık bölge için} \\ 0, & \text{karanlık bölge için} \end{cases} \quad (2)$$

Hedef yüzeyinde aydınlanan geniş bir açı için yapılan çözümlerde matematiksel çözümlerin karanlık bölgelerde indüklenen akımın sıfır kabul edilmesi nedeniyle doğru sonuçlar vermediği görülmektedir. Ayrıca, bu yaklaşımda yüzey akımları ve köşe kaynaklı kırınımlar da hesaplamalara dahil edilmediğine dikkat edilmelidir [7].



2.2. Radar Kesit Alanı Azaltım Yöntemleri

Radar kesit alanı azaltmak için genellikle 4 temel yaklaşım izlenmektedir. Bunlar;

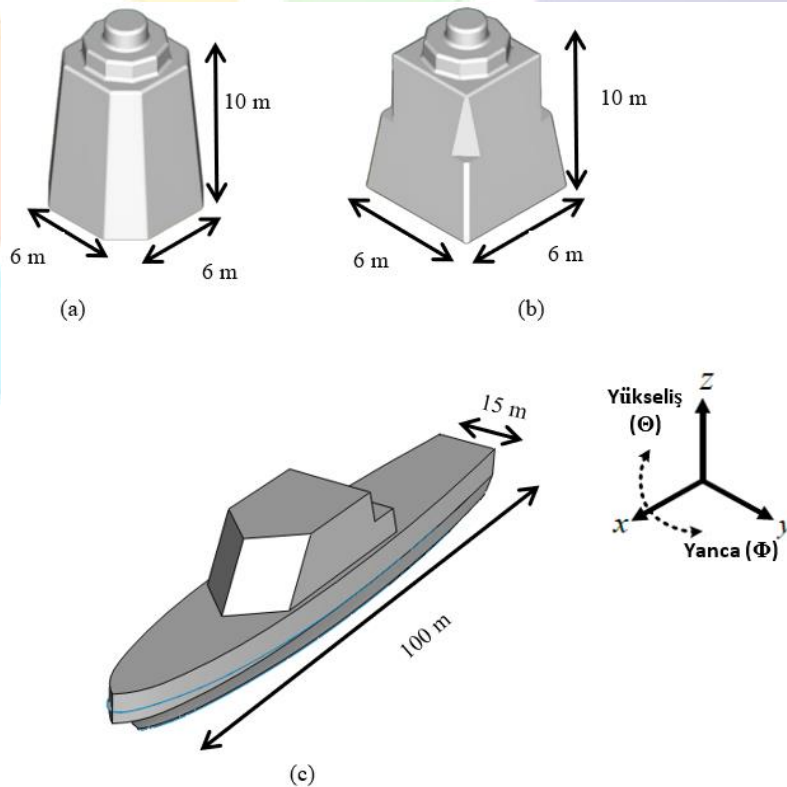
- Şekillendirme,
- Aktif iptal,
- Pasif iptal,
- Radar soğurucu malzeme,

uygulanmasıdır [2,3].

Burada özellikle şekillendirme kavramını incelersek, şekillendirme yöntemi ile gelen radar sinyallerini radar alıcısı yönünde geri yansımaları engelleyecek ya da azaltmak maksadıyla özel yüzey şekilleri tanımlanması olarak ifade edilebilmektedir. Ayrıca, bu çalışma kapsamında radar kesit alanı konsepti dahilinde tasarlanan mast yapılarının hedef platform üzerine etkisi gösterilmiştir.

3. Analizler

Analizler kapsamında, radar kesit alanı tahmin programları tarafından sıklıkla kullanılan fiziksel optik yöntemi kullanarak çözüm üreten endüstriyel bir yazılım kullanılmıştır. Boyutları Tablo 1’de gösterilen 2 farklı mast yapısı ve bunların etkilerini görmek maksadıyla basit bir gemi modeli Şekil 4’teki gibi tasarlanmıştır. Mast-1 ve Mast-2 olarak 2 farklı yapı tasarlanmasındaki amaç şekil değişikliklerinin platformun radar kesit alanını nasıl değiştirdiğini göstermektir. Burada, bahse konu yapıların radar kesit alanlarının frekansa bağlı değişimini incelemek maksadıyla IEEE frekans bantlarından X ve Ka bantta 2 farklı nokta frekans değeri seçilmiş olup her bir frekans değerinde yanca ve yükseliş açıları değiştirilerek değişimler gözlemlenmiştir. Geminin yüzeyinde aydınlanan bölgelerdeki çoklu yansımalar dikkate alınmış ve polarizasyona bağlı olarak meydana gelen değişimlerde grafiklerle sergilenmiştir. Ayrıca, Tablo 2-13’te sergilenen değerlerin hesaplanmasında her bir açı değişimine karşılık gelen sayıların aritmetik ortalaması alınmıştır.



Şekil 4 Tasarlanan mast yapıları ve gemi modeli. (a) Mast-1, (b) Mast-2, (c) Gemi Modeli



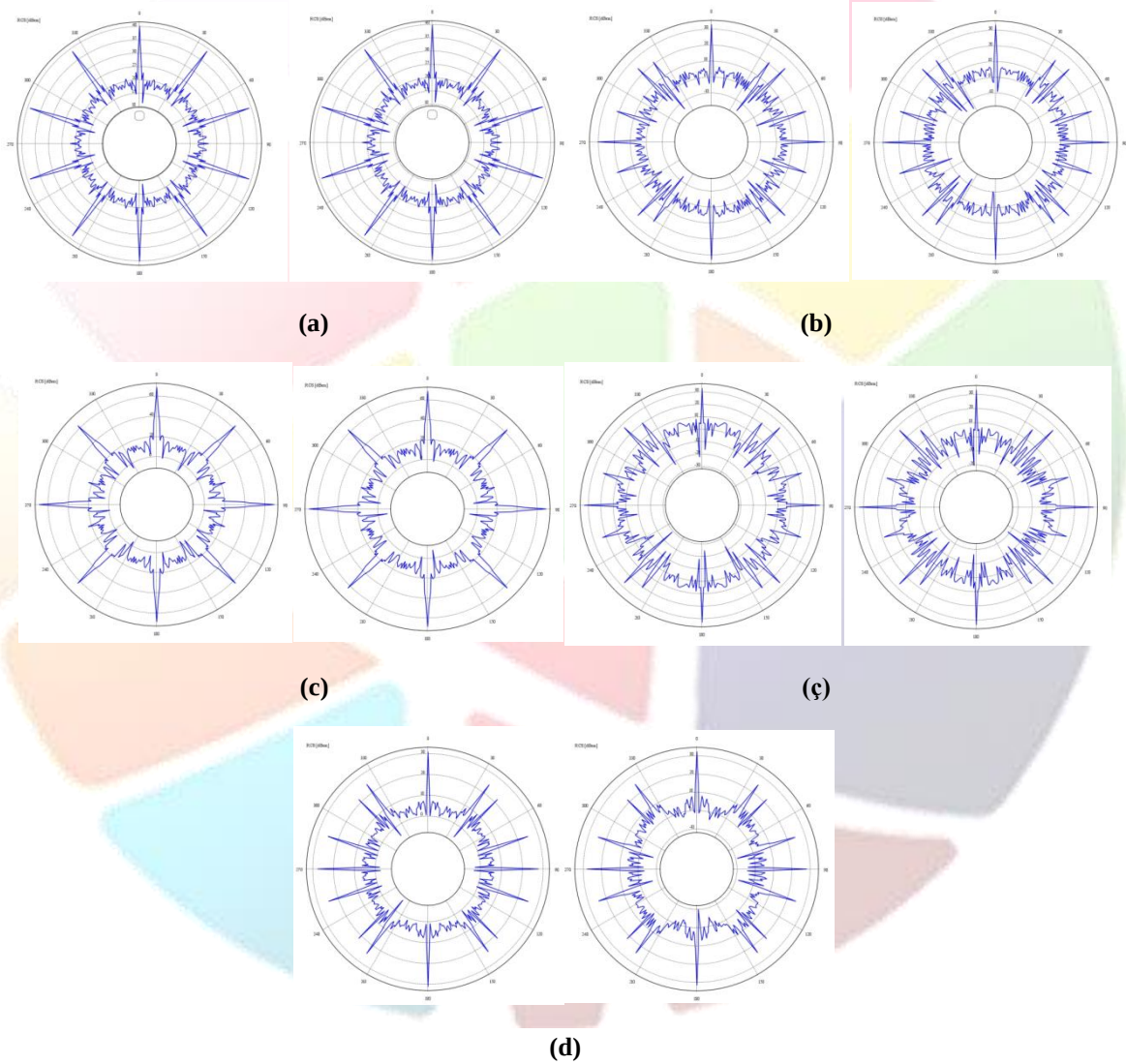
Tablo 1: Tasarlanan mast yapıları ve gemi boyutları

Tip	En (m)	Boy (m)	Yükseklik (m)
Mast-1	6	6	10
Mast-2	6	6	10
Gemi	15	100	20

3.1. Mast-1

3.1.1. X Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak X bant seçilerek, 2 farklı polarizasyonda ve yancada (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ayrıca analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma (sağdaki grafikler)) Şekil 5'te sunulmuştur.

Şekil 5: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (ç) $\Theta=7^\circ$ ve (d) $\Theta=10^\circ$

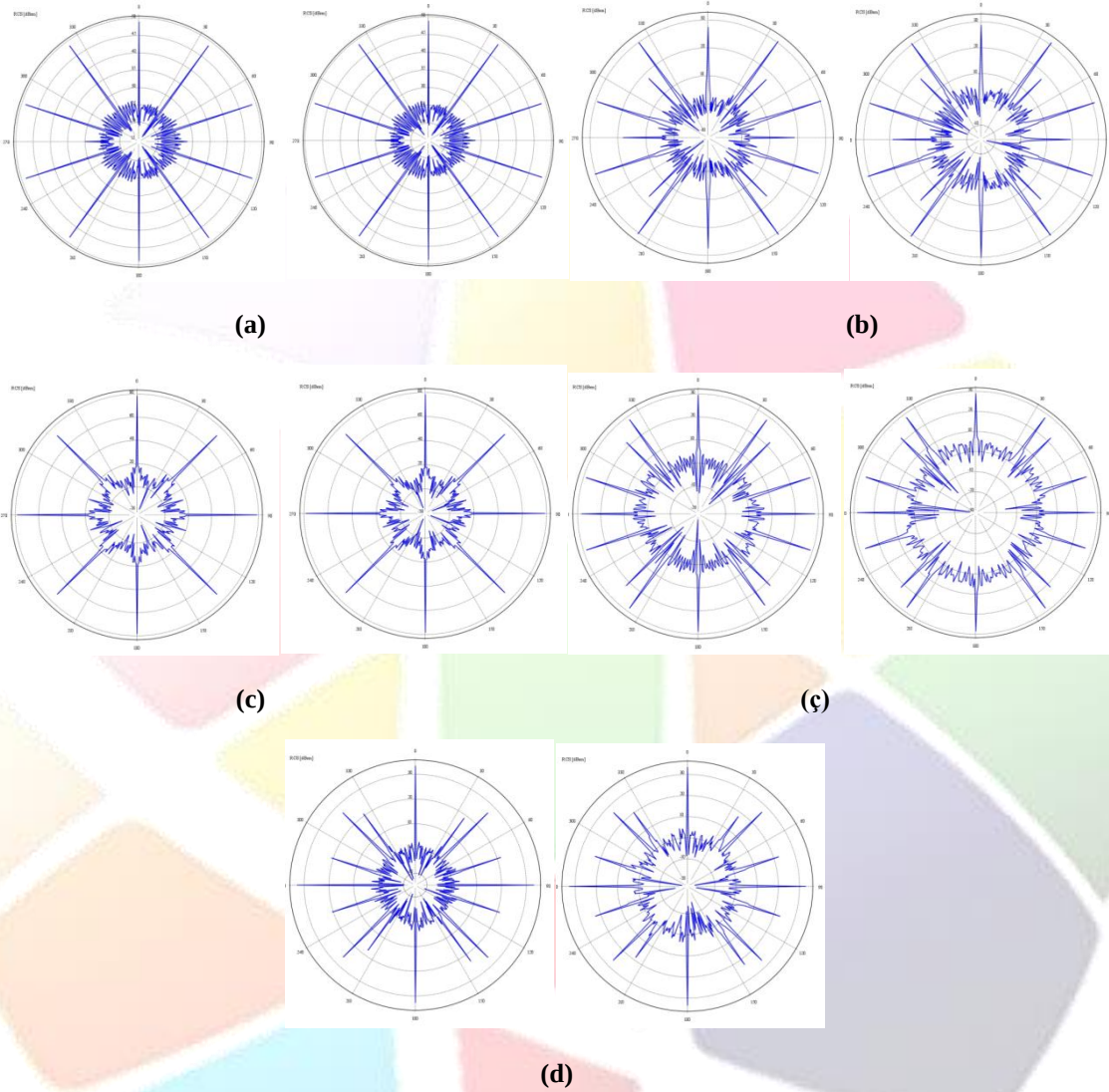
Tablo 2: Mast-1 ortalama radar kesit alanı değerleri

Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast-1	X bant	Y/Y	25,71 dBm ²	15,07 dBm ²	51,27 dBm ²	16,11 dBm ²	14,11 dBm ²
		D/D	25,60 dBm ²	15,37 dBm ²	51,25 dBm ²	15,88 dBm ²	14,67 dBm ²



3.1.2. Ka Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak Ka bant seçilerek, 2 farklı polarizasyon ve yancada (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ek olarak analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma(sağdaki grafikler)) Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (ç) $\Theta=7^\circ$ ve (d) $\Theta=10^\circ$

Tablo 3: Mast-1 ortalama radar kesit alanı değerleri

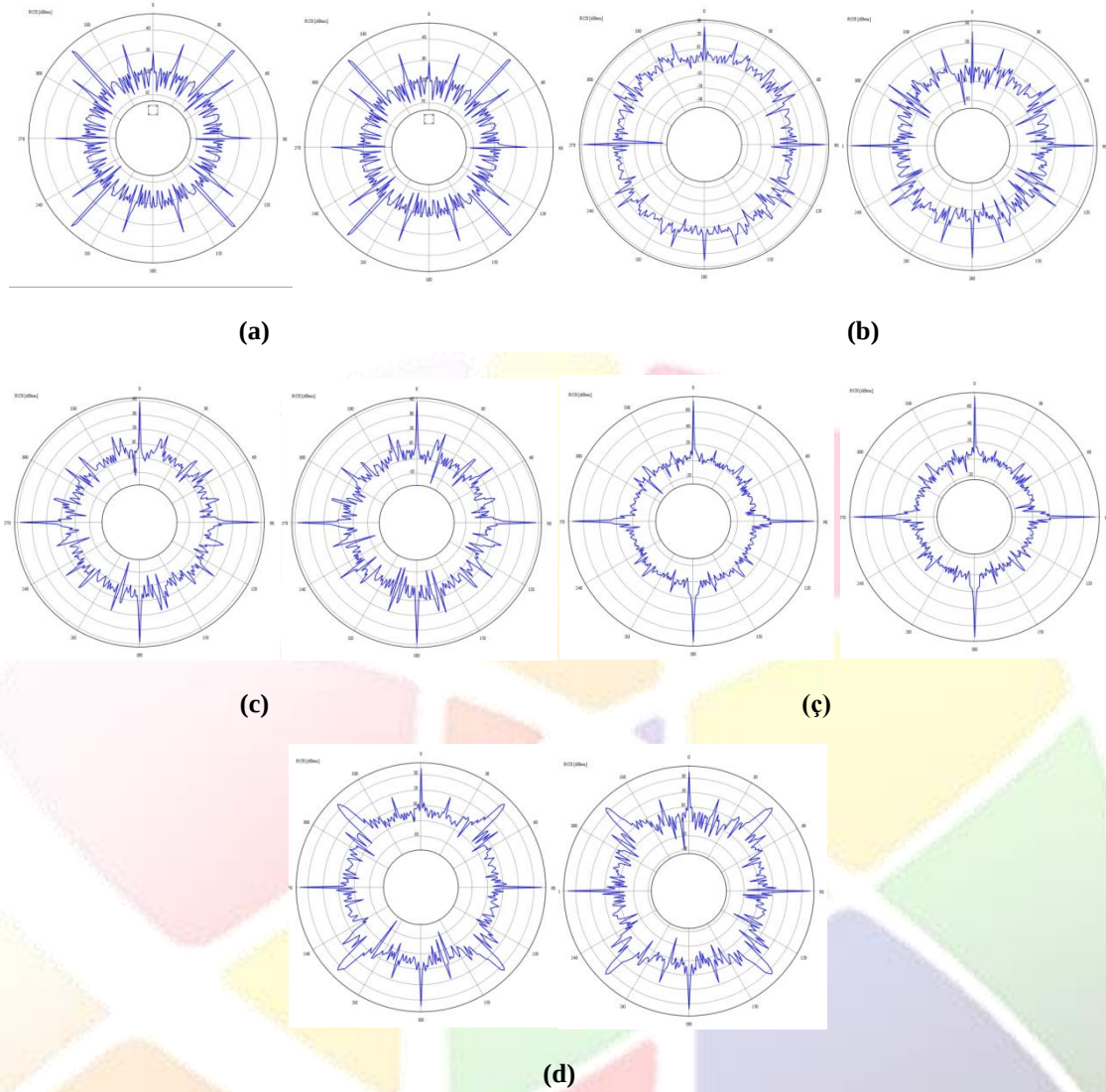
Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast-1	Ka bant	Y/Y	34,08 dBm ²	14,80 dBm ²	60,73 dBm ²	14,84 dBm ²	15,70 dBm ²
		D/D	34,07 dBm ²	15,46 dBm ²	60,73 dBm ²	14,26 dBm ²	15,93 dBm ²

3.2. Mast-2

3.2.1. X Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak X bant seçilerek, 2 farklı polarizasyon ve yancada (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ek olarak analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma(sağdaki grafikler)) Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (d) $\Theta=7^\circ$ ve (e) $\Theta=10^\circ$

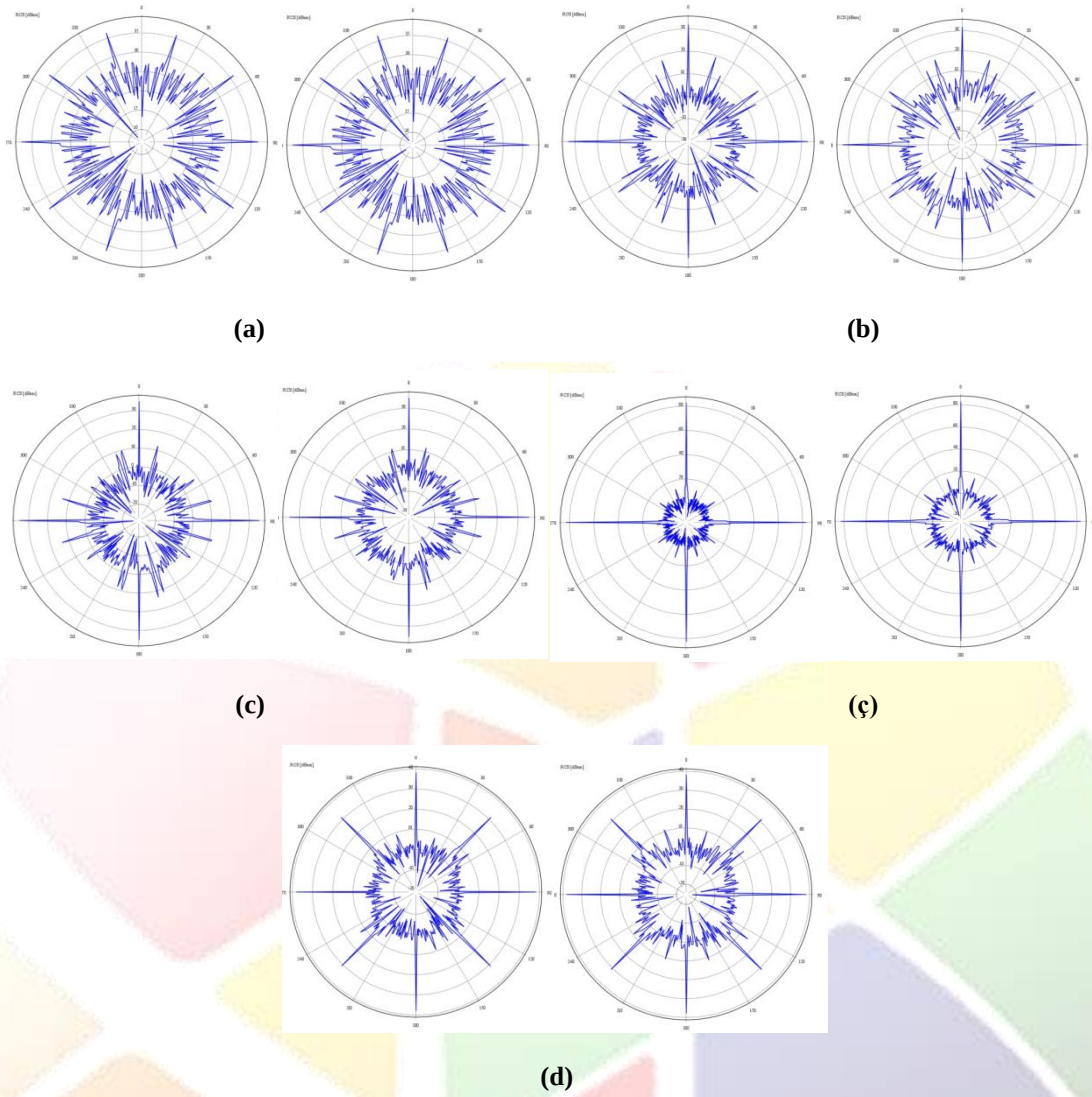
Tablo 4: Mast-2 ortalama radar kesit alanı değerleri

Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast-2	X bant	Y/Y	29,42 dBm ²	11,06 dBm ²	20,58 dBm ²	54,80 dBm ²	20,26 dBm ²
		D/D	29,40 dBm ²	11,91 dBm ²	20,51 dBm ²	54,80 dBm ²	20,34 dBm ²

3.2.2. Ka Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak Ka bant seçilerek, 2 farklı polarizasyon ve yancada (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ek olarak analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma(sağdaki grafikler)) Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 8: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (ç) $\Theta=7^\circ$ ve (d) $\Theta=10^\circ$

Tablo 5: Mast-2 ortalama radar kesit alanı değerleri

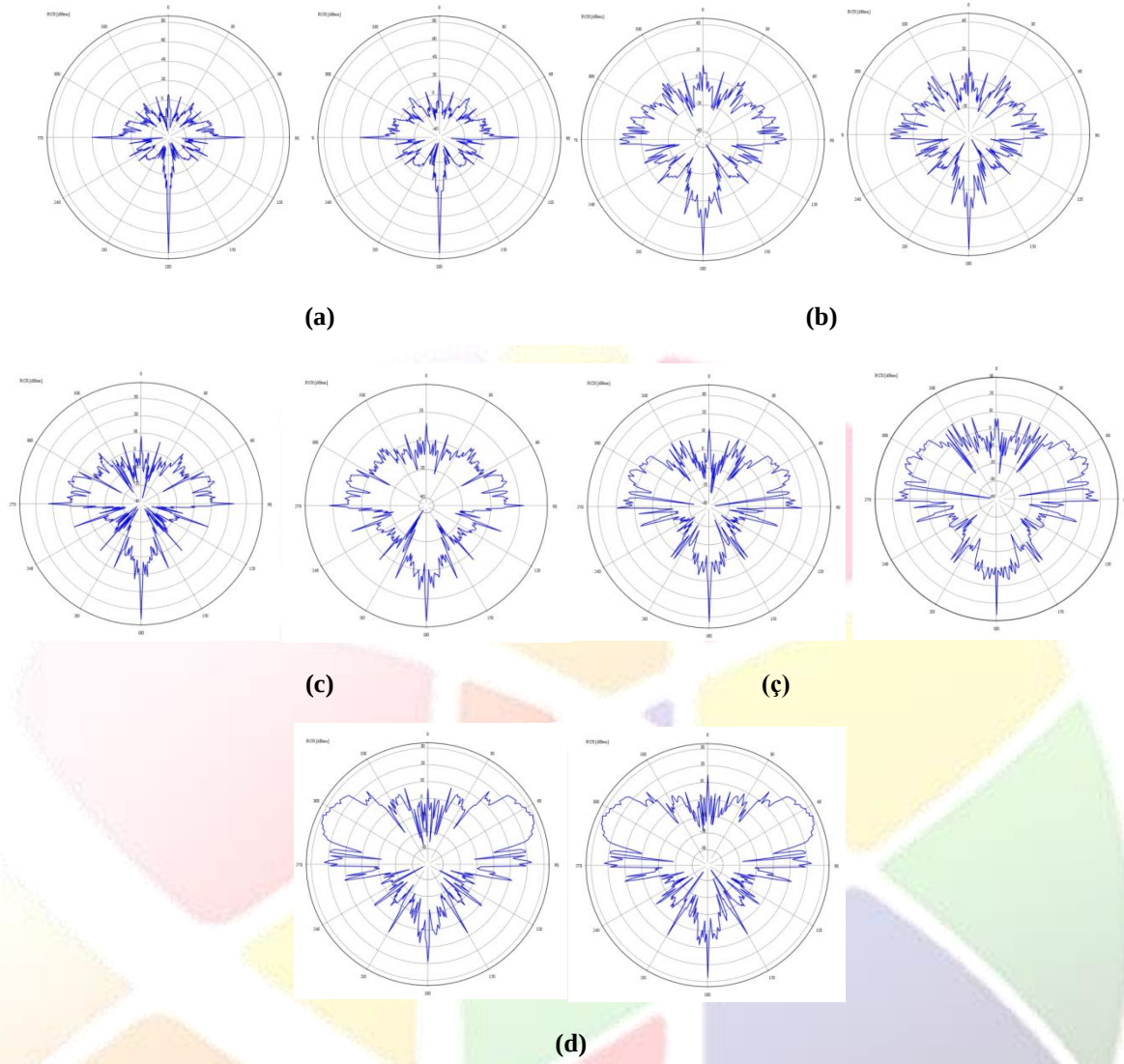
Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast-2	Ka bant	Y/Y	26,15 dBm ²	14,44 dBm ²	16,66 dBm ²	64,34 dBm ²	20,25 dBm ²
		D/D	26,06 dBm ²	14,41 dBm ²	16,66 dBm ²	64,34 dBm ²	20,23 dBm ²

3.3. Mast Olmadan Gemi Modeli

3.3.1. X Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak X bant seçilerek, 2 farklı polarizasyon ve yancada (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ek olarak analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma(sağdaki grafikler)) Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (ç) $\Theta=7^\circ$ ve (d) $\Theta=10^\circ$

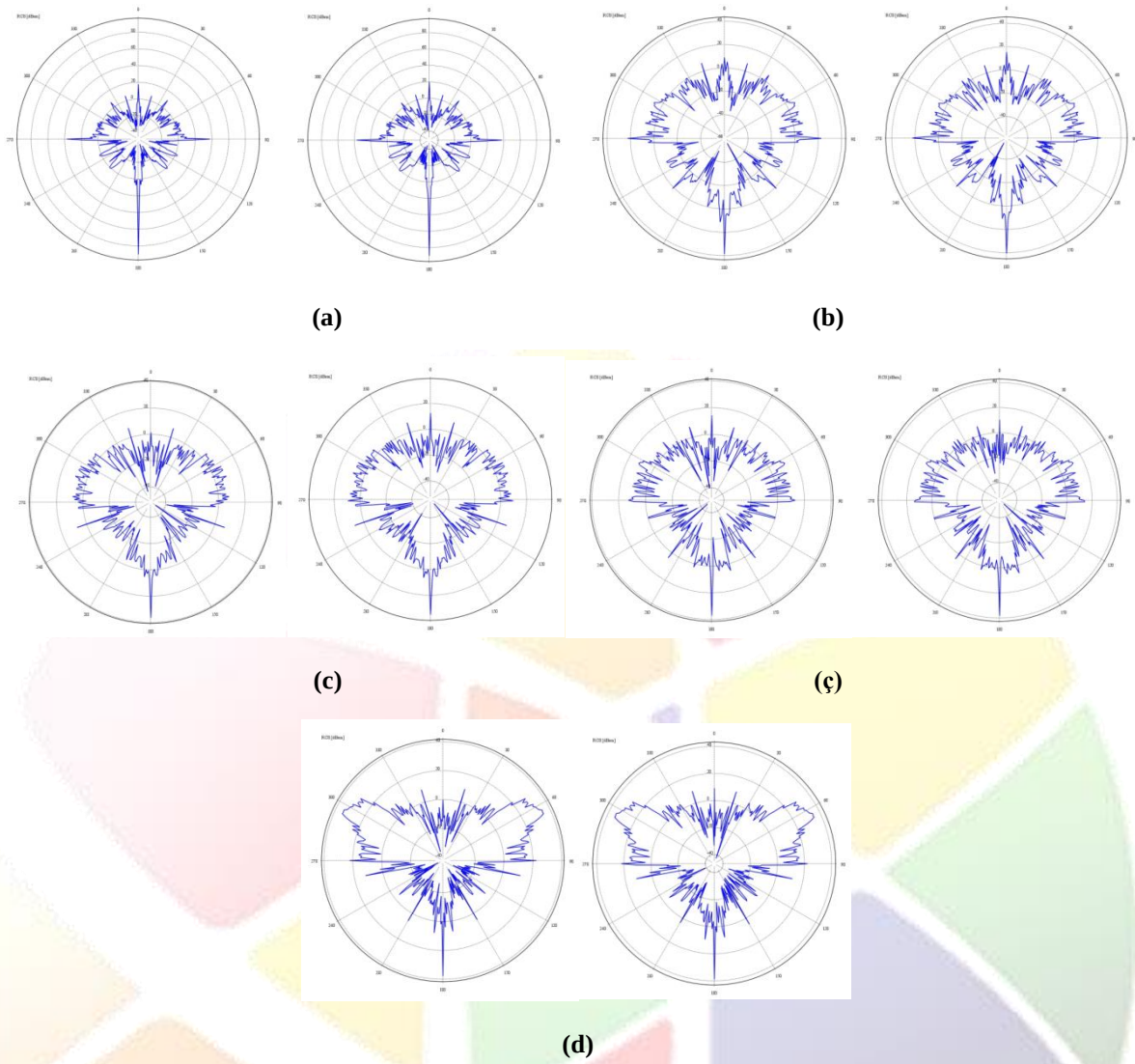
Tablo 6: Mast olmadan gemi modeli ortalama radar kesit alanı değerleri

Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast Olmadan Gemi Modeli	X bant	Y/Y	55,21 dBm ²	15,32 dBm ²	11,60 dBm ²	10,57 dBm ²	18,98 dBm ²
		D/D	55,21 dBm ²	16,81 dBm ²	11,60 dBm ²	8,55 dBm ²	19,06 dBm ²

3.3.2. Ka Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak Ka bant seçilerek, 2 farklı polarizasyon ve yancada (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ek olarak analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma(sağdaki grafikler)) Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (d) $\Theta=7^\circ$ ve (e) $\Theta=10^\circ$

Tablo 7: Mast olmadan gemi modeli ortalama radar kesit alanı değerleri

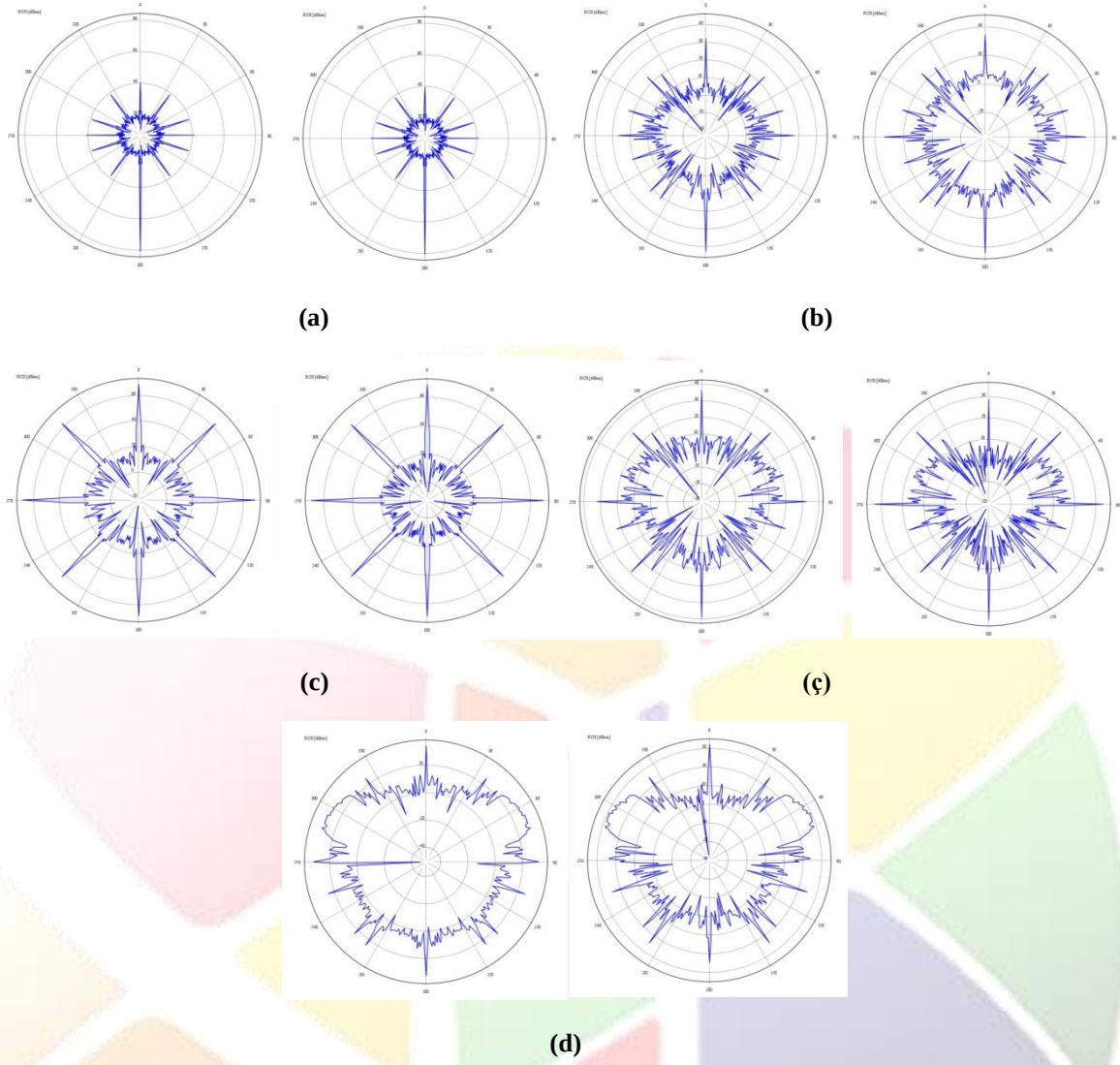
Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast Olmadan Gemi Modeli	Ka bant	Y/Y	64,75 dBm ²	13,57 dBm ²	11,28 dBm ²	12,12 dBm ²	21,55 dBm ²
		D/D	64,75 dBm ²	15,30 dBm ²	10,07 dBm ²	13,11 dBm ²	21,70 dBm ²

3.4. Mast-1 ve Gemi Modeli

3.4.1. X Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak X bant seçilerek, 2 farklı polarizasyon ve yarıda (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ek olarak analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma(sağdaki grafikler)) Şekil 11’de sunulmuştur.



Şekil 11: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (d) $\Theta=7^\circ$ ve (e) $\Theta=10^\circ$

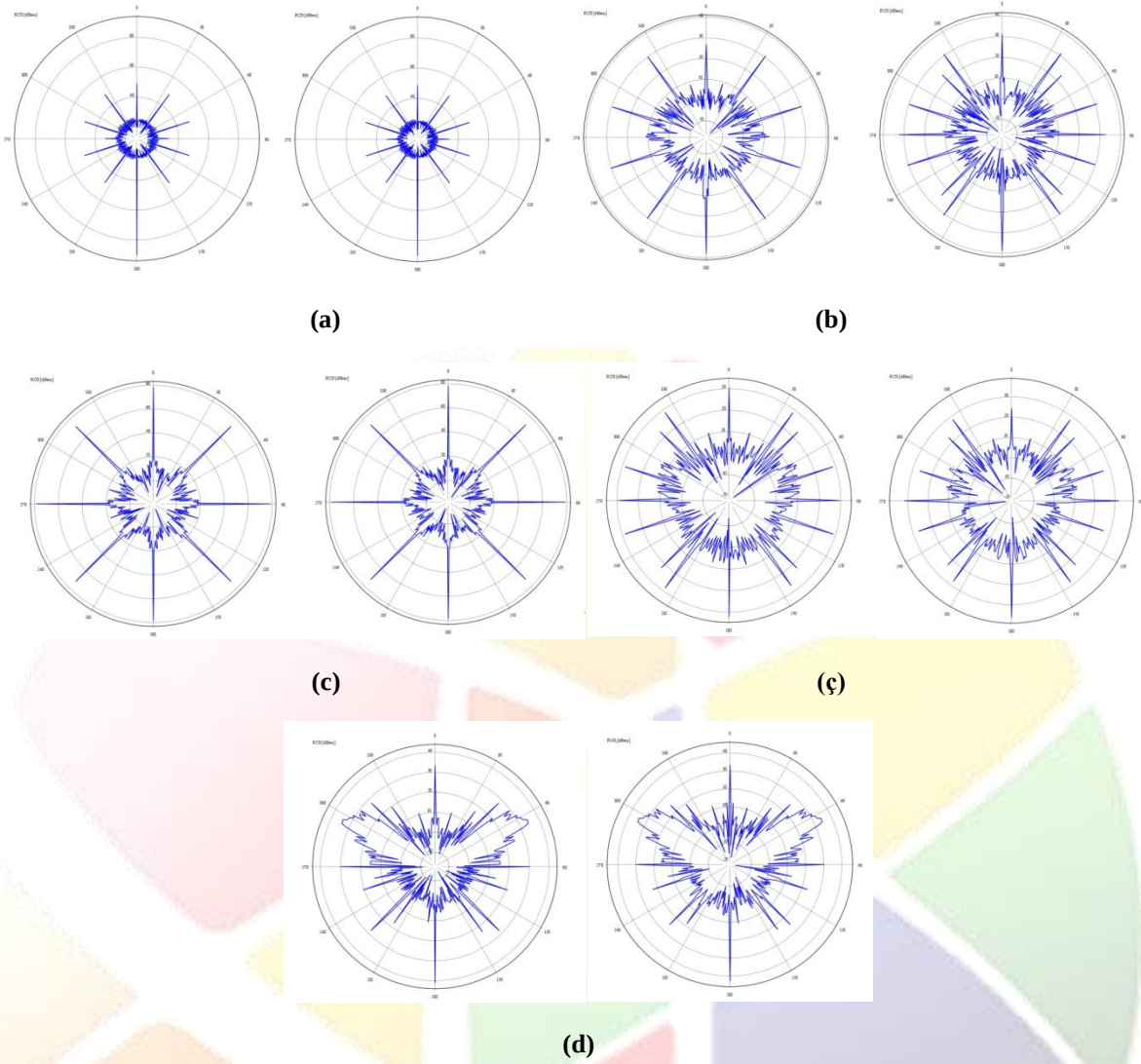
Tablo 8: Mast-1 ve gemi modeli ortalama radar kesit alanı değerleri

Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast-1 ve Gemi Modeli	X bant	Y/Y	55,14 dBm ²	18,79 dBm ²	51,26 dBm ²	18,38 dBm ²	20,92 dBm ²
		D/D	55,15 dBm ²	20,85 dBm ²	51,25 dBm ²	15,72 dBm ²	20,06 dBm ²

3.4.2. Ka Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak Ka bant seçilerek, 2 farklı polarizasyon ve yancada (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ek olarak analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma(sağdaki grafikler)) Şekil 12’de sunulmuştur.



Şekil 12: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (d) $\Theta=7^\circ$ ve (e) $\Theta=10^\circ$

Tablo 9: Mast-1 ve gemi modeli ortalama radar kesit alanı değerleri

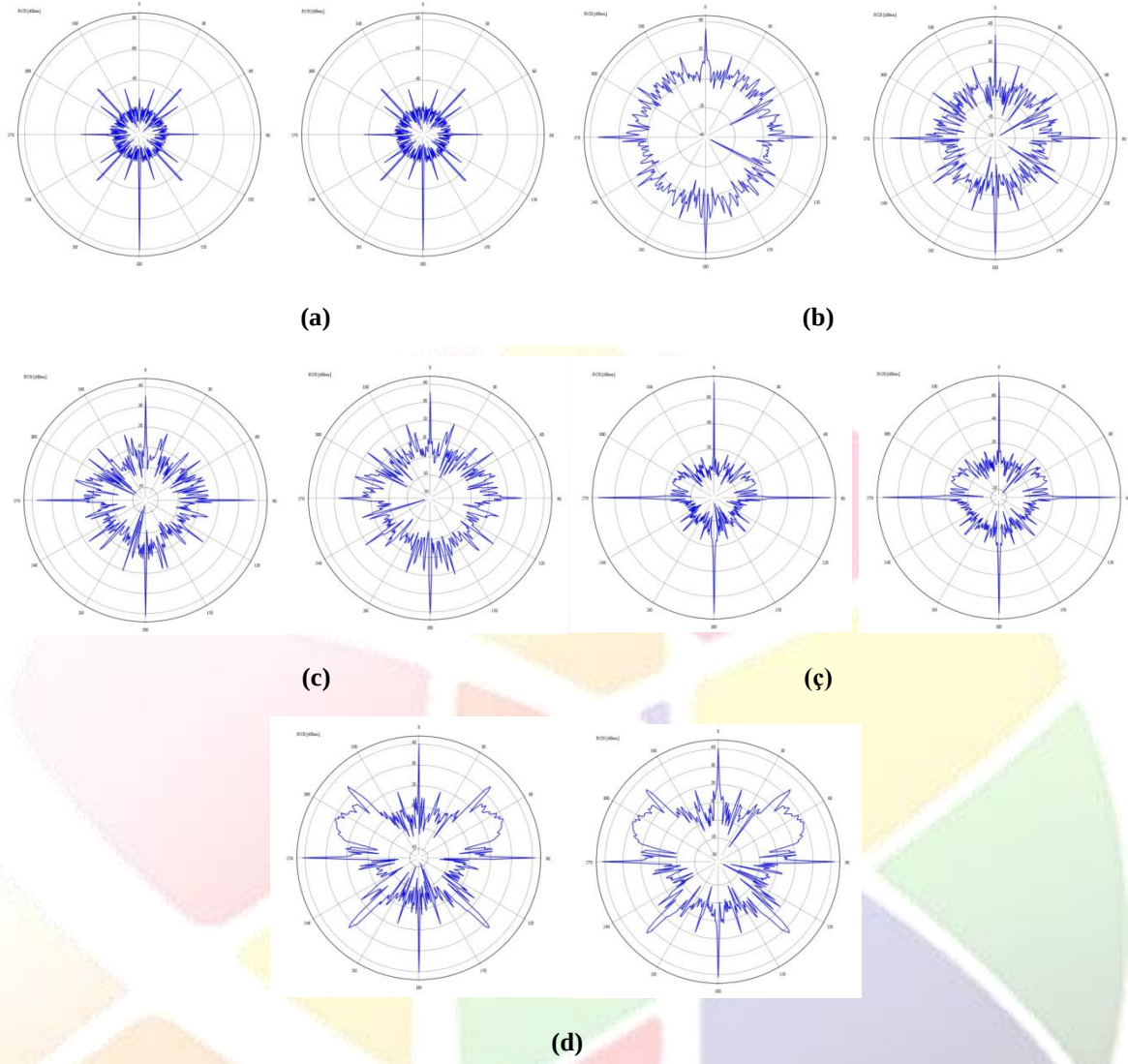
Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast-1 ve Gemi Modeli	Ka bant	Y/Y	64,70 dBm ²	16,75 dBm ²	60,74 dBm ²	15,65 dBm ²	22,78 dBm ²
		D/D	64,70 dBm ²	18,47 dBm ²	60,73 dBm ²	16,03 dBm ²	23,14 dBm ²

3.5. Mast-2 ve Gemi Modeli

3.5.1. X Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak X bant seçilerek, 2 farklı polarizasyon ve yarıda (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ek olarak analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma(sağdaki grafikler)) Şekil 13'te sunulmuştur.



Şekil 13: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (d) $\Theta=7^\circ$ ve (e) $\Theta=10^\circ$

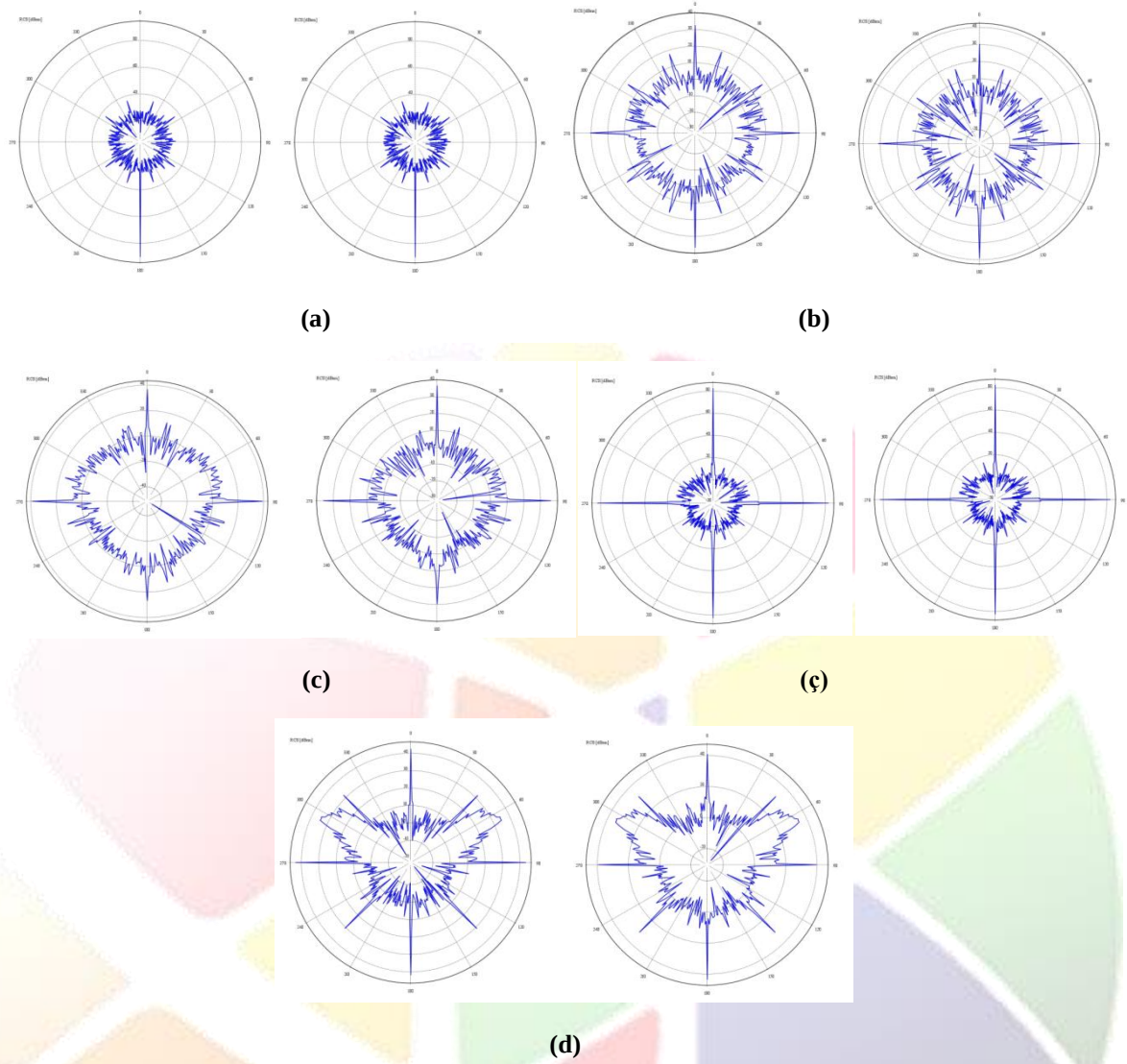
Tablo 10: Mast-2 ve gemi modeli ortalama radar kesit alanı değerleri

Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast-2 ve Gemi Modeli	X bant	Y/Y	55,23 dBm ²	18,62 dBm ²	19,98 dBm ²	54,92 dBm ²	24,84 dBm ²
		D/D	55,23 dBm ²	19,38 dBm ²	18,53 dBm ²	54,84 dBm ²	25,19 dBm ²

3.5.2. Ka Bant

Bu bölümde tehdit frekansı olarak Ka bant seçilerek, 2 farklı polarizasyon ve yancada (Φ) 0° - 360° , yükselişte (Θ) ise 0° - 10° kadar analizler koşulmuştur. Ek olarak analiz sonuçları, polarizasyon tipine göre (Yatay Gönderme/Yatay Alma (soldaki grafikler) ve Dikey Gönderme/Dikey Alma(sağdaki grafikler)) Şekil 14'te sunulmuştur.



Şekil 14: Analiz sonuçları. (a) $\Theta=0^\circ$, (b) $\Theta=3^\circ$, (c) $\Theta=5^\circ$, (d) $\Theta=7^\circ$ ve (e) $\Theta=10^\circ$

Tablo 11: Mast-2 ve gemi modeli ortalama radar kesit alanı değerleri

Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast -2 ve Gemi Modeli	Ka bant	Y/Y	64,75 dBm ²	15,49 dBm ²	18,70 dBm ²	64,17 dBm ²	26,05 dBm ²
		D/D	64,75 dBm ²	16,17 dBm ²	17,35 dBm ²	64,18 dBm ²	25,11 dBm ²

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, entegre mast yapılarının basit bir gemi modelinin radar kesit alanı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bahse konu radar kesit alanı değerinin frekansa, sinyalin polarizasyonuna, mastın şekline ve bakış açısına bağlı olarak nasıl değişmekte olduğu gösterilmiştir. Ek olarak, seçilen 2 farklı frekans bölgesiyle hem radarların yoğun olarak çalıştığı X bantta hem de yeni nesil radar sistemleri tarafından kullanılmaya başlanan Ka bantta analizler yapılmıştır.

Tablo 12'deki sonuçlar incelendiğinde, Mast-1'in $\Theta=5^\circ$ bakış açısında 51,27- 60,73 dBm² değerleri arasında maksimum radar kesit alanı değerlerini aldığı görülmektedir. Mast olmadan incelenen gemi modelinde $\Theta=0^\circ$ bakış açısında 55,21- 64,745 dBm² arasında değerler aldığı, bunun nedeni ise Şekil 9'da görüldüğü gibi nispeten daha düz bir yüzeye sahip olduğu kış sektöründen kaynaklanmaktadır. Son olarak, Mast-1 ve gemi modeli birlikte incelendiğinde, tek tek yapılan



analizlerdeki gibi $\Theta=0^\circ$ ve $\Theta=5^\circ$ de diğer bakış açılarına göre muazzam bir artış olduğu görülmektedir.

Tablo 12: Mast-1 ve gemi modeli ortalama radar kesit alanı değerleri

Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast-1	X bant	Y/Y	25,71 dBm ²	15,07 dBm ²	51,27 dBm ²	16,11 dBm ²	14,11 dBm ²
		D/D	25,60 dBm ²	15,37 dBm ²	51,25 dBm ²	15,88 dBm ²	14,67 dBm ²
	Ka bant	Y/Y	34,08 dBm ²	14,80 dBm ²	60,73 dBm ²	14,84 dBm ²	15,70 dBm ²
		D/D	34,07 dBm ²	15,46 dBm ²	60,73 dBm ²	14,26 dBm ²	15,93 dBm ²
Mast Olmadan Gemi Modeli	X bant	Y/Y	55,21 dBm ²	15,32 dBm ²	11,60 dBm ²	10,57 dBm ²	18,98 dBm ²
		D/D	55,21 dBm ²	16,81 dBm ²	11,60 dBm ²	8,55 dBm ²	19,06 dBm ²
	Ka bant	Y/Y	64,75 dBm ²	13,57 dBm ²	11,28 dBm ²	12,12 dBm ²	21,55 dBm ²
		D/D	64,75 dBm ²	15,30 dBm ²	10,07 dBm ²	13,11 dBm ²	21,70 dBm ²
Mast-1 ve Gemi Modeli	X bant	Y/Y	55,14 dBm ²	18,79 dBm ²	51,26 dBm ²	18,38 dBm ²	20,92 dBm ²
		D/D	55,15 dBm ²	20,85 dBm ²	51,25 dBm ²	15,72 dBm ²	20,06 dBm ²
	Ka bant	Y/Y	64,70 dBm ²	16,75 dBm ²	60,74 dBm ²	15,65 dBm ²	22,78 dBm ²
		D/D	64,70 dBm ²	18,47 dBm ²	60,73 dBm ²	16,03 dBm ²	23,14 dBm ²

Tablo 13'teki sonuçlar incelendiğinde, Mast-2'in $\Theta=7^\circ$ bakış açısında 54,80- 64,34 dBm² değerleri arasında maksimum radar kesit alanı değerlerini aldığı görülmektedir. Burada, Mast-2 ve gemi modeli birlikte incelendiğinde, tek tek yapılan analizlerdeki gibi $\Theta=0^\circ$ ve $\Theta=7^\circ$ de diğer bakış açılarına göre muazzam bir artış olduğu görülmektedir.

Tablo 13: Mast-2 ve gemi modeli ortalama radar kesit alanı değerleri

Platform Tipi	Frekans	Polarizasyon	Yükseliş Açısı				
			$\Theta=0^\circ$	$\Theta=3^\circ$	$\Theta=5^\circ$	$\Theta=7^\circ$	$\Theta=10^\circ$
Mast-2	X bant	Y/Y	29,42 dBm ²	11,06 dBm ²	20,58 dBm ²	54,80 dBm ²	20,26 dBm ²
		D/D	29,40 dBm ²	11,91 dBm ²	20,51 dBm ²	54,80 dBm ²	20,34 dBm ²
	Ka bant	Y/Y	26,15 dBm ²	14,44 dBm ²	16,66 dBm ²	64,34 dBm ²	20,25 dBm ²
		D/D	26,06 dBm ²	14,41 dBm ²	16,66 dBm ²	64,34 dBm ²	20,23 dBm ²
Mast Olmadan Gemi Modeli	X bant	Y/Y	55,21 dBm ²	15,32 dBm ²	11,60 dBm ²	10,57 dBm ²	18,98 dBm ²
		D/D	55,21 dBm ²	16,81 dBm ²	11,60 dBm ²	8,55 dBm ²	19,06 dBm ²
	Ka bant	Y/Y	64,75 dBm ²	13,57 dBm ²	11,28 dBm ²	12,12 dBm ²	21,55 dBm ²
		D/D	64,75 dBm ²	15,30 dBm ²	10,07 dBm ²	13,11 dBm ²	21,70 dBm ²
Mast-2 ve Gemi Modeli	X bant	Y/Y	55,23 dBm ²	18,62 dBm ²	19,98 dBm ²	54,92 dBm ²	24,84 dBm ²
		D/D	55,23 dBm ²	19,38 dBm ²	18,53 dBm ²	54,84 dBm ²	25,19 dBm ²
	Ka bant	Y/Y	64,75 dBm ²	15,49 dBm ²	18,70 dBm ²	64,17 dBm ²	26,05 dBm ²
		D/D	64,75 dBm ²	16,17 dBm ²	17,35 dBm ²	64,18 dBm ²	25,11 dBm ²

Mast-1 ve Mast-2 yapıları birlikte incelendiğinde, Mast-1'in $\Theta=0^\circ$, 7° ve 10° bakış açılarında buna karşın Mast-2'nin $\Theta=3^\circ$ bakış açısında nispeten daha düşük radar kesit alanına sahip olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada, düşük görünürlük yeteneklerine haiz gemiler tasarlarken şekillendirmenin radar kesit alanı konsepti açısından önemli bir kriter olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, yeni nesil gemilerde konuşlanmaya başlayan entegre mast yapılarının tasarım aşamalarında tehdidin bakış açısına göre tasarlanması önemli bir unsur olduğuna da dikkat edilmelidir.

Bu çalışmada elde edilen veriler düşük görünürlük yeteneklerine sahip entegre mast yapılarının geliştirilmesinde kullanılabilecektir.

5. Kaynakça

[1] Koç, E., "Metamalzeme Kullanımı İle Radar Kesit Alanı Azaltma Uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, *Ulusal Tez Merkezi*, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2022.



- [2] Khan, J., Duan, W. and Sherbaz S., “Radar Cross Section Prediction and Reduction for Naval Ships”, *Journal of Marine Science and Application*, 10.1007/s11804-012-1122-5, pp. 1-11, 2012.
- [3] Knott, EF., Shaeffer, JF. and Tuley, MT., *Radar Cross Section, Second Edition*, SciTech Publishing, Raleigh, NC, USA, 2004.
- [4] Shin, H., Yoon, D., Kim, C., and Yang S. Y., “Shape Optimization of an Integrated Mast for RCS Reduction of a Stealth Naval Vessel”, *Applied Sciences*, 10.3390/app11062819, pp. 1-14, 2021.
- [5] Skolnik, I. M., *Radar Handbook, Third Edition*, The McGraw-Hill Companies , USA, 2008.
- [6] Okan, T., “Fiziksel Optik Yöntemiyle Üç Boyutlu Cisimlerin Radar Kesit Alanının Hesaplanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Ulusal Tez Merkezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [7] David, C. J., *Radar and Laser Cross Section Engineering, Second Edition*, AIAA Education Series, USA, 2005.
- [8] YÖK. (2018). Ulusal Tez Merkezi. Available: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>.
- [9] Solidworks. Available: <https://www.solidworks.com/tr>.
- [10] Grabcad. Available: <https://grabcad.com/library>.

