

“

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ULUSLARARASI ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRMELER

Aralık 2024

EDİTÖRLER

PROF. DR. COŞKUN ÖZALP

PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

”

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2024

ISBN • 978-625-5955-32-6

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Alanında Uluslararası Araştırma ve Değerlendirmeler

ARALIK 2024

EDİTÖRLER

PROF. DR. COŞKUN ÖZALP
PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

İÇİNDEKİLER

PLASTİK ATIKLARIN OTOMOBİLLERDE GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Gülşah ÖNER	1
-------------------	---

BİYOKÜTLE VE PLASTİK KOPİROLİZİ

Ahmet Rasim GİRİŞEN	15
Gürkan KARA	15
Hakan ÖZCAN	15

YÜKSEK ENTROPİ ALAŞIMLARI: YAPI-ÖZELLİKLER VE TÜRKİYE'DEKİ ÇALIŞMALAR

Caner BULUT	35
-------------------	----

SÜPERİLETKEN KABLOLARIN YAPISI VE GÜNCEL GELİŞMELER

Yağmur ATALAYIN	61
Zuhal OKTAY.....	61
Can COŞKUN	61

MÜHENDİSLİK TASARIMLARI İÇİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ÜRETKEN TASARIM ÜZERİNE BİR İNCELEME

Mehmet KÜÇÜK	73
Funda KAHRAMAN	73

PROTOTİP BİR OTONOM ARACIN TASARIMI, UYGULAMASI VE SÜRÜŞ KRİTERLERİNİN BELİRLENMESİ

Hasan D. YILDIZAY.....	89
------------------------	----

FLAŞ SOĞUTUCULU İKİ KADEMELİ GENLEŞME SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ

Cenker AKTEMUR,	107
Barış KAVASOĞULLARI	107

SÜRTÜNMELİ DELME YÖNTEMİ VE ETKİLİ OLAN TEMEL PARAMETRELER

Cebeli ÖZEK..... 123

BOBİN MANYETİK ALAN VERİLERİNİN RADYAL BAZ FONKSİYONLAR KULLANILARAK İKİ BOYUTLU UZAYDA İNTERPOLASYONU

Hüseyin YILDIZ..... 153

Yasemin POYRAZ KOÇAK..... 153

BİYODİZEL ÜRETİMİNDE HETEROJEN YEŞİL KATALİZÖR OLARAK YENİLENEBİLİR BİR KAYNAK OLAN DENİZ KABUĞU KULLANIMI

Mehmet Ali Biberici..... 173

ALÜMİNYUM TEMELLİ İŞLEMELERDE TALAŞ AÇISI VE KESME HIZININ YİĞİNTİ TALAŞ VE YİĞİNTİ KATMANI OLUŞTURMASI ÜZERİNE ETKİLERİ

Ulaş İPEKOĞLU 181

Can COŞKUN 181

Zuhal OKTAY..... 181

ATIKLAŞTIRILACAK SUYUN PV-T HİBRİT SİSTEMLERDE FOTOVOLTAİK PANELLERİN VERİMİNİ YÜKSELTMEDE KULLANILMASI

Enes AKÇAY 195

Necdet Buğra YILMAZ..... 195

MAKİNE ÖĞRENMESİ MODELLERİ İLE KOMBİNE ÇEVİRİMLİ ELEKTRİK SANTRALİ İÇİN ELEKTRİK ÜRETİMİ TAHMİNİ VE OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI

Mücahit Emin KARAGÖZ 209

Barış KAVASOĞULLARI 209

Kemal ADEM..... 209

ALÜMİNYUM TEMELLİ İŞLEMELERDE TALAŞ AÇISI VE KESME HIZININ YİĞİNTİ TALAŞ VE YİĞİNTİ KATMANI OLUŞTURMASI ÜZERİNE ETKİLERİ

Ulaş İPEKOĞLU 217

Can COŞKUN..... 217

Zuhal OKTAY..... 217

BÖLÜM 1

PLASTİK ATIKLARIN OTOMOBİLLERDE GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Gülşah ÖNER¹

¹ Doç.Dr. Gülşah ÖNER

Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

PLASTİK ATIKLARIN OTOMOBİLLERDE GERİ DÖNÜŞÜMÜ

1.Giriş

Plastik; karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve diğer organik ya da inorganik elementlerin oluşturduğu monomer adı verilen; basit yapıdaki molekülü gruplardaki bağın koparılarak polimer adı verilen uzun ve zincirli bir yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen malzemelere verilen isimdir. Plastik kelimesi, “şekillendirilebilen veya kalıplanabilen” anlamına gelen Yunanca πλαστικός (plastikos) ve “kalıplanmış” anlamına gelen πλαστός (plastos) kelimesinden türetilmiştir (Anon n.d.-g).

Plastikler, insanlık tarafından yapılan en ucuz ve aynı zamanda en değerli malzemelerden biridir. Plastik üretimi iyi bir şekilde yerleşmiştir ve ham malzeme neredeyse her türlü gereksinime uyum sağlayabilir ve bu da onları etkileyici bir şekilde çok yönlü hale getirmektedir. Plastiklerin her yerde bulunması, çoğu insanın bu malzemeyle sürekli temasını sağlar. Aslında, plastiksiz bir hayat düşünülemez. Bu malzemeler, ekonomimizi, toplumumuzu ve hayatımızı geliştirmeye yardımcı olmuştur, çünkü plastikler gerçekten değerlidir (Schönmayr 2017).

Dünya çapında otomobil ve ticari araçların yıllık ortalama üretimi yaklaşık 85-95 milyondur. Otomobilin ortalama ağırlığı yaklaşık 1,2 tondur ve bu da 102,5 milyon ton rafine edilmiş işlenmiş malzeme anlamına gelir. Bileşiminin yapısı şu şekildedir: hurda demir, plastikler, lastikler, demir dışı metaller, cam, köpük, araba aküleri, elektrik atıkları, tekstiller ve yalıtım malzemeleri (Čabalová et al. 2021). Araçlar yüksek oranda plastik içerir (Tablo 1), özellikle poliolefin (polipropilen-PP ve polietilen-PE), bunların özellikleri moleküler ağırlığa ve kristalinite derecesine bağlıdır (Čabalová et al. 2021). Günümüzde, ekonomik olarak gelişmiş ülkelerde poliolefinler tamamen atık plastikler şeklinde geri kazanılmaktadır. Yukarıda belirtilen plastikler folyo, levha malzemeleri, elektrikli cihaz kılıfları, enjeksiyon kalıplı parçalar, sulama boruları, çeşitli kasalar vb. üretiminde kullanılır (Zhang and Chen 2014). Polivinil klorür (PVC) ve poliüretan (PU), seri üretilen sentetik plastiklerdir ve otomotiv endüstrisinde de kullanılırlar. Özellikleri hem üretime hem de işleme yönetime bağlıdır. PVC atıkları kanalizasyon boruları, ekstrüde profiller ve levha üretimi için kullanılır; PVC ve poliolefinin karışık atıkları, endüstriyel şirketlerin paletleri ve zemin parçaları için işlenir; ve PU atıkları, boyutsal kararlılığı ve aşınma direncini artırmak için termoplastik poliüretan karışımlarına katkı maddesi olarak kullanılır (Aristri et al. 2021).

Günümüzde otomotiv endüstrisinde, metalleri plastik bileşenlerle değiştirme eğilimi artmaktadır, bu da otomobillerin ağırlığının azaltılmasına ve dolayısıyla yakıt tüketiminin azaltılmasına yol açmaktadır. Çok sayıda farklı plastik malzeme nedeniyle, plastiklerin geri kazanılması büyük faydalar sağlamaktadır. Sert çıkarılabilir atıkların küresel sorunu, sürekli artan otomobil

sayısıyla ve dolayısıyla birincil hammaddesi kauçuk olan aşınmış lastiklerin büyümesiyle ilgilidir. Kauçuk, düşük sertliğe sahip yüksek elastikiyet ve son derece yüksek süneklik gibi alışılmadık bir fiziksel özellik kombinasyonu ile karakterize edilen bir hammaddedir. İşleme davranışını etkilemek, gerekli uygulama özelliklerini belirlemek ve malzeme maliyetlerini azaltmak için çok sayıda katkı maddesi kullanılır. Aktif ve inaktif karbon siyahı ve dağıtıcı katkı maddeleri (SiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , MgCO_3) en önemli kauçuk dolgu maddeleridir. Kauçuk kullanımı için en büyük alan (%35-45) lastik üretimidir. Doğal kauçuk (NR), poliizopren kauçuk (IR), bütadien-stiren kauçuk (SBR) ve polibütadien kauçuk (BR) üretimlerinde kullanılır (Čabalová et al. 2021).

Plastik atıklarda olduğu gibi, hem atık kauçuk hem de aşınmış lastikler hala küresel bir sorundur ve içerikleri hala rasyonel olarak geri kazanılabilen atık miktarından çok daha yüksektir. Her yıl milyonlarca lastik atılır veya gömülür. Kauçuk atıklarından orijinal kauçuğu veya diğer kauçuk hammaddelerini geri kazanmak için hiçbir rejenerasyon işlemi kullanılamaz. Lastik, enerji potansiyeli olan bir dizi kimyasal içerir, ancak aynı zamanda ikincil hammadde kaynağıdır. Lastikler kauçuktan (%46-48), karbon siyahından (%25-28), çelik ek parçalardan (%10-12), yağ ve vulkanize edici maddelerden (%10-12) ve gömülü sentetik ipliklerden ve tekstillerden (%3-6) oluşur. İkincil malzeme olarak lastikler yalnızca iki şekilde kullanılır: malzeme dönüşümü (zeminler, gürültü duvarları, vb.) ve enerji geri kazanımı (Bulei et al. 2018).

Tablo 1. Plastik Malzemelerin Otomotiv Sektöründe Kullanımları (Čabalová et al. 2021)

Plastik Malzeme	Özellikleri	Kullanım Alanları	Kaynak
Polypropylene-PP Polyethylene-PE	Düşük fiyat; iyi uyarlanabilirlik; iyi performans ve geri dönüşümü kolay;	İnce duvarlı kalıplar; yakıt depoları ve hortumlar	(Maddah 2016)
Genişletilmiş polipropilen-EPP	Mükemmel mekanik özellikler - esneklik, basınç dayanımı; yüksek enerji emme yeteneği; şok koruması alanında en katı kriterleri yerine getirme; termal ve ses yalıtımı	Arabanın dış ve iç kısmında; tamponların bir parçası olarak; koltuklar; bagaj bölmeleri; koltuk başlıkları; halı dolguları	(Zhang and Chen 2014)
Polivinil klorür-PVC	Yüksek çekme mukavemeti; tokluk; yangına dayanıklılık; kimyasal direnç Plastikleştirici içermeyen PVC (novodur) suya, asitlere, alkalilere, organik bileşiklere, oksijene, su buharına dayanıklıdır; yüksek sertlik; aşınma direnci; mekanik mukavemet; iyi elektriksel yalıtım özellikleri; yüksek parlaklık ve berraklık; kendi kendine sönme; yapıştırıcılar bağlama ve kaynak; arabaların alt yüzeylerinin ve altta yatan tekstillerin kaplaması	Suni deri; folyo; kalıplama; profil; hortumların yüzey tabakası olarak yumuşatılır. Yüklü kalıplama; profil ve levhaların üretiminde yumuşatılmaz.	(Anon n.d.-h; Zhang and Chen 2014)

Poliüretan-PUR	Artan konfor; korozyon direnci; yalıtım; ses emilimi	Hassas ince duvarlı kalıplamaların üretimi; paralel bağlantı kovanları ve bağlantı tozlayıcıları; yalıtım ve sızdırmazlık bantları; tekstil laminasyonu; paketleme; inşaat sektöründe yalıtım malzemeleri; yapııştırıcılar ve elyaflar	(Anon n.d.-b)
Akrilonitril bütadien stiren-ABS	Sert, parlak yüzey; çekici görünüm; galvanik kaplamaya olanak sağlar	Karmaşık ve gergin kalıplamalar; ızgaralar; radyatör kapakları; havalandırma; far çerçeveleri; direksiyon kapakları; dikiz aynası muhafazaları; tekerlek göbeği kapakları; gösterge panelleri; büyük kaput parçaları; güvenlik paneli kaplama tabakası; tavan paneli kaplama tabakası, vakumla çekilmiş plakalar; yüzey ve iç gövde parçaları için	(Čabalová et al. 2021; Kulshreshtha 1993; Lithner, Nordensvan, and Dave 2012)
Stiren ve akrilonitril-SAN kopolimeri	Polistiren malzemeler arasında kimyasal olarak en dayanıklı olanıdır ve 85 °C sıcaklıkta bile uzun süre dayanır	Düşük sıcaklıklara karşı iyi bir dirence sahip kapaklar; cam elyaf takviyeli ürünler için; projektör kapakları; araba iç mekanları	(Čabalová et al. 2021)
Polimetilmetakrilat-PMMA	Berraklık; büyük kalınlıklarda renksizlik (%92 ışık geçirgenliği); hava koşullarına, suya, seyreltilmiş asitlere ve hidroksitlere karşı direnç; 80 °C'ye kadar ısı direnci; düşük yüzey sertliği	Karavan ve araçların camlanması	(Čabalová et al. 2021)
Polikarbonat-PC	Teknik açıdan önemli plastik yapı; yüksek ışık geçirgenliği; yüksek darbe dayanımı; iyi elektriksel yalıtım özellikleri; yüksek mekanik çekme dayanımı; düşük su emilimi; UV radyasyonuna karşı direnç; 140 °C'ye kadar kimyasal ve boyutsal kararlılık	Son derece dayanıklı kalıplamalar	(Anon n.d.-h)
Poliamid-PA	Yüksek sertlik; tokluk; aşınma direnci; iyi elektriksel yalıtım özellikleri	Kolların stresli parçalarının bir parçası; pencere kontrolleri ve yataklar gibi yapı plastikleri biçimindeki kayar burçlar; dişliler; bobinler; metallerin korozyon önleyici kaplamaları; elektriksel yalıtım katmanları; lastikler için kordonlar; konveyör bantları; halı lifleri; ağlar	(Čabalová et al. 2021)

Birçok bilim insanının amacı, en çok üretilen plastik ve kauçukların bir kısmını geri dönüştürmek için yeni yöntemler geliştirmektir. Poliolefinler (PP, PE), sentetik plastiklerin ana grubudur ve atıkları birçok kimyasal dönüşüm için oldukça çekici bir malzemedir. Bazen kimyasal geri dönüşüm olarak da adlandırılan üçüncül geri dönüşüm, polimerleri katma değerli ürünlere ayırmak için kimyasal işlemler kullanır. Tipik işlemler arasında atık plastiklerin hidrolizi (Al-Salem, Lettieri, and Baeyens 2009; Thiounn and Smith 2020; Wolosiewicz-Glab et al. 2017) ve pirolizi (Cabalova et al. 2021; Karthikeyan, Sivakumar, and Manimekalai, T.K.; Sathiskumar 2012; Yuliansyah et al. 2015) yer alır. Al-Salem ve diğerlerine göre

(Al-Salem et al. 2017), plastik atıkların pirolizi, yanma ve gazlaştırmaya kıyasla karbon monoksit ve karbondioksit emisyonunu en aza indirerek kirliliğe karşı daha iyi çevresel faydaları ve plastik ürünlerin karbon ayak izini azaltması nedeniyle önem kazanmıştır. Piroliz, polimerlerin 400 (450)–800 °C sıcaklıkta daha kısa sürede ve oksijensiz koşullar altında termal ayrışma süreci anlamına gelir (Anuar et al. 2016). Bu işlem sırasında, yakıt olarak yoğunlaşabilen ve gaz yakıt olarak yoğunlaşmayan kalıntılar ve uçucu hidrokarbonlar gibi karbon ürünleri üretilir (Tukker n.d.). PP ve PE termal çatlatma ürünleri esas olarak olefinlerin (C1-C4) ve aromatik bileşiklerin (benzen, toluen, ksilen) bir karışımıdır (Achilias et al. 2012). Polistirenlerin (PS) pirolizinin ana ürünleri stirendir. Wong ve diğerlerine (Wong et al. 2017) ve Achilias ve diğerlerine (Achilias 2007) göre, PP'den elde edilen sıvı piroliz ürünleri ham petrole benzer, ancak bu ürünler hammaddelerden gelen kül ve mumun varlığını gösterir ve bu da kaliteyi düşürür (Kassargy et al. 2017).

Perspektif açısından, kauçuk atığı kimya endüstrisi için hammadde olarak kullanmak için de avantajlıdır. Piroliz karbonu, petrol ve gaz ve çelik kord, kauçuk atığının (aşınmış lastikler) piroliz işleminin son ürünleridir. Piroliz gazı, hem ısı hem de elektrik üretimi için teknolojik süreçte doğrudan kullanılabilir. Teknolojik tesisin enerji öz yeterliliğini sağlayabilir. Piroliz karbon ince siyah tozu (aktif kömür), yüksek kalorifik değeri nedeniyle alternatif yakıt olarak da kullanılabilir. Daha fazla işlendikten sonra filtrasyon ekipmanlarının bir bileşeni olarak kullanılabilir (atık su arıtma tesislerinde). Kauçuk endüstrisinde katkı maddesi (karbon siyahının kısmi ikamesi, petrol rafinerilerinde emici malzeme, plastik üretiminde pigment) piroliz karbon kullanımının bir başka olasılığıdır. Piroliz yağı, yüksek enerji içeriği nedeniyle doğrudan ısı veya elektrik üretmek için kullanılabilir. Daha fazla işlenmesi sırasında (hidrojenasyon, fraksiyonel damıtma, kraking) çeşitli kimya endüstrilerinde yeniden kullanılabilen çok çeşitli kimyasallar elde etmek mümkündür. Lastiklerde, metalurji için ikincil bir hammadde olan birkaç tür çelik tel vardır. Eski lastiklerin sıvılaştırma işlemi de atık kauçuğun kimyasal geri dönüşümüdür. Kesilmiş lastiklerin (15-20 cm) eski yağda 400 °C'de kuru damıtılması işlemidir. Hafif ve ağır yağlar bu piroliz işlemiyle elde edilebilir. İşletme maliyetleri hala çok yüksektir (Čabalová et al. 2021).

2. Otomotiv Plastikleri

1956 yılında plastik ilk kez otomobillerin gövde işlerinde kullanılmıştır. Bu polimerlerin aracın toplam ağırlığına sunduğu hafiflik, yakıt tüketiminde yılda 12 ton azalmaya ve CO₂ emisyonlarında 30 kat azalmaya yol açmıştır (Anon n.d.-f). Plastikler ayrıca diğer malzemelere göre ek avantajlar da sunmaktadır. Büyük dayanıklılığı düşük hızlı darbelerdeki hasarı azaltır ve şekil verilebilirliği montajın karmaşıklığını azaltarak bu üretim hattındaki maliyetleri düşürür. Yapısal kararlılık nedeniyle kimyasal maddelere karşı direnç, düşük elektrik ve ısı iletkenliği, korozyona ve bozulmaya karşı iyi direnç, iyi optik

özellikler ve çoğu ticari polimerin düşük maliyeti, plastiklerin diğer malzemelere kıyasla sunduğu birçok avantajdan birkaçıdır. Dahası, piyasada bulunan geniş polimer yelpazesi ve çeşitli özellikleri plastikleri oldukça çok yönlü hale getirir. Bu çok yönlülük, hem iç hem de dış olmak üzere aracın çeşitli parçalarında kullanılmasını sağlar. Bu nedenle, plastik gibi sentetik malzemelerin kullanımı son yıllarda otomotiv endüstrisinde artmış ve bunları birçok araçta ana malzemelerden biri haline getirmiştir; bazı araçların ağırlığının %50'sine kadar plastiktir. Tüm plastik uygulamaları arasında otomotiv endüstrisi, 2019'da %9,6'lık bir taleple Avrupa'da üçüncü en yüksek talebe sahip sektördür bu da 2013'ten bu yana %1'den fazla bir artışı temsil etmektedir (Zambrano et al. 2024).

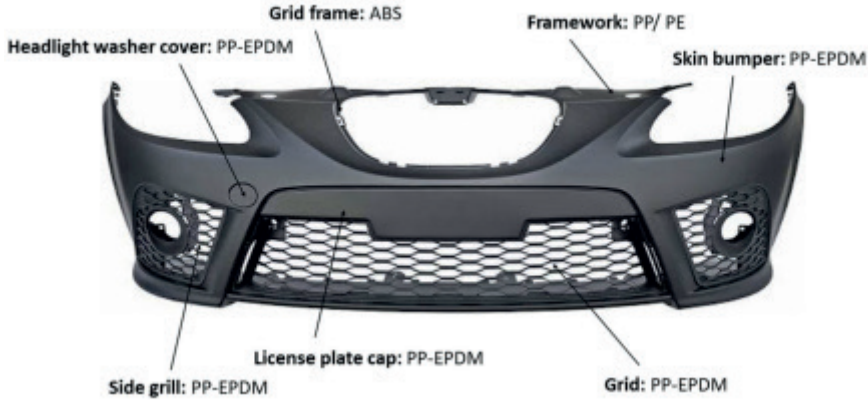
Otomotiv endüstrisinde kullanılan başlıca polimerler termoplastikler, elastomerler ve termosetlerdir. İyi bilinen termoplastikler arasında ABS, PA, PC, polipropilen (PP), polietilen (PE) ve polivinil klorür (PVC) bulunur; bazen bunların veya PP-EPDM (polipropilen-etilen propilen dien monomer), ABS-PC ve PC-PBT (polikarbonat-polibütilen tereftalat) gibi elastomerlerin kombinasyonları da kullanılır. Fiberglas takviyeli polyester ve epoksi reçineleri gibi termosetler gibi termoset kompozitler ve poliüretan gibi elastomerler öncelikli olarak iç kaplamalar için kullanılır (Patil, Patel, and Purohit 2017). PC'ler genellikle takviyesiz koşullarda kullanılır ve uygulamaları tamponlar, far camları ve güvenlik ekranları gibi alanlarda olabilir. Gösterge panellerinde ABS, polifenil eter (PPE), PC ve PP kullanılır. Orta büyüklükteki bir arabada, farklı şekillerde 1000'den fazla parça polimerlerden yapılır (Anon n.d.-a).

Bununla birlikte, üç tür plastik - PP, PE ve poliüretan (PU) - otomotiv endüstrisinde kullanılan bu malzemelerin yarısından fazlasını temsil eder. Otomotiv sektöründe bu ve diğer polimerlerin kullanımındaki öngörülen büyüme de her geçen gün giderek artmaktadır (Anon n.d.-e).

PP, otomotiv sektöründe en yaygın kullanılan plastiktir (Maddah 2016). Ön ve arka tamponlarda, kimyasal tanklarda, kablo yalıtımında ve hatta halı liflerinde kullanılır. Tamponun temel görevi, bir çarpışma durumunda aracı yastıklamak ve korumaktır. Bu, söz konusu güvenlik bileşeninin yokluğunda ortaya çıkabilecek olası hasarları azaltarak kinetik enerjinin emilmesiyle sağlanır (Davoodi, Sapuan, and Yunus 2008).

Tampon, aracın toplam ağırlığının yaklaşık 9 kg'ını temsil eder. Bu nedenle, aracın bu çok önemli parçasının yapıldığı malzeme, darbeyi yastıklamak için deforme edilebilir olmalıdır (**Şekil 1**). Arabaların içindeki plastiklerin ilk kullanımı, 70'lerde polimerlerin geliştirilmesi sayesinde tamamen yeniden tasarlanan tamponlardaydı. Farklı marka ve modellerin tamponlarının bileşimi üzerine yapılan bir çalışmaya göre (Gallone and Zeni-guido 2019), bunlar %91 poliolefinlerden (PP ve PE) yapılmıştır. PP'ye PE eklenmesi genellikle darbe direncini artırmak ve malzeme özelliklerini iyileştirmek için yapılmıştır. PP ve

PE'nin uyumluluğu iyi olmasa da, karıştırmayı mümkün kılmak için uyumlulaştırıcılar eklenir. Bu katkı maddeleri, aralarındaki arayüz gerilimini azaltır ve etkileşimi iyileştirir. Ayrıca polimer uyumluluk yardımcıları sayesinde kopolimerler olarak birlikte geri dönüştürülebilirler. Öte yandan, EPDM (etilen propilen dien monomer) de genellikle takviye olarak eklenir. Atmosferik etkenlere karşı çok iyi özelliklere sahip, yüksek elastikiyet ve dirence sahip bir elastomerdir. Ayrıca PP ve PE arasında uyumlulaştırıcı bir katkı maddesi işlevinden de yararlanır. Avrupa'da tamponlar çoğunlukla polipropilenden yapılır ancak metal ekler de (krom veya alüminyum). İçermektedir. Tamponların üretiminde kullanılan diğer malzemeler PU, ABS, akrilonitril-stiren-akrilat (ASA) ve polibütilen tereftalatlı PC'dir (PC/PBT), ancak bunlar PP'den daha az kullanılır.



Şekil 1. Ön tampon plastik yapıya sahip Seat Leon 04-09 Look FR/Cupra (Zambrano et al. 2024)

Aslında, Renault Grubu araçlarında geri dönüştürülmüş plastik kullanımı 1990'larda başlamıştır. (Herou, Rusu, and Gradin n.d.). Otomotiv sektörü muhtemelen en iyi geri dönüşüm kaydına sahip sektör olmakla birlikte (Mashek, W.; Holmes, K.; Martin 2016). Ford, ünlü Focus (Mashek, W.; Holmes, K.; Martin 2016) gibi çok sayıda modelde 50 milyon pound'dan fazla plastik kullanarak yolcu koltuğu döşemeleri için geri dönüştürülmüş plastikler kullanmıştır. Opel ayrıca "geri dönüşüm ve geri kazanım" yönergelerindeki geri dönüşüm hedeflerine ulaşmaya kararlıdır ve işleme süreçlerinin kalitesinin bu malzemeleri araçlarının görünür bileşenlerinde kullanmalarına izin vermesini sağlamaya çalışmıştır (**Şekil 2**). Honda, üretim süreci sırasında oluşan tampon atıklarını geri dönüştürüyor ve bu atıklar Honda'nın tedarik zincirinde yeniden formüle edilerek çamurluk yapımında yeniden kullanmıştır (Mashek, W.; Holmes, K.; Martin 2016). Birleşmiş Milletler tarafından övülen bir kirlilik önleme planının parçası olarak 2025 yılına kadar araçlarını üretmek için kullanılan plastiklerin en az %25'inin geri dönüştürülmesini sağlayan Volvo gibi bazı markaların taahhüdü, plastik geri dönüşüm sektörü için iyi bir geleceğin habercisi olmaktadır (Anon n.d.-d). Ayrıca yeniden tasarlanan Clio IV'te (2016)

tamponlarda ve tekerlek davlumbazlarında kullanılan ana malzeme geri dönüştürülmüş plastiktir.



Şekil 2. Opel Insignia aracındaki geri dönüştürülmüş plastik parçalar (Anon n.d.-c)

2.1. Yenilenemeyen Kaynaklardan Plastikler

Taşımacılık sektöründe, otomotiv endüstrisi neredeyse başlangıcından beri plastik kullanmaktadır. Plastiklerin hafifliği, esnekliği ve birçok özelliği onları otomotiv endüstrisi için ideal hale getirerek otomobillerin genel ağırlığını azaltır ve daha az yakıt tüketimine yol açar (Begum, Rane, and Kanny 2020). Tipik olarak, plastikler gövde panelleri, conta, jant kapakları, hava yalıtım şeritleri, tamponlar ve çamurluklar, hava barajları, döşemeler ve gösterge paneli, gösterge paneli, kapı panelleri, direksiyon simidi, koltuk ve ilgili parçalar, gösterge paneli kaplaması ve dekoratif parçalar gibi dış parçalarda kullanılır. Sensörler, ateşleme bölmeleri, sıvı sistemleri, güç dağıtımı ve rezonatörler gibi kaput altı bileşenleri de plastik kullanır (Adeniyi et al. 2016). Poliamid (PA), polifenilen sülfür (PPS), polimetilmetakrilat (PMMA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) gibi mühendislik plastikleri, yenilenemeyen kaynakların yüksek performanslı segmentine aittir. Bu plastikler, polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC) ve polistiren (PS) gibi emtia plastiklerinden daha yüksek özellikler sergiler. Mükemmel mukavemet, iyi sıcaklık direnci, tokluk, sertlik, kimyasal direnç, hafiflik, aşınma ve yıpranma direnci gösterirler ve otomobil bileşenlerini kolayca yaparlar (Patil et al. 2017). Bazı durumlarda, metal bileşenlerin yerini kolayca alabilirler. Mühendislik plastiklerinin kullanımı tek plastiklerden, Renault'un (stiren maleik anhidrit ve akrilonitril bütadien stirenin (SMA-GF) %15 cam takviyeli kopolimer bileşiği) ve Citroen'in (stiren maleik anhidrit (SMA) ve ABS'nin cam takviyeli karışımı Xiran) tavan sistemleri gibi daha karmaşık kopolimerlere doğru ilerler (Nickels 2021). Otomotiv endüstrisinde en yaygın kullanılan plastikler arasında akrilonitril bütadien stiren (ABS), poliamid (PA), polikarbonat (PC), polietilen tereftalat (PET), polistiren (PS) ve polibütilen tereftalat (PBT) bulunur (Vieyra et al. 2022).

Mühendislik ve geleneksel plastikler, fosil türevi plastikler olarak da adlandırılır, makul bir zaman dilimi içinde mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak parçalanamaz. Genellikle, bazı plastik filmlerin 60 mm'sinin toprakta tamamen parçalanması yaklaşık 300 yıl sürer; bu nedenle plastikler ekolojik bir sorun olarak kabul edilir (Vieyra, Aguilar-Méndez, and San Martín-Martínez 2013). Yetenekli mikroorganizmalar ve tasarlanmış enzimler, PET gibi polimerlerin mikrobiyal parçalanmasını mümkün kılarsa da (Danso, Chow, and Streita 2019; Vieyra et al. 2015), fosil türevi plastikler kompostlanamaz.

2.2. Yenilenebilir Kaynaklardan Plastikler

Fosil yakıttan yenilenebilir kaynaklardan türetilen plastiklere geçiş, otomotiv endüstrisi için belirlenen mevcut çevresel hedeflere ulaşma yönünde bir adımdır. Bazı fosil yakıt türevi plastiklerin ikame edilmesi, atık yönetimi için çok ihtiyaç duyulan bir çözüm olan hafifletme çözümüne katkıda bulunur ve plastik bertarafını çevreleyen endüstriyel ve ekolojik sorunları çözer. Biyoplastikler, doğal elyaf kompozitler ve elyaf takviyeli polimer kompozitler mevcut alternatiflerdir. Tanımlar konusunda bir fikir birliği olmadığından, açıklamaları ve otomotiv uygulamalarındaki kullanımlarının kapsamını sağlıyoruz.

2.2.1. Biyoplastikler

Biyoplastikler, biyobazlı, biyolojik olarak parçalanabilir malzemeler veya her ikisi ailesidir. Biyobazlı plastikler, mısır, patates, buğday ve bitkisel yağ gibi yenilenebilir kaynaklardan kimyasal veya biyolojik işlemlerle insan yapımı veya işlenmiş organik makromoleküllerdir (Babu, O'Connor, and Seeram 2013). Genellikle biyopolimerler olarak adlandırılan biyobazlı plastikler, doğal maddelerden doğrudan ekstraksiyon, biyokütleden türetilen monomerlerin polimerizasyonu veya mikroorganizmalar tarafından üretilir (Spierling et al. 2018). Canlı organizmalarda hücre içi veya hücre dışı olarak üretilen doğal biyopolimerler arasında selüloz, kitin, nişasta, polihidroksibutirat (PHB) gibi polihidroksialkanoatlar (PHA) ve polilaktid asit (PLA) ve diğerleri gibi sentez reaksiyonları yoluyla oluşturulan sentetik biyopolimerler bulunur (Grose 2009).

Biyoplastikler biyolojik olarak parçalanabilir veya kompostlanabilir. Biyolojik olarak parçalanabilir bir polimer, çevredeki mikroorganizmaların malzemeleri su, karbondioksit ve metan gibi doğal maddelere parçaladığı bir kimyasal süreç olan biyolojik parçalanmaya uğrar (Babu et al. 2013). ASTM uluslararası standartları 6400 ve 6868'e göre, kompostlanabilir plastikler kompostlama sırasında uygun parçalanma, yeterli düzeyde doğal biyolojik parçalanma ve bitki büyümesini destekleyecek olumsuz etkiler göstermemelidir. Bu standartlar, malzemenin belirli bir süre içinde biyolojik olarak parçalanmasını ve toprakta toksik kalıntı bırakmamasını gerektirir. Çevreye maruz kalma (yani sıcaklık, nem, mikrobiyal popülasyon, pH ve oksijen içeriği) bir polimerin biyolojik olarak parçalanmasını etkiler; bu nedenle, endüstriyel kompost-

lama koşulları altında mikrobiyal aktivite ile parçalanan bir malzeme diğer koşullarda parçalanmayabilir (Narancic et al. 2018). Biyolojik bazlı malzemeler, selülozik bitki lifleri, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen monomerlerden yapılan biyolojik bazlı polimerler ve yüksek oranda biyolojik olarak parçalanabilir polimerleri içerir.

Sonuç

Ömrünü tamamlamış atıkların otomotiv sanayinde kullanımı hem çevreye olan zararların azaltılmasına hem de katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesine katkı sağlamaktadır. Bu durum ürün maliyetlerini azaltarak ekonomiye katkı sağlamaktadır. Geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi kullanılacak olan malzemelerin teknik ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Ayrıca otomotiv sektörünün ihtiyacı olan malzemeler içerisinde geri dönüştürülmüş materyallerin kullanımını teşvik edici düzenlemelerin hayata geçirilmesi önem arz etmektedir.

Kaynaklar

- Achilias, D. S. ..., L. ... Andriotis, I. A. ... Koutsidis, D. A. ... Louka, N. P. ... Nianias, P. ... Si-afaka, I. ... Tsagkalias, and G. Tsintzou. 2012. "Recent Advances in the Chemical Recycling of Polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA)." P. 64 in *In Material Recycling—Trends and Perspectives*.
- Achilias, Dimitris S. 2007. "Chemical Recycling of Poly(Methyl Methacrylate) by Pyrolysis. Potential Use of the Liquid Fraction as a Raw Material for the Reproduction of the Polymer." *European Polymer Journal* 43(6):2564–75. doi: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2007.02.044.
- Adeniyi, Amos, Oluranti Agboola, Emmanuel Rotimi Sadiku, M. O. Durowoju, P. A. Olubambi, A. Babul Reddy, I. D. Ibrahim, and W. K. Kupolati. 2016. "Thermoplastic-Thermoset Nanostructured Polymer Blends." *Design and Applications of Nanostructured Polymer Blends and Nanocomposite Systems* 15–38. doi: 10.1016/B978-0-323-39408-6.00002-9.
- Al-Salem, S. M. ..., A. ... Antelava, A. ... Constantinou, G. ... Manos, and A. Dutta. 2017. "A Review on Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Solid Waste (PSW)." *J. Environ. Manag.* 197:177–98.
- Al-Salem, S. M., P. Lettieri, and J. Baeyens. 2009. "Recycling and Recovery Routes of Plastic Solid Waste (PSW): A Review." *Waste Management* 29(10):2625–43. doi: 10.1016/J.WASMAN.2009.06.004.
- Anon. n.d.-a. "Automotive & Transport." Retrieved (<https://www.plasticsconverters.eu/automotiveandtransport>).
- Anon. n.d.-b. "Automotive Plastics and Composites: Worldwide Markets and Trends to 2007 - D. Mann - Google Kitaplar." Retrieved December 3, 2024 (https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=TcQ7fUuJdcAC&oi=fnd&pg=P-P1&dq=Automotive+Plastics+and+Composites:+Worldwide+Markets+and+Trends+to+2007%3B+Reinforce+Plastics+Magazine%3B+Elsevier:+Amsterdam,+The+Netherlands,+2007%3B+p.+420&ots=gvpvrYRFnw&sig=ji-MuRT3ppE95MOqh9bf1RROqS88&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
- Anon. n.d.-c. "El Camino Para Conservar El Medio Ambiente." Retrieved (<https://www.opel.es/tools/reciclaje.html>).
- Anon. n.d.-d. "El Largo Camino a Recorrer Por El Plástico Reciclado En La Industria Automotriz." Retrieved (<https://knaufautomotive.com/es/el-plastico-reciclado-en-la-industria-automotriz/>).
- Anon. n.d.-e. "Global Automotive Plastics Market Size." Retrieved (<https://www.gminsights.com/industry-analysis/automotive-plastics-market>).
- Anon. n.d.-f. "Plástico." Retrieved (<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/113051-Plasticos-La-mejor-alternativa-tecnica-para-reducir-el-peso-del-automovil.html>).
- Anon. n.d.-g. "Plastik." Retrieved (<https://tr.wikipedia.org/wiki/Plastik>).
- Anon. n.d.-h. "The Plastics Used in Automotives." Retrieved (<https://www.azom.com/>)

article.aspx?ArticleID=17014).

- Anuar, S. .., D. .. Shafferina, F. .. Abnisa, W. M. A. .. Wan Daud, and M. K. Aroua. 2016. "A Review on Pyrolysis of Plastic Wastes." *Energy Convers. Manag.* 115:308–26.
- Aristri, M. A. .., M. A. R. .. Lubis, Yadav S.M.;, A. N. .. Papadopoulos, W. .. Pizzi-Fatriasari, M. .. Ismayati, and A. H. Iswanto. 2021. "Recent Developments in Lignin- and Tannin-Based Non-Isocyanate Polyurethane Resins for Wood Adhesives—A Review." *Applied Sciences* 11:4242.
- Babu, Ramesh P., Kevin O'Connor, and Ramakrishna Seeram. 2013. "Current Progress on Bio-Based Polymers and Their Future Trends." *Progress in Biomaterials* 2(1):8. doi: 10.1186/2194-0517-2-8/TABLES/12.
- Begum, Sabana Ara, Ajay Vasudeo Rane, and Krishnan Kanny. 2020. "Applications of Compatibilized Polymer Blends in Automobile Industry." *Compatibilization of Polymer Blends: Micro and Nano Scale Phase Morphologies, Interphase Characterization, and Properties* 563–93. doi: 10.1016/B978-0-12-816006-0.00020-7.
- Bulei, C., M. P. Todor, T. Heput, and I. Kiss. 2018. "Directions for Material Recovery of Used Tires and Their Use in the Production of New Products Intended for the Industry of Civil Construction and Pavements." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 294(1):012064. doi: 10.1088/1757-899X/294/1/012064.
- Cabalova, I. .., J. .. Geffertova, T. .. Bubenikova, and J. Krilek. 2021. "Pyrolytic Recovery as a Prospective Use of Plastic Waste Materials." *MM Sci. J.* 4376–82. doi: 10.17973/MMSJ.2021_6_2021049.
- Čabalová, Iveta, Aleš Ház, Jozef Krilek, Tatiana Bubeníková, Ján Melicherčík, and Tomáš Kuvík. 2021. "Recycling of Wastes Plastics and Tires from Automotive Industry." *Polymers* 13(13):2210. doi: 10.3390/POLYM13132210/S1.
- Danso, Dominik, Jennifer Chow, and Wolfgang R. Streita. 2019. "Plastics: Environmental and Biotechnological Perspectives on Microbial Degradation." *Applied and Environmental Microbiology* 85(19). doi: 10.1128/AEM.01095-19/SUPPL_FILE/AEM.01095-19-SD001.XLSX.
- Davoodi, M. M., S. M. Sapuan, and R. Yunus. 2008. "Conceptual Design of a Polymer Composite Automotive Bumper Energy Absorber." *Materials & Design* 29(7):1447–52. doi: 10.1016/J.MATDES.2007.07.011.
- Gallone, T. .., and A. Zeni-guido. 2019. "Closed-Loop Polypropylene, an Opportunity for the Automotive Sector." *J. Field Actions—Field Actions Sci. Rep.* 48–53.
- Grose, L. 2009. "Sustainable Cotton Production." *Sustainable Textiles: Life Cycle and Environmental Impact* 33–62. doi: 10.1533/9781845696948.1.33.
- Heroiu, Petrica;, Marius Ciprian; Rusu, and Oana Elena Gradin. n.d. "Renault Vehicles and Their Progress Regarding the Reducing of Environmental Footprint."
- Karthikeyan, S. .., N. .. Sivakumar, and C. Manimekalai, T.K.; Sathiskumar. 2012. "A Review on Pyrolysis of Waste Plastics to Value Added Products." *Elixir Online J.* 29:8291–98.

- Kassargy, Chantal, Sary Awad, Gaetan Burnens, Khalil Kahine, and Mohand Tazerout. 2017. "Experimental Study of Catalytic Pyrolysis of Polyethylene and Polypropylene over USY Zeolite and Separation to Gasoline and Diesel-like Fuels." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 127:31–37. doi: 10.1016/J.JAAP.2017.09.005.
- Kulshreshtha, A. K. 1993. "A Review of Commercial Polyblends Based on PVC, ABS, and PC." *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 32(6):551–78. doi: 10.1080/03602559308021022.
- Lithner, Delilah, Ildikó Nordensvan, and Göran Dave. 2012. "Comparative Acute Toxicity of Leachates from Plastic Products Made of Polypropylene, Polyethylene, PVC, Acrylonitrile–Butadiene–Styrene, and Epoxy to *Daphnia Magna*." *Environ Sci Pollut Res* 19:1763–72.
- Maddah, Hisham A. 2016. "Polypropylene as a Promising Plastic: A Review." *American Journal of Polymer Science* 6(1):1–11. doi: 10.5923/J.AJPS.20160601.01.
- Mashek, W.; Holmes, K.; Martin, K. 2016. "Automotive Recycling: Devalued Is Now Revalued." Pp. 1–48 in *The Plastics Industry Trade Association*.
- Narancic, Tanja, Steven Verstichel, Srinivasa Reddy Chaganti, Laura Morales-Gamez, Shane T. Kenny, Bruno De Wilde, Ramesh Babu Padamati, and Kevin E. O'Connor. 2018. "Biodegradable Plastic Blends Create New Possibilities for End-of-Life Management of Plastics but They Are Not a Panacea for Plastic Pollution." *Environmental Science and Technology* 52(18):10441–52. doi: 10.1021/ACS. EST.8B02963/ASSET/IMAGES/LARGE/ES-2018-029635_0007.JPEG.
- Nickels, Liz. 2021. "New Innovations in Automotive Thermoplastics." <https://doi.org/10.1016/j.Repl.2019.06.041> 63(4):185–88. doi: 10.1016/J.REPL.2019.06.041.
- Patil, Akshat, Arun Patel, and Rajesh Purohit. 2017. "An Overview of Polymeric Materials for Automotive Applications." *Materials Today: Proceedings* 4(2):3807–15. doi: 10.1016/J.MATPR.2017.02.278.
- Schönmayr, David. 2017. "Automotive Recycling, Plastics, and Sustainability: The Recycling Renaissance." *Automotive Recycling, Plastics, and Sustainability: The Recycling Renaissance* 1–184. doi: 10.1007/978-3-319-57400-4/COVER.
- Spierling, Sebastian, Eva Knüpffer, Hannah Behnsen, Marina Mudersbach, Hannes Krieg, Sally Springer, Stefan Albrecht, Christoph Herrmann, and Hans Josef Endres. 2018. "Bio-Based Plastics - A Review of Environmental, Social and Economic Impact Assessments." *Journal of Cleaner Production* 185:476–91. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.014.
- Thiounn, Timmy, and Rhett C. Smith. 2020. "Advances and Approaches for Chemical Recycling of Plastic Waste." *Journal of Polymer Science* 58(10):1347–64. doi: 10.1002/POL.20190261.
- Tukker, A. n.d. "Plastics Waste: Feedstock Recycling, Chemical Recycling and Incineration - Arnold Tucker - Google Kitaplar." Retrieved December 3, 2024 (<https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=16-QHqe03foC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Plastics+Waste—Feedstock+Recycling,+Chemical+Recyclin>

- g+and+Incineration%3B+Rapra+Review+Reports%3B+&ots=kXx7n-O39i&-sig=evN4lLA8jI-6ejJl5uIWN03gEa0&redir_esc=y#v=onepage&q=Plastic).
- Vieyra, H., M. A. Aguilar-Méndez, and E. San Martín-Martínez. 2013. "Study of Biodegradation Evolution during Composting of Polyethylene-Starch Blends Using Scanning Electron Microscopy." *Journal of Applied Polymer Science* 127(2):845–53. doi: 10.1002/APP.37818.
- Vieyra, Horacio, Joan Manuel Molina-Romero, Juan de Dios Calderón-Nájera, and Alfredo Santana-Díaz. 2022. "Engineering, Recyclable, and Biodegradable Plastics in the Automotive Industry: A Review." *Polymers* 14(16):3412. doi: 10.3390/POLYM14163412.
- Vieyra, Horacio, Eduardo San Martín-Martínez, Esmeralda Juárez, Ulises Figueroa-López, and Miguel A. Aguilar-Méndez. 2015. "Biodegradation Process of a Blend of Thermoplastic Unripe Banana Flour—Polyethylene under Composting: Identification of the Biodegrading Agent." *Journal of Applied Polymer Science* 132(29). doi: 10.1002/APP.42258.
- Wolosiewicz-Glab, Marta, Paulina Pięta, Sebastian Sas, and Łukasz Grabowski. 2017. "Plastic Waste Depolymerization as a Source of Energetic Heating Oils." *E3S Web of Conferences* 14:02044. doi: 10.1051/E3SCONF/20171402044.
- Wong, S. L., N. Ngadi, T. A. T. Abdullah, and I. M. Inuwa. 2017. "Conversion of Low Density Polyethylene (LDPE) over ZSM-5 Zeolite to Liquid Fuel." *Fuel* 192:71–82. doi: 10.1016/J.FUEL.2016.12.008.
- Yuliansyah, Ahmad Tawfiequrrahman, Agus Prasetya, RamadhanMuhammad A. A., and Rizki Laksono. 2015. "Pyrolysis of Plastic Waste to Produce Pyrolytic Oil As an Alternative Fuel." *International Journal of Technology* 7:1076–83.
- Zambrano, Carla, Pablo Tamarit, Ana Inés Fernandez, and Camila Barreneche. 2024. "Recycling of Plastics in the Automotive Sector and Methods of Removing Paint for Its Revalorization: A Critical Review." *Polymers* 16:3023. doi: 10.3390/POLYM16213023.
- Zhang, Hongshen, and Ming Chen. 2014. "Current Recycling Regulations and Technologies for the Typical Plastic Components of End-of-Life Passenger Vehicles: A Meaningful Lesson for China." *J Mater Cycles Waste Manag* 16:187–200.

BÖLÜM 2

BİYOKÜTLE VE PLASTİK KOPİROLİZİ

Ahmet Rasim GİRİŞEN¹

Gürkan KARA²

Hakan ÖZCAN³

1 (Dr.) Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, TürkiyeE-mail: ahmetrasimgirisen@gmail.comORCID: 0000-0002-1201-7614

2 (Arş. Gör.) Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, TürkiyeE-mail: gurkan.kara@omu.edu.tr ORCID: 0000-0003-0365-3827

3 (Prof. Dr.) Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, TürkiyeE-mail: ozcanh@omu.edu.tr ORCID: 0000-0002-7848-3650

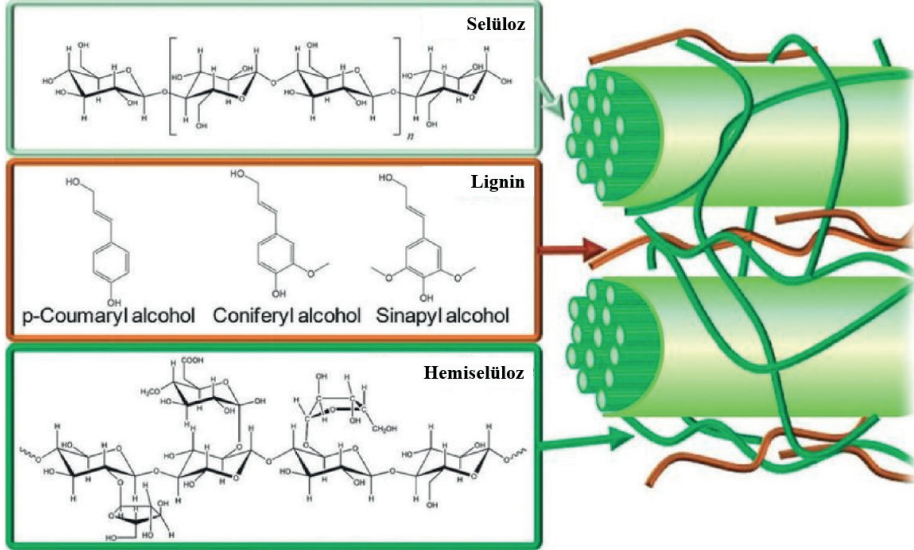
1. Giriş

Plastik malzemeler, pratik, çok yönlü ve düşük maliyetli olmaları sebebiyle dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Thahir vd., 2021). Günümüzde plastikler günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçası olmuştur ve plastikleri ortadan kaldırmak neredeyse imkânsız hale gelmektedir. Artan insan nüfusu beraberinde enerji, gıda, teknoloji ve tüketici ürünlerine olan talepte de hızlı bir artışa sebep olmaktadır. Geçmişten günümüze plastik üretim miktarlarına bakıldığında, 1950’de yılda 2 milyon ton olan plastik üretimi 2018’de yılda 381 milyon ton olduğu görülmektedir. (Rhodes, 2019). Küresel çapta incelendiğinde, plastik atıkların yalnızca yaklaşık %20’si geri dönüştürülmüş ve %25’i yakılmıştır. Geriye kalan plastikler ise atık olarak kalmaktadır 3. Makaleyi göster. Çevreye giren plastik atıkların doğal olarak parçalanması çok uzun sürer ve kirliliğe neden olur. Bu durum hem kaynakların israf edilmesine sebep olur hem de dünya üzerinde yaşayan canlıları tehdit eder (Priya vd., 2023). Plastik atıklar mekanik, biyolojik ve kimyasal olarak üç farklı şekilde geri dönüştürülebilir. Mekanik geri dönüşüm yöntemi ile plastik atıkları yeniden işlenebilen ikincil ham maddelere dönüştürülmektedir. Biyolojik geri dönüşüm yönteminde hem doğal hem de sentetik plastik atıkları ayrıştırmak için mikrop, mantar ve enzimatik işlemler kullanılmaktadır. Kimyasal geri dönüşüm yönteminde ise plastik atıkların yakıtlara, kimyasal ürünlere ve yeni plastiklere termokimyasal yolla dönüştürülmesi sağlanmaktadır (Hossain vd., 2022).

Plastiklerin yanı sıra enerji kaynağı olarak değerlendirilebilmeyi hak eden bir diğer değerli ve doğal kaynak biyokütledir. Biyokütle, her yıl küresel olarak yalnızca tarım sektöründen üretilen tahmini 140 milyar ton biyokütle atığıyla yüksek bir kullanım potansiyeline sahiptir. Ancak bunun yalnızca %40’ı yakıt, yem ve güç üretimi için kullanılmaktadır. Biyokütle kalıntılarının çoğu yakılarak çevre ve iklim için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Tripathi vd., 2019). Öte yandan, en bol bulunan biyokütle türü olan lignoselülozik biyokütle, ormancılık ve tarımsal kalıntılardan yıllık olarak yaklaşık 181,5 milyar ton üretilir. Üretilen bu biyokütle atığının yalnızca 8,2 milyar tonu kullanılmaktadır. Kullanım fazlası olan bu atık biyokütlenin bir enerji kaynağı potansiyeli olarak değerlendirilmesi önemlidir. Tarımsal ve lignoselülozik biyokütlenin yararlı ürünlere (gübre, biyoplastikler ve biyoyakıtlar gibi) dönüştürülmesi ile biyokütle kaynak döngülerinin verimli bir şekilde yönetilmesi, fosil yakıt kullanımının azaltılması ve sıfır biyokütle israfı ile dünyamıza ciddi katkılar sağlanabilir (Dahmen vd., 2019). Lignoselülozik biyokütlenin yapısı Şekil 1’de verilmiştir.

Lignoselülozik biyokütle esasen selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşmaktadır. Her bir bileşenin varlığı ve içeriği piroliz sonucu elde edilecek ürünlerin miktarı ve içerikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Biyokütlerdeki selüloz içeriği ne kadar yüksekse, o kadar sıvı ürün elde edilebilir; hemise-

lülöz içeriği ne kadar yüksekse, o kadar gaz ürünü üretilebilir; lignin içeriği ne kadar yüksekse, o kadar biyokömür üretilebilir (R. Kumar vd., 2020). Genellikle lignin, selüloz ve hemiselülozdan daha yüksek bir piroliz sıcaklığı gerektirmektedir ve üç bileşen piroliz işlemi sırasında birbirini etkiler. Lignin yapısındaki polimerin oksijensizleşmesi üzerinde selüloz ve hemiselülozun varlığı pozitif etkiye sahiptir. Selüloz ve hemiselülozdan piroliz sonucu üretilen olefinler, ligninin pirolizini teşvik edebilmektedir (Nanduri vd., 2021). Lignoselülozik biyokütlenin yapısında üç ana bileşene ek olarak, proteinler, lipitler, küçük molekül şekerleri vb. gibi başka kimyasallar da bulunmaktadır. Piroliz işlemi esnasında, biyokütlenin bünyesinde bulunan tüm kimyasallar rastgele bir şekilde parçalanacak ve nispeten yüksek bir sıcaklıkta birbirleriyle etkileşime gireceklerdir. Biyokütlenin içerdiği elementlerin bileşimi açısından baktığımızda, plastiklere kıyasla yüksek bir oksijen içeriğine ve daha düşük hidrojen oranına sahip olabilmektedirler. Bu sebeple lignoselülozik biyokütlenin pirolizinden elde edilen ürünler, geleneksel fosil yakıtlara kıyasla daha düşük bir ısıtma değerine sahip olmaktadır (Cai vd., 2018).



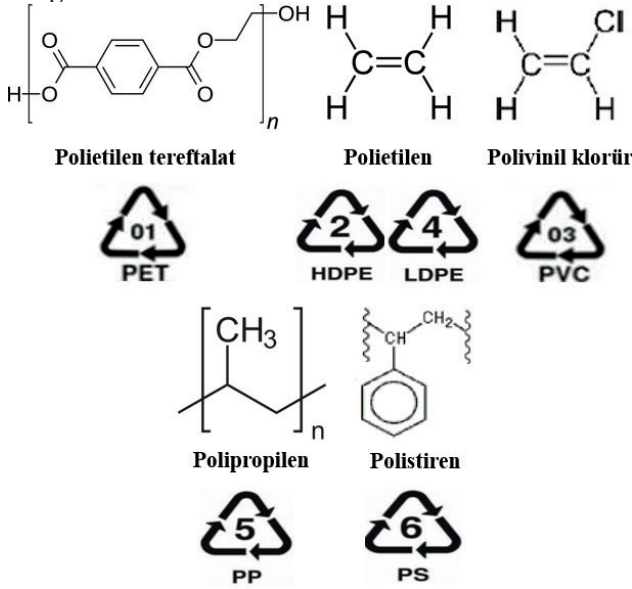
Şekil 1. Lignoselülozik biyokütle içeriği (Alonso vd., 2012)

Biyokütle pirolizi, biyokütleyi oluşturan makromoleküller arasındaki bağların kırılarak, oksijensiz veya oksijeni sınırlı bir ortamda, yüksek bir sıcaklıkta yeniden birleşerek biyoyağ, biyokömür ve yanıcı biyogaz ürettiği süreci ifade etmektedir. Biyokütleden elde edilen biyoyağın sıvı yakıt olarak kullanılabilme potansiyeli bulunmaktadır. Fosil yakıt kökenli benzin, kerosen ve dizel yakıtın yerini alabilecek nitelikte olması giderek daha fazla ilgi çekmesine ve araştırılmasına neden olmaktadır. Ancak, biyokütle pirolizinden elde edilen biyoyağ direkt olarak fosil yakıtlar yerine kullanılamamaktadır. Biyokütleden elde edilen biyoyağın içerisinde çok fazla su, aldehit ve karboksilik asit yapıları gibi

yüzlerce organik madde bulunmaktadır (Khosravanipour vd., 2018). Bunların yanı sıra yüksek oksijen içeriği, güçlü asit özelliği ve zayıf stabilitesi, depolama ve taşımada zorluklar nedeniyle pirolizden elde edilen biyoyağların çeşitli yükseltgeme işlemlerine tabi tutulması gerekmektedir. Yükseltgeme reaksiyonlarının üretim sürecini uzatması, ilave donanım ve ekipman ihtiyacı ve maliyetleri arttırması sebebiyle farklı yöntemler kullanılarak biyoyağların kalitesi arttırılmaya çalışılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi olan kopiroliz yönteminde, biyokütlenin hidrojen zenginleştirme ve oksijen giderimi gibi yükseltgeme işlemleri ikinci bir piroliz materyali kullanılarak sağlanmaya çalışılmaktadır. Birbirleri ile sinerjistik bir etki yaratması sonucu elde edilecek biyoyağlar fosil yakıtlara benzer kalitede olmakta ve yükseltgeme işlemleri için gerekli süre ve maliyetler düşürülebilmektedir (Shuang Wang vd., 2020).

Plastik ve biyokütlelerin mevcut ve gelecekteki durumları değerlendirildiğinde, bu atıklar kullanım yöntemlerine bağlı olarak hem bir kriz sebebi hem de bir fırsat olabilir. Biyokütle ve plastiklerin kopirolizi, biyokütle veya plastiklerin ayrı ayrı pirolizine kıyasla elde edilen ürünlerin kalitesini önemli ölçüde arttırmaktadır. Biyokütle ve plastiklerin kopirolizinden elde edilen kömür, yalnızca biyokütle pirolizinden elde edilen kömürle karşılaştırıldığında daha yüksek verim, daha yüksek kalorifik değer ve mekanik olarak daha dayanıklı bir yapıya sahiptir. Bu şekilde elde edilen kömür katalizör taşıyıcı, elektrot malzemeleri vb. uygulamalar için daha kullanışlıdır (Uzoejinwa vd., 2018). Bu nedenle, özellikle işlem mekanizmasını ortaya çıkarmak için, biyokütle ve plastiklerin kopirolizinden elde edilen kömür üretiminin incelenmesi önem arz etmektedir. Biyokütle ve plastiklerin kopirolizi, serbest radikaller arasındaki etkileşimleri içeren sinerjik bir etkiye sahiptir (Fu vd., 2023; Nardella vd., 2022). Plastik polimerler, özellikle poliolefinler, biyokütle ile kopiroliz sırasında zincir yapıların rastgele bir şekilde kopar. Bu durum güçlü çatlama reaksiyonları ve çok sayıda hidrojen radikalının oluşması ile sonuçlanır (Dai vd., 2022; H. W. Lee vd., 2018; Önal vd., 2014). Hidrojen radikalleri, biyokütlenin piroliz ile ayrışmasından oluşan küçük moleküllü radikallerle birleşerek su ve gaz üretimini destekler (Cui vd., 2023; Patil vd., 2018). Ayrıca, hidrdeoksijenasyon reaksiyonunu kolaylaştırarak ürünlerdeki oksijenli bileşik ve nitrürlerin içeriğini azaltır. Bunun yanı sıra, fenol ve aldehytlerin verimini artırır ve Diels-Alder reaksiyonu yoluyla aromatik hidrokarbonların oluşumunu teşvik eder (Y. Li vd., 2019; Shafaghat vd., 2019). Biyokütle pirolizinden gelen su, katranın daha fazla parçalanmasına katkıda bulunur ve kopirolizden elde edilen biyoyağın veriminin yanı sıra özelliğini de olumlu yönde etkiler (Cui vd., 2023; Hassan vd., 2016; H. Lee vd., 2016). Ancak, plastik malzemelerin farklı olması nedeniyle piroliz ürünleri de karmaşık bir yapıdadır. Kopiroliz sırasında her plastik türünün biyokütle ile arasındaki etkileşimde farklı olacağından, biyokütle ve plastiklerin kopirolizinin sinerjik etkisinde plastik türünün etkisinin araştırılması esastır. Biyokütle ve plastiklerin kopirolizinden elde edilen ürün-

lerin içerikleri plastik türünden etkilenir. Farklı plastikler farklı polimerden oluşmaktadır (Jaafar vd., 2021; Z. Wang vd., 2021). Bazı plastiklerin temel yapıları Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Plastik türleri ve yapıları

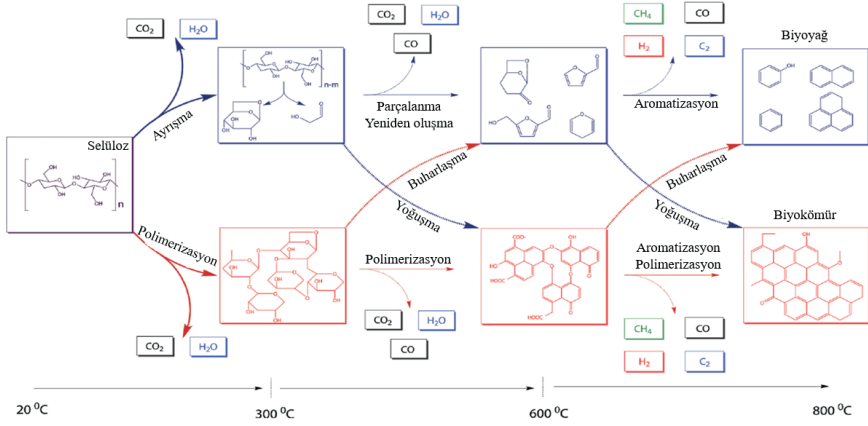
Yaygın plastikler arasında bulunan polipropilen (PP) ve polistiren (PS), minimum oksijen içeriğine sahip olefinlerden oluşan polihidrokarbon plastiklerdir. Bu plastikler, biyokütle ile kopoliz edildiğinde oksijenli fonksiyonel grupların ayrışmasında bozucu etki gösterir (He vd., 2023; Salvilla vd., 2020; Vural Gursel vd., 2021). Polyester plastikler ise Polibütlen tereftalat (PBT), Polietilen tereftalat (PET) ve Polikarbonat (PC) olarak sıralanabilir. PET'in biyokütle ile kopolizinde, PET'in ayrışması sonucu oluşan organik asitler biyokütleyle etkileşime girerek aromatik hidrokarbonların oluşunda etkin rol alabilmektedir (Al-Salem vd., 2017; Kumagai vd., 2019). PC ve lignin yapıları incelendiğinde, iki yapının da aromatik bir halka ve fenolik oluşum içeren kimyasal yapılara sahip olduğu görülmektedir. PC'nin biyokütle ile kopolizasyonu esnasında benzer yapı sebebiyle PC'nin biyokütledeki ligninle etkileşime girmesi muhtemeldir (E. Engamba vd., 2022). Biyokütle ve plastiklerin sahip oldukları karmaşık yapıları sebebiyle oluşabilecek reaksiyon ihtimalleri de bir hayli fazla ve karmaşık olmaktadır. Bu duruma örnek olarak bazı araştırmacılar PET'in biyokütle ile kopolizasyonu sırasında kömür üretimi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu öne sürerken, diğerleri ise tam tersi görüşü benimsemektedir (Kumagai vd., 2019; C. Li vd., 2022).

2. Biyokütle pirolizi

Biyokütlenin kimyasal yapısının temelde kompleks olduğu bilinmektedir.

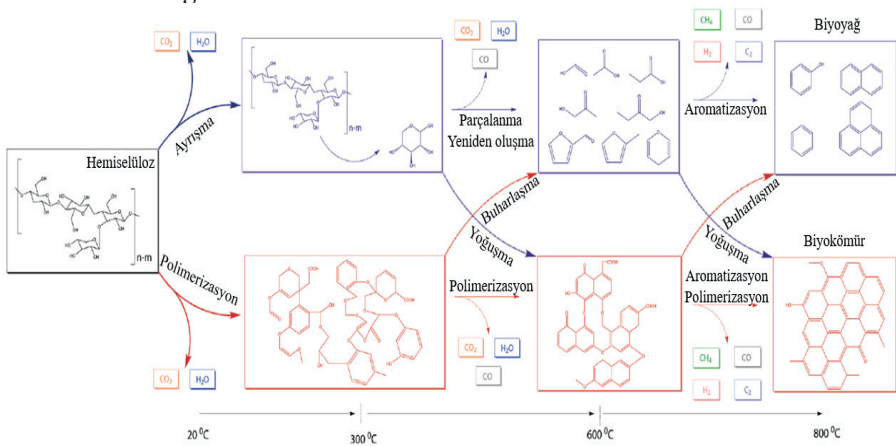
Lignoselülozik biyokütle, bitkilerin nişasta içermeyen ve fiber ya da lifli olarak adlandırılan bölümlerini ifade etmektedir. Ayrıca düşük molekül ağırlığına sahip kül ve ekstraktif maddelerde biyokütle içerisinde bulunmaktadır. Biyokütlerde bulunma miktarları yönünden değerlendirildiğinde temelde lignin, hemiselüloz ve selüloz lignoselülozik biyokütlenin 3 temel yapısını oluşturmaktadır. Biyokütlenin değişmesi yapıdaki bu 3 ana bileşenin dağılım miktarlarının da farklılık göstermesine sebep olmaktadır. Genel olarak bakıldığında biyokütle içerisinde hemiselüloz için %15-30, selüloz için %40 – 60, ve lignin için ise yaklaşık olarak %10-25 oranında bulunabilmektedir (Vigouroux ve Dissertation, 2001). Tarımsal kökenli ve otsu biyokütlerin içerdiği ekstraktif madde ve kül oranları odunsu biyokütlere kıyasla daha fazla olmaktadır. Ekstraktifler maddeler olarak tanımlanan bileşenler, bitkisel ve hayvansal dokularda bulunabilen protein, yağ, nişasta ve şeker gibi maddeleri ifade etmektedir. Kül ise biyokütlenin ihtiva ettiği inorganik bileşenler olarak söylenebilir. Bitkilerin hücre duvarlarında bulunan ve bitkiye yapısal dayanıklılık sağlayan bölümü ise selüloz, lignin ve hemiselüloz oluşturur (Shurong Wang vd., 2017). Bitkilerde bulunan nişasta ve karbonhidratlar insanların sindirebilmektedir. Fakat lignoselülozik yapıları insanlar kolaylıkla sindiremezler. Bitki ve odunsuların enerji kaynağı olarak kullanılması hususunda dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli nokta ise insanların besin zincirine zarar vermemesi ve desteklemesidir.

Odunsu biyokütlenin içinde kayda değer bir oranda selüloz bulunduğu için, bu bileşiğin biyokütlenin en önemli unsurlarından biri olduğu söylenebilir (Isahak vd., 2012). Doğada en yaygın bulunan organik bileşik olma niteliğine sahip olan selüloz, doğrusal bir polisakkarit olarak tanımlanabilir. Yapısında, D-glükopiranoz parçalarının birbirine bağlanmasıyla oluşan uzun zincirler yer alır (White vd., 2011). Şekil 3'te selülozun farklı sıcaklıklarda izlediği piroliz adımları gösterilmektedir. Selüloz, kristal ve amorf bölgeler içeren bir kimyasal yapıya sahip olup lifli bir form oluşturur. Bu lifli yapı, içerdiği hidrojen bağları sayesinde yüksek gerilme dayanımı sağlar. Bu durum, aynı zamanda çoğu çözücünün bu yapıyı çözmesini engeller (Anca-Couce, 2016). Selülozun yapısı, $(C_6H_{10}O_5)_n$ şeklinde ifade edilebilir (Tiftik, 2006).



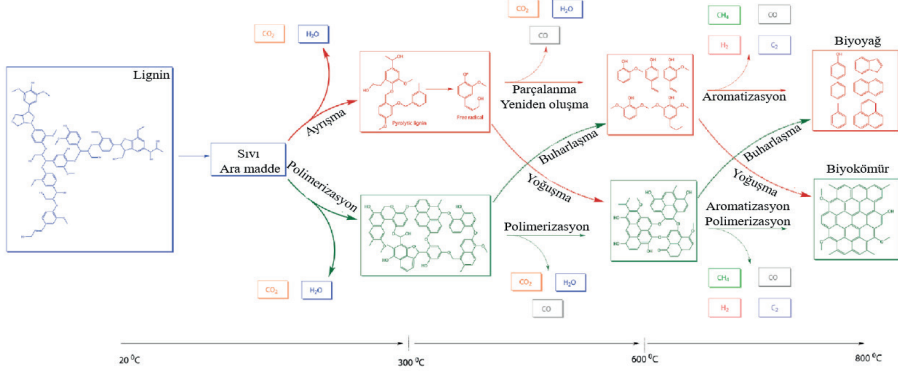
Şekil 3. Selülozun farklı sıcaklıklarda izlediği piroliz adımları (K N vd., 2022)

Hemiselüloz, kısa zincirli heteropolisakkaritlerin meydana getirdiği dallanmış ve düzensiz bir yapıya sahiptir. Selüloz liflerini ligninle sararak bir bağ oluşturur. Hemiselülozun bileşimi ve yapısında yer alan polisakkarit türleri, kaynak alındığı biyokütlenin türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Selüloz ile karşılaştırıldığında, hemiselülozun polimerizasyon derecesi (100–200) daha düşük olup, kimyasal yapısı $(C_5H_8O_4)_n$ genel formülü ile ifade edilebilir (Klass, 1998). Moleküler ağırlığı da selüloza göre daha düşük olan hemiselülozun yapısı, farklı biyokütle türlerine göre çeşitlilik göstermektedir. En yaygın olarak d-ksiloz bulunmakla birlikte, d-glikoz, d-glukuronik asit, d-galaktoz, d-mannoz ve l-arabinoz gibi basit şeker kalıntılarını da içermektedir. Hemiselüloz, baz veya seyreltilmiş asit kullanımı ile kolayca hidrolize edilebilmektedir (Basu, 2013). Şekil 4'te Hemiselülozun farklı sıcaklıklarda izlediği piroliz adımları gösterilmektedir.



Şekil 4. Hemiselülozun farklı sıcaklıklarda izlediği piroliz adımları (K N vd., 2022)

Bitkilerin liflerinin dış tabakalarında yer alarak yapısal sertlik sağlayan ve polisakkarit liflerini bir arada tutan lignin, hidroksil ve metoksi grupları içeren fenilpropan birimlerinden oluşan, rastgele varyasyonlara sahip, aromatik, üç boyutlu ve polifenolik bir yapıdır. Hemiselüloz ve selüloz arasında yer alarak hücre duvarında bağlayıcı bir işlev üstlenmektedir. Ligninin iç yapısı, biyokütlenin türüne bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Sert odunsu biyokütlelerde lignin oranı genellikle %16 - %25 arasında değişirken, yumuşak odunsu biyokütlelerde bu oran %23 - %33 aralığında gözlemlenir. Lignoselülozik biyokütlelerde ise bu değer %40'a kadar çıkabilmektedir (Dhyani ve Bhaskar, 2017; Triantafyllidis vd., 2013). Şekil 5'te ligninin farklı sıcaklıklarda izlediği piroliz adımları gösterilmektedir. Diğer polisakkaritlerden farklı olarak, ligninin hidrofobik özelliği, odunsu yapılara yalnızca sertlik kazandırmakla kalmaz, aynı zamanda su geçirmezlik gibi önemli bir avantaj da sağlar (Tiftik, 2006).



Şekil 5. Ligninin farklı sıcaklıklarda izlediği piroliz adımları (K N vd., 2022)

Biyokütlenin piroliz süreci, birbirine geçişkenlik gösteren dört temel aşamadan meydana gelmektedir. Bu aşamalar, birbiri ardına gerçekleşiyor gibi görünse de bir süreç devam ederken diğer süreç başlayabilir. Söz konusu aşamalar kuruma, başlangıç, orta ve son aşama olarak adlandırılabilir.

Kuruma aşaması genellikle 100 °C civarında gerçekleşir. Biyokütlenin ısıtılmasıyla birlikte bu aşamada nem ve gevşek bağlı su ortamı terk eder. Serbest nem buharlaştıktan sonra, ısı biyokütlenin iç kısımlarına doğru yayılmaya devam eder. Ancak yapıda yüksek miktarda nem bulunması durumunda, bu nem, yapıda yer alan linyitik fraksiyonların erimesine katkı sağlayabilir. Bu durum, ahşap malzemelere şekil vermek amacıyla mobilya sektöründe buharlı ortamda uygulanan ısıtma işlemi hatırlatmaktadır (Diebold ve Bridgewater, 1997).

Başlangıç aşaması 100-300 °C sıcaklık aralığında meydana gelir. Bu aşamada biyokütlerde egzotermik dehidrasyon gözlemlenirken suyun yanı sıra CO ve CO₂ gibi düşük moleküler ağırlıklı gazların salınımı gerçekleşir. 200 °C'ye ulaşıldığında, aşamalar arasındaki geçişkenlik nedeniyle orta aşama başlar. Bu aşamanın net bir bitiş sıcaklığı bulunmamakla birlikte, 600 °C genellikle son

sıcaklık olarak kabul edilmektedir. Birincil piroliz bu aşamada gerçekleşir ve biyokütledeki büyük moleküller parçalanarak birincil kömür, yoğunlaşabilir gazlar ve yoğunlaşamayan gazlar gibi ürünlere dönüşür (Mohan vd., 2006).

Son aşamada ise sıcaklık aralığı 300-900 °C arasında değişir. Bu aşamada ikincil parçalanmalar meydana gelir ve piroliz sonucu oluşan buharın bekleme süresi kritik öneme sahiptir. Yoğunlaşabilir, yüksek moleküler ağırlıklı gazlar bu aşamada uzun süre kalırsa, daha düşük moleküler ağırlıklı bileşenlere dönüşerek yoğunlaşamayan gaz ve ikincil kömür ürünlerini oluşturur. Ancak buharın bekleme süresi kısa tutulduğunda, makul seviyede parçalanma gerçekleşir ve sıvı ürün miktarı artar (Lewandowski vd., 2020).

Sıcaklık, piroliz ürünlerinin oluşumunda belirleyici bir etkidir. Düşük sıcaklıklarda CO₂ üretimi artış gösterirken sıcaklık yükseldiğinde bu miktar azalır. Hidrokarbonlar açısından ise 450-500 °C aralığında maksimum seviyeye ulaşılır, ancak sıcaklık arttıkça bu miktar azalma eğilimine girer. Hidrokarbonların azalması, yapının parçalanma oranındaki artıştan kaynaklanır ve bu durum hidrojen üretimini artırıcı bir etki yaratır. Ayrıca, sıcaklık artışı biyokömür üretimini de artırır. Biyokömür, katalitik bir etkiye sahip olduğu için piroliz buharının reaktör içerisinde beklemesi ve biyokömür ile katalize edilmesi sonucunda ikincil parçalanmaların oluşması beklenebilir (Basu, 2013).

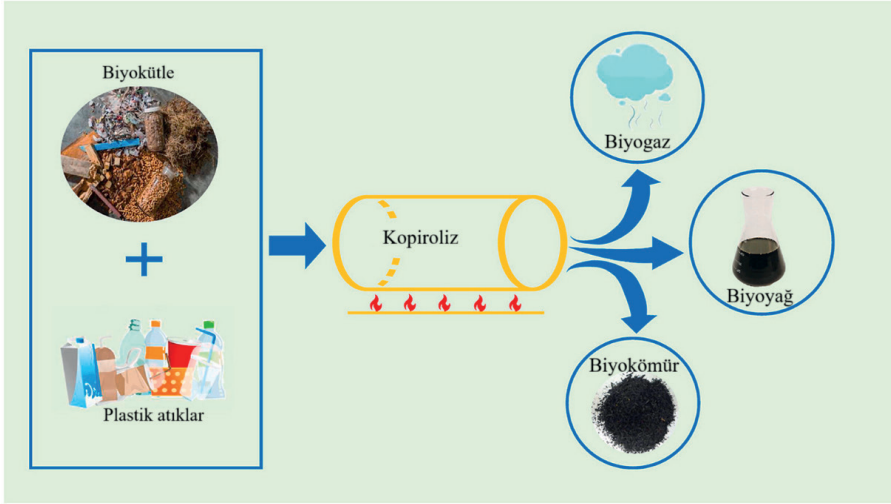
3. Plastik pirolizi

Plastik piroliz sırasında, uzun zincirli polimerler yapılar daha küçük fraksiyonlara ayrılır. Piroliz sonucu ortaya çıkan biyoyağlar ve biyogazlar hem yakıt hem de kimyasal olarak oldukça değerlidir (Kunwar vd., 2016; Santos vd., 2019). Herhangi bir katalizör kullanılmadan, PP ve PE'nin 500–600 °C'de gerçekleştirilen pirolizi sonucunda oda sıcaklığında katı bir mum ürünü olarak da ifade edilebilen C₂₀₊ hidrokarbonlar üretilmektedir (Elordi vd., 2011). Daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen piroliz sonucunda ise farklı karbon sayısına sahip ürünler oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıkta piroliz sonucunda genellikle C₁–C₄ karbon aralığında olefin karışımları, C₅–C₂₀ karbon aralığında olefinler ve az miktarda aromatiklerden oluşan gaz ve petrol ürünlerinin oluşumu gözlemlenir (Elordi vd., 2011). Bu duruma bir örnek olarak PE'nin piroliz edilmesi sonucunda, C₁–C₄ arasında gaz ürünler, C₅–C₁₀ arasında aromatik olmayan hidrokarbonlar, mono-aromatikler ve C₁₁'den daha büyük mumsu yapılar oluşmaktadır. Mum verimi sıcaklığın artmasıyla azalma gösterirken, gaz ürün veriminde önemli ölçüde artış gözlemlenir. Daha yüksek sıcaklıklarda yapılan piroliz çalışmalarının aromatiklerin oluşumunu nispeten kolaylaştırabileceği yorumu yapılabilir (S. Kumar vd., 2011; Ueno vd., 2010). Aromatik monomerler çoğunlukla, iki aromatik halka arasında bulunan C–C karbon bağlarının kırılması sonucu terminal aromatik halkanın düştüğü fermuar açma reaksiyonu yoluyla üretilmektedir. Molekül içi hidrojen transferi ve ardından oluşan kopma, aromatik dimerlerin oluşumunda oldukça etkilidir. Ancak, moleküller

arası hidrojen transferi ve ardından kopma, üç veya daha fazla aromatik halka içeren daha büyük bir molekül oluşturur. Bunun yanı sıra, monomer rekombinasyonu veya moleküller arası benzil radikal eklenmesi ve ardından gerçekleşen kopma neticesinde aromatik dimerler ve trimerler oluşturulabilmektedir (Dean vd., 1989; Ohtani vd., 1990). PVC tamamen farklı diğer plastiklere göre farklıdır. Bunun sebebi katalizörler olmadan gerçekleştirilen PVC pirolizi ile, mum yerine polisiklik aromatik hidrokarbonlardan (PAH'lar) oluşan yüksek verimli biyoyağlar elde edebilir (Gui vd., 2013). PVC pirolizi yaygın olarak üç aşamalı bir mekanizma ile açıklanır. Birinci mekanizmada iç siklizasyonla birlikte klor giderme; ikinci mekanizmada aromatik zincir kesilmesi; üçüncü mekanizmada ise 2–4 halka aromatiklerinin salınımı olarak söylenebilir (Lange vd., 2013; Zhou vd., 2016). PET pirolizinin ana termal bozunma yolu kopma ve retro-hidroalkoksilasyonu olarak söylenebilir. O-C bağının ayrılması ve bir β -H atomunun karbonil O'ya aktarılabilmesi ile benzoik asit ve vinilik ürünler oluştuğu söylenebilir (Levchik ve Weil, 2004) (Samperi vd., 2004). Ayrıca, büyük miktarda CO₂, CO ve etilen üretmek için ester gruplarının serbest bıraktığı bazı çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile doğrulanmaktadır (Artetxe vd., 2010).

4. Biyokütle ve Plastiklerin Kopiolizi

Biyokütle ve plastiklerin kopiolizi konusunda yapılan araştırmalarda, biyokütle ve plastik kopioliz işleminin mekanizmasını ortaya çıkarmak için kinetik analizler uygulanmıştır. Biyokütle ve PVC'nin kopioliz işlemi üç adıma ayrılabilir ve plastiklerin bozunması için aktivasyon enerjileri biyokütleninkine kıyasla daha yüksektir. Çam ağacının PP veya PET ile piroliz sürecini kinetik analizlerle incelendiği bir çalışmada, plastiklerin biyokütlenin çatlama mekanizmasında bant genişliğini artırırken aktivasyon enerjisini azalttığını tespit edilmiştir (Burra ve Gupta, 2018). Çam talaşı ile plastiklerin (PP, PET, HDPE gibi) kopiolizi kinetik analizler ile değerlendirilmiş; simülasyon ve deneyin uyumlu olduğu, ayrıca biyokütle ile plastikler arasında hafif etkileşimlerin mevcut olduğu gösterilmiştir. Tütünün PP veya PVC ile piroliz sürecinin incelendiği çalışmada ise biyokütle ile PVC arasındaki etkileşimlerin kopioliz sürecinde daha az enerji gereksinimi sağladığını belirlenmiştir (R. Chen vd., 2019). Ayrıca, tütün ve PP kopiolizinde, aktivasyon enerjisinin tütün pirolizine kıyasla %22 oranında azaldığı görülmüştür.



Şekil 6. Biyokütle ve plastik atıkların kopirolizasyonu

Selüloz veya çam talaşının LDPE ile kopiroliz sürecinin araştırıldığı bir çalışmada, özellikle kömür yatağındaki uçucu bileşiklerin reaksiyonunda, hammaddelerin etkileşimleri sonucu pozitif sinerji etkileri tespit edilmiştir (Zheng vd., 2018). Yüksek sıcaklıkta, LDPE eriyerek biyokütle parçacıklarını kaplamakta ve biyokütle önce ayrılarak radikaller üretmekte, ardından bu radikaller LDPE ile reaksiyona girerek uçucu kimyasallar oluşturmaktadır. Daha sonra LDPE, biyokütlenin kaplamasını kırarak ek uçucu bileşiklerin serbest kalmasını sağlamaktadır. Bu süreç, sinerji etkilerinin temel mekanizmasıdır. Isıtma sırasında, biyokütleden üretilen kömür, plastik pirolizi sonucu oluşan buharları kataliz etmekte; yoğunlaşma aşamasında ise biyokütle kaynaklı biyoyağ, plastikten gelen gazların sıvı faz ürünlerine dönüşümünü kolaylaştırmaktadır (Gunasee vd., 2017).

PE, PP, PS, PVC ve PET'in selüloz pirolizi üzerindeki etkilerinin incelenmesi sonucunda sinerjik etkilerin şu beş mekanizma ile özetlenebileceğini belirlenmiştir (Kumagai vd., 2019). Bu mekanizmalar:

- 1) Levoglukozanın (gaz fazı) kömüre dönüşümünü sınırlamak.
- 2) Plastiklerden hidrojen soyutlanması yoluyla levoglukozan üretimini artırmak.
- 3) Plastiklerin düşük moleküler ağırlıklı bileşiklere bozunma sürecini hızlandırmak.
- 4) Levoglukozanın levoglukozenona dönüşümünü kolaylaştırmak.
- 5) PET veya PVC ile kopiroliz sırasında selülözün kömürleşme verimini artırmak.

Plastiklerin sıvı üretimini artırırken katı üretimini azalttığı, gaz analizi sonuçlarında ise tüm plastiklerin C_1 - C_4 hidrokarbonlarının verimini artırdığı görülmüştür. Sıvı ürünler, levoglukoza, levoglukozenon, anhidroşekerler, C_2 - C_4 karbonil bileşikler, beş üyeli halkalar, C_{5+} alifatik hidrokarbonlar, monosiklik aromatik hidrokarbonlar, polisiklik aromatik hidrokarbonlar, O içeren aromatikler ve C_1 içeren aromatikler gibi on kategoriye ayrılmıştır. Tüm plastikler levoglukoza üretimini artırırken PVC bu eğilimi göstermemiştir. HDPE ve gazetenin kopirolizinde ise, hammaddeler arası reaksiyon olmadığı sonucuna varılmıştır (W. Chen vd., 2016).

Biyokütle ve plastik kopirolizi sırasında aktivasyon enerjisi, makromoleküllerin parçalanmasını kolaylaştırarak önemli ölçüde azalır. Isıl kararlılıktaki farklılıklar nedeniyle, biyokütle önce ayrılmakta ve ürettiği radikaller ile kömür, plastik pirolizini teşvik etmektedir. Plastik eriyerek biyokütle parçacıklarını kaplamakta ve kütle ile enerji aktarımını kolaylaştırarak sinerjik etkiler sağlamaktadır.

5. Sonuçlar

Biyokütle ve plastiklerin kopiroliz süreci, atık yönetimi ve enerji üretimi konularında hem çevresel hem de ekonomik avantajlar sunan yenilikçi bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Biyokütle ve plastiklerin kopirolizinin enerji verimliliği ve atık azaltımı bağlamında önemli bir potansiyele sahiptir. Biyokütlenin temel bileşenleri olan selüloz, hemiselüloz ve lignin, piroliz ürünlerinin özelliklerini ve verimini belirleyen kritik unsurlardır. Selülozun yüksek sıvı ürün verimi, hemiselülözün gaz ürün üretimi ve ligninin biyokömür verimi üzerinde etkili olmaktadır. Piroliz sürecinde her bir bileşenin etkisi, sıcaklık ve diğer işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Plastiklerin kopirolize dahil edilmesi, biyokütleye kıyasla daha yüksek hidrojen oranı ve düşük oksijen içeriği sayesinde piroliz ürünlerinin kalite ve veriminde önemli bir iyileşme sağlamaktadır. Özellikle, polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) gibi plastiklerin biyokütle ile birlikte pirolizi sırasında sinerjik etkiler oluşmaktadır.

Piroliz sürecinde sıcaklık, en önemli parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Düşük sıcaklıklarda CO_2 üretiminin artışı gözlemlenirken, yüksek sıcaklıklar hidrojen ve hidrokarbon üretimini artırarak biyoyakıt verimliliğini artırmaktadır. Plastiklerin yüksek sıcaklıklarda eriyerek biyokütle parçacıklarını kaplaması, kütle ve enerji transferini kolaylaştırarak uçucu bileşiklerin üretimini desteklemektedir. Ayrıca, biyokütle tarafından üretilen radikallerin plastiklerin ayrışmasını teşvik ettiği ve bu süreçte biyokömürün katalitik bir rol oynadığı görülmektedir. Plastiklerin kopiroliz sürecindeki etkileri, plastik türüne göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, PP ve PE gibi poliolefinler, hidrokarbon üretimini artırırken oksijenli fonksiyonel grupların parçalanmasını hızlandırmaktadır. PET ve PVC gibi polyesterler, aromatik hidrokarbon-

ların oluşumunda etkin bir rol oynamaktadır. Ancak, plastiklerin yapısal çeşitliliği, piroliz sürecindeki etkileşimleri karmaşık hale getirebilmektedir. Bazı çalışmalar, PET'in biyokütle ile kopiroliz sırasında kömür üretimini olumsuz etkilediğini öne sürerken, diğer araştırmalar bu etkinin pozitif olabileceğini belirtmektedir.

Biyokütle ve plastiklerin kopirolizinden elde edilen ürünlerin enerji potansiyeli ve uygulama alanları geniş bir yelpazeye sahiptir. Biyokütle ve plastik kopirolizi sırasında üretilen biyoyağlar, fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılabilirken, biyokömür ve biyogaz gibi ürünler enerji üretiminde değerlendirilebilmektedir. Kopiroliz sürecinde elde edilen ürünlerin kalitesi, işlem parametrelerinin optimize edilmesiyle artırılabilir. Özellikle, biyoyağların oksijen içeriğinin azaltılması ve hidrojen oranının artırılması, bu ürünlerin yakıt kalitesini iyileştirmektedir. Kopiroliz sürecinin enerji üretiminde sürdürülebilir bir çözüm sunmasının yanı sıra, çevresel etkileri azaltma potansiyeli de büyüktür. Plastik atıkların geri dönüşüm oranlarının düşük olduğu göz önüne alındığında, bu yöntem, plastiklerin yeniden kullanımını artırarak çevresel kirliliği azaltabilir. Benzer şekilde, tarımsal biyokütle atıklarının enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi, atık yönetimi ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak, biyokütle ve plastiklerin kopirolizi, sürdürülebilir enerji üretimi ve atık yönetimi için umut vadeden bir yöntemdir. Bu sürecin hem akademik hem de endüstriyel alanda daha fazla araştırılmasının gerekli olduğu aşikardır. İlerleyen dönemde, farklı plastik ve biyokütle türlerinin etkileşimlerini anlamak, bu süreçlerin optimize edilmesi ve yaygınlaştırılması için önem taşımaktadır. Enerji dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, bu yöntemin küresel ölçekte daha geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlayabilir.

Kaynaklar

- Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., ve Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management*, 197, 177-198. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- Alonso, D. M., Wettstein, S. G., ve Dumesic, J. A. (2012). Bimetallic catalysts for upgrading of biomass to fuels and chemicals. *Chemical Society reviews*, 41 24, 8075-8098.
- Anca-Couce, A. (2016). Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 53, 41-79. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.10.002>
- Artetxe, M., Lopez, G., Amutio, M., Elordi, G., Olazar, M., ve Bilbao, J. (2010). Operating Conditions for the Pyrolysis of Poly-(ethylene terephthalate) in a Conical Spouted-Bed Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(5), 2064-2069. doi:10.1021/ie900557c
- Basu, P. (2013). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, 1-530.
- Burra, K. G., ve Gupta, A. K. (2018). Kinetics of synergistic effects in co-pyrolysis of biomass with plastic wastes. *Applied Energy*, 220, 408-418. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.117>
- Cai, W., Liu, R., He, Y., Meiyun, C., ve Cai, J. (2018). Bio-oil production from fast pyrolysis of rice husk in a commercial-scale plant with a downdraft circulating fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 171, 308-317. doi:10.1016/j.fuproc.2017.12.001
- Chen, R., Zhang, J., Lun, L., Li, Q., ve Zhang, Y. (2019). Comparative study on synergistic effects in co-pyrolysis of tobacco stalk with polymer wastes: Thermal behavior, gas formation, and kinetics. *Bioresource Technology*, 292, 121970. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121970>
- Chen, W., Shi, S., Zhang, J., Chen, M., ve Zhou, X. (2016). Co-pyrolysis of waste newspaper with high-density polyethylene: Synergistic effect and oil characterization. *Energy Conversion and Management*, 112, 41-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.005>
- Cui, Y., Zhang, Y., Cui, L., Liu, Y., Li, B.-X., ve Liu, W. (2023). Microwave-assisted pyrolysis of polypropylene plastic for liquid oil production. *Journal of Cleaner Production*, 411, 137303. doi:10.1016/j.jclepro.2023.137303
- Dahmen, N., Lewandowski, I., Zibek, S., ve Weidtmann, A. (2019). Integrated lignocellulosic value chains in a growing bioeconomy: Status quo and perspectives. *GCB Bioenergy*, 11. doi:10.1111/gcbb.12586
- Dai, L., Zhou, N., Lv, Y., Cheng, Y., Wang, Y., Liu, Y., . . . Ruan, R. (2022). Pyrolysis technology for plastic waste recycling: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 93, 101021. doi:10.1016/j.pecs.2022.101021

- Dean, L., Groves, S., Hancox, R., Lamb, G., ve Lehrle, R. S. (1989). Pyrolysis-GC and MS applied to study oligomer formation in the degradation of polystyrene and styrene copolymers. *Polymer Degradation and Stability*, 25(2), 143-160. doi:[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(89\)81005-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(89)81005-5)
- Dhyani, V., ve Bhaskar, T. (2017). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 129. doi:10.1016/j.renene.2017.04.035
- Diebold, J., ve Bridgwater, T. (1997). Overview of Fast Pyrolysis of Biomass for the Production of Liquid Fuels. In (pp. 5-23).
- E. Engamba, S., Xiong, Z., Chaiwat, W., Kamara, M., Longfei, X., Jun, X., . . . Xiang, J. (2022). Review on synergistic effects during co-pyrolysis of biomass and plastic waste: Significance of operating conditions and interaction mechanism. *Biomass and Bioenergy*, 159, 106415. doi:10.1016/j.biombioe.2022.106415
- Elordi, G., Olazar, M., Lopez, G., Artetxe, M., ve Bilbao, J. (2011). Product Yields and Compositions in the Continuous Pyrolysis of High-Density Polyethylene in a Conical Spouted Bed Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(11), 6650-6659. doi:10.1021/ie200186m
- Fu, J., Wu, X., Liu, J., Evrendilek, F., Chen, T., Xie, W., . . . He, Y. (2023). Co-circularity of spent coffee grounds and polyethylene via co-pyrolysis: Characteristics, kinetics, and products. *Fuel*, 337, 127061. doi:10.1016/j.fuel.2022.127061
- Gui, B., Qiao, Y., Wan, D., Liu, S., Han, Z., Yao, H., ve Xu, M. (2013). Nascent tar formation during polyvinylchloride (PVC) pyrolysis. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2), 2321-2329. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.08.013>
- Gunasee, S., Danon, B., Görgens, J., ve Mohee, R. (2017). Co-Pyrolysis of LDPE and Cellulose: Synergies during devolatilization and condensation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126. doi:10.1016/j.jaap.2017.05.016
- Hassan, H., Lim, J. K., ve Hameed, B. H. (2016). Recent progress on biomass co-pyrolysis conversion into high-quality bio-oil. *Bioresour. Technology*, 221, 645-655. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.026>
- He, B., Yu, Y., Gong, X., Liu, S., Tian, H., ve Leng, E. (2023). Mechanism of acid-catalyzed pyrolysis of levoglucosan: Formation of anhydro-disaccharides. *Fuel*, 345, 128242. doi:10.1016/j.fuel.2023.128242
- Hossain, R., Islam, M. T., Ghose, A., ve Sahajwalla, V. (2022). Full circle: Challenges and prospects for plastic waste management in Australia to achieve circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133127>
- Isahak, W. N. R. W., Hisham, M. W. M., Yarmo, M. A., ve Yun Hin, T.-y. (2012). A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5910-5923. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.039>
- Jaafar, Y., Abdelouahed, L., El hage, R., El Samrani, A., ve Taouk, B. (2021). Pyrolysis of common plastics and their mixtures to produce valuable petroleum-like

- products. *Polymer Degradation and Stability*, 195, 109770. doi:10.1016/j.polym-degradstab.2021.109770
- K N, Y., T, P. D., P, S., S, K., R, Y. K., Varjani, S., . . . J, R. B. (2022). Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. *Chemosphere*, 286, 131824. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131824>
- Khosravanipour, A., Solomatnikova, O., Drogui, P., ve Tyagi, R. (2018). A review of recent research and developments in fast pyrolysis and bio-oil upgrading. *Bio-mass Conversion and Biorefinery*, 8. doi:10.1007/s13399-018-0320-z
- Klass, D. L. (1998). *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. San Diego: Academic Press.
- Kumagai, S., Yamamoto, M., Takahashi, Y., Kameda, T., Saito, Y., ve Yoshioka, T. (2019). Impact of Common Plastics on Cellulose Pyrolysis. *Energy & Fuels*, 33(7), 6837-6841. doi:10.1021/acs.energyfuels.9b01376
- Kumar, R., Strezov, V., Weldekidan, H., He, J., Singh, S., Kan, T., ve Dastjerdi, B. (2020). Lignocellulose biomass pyrolysis for bio-oil production: A review of biomass pre-treatment methods for production of drop-in fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, 109763. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109763>
- Kumar, S., Panda, A. K., ve Singh, R. K. (2011). A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 893-910. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.005>
- Kunwar, B., Cheng, H. N., Chandrashekar, S. R., ve Sharma, B. K. (2016). Plastics to fuel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 421-428. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.015>
- Lange, H., Decina, S., ve Crestini, C. (2013). Oxidative upgrade of lignin – Recent routes reviewed. *European Polymer Journal*, 49(6), 1151-1173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.03.002>
- Lee, H., Kim, K. O., Jeong, Y., Lee, S., Jang, B., ve Kim, T. (2016). Clinical Outcomes in Hospitalized Patients with Clostridium difficile Infection by Age Group. *The Korean Journal of Gastroenterology*, 67, 81. doi:10.4166/kjg.2016.67.2.81
- Lee, H. W., Kim, Y.-M., Lee, B., Kim, S., Jae, J., Jung, S.-C., . . . Park, Y.-K. (2018). Catalytic copyrolysis of torrefied cork oak and high density polyethylene over a mesoporous HY catalyst. *Catalysis Today*, 307, 301-307. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.01.036>
- Levchik, S., ve Weil, E. (2004). A review on thermal decomposition and combustion of thermoplastic polyesters. *Polymers for Advanced Technologies*, 15, 691-700. doi:10.1002/pat.526
- Lewandowski, W., Ryms, M., ve Kosakowski, W. (2020). Thermal Biomass Conversion: A Review. *Processes*, 8, 516. doi:10.3390/pr8050516
- Li, C., Sun, Y., Li, Q., Zhang, L., Zhang, S., Wang, H., . . . Hu, X. (2022). Effects of volatiles on properties of char during sequential pyrolysis of PET and cellulose.

Renewable Energy, 189. doi:10.1016/j.renene.2022.02.091

- Li, Y., Huang, S., Wang, Q., Li, H., Zhang, Q., Wang, H., . . . Gao, J. (2019). Hydrogen transfer route and interaction mechanism during co-pyrolysis of Xilin-hot lignite and rice husk. *Fuel Processing Technology*, 192, 13-20. doi:10.1016/j.fuproc.2019.04.022
- Mohan, D., Pittman, C. U., Jr., ve Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848-889. doi:10.1021/ef0502397
- Nanduri, A., Kulkarni, S. S., ve Mills, P. L. (2021). Experimental techniques to gain mechanistic insight into fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111262. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111262>
- Nardella, F., Bellavia, S., Mattonai, M., ve Ribechini, E. (2022). Co-pyrolysis of biomass and plastic: Synergistic effects and estimation of elemental composition of pyrolysis oil by analytical pyrolysis–gas chromatography/mass spectrometry. *Bioresource Technology*, 354, 127170. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127170>
- Ohtani, H., Yuyama, T., Tsuge, S., Plage, B., ve Schulten, H. R. (1990). Study on thermal degradation of polystyrenes by pyrolysis-gas chromatography and pyrolysis-field ionization mass spectrometry. *European Polymer Journal*, 26(8), 893-899. doi:[https://doi.org/10.1016/0014-3057\(90\)90164-Y](https://doi.org/10.1016/0014-3057(90)90164-Y)
- Önal, E., Uzun, B. B., ve Pütün, A. E. (2014). Bio-oil production via co-pyrolysis of almond shell as biomass and high density polyethylene. *Energy Conversion and Management*, 78, 704-710. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.022>
- Patil, V., Adhikari, S., ve Cross, P. (2018). Co-pyrolysis of lignin and plastics using red clay as catalyst in a micro-pyrolyzer. *Bioresource Technology*, 270, 311-319. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.034>
- Priya, A., Anusha, G., Thanigaivel, S., Karthick, A., Mohanavel, V., Velmurugan, P., . . . Chelliapan, S. (2023). Removing microplastics from wastewater using leading-edge treatment technologies: a solution to microplastic pollution—a review. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 46(3), 309-321. doi:10.1007/s00449-022-02715-x
- Rhodes, C. J. (2019). Solving the plastic problem: From cradle to grave, to reincarnation. *Sci Prog*, 102(3), 218-248. doi:10.1177/0036850419867204
- Salvilla, J. N., Ofrasio, B. I., Rollon, A., Manegdeg, F., Abarca, R. R., ve De Luna, M. D. (2020). Synergistic co-pyrolysis of polyolefin plastics with wood and agricultural wastes for biofuel production. *Applied Energy*, 279, 115668. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115668
- Samperi, F., Puglisi, C., Alicata, R., ve Montaudo, G. (2004). Thermal degradation of poly(ethylene terephthalate) at the processing temperature. *Polymer Degradation and Stability*, 83(1), 3-10. doi:[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00166-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00166-6)

- Santos, E., Rijo, B., Lemos, F., ve Lemos, M. A. N. D. A. (2019). A catalytic reactive distillation approach to high density polyethylene pyrolysis – Part 1 – Light olefin production. *Chemical Engineering Journal*, 378, 122077. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122077>
- Shafaghat, H., Lee, H. W., Yang, L., Oh, D., Jung, S.-C., Rhee, G., . . . Park, Y.-K. (2019). Catalytic co-conversion of Kraft lignin and linear low-density polyethylene over mesoZSM-5 and Al-SBA-15 catalysts. *Catalysis Today*, 355. doi:10.1016/j.cattod.2019.04.052
- Thahir, R., Irwan, M., Alwathan, A., ve Ramli, R. (2021). Effect of temperature on the pyrolysis of plastic waste using zeolite ZSM-5 using a refinery distillation bubble cap plate column. *Results in Engineering*, 11, 100231. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100231>
- Tiftik, B. E. (2006). *Çay fabrikası atığının pirolizi ve piroliz ürünlerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans). Ankara University,
- Triantafyllidis, K., Lappas, A. A., ve Stöcker, M. (2013). The Role of Catalysis for the Sustainable Production of Bio-fuels and Bio-chemicals. 1-594.
- Tripathi, N., Hills, C. D., Singh, R. S., ve Atkinson, C. J. (2019). Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 35. doi:10.1038/s41612-019-0093-5
- Ueno, T., Nakashima, E., ve Takeda, K. (2010). Quantitative analysis of random scission and chain-end scission in the thermal degradation of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 95(9), 1862-1869. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.04.020>
- Uzoejinwa, B., He, X., Wang, S., Abomohra, A., Hu, Y., ve Wang, Q. (2018). Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. *Energy Conversion and Management*, 163, 468-492. doi:10.1016/j.enconman.2018.02.004
- Vigouroux, R., ve Dissertation, V. (2001). *PYROLYSIS OF BIOMASS. Rapid Pyrolysis at High Temperature. Slow Pyrolysis for Active Carbon Preparation*.
- Vural Gursel, I., Moretti, C., Hamelin, L., Jakobsen, L. G., Steingrimsdottir, M. M., Junginger, M., . . . Shen, L. (2021). Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of bio-based and petrochemical PET bottles. *Science of The Total Environment*, 793, 148642. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148642>
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., ve Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>
- Wang, S., Zhao, S., Uzoejinwa, B. B., Zheng, A., Wang, Q., Huang, J., ve Abomohra, A. E.-F. (2020). A state-of-the-art review on dual purpose seaweeds utilization for wastewater treatment and crude bio-oil production. *Energy Conversion and Management*, 222, 113253. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113253>

- Wang, Z., Burra, K., Lei, T., ve Gupta, A. (2021). Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 84, 100899. doi:10.1016/j.pecs.2020.100899
- White, J. E., Catallo, W. J., ve Legendre, B. L. (2011). Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91(1), 1-33. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.01.004>
- Zheng, Y., Tao, L., Yang, X., Huang, Y., Liu, C., ve Zheng, Z. (2018). Study of the thermal behavior, kinetics, and product characterization of biomass and low-density polyethylene co-pyrolysis by thermogravimetric analysis and pyrolysis-GC/MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 133. doi:10.1016/j.jaap.2018.04.001
- Zhou, J., Gui, B., Qiao, Y., Zhang, J., Wang, W., Yao, H., . . . Xu, M. (2016). Understanding the pyrolysis mechanism of polyvinylchloride (PVC) by characterizing the chars produced in a wire-mesh reactor. *Fuel*, 166, 526-532. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.034>

BÖLÜM 3

YÜKSEK ENTROPİ ALAŞIMLARI: YAPI-ÖZELLİKLER VE TÜRKİYE'DEKİ ÇALIŞMALAR

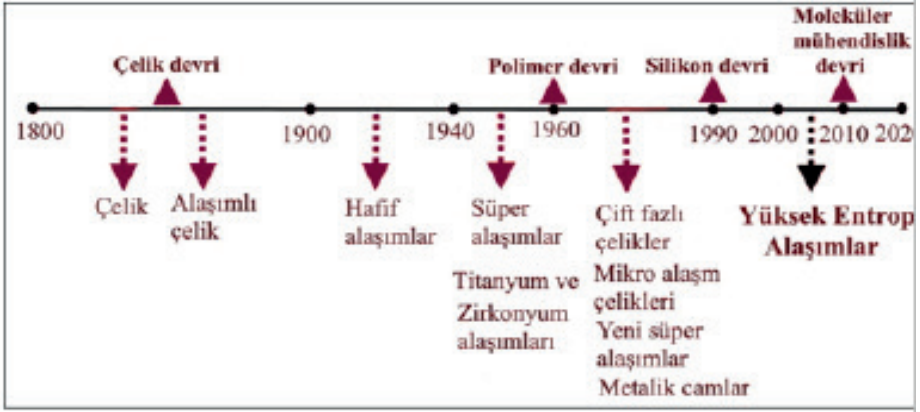
Caner Bulut¹

¹ Öğr. Gör. Dr., Iğdır Üniversitesi, TBMYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Bölümü,
Otomotiv Teknolojisi, caner.bulut@igdir.edu.tr, 0000-0001-5421-300X

1. Giriş

Alaşımlama, insanlık tarihinin başlangıcından günümüze kadar sürekli olarak gelişen metalurji ve malzeme biliminin en önemli kazanımlarından biridir. Bu süreçte yeni metal ve alaşım malzemelerinin keşfi büyük bir rol oynamıştır. Alaşımların yapıları, özellikleri ve performansları sanayinin ilerlemesine ve dolayısıyla toplumların gelişmesine önemli katkılar sağlamıştır. Örneğin paslanmaz çelikler, süper alaşımlar, bakır, nikel, titanyum ve magnezyum alaşımları gibi malzemeler zaman içinde geliştirilen önemli malzeme gruplarındandır. Alaşım, en az bir metal element içeren iki veya daha fazla elementin birleşerek metalik özellikler taşıyan bir malzeme oluşturması olarak tanımlanır. Bir alaşım sistemi, tüm kimyasal bileşim kombinasyonlarını kapsar; iki elementten oluşan sistemler “ikili alaşım sistemi”, üç elementten oluşanlar ise “üçlü alaşım sistemi” olarak adlandırılır. Yaygın olarak bilinen 45 metal, 990 farklı ikili sistem ve 14.000’e yakın üçlü sistem oluşturabilir. Ayrıca, kimyasal bileşim oranı %1 oranında değiştirildiğinde, her bir ikili sistemden 100 farklı alaşım oluşturulabilir (Habashi 2008; Savaşkan 2009).

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan metaller genellikle saf formlarında değil, alaşımlar halinde bulunmaktadır. Metal işleme sürecinin eriyik hâlinde istenilen özellikleri elde edebilmek için ana metalin içine bir veya daha fazla alaşım elementi eklenmektedir. Bu karışım, katılaşma sırasında saf metalden farklı bir yapının oluşmasına neden olmaktadır (Karaaslan 2010). Yüzyıllar süren geleneksel ve özel alaşımların gelişiminde etkili olan alaşım tasarımı, üretimi ve seçimi, genellikle bir ana element veya tek bileşen yaklaşımına dayanmaktadır. Bu anlayış pek çok mühendislik uygulamasında kullanılan alaşım sistemlerinin oluşmasını sağlamıştır. Yüksek sıcaklık nikel süper alaşımları, dövme alüminyum alaşımları ve korozyona dayanıklı paslanmaz çelikler gibi çalışma koşullarında arzu edilen özellikleri dengeleyerek sağlayabilen başarılı alaşımların geliştirilmesi, bu tür uygulamalara örnek teşkil etmektedir. Ancak bir ana bileşen konsepti üzerine kurulu bu yaklaşımlar alaşımların kimyasal bileşenlerini sınırlayabilir ve istenilen mikroyapı ile özelliklerin elde edilmesinde bazı zorluklar oluşturabilir (Murty et al. 2019). Şekil 1.1’de, metalik malzemelerin tarihsel gelişimi şematik bir şekilde sunulmaktadır.

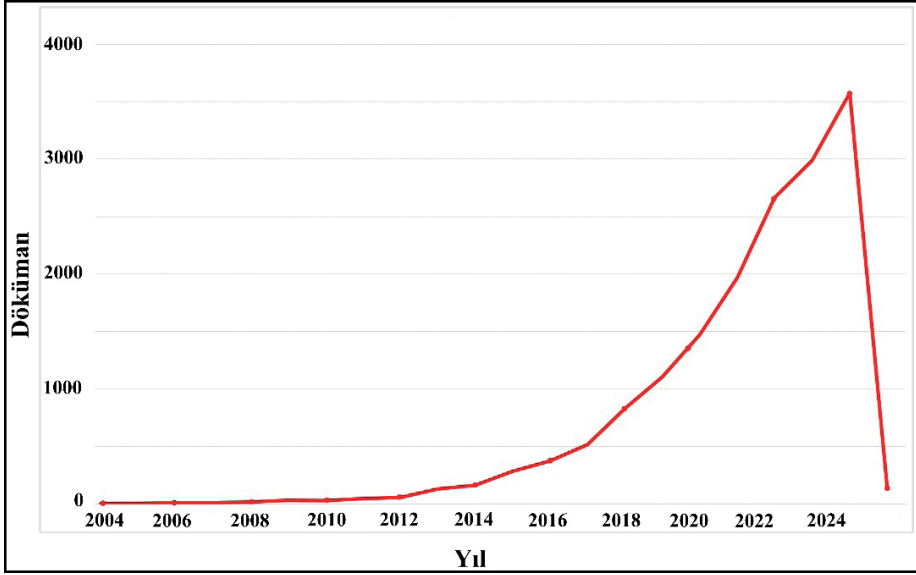


Şekil 1.1. Metalik malzemelerin tarihsel süreci (Şimşir 2022)

2. Yüksek Entropi Alaşımları

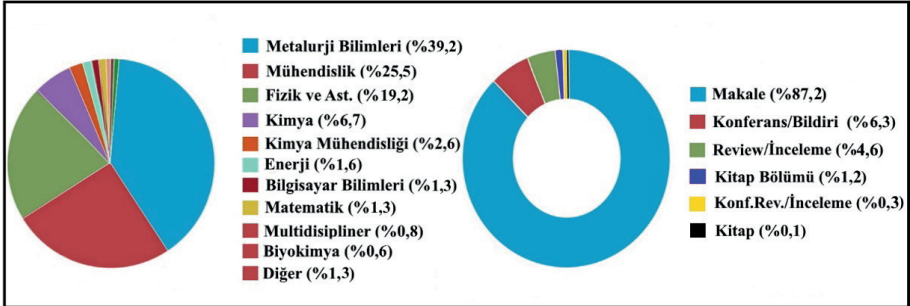
Günümüz dünyasında teknolojik gelişmelerin hızla ilerlemesiyle birlikte, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik gibi hedeflere ulaşmak için yüksek dayanıklılığa, aşınma ve korozyon direncine sahip aynı zamanda düşük ve yüksek sıcaklık koşullarında verimli bir şekilde çalışabilen makine elemanlarının önemi endüstride giderek artmaktadır. Bu doğrultuda malzeme bilimciler sürekli servis şartlarında daha verimli çalışabilen yeni nesil malzemeler geliştirmek için yoğun bir çaba içindedirler. Ayrıca maliyet, zaman ve iş gücü gibi kayıpların minimize edilmesi de iyileştirilmesi gereken diğer önemli faktörlerdendir. Bu ihtiyaçlar ve gelişmeler doğrultusunda yeni nesil malzemeler arasında dikkat çeken bir alan, Yüksek Entropi Alaşımları (YEA'lar) olmuştur. Bu alandaki bilimsel çalışmalar, birbirinden bağımsız olarak 2004 yılında Yeh et al. (Yeh et al. 2004) ve Cantor et al. (Cantor et al. 2004) tarafından eşit veya eşite yakın çok bileşenli alaşımlar tasarlama fikrinin ortaya atılmasıyla başlamıştır.

İlk zamanlarda çoklu ana elemente sahip bu yeni alaşımların kimyasal bileşimleri ve mikroyapılarının karmaşık ve analiz edilmelerinin zor olduğu düşünülmüştür. Zamanla yapılan araştırmalardan sonra bu alaşımların sentezlenmesi, prosesi ve analizinin mümkün olduğu anlaşılmıştır (Erdoğan 2018). Özellikle 2010 yılı itibarıyla bilim dünyasında ilgi çekici bir malzeme grubu haline gelen YEA'lar geleneksel alaşımlardan oluşan malzeme gruplarından tamamen farklı bir mikroyapıya sahiptir. Kontrollü bir şekilde ayarlanabilen mekanik ve mikroyapısal özellikleriyle YEA'lar araştırmacıların ve endüstrinin dikkatini çekmektedir (Zhang et al. 2014). Çok bileşenli alaşımlar (Ranganathan 2003; Senkov et al. 2010) veya bileşimsel olarak karmaşık alaşımlar (Gao 2014) diye de adlandırılan YEA'lar (Yeh et al. 2004) ile ilgili çalışmaların yıllara göre dağılımı Şekil 1.2'de grafiksel olarak sunulmuştur.



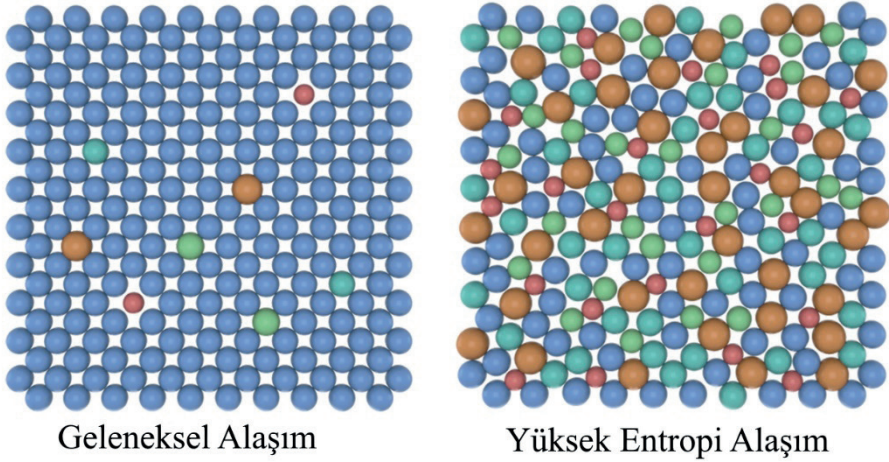
Şekil 1.2. YEA'lar ile ilgili çalışmaların yıllara göre dağılımı (Veriler 2004 -19.11.2024 zaman aralığı için Scopus veri tabanından alınmıştır).

Şekil 1.2'de, 2004 - 19 Kasım 2024 tarihleri arasında 14.000'den fazla veri toplanmış olup, aramalarda herhangi bir dil ve doküman sınırlaması yapılmamıştır. Bilimsel verilerin 2010 yılına kadar yatay bir eğilim izlediği ve 2010'dan sonra artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Özellikle 2017 yılından itibaren YEA'lar bilim dünyasında daha fazla ilgi görmeye başlamış ve bu durum çalışma verilerine de yansımıştır. YEA'lar tüm geleneksel ve modern üretim alanlarında makale, inceleme/derleme (review), kitap, kitap bölümü, bildiri, konferans gibi farklı bilimsel çalışmalarla karşımıza çıkmaktadır (Şekil 1.3). Bu bulgular, YEA'ların, yeni nesil malzeme grupları arasında araştırmacıların ilgisini giderek arttıran ve önemli bir konu haline gelen bir alan olduğunu göstermektedir. Bu durum yakın gelecekte YEA'ların mevcut malzeme gruplarına önemli bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 1.3. YEA'ların çalışma alanlarına ve doküman tipine göre dağılımı (Veriler, 19.11.2024 tarih aralığı için Scopus veri tabanından alınmıştır).

“Yüksek Entropi Alaşımları (High Entropy Alloys)” terimi, ilk olarak Yeh et al. tarafından yayımlanan bir makalede kullanılmıştır (Yeh et al. 2004). Zaman içerisinde YEA çalışmaları bilim insanlarının 2010 yılından sonra araştırmalarını yalnızca düzensiz katı çözelti fazına sahip birinci nesil YEA’larla sınırlı tutmayıp aynı zamanda farklı molar oranlarda element içeren, kompleks mikroyapıya ve ikincil çökelti fazlarına sahip ikinci nesil YEA’lar üzerine de yoğunlaştırdığını göstermiştir. Bu ikinci nesil YEA’lar 2015 yılında Miracle tarafından yazılan bir derleme makalesinde “Kompleks Konsantre Alaşımlar” olarak yeni bir terimle tanımlanmıştır (Miracle 2015; Yılmaz 2021). Şekil 1.4’te, geleneksel alaşımların ve YEA’ların atomik yapılarının şematik gösterimi sunulmaktadır.

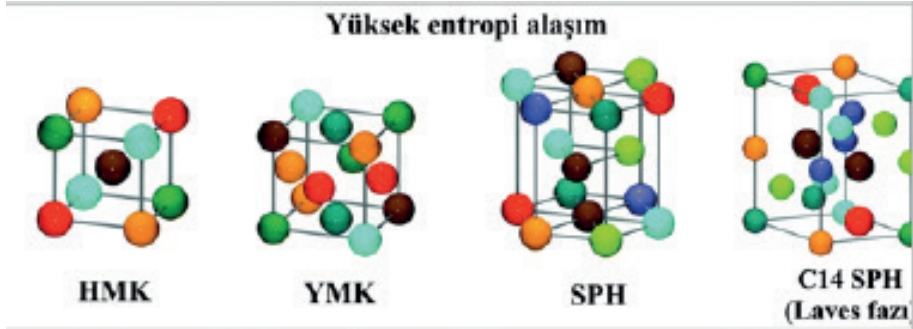


Şekil 1.4. Geleneksel ve YEA’ların kavramsal şematik gösterimi (Han et al. 2023)

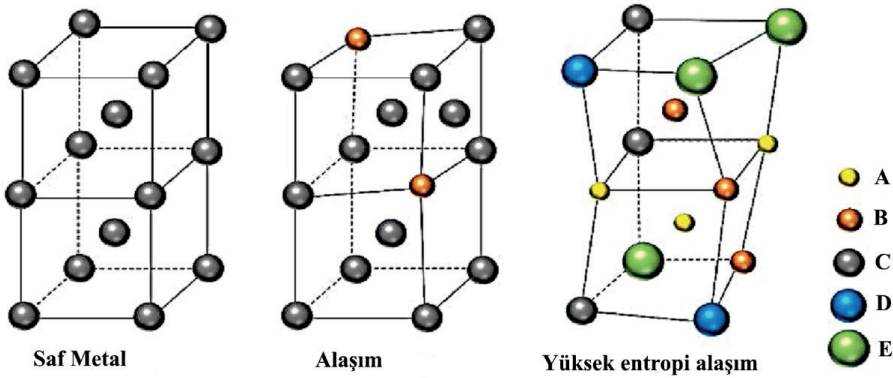
Geleneksel alaşımlarda ana metal elementine farklı oranlarda diğer elementler eklenerek alaşımların özellikleri geliştirilebilir. Ancak YEA’larda bir ana metal element anlayışı yerine birden çok ana metal element eşit veya eşite yakın atomik oranlarla bir arada bulunabilmektedir. Bu durum YEA’larda benzersiz bir kafes dizilimi oluşturur ve bu dizilim, alaşımların kimyasal kararlılığını sağlar (Wang et al. 2007; Zhang et al. 2014; Xu et al. 2019). YEA’lar, en az beş elementin eşit veya yakın atomik oranlarda bir kompozisyon oluşturduğu katı eriyik yapısına sahip alaşımlardır. Genellikle 5-13 ana element içerirler ve her bir elementin konsantrasyonu %5 ile %35 arasında değişebilmektedir (Yeh 2013; Brif et al. 2015).

YEA’lar yüksek ve düşük sıcaklık kararlılıkları, iyi işlenebilirlikleri, radyasyon ve korozyon direnci, yüksek mukavemetleri ve kristal yapıları ile dikkat çeken malzemelerdir (Sharma et al. 2018; Yang et al. 2020; Gu et al. 2021). Alaşımdaki çok sayıda elementin birbirine yakın oranlarda bulunması yüksek karışım entropisine yol açar. Bunun sonucunda, düzensiz ve kısmen düzenli yüzey merkezli kübik (YMK), hacim merkezli kübik (HMK) veya her iki

yapının bir arada bulunduğu (YMK+HMK) ve sıkı paket hegzagonal (SPH) yapılarını oluşturma eğilimindedir (Zhang et al. 2012; Dada et al. 2021). Şekil 1.5'te bu yapıların şematik bir gösterimi sunulmuştur. Bununla birlikte, bazı YEA'larda belirli oranlarda intermetalik bileşik fazları da oluşabilmektedir (Wang et al. 2022; Bulut et al. 2024b). YEA'larda tüm atomlar kafes bölgelerine rastgele yerleşir ve bu durum ciddi kafes çarpılmalarına ve gerilme oluşumuna yol açar (Ye et al. 2016). Şekil 1.6'da, tek bir elementin oluşturduğu kafes dizilimi, bir alaşım elementi eklenerek oluşturulan kafes dizilimi ve YEA sistemine ait kafes dizilimleri gösterilmektedir (Sonar et al. 2024). Alaşım elementlerinin sayısının artmasıyla birlikte, kafeste düzensizliğin arttığı ve yapının önemli oranda distorsiyona uğradığı gözlemlenmektedir. Bu özellik, YEA'larda istenilen temel özelliklerden biridir.



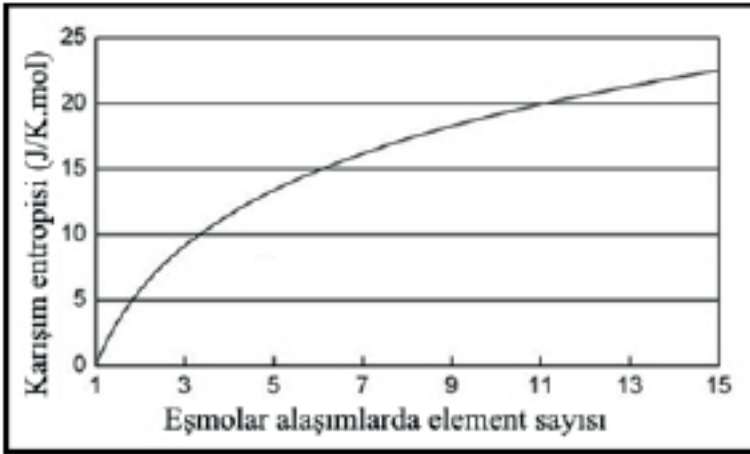
Şekil 1.5. YEA'ların tanımlanmış kristal yapıları (Ma et al. 2021)



Şekil 1.6. Tek bir elementin oluşturduğu kafes dizilimi, bir alaşım elementi eklenerek oluşturulan kafes dizilimi ve YEA sistemine ait kafes dizilimi (Sonar et al. 2024).

YEA sistemindeki eleman sayısı arttıkça, alaşım yapısının entropisi de artar. Yüksek entropi, kafes gerinimi, faz oluşum kinetiği, faz bileşimleri ve malzeme yapısının özellikleri üzerinde etkili olur. Ayrıca, bileşenler arasındaki çözünürlük artışı ve faz oluşumu ile mikroyapı oluşumuna da yüksek karışım entropisinin katkı sağladığı belirtilmiştir (Yeh 2013; Murty et al. 2019). Termodinamik açısından bir sistem, sabit sıcaklık ve basınç altında Gibbs Serbest

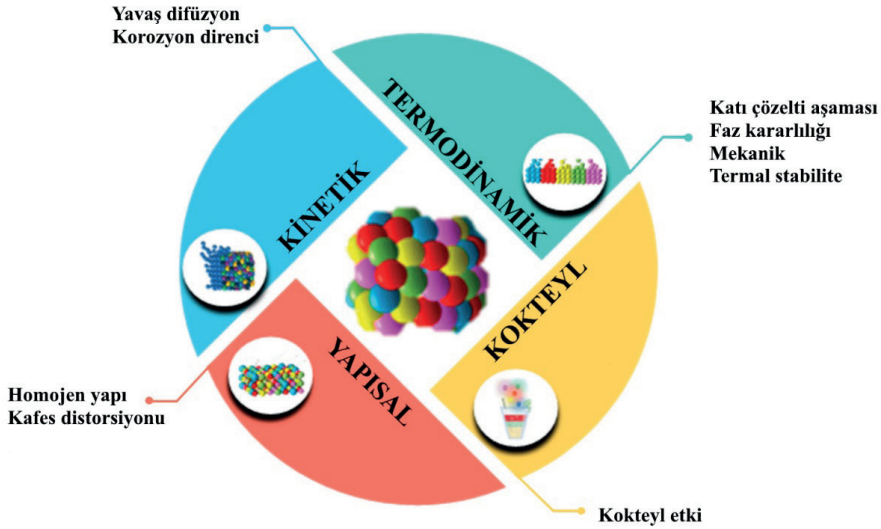
Enerjisinin minimuma ulaşmasıyla dengeye gelir (Zhang et al. 2012). Dolayısıyla yüksek karışım entropisini, karışım entalpisine karşı dengeleyebilmek için Gibbs Serbest Enerjisi en düşük seviyeye indirilmelidir. Bu nedenle, YEA sistemlerinde genellikle en az 5 ve en fazla 13 element tercih edilmektedir. Şekil 1.7'deki eğri incelendiğinde, karışım entropisinin yatay bir seyir izlediği ve bu durumda 13 veya daha fazla element eklemenin YEA sistemine çok az ya da hiç fayda sağlamayacağı anlaşılmaktadır. Ancak, her bir elementin konsantrasyonu eşmolar olabilir veya %5 ile %35 arasında değişebilir. Bu da olası YEA sistemlerinin sayısını genişletmektedir. Ayrıca, YEA'lar geleneksel alaşımlarda olduğu gibi herhangi bir elementin konsantrasyonunun %50'yi aşmadığı sistemlerdir ve bu yapılar için çok sayıda alaşım üretilebilir (Yeh 2006, 2013). Sonuçta çoklu kafes dizilimleri sayesinde, istenilen özelliklerde ve belirli gereksinimlere göre ayarlanabilen birden fazla özelliği bir arada bulunduran YEA sistemleri elde edilebilir (Miracle et al. 2014).



Şekil 1.7. Eşmolar alaşımlarda karışım entropisinin değişim fonksiyonu (Yeh 2006)

2.1. Yüksek Entropi Alaşımlarının Mikroyapısı ve Özelliklerine Etki Eden Temel Faktörler

Yeni nesil malzemeler arasında kabul gören YEA'lar, mikroyapılarını ve özelliklerini etkileyen bir dizi faktöre sahiptir. Bu faktörler arasında Şekil 1.8'de verildiği gibi yüksek entropi etkisi, yavaş difüzyon etkisi, kafes distorsiyonu ve kokteyl etkisi gibi çekirdek etkiler daha temel rol oynamaktadır (Yeh 2006; Arshad et al. 2022). Termodinamik açıdan, yüksek entropi etkisi karmaşık fazların oluşumunu engelleyebilir. Kinetik açıdan ise yavaş difüzyon etkisi, faz dönüşümünü yavaşlatabilir. Yapısal olarak kafes distorsiyonu etkisi, malzemenin bazı özelliklerini değiştirebilir. Kokteyl etkisi ise, farklı atomların etkileşimleri ve kafes distorsiyonu sonucu karışım kuralına göre öngörülen miktarlardan farklı özelliklerin ortaya çıkmasına yol açabilir (Yeh 2013; Pickering and Jones 2016).



Şekil 1.8. YEA'ların özelliklerine etki eden faktörler (Caramarin et al. 2024)

Yüksek entropi etkisi, çok bileşenli sistemler olduklarından dolayı YEA'ların faz dönüşümünde kritik bir rol oynayan en önemli çekirdek etkisidir (Yeh 2013; Gao et al. 2016). Bu etki, kimyasal olarak uyumlu elementlere sahip ve katı çözelti fazları veya tek fazdan oluşan alaşımların birleşmesine yardımcı olur (Eiřmann et al. 2017; Dada et al. 2021). Özellikle yüksek sıcaklıklarda, katı çözelti fazlarının oluşumunu teşvik ederek mikroyapıyı daha basitleştirebilir. Bu nedenle yüksek entropi etkisi, çökeltme sertleşmesi nedeniyle çözelti fazlarının mukavemetini ve sünekliğini artırma potansiyeline sahiptir (Lu et al. 2015; Gao et al. 2016). Özetle yüksek entropi etkisi, YEA'lar için çok kırılğan olan ve analiz edilmesi karmaşık olan çeşitli stokiometrik bileşikler ve karmaşık fazların oluşumunu engellemek açısından büyük öneme sahiptir. Bu etki faz ayrışmasını zorlaştırarak homojen bir mikro yapı oluşumuna katkıda bulunabilir.

Yeni fazların oluşumu, YEA'ların bileşimindeki ayrışmanın gerçekleşebilmesi için farklı atom türlerinin ortak difüzyonunu gerektirir. Ancak, geleneksel alaşımlarda olduğu gibi, YEA'larda da yer alan difüzyonu için boşluk konsantrasyonu sınırlıdır. Çünkü YEA'lardaki her boşluk, pozitif bir oluşum entalpisi ve yüksek bir karışım entropisi ile ilişkilidir. Bu da belirli bir sıcaklıkta dengeye ulaşmış bir konsantrasyonda minimum serbest karışım enerjisinin oluşmasına neden olur. YEA'larda kafes bölgeleri arasındaki potansiyel enerji dalgalanmalarının büyüklüğü nedeniyle difüzyon hızı daha yavaş olup, daha yüksek aktivasyon enerjisi gerektirebilir. Düşük kafes potansiyel enerjisine sahip bölgeler atomik difüzyonu engelleyerek tuzak veya engel/bariyer görevi görür ve bu da yavaş difüzyon etkisine yol açar. Bu nedenle, kafes distorsiyonları atomik hareketleri engeller ve YEA'larda difüzyon kısıtlanır (Yeh 2013). Yavaş

difüzyon etkisi olarak bilinen bu olgu, amorf yapılar veya monokristal yapıların büyümesine bağlı olarak ortaya çıkar ve yüksek sıcaklıklarda bile devam eder. Örneğin, Fe-Co-Ni-Cr-Mn YEA sisteminde yavaş kafes difüzyonu Tsai ve arkadaşları tarafından sistematik olarak incelenmiş ve bu YEA sistemindeki beş bileşenin difüzyon katsayılarının farklı olduğu, ayrıca bazı elementlerin daha düşük aktiviteye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, faz dönüşüm hızlarını düşürür (Tsai et al. 2013; Lu et al. 2015). Yavaş difüzyon etkisi, YE-A'ların özelliklerine olumlu yönde katkı sağlar; nano boyutlu çökeltilerin dö-küm yöntemleriyle bile oluşmasına olanak tanır ve böylece dayanım-tokluk kombinasyonunu geliştirir ayrıca çok yüksek sürünme direnci elde edilebilir (Gao et al. 2016; Eißmann et al. 2017).

Çok elementli kafes yapılarında, atom boyutlarındaki farklılıklar nedeniyle yüksek oranda kafes distorsiyonu meydana gelir. Kafes distorsiyon etkisi olarak bilinen bu durum, YEA sistemlerinin mekanik, termal, elektriksel, optik ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkiler. YEA'larda "çözünen" ve "çözücü" terimleri, geleneksel anlamlarını yitirir. Katı çözeltiler genellikle bir çözücü ve ona karışan çözünen elementleri içerirken, YEA'larda eşmolar oranlar nedeniyle bu ayrımın yapılması pek mümkün değildir. Bu tür "süper katı-çözelti" sistemlerinde atom boyutları arasındaki farklar ve bileşenler arasındaki bağlar önemli ölçüde kafes bozulmasına yol açar. Kafes distorsiyonu, belirli bir kafes bölgesindeki bir atomun ideal konumundan sapmasına neden olur. Ayrıca, bir kafes bölgesindeki atomun çevresindeki elektron konfigürasyonu, her atomun YEA içindeki farklı elementlerin komşu atomlarıyla bağ kurmasından dolayı saf bileşenin ideal kristal yapısındaki simetriyle karşılaştırıldığında asimetric olacaktır (Yeh 2013; Lu et al. 2015; Murty et al. 2019). Kafes distorsiyon etkisi, aşırı kimyasal bağlanma, kayma modülü farkı, kısa mesafe düzeni ve dipol etkileşimleri gibi faktörlerle birleşerek, katı çözelti sertleşmesine katkı sağlayan önemli yapısal faktörlerden biridir (Gao et al. 2016).

Kokteyl/sinerjistik etkisi, elementler arasındaki karşılıklı etkileşimlerden kaynaklanan genel bir etki olup kompozisyon ve mikroyapıya bağlı olarak şekillenir (Gao et al. 2016). Bu etki, atomik düzeyde çok elementli bileşik etkilerinden mikro ölçekli çok fazlı bileşik etkilerine kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır (Yeh 2013). Kısacası, alaşımlardaki kokteyl etkisi, tek başına bir elementle elde edilemeyen özelliklerin birden fazla elementin bir araya getirilmesiyle elde edilebileceğini gösterir ve bu da üstün özelliklere sahip malzemelerin üretimini mümkün kılar (Ranganathan 2003; Ozkan and Karaoglanlı 2021). Alaşım tasarımı, doğru bileşim ve işleme yöntemlerinin seçilmeden önce bu faktörlerin ve etkilerin anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu sayede uygun bileşim tasarımının sağlanması için gerekli özellikler elde edilebilir ve tüm avantajlardan en verimli şekilde yararlanılabilir.

2.2. Yüksek Entropi Alaşımlarda Katı Çözelti ve İntermetalik Fazlar

YEA'lar üzerine yapılan araştırmalar, atomlar arasındaki atomik boyut farklarının büyük olduğu veya çok bileşenli alaşımlardaki belirli elementler arasında güçlü bir çekim olduğu durumlarda konfigürasyonel entropinin tek başına basit rastgele katı çözeltilerin oluşumunu açıklamakta yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Böyle durumlarda çeşitli intermetalik fazlar ve bazı işlem koşulları altında amorf fazlar da gözlemlenmiştir. Yüksek entropi alaşımları katı çözelti fazları, ikincil katı-çözelti fazları ve/veya Beta (β), Laves ve Sigma (σ) gibi intermetalik fazlar içeren çok fazlı yapılar gösterebilir (Murty et al. 2019; Srivatsan and Manoj 2020). İntermetalik fazlar arasında en yaygın gözlemlenen kristal yapılar B2, Sigma (σ) fazı ve Laves fazıdır. Genellikle bu fazlardan bazıları rastgele katı çözeltilerle birlikte gözlemlenir ve bunun, alaşımların yavaş soğutulması veya termal tavlama işlemleri sırasında YEA'lardaki katı çözeltilerden çökelmeye bağlı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca üretim aşamasında atmosferdeki azot (N) ve karbon (C) gibi elementlerin YEA hedeflerinden püskürtülerek alt tabakalarda biriken yüksek entropili nitrür ve karbür ince filmlerin aslında Hagg fazı türündeki ara yer bileşiklerinin yapılarına sahip katı çözeltiler olduğu tespit edilmiştir (Murty et al. 2019).

Katı eriyikler ve arayer bileşikler (Hagg fazları); katı durumda birbiri içinde çözünebilen ve ortak bir kafes yapısı oluşturan bileşenlerden meydana gelen katı eriyikler tek fazlı bir yapıya sahip olur. İkili katı eriyiklerin oluşumunu Hume-Rothery kuralları belirlerken YEA'larda faz oluşumunda önemli diğer parametreler arasında karışım entalpisi ve karışım entropisi gibi faktörler öne çıkmaktadır (Erdoğan 2018; Murty et al. 2019). YEA'lar, intermetalik faz yapılarına kıyasla daha çok düzensiz ve yarı düzenli yapılarına sahip HMK, YMK ve SPH katı eriyik fazları oluşturma eğilimindedirler. Bu eğilim, karışım entropisine dayandırılmaktadır (Ye et al. 2016; Miracle and Senkov 2017). Bir metal kafes yapısı içinde atomların yarıçaplarının oranı 0,59'dan büyük olmamak koşuluyla (Hagg kuralı), yeterince küçük metal olmayan atomlar (H, N, C, B, P, O) aralardaki boşluklarda yer alır veya belirli arayer alanlarını işgal eder. Bu durum sonucunda bir arayer bileşiği oluşur ve bu tür bileşiklere Hagg Fazı denir (Murty et al. 2019; Chen et al. 2021; Pushcharovsky 2023). YEA sistemleri nitrürler, karbürler, oksitler ve bunların çeşitli kombinasyonlarını içerecek şekilde farklı yüksek entropi seramikler olarak genişletilebilir. Ayrıca farklı üretim yöntemleri kullanılarak çok bileşenli kafes yapısına sahip arayer bileşikleri sentezlenebilir (Chen et al. 2004; Li et al. 2020; Park et al. 2020). Bu ve benzeri çalışmalar arayer bileşiklerinin kullanılan YEA yapılarının mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Zhou et al. 2018; Park et al. 2020).

İntermetalik fazlar, metalik elementlerin bir araya gelerek belirli bir kristal yapıya sahip olan bileşiklerdir. Bu bileşikler, farklı metal atomlarının kristal yapıda düzenli bir şekilde sıralanarak birleşmesiyle oluşur. İntermetalik fazlar, metalik ve seramik bileşikler arasında bir geçiş fazı oluştururlar. Ge-

nellikle karmaşık ve düzenli kristal yapıları ile tanınan bu bileşikler pek çok endüstriyel uygulama için önemli özellikler taşır. İntermetalik fazların özellikleri metalik bileşiklerin mukavemet, sertlik ve iletkenlik gibi özellikleri ile seramik bileşiklerin kırılabilirlik ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özelliklerinin bir birleşimini içerebilir. Bu kombinasyon, özellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında kullanılan uygulamalarda bu bileşiklerin önemini artırır (Berdovsky 2008; Sauthoff 2008).

B2 fazı, düzenli bir yapıya sahip olan ve HMK yapısına dayanan bir fazdır. Bu yapıda, kübik kafesin merkezi noktasında bir tür atom bulunurken kafesin köşe noktalarında farklı türde atomlar yer almaktadır. B2 fazına sahip en yaygın bileşik yapıları arasında CsCl, CuZn ve NiAl yer alır. B2 fazı birçok YEA'lar sisteminde majör veya minör faz olarak gözlemlendiği gibi bazı durumlarda ısıtılma sırasında HMK fazdan çökme yoluyla da ortaya çıkabilir. Genellikle B2 fazının gözlemlendiği sistemlerde alaşımlar Al ile birlikte Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni ve Cu gibi 3d geçiş elementlerini içerebilir. Özellikle Al ile birlikte Fe, Co ve Ni gibi 3d geçiş elementleri B2 faz yapısının oluşumuna güçlü bir eğilim gösterir (Sauthoff 2008; Erdoğan 2018; Murty et al. 2019).

L1₂ fazı, YMK faz yapısına sahip düzenli bir fazdır. Bu yapıda, kafesin yüzey merkezlerinde bir tür atom bulunurken kafesin köşe noktalarında farklı bir tür atom yer almaktadır. L1₂ fazı, az sayıda YEA'lar sisteminde gözlemlenmektedir (Sauthoff 2008; Manzoni et al. 2013; Yuan et al. 2021). Bu faz yapısına sahip YEA'lar genellikle Al ve Ni elementlerini içerir ve hem YMK hem de L1₂ faz yapılarının varlığına sahiptir. Bu tür alaşım sistemlerinde Al içeriği belirli bir seviyede olmalıdır; aksi takdirde HMK yapı ve B2 fazlarının oluşumu söz konusu olabilir. L1₂ fazına sahip en yaygın bileşikler arasında AuCu₃ ve Ni₃Al bulunur (Murty et al. 2019).

Sigma fazı (σ), daha büyük atom boyutuna sahip bileşenlerin belirli bir kafes bölgesini işgal ettiği daha küçük atomların ise genel serbest enerjisini düşürmek amacıyla daha fazla bağ yaparak başka bir kümeyi işgal ettiği topolojik olarak sıkı paketlenmiş bir fazdır. Sigma fazı, genellikle Cr içeren çelik yapılarında bulunur ve eş atomlu FeCr bileşimi ile tetragonal bir yapıya sahiptir. Bu faz yapısı, eş atomlu CoCr ve FeMo gibi Co-Cr ve Fe-Mo ikili alaşımlarında da gözlemlenebilir. Ayrıca, yüksek miktarda Cr ve/veya Mo içeren Fe ve/veya Co ile birlikte çok sayıda YEA sisteminde işlem aşamalarının çeşitli safhalarında σ fazının oluşumu görülebilmektedir. YEA'larda σ fazı, aynı zamanda çok bileşenli bir katı eriyik olarak karşımıza çıkmaktadır. σ fazının oluşumu YEA'lar da yalnızca karışım entropisine bağlı değildir; bu etkiye ek olarak elementler arasındaki etkileşimler ve atomik boyut farkları da farklı tipte katı eriyiklerin oluşmasına yol açabilir (Erdoğan 2018; Murty et al. 2019). Tsai ve arkadaşları, σ fazının oluşumunu öngörmek için yeni bir parametre önermişlerdir: eşleşik sigma-faz oluşturan elementler. Bu parametreye göre, çok bileşenli bir alaşımda ikili σ fazı oluşturan iki element varsa bu elementler sigma-faz oluşturan

elementler olarak kabul edilir. Örneğin, A ve B elementleri arasında ikili σ fazı oluştuğunda A elementi alaşımdaki Cr iken, B elementi Co ve Fe olabilir. Dolayısıyla, CoCrFeNi alaşımlarında sigma-faz oluşturan elementler Cr, Co ve Fe'dir (Tsai et al. 2016; Wang et al. 2021).

Laves fazı, atomik boyut farkının 1,05 ile 1,67 arasında olduğu intermetalik bileşik yapıya sahip bir fazdır ve genellikle AB_2 stokiyometrik oranında oluşur. Laves fazları, üç farklı sınıfta karşımıza çıkar: kübik $MgCu_2$ (C15), altıgen $MgZn_2$ (C14) ve altıgen $MgNi_2$ (C36) (Murty et al. 2019; Pushcharovsky 2023). Çoğu YEA'lar sisteminde Laves fazı, ana faz ya da minör faz olarak gözlemlenebilir ve YEA'ların mukavemetinin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Uporov et al. 2021; Zhao et al. 2021).

2.3. Yüksek Entropi Alaşımlarının Üretim Yöntemleri

Yüksek entropi alaşımları, birçok farklı imalat ve yüzey mühendisliği yöntemiyle üretilebilmektedir. Bu yöntemler genel olarak sıvı, katı ve gaz karıştırma üretim yöntemleri olarak üç ana başlık altında toplanmaktadır (Gao et al. 2016). Sıvı hal üretim yöntemleri, YEA'ların üretiminde kullanılan yaygın yöntemlerdir ve bunlar arasında ark ergitme, indüksiyon ergitme ve bridgeman metodu yer almaktadır (Zhang and Xing 2020). Bu ergitme ve döküm teknikleri arasında vakum ark ergitme ve indüksiyon ergitme metotları sıklıkla tercih edilen yöntemlerdendir (Won et al. 2018; Vaidya et al. 2019). Katı hal üretim yöntemiyle YEA'ların üretiminde önemli bir paya sahip olan toz metalurjisi (TM), çok küçük parçacıkların uygulanan basınç ve sıcaklık etkisiyle birbirine bağlanması sonucu ürün haline getirme işlemidir (Varol 2012; Bulut 2017). Yüzey modifikasyon teknikleri arasında ise lazer kaplama (laser cladding), plazma nitrürleme, ince filmler/magnetron püskürtme gibi işlemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Gao et al. 2016; Murty et al. 2019; Srivatsan and Manoj 2020; Zhang and Xing 2020). Bunların yanı sıra, son yıllarda eklemeli imalat (3D baskı gibi) yöntemi de YEA'ların üretimi için sıklıkla tercih edilmektedir (Daminabo et al. 2020; Yuan et al. 2021).

Ark ergitme yönteminde, su soğutmalı bakır bir pota ile tungsten (W) alaşımlı elektrot arasında oluşturulan ark sayesinde atmosferik kirliliği önlemek amacıyla koruyucu gaz altında üretim yapılmaktadır. Bu yöntemde yüksek sıcaklıklar kullanarak metallerin erimesi sağlanır. Saf metaller bakır kavanoza yerleştirilip vakum altında yüksek saflıktaki argon gazıyla korunur. Yüksek voltajla ark başlatılır, titanyum ingotu önce eriyerek oksijen alır ve ardından diğer hammaddeler eritilip YEA yapıları elde edilir. Elektromanyetik karıştırma bazen sıvı metalin homojenliğini sağlamak içinde kullanılır (Zhang and Xing 2020; Yılmaz 2021). Bu yöntemde, yüksek erime noktasına sahip elementler için uygundur ancak erime ve kaynama noktası düşük elementler (Mg, Zn, Mn, Sn gibi) için buharlaşma riski yüksek olduğundan bileşim kontrolü açısından zorluklar yaşanabilmektedir (Alaneme et al. 2016). Bu yöntem-

lerin başka bir dezavantajı ise hızlı katılaşma nedeniyle sürecin kolayca kontrol edilememesidir ve parça şekil karmaşıklığı ve mikro yapılar konusunda hala bazı sınırlamalara sahip olmasıdır (Gao et al. 2016; Yong 2019; Li et al. 2020). Örneğin, katılaşma sırasında segregasyon, dendritik yapılar ve dendritik arası oluşumlar görülebilir; bu da mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilir ve ikincil işlemler gerektirebilir (Li et al. 2018; Ozkan and Karaoglanli 2021). Bu sebeple, alaşım tasarımı kompozisyon kontrolünün dikkatlice yapılması büyük önem taşır. Bu tür durumlarda, indüksiyon ve direnç ısıtma fırınlarının kullanılması, üretim sürecini iyileştirebilecek bir çözüm sunabilmektedir (Gao et al. 2016; Murty et al. 2019; Yong 2019). İndüklenen akım kullanarak metal erimesi, iyi iletkenlik gösteren metallerde hızlı ve etkili bir yöntemdir. Su soğutmalı bakır kavanozda dıştaki indüksiyon bobini ile metallerde akım üretilir. Bu akım, metallerde ısı oluşturarak alaşımın erimesini sağlar ve elektromanyetik karıştırma ile kompozisyonun homojenleşmesine yardımcı olur. Ark erimesine göre avantajı 1 kg'den büyük ingotlar üretme kapasitesidir (Zhang and Xing 2020). Chen ve arkadaşları CoCrFeNiMnTi_x alaşımlarında artan Ti oranıyla YMK fazdan HMK faz yapısına geçişin oluştuğunu, mekanik özelliklerin iyileştiğini ancak sünekliğin azaldığını ayrıca katı-sıvı geçiş sıcaklığının düştüğünü ve erime sıcaklığının genişlediğini belirlemişlerdir (Chen et al. 2022).

Katı hal üretim yöntemi olarak öne çıkan TM yöntemlerinden mekanik alaşımlama (MA), toz malzemelerin belirli bir ortamda karıştırılması ve işlenmesiyle YEA'ların üretimine olanak tanımaktadır. MA, farklı element tozlarının yüksek enerjili değirmenlerde öğütülerek iyi homojenliğe sahip nanomalzemeler, alaşımlar ve kompozit tozlar elde edilmesini sağlayan bir işlemdir (Suryanarayana 2001; Chakraborty et al. 2019, 2020). Joo ve arkadaşları, CoCrFeMnNi alaşımını MA ve kıvılcım plazma sinterleme (SPS) ile üretmiş ve alaşımın YMK tek faz yapısını sergilediğini, alaşımın yüksek sıcaklıklarda (900 °C - 1100 °C) bu faz yapısını koruduğunu ve öğütme süresi arttıkça faz yapısının kararlılığının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca öğütme ortamındaki karbon nedeniyle krom karbürlerinin yüzeyde biriktiğini ve 60 dakika MA ile 900 °C SPS işlemiyle ince taneli mikroyapılar elde ettiklerini raporlamışlardır (Joo et al. 2017).

Gaz hal üretim yöntemi, gaz formunda üretilen YEA malzemelerine kaplama işlemi uygulanabilmesini sağlar. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemleri arasında en yaygın kullanılan kaplama teknikleri magnetron sıçratma (MS), plazma nitrürleme/kaplama ve moleküler demet epitaksi gibi yöntemlerdir (Gao et al. 2016; Murty et al. 2019; Yong 2019). Magnetron sıçratma, kaplanacak tabakaların (katot) üzerine, atomların yüklü gaz iyonları (plazma haline gelmiş) tarafından bombardıman edilerek ince film kaplama yapılmasını sağlayan bir tekniktir. Metal iyonları, hedeften uzaklaştırılarak kaplanacak alt tabakanın yüzeyine anot-katot arasındaki voltaj ve manyetik alan farkı ara-

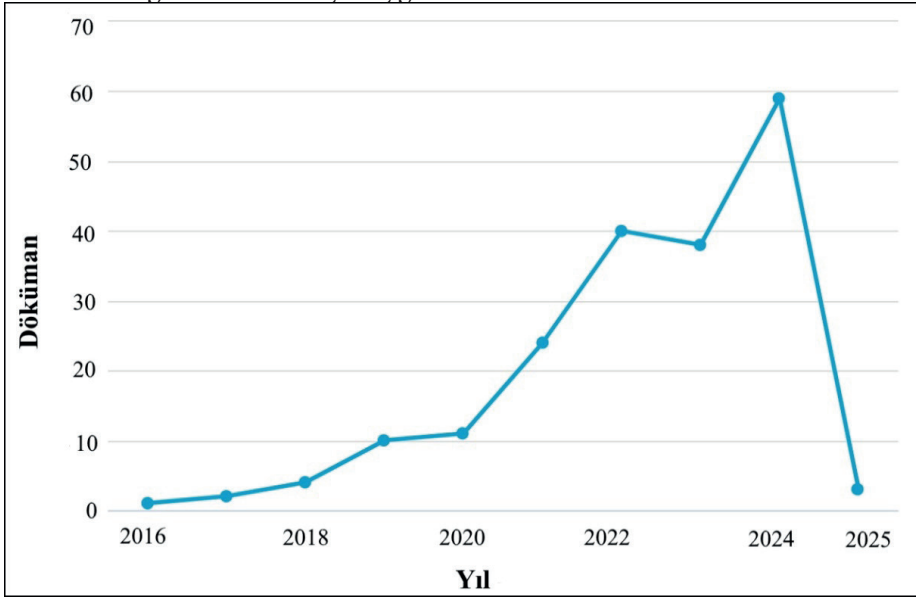
cılığıyla birikir (Karaca 2019; Yılmaz 2021). Atomsal düzeyde kontrol sağlama imkânı daha yoğun filmler oluşturulması ve daha iyi adezyon sağlanması açısından magnetron sıçratma yöntemi birçok avantaja sahiptir (Çiçek 2018). Plazma kaplama yöntemi ise, ısı plazma ark jeti kullanarak iş parçasının yüzeyini değiştirir ve kaplama katmanıyla ana malzeme arasında metalurjik bağ oluşmasını sağlar. Böylece kaplamanın mekanik ve aşınma özellikleri iyileştirilir (Liu et al. 2023). Bu teknoloji, kalın kaplamaların yapılmasına da olanak tanır. YEA'ların bu işlemler arasında en çok tercih edilen lazer destekli kaplama (laser cladding) yönteminde lazer ışını yoğun enerji sağlayarak ısı kaynağı işlevi görür ve çok küçük bir alanda odaklanarak alt tabakanın ısıdan etkilenen bölgesini yüzeyssel bir şekilde ısıtarak işlem yapar (Ye et al. 2017; Shu et al. 2018; Yong 2019). Gu ve arkadaşları, $\text{CoCr}_{2,5}\text{FeNi}_2\text{Ti}_x$ ($x=0 - 0,50 - 1,0 - 1,5$) yapısını lazer kaplama ile üreterek kaplama ve alt tabaka arasında mükemmel bağlanma sağladığını ve Ti ilavesinin $x=1$ 'e kadar korozyon direncini artırdığını sonrasında ise azalttığını bildirmişlerdir (Gu et al. 2020).

Son yıllarda, YEA'ların eklemeli imalat yöntemleriyle üretimi konusunda belirgin bir artış olduğu ve özellikle lazer toz yatak destekli ergitme (Laser Powder Bed Fusion/L-PBF) yöntemlerin tercih edildiği gözlemlenmektedir (Bulut and Yıldız 2024). Geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında eklemeli imalat, karmaşık geometrilere sahip malzemelerin herhangi bir kalıp veya takıma ihtiyaç duymadan üretilmesini sağlayan esnek bir işleme tekniği sunmakla birlikte yüksek düzeyde yerel proses kontrolünü mümkün kılan ve karmaşık geometrilerin üretilmesine imkân veren mühendislik malzemesi olarak YEA'ların üretimi için uygun bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Brif et al. 2015; Fujieda et al. 2015, 2019; Chen et al. 2020). Sun vd., seçici lazer ergitme (SLE) ile ürettikleri CrCoFeNiMn alaşımının YMK matrisinde hiyerarşik mikroyapı ve az miktarda Cr parçacığı olduğunu gözlemlemiş, 320 W lazer gücü, 750 mm/s tarama hızı ve 0,09 mm tarama mesafesiyle en iyi mukavemet ve tokluğa sahip numuneler elde ettiklerini belirtmişlerdir (Sun et al. 2023).

2.4. Türkiye'de YEA'lar ile İlgili Çalışmalara Kısa Bir Bakış

YEA'ların literatürüyle ilgili dünya genelinde yapılan çalışmaların yaklaşık genel bir çıkarımı Şekil 1.2'de sunulmuştur. Bu çıkarımlardan da anlaşıldığı gibi bilim dünyasında YEA'lara büyük bir ilgi mevcuttur. Bu başlık altında Türkiye'de gerçekleştirilen çalışmalara kısa bir bakış yapılacaktır. Şekil 1.9'da Türkiye'de Scopus veri tabanından alınan verilere göre YEA'lar ile ilgili yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı sunulmuştur. Bu veriler için herhangi bir dil sınırlaması yapılmamış olup makale, derleme, konferans vb. gibi bilimsel çalışmalarını içermektedir. YEA'lar hakkında gerçekleştirilen bu bilimsel çalışmalara katkıda bulunan Türkiye'deki üniversiteler ve diğer vb. kurumlarda görev yapan yazarlar ile birlikte birçok çalışmaya diğer dünya ülkelerine bağlı bilim insanları da ortak-yazar olarak katkıda bulunmuştur. Şekil 1.9'daki veriler dik-

kate alındığında günümüze doğru süreç ilerledikçe bilimsel dokümanlarda da artan bir eğilim söz konusudur. Ayrıca, “Yükseköğretim Kurulu Tez Merkezi” veri tabanında YEA’lar ile ilgili yayımlanan yaklaşık 70 yüksek lisans ve 21 doktora tezinin bulunması, bu alandaki akademik ilginin giderek arttığını ve konunun önem kazandığını göstermektedir. Çalışmaların çoğunluğunda geleneksel imalat yöntemleri (döküm, toz metalurjisi vb. gibi) kullanılırken (Erdogan et al. 2021; Öztürk et al. 2022; Güler et al. 2024; Karabacak et al. 2024) sınırlı sayıda da olsa eklemeli imalat yöntemleri de bu alışımların üretiminde kullanılmıştır (Altınok et al. 2024; Bulut et al. 2024b, 2024a; Ozalp et al. 2024). Sonuç olarak, YEA’lar ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalar dünyada olduğu gibi Türkiye’de giderek artan bir ilgiyle gelişmekte olup bu alandaki akademik üretim ve katkılar konuya olan dikkat çekici eğilimin ve bilimsel potansiyele önemli bir göstergesidir. Bu artan ilgi YEA’ların eğitim, öğretim, yönetim ve araştırma alanlarındaki potansiyel etkilerini daha derinlemesine inceleme gerekliliğini doğurmaktadır. Türkiye’deki araştırmaların yanı sıra uluslararası işbirliklerinin de güçlenmesi, bu alandaki bilgi birikiminin daha geniş bir perspektifle gelişmesini sağlayacak ve dolayısıyla bu alışımların malzemelerinin tanınabilirliğini ve endüstriyel uygulamalarına olanak sunacaktır.



Şekil 1.9. Türkiye’de YEA’lar ile ilgili çalışmaların yıllara göre dağılımı (19.11.2024 tarihinde Scopus veri tabanından alınmıştır).

3. Gelecek Beklentileri ve Sonuç

YEA’lar malzeme üretimi için önemli bir alanı temsil etmektedir. YEA’ların geliştirilmesi gelecekteki potansiyel uygulamalar için büyük bir önem taşımaktadır. Çünkü bu süreçler ve yöntemler uygun seçimler ve optimizasyonlar yapıldığında uygulanabilir. Bu alışımların üretim ve gelişimleri geleneksel

üretim yöntemleri haricinde özellikle modern veya yenilikçi imalat yöntemleri ile ilerletilebilir. YEA'ların bileşim ve süreç kombinasyonları çeşitlilik gösterdiğinden bu alaşımlar farklı mikro yapılar ve özellikler sunarak geleneksel malzemelerin uygulandığı birçok alanda kullanılabilecek potansiyele sahiptir. Ancak, YEA'lar hakkındaki araştırmalar henüz sınırlıdır ve daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Ayrıca mevcut çalışmaların endüstriyel uygulamaları yeterince yaygın değildir. Bu nedenle farklı üretim yöntemleriyle üretilen YEA'ların işlenebilirliği üzerine yapılacak araştırmalar büyük önem taşımaktadır.

Teknolojinin gelişmesiyle paralel olarak biriken bilgi ve deneyim sayesinde, simülasyon ve modelleme yardımıyla daha iyi özelliklere sahip birçok YEA'nın gelecekte başarıyla geliştirileceği umut edilmektedir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için mühendislik malzemeleri endüstride önemli bir yer tutmaktadır. Örneğin, süper alaşımlar yüksek sıcaklıklarda iyi performans sergiler. Çeşitli çalışmalara dayanan YEA'lar, geleneksel süper alaşımların yerine kullanılabilir. Ayrıca yüksek sıcaklık oksidasyon direnci ve korozyon direnci gerektiren ortamlarda YEA kaplamalar oldukça umut vericidir ancak daha karmaşık bileşimler ve üstün yüksek sıcaklık özellikleri gerektirmektedir.

YEA'lar, süperiletkenler gibi fonksiyonel malzemeler, termoelektrik, süperiletken ve manyetik malzemeler gibi uygulamalarda gelecekte daha fazla geliştirilebilir. Yüksek korozyon direncine sahip yapılar nükleer sanayide alternatif malzemeler olarak tercih edilebilir. Ayrıca hafif YEA'lar taşınabilir uygulamalar, pil malzemeleri ve ulaşım alanlarında kullanılabilir. Yüksek sertlik ve dayanıklılığa sahip YEA yapıları yüksek hız çeliklerinde ve kesici takım çeliklerinde difüzyon engelleyici ve sert kaplamalar olarak tercih edilebilir.

Lazer toz yatak esaslı eklemeli imalat sistemleriyle ilgili üretimden kaynaklı YEA yapılarında kusur mekanizmaları veya bu kusurları azaltma/engelleme stratejileri araştırılmalıdır. Ayrıca bu üretim yöntemleriyle üretilen YEA malzemelerin deneysel olarak yorulma, dayanıklılık ve ömür tahminlerinin nihai uygulamalar üzerindeki etkilerine dair araştırmalar sınırlıdır. Gelecekteki araştırmalar, toz yatak esaslı eklemeli imalat ile işlenmiş YEA'ların yorulma ömür performansı, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklık akışkanlık özelliklerine odaklanabilir. Eklemeli üretim, metalik camların üretimini mümkün kılmaktadır ancak istenen mekanik özelliklere sahip tamamen amorf metalik camları elde etmek oldukça zordur. Araştırmalar, bu malzemelerin istenen kalite ve özelliklere ulaşması için işleme parametrelerinin iyileştirilmesine ve optimizasyonuna odaklanmalıdır. Lazer kaplama (laser cladding) yöntemleriyle ilgili araştırmalar da YEA'lar için önemli bir alandır. Üretim sırasında oluşabilecek gerilmeler ve elementel ayrışmalar (segregasyon gibi) mikro yapıda çatlakların oluşmasına yol açabilir. Bu konuda yapılacak çalışmalar, lazer kaplama malzemelerinin yüzey mühendisliğindeki özelliklerini geliştirmeye yönelik düşünülebilir.

YEA'ların, yeni katalitik malzemelerin geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyeli vardır, çünkü düşük maliyetli ve geçiş metal elementleri içeren YE-A'lar katalitik malzeme maliyetlerini azaltabilir. Ayrıca, YEA'lar, süperkapasitörlerde ve enerji depolama cihazlarında kullanılabilecek malzemeler olarak da geliştirilebilir.

Sonuç olarak, YEA'ların araştırılması ve uygulanabilirliği çeşitli üretim yöntemleriyle elde edilebilen birçok çalışmada incelense de henüz bu alışımların gelişimleri başlangıç seviyesindedir. Nitekim bu alışımların endüstriyel saha da kullanılabilirliği henüz istenen seviyelere ulaşmamıştır ve bu konuda birçok çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekte bu alanın daha geniş bir uygulama yelpazesi sunması beklenmektedir. Bu çalışmalar, hem akademik anlamda hem de endüstriyel düzeyde daha fazla katkı sağlayacak ve potansiyel kullanım alanlarını daha da genişletecektir. Gelişen teknolojilerle birlikte, daha fazla optimizasyon ve iyileştirme ile YEA'ların gerçek dünyadaki endüstriyel uygulamaların da daha yaygın hale gelmesi beklenebilir.

Kaynakça

- Alaneme, K. K., Bodunrin, O. M. and Oke, R. S. 2016. Processing , alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys : a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 5(4), 384–393. doi:10.1016/j.jmrt.2016.03.004
- Altınok, S., Buscher, M., Beckers, M. and Kalay, Y. E. 2024. Microstructure and Mechanical Properties of CoFeNiCuMn High-Entropy Alloys Produced by Laser Powder Bed Fusion. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 13(4), 711–729. doi:10.1007/s13632-024-01110-0
- Arshad, M., Amer, M., Hayat, Q., Janik, V., Zhang, X., Moradi, M. and Bai, M. 2022. High-Entropy Coatings (HEC) for High-Temperature Applications: Materials, Processing, and Properties. *Coatings*, 12(5), 691. doi:10.3390/coatings12050691
- Berdovsky, Y. N. 2008. *Intermetallics Research Progress*. (Yakov N. Berdovsky, Ed.) (1. edition.). New York: Nova Science Publishers, Inc. doi:2007034989
- Brif, Y., Thomas, M. and Todd, I. 2015. The use of high-entropy alloys in additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 99, 93–96. doi:10.1016/j.scriptamat.2014.11.037
- Bulut, C. 2017. Karbon nanotüp takviyeli bakır matrisli kompozitlerin yeni bir karıştırma tekniği ile üretilmesi ve karakterizasyonu. <https://tez.yok.gov.tr/Ulusal-TezMerkezi/> from retrieved.
- Bulut, C., Fatih, Y., Varol, T., Kaya, G. and Ergüder, T. O. 2024a. Effects of Selective Laser Melting Process Parameters on Structural, Mechanical, Tribological and Corrosion Properties of CoCrFeMnNi High Entropy Alloy. *Metals and Materials International*, (0123456789). doi:10.1007/s12540-024-01694-w
- Bulut, C. and Yıldız, F. 2024. Bibliometric analysis of laser powder bed additive manufacturing of high-entropy alloys: where are we and how far have we come? *Progress in Additive Manufacturing*, (0123456789). doi:10.1007/s40964-024-00840-5
- Bulut, C., Yıldız, F., Varol, T. and Ergüder, T. O. 2024b. Effect of titanium on the structural , mechanical and surface properties of CoCrFeMnNiTi high entropy alloy fabricated by selective laser melting. *Intermetallics*, 169(January), 15. doi:10.1016/j.intermet.2024.108281
- Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P. and Vincent, A. J. B. 2004. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering A*, 375–377(1-2 SPEC. ISS.), 213–218. doi:10.1016/j.msea.2003.10.257
- Caramarin, S., Critina Badea, I., Florin Mosinoiu, L., Mitrica, D., Adriana Serban, B., Vitan, N., Madalina Cursaru, L. and Pogrebnjak, A. 2024. Structural Particularities, Prediction, and Synthesis Methods in High-Entropy Alloys. *Applied Sciences*, 14 (17)(7576). doi:doi.org/10.3390/app14177576
- Chakraborty, S., Gupta, A. K., Roy, D. and Basu Mallick, A. 2020. Nanomechanical properties of mechanically alloyed and spark plasma sintered W-nanoparti-

- culate dispersed Cu-Nb alloys. *Materials Letters*, 274, 128004. doi:10.1016/j.matlet.2020.128004
- Chakraborty, S., Gupta, A. K., Roy, D. and Basumallick, A. 2019. Studies on nano-metal dispersed Cu-Cr matrix composite. *Materials Letters*, 257, 126739. doi:10.1016/j.matlet.2019.126739
- Chen, P., Li, S., Zhou, Y., Yan, M. and Attallah, M. M. 2020. Fabricating CoCrFeMnNi high entropy alloy via selective laser melting in-situ alloying. *Journal of Materials Science and Technology*, 43, 40–43. doi:10.1016/j.jmst.2020.01.002
- Chen, T., Foo, C. and Tsang, S. C. E. 2021. Interstitial and substitutional light elements in transition metals for heterogeneous catalysis. *Chemical Science*, 12(2), 517–532. doi:10.1039/d0sc06496c
- Chen, T. K., Shun, T. T., Yeh, J. W. and Wong, M. S. 2004. Nanostructured nitride films of multi-element high-entropy alloys by reactive DC sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 188–189(1-3 SPEC.ISS.), 193–200. doi:10.1016/j.surfcoat.2004.08.023
- Chen, Y., Liu, W., Wang, H., Xie, J., Zhang, T., Yin, L. and Huang, Y. 2022. Effect of Ti Content on the Microstructure and Properties of CoCrFeNiMnTix High Entropy Alloy. *Entropy*, 24–241(Effect of Ti Content on the Microstructure and Properties of CoCrFeNiMnTix High Entropy Alloy), 1–11. doi:https:// doi.org/10.3390/e24020241
- Çiçek, H. 2018. Magnetron Sıçratma Yöntemi ile Büyütülen Elmas Benzeri Karbon Filmlerin Adezyon ve Çoklu-Çizik Test Davranışlarının Araştırılması. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 209–217. doi:10.21597/jist.407877
- Dada, M., Popoola, P. and Mathe, N. 2021. Recent advances of high entropy alloys for aerospace applications: a review. *World Journal of Engineering*, 20(1), 43–74. doi:10.1108/WJE-01-2021-0040
- Daminabo, S. C., Goel, S., Grammatikos, S. A., Nezhad, H. Y. and Thakur, V. K. 2020. Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems. *Materials Today Chemistry*, 16, 100248. doi:10.1016/j.mtchem.2020.100248
- Eißmann, N., Klöden, B., Weißgärber, T. and Kieback, B. 2017. High-entropy alloy CoCrFeMnNi produced by powder metallurgy. *Powder Metallurgy*, 60(3), 184–197. doi:10.1080/00325899.2017.1318480
- Erdoğan, A. 2018. Yüksek entropili alaşımlarda mikroyapı oluşumu ve alaşım elementlerinin yapıya etkileri. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/> from retrieved.
- Erdogan, A., Günen, A., Gök, M. S. and Zeytin, S. 2021. Microstructure and mechanical properties of borided CoCrFeNiAl_{0.25}Ti_{0.5} high entropy alloy produced by powder metallurgy. *Vacuum*, 183(September 2020). doi:10.1016/j.vacuum.2020.109820

- Fujieda, T., Chen, M., Shiratori, H., Kuwabara, K., Yamanaka, K., Koizumi, Y., Chiba, A. and Watanabe, S. 2019. Mechanical and corrosion properties of CoCr-FeNiTi-based high-entropy alloy additive manufactured using selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 25(October 2018), 412–420. doi:10.1016/j.addma.2018.10.023
- Fujieda, T., Shiratori, H., Kuwabara, K., Kato, T., Yamanaka, K., Koizumi, Y. and Chiba, A. 2015. First demonstration of promising selective electron beam melting method for utilizing high-entropy alloys as engineering materials. *Materials Letters*, 159, 12–15. doi:10.1016/j.matlet.2015.06.046
- Gao, M. C. 2014. Progress in High-Entropy Alloys. *Jom*, 66(10), 1964–1965. doi:10.1007/s11837-014-1136-3
- Gao, M. C., Yeh, J.-W., Peter, K. L. and Yong, Z. 2016. High-Entropy Alloys, Fundamentals and Applications. (M. C. G. · J.-W. Yeh and P. K. L. · Y. Zhang, Eds.). Switzerland: Springer Nature. doi:DOI 10.1007/978-3-319-27013-5
- Gu, Z., Su, X., Peng, W., Guo, W., Xi, S., Zhang, X., Tu, H., Gao, Y. and Wu, H. 2021. An important improvement of strength and ductility on a new type of CoCr_{2.5}FeNi₂TiW_{0.5} high entropy alloys under two different protective gases by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 868. doi:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159088
- Gu, Z., Xi, S. and Sun, C. 2020. Microstructure and properties of laser cladding and CoCr_{2.5}FeNi₂Ti_x high-entropy alloy composite coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 152986. doi:10.1016/j.jallcom.2019.152986
- Güler, Ö., Yılmaz, D., Kanca, M. S., Edalati, K. and Taşgın, Y. 2024. Radiation shielding properties of composites of TiZrNbHfTa refractory high entropy alloy reinforced with TiZrNbHfTaOx high-entropy oxide. *Journal of Alloys and Compounds*, 995(May), 11. doi:10.1016/j.jallcom.2024.174815
- Habashi, F. 2008. Alloys. preparation, properties, Applications. (F. Habashi, Ed.) (First.). Singapore: Wiley-VCH. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=84G2gHwRT6AC&oi=fnd&pg=PP2&dq=what+is+alloys&ots=-rzwlMMobR&sig=c7sniQuFX1XnZl18u9P3_OacaIs&redir_esc=y#v=onepage&q=what is alloys&f=false from retrieved.
- Han, X., Wu, G., Zhao, S., Guo, J., Yan, M., Hong, X. and Wang, D. 2023. Nanoscale high-entropy alloy for electrocatalysis. *Matter*, 6(6), 1717–1751. doi:10.1016/j.matt.2023.03.034
- Joo, S. H., Kato, H., Jang, M. J., Moon, J., Kim, E. B., Hong, S. J. and Kim, H. S. 2017. Structure and properties of ultrafine-grained CoCrFeMnNi high-entropy alloys produced by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 698, 591–604. doi:10.1016/j.jallcom.2016.12.010
- Karaaslan, A. 2010. Mühendislik Alaşımları İçin Faz Diyagramları. Türkiye: Literatür Yayınları.
- Karabacak, A. H., Çanakçı, A., Özkaya, S., Tunç, S. A., Güler, O. and Çelebi, M. 2024. Effect of AlCrCuFeNi high entropy alloy reinforcements with and without

- B4C on powder characteristic, mechanical and wear properties of AA5083 metal-metal composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 1008(July). doi:10.1016/j.jallcom.2024.176627
- Karaca, Y. 2019. Yüksek Entropili CrMnFeCoNiAl Alaşımlarına Bor İlavesinin Etkisi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/> from retrieved.
- Li, B., Zhang, L., Xu, Y., Liu, Z., Qian, B. and Xuan, F. 2020. Selective laser melting of CoCrFeNiMn high entropy alloy powder modified with nano-TiN particles for additive manufacturing and strength enhancement : Process , particle behavior and effects. *Powder Technology*, 360, 509–521. doi:10.1016/j.powtec.2019.10.068
- Li, C. W., Chang, K. C., Yeh, A. C., Yeh, J. W. and Lin, S. J. 2018. Microstructure characterization of cemented carbide fabricated by selective laser melting process. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 75(May), 225–233. doi:10.1016/j.ijrmhm.2018.05.001
- Liu, M., Peng, Q. qing, Zhu, X. wei, Huang, Y. fei, Wang, H. dou, Piao, Z. yu, Ma, G. zheng, Luo, X. ping and Qiao, Q. sen. 2023. Development of an Alternative to the Plasma Cladding Process: the Plasma Spray Melting Technology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(5), 1362–1377. doi:10.1007/s11666-023-01574-6
- Lu, Z. P., Wang, H., Chen, M. W., Baker, I., Yeh, J. W., Liu, C. T. and Nieh, T. G. 2015. An assessment on the future development of high-entropy alloys: Summary from a recent workshop. *Intermetallics*, 66, 67–76. doi:10.1016/j.intermet.2015.06.021
- Ma, Y., Ma, Y., Wang, Q., Schweidler, S., Botros, M., Fu, T., Hahn, H., Brezesinski, T. and Breitung, B. 2021. High-entropy energy materials: Challenges and new opportunities. *Energy and Environmental Science*, 14(5), 2883–2905. doi:10.1039/d1ee00505g
- Manzoni, A., Daoud, H., Mondal, S., Van Smaalen, S., Völkl, R., Glatzel, U. and Wanderka, N. 2013. Investigation of phases in Al₂₃Co₁₅Cr₂₃Cu₈Fe₁₅Ni₁₆ and Al₈Co₁₇Cr₁₇Cu₈Fe₁₇Ni₃₃ high entropy alloys and comparison with equilibrium phases predicted by Thermo-Calc. *Journal of Alloys and Compounds*, 552, 430–436. doi:10.1016/j.jallcom.2012.11.074
- Miracle, D. B. 2015. Critical Assessment: Critical Assessment 14: High entropy alloys and their development as structural materials. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 31(10), 1142–1147. doi:10.1179/1743284714Y.0000000749
- Miracle, D. B., Miller, J. D., Senkov, O. N., Woodward, C., Uchic, M. D. and Tiley, J. 2014. Exploration and development of high entropy alloys for structural applications. *Entropy*, 16(1), 494–525. doi:10.3390/e16010494
- Miracle, D. B. and Senkov, O. N. 2017. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511. doi:10.1016/j.actamat.2016.08.081
- Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan, S. and Bhattacharjee, P. P. 2019. High-Entropy Alloys. (B. S. Murty, J. W. Yeh, S. Ranganathan and P. P. Bhattacharjee, Eds.)

- High-Entropy Alloys (Second Edi.). United States: Elsevier, Matthew Deans. <https://www.elsevier.com/books-and-journals> from retrieved.
- Ozalp, A., Okuyucu, C., Koc, B., El-Atwani, O. and Aydogan, E. 2024. Development and directed energy deposition of high strength Hf₅Mo₁₅Nb₃₅Ta₂₅Ti₂₀ refractory high entropy alloys. *Materials Characterization*, 209(September 2023), 113679. doi:10.1016/j.matchar.2024.113679
- Ozkan, D. and Karaoglanli, A. C. 2021. High entropy alloys: Production, properties and utilization areas. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8(1), 164–181. doi:10.31202/ecjse.800968
- Öztürk, S., Önal, S., Sünbül, S. E., Şahin, Ö., İçin, K. and Furkan, A. 2022. Journal of Alloys and Compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, 903(903), 163867. doi:10.1016/j.jallcom.2022.163867
- Park, J. M., Choe, J., Kim, J. G., Bae, J. W., Moon, J., Yang, S., Kim, K. T., Yu, J., Kim, H. S., Min, J., Choe, J., Kim, J. G., Bae, J. W. and Moon, J. 2020. Superior tensile properties of 1 % C-CoCrFeMnNi high-entropy alloy additively manufactured by selective laser melting, 3831. doi:10.1080/21663831.2019.1638844
- Pickering, E. J. and Jones, N. G. 2016. High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects. *International Materials Reviews*, 61(3), 183–202. doi:10.1080/09506608.2016.1180020
- Pushcharovsky, D. Y. 2023. Mineralogical Crystallography: II. Simple Materials, Native Metals, and Intermetallic Compounds. *Crystallography Reports*, 68(Suppl 1), S18–S40. doi:10.1134/S1063774523601521
- Ranganathan, S. 2003. Alloyed pleasures: Multimetallc cocktails. *Current Science*, 85(10), 1404–1406.
- Sauthoff, G. 2008. Intermetallics. (F. B. Pickering, K. H. Matucha, R. W. Cahn, G. Petzow and G. Effenberg, Eds.). Germany: Wiley-VCH. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=Oe_POhzOIQkC&oi=fnd&pg=PP2&dq=what+is+intermetallics+phase&ots=2-VSLd1J25&sig=E7IYmGVP-IX3VJ09y0t-kaVq-Yc8&redir_esc=y#v=onepage&q=what is intermetallics phase&f=false from retrieved.
- Savaşkan, T. 2009. “Malzeme Bilimi ve Muayenesi”, Genişletilmiş ve Geliştirilmiş” (5. baskı.). Trabzon: Celepler Matbaacılık.
- Senkov, O. N., Wilks, G. B., Miracle, D. B., Chuang, C. P. and Liaw, P. K. 2010. Refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*, 18(9), 1758–1765. doi:10.1016/j.intermet.2010.05.014
- Sharma, A. S., Yadav, S., Biswas, K. and Basu, B. 2018. High-entropy alloys and metallic nanocomposites: Processing challenges, microstructure development and property enhancement. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 131(April), 1–42. doi:10.1016/j.mser.2018.04.003
- Shu, F. Y., Liu, S., Zhao, H. Y., He, W. X., Sui, S. H., Zhang, J., He, P. and Xu, B. S. 2018. Structure and high-temperature property of amorphous composite coating sy-

- ntesized by laser cladding FeCrCoNiSiB high-entropy alloy powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 731, 662–666. doi:10.1016/j.jallcom.2017.08.248
- Şimşir, C. 2022. “Yeni Nesil Metal Alaşımlar, Alaşım Tasarımı ve Yarattığı Fırsatlar / Metal Malzemelerin Gelişimi”. Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (TTGV) / İdeaport data. desing. dijital. Ankara. doi:https://ttgv.org.tr/meda-
a/2024/01/2021-faaliyet-raporu.pdf
- Sonar, T., Ivanov, M., Trofimov, E., Tingaev, A. and Suleymanova, I. 2024. An overview of microstructure, mechanical properties and processing of high entropy alloys and its future perspectives in aeroengine applications. *Materials Science for Energy Technologies*, 7(July 2023), 35–60. doi:10.1016/j.mset.2023.07.004
- Srivatsan, T. S. and Manoj, G. 2020. High Entropy Alloys/Innovations, Advances, and Applications. (M. G. T.S. Srivatsan, Ed.) (First.). New York: Taylor & Francis Group, LLC. https://lccn.loc.gov/2019054140 from retrieved.
- Sun, M., Wang, B., Zhang, J. and Lu, B. 2023. In-situ synthesis of CoCrFeMnNi high-entropy alloy by selective laser melting. *Intermetallics*, 156, 107866. doi:doi.
org/10.1016/j.intermet.2023.107866
- Suryanarayana, C. 2001. Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46(1–2), 184. doi:https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9
- Tsai, K. Y., Tsai, M. H. and Yeh, J. W. 2013. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 61(13), 4887–4897. doi:10.1016/j.actamat.2013.04.058
- Tsai, M. H., Chang, K. C., Li, J. H., Tsai, R. C. and Cheng, A. H. 2016. A second criterion for sigma phase formation in high-entropy alloys. *Materials Research Letters*, 4(2), 90–95. doi:10.1080/21663831.2015.1121168
- Uporov, S. A., Ryltsev, R. E., Estemirova, S. K., Sterkhov, E. V. and Chtchelkatchev, N. M. 2021. Stable high-entropy TiZrHfNbVCrMoMnFeCoNiAl Laves phase. *Scripta Materialia*, 193, 108–111. doi:10.1016/j.scriptamat.2020.10.049
- Vaidya, M., Guruvadyathri, K. and Murty, B. S. 2019. Phase formation and thermal stability of CoCrFeNi and CoCrFeMnNi equiatomic high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 774, 856–864. doi:10.1016/j.jallcom.2018.09.342
- Varol, T. 2012. AA2024 Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi. https://tez.
yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi from retrieved.
- Wang, J., Zhang, M., Wang, H., Li, Z., Cheng, X., Zhang, B., Li, J. and Ran, X. 2022. Mitigating hot-cracking of laser melted CoCrFeNiMnTi_x high-entropy alloys. *Materials Letters*, 314(January), 131771. doi:10.1016/j.matlet.2022.131771
- Wang, X. F., Zhang, Y., Qiao, Y. and Chen, G. L. 2007. Novel microstructure and properties of multicomponent CoCrCuFeNiTi_x alloys. *Intermetallics*, 15(3), 357–362. doi:10.1016/j.intermet.2006.08.005
- Wang, X. J., Xu, M., Liu, N. and Liu, L. X. 2021. The formation of sigma phase in the CoCrFeNi high-entropy alloys. *Materials Research Express*, 8(7).

doi:10.1088/2053-1591/ac0a5c

- Won, J. W., Lee, S., Park, S. H., Kang, M., Lim, K. R., Park, C. H. and Na, Y. S. 2018. Ultrafine-grained CoCrFeMnNi high-entropy alloy produced by cryogenic multi-pass caliber rolling. *Journal of Alloys and Compounds*, 742, 290–295. doi:10.1016/j.jallcom.2018.01.313
- Xu, X. D., Chen, S. Y., Ren, Y., Hirata, A., Fujita, T., Liaw, P. K. and Chen, M. W. 2019. Temperature-dependent compression behavior of an Al_{0.5}CoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Materialia*, 5(February). doi:10.1016/j.mtla.2019.100243
- Yang, D., Liu, Y., Jiang, H., Liao, M., Qu, N., Han, T., Lai, Z. and Zhu, J. 2020. A novel FeCrNiAlTi-based high entropy alloy strengthened by refined grains. *Journal of Alloys and Compounds*, 823. doi:10.1016/j.jallcom.2020.153729
- Ye, Q., Feng, K., Li, Z., Lu, F., Li, R., Huang, J. and Wu, Y. 2017. Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating. *Applied Surface Science*, 396, 1420–1426. doi:10.1016/j.apsusc.2016.11.176
- Ye, Y. F., Wang, Q., Lu, J., Liu, C. T. and Yang, Y. 2016. High-entropy alloy: challenges and prospects. *Materials Today*, 19(6), 349–362. doi:10.1016/j.mattod.2015.11.026
- Yeh, J. W. 2006. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie: Science des Materiaux*, 31(6), 633–648. doi:10.3166/acsm.31.633-648
- Yeh, J. W. 2013. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *Jom*, 65(12), 1759–1771. doi:10.1007/s11837-013-0761-6
- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Tsau, C. H. and Chang, S. Y. 2004. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303. doi:10.1002/adem.200300567
- Yılmaz, R. 2021. Havacılık Uygulamalarına Yönelik Yenilikçi Yüksek Entropili Süper alaşımların Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/> from retrieved.
- Yong, Z. 2019. High entropy materials. (Yong Zhang, Ed.) *Current Science* (3rd ed.). Gateway East, Singapore: © Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1
- Yuan, B., Dong, Y., Li, C., Yang, Y. and Zhang, P. 2021. Excellent strengthening effect of L12 precipitates on the selective laser melting Al_{0.3}CoCrFeNiCu high entropy alloy via annealing treatment. *Materials Letters*, 304(July), 130628. doi:10.1016/j.matlet.2021.130628
- Zhang, C., Zhang, F., Chen, S. and Cao, W. 2012. Computational thermodynamics aided high-entropy alloy design. *Jom*, 64(7), 839–845. doi:10.1007/s11837-012-0365-6
- Zhang, Y. and Xing, Q. 2020. High Entropy Alloys: Manufacturing Routes. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, 327–338. doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.12123-X

- Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K. and Lu, Z. P. 2014. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61(September 2013), 1–93. doi:10.1016/j.pmatsci.2013.10.001
- Zhao, Y., Lau, K. B., Teh, W. H., Lee, J. J., Wei, F., Lin, M., Wang, P., Tan, C. C. and Ramamurty, U. 2021. Compositionally graded CoCrFeNiTi_x high-entropy alloys manufactured by laser powder bed fusion: A combinatorial assessment. *Journal of Alloys and Compounds*, 883, 160825. doi:10.1016/j.jallcom.2021.160825
- Zhou, R., Liu, Y., Zhou, C., Li, S., Wu, W., Song, M., Liu, B., Liang, X. and Liaw, P. K. 2018. Intermetallics Microstructures and mechanical properties of C-containing FeCoCrNi high- entropy alloy fabricated by selective laser melting. *Intermetallics*, 94(November 2017), 165–171. doi:10.1016/j.intermet.2018.01.002

BÖLÜM 4

SÜPERİLETKEN KABLOLARIN YAPISI VE GÜNCEL GELİŞMELER

Yağmur ATALAYIN¹

Zuhal OKTAY²

Can COŞKUN³

1 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, 2217104010@std.idu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-6966-7853>

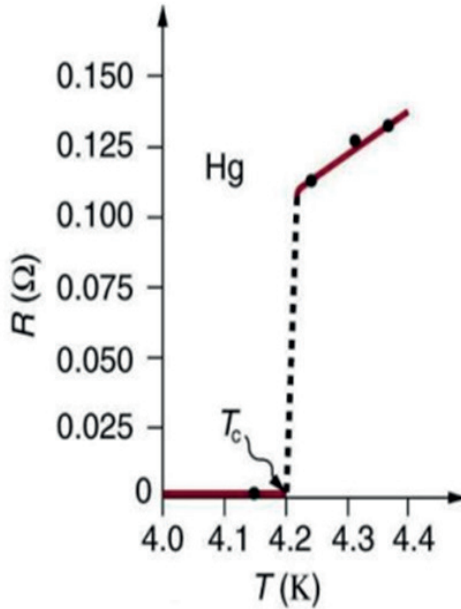
2 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, zuhal.oktay@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>

3 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, can.coskun@idu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>

1. Giriş

Bugünün koşullarında elektrik enerjisi toplumun temel ihtiyaçları arasında en önemli kriterlerden biri olmuştur . Bu nedenle çeşitli kaynaklardan enerji ihtiyacı karşılanmış ve minimum kayıpla tüketiciye aktarılmaya çalışılmıştır. Elektrik enerjisinin çıkış noktasından kullanıcıya aktarılması esnasında en mühim noktalardan bir tanesi elektrik enerjisinin mümkün olabilecek minimum kayıpla aktarılması, başka bir önemli nokta da elektrik enerjisinin maximum kaliteli şekilde tüketiciye aktarılmasıdır. Bu nedenlerden dolayı elektrik enerjisi kalitesi kavramı ortaya atılmıştır. Elektrik enerjisi kalitesi kavramı, elektrik enerjisinin devamlılığı, akım ve gerilim fonksiyonlarının sinüs dalgasına konumu, frekansın aynı kalması gibi olayları içermektedir. Ülkelerdeki elektrik enerji kalitesi kavramının en iyi konumda olması o ülkeler için refah düzeyinin de o kadar iyi olması şeklinde düşünülebilir, bundan dolayı geçmişten bu yana süperiletken malzemeler üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Eroğlu, 2009).

İlk süperiletken malzeme 8 Nisan 1911 senesinde Lieden’de Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes ve araştırma arkadaşlarının desteği ile bulunmuştur (Onnes, 1911). Onnes yaptığı araştırmaların ışığında cıva elementinin sıvı helyum kullanarak 4,2 K’ye kadar sıcaklığı düşürüldüğünde elektriksel direncinin sıfıra ($<10^{-27} \Omega m$) yakınlığına gözlemlemiştir (URL 1). Aşağıda cıvanın sıcaklık-direnç grafiği verilmiştir.



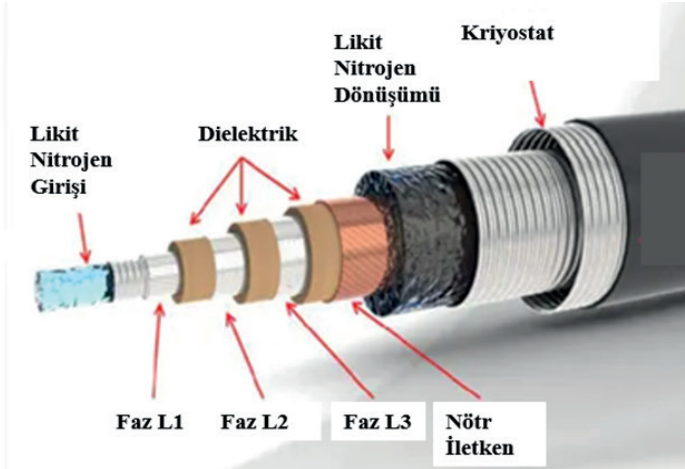
Şekil 1 Cıvanın sıcaklık-direnç grafiği (URL 1)

1986 senesinde Bednorz ve Müller aracılığıyla Zürih'te IBM Laboratuvarlarında Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri (YSS) şeklinde isimlendirilen yeni bir süperiletken malzeme keşfedilmiştir (LBCO-Lantan baryum bakır oksit) (Bednorz ve Müller, 1986). En önemli Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri YBCO (itriyum baryum bakır oksit) ve BSCCO (bizmut stronsiyum kalsiyum bakır oksit)'dir. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerin buluşundan sonra sıcaklık düşürme işlemi sıvı azotla yapılmaya başlanmış ve kritik akım ölçüleri tercih edilen değerlere yükselmiş, bununla beraber süperiletken malzemelerin kullanım alanları artmıştır. 1986'dan bugüne çok sayıda makale yazılmıştır. Süperiletken malzemeler eşsiz niteliklerinden dolayı elektrik enerjisi güç sistemleri, tıp, ulaştırma ve teknoloji gibi çoğu kulvarda yer almıştır (Hartikainen ve ark., 2004; Biswas ve ark., 2013).

1962'de Westinghouse aracılığıyla, ilk ergonomik süperiletken mıknatıs oluşumuna olanak sağlayan ve niyobyum-titanyum alaşımından oluşan süperiletken kablo üretimi yapıldı. Aynı sene Josephson iki süperiletken elektrot arasına koyulmuş ince ve elektrik geçirmeyen oksit tabakadan oluşan "Josephson eklemi" şeklinde isimlendirilen anahtarı keşfetti ve bu anahtarlar (süperiletken kuantum girişim aygıtı) olarak adlandırıldı (Josephson, 1962).

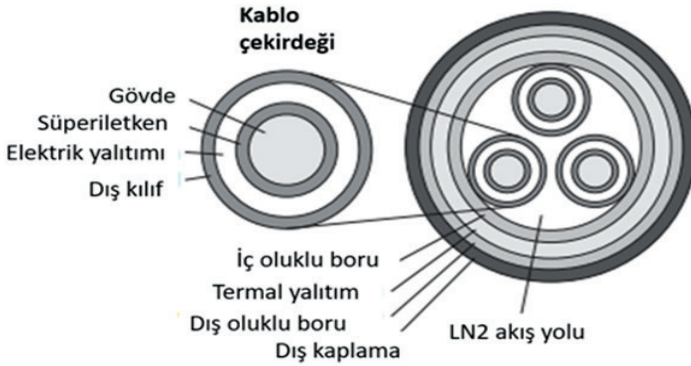
2. Süper İletken Kablo ve Yapısı

Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri elektrik iletimi için umut verici bir teknolojidir. Bunun en mühim sebebi Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri kabloların hali hazırda bulunan bakır kablolarla karşılık üç ila beş kat kadar fazla akım iletme kapasitesi bulundurmasıdır (Rose, 1999). Aşağıda süperiletken kabloların iç yapısı görülmektedir.



Şekil 2 Süperiletken Kablo İç Yapısı (URL 2)

Bir başka süper iletken kablonun yapısı Şekil 3’te gösterilmektedir. İletken, Bi-bazlı süper iletken tellerin bir alan üzerine spiral şeklinde döşenmesiyle oluşturulur. Polipropilen Lamine Kağıt (PPLP), iyi yalıtım gücü ve düşük sıcaklıklarda düşük dielektrik kaybı nedeniyle elektrik yalıtımı için kullanılır. Sıvı nitrojen, soğutucuya ek olarak bileşik bir yalıtım görevi görür [10]. Aşağıda süperiletken kablo iç katmanları gösterilmiştir.



Şekil 3 Süperiletken Kablo Yapısı (Masuda ve ark., 2005)

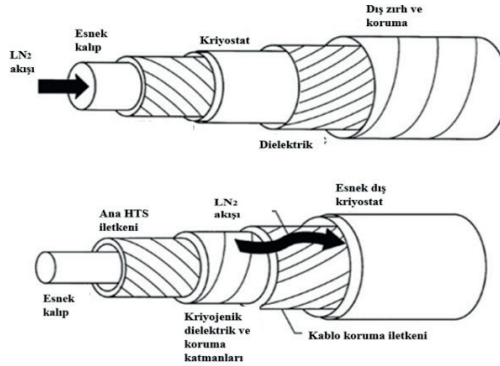
Yalıtım katmanının dış tarafında, aynı iletken malzemeden süper iletken bir tel, bir kalkan katmanı oluşturmak üzere spiral şeklinde sarılır. Her bir çekirdeğin bir koruma katmanı, kabloların her iki ucunda birbirine bağlanır, böylece iletkenlerdeki ile aynı büyüklükte bir elektrik akımı, kalkan katmanında ters yönde indüklenir, böylece dışarıdaki elektromanyetik alan sızıntısı azaltılır. Üç damar birbirine sarılır ve bu, çift katmanlı oluklu borunun içine yerleştirilir. Isı yalıtımı, iç ve dış oluklu borular arasına yerleştirilir ve burada, ısı yalıtım performansını iyileştirmek için bir vakum durumu korunur (Masuda ve ark., 2005).

Süperiletken kablonun seçkin özellikleri;

- Süperiletken malzeme oldukça büyük değerlerde akım taşıyabilir, çok daha fazla manyetik alan sağlayabilir ve elektrik akımını direnç kaynaklı enerji kayıpları olmadan taşıyabilir.
- Süperiletken kablolar, benzer boyutlardaki diğer kablolarla kıyasla çok daha fazla akım iletebilir.
- Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinden yararlanılan süperiletken motor, transformatör gibi uygulamalarda, hali hazırda kullanılan cihazlara kıyasla benzer güç için boyutlar ve enerji kayıpları yarı yarıya azalmaktadır (Bozdağ, 2011).

Süperiletken kablounun, metropol alanlardaki iletim kapasitesi eksikliğine yönelik çözümlerden biri olması bekleniyor. Esasları; kompakt boyutta büyük iletim kapasitesi, küçük iletim kaybı, kablounun dışına elektromanyetik alan sızıntısı olmaması ve küçük empedans. Bu özellikler, elektrik şebekelerinin güvenilirliğinin ve ekonomik rekabet gücünün geliştirilmesinde etkilidir. Son zamanlarda, süper iletken kablounun gerçek ağ sistemlerine uygulanmasını ve ticarileştirilmesini hızlandırmak için dünya çapında birçok tanıtım projesi başlatılmıştır (Masuda ve ark., 2005).

Süperiletken kablo kompakt olduğundan ve yüksek miktarda elektrik gücü iletebildiğinden, çok sayıda borunun ve diğer materyallerin bulunduğu sıkışık yer altı alanını daha etkin bir şekilde kullanabilir. Ayrıca Süperiletken kablo genel inşaat maliyetini geleneksel kablolarla göre azaltır. Çift tabanlı süperiletken tellerin geliştirilmesinde, yeni geliştirilen basınçlı sinterleme yöntemi, yüksek kritik akıma sahip düşük maliyetli uzun telin seri üretimine yardımcı olmuştur. Süper iletken telin kritik akımı tel başına 130 A'yı (4 mm x 0,2 mm) aşan değerlere ve kabloyu kullanışlı hale getirmek için önemli bir mekanik özellik olan 140 MPa'lık artan bir gerilme direncine sahiptir. Ayrıca, seri üretildiğinde bile 1 km uzunluğundaki tel için tek tip özellikler elde edilebilir (Masuda ve ark., 2005). Aşağıdaki şekilde süperiletken kablo için farklı LN2 akış çalışması görülmektedir.



Şekil 4 Süperiletken Kablo İçin Farklı LN2 Akış Çalışması (Pamidi ve ark., 2015)

Süperiletken kabloların endüstriyel uygulamalarının, malzemelerinin ve kriyojenik teknoloji gibi destekleyici teknolojilerin gelişmesi nedeniyle uygulanabilir olduğu giderek kanıtlanabilir hale gelmiştir. HTS kablolar umut verici bir gelecek vadetmektedir ve metropol alanlarda elektrik şebekesini yükseltmek için daha uygun hale gelmiştir (Lee ve ark., 2019; Malozemoff ve ark., 2015).

Süperiletken kablolar giderek daha rekabetçi hale gelmektedir. Geleneksel iletim hatlarına ve kablolarla kıyasla, daha düşük voltaj seviyelerinde ve daha az

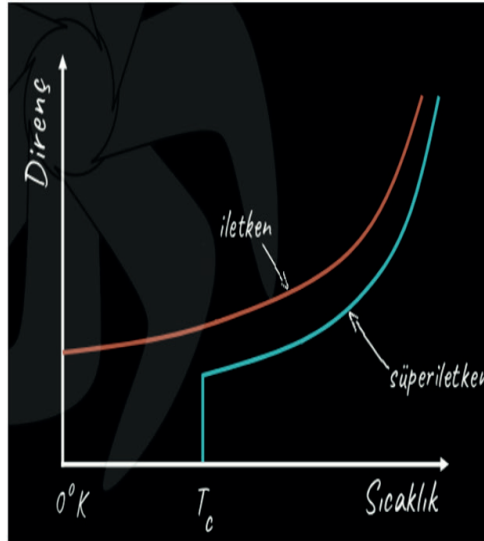
güç kaybıyla uzun mesafelerde güç aktarma yetenekleri gibi üstün avantajlara sahiptirler (Ballarino ve ark., 2016). Bu nedenle, SC'lerin büyük ölçekli uygulamaları, benzersiz fiziksel özelliklerinden dolayı önemli araştırmaların odak noktası olmuştur (Xiang ve ark., 2022).

Geleneksel enerji nakil kablolarına kıyasla, süperiletken kabloların bazı avantajları vardır. Bu avantajlar şunları içerir: Süper iletken kablolar, büyük DC akımları direnç göstermeden taşıyabilir. Soğutma maliyeti hesaba katıldıktan sonra bile toplam işletme kaybı, geleneksel kablolarının yalnızca %50-60'ı kadardır ve bu da kablonun enerji tasarruflu olduğunu gösterir. Süper iletken kablolar şu anda aynı kesitteki geleneksel kabloların 5 ila 6 katı taşıma kapasitesine sahip olduğundan, iletim sisteminin alanı ve alan gereksinimleri azaltılabilir (Fietz ve ark., 2016).

Malzemeye göre farklı olan belirli bir kritik sıcaklık (T_c) sınır değerinin altında süperiletkenlik durumuna geçiş iki ana durumla kendini gösterir:

1-İlk başta, süperiletken malzeme elektrik akımına direnç göstermemeye başlar ve bu durumda direnç 0'a düştüğünden dolayı elektrik, malzeme içerisinden geçerken hiç kayba uğramadan iletilir.

2-Diğer bir durum, belirli bir değere kadar harici manyetik alanlar süperiletken malzemeye geçiş yapamaz ama yüzeyinde kalır, bu durum ilk defa 1933'de Alman bilim adamı Walther Meissner aracılığıyla gözlemlenmiştir (URL 3). Aşağıda iletken ve süperiletken malzemelerin sıcaklıkla değişen elektriksel direnç davranışı verilmiştir.



Şekil 5 İletken ve Süperiletken Malzemelerin Sıcaklıkla Değişen Elektriksel Direnç Davranışı (URL 3)

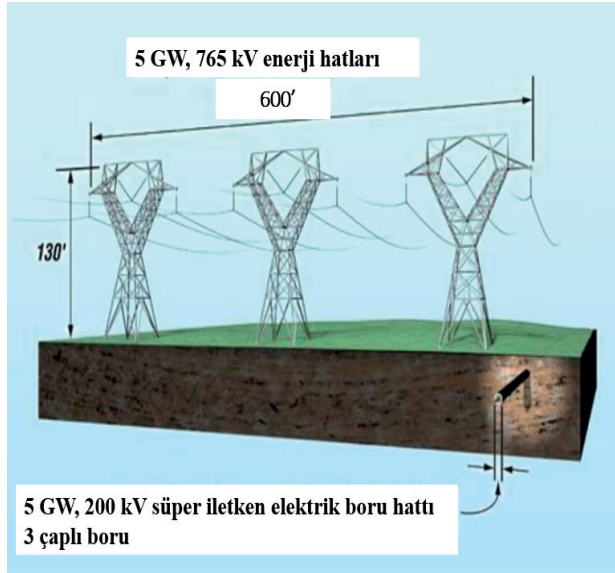
3. Süper İletken Kablo Gelişimi ve Uygulama Projeleri

1970 yıllarında sıvı He soğutmalı Düşük Sıcaklık Süperiletken (DSS) kablolar için düzenlenen deneyler teknik açıdan başarılı olmuştur (Grant, 1997).

Ama bu kablolar 5-10 GVA üstünde güç aktarımları için ekonomik açıdan kullanılabilir. Sıvı N₂ soğutmalı Yüksek Sıcaklık Süperiletken kablolar ise kritik değer 300-500 MVA civarındadır (Rahman ve Nassi, 1997).

Hali hazırdaki sıvı N₂ soğutmalı Bi-2223/Ag süperiletken şeritler yaklaşık olarak 0.1 T'lık düşük alan sınırları içerisindedir. Danimarka'da, 30 m boyunda 3-fazlı, 30 kV, 104 MVA'lık Yüksek Sıcaklık Süperiletken kablo Kopenhag elektrik santralinde hazırlanmış ve teste tabii tutulmuştur (Willén ve ark., 2002). Japonya'da ise 100 m boyunda 66 kV/1 kA / 114 MVA'lık 3-fazlı kablo 1 sene süresince teste tabii tutulmuştur (Watanabe ve ark., 2003; Narlikar, 2004).

Aşağıdaki şekilde Tres Amigas Projesinden bir görsel verilmiştir. Bu projede 5 MW'lık istasyon için tercih edilecek olan süperiletken kablolar yerine geleneksel kablolar kullanılmış olsaydı ancak 765 kW'lık bir santralin elektrik enerjisini aktarabilecekti (URL 4).



Şekil 6 Tres Amigas Projesi (URL 4)

Amerika Birleşik Devletleri'nde süper iletken kabloları üzerine geliştirme çalışmaları Birleşik Devletler Enerji Departmanı (DOE) aracılığıyla "Superconductivity Partnership Initiative (SPI)" projesi ile desteklenmektedir. Detroit'te gerçekleştirilen 120 metre boyundaki süper iletken kablo uygulaması başarıyla sonuçlanmamış, ancak Shouthwire Şirketinin 30 metre boyundaki

kablo projesi başarılı olmuştur (Okutan, 2012).

Avrupa Birliğinde ise 6. Çerçeve Programı içerisinde bir Fransız firması olan Nexan önderliğinde Avrupa Birliği'nden 7 kurumun katılımıyla 2004 senesinde "Super 3C" projesi olarak başlanmış ve 2009 senesinde sonuca varılmıştır. Katılımcı ülke ve kuruluşlar: Fransa (Nexan), Almanya (EON AG ve Z-BF), Finlandiya (Tempere Teknoloji Üniversitesi), Slovakya (Slovak Academy of Sciences, Institute of Electric Engineering), İspanya (Instituto de Ciencia de Materials de Barcelona), İspanya (Lebian Tecnia) dır. Bu proje ile ikinci kuşak HTS şeritler kullanarak 17 MW güç iletme kapasitesine sahip 30 metre boyun-daki kablo başarılı bir biçimde test edilmiştir (Okutan, 2012).

Uzak doğu ülkelerinden Japonya'da ise, Super-GM Projesi kapsamında, CRIEPI ve Furukawa Electric Co., Ltd., CRIEPI laboratuvarında 500 metre, 77 kV sınıfı tek damarlı test kablosu inşa edildi ve uzun vadeli deneyler yapıldı (Okutan, 2012).

Bir diğer uzak doğu ülkesi Güney Kore'de "Dream of Advanced Power System by Applied Superconductivity Technologies (DAPAS)" Programı öncülüğünde 30 m klasmanında süper iletken kablo geliştirilmiştir (Okutan, 2012). Çin Yunyan projesi ile 33.50 m, 35 kV, 121 MVA yüksek sıcaklıklı süper iletken kabloyu mevcut ağına monte etme çalışmalarını başarmıştır (Okutan, 2012). Görüldüğü gibi bütün dünyada süper iletken kablo projeleri büyük ölçüde desteklenmekte ve süper iletken kablo teknolojisi oldukça hızlı şekilde gelişmektedir. Birçok gelişmiş ülke kendi süperiletken kablo teknolojisini geliştirmekte ve bunu uygulama yolunda ilerlemektedir.

Ülkemizde süper iletken tel ve şerit üzerine birçok çalışma yapılmıştır ve hala yapılmaktadır, dolayısıyla bu çalışmalar sonucunda belirli bilgi birikimleri ve bilimsel yayınlar ortaya çıkmaktadır. Fakat süper iletken kabloların yapımı zor olmasa dahi, kablonun elektro manyetik tepkisini belirleyecek deneyleri yapmak hem de teorik altyapıyı oluşturmak kolay değildir. Bir diğer mühim durum ise kablo çalışmalarının genelde gelişmiş firmaların AR-GE departmanları ya da günlük yaşantımızda birtakım değişikliklere yol açacak büyük ölçekli projelerle yürütülmesidir (Okutan, 2012).

Süper iletkenlerin teknolojik çalışmalarda yer edinmesinin önündeki en mühim zorluk soğutma noktasında maliyetlerinin fazla oluşudur. Süper iletkenler doğru akımı direnç olmadan aktarırken alternatif akıma karşı az da olsa direnç uygulamaktadırlar. Uygulanan direnç ısıya dönüşmektedir ve ortaya çıkan ısı iletkeninin soğutma maliyetini artırmaktadır. Süper iletkenlerin önümüzdeki senelerde en mühim ticari çalışmalarından ikisi süper iletken kablo ve rüzgar türbinleri için jeneratörler olarak düşünülmektedir (URL 5).

Japonya'daki bir çalışmada ise; süper iletken besleme kablosu, soğutma işleminde oda sıcaklığından sıvı nitrojen sıcaklığına kadar büzülür. Bir de-

miryolu hattına uzun bir süper iletken besleme kablosu yapıldığında, soğutma kuvvetinden dolayı kablounun büzülmesine karşı karşı önlemlerin dikkate alınması gerekir. Test pistinde 300 m sınıfında kablo döşemenin uygun yöntemi rapor edilmektedir. Ayrıca kablounun kurulumundan sonra tüm uzunluğu boyunca çekilen X-ray radyografisinde herhangi bir burulma ve kopma noktası görülmediğinden yöntemin bu kablo için uygun olduğunu da bildirilmektedir (Tomita ve ark., 2018). Aşağıda bu projeyle alakalı kablo görseli verilmiştir.



Şekil 7 Offset noktası (Tomita ve ark., 2018)

4. Sonuçlar

Çalışma neticesinde daha kolay ve daha kısa kurulum süresi yüksek sıcaklıklı süperiletken kabloların en büyük avantajlarından birisidir. HTS kabloları kompakt olduğundan ve mevcut gaz, petrol, su veya elektrik koridorlarından ya da karayolu veya demiryolu geçiş hakları boyunca yeraltından geçirilebildiğinden, şebeke operatörleri daha kısa kurulum süresinden faydalanabilir. Ek olarak, HTS kabloları aktif olarak soğutulur ve çevredeki ortamdan termal olarak bağımsızdır, bu da kurulumlarını kolaylaştırır.

Bu yönler, daha yüksek kapasiteli iletim koridorlarının önünü açmaktadır. Bununla birlikte, aynı koridorları paylaşan altyapılar üzerinde manyetik alan etkisinin dikkatli bir analizi yapılacaktır.

Çevre üzerinde önemli ölçüde pozitif etki oluştururlar. Kablolar üzerinden konvansiyonel kablolarla göre kompaktlık ve daha yüksek kapasiteli güç iletimi sağlayan çok daha yüksek akım yoğunluk seviyelerine ulaşılması, operatörler ve çevre için önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Bir süper iletken sistem, kablolar arasında büyük bir ayırım gerektirmemesinin bir sonucu olarak, bir yer altı tesisatında daha az yer kaplar.

Bir diğer önemli özellik ise yüksek güç taşıma kapasitesidir. Daha yüksek akım yoğunluğu seviyelerine ulaşmak, yüksek kapasitelerde toplu güç aktarımını kolaylaştırmaya devam ederken operasyonel gerilimlerin azaltılabileceği anlamına gelir. Daha düşük çalışma voltajları, kablounun her iki ucunda gerekli olan elektrikli ekipmanın boyutunu ve hacmini azaltır.

Referanslar

- Ballarino A., Bruzek C., Ditmar N., Giannelli S., Goldacter W., Grasso G., Grili F., Haberstroh C., Holé S., Lesur F., Marian A., Martínez-Val J., Martini L., Rubbia C., Salmieri D., Schmidt F., Tropeano M., 2016 The BEST PATHS project on MgB₂ superconducting cables for very high power transmission. *IEEE Trans Appl Supercond* 26;3:1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2016.2545116>.
- Bednorz, J. G., Müller, K. A., 1986 Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system, *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 64:2;189-193
- Biswas, M., Azim, S., Saha, T. K., Zobayer, U., Urmi, M. C., 2013 Towards Implementation of Smart Grid: An Updated Review on Electrical Energy Storage Systems, *Smart Grid and Renewable Energy*, 4;122-132.
- Bozdağ H.Ö., 2011 *Süperiletken Senkron Generatörün Uçlarında Üç Fazlı Simetrik Kısa Devre Arızası Simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eroğlu, H., 2009 *Bir Dağıtım Şebekesinin Güç Kalitesi ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Fietz WH, Wolf MJ, Preuss A, Heller R, Weiss K-P. 2016 High-Current HTS Cables: Status and Actual Development. *IEEE Trans Appl Supercond*. 26;4:1–5.
- Grant, P. M., 1997 Superconductivity and electric power: promises, promises ... past, present and future *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 7;2:112-113.
- Hartikainen, T., Lehtonen, J., Mikkonen, R., 2004 Reduction of greenhouse-gas emissions by utilization of superconductivity in electric-power generation, *Applied Energy*, 78:2;151-158
- Josephson, B. D., 1962 Possible new effects in superconductive tunnelling . *Phys. Lett*. 1 7:251–253.
- Lee C., Choi J., Yang H., Parkı M., Iwakuma M., 2019 Economic evaluation of 23 kV tri-axial HTS cable application to power system.” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 29;5:1-7.
- Masuda, T., Yumura H., Watanabe M., Takigawa H., Ashibe Y., Suzawa C., Kato T., Okua K., Yamada Y., Hiroso M., Yatsuka K., Sato K., Isojima S., 2005 High temperature superconducting cable technology and development trends. *SEI Teknik İnceleme* 59;7;13-19.
- Malozemoff AP, Yuan J, Rey CM. 2015 High-temperature superconducting (HTS) AC cables for power grid applications. *In: Superconductors in the power grid*. Woodhead Publishing 133-188.
- Narlikar, A. V., 2004 High Temperature Superconductivity. *Engineering applications*, Springer.
- Onnes, H. K., 1911 The superconductivity of mercury, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*

- Okutan, M., 2012. Yüksek sıcaklık üstün iletken güç iletim kablolarının elektromanyetik analizi ve alternatif akım kayıplarının hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı Rize.
- Pamidi, S. Kim, C.H., Graber, L. 2015 High-temperature superconducting (HTS) power cables cooled by helium gas. *Superconductors in the Power Grid, Materials and Applications Woodhead Publishing Series in Energy*, 225-260.
- Rahman, M. M., Nassi, M., 1997 High capacity cable's role in once and future grids, *IEEE Spectrum*, 34; 7:31-35.
- Rose, C., 1999 A sielectric-free superconducting coaxial cable, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 38;2:166- 178.
- Tomita, M., Akasaka, T., Fukumoto, Y., Ishihara, A., Suzuki, K., Kobayashi, Y., 2018. Laying method for superconducting feeder cable along railway line. *Cryogenics*, 89:125–130. doi:10.1016/j.cryogenics.2017.11.007
- Watanabe, M., Masuda, T., Ashibe, Y., Hirose, M., Isojima, S., Honjo, S., Uchiyama, T., Shimodate, M., Takahashi, Y., Suzuki, H., 2003 Thermo-mechanical properties of a 66 kV superconducting power cable system, *Applied Superconductivity, IEEE Transactions*. 13;2:1956-1959.
- Willén, D., Hansen, E., Däumling, M., Rasmussen, C. N., Østergaard, J., Træholt, C., Veje, E., Tønnesen, O., Jensen, K. H., Krüger Olsen, S., Rasmussen, C., Hansen, E., Schuppach, O., Visler, T., Kvorning, S., Schuzster, J., Mortensen, J., Christiansen, J., Mikkelsen, S. D., 2002 First operation experiences from a 30 kV, 104 MVA HTS power cable installed in a utility substation, *Physica C*, 372-376;3:1571-1579.
- Xiang W., Yuan W., Xu Y., Hodge E., Fitzgerald J., McKeever P., Bell K., 2022 DC fault study of a point-to-point HVDC system integrating offshore wind farm using high-temperature superconductor DC cables. *IEEE Trans Energy Convers*. 37;1:377–388. <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2021.3094308>.
- URL 1: https://www.emo.org.tr/ekler/47061d49e7e10d1_ek.pdf (Erişim Tarihi: 27.01.2024).
- URL 2. <https://teknoloji.org/superiletkenlik-nedir-superilektenler-nerede-kullanilir/>, (Erişim Tarihi: 27.01.2024).
- URL 3. <https://uskudar.biz/malzeme-bilgisi/%C3%BCst%C3%BCniletkenler.html> (Erişim Tarihi: 27.01.2024).
- URL 4. <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/tesla-bobininin-incelenmesi/4401#ad-image-0>, (Erişim Tarihi: 27.01.2024).
- URL 5. <http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/aug/24/probing-the-cosmic-ray-climate-link>., (Erişim Tarihi: 27.01.2024).

BÖLÜM 5

MÜHENDİSLİK TASARIMLARI İÇİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ÜRETKEN TASARIM ÜZERİNE BİR İNCELEME

*Mehmet KÜÇÜK*¹

*Funda KAHRAMAN*²

¹ Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği ABD, 33400, Tarsus, Mersin, Türkiye, mehmetkucuk1985@gmail.com (ORCID: 0000-0001-9196-0784)

² Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 33400, Tarsus, Mersin, Türkiye, fkahraman@tarsus.edu.tr (ORCID: 0000-0002-1661-3376)

1. GİRİŞ

İnovasyon, özgünlük ve alan bilgisi içeren tasarım dinamik bir süreçtir. Bir ihtiyacın-isteğin gereklilikler ve kısıtlar dikkate alınarak açıkça tanımlanan bir görev olarak belirtilmesiyle tasarım süreci başlamaktadır. Tasarım probleminin çözümüne, sistematik yaklaşım ve yinelemeli süreçler ile ulaşılmaktadır. Optimizasyon, tasarımda en iyi çözümlere ulaşmayı sağlamaktadır. Optimizasyonda, bir sistemin veya sürecin ideal durumlarını ve koşullarını elde etmek için matematiksel formüller ve algoritmalar kullanılır (Okudan ve Şen, 2023). Optimizasyonda her bir kriter için bir önem düzeyi atanır ve bazılarına diğerlerine göre daha fazla ağırlık verilerek en ideal çözüm aranmaktadır. Günümüzde mühendislik tasarımlarında “parametrik optimizasyon”, “topoloji optimizasyonu” ve “üretken tasarım” yöntemleri giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Tasarım çalışmasında bağımlı değişkenler ve kısıtlar parametre olarak ifade edilmektedir. Parametreler seçilen sınır aralığında değiştirilerek çok sayıda farklı tasarımlar oluşturulabilmektedir. Parametrik optimizasyon, seçilen aralıktaki parametrelerin değiştirilmesi ile en uygun tasarıma ulaşma çalışmasıdır. Nihai tasarım seçilen parametrelere göre ulaşılabilecek optimum tasarımdır. Parametrik optimizasyon ile parametrik analiz, ürün tasarım ve geliştirme iş akışının bir parçası olarak birlikte kullanılmaktadır. Parametrik çalışmalar, tasarımın yeniden yapılandırılmasında önemli katkılar sağlamaktadır. Parametrik tasarım, tasarım fikrinden daha çok bir tasarım aracıdır. CAD programlarında (SolidWorks, Catia, Fusion 360, Creo Parametric, Siemens NX vb.) geometrinin boyutları değişken olarak seçilerek parametrik tasarımlar oluşturulabilmektedir. Parametrik tasarımda oluşturulan modellerin boyutları tek seferde değiştirme yerine ayrı ayrı değiştirilebilmektedir.

Topoloji optimizasyonu, belirlenen tasarım alanında ideal malzeme dağılımını sağlayan güçlü tasarım araçlarından biri olmuş (Fernandez, 2013), önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir (Lógó ve Ismail, 2020).

Üretken tasarım, tanımlanmış parametrelere ve kısıtlara göre tasarım alternatifleri oluşturmak için yapay zekâ algoritmaları kullanır. Malzeme, ağırlık, üretim türleri vb. olmak üzere çeşitli faktörler için tasarım optimizasyonu sunmaktadır. Geleneksel tasarıma kıyasla ürün geliştirme süreci üretken tasarımda daha hızlıdır.

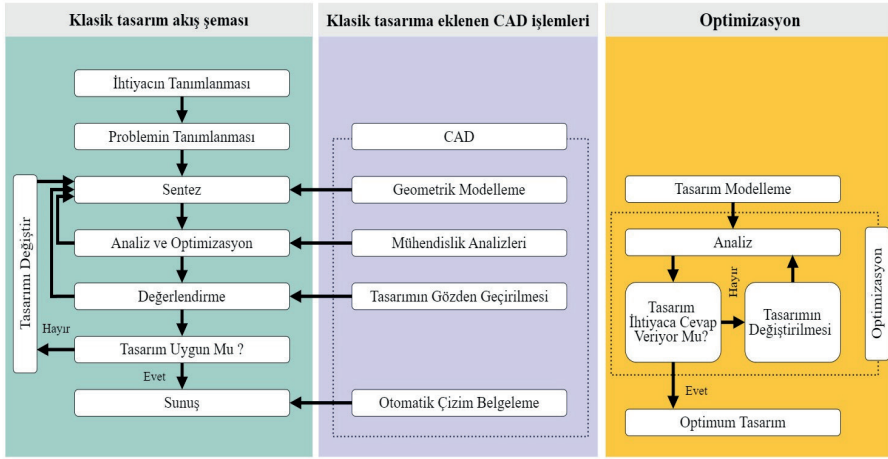
Katmanlı imalat, CAD sistemlerinin kısıtlarını gösterirken, topoloji optimizasyonunun ve üretken tasarımın potansiyelinin görülmesini sağlamıştır.

2. TASARIM ve OPTİMİZASYON

Geleneksel tasarım, tasarım bilgisi ve uzmanlık gerektirir (McKnight, 2017). Tasarım mühendisinin geçmiş deneyimleri, bilgi ve beceri düzeyi tasarım sürecinde önemli yere sahiptir. Geleneksel tasarım, bilgisayar teknolojile-

rinin yaygınlaşmasından öncesine kadar dayanmaktadır. CAD sistemlerinin ortaya çıkışı sonrasında geleneksel manuel çizimden dijital tasarıma önemli bir geçiş olmuştur. CAD sistemleri, nihai tasarımın ayrıntılı 3D modeliyle tasarım uzayında daha karmaşık ve gerçekçi nesnelerin oluşturulmasını sağlamıştır (Barbieri ve Muzzupappa, 2022). 20. yy. başında CAD genellikle taslak-çizim kavramı olarak kullanılırken, günümüzde tasarım anlamında kullanılmaktadır. Geleneksel CAD sistemlerinde kullanıcının uzmanlığına ve komut girdisine ihtiyaç vardır. Algoritmalar kullanarak yenilikçi tasarımlar oluşturan araçlar geliştirilene kadar, CAD geleneksel tasarımda sadece bir iş akış süreci olarak değerlendirilirdi. Geleneksel CAD sistemleri, tasarım fikrini geliştirmek yerine uygulamak için kullanılırdı (Vlah, Žavbi ve Vukašinović, 2020). Bilgisayar destekli tasarım alanında bulut tabanlı CAD (Cloud-based CAD), üretken tasarım, parametrik ve üretken modelleme benzeri yeni teknolojiler, yaygınlaşmakta ve gelişimini artırarak sürdürmektedir. CAD sistemlerinin bulut teknolojisi ile entegrasyonu, tasarım takımının eş zamanlı çalışabilmesi sağlanmaktadır. Yakın gelecekte, yapay zekâ ile CAD entegrasyonu tasarım alanında önemli değişim sağlayacaktır.

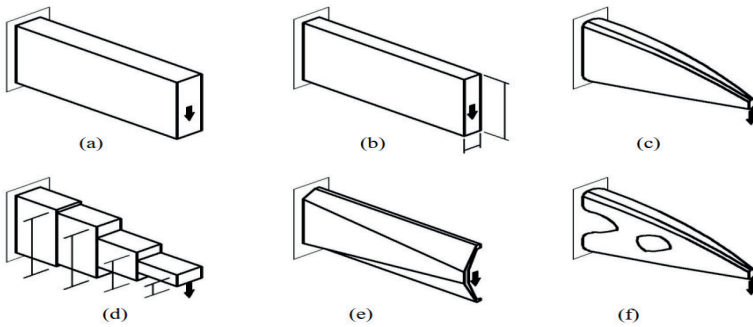
Klasik tasarım süreci ile bu sürece dâhil edilen CAD işlemleri ve tasarım optimizasyonu Şekil 1’de gösterilmiştir. Klasik tasarım sürecinin her adımı, geri bildirimler ve döngüler ile ilerlemektedir. Sentez, analiz-optimizasyon ve değerlendirme adımları tekrarlayıcıdır. Sentez ile analiz-optimizasyon, kısıtlara ulaşılan kadar yinelenir. Kısıtlara ulaşamadığında tasarım değiştirilerek yeniden analiz edilir. Değerlendirme aşamasında fiziksel testler için prototipler oluşturulur. Fiziksel model üzerinde testler yapılır ve sonuçlar karşılaştırılır. Klasik tasarımda; sentez adımına geometrik modelleme, analiz ve optimizasyon adımına mühendislik analizleri, değerlendirme adımına tasarımın gözden geçirilmesi, sunuş adımına ise otomatik çizim/belgeleme olarak CAD modülleri dâhil edilmiştir (Erbil, 2006). Ağırlık, kütle veya hacim olarak azaltma, rijitliği artırma, gerilmeleri azaltma, maliyetleri düşürme vb. tasarım optimizasyon çalışmalarında genel hedeflere örnek olarak sıralanabilir.



Şekil 1. CAD dâhil edilen klasik tasarım akış şeması ve optimizasyon işlemi (Erbil, 2006)

2.1. Yapısal Optimizasyon

Yapısal optimizasyon, genel optimizasyonun bir alt alanıdır (Leiva, 2011; Yüksel, 2019). Yapısal optimizasyon genellikle boyut (sizing), şekil (shape) ve topoloji (topology), optimizasyonları olarak üç türdür. Ayrıca, topometri (topometry) ve topografi (topography), optimizasyonları da yapısal optimizasyon türleri (Şekil 2) olarak sayılmaktadır. Boyut ve şekil optimizasyonu günümüzde oldukça ilerleme sağlamıştır. Ancak, tasarım uzayında yapısal yerleşim belirlendikten sonra tasarımda değişiklikler kısıtlı kalmaktadır. Topoloji optimizasyonu ise uygulamalarda yenilikçi ve özgür tasarımlar oluşturması ile kendisine yer bulmaktadır (Zhong vd., 2023).



Şekil 2. Yapısal optimizasyon türleri (a) Tasarım bölgesi (b) Boyut optimizasyonu (c) Şekil optimizasyonu (d) Topometri optimizasyonu (e) Topografya optimizasyonu (f) Topoloji optimizasyonu (Fernandez, 2013)

2.1.1. Boyut optimizasyonu

Boyut optimizasyonu, yapısal optimizasyonun ilk (en eski) formudur.

Boyut optimizasyonu diğer yapısal optimizasyon türlerine göre daha basittir. Topometri optimizasyonu ile benzerlik göstermektedir. Yapının karakterini oluşturan kalınlık, genişlik ve yükseklik benzeri boyutlar tasarım değişkenidir. Yapıda en ideal özelliklere ve duruma ulaşmak için boyutların optimizasyonu- dur. Sadece boyutsal değişiklikler gerçekleştirilmektedir.

2.1.2. Şekil optimizasyonu

Şekil optimizasyonunda yapının dış sınırlarının en iyi değer(ler)ine ulaşmaya çalışılmaktadır. Topoloji optimizasyonunun sınırlı bir formudur. Boyut optimizasyonuna göre daha verimli çözümler sağlamaktadır. Otomotiv ve havacılık endüstrilerinde boyut optimizasyonu ile birlikte kullanımı yaygındır.

2.1.3. Topometri optimizasyonu

Topometri optimizasyonu, boyut optimizasyonunun genel bir formudur. Farklı yönü her eleman için boyutların bağımsız tasarlanmasıdır. Topometri optimizasyonu, belirlenen tasarım alanında elemanların boyutlarının optimal dağılımını bulur, bu yöntem eleman-eleman boyut(landırma) optimizasyon problemi olarak görülebilir. Topometri optimizasyonu genellikle çok sayıda tasarım değişkeniyle ilgilenir (Fernandez, 2013; Leiva, 2004; Önal, 2018).

2.1.4. Topografya optimizasyonu

Topografya optimizasyonu, şekil optimizasyonunun gelişmiş bir formudur. Tasarım alanında şekil değişkenine dayalı takviyeler oluşturulmaktadır (Arslan, 2018; Kong vd., 2016). Topografya optimizasyonu, iç desenin dağılımıyla şeklin iyileştirildiği şekil optimizasyonudur. Sac levha parçasındaki büküm desenleri örnek olarak verilebilir (Fernandez, 2013). Yapının rijitliğini, doğal frekanslarını artırmak amacıyla sac yüzeyinde güçlendirici takviyeler (girinti-çıkıntı) oluşturulmakta ve dağılımı belirlenmektedir (Önal, 2018).

2.2. Topoloji Optimizasyonu

Yapısal optimizasyon türleri arasında yer alan topoloji optimizasyonu, güncel konular arasındadır. Makine, otomotiv, inşaat ve havacılık alanlarında topoloji optimizasyonu uygulamaları mevcuttur. İlk makale, 1904 yılında Anthony George Maldon Michell (1870-1959) tarafından paylaşılmıştır (Fernandez, 2013; Rozvany, 2009; Tyflopoulos vd., 2018). Bendsøe ve Kikuchi'nin (1988) sayısal topoloji optimizasyonu konusundaki öncü makalesi, homojenizasyon teorisi ve sayısal optimizasyon yöntemleri ile ilgili önceki çalışmalar üzerine inşa edilmiştir. Homojenizasyon yaklaşımı sonrasında *density* (yoğunluk), *level set* (düzey ayarlama/seviye belirleme, aşamalı kaydırma), *topological derivative* (topolojik türev), *phase field* (faz alanı), *evolutionary approaches* (evrimsel yaklaşımlar) benzeri çok sayıda yeni metod geliştirilmiştir (Sigmund ve Maute, 2013). Zargham vd. (2016)'e göre dört temel topoloji optimizasyonu yönteminin artıları ve eksileri Tablo 1'de gösterilmiştir.

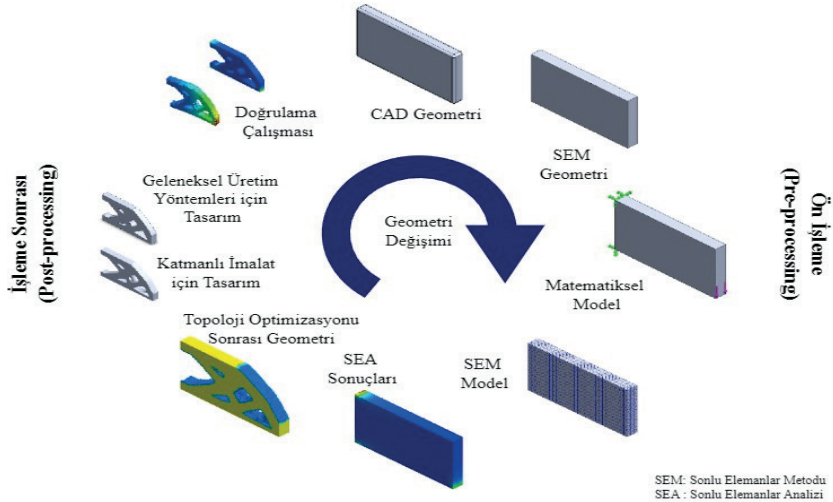
Tablo 1. *Topoloji optimizasyon yöntemlerinin artıları ve eksileri*

Yöntemler	Artıları	Eksileri
Homojenleştirme Yöntemi (Homogenization)	İyi teorik temel, İyi yakınsama davranışı,	Matematiksel programlamada hesaplama zorlukları,
Evrimsel Yöntemi (Evolutionary)	Etkin sonuçlar, Kullanım kolaylığı,	Hesaplama verimsizlik, Sezgisel olması,
Yoğunluk Yöntemi (SIMP)	Değişken azlığı, Ayarlanabilir penaltı ile gözenekli bölgelerin seçici olarak bastırılması, Çok yönlü olması, Çok çeşitli tasarım kısıtlamaları, Çoklu yük koşulları ve büyük sistemlerde kullanılabilirlik,	Karmaşık ve konveks olmayan problemlerde global optimumu garanti etmemesi,
Düzyayınlama/ Aşamalı Kaydırma Yöntemi (Level Set Method)	Doğrusal olmayanlar da dâhil tüm türlerdeki amaç fonksiyonları veya yapısal model ile uyumludur. Eş zamanlı şekil ve topoloji optimizasyonu, Kesin sınırları olan ara değerli bölgeleri içermeyen sonuçlar,	İki boyutlu optimizasyonlarda yeni boşluklar oluşturamaması, bunun yerine mevcut sınırların ötelenmesi,
Kaynak: Zargham vd., (2016)		

Topoloji optimizasyonu için yazılımlar, 90'lerden itibaren kullanılmaktadır. İlk örneği 1989 yılında bir Japon şirketi (Quint Co.) Optishape ile piyasaya sürülmüş ve Bendsøe ve Kikuchi'nin (1988) yaklaşımına dayanmaktadır. Sonrasında otomotiv ve havacılık çalışmaları için benzerleri geliştirilmiştir. Bu programlar: Optistruct (Altair, ABD), Construct (MSC Yazılım, ABD), Cato (CES Eckard GmbH, Almanya), TOP (Ford Motor Co., ABD), Optcom (MSC/Nastran Yazılım) vb. sıralanabilir. Geliştirilen bu programlar tasarım süreçlerinde kolaylık sağlamıştır (Bendsøe ve Sigmund, 2003).

Topoloji optimizasyonu işlem adımları Şekil 3'te gösterilmiştir. Genellikle mevcut olan bir CAD geometrisi ile süreç başlar. Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla sayısal model oluşturulur. Analiz sonuçları girdi verileri olarak topoloji optimizasyonu sonrası geometrinin oluşmasını sağlar. Üretim prosesine göre geometri değiştirilir ve doğrulama çalışması sonrasında nihai geometri ile süreç sonlanır.

Programların kullandığı optimizasyon türleri *topoloji optimizasyonu* (SIMP, LSA, BESO vb.) *üretken tasarım*, *kafes örgüsü* (lattice) Tablo 2'de listelenmiştir.



Şekil 3. Topoloji optimizasyonu işlem adımları (Tyflopoulos ve Steinert, 2022)

Tablo 2. Yazılımların optimizasyonda kullandığı yöntemler

Programlar	Optimizasyon türleri
Abaqus (Tosca)+Insight (3DS)	TO (SIMP, RAMP)
Altair (HyperWorks)	TO (SIMP, LSA)
Altair OptiStruct	TO (SIMP), Kafes Örgüsü
Ansa (Tosca, Nastran sol 200)	TO (SIMP, RAMP)
Ansys (Discovery)	TO (SIMP), Üretken tasarım
Ansys (Mechanical)	TO (SIMP, LSA), Kafes Örgüsü
Autodesk Fusion 360	Üretken tasarım
Autodesk Inventor	TO (SIMP)
Catia (3DS)	TO (SIMP), Üretken tasarım, Kafes Örgüsü
Comsol	TO (SIMP, RAMP, LSA), Kafes Örgüsü
Creo PTC	TO (SIMP, RAMP), Üretken tasarım
FreeFEM	TO (SIMP, LSA)
Inspire (Altair)	TO (SIMP), Kafes Örgüsü
Matlab (Math Works) kodlar	TO (SIMP, LSA, BESO)
MSC Nastran	TO (SIMP)
nTopology	TO (SIMP), Kafes Örgüsü
Siemens NX	TO (SIMP, RAMP), Üretken tasarım, Kafes Örgüsü
Solid Edge (Siemens)	Üretken tasarım
SolidWorks (3DS)	TO (SIMP)
Tosca	İlk versiyonlarda ESO, güncellerde SIMP + MMA
Kaynak: Ribeiro vd., (2021); Tyflopoulos, (2022); Tyflopoulos ve Steinert, (2022)	

Topoloji optimizasyonu, karmaşık geometrilerin imalatı için katmanlı imalat proseslerine yöneliktir. Ayrıca, yazılım firmaları geleneksel imalat

yöntemlerine yönelik optimize edilmiş tasarımların üretimine katkı sağlamak amacıyla yeni imalat kısıtlarını programlarına dâhil etmiştir (Tyflopoulos, 2022). Topoloji optimizasyonunun gelecekte daha çok yaygınlaşacağı öngörülmektedir (Bendsøe ve Sigmund, 2003). Zhong vd. (2023)'e göre yüksek teknolojinin ve ileri üretim yöntemlerinin katkısıyla, topoloji optimizasyonunun hesaplama verimliliği ve doğruluğu daha fazla artacaktır. Topoloji optimizasyonu için öngörülen gelişim yönleri: (i) makro boyuttan mikro boyuta, (ii) katmanlı imalata entegre olmasıyla daha karmaşık tasarımların üretilmesi, (iii) malzeme tasarımı alanına entegrasyonu, (iv) yüksek doğruluk ve hızlı çözümler için yapay zekâ ve makine öğrenmesi ile birleşebileceği vb. sıralanmaktadır.

Topoloji optimizasyonu ile üretken tasarım birbirine yakın kavramlar olarak görülmesine karşı aralarında fark vardır. Topoloji optimizasyonu, en iyi yapısal performansa ulaşma amacıyla belli alandaki malzeme dağılımını düşürecek algoritmalar içerir. Topoloji optimizasyonunda algoritma başlangıç tasarımına göre en ideal tasarımı aramaktadır (Westerveld, 2021). Üretken tasarım, seçilen hedef ve kısıtlara göre verimli çözümlere ulaşmak için genetik, evrimsel vb. algoritmalar kullanır. Üretken tasarım, tam olarak tanımlanmamış tasarım uzayında level set yöntemi temelli algoritma yardımıyla daha özgül ve yenilikçi tasarımlar önermektedir (Vlah, Žavbi ve Vukašinić, 2020).

Katmanlı imalat için tasarım ve optimizasyon konularında topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım önemli yere sahiptir (Barbieri ve Muzzupappa, 2022).

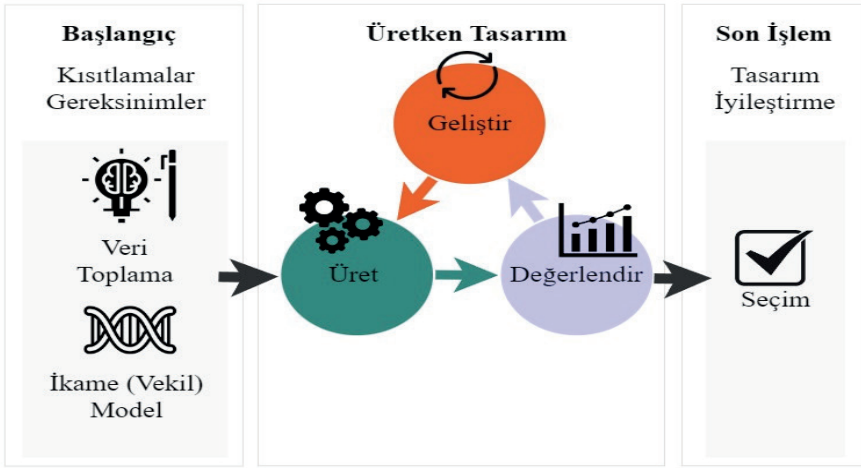
2.3. Üretken Tasarım

Üretken tasarım üzerinde ilk çalışmalar, doğadan esinli tasarım algoritmalarıyla başlamaktadır. Üretken tasarımla ilgili kayda değer bir uygulama örneği olmamasına karşı genellikle teorik çalışmalar 1980'lere kadar gitmektedir. İlk olarak mimarlık alanında ilgi görmüş olsa da mühendislik tasarım alanında ürün geliştirme sürecinin bir parçası olmuştur. Oldukça geniş bir uygulama potansiyeline karşılık, günümüze kadar üretken tasarımın genel kabul görmüş bir tanımı yapılamamıştır (Barbieri ve Muzzupappa 2022; Vlah, Žavbi ve Vukašinić, 2020; Westerveld, 2021). Dhokia, Essink ve Flynn (2017)'e göre, üretken tasarım; belirtilen gereksinimlere, kısıtlamalara ve hedeflere dayalı kavramlar üreten bir araçtır. Üretken tasarım La Rocca (2012)'ya göre kullanıcının boyutlar, dayanıklılık gereksinimleri ve diğer kısıtlamalar olarak girdi sağladığı bir metodolojidir. Oh vd. (2019), üretken tasarımı, yapısal performans gereksinimlerini karşılayan tasarım seçeneklerini araştırmayı ve farklı gerekler için ideal tasarımı seçmeyi amaçlayan bir yaklaşım olarak belirtmektedir.

Üretken tasarım, tasarım sürecinde oluşturduğu çözüm uzayıyla tasarımın niteliğini arttırırken sürecin kısılmasını sağlamaktadır (Okudan ve Şen, 2023). Üretken tasarım çözümlerinin oluşturulması bulut tabanlı bir yapay

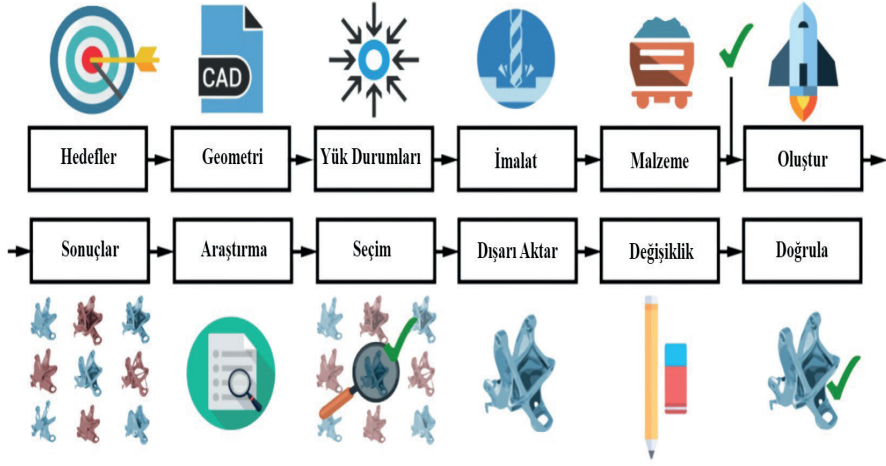
zekâ algoritmasına dayanmaktadır (Eren ve Sezer, 2019). Üretken tasarım, 3D modellerin oluşturulması ve optimizasyonunda yapay zekâ ile yönlendirilen yeni teknolojiler arasında yer almaktadır. Üretken tasarım, tasarım alanında bir dereceye kadar otomasyon ve özerklik içeren çoklu tasarımlar oluşturmaktadır. Üretken tasarım, yapay zekâ ve bulut teknolojisi desteği ile belirlenen kısıtlara ve hedeflere göre çok sayıda alternatif tasarım üretmektedir. Tanımlanmış hedeflere ve kısıtlamalara karşı tüm olası tasarım çözümlerini analiz etmek ve sistematik olarak keşfetmek için algoritmalar kullanan bir stratejidir.

Üretken tasarım, topoloji ve parametrik optimizasyonlara kıyasla daha fazla esneklik sağlamaktadır. Başlangıç (üretken tasarım öncesi: pre-generative design), üretken tasarım ve son işlem (üretken tasarım sonrası: post-generative design) olmak üzere üç adımdan oluşan üretken tasarım döngüsü Şekil 4'te gösterilmiştir. Üretken tasarım döngüsü, araştırılan problemle ilgili verilerin toplanmasıyla başlamaktadır. Başlangıçta, rastgele birçok aday oluşturulur. Her aday diğerlerine göre puanlanması ve sıralanması için kriter ve hedefe göre değerlendirilir. Vekil model, seçilen çözümün geliştirilmesi için başlangıç noktasını oluşturmaktadır (Recio ve Serra, t.y.; Walmsley t.y.).



Şekil 4. Üretken tasarım döngüsü (Recio ve Serra, t.y.; Walmsley, t.y.)

Üretken tasarım işlem adımları Şekil 5'te gösterilmiştir. İlk olarak üretken tasarım öncesinde korunan ve engel geometriler dikkate alınarak yük durumları, kısıtlar, hedefler, sınırlar, imalat yöntemi, malzeme seçimi gerçekleştirilmektedir. İkinci aşamada, üretken tasarım aşamasında en uygun çözümler araştırılır, oluşturulan geometriler detaylı şekilde karşılaştırılır ve değerlendirilir. Üçüncü aşamada, seçilen katı model tasarımı dışarı aktarılır. Üretim türüne göre gerekli değişiklikler ve doğrulama analizleri yapılır (Buonamici vd., 2020; Kurtoğlu, t.y.).



Şekil 5. Üretken tasarım işlem adımları (Buonamici vd., 2020)

Üretken tasarımın avantajları ve dezavantajları Tablo 3'te karşılaştırılmıştır. Mühendislik tasarımlarında kullanımı yaygınlaşan topoloji optimizasyonu, üretken tasarım ve parametrik optimizasyonun karşılaştırması Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Üretken tasarımın avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Tasarım arama ve keşfi	Oluşturulan tasarımların kapsamlı analize ve simülasyona ihtiyacının olması
Hızlı ürün geliştirme süreci	Tüm kriterlere ulaşmak için doğru parametreleri ekleme zorluğu
Çok sayıda tasarım çözümü	Üretken tasarımın, tasarımcının yerini alacağı düşüncesi
Hızlı tasarım oluşturma	Yeni bir süreci benimsemenin zor olması
Tasarımcı önyargısının olmaması	Çoklu tasarımlarda analiz ve karşılaştırmanın zor olması
Tanımlanan gereksinimlere uygun tasarımların oluşturulması	Oluşturulan tasarımlarda düzeltmenin gerekli olması
Yüksek ürün performansı	Yeni üretim yöntemlerini öğrenme ve bunlar için yatırım yapma zorluğu
Kaynak: Westerveld, (2021)	

Tablo 4. Topoloji optimizasyonu, üretken tasarım ve parametrik optimizasyon yöntemlerinin karşılaştırması

	Topoloji Optimizasyonu	Üretken Tasarım	Parametrik Optimizasyon
Amaç	Malzeme miktarını en aza indirirken performansı korumayı ve iyileştirmeyi amaçlamaktadır.	Performans, maliyet, estetik, malzeme, imalat yöntemi vb. parametreleri dengeleyen bir tasarımlar oluşturmayı amaçlamaktadır.	Mevcut tasarımda seçilen parametrelerin değişimi ile en uygun tasarıma ulaşmayı amaçlamaktadır.
Süreç	Performansı geliştirmek için seçilen tasarım alanında malzeme dağılımını optimize etmeye odaklanmaktadır.	Seçilen kısıtlara ve hedefe göre çoklu tasarım önerilerini keşfetmek için algoritmalar kullanır.	Optimize edilmiş tasarıma ulaşmak için en uygun parametreleri belirlemeye odaklanmaktadır.
Girdi	Başlangıç tasarımı oluşturulur. Hedef ve kısıtlar belirlenir.	Korunan ve engel geometriler dikkate alınarak yük durumları, kısıtlar, hedefler, sınırlar, imalat yöntemi, malzeme vb. belirlenir.	Tasarım değişkenleri, hedef ve kısıtlar seçilir. Parametreler belirlenir.
Çıktı	Gereksiz malzemenin çıkartıldığı başlangıç tasarımının ideal formunu oluşturur.	İdeal tasarım için çok sayıda alternatif oluşturur.	Hedeflere göre optimize edilmiş nihai tasarım için en uygun parametreleri oluşturur.
İnsan Etkisi	Ulaşılan sonuçları yorumlar. Gerekli düzeltmeleri yapar.	Üretilen seçenekler arasında en uygun olan tasarımı seçer. Gerekli düzeltmeleri yapar.	Parametreleri ve aralığı (maks.-min.) belirler. Algoritmayı seçer.

3. SONUÇ

Bu çalışmada, mühendislik alanında tasarım ve optimizasyon ile ilgili olarak topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım yaklaşımları incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Topoloji optimizasyonu, temel olarak insan tarafından oluşturulan girdi ile yönlendirilir. Performansı geliştirmek için başlangıç tasarımına uygulanmaktadır. Topoloji optimizasyonu farklı başlangıç tasarım uzayları için farklı çözümler sağlamaktadır.

Üretken tasarım, farklı yapıların ve malzemelerin kombinasyonu ile tasarım çözümünde tek simülasyonda çok sayıda öneri sunmaktadır. Üretken tasarımda başlangıç tasarım uzayı olmadan optimal çözümlere sağlamaktadır.

Topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım, mühendisler için tasarımlarda performansı geliştirme ve optimize edilmiş yeni tasarım konularında önemli avantajlar sağlamaktadır. Üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu gerçek bir pratiklik kazanmış ve tasarım sürecinde kullanılan yazılımlar ile avantajlı

bir seviyeye ve gelişmişliğe ulaşmıştır. Uzun yıllar süresince yürütülen kuramsal çalışmalar, katmanlı imalat ile üretilebilirlik kazanmıştır. Katmanlı imalat için tasarım ve tasarımların optimizasyonu ile ilgili olarak topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım yöntemleri yüksek potansiyele sahiptir.

KAYNAKLAR

- Arslan, M. (2018). *Yeni nesil yapısal optimizasyon teknikleri ile yüksek performanslı yolcu koltuğu komponentlerinin geliştirilmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa.
- Barbieri, L., & Muzzupappa, M. (2022). Performance-driven engineering design approaches based on generative design and topology optimization tools: A comparative study. *Applied Sciences*, 12(4), 2106. <https://doi.org/10.3390/app12042106>
- Bendsøe, M. P., & Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71(2), 197-224. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
- Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology optimization, theory, methods, and applications* (2nd Edition). Berlin: Springer.
- Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Volpe, Y., & Governi, L. (2020). Generative design: an explorative study. *Computer-Aided Design and Applications*, 18(1), 144-155. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.144-155>
- Dhokia, V., Essink, W. P., & Flynn, J. M. (2017). A generative multi-agent design methodology for additively manufactured parts inspired by termite nest building. *CIRP Annals*, 66(1), 153-156. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.039>
- Erbil, H. S. (2006). *Makina parçalarının şekil optimizasyonu ile yeniden tasarlanması çalışması* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kayseri.
- Eren, O. ve Sezer, H.K. (2019). *Üretken tasarım ve topoloji optimizasyonu yaklaşımlarıyla ürün tasarımı*. Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Sosyal Bilimlerde Güncel Gelişmeler Sempozyumu, 21-22 Aralık 2019, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Fernandez, L. (2013). *Topology optimization using a level set penalization with constrained topology features* [Unpublished Master's Thesis]. Clemson University, Department of Mechanical Engineering, South Carolina, https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/1700
- Kong, Y. S., Abdullah, S., Omar, M. Z. ve Haris, S. M. (2016). Topological and topographical optimization of automotive spring lower seat. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(7), 1388-1405. <https://doi.org/10.1590/1679-78252082>
- Kurtoğlu, C., (t.y.). Üretken tasarım eğitim serisi. (01.09.2024) tarihinde <https://www.tasarimveteknik.com/fusion360/uretkentasarim/> adresinden erişilmiştir.
- La Rocca, G. (2012). Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), 159-179. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.02.002>

- Leiva, P. J. (2011). *Structural optimization methods and techniques to design efficient car bodies*. In International Automotive Body Congress (IABC), Michigan, USA, (s. 41-55).
- Lógó, J. M., & Ismail, H. (2020). Milestones in the 150-year history of topology optimization: A review. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 27, 97-132. <http://dx.doi.org/10.24423/cames.296>
- McKnight, M. (2017). Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer. *KnE Engineering*, 2(2), 176. <https://doi.org/10.18502/keg.v2i2.612>
- Oh, S., Jung, Y., Kim, S., Lee, I., & Kang, N. (2019). Deep generative design: Integration of topology optimization and generative models. *Journal of Mechanical Design*, 141(11). <https://doi.org/10.1115/1.4044229>
- Okudan, A., & Şen, B. (2023). Optimizasyon nedir ve türleri nelerdir?. *Mühendis ve Makina Güncel*, 84, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/014_15.pdf
- Önal, A. S. (2018). *Darbe emici yapıların çarpışma açısından topoğrafya optimizasyonu ile tasarımı* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa.
- Recio, R.B. ve Serra, P. (t.y.). Guide to Optimizing Daily Workflows with Generative Design. (1.10.2024) tarihinde <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Guide-Optimizing-Daily-Workflows-Generative-Design-2020#handout> adresinden erişilmiştir.
- Ribeiro, T. P., Bernardo, L. F. A., & Andrade, J. M. A. (2021). Topology optimisation in structural steel design for additive manufacturing. *Applied Sciences*, 11(5), 2112. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/app11052112>
- Rozvany, G. I. N. (2009). A critical review of established methods of structural topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 37(3), 217-237. <https://doi.org/10.1007/s00158-007-0217-0>
- Sigmund, O., & Maute, K. (2013). Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(6), 1031-1055. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>
- Tyflopoulos, E. (2022). *Topology optimization in mechanical engineering: Implementation and practical aspects* [Unpublished Doctoral Dissertation]. Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Mechanical and Industrial Engineering. <https://hdl.handle.net/11250/2996959>
- Tyflopoulos, E., & Steinert, M. (2022). A comparative study of the application of different commercial software for topology optimization. *Applied Sciences*, 12(2), 611. <https://doi.org/10.3390/app12020611>
- Tyflopoulos, E., Tollnes, F. D., Steinert, M. & Olsen, A. (2018). *State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs* [Paper Presentation]. The Design Society 91: Proceedings of Nord Design 2018, Linköping, Sweden, 14-17 August 2018. <https://www.designsociety.org/publicati->

[on/40744/](#)

- Vlah, D., Žavbi, R., & Vukašinović, N. (2020). Evaluation of topology optimization and generative design tools as support for conceptual design. *Proceedings of the Design Society: Design Conference, 1*, 451–460. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.165>
- Walmsley, K., (t.y.). Getting started with generative design for AEC. (1.10.2024) tarihinde <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Getting-Started-Generative-Design-AEC-2018#handout> adresinden erişilmiştir.
- Westerveld, C.E. (2021). Generative Design: recommended actions to smooth the way for production of generative designs with additive manufacturing.
- Yüksel, O. (2019). An overview on topology optimization methods employed in structural engineering. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 159-175. <https://doi.org/10.34186/klujes.606666>
- Zargham, S., Ward, T. A., Ramli, R., & Badruddin, I. A. (2016). Topology optimization: a review for structural designs under vibration problems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53(6), 1157-1177. <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1370-5>
- Zhong, Y., Jiang, X., Yang, Y., Xu, B., Zhu, Q., Wang, L., & Dong, X. (2023). Visualization analysis of research hotspots on structural topology optimization based on CiteSpace. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45447-y>

BÖLÜM 6

PROTOTİP BİR OTONOM ARACIN TASARIMI, UYGULAMASI VE SÜRÜŞ KRİTERLERİNİN BELİRLENMESİ

Hasan D. YILDIZAY¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, hasan.yildizay@dpu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-2449-8056

GİRİŞ

Otonom araçlar, insan faktörü olmadan varış noktaları arasında hareket edebilmek için sensörler ve yapay zekanın bir kombinasyonunu kullanan araçlardır. Otonom sürüş, araç üzerinde bulunan sensörlerden üretilen verilerin araç içindeki bilgisayarda çalıştırılan yapay zeka algoritmaları ile anlamlı hale getirilerek, yine araç içinde bulunan ve aracın direksiyon, fren ve gaz sisteminin kontrolünü sağlayan “Araç Kontrol Sistemi Kartı” na gönderilerek aracın sürüşünü gerçekleştirmesidir.

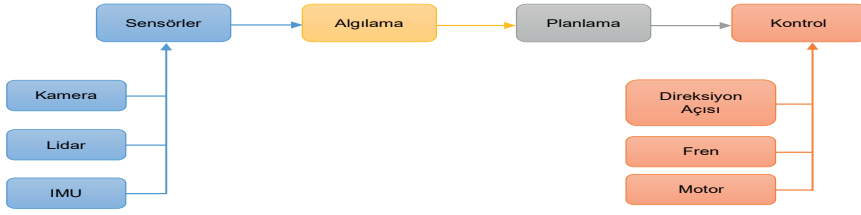
Aracın tam anlamıyla sürücüsüz bir şekilde hareket etmesi için ihtiyaç duyulan en önemli veri kamera sensörü sayesinde elde edilmektedir. Sensörden alınan veri, araç içinde bulunan “Yapay Zeka Bilgisayarı” olarak adlandırılan bilgisayar içinde gerekli algoritmalar ile anlamlı bir hale getirilmektedir. Bu bilgisayar, kameradan gelen kareleri arka planda yapay zeka bilgisayarı ile görüntü işleme ve derin öğrenme metotları kullanarak işlemektedir. Bilgisayar bu işleme sonucunda görüntüleri matrislere dönüştürür ve yapay sinir ağları ile bu matrisleri algoritmaya uygun bir şekilde tekrar işlemektedir. Bu işlemler sonucunda kameradan gelen veriler artık bir anlam kazanmaktadır. Bu proselere Bilgisayarlı Görü (Computer Vision) adı verilir. Otonom aracın bu yazılımlar aracılığıyla, sürücüsüz bir şekilde istenilen hedefe ulaşması sağlanmış olmaktadır.

Çalışma kapsamında Tübitak tarafından düzenlenen 2023 Teknofest Robotaksi Binek Otonom Araç yarışması kural kitapçığına uygun otonom araç üretilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda 2022 yılında yarışan aracın üzerinde yazılımsal ve donanımsal değişiklikler yapılarak 2023 yılı Teknofest Robotaksi Binek Otonom Araç yarışması isterlerine göre inovatif ve özgün geliştirmeler yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda geliştirilen otonom sürüş özellikli araç ile Kocaeli Bilişim Vadisinde 2023 yılında düzenlenen Teknofest Robotaksi Binek Otonom Araç Yarışması’ na katılım sağlanarak 471 takım içerisinde 8. lik derecesi elde edilmiştir.

OTONOM SÜRÜŞLÜ ARAÇLAR

Otonom araçlar, bir varış noktasına gitmek için insan operasyonu gerektirmeyen araçlardır. Otonom araç sürüş sistemleri hem normal koşullarda hem de beklenmedik durumlarda araçları yönetmek veya kontrol etmek için kullanıcılardan bağımsız karar yapılarına sahiptir [Erdoğan M. vd. 2021].) Trafik, yayalar ve yoldaki diğer çevreleri yorumlamak ve bunlara yanıt vermek için kameralar, sensörler ve gelişmiş yazılımlar kullanırlar. Son yıllarda derin öğrenme tabanlı yaklaşımların, otonom araç sürüşü sistemlerinde karmaşık görsel görevlerin yorumlanması, konumlandırma ve çevresel algılama konularında umut verici çözümler sunduğu gözlemlenmiştir [Jeyalakshmi S. vd. 2024].

Çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilecek otonom aracın sürüşü gerçekleşmesi durumunda sistem ilerleyişi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Sürücüsüz Araç Alt Sistemleri

Otonom araçlar sensörlerden gelen verileri arka planda yapay zekâ algoritmaları ile araç bilgisayarındaki işleyip karar mekanizması aracılığıyla ürettiği komutları kontrol sistemine ileterek hedeflenen konuma ilerlerler. Bu doğrultuda ilerlerken kesintisiz bir şekilde veri alabilmesi ve karar algoritmasının aksamaması için doğru sensörler ve bilgisayar kullanılmalıdır. Bu sebeple yol şeritlerinin ve trafik tabelalarının hem tespiti hem de takibi için genelde derinlik ölçebilen kameralar ve işlem gücü yüksek bilgisayarların kullanımı tercih edilmektedir. Bu bileşenlerin doğru seçimi aracın yanlış karar vermemesi ve güvenliğin sağlanması için önemlidir.

TEKNOFEST Teknoloji Yarışmaları Kapsamında her yıl “Robotaksi Binek Otonom Araç Yarışması” düzenlenmektedir. Robotaksi Binek Otonom Araç Yarışmasının hedefi, otonom araç teknolojileri alanında özgün tasarım, algoritma hususlarında yetkinlik kazanmaya teşvik etmek olarak özetlenebilir [<https://teknofest.org>]. Bu doğrultuda yarışmaya katılacak aracın tasarımı, üretimi, direksiyon, fren ve tahrik sistemi özgün bir şekilde tasarlanıp yapımı gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında otonom sürüş özellikleri kazandırılan araç üzerinde kullanılan kameranın gelişmiş özellikleri ve içerisinde bulunan dahili sensörler sayesinde aracın çevreyi doğru algılayabilmesi sağlanmıştır. Kamera sensöründen gelen görüntü verisi de araç bilgisayarındaki çalışan algoritmalar sayesinde işlenerek çevredeki trafik tabelaları ve ışıklarının tespitinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Böylece, tespit edilen tüm durumlar için karar mekanizması ile oluşturulan hareket planları kontrol sistemine gönderilerek aracın çevre koşullarına uygun bir biçimde yol almasını sağlamıştır.

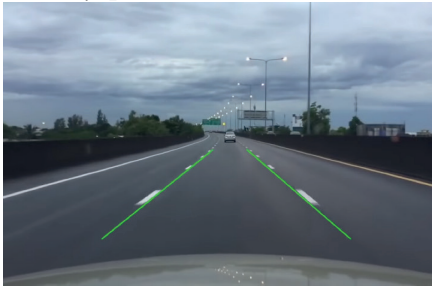
Bu amaçla, geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile yüksek işlem kapasitesine sahip bilgisayar ve derinlik ölçebilen gelişmiş kameraların senkronize çalışması sağlanmıştır. Bu senkronizasyonun sağlanması için bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Otonom sürüş özellikleri kazandırılmış araçta doğru sürüş için sensörlerden doğru verilerin alınması, alınan verilerin yüksek hızda işlenmesi ve sorunsuz, güvenli bir sürüşün gerçekleştirilmesi

hedeflenmiştir. Yol şeritlerinin, trafik tabela ve ışıklarının doğru tespiti için geniş açılı ve netliği yüksek bir kamera kullanılacaktır. Kameradan gelen görüntüleri sorunsuz bir şekilde işleyip karar algoritmaları aracılığıyla sürüşü gerçekleştirmesi, yapay zekâ bilgisayarı ile sağlanacaktır. Çalışmanın amacı, tüm bu gereklilikleri toparlayıp günümüz teknolojisini tam anlamıyla ve verimli bir şekilde kullanarak her türlü koşula uygun, güvenli bir sürüş gerçekleştiren; yazılımı ve algoritmaları tamamen yerli bir otonom araç elde etmektir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Otonom aracın sensörlerden gelen verileri hızlı bir biçimde işleyip karar verebilmesi için yüksek işlem gücüne sahip grafik kartlar kullanılmalıdır. Bu grafik kartları CUDA ve Tensor çekirdekleri içermektedir. Yüksek hızlı grafik kartıyla birlikte görüntü işleme ve derin öğrenme yöntemlerindeki matris işlemleri çok daha hızlı hesaplanıp gerekli komutlar aracın kontrol mekanizmasını yöneten araç kontrol kartına gönderilmektedir [<https://developer.nvidia.com/tensorrt>].

Kameradan alınan verilerin OpenCV, TensorFlow, Numpy, Torch gibi birçok kütüphane kullanılarak işlenmesi sağlanmıştır. İşlenen bu veriler daha önceden bilgisayar üzerinde derin öğrenme algoritmaları ile eğitilen özgün modeller sayesinde tespit edilmiştir. Şekil 2a ve 2b'de derin öğrenme yöntemleri sayesinde gerçekleştirilen tespit işlemlerinin örnekleri bulunmaktadır. Eğitilmiş özgün model ile doğruluk oranı yüksek bir şekilde tespit işleminin gerçekleştirilmesi için eğitim işlemi, yüksek işlem gücüne sahip ekran kartı kullanılarak çok sayıda fotoğraflardan oluşan veri setleri ve doğru algoritmalar seçilerek yapılmıştır.

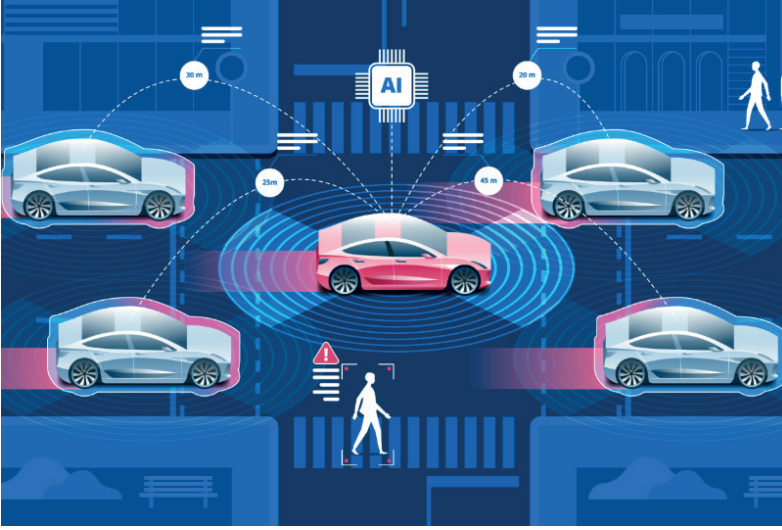


Şekil 2a. Şerit Tespit Örneği



Şekil 2b. Trafik Işığı Tespit Örneği

Modellerin eğitimi tamamlandıktan sonra araç içindeki bilgisayarda yazılan tespit ve karar algoritmaları çalıştırılarak otonom sürüş için gerekli veriler elde edilmiştir. Alınan çıktıların kontrol sistemine gönderilerek aracın hareketini sağlayan motorların doğru şekilde çalışması sağlanarak otonom sürüş gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te bir otonom aracın sürüş sisteminin modellenmesi bulunmaktadır.



Şekil 3. Otonom Araç Sürüş Modeli

KAMERA SENSÖRÜ VE KULLANIMI

Kamera

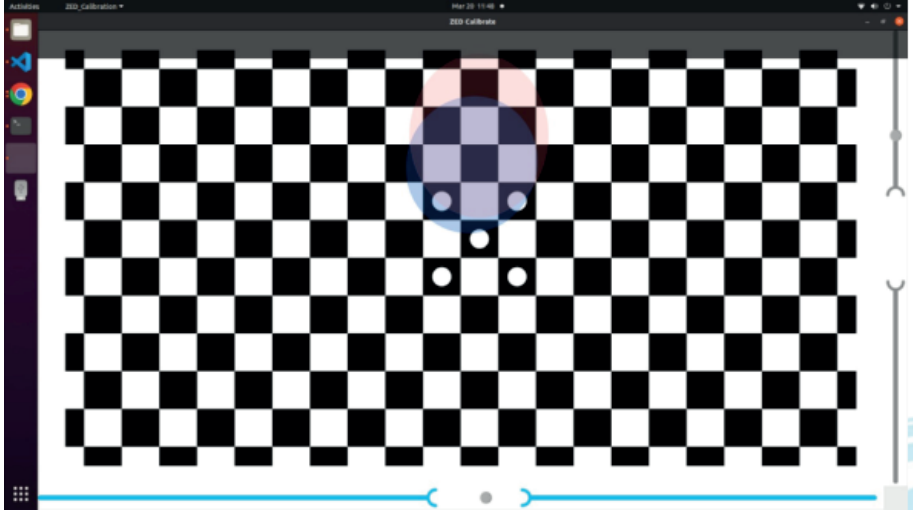
Araç üzerinde 2 adet kamera kullanılmıştır. Bunlardan biri ZED 2 Stereo marka ve model kamera diğeri ise Logitech Brio 4K tipi marka ve modeldir (Şekil 4). Kameralar araç üzerinde, görüş açısının tespit işlemlerini engellemeyecek şekilde montajlanmıştır



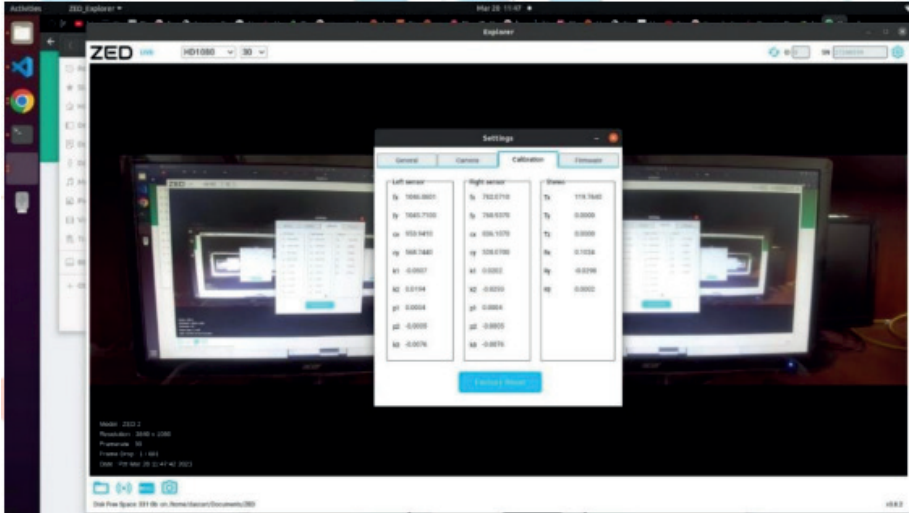
Şekil 4. Araçta kullanılan kameralar

Nesne tespiti için ZED 2 Stereo marka ve model olan kamera, 120°'lik görüş açısı ile geniş açılı görüntü alabilme özelliğinden dolayı kullanılmıştır. Bu kameradan aynı zamanda derinlik ölçümünde, trafik ışıklarının ve tabelalarının mesafe ölçümünde de faydanılmıştır. Ayrıca bu kamera ROS

ile uyumlu çalışmaktadır. Bu nedenle, kamera için SDK kurulduktan sonra Python API'sı kullanılarak mesafe verilerini direkt karar algoritmasına aktarılması sağlanmıştır. Kameradan optimum veri alınabilmesi olası hatalara karşın ise kameranin kalibrasyonu da bu çalışma kapsamında yapılmıştır (Şekil 5 ve Şekil 6).



Şekil 5. ZED 2 kamera kalibrasyonu



Şekil 6. ZED 2 kameranin kalibrasyon sonuçları

Araç üzerinde kullanılan bir diğer kamera olan Logitech Brio 4K ile şerit tespit ve takip algoritmaları için gerekli görüntü verisinin alınması sağlanmıştır. Bu modelin tercih edilmesindeki en büyük sebep içeriğinde bulunan RightLight™ 3 ve yüksek dinamik aralık (HDR) teknolojilerine sahip olmasıdır.

Bu sayede kamera az ışıklı ve doğrudan güneş ışığı alan ortamlar başta olmak üzere her türlü şartta problemsiz bir görüntü aktarımı sağlamaktadır. Ayrıca kameranın sağladığı maksimum 90° lik görüş açısı tercih edilmesindeki en önemli sebepler arasındadır. Bu sayede şerit tespiti sırasında kameranın yerden yüksekliğinden bağımsız olarak; düz yolda ve viraj gibi daha fazla görüş açısı gerektiren bölgelerde şeritlerin rahatlıkla kameranın görüş açısında kalması sağlanmıştır.

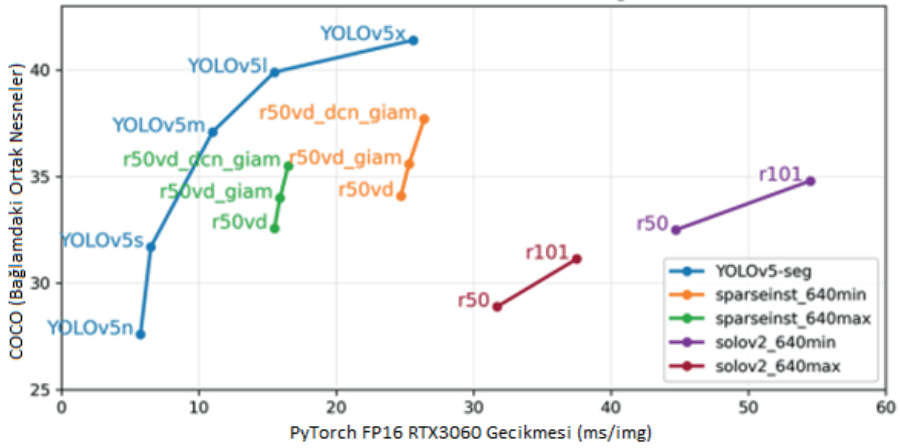
Kamera Kullanım Amaçları

• Trafik Tabela ve Işıklarının Tespiti

Otonom aracın çevresinde bulunan trafik tabela ve ışıkları kamera sensörü ile alması ve oluşturduğumuz nesne tespit algoritması ile tespit işlemini gerçekleştirmesi hedeflenmiştir.

Trafik tabela ve ışıklarının tespiti için YOLO (You Only Look Once) Derin Öğrenme algoritması kullanılmıştır. YOLO algoritmasının tercih edilmesinin sebebi, gerçek zamanlı nesne tespiti yapabilmesi ve bununla birlikte mAP (genel ortalama kesinlik) değerini yüksek oranda vermesidir. YOLO, trafik tabela ve ışıklarının tespiti gibi görüntü sınıflandırma uygulamalarında sıklıkla tercih edilen CNN (Convolutional Neural Network) Gerçek Zamanlı Nesne Takip algoritmasını kullanmaktadır. Hızlı ve etkili yaya tespiti ve araç tespiti, otonom sürüş teknolojisinde giderek daha önemli bir görev haline gelmiştir. Bu nedenle birçok çalışmada, optimize edilmiş özellik çıkarımı ile YOLO tabanlı yaya ve araç tespiti algoritması birçok çalışmada önerilmektedir [Yang Z. vd. 2018]

CNN modelinin diğer modellere göre önemli avantajları vardır. İşlemcilerle görebilme durumlarında, aşırı öğrenme ihtimalini azaltabilirler ve böylece hesaplamadaki karmaşadan koruyabilirler. Diğer önemli avantajı ise parametreleri paylaşabilme özellikleridir. CNN aracılığıyla öğrenilmiş parametreler sonraki katmanlara girdi şeklinde paylaşılabilir. Böylece, aynı durumlar önceki katmandan tekrar kullanılabilir. Bu durumda her defasında katmanların tekrar öğrenmesini durumunu ortadan kaldırmaktadır. Bu avantajları paylaşımı ile diğer katmanlar çok daha karmaşık özellikleri öğrenebilir duruma gelir.



Şekil 7. YOLOv5 ile diğer algoritmaların karşılaştırılması

YOLO modelleri arasında hedeflenen FPS (saniye başına kare) ve mAP (ortalama hassasiyet) değerlerini veren YOLOv5l modeli kullanılmıştır (Şekil 7) [<https://github.com>, <https://docs.ultralytics.com>, <https://pytorch.org>].

YOLOv5l algoritması kullanılarak modeli oluşturmak için önce özgün bir veri seti oluşturulmuştur. Veri seti 14 sınıf ve her sınıftan en az 700 olmak üzere 10.100 veriden oluşmaktadır. Veri setindeki fotoğraflar ile tabelaların çeşitli farklı arka planlarda ve açılarda çekilmesi, üyelerin Google Maps' ten araştırarak elde etmesi, yine üyelerin çevreden görüntüler elde etmesi ve data augmentation yöntemi kullanıp artırılması sonucu ile elde edilmiştir (Şekil 8).

```
girilmez
durak
sag_donulmez
sol_donulmez
yesil_isik
kirmizi_isik
ileri_sag
ileri_sol
park
park_yasak
mecburi_sag
mecburi_sol
kavsak
```

Şekil 8. Veri Seti İçinde Bulunan Sınıflar

Veri seti elde edildikten sonra YOLO algoritması formatına uygun olacak şekilde etiketlenmiştir (Şekil 9).

```
<object-class><x><y><width><height>
```

Şekil 9. YOLO algoritması formatında Etiket

Veriler (images) ve etiketleri (labels) %80 train (eğitim) ve %20 validation (doğrulama) olacak şekilde ayrılmıştır. (Şekil 10) [<https://wandb.ai/>].

```
--data
--train
--images (8080 adet .jpg dosyası)
--labels (8080 adet .txt dosyası)

--validation
--images (2020 adet .jpg dosyası)
--labels (2020 adet .txt dosyası)
```

Şekil 10. Veri Seti Şablonu

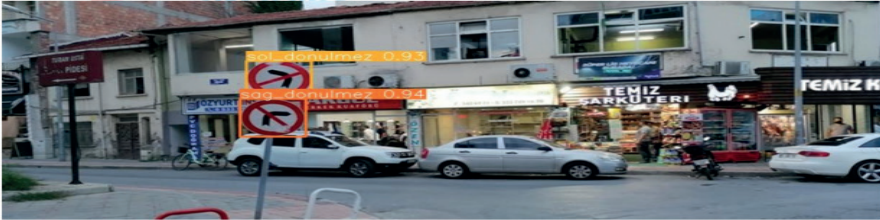
YOLOv5l modeli kullanılarak oluşturulan veri setinin eğitilmesi sonucunda modelin, ağırlık (weights) dosyası elde edilmiştir. Eğitim için gerekli ortam hazırlandıktan sonra eğitim başlatılmış ve wandb ile eğitimin ilerleyişi takip edilmiştir. İstenilen doğruluk ve loss değerlerine ulaşıldığında eğitim durdurulmuştur.

Eğitim sonucu elde edilen weights (ağırlık) dosyası ile test edildiğinde simetrik olarak birbirinin aynı olan tabelalarda doğru tespit gerçekleşmediği fark edilmiş yapılan araştırmalar sonucu fliplr değerinin 0.0 yapılması gerektiği aksi takdirde YOLOv5'in işlenen veri sayısını artırmak için verilen görüntülerin simetrisini de aynı sınıfa alarak eğittiği anlaşılmıştır (Şekil 11). Bu durum 2024 yılında yapılacak otonom yarışlarına hazırlanılmasında ciddi katkı ve deneyim kazanılmasına sebep olmuştur.

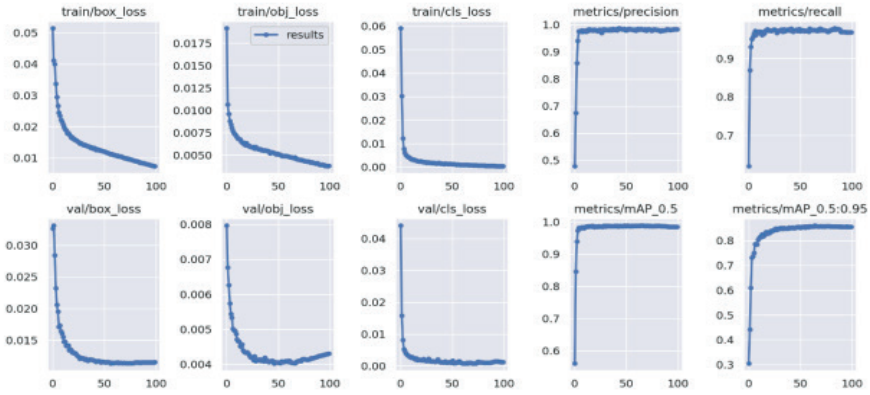


Şekil 11. Fliplr Değeri 0.5 Olduğunda Elde Edilen Sonuç

Bu değerın düzelmesi ile eğitim tekrar edilmiş ve eğitim sonucu test edildiğinde sorunun ortadan kalktığı görülmüştür (Şekil 12).



Şekil 12. YOLOv5 ile Test Edilmiş Trafik Levha Tespiti



Şekil 13. Eğitim Sonucu Elde Edilen Grafik

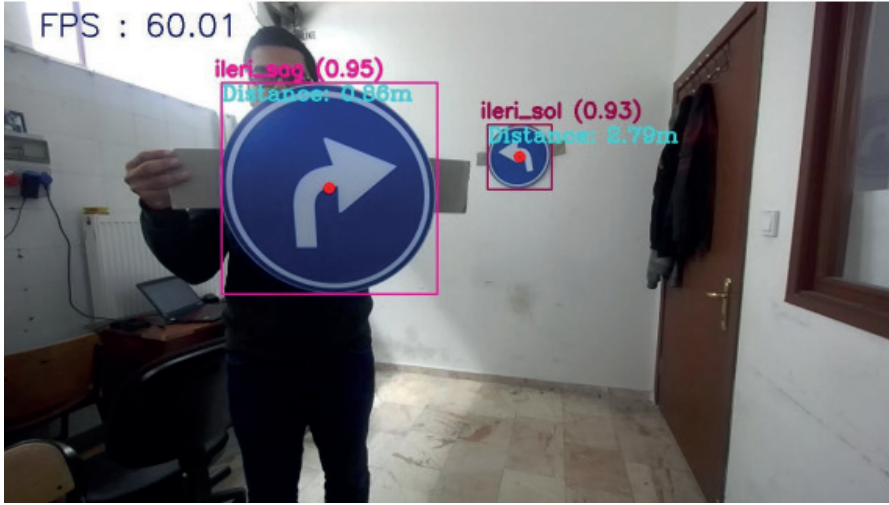
Eğitim sonucunda elde edilen model %85-%86 doğruluk hassasiyeti(mAP_0.5:0.95) ile %90 - %97 oranında doğruluk (mAP_0.5) vermektedir (Şekil 13).

Trafik tabela ve ışık tespiti için yapılan testler sonucunda hedeflenen şekilde gerçekleştiği görüldükten sonra ZED2 kamera sensörü ile tespit edilen nesnelerin uzaklık verilerinin elde edilmesi işlemine geçilmiştir. ZED SDK kurulumu sonrası kendi içinde bulunan nesne tespiti ile entegre şekilde uzaklık verisini veren kod kullanılmaya çalışılmıştır ancak kod içinde bulunan thread fonksiyonlarının nesne tespiti için istenilen performansı vermede sorun çıkardığı görülmüştür (Şekil 14).



Şekil 14. Yolov5 ile Test Edilmiş Trafik Levha Tespiti

Bunun hatalı verileri düzeltebilmek amacıyla ZED uzaklık verisi ile entegre şekilde çalışan özgün algoritma oluşturulmuştur. Bu algoritma kodlarının hedeflenen performansı verdiği görüldükten sonra kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. ZED 2 ve YOLOv5l modeli kullanılarak alınan Trafik Levha Tespiti

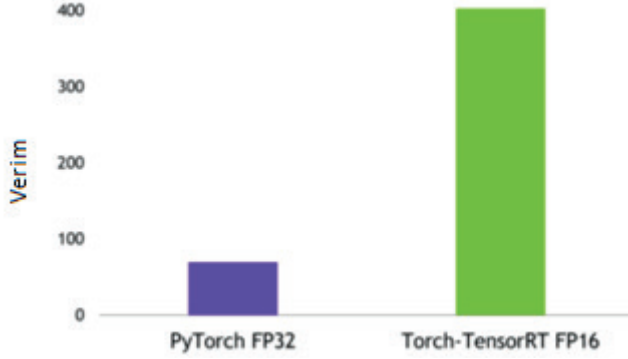
Oluşturulan Torch (.pt uzantılı) modelinin RTX 4070 Ti ekran kartında 60 FPS verdiği görülmüştür. Model üzerinde optimizasyon sağlamak için TensorRT (engine) dönüşümü gerçekleştirilmiştir. TensorRT, Nvidia GPU’larda çalışan yüksek performanslı derin öğrenme çıkarımı sunan bir SDK’dır. Ayrıca YOLOv5’in kullandığı kütüphane olan PyTorch ile entegredir [<https://developer.nvidia.com>].



Şekil 16. TensorRT Optimizasyonu

NVIDIA TensorRT tabanlı uygulamalar, tüm ana çerçevelerde eğitilmiş sinir ağı modellerini optimize edilmesini ve yüksek doğrulukla daha düşük hassasiyet için kalibre edilmesine olanak sağlamaktadır. TensorRT ayrıca ek bir performans artışı için seyrek Tensor Çekirdekleri kullanmaktadır. Azaltılmış

hassasiyetli çıkarım, birçok gerçek zamanlı hizmetin yanı sıra otonom ve gömülü uygulamalar için gerekli olan gecikmeyi önemli ölçüde en aza indiren bir durumdur (Şekil 16).

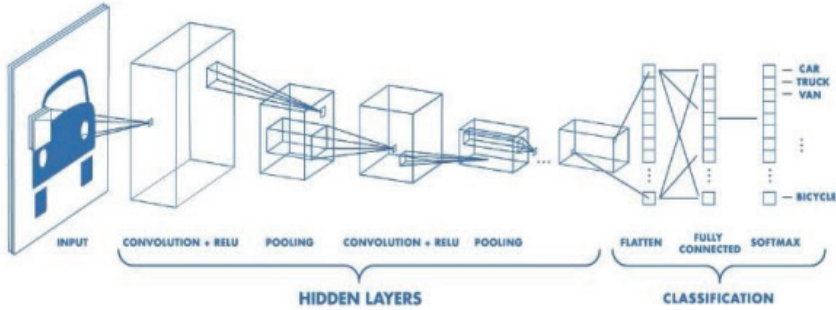


Şekil 3.17. PyTorch ile Torch -TensorRT'in iş Hacminin Karşılaştırılması

TensorRT optimizasyonu uygulanan nesne tespit modeli ZED2 kamera sensörü kullanılarak test edilmiş, trafik tabela ve ışıkları tespit etme ve uzaklık verilerini elde etme işlemleri başarıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 17).

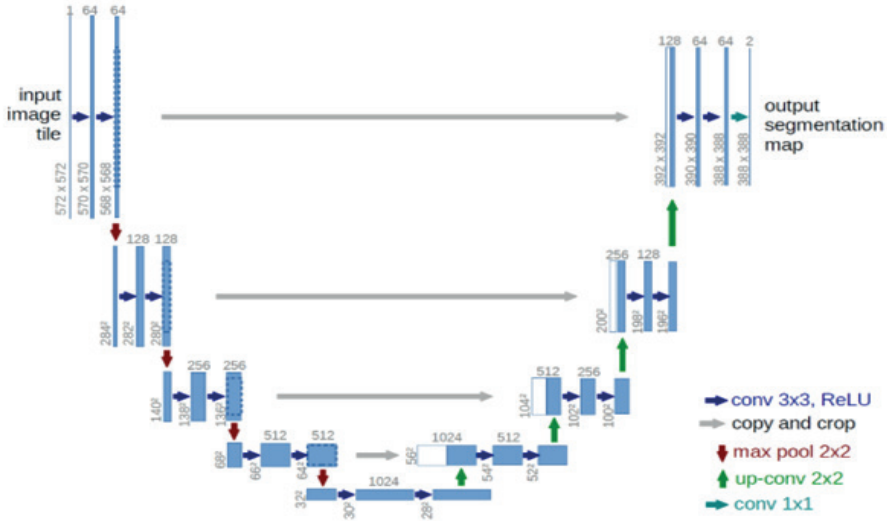
• Şerit Tespit ve Takip Algoritması

Şerit tespiti için bir tür CNN olan U-net teknolojisi kullanılmıştır. CNN de kullanılan Unet mimarisinde katmanları elde edilen veri setine göre düzenlenmiş olup tam performans alabilmek için parametrelerde değişiklikler yapılmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. CNN Yapısı

• U-Net Mimarisi



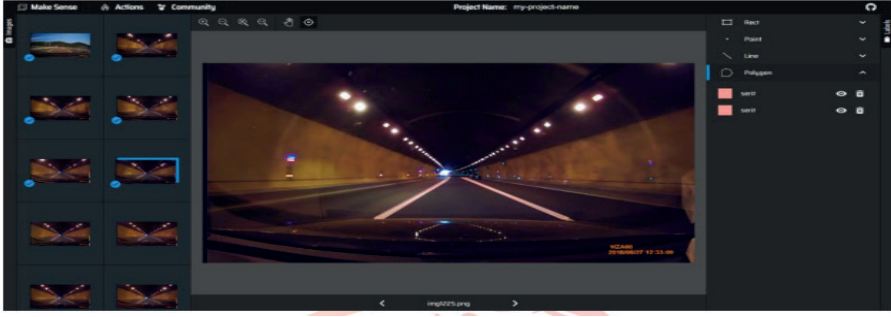
Şekil 19. U-Net Katmanları

U-Net, biyomedikal görüntü bölütleme için tasarlanmış bir derin öğrenme yapay sinir ağı mimarisidir. U-Net, giriş görüntüsünden özellikleri çıkarmak için bir kodlayıcı ağ ve bunları bir bölütleme maskeleri oluşturmak için bir çözücü ağ içerir. Bu iki ağ arasındaki veri akışını sağlamak için “atlamalı bağlantılar” adı verilen bir dizi bağlantı kullanılır. Bu tasarım, küçük yapılar ve ince detayları işlemek için uygun olduğu için, biyomedikal görüntü bölütleme ve bu tarz hassas uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Algoritması oluşturulan şerit tespit sisteminde kullanılan teknolojinin oldukça hassas bir işleme yapması gerekmektedir. Bu nedenle U-net mimarisini kullanmak şerit tespitinde iyi sonuçlar alınmasını sağlamıştır. U-net’in yayınlanmış son versiyonunda temel olarak kullanılan katmanlar bulunmaktadır (Şekil 19) [Ronneberger O. vd].

• Modelin Eğitimi ve Veri Setindeki İyileştirmeler

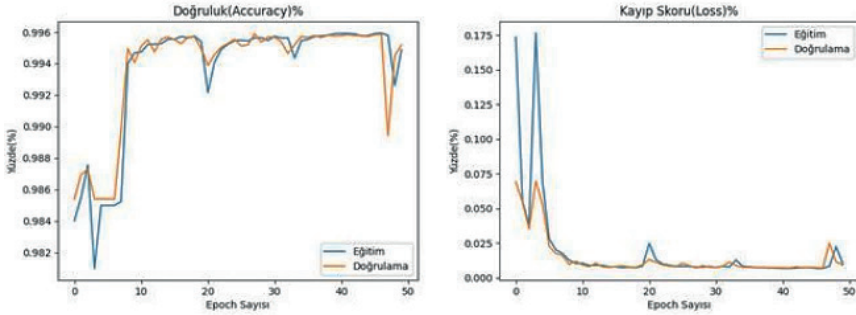
U-net ile modeli Ön Tasarım Raporundan itibaren geliştirmek için öncelikle veri setindeki görsellerin sayısı artırılmıştır. Bunun için kendi elde ettiğimiz veri seti üzerine hazır veri setlerinden uygun görüntüler eklenmiştir. Görüntüler yapay zeka algoritmaları kullanılarak poligon yöntemi ile etiketlenerek JSON formatında etiket dosyalarının çıktısı alınmıştır (Şekil 20).



Şekil 20. Şeritlerin Poligon Yöntemi ile Etiketlenmesi

Modelin eğitilebilmesi için şerit fotoğraflarının orijinal haline ve segmen-tasyon görüntüsüne dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle JSON forma-tında çıktı alınan etiket dosyaları maskelenmiş fotoğraflara dönüştürülmüştür. Daha önce eğitimi tamamlanan modeli daha ileri seviyede geliştirmek ve şerit tespiti için daha optimize bir hale getirebilmek amacıyla yeniden bir model eğitimi gerçekleştirilmiştir. Eğitim için önceki model eğitiminden farklı olarak 1000 fotoğraf ve 50 epoch (dönem sayısı) kullanılmıştır. Eğitim kodlarında ön işleme ve katman bölümlerinde değişiklik yapılmamıştır. Ancak eğitimin hi-per parametrelerinde fotoğraf sayısı ve boyutlarına göre değişiklikler yapılmış-tır. Eğitim sonucu oluşan modelin testlerinde önceki modele göre daha yüksek performans sunduğu görülmüştür

(Şekil 21).



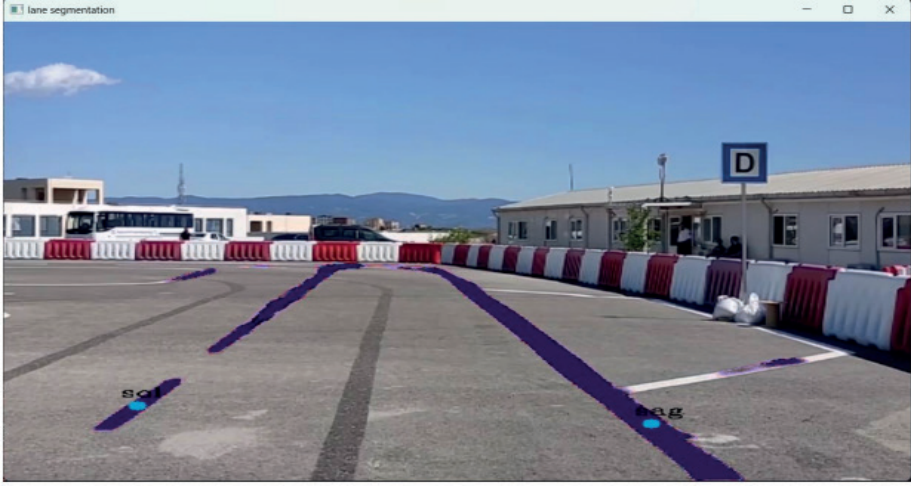
Şekil 21. Şerit Tespit Modeli / Doğruluk ve Kayıp Değerleri Grafiği

Şerit tespit sisteminde U-net' in kullanılmasındaki avantajlardan birisi de az veri ile yüksek performans alınabilmesidir. Bu nedenle elde edilen veri setindeki sayısı büyük olmamasına rağmen şerit tespiti için yüksek doğrulukta bir performans alınmıştır. Adım sayısı da birçok deneme sonrasında en performanslı olabilecek noktaya ayarlanmıştır. Veri setindeki görsellerin boyutları birbirinden farklı olduğundan öncelikle eğitim kısmında bir ön işlem uygulanarak tüm görsellerin boyutları python kodu yardımıyla 512x512

boyutuna çevrilmiştir. U-net mimarisi için tüm işlemler gerçekleştirildikten sonra model oluşturulmuştur.

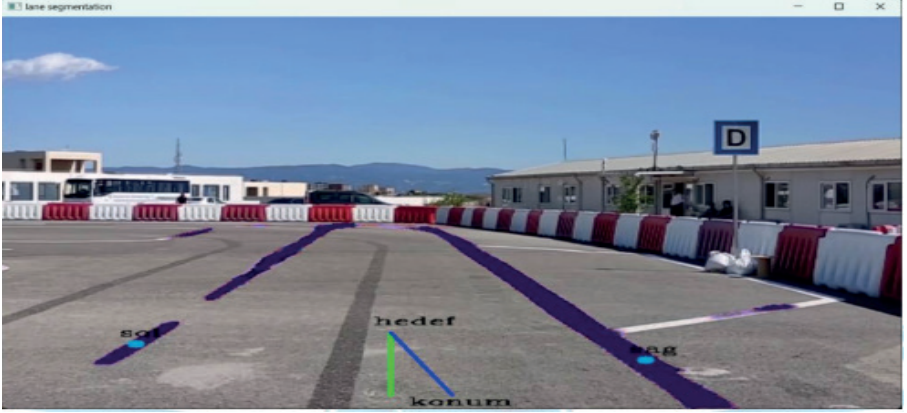
• Şerit Takibi

Şerit tespiti tamamlandıktan sonra şerit takibi için oluşturulan model ve OpenCV kütüphanesi kullanılarak bir test kodu sistemi oluşturulmuştur. Öncelikle sağ ve sol şerit ayrı ayrı tespit edilip video üzerinde belirtilerek sağ ve sol şeridin ikisinde de aynı hızda iki referans noktası oluşturulmuştur. Bu referans değerlerinin videonun ilerleyen kısımlarında belirli periyotlarda güncellenmesini sağlanmıştır (Şekil 22).



Şekil 22. Sağ ve Sol Referans Noktalarının Gösterimi

Aracın parkur boyunca şeritten çıkmadan ilerleyebilmesi için bir orta nokta belirlenmiştir. 48 Aracın parkur boyunca herhangi bir engelle veya olağan dışı bir durumla karşılaşmadığı sürece bu orta noktayı takip etmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Orta noktayı hesaplamak için sağ ve sol şerit üzerinde oluşturulan referans noktalarının bilgileri kullanılarak bir orta nokta oluşturulmuştur. Şekil 23’ da belirtilen yeşil çizgi (hedef bölgesi) aracın takip etmesi gereken orta noktayı mavi çizgi ise aracın anlık konumunu göstermektedir. Şerit takip kamerasının konumu araçta tam ortalanmaktadır. Bu sebeple görüntünün x eksenine göre tam ortası aracın anlık konumu için referans alınmıştır.

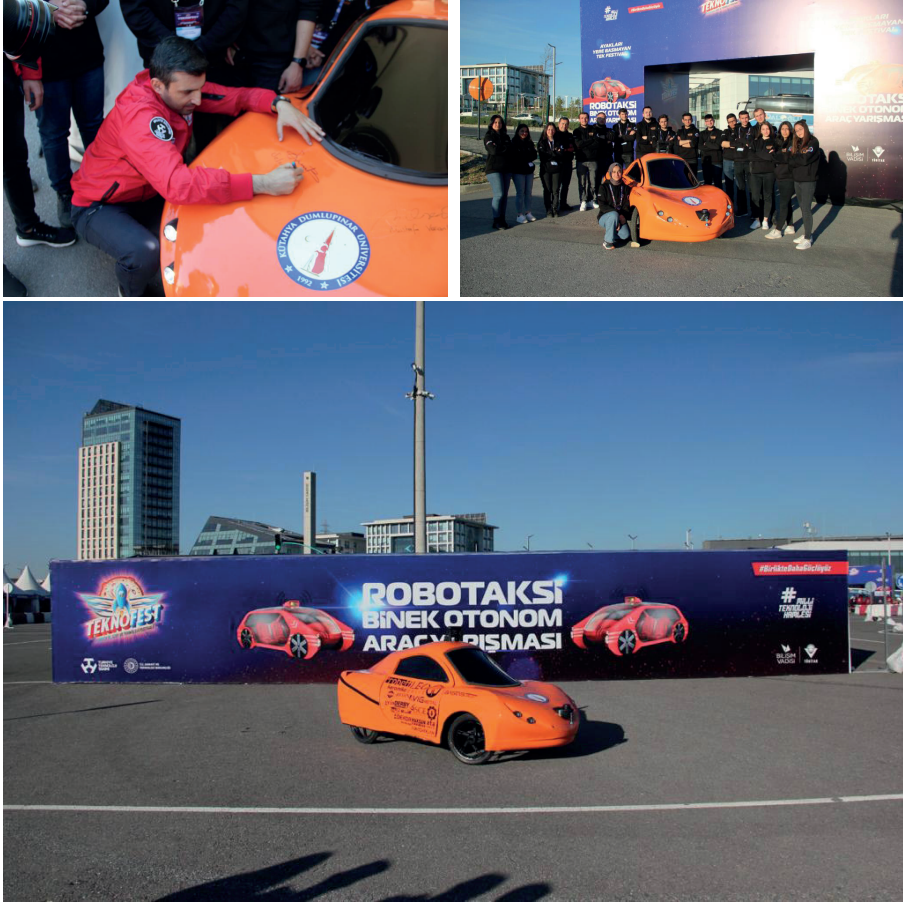


Şekil 23. Başlangıç ve Bitiş Noktası Tespiti için Karelerin Oluşturulması

SONUÇLAR

Ön Tasarım Raporundan itibaren sistem optimizasyonu ve sistem verimliliğinin artırılması için çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Yapılan değişiklikler ile daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu yapısal ve tasarımsal değişiklikler;

- Trafik tabela ve ışıklarının tespitinde, daha fazla kaynak bulunması, hedeflenen doğruluk (mAP) ve kare hızını (FPS) sağlaması sebebiyle YOLOv7 yerine YOLOv5 nesne tespit algoritmasının kullanılmasına karar verilmiştir.
- Trafik tabela ve ışıklarının tespiti için kullanılacak veri setindeki verilerin miktarı ve çeşitliliği daha yüksek doğruluk değeri(mAP) alınabilmesi için artırılmıştır.
- Şerit tespiti için kullanılan Tensorflow ve nesne tespiti için kullanılan PyTorch kütüphane çakışması tespit edildikten sonra U-net modelinin katman ağırlıkları hesaplanarak PyTorch modeline çevrilmiştir.
- Şerit tespiti için kullanılacak veri setindeki verilerin miktarı ve çeşitliliği daha yüksek doğruluk değeri(mAP) alınabilmesi için artırılmıştır.
- İleride bir sorunla karşılaşılması durumunda tedbir olarak YoloP v2 nesne tespit algoritması kullanılarak yeni bir şerit tespit modeli daha oluşturulmuştur.



Şekil 25. Robotaksi Binek Otonom Yarışmasına ait fotoğraflar

Tasarımı, yazılımı ve ekipmanları özgün olarak hazırlanan bu araç ile, TEKNOFEST tarafından düzenlenen 10-13 Nisan Robotaksi Binek Otonom Araç Yarışmasına katılım sağlanmıştır. Bilindiği üzere TEKNOFEST, Türkiye’de milli teknolojinin geliştirilmesi konusunda kritik rol oynayan birçok kuruluşun paydaşlığıyla düzenlenen Türkiye’nin ilk ve tek havacılık, uzay ve teknoloji festivalidir. Bu festivalde ülkemizin teknoloji üreten ve geliştiren bir topluma dönüşmesi konusunda farkındalık oluşturması hedeflenmektedir. Bu kapsamda özgün tasarım ve yazılımı yapılan araç ile, 2023 yılında düzenlenen Robotaksi Binek Otonom Araç Yarışmasında 471 takım içinde 31 finalist takımdan biri olarak yarışmalara katılım sağlamıştır. Yarışma sonunda özgün tasarım ve yazılımın öne çıkması ile Türkiye 8. si olarak başarı elde edilmiştir. (Şekil 25).

REFERANSLAR

- Erdoğan M., Kaya İ., Karaşan A., Çolak M., Evaluation of Autonomous Vehicle Driving Systems For Risk Assessment Based On Three-Dimensional Uncertain Linguistic Variables, *Applied Soft Computing* 113 (2021) 107934, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107934>
- Jeyalakshmi S., Ravikumar S., Lakshmi R., Vivekanandan G., An Agile Autonomous Car Driving Assistance Using Hybrid Optimization-Based Kernel Support Vector Convolutional Network, *Expert Systems With Applications*, 237 (2024) 121317, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121317>
- Robotaksi-Binek Otonom Araç Yarışması, <https://teknofest.org/tr/competitions/competition/29>
- Ultralytics YOLO Vision, <https://github.com/ultralytics/yolov5>
- Ultralytics YOLO Dokümanlar, https://docs.ultralytics.com/tr/yolov5/quickstart_tutorial/
- Ultralytics YOLOv5 for Object Detection, Instance Segmentation and Image Classification https://pytorch.org/hub/ultralytics_yolov5/
- Weights&Biases The AI Developer Platform, <https://wandb.ai/site/>
- Nvidia Developer, <https://developer.nvidia.com/tensorrt>
- Ronneberger O., Fischer P., Brox T., U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, Lecture Notes in Computer Science* (2015), vol 9351. Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
- Yang Z., Li J., and Li H., Real-time Pedestrian and Vehicle Detection for Autonomous, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* Changshu, Suzhou, China, June 26-30, 2018, <https://doi.org/10.1109/ivs.2018.8500642>

BÖLÜM 7

FLAŞ SOĞUTUCULU İKİ KADEMELİ GENLEŞME SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ

*Cenker AKTEMUR¹,
Barış KAVASOĞULLARI²*

¹Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Termodinamik ve Enerji ABD, Sivas, Türkiye

²Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Mühendisliği Bölümü, Hava-Uzay Ortamı ve Sistemleri ABD, Sivas, Türkiye

1. Giriş

Tek kademeli buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemleri, buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklıkları arasındaki farkın düşük olduğu durumlarda tatmin edici bir performans sergilemektedirler (Dincer, 2017). Fakat buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklıkları arasındaki farkın fazla olduğu, özellikle düşük sıcaklıkta soğutma yapılan uygulamalarda, kompresör basınç oranının ve kompresör çıkış sıcaklığının artması, bu tip sistemlerde performans katsayısını (COP) oldukça düşürmektedir (Saeed vd., 2023). Buna ek olarak kompresörde gazın sıcaklığının artması, kompresörün hacimsel verimini düşürmekte ve kompresörün aşırı ısınmasına sebep olmaktadır (Kaya 2021; Rodríguez-Jara vd., 2022). Bu tip olumsuzlukların önüne geçilebilmesi için, iki-kademeli genleşme sistemine sahip soğutma sistemleri önerilmiştir.

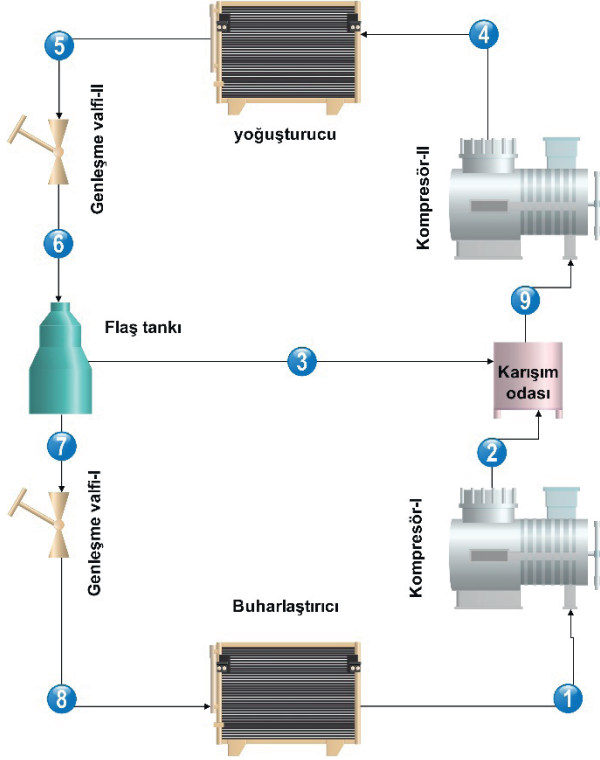
İki-kademeli genleşme sistemleri ile ilgili literatürdeki çalışmalar, genellikle sistemde kullanılan farklı akışkanların termodinamik performans analizlerine yoğunlaşmaktadır. Buna ek olarak bazı araştırmacılar sistemin çevre-ekonomik performansını arttırmak için, sistemde iş akışkanı olarak karbondioksit (CO_2) tercih etmişlerdir. Sun ve Wang (2022), endüstriyel soğutma sistemlerinde kullanılan kaskad soğutma teknolojilerinin performans analizi üzerine odaklanmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, R1150/R717 soğutucu grubuyla iki kademeli sıkıştırmaya dayalı kaskad soğutma sistemi (CRST), mevcut üç kademeli kaskad soğutma sistemi (TCRS) ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçları, CRST'nin enerji tasarrufu sağladığını, sıkıştırıcı çıkış sıcaklıklarını düşürdüğünü ve yıllık toplam güç tüketimini %8.6-10.2 oranında azalttığını göstermiştir. Ayrıca, CRST'nin düşük sıcaklık aralıklarında (-120°C ila -80°C) TCRS'nin yerini alabilecek etkin bir alternatif olduğu ortaya konulmuştur. Citarella vd. (2021), ticari soğutma sektöründe kullanılan küçük ölçekli CO_2 (R744) bazlı iki kademeli bir soğutma sisteminin performansını incelemişlerdir. Araştırmada, Avrupa Birliği'nin enerji verimliliği standartlarına uygunluğu sağlamak için yapılan deneysel analizlere odaklanılmış, CO_2 'nin çevresel etkisinin düşük olduğu ve belirli tasarım iyileştirmeleriyle enerji verimliliğini artırdığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda ayrıca, ara soğutucu kullanımı ve flaş gazı giderme gibi faktörlerin, sistemin soğutma kapasitesini ve performans katsayısını artırdığı tespit edilmiştir. Niu vd. (2023) yaptıkları çalışmada, CO_2 ile çalışan iki kademeli bir soğutma sisteminde dış ara soğutucu kullanımının performansa etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, sistemin optimal basınç değerlerini belirlemek ve performansını artırmak amaçlanmıştır. Simülasyon ve deneysel analizler, değişken hızda çalışan kompresörlerin, sabit hızlı kompresörlere göre enerji verimliliğini %4,5 artırdığını, ancak soğutma kapasitesini %8,4 azalttığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, bu tür sistemlerin enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından etkili bir alternatif olduğunu ortaya koymuştur. Tahmasebzadehbaie ve Sayyaadi (2020), gaz türbini çevrimi ile birlikte çalışan bir çift-kademeli soğutma sisteminin, propilen

ve propan olmak üzere iki farklı iş akışkanı için termodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada iki akışkan arasından en iyi performansı propilenin gösterdiği belirlenmiş olup, söz konusu akışkanla sistemin performans katsayısının 1,42'den 2,01'e yükseldiği tespit edilmiştir. Ayrıca sistemin azot oksit ve karbonmonoksit emisyonlarının sırasıyla 30,74'ten 29,7 ve 81,0'den 71,6 ppm'e düştüğü raporlanmıştır. Llopis vd. (2015), düşük sıcaklıktaki soğutma için beş farklı tipte iki-kademeli çevrim önermişlerdir. Yapılan çalışmada R717, R744, R290, R152a, R1234ze, R134a ve R404A olmak üzere yedi farklı iş akışkanı ele alınmış ve önerilen sistemlerin bu akışkanlara göre enerji ve çevresel analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda R744 (CO₂) ile çalışan sistemlerin, özellikle sıcak iklime sahip bölgelerde, iyi performans gösterebileceği ortaya konulmuştur. Wang vd. (2021) ise, seri ve paralel bağlı olmak üzere iki tip iki-kademeli buhar sıkıştırma soğutma çevriminin termodinamik performans karşılaştırmasını yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada R134a ve R600 olmak üzere iki farklı akışkan tercih eden araştırmacılar, R600 kullanımının özgül soğutma kapasitesini %102,72 arttırdığını; R600 kullanılan seri bağlı sistemin ise COP ve ekserji veriminin paralel bağlı sisteme göre sırasıyla %7,8 ve %11 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Mancuhan (2019) ara soğutuculu iki kademeli soğutma sisteminin farklı soğutucu akışkanlarla, düşük ve orta sıcaklık uygulamaları için, performans analizini gerçekleştirmiştir. R717, R134a, R152a, R290, R404A ve R507 ile yapılan teorik analizlerde sistem, optimum ara basınç, buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklıklarına göre optimize edilmiştir. Analiz sonuçları, R290'ın düşük sıcaklık uygulamalarında yüksek COP (1,81) ve düşük GWP (11) değerleriyle öne çıktığını, orta sıcaklıkta ise R717'nin en iyi COP (2,65) ve sıfır GWP ile çevre dostu bir seçenek olduğu ortaya konulmuştur. Roy ve Mandal (2023), R32, R290, R1270, R143a ve R410A soğutucu akışkanlarını kullanan iki kademeli bir soğutma sisteminin termo-ekonomik performans analizini yapmışlardır. Çalışmada, R290 ve R1270'in COP, ekserji verimliliği, kütle debisi ve yıllık tesis maliyeti açısından en iyi performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, R1270 ve R32, R410A'nın en uygun alternatifleri olarak belirlenmiştir.

2. Sistem Tanıtımı ve Termodinamik Modelleme

Bu bölümde R134a ve R134a soğutucu akışkanlarını kullanan flaş soğutuculu iki kademeli genleşme sisteminin detayları ve termodinamik ve çevresel analiz denklemleri sunulmuştur. Şekil 1'de flaş soğutuculu iki kademeli genleşme sisteminin şematik olarak gösterimi verilmiştir. Soğutucu akışkan buharlaştırıcıda düşük basınç ve düşük sıcaklıkta buharlaşır. Düşük basınçlı buhar, düşük basınçlı kompresörde orta basınca sıkıştırılır. Soğutucu akışkanın sıcaklığı ve basıncı artar. Düşük basınçlı kompresörden gelen buhar, karıştırma odasındaki flaş odasından gelen buharla birleştirilir. Bu, termodinamik koşulları dengeler ve soğutucuyu yüksek basınçlı sıkıştırmaya hazırlar. Soğutucu akışkan daha da sıkıştırılarak yüksek basınç ve sıcaklığa ulaşır. Sıcak,

sıkıştırılmış soğutucu akışkan ortama ısı salar ve yoğunlaşarak bir sıvıya dönüşür. Sıvı soğutucu akışkan bir genleşme valfi aracılığıyla genişletilir ve orta basınca düşürülür. Soğutucu akışkanın bir kısmı buhara dönüşür. Soğutucu akışkan flaş odasında buhar ve sıvı fazlarına ayrılır. Basıncın buharlaştırıcı seviyesine düşürülmesi için sıvı faz, diğer bir genleşme valfinden geçer. Soğutucu akışkan buharlaştırıcıya girer, burada ısıyı emer ve tekrar buharlaşarak çevrimi tamamlar.



Şekil 1. Flaş soğutuculu iki kademeli genleşme sisteminin şematik olarak gösterimi

Bu çalışmada incelenen sistemin termodinamik ve çevresel analizi yapılmıştır. Çalışma parametreleri olarak buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve sistemin çalışma süresine göre soğutma tesir katsayısı (STK), flaş soğutucuda buharlaştırılan sıvı soğutucu akışkanın kuruluk oranı ve toplam eşdeğer ısınma etkisi, total equivalent warming impact (TEWI) çıktıları incelenmiştir.

Tablo 1’de incelenen sistemde kullanılan soğutucu akışkanlara ait termodinamik ve çevresel özellikler listelenmiştir (Zhang vd., 2022).

Tablo 1. İncelenen sistemde kullanılan soğutucu akışkanlara ait termodinamik ve çevresel özellikler

Soğutucu akışkan	Normal kaynama noktası, K	Kritik sıcaklık, K	Kritik basınç, MPa	ODP	GWP
R134a	247.05	374.25	4.05	0	1430
R13I1	250.95	396.45	3.95	0	1

İncelenen sistemin termodinamik ve çevresel analizi için Engineering Equation solver, Mühendislik Denklemleri Çözücüsü (EES) kullanılmıştır. Analiz için yazılıma girilen kodlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Analiz için yazılıma girilen kodlar

Kodlar	
$T[1] = -30$ $x[1] = 1$ $h[1] = \text{Enthalpy}(R$, T=T[1], x=x[1]) s[1] = \text{Entropy}(R$, T=T[1], x=x[1]) P[1] = \text{Pressure}(R$, T=T[1], x=x[1]) $	$P[2] = P[3]$ $h_{2s} = \text{Enthalpy}(R$, P=P[2], s=s_{2s}) s[2] = \text{Entropy}(R$, P=P[2], h=h[2]) T[2] = \text{Temperature}(R$, P=P[2], s=s[2]) s_{2s} = s[1] \eta_1 = (h_{2s} - h[1]) / (h[2] - h[1]) $
$x[3] = 1$ $h[3] = \text{Enthalpy}(R$, T=T[3], x=x[3]) s[3] = \text{Entropy}(R$, T=T[3], x=x[3]) P[3] = \sqrt{P[1] \cdot P[5]} T[3] = \text{Temperature}(R$, P=P[3], x=x[3]) $	$P[4] = P[5]$ $T[4] = \text{Temperature}(R$, P=P[4], h=h[4]) h_{4s} = \text{Enthalpy}(R$, P=P[4], s=s_{4s}) s[4] = \text{Entropy}(R$, P=P[4], h=h[4]) \eta_2 = (h_{4s} - h[3]) / (h[4] - h[3]) s_{4s} = s[9] $
$T[5] = 45$ $x[5] = 0$ $h[5] = \text{Enthalpy}(R$, T=T[5], x=x[5]) s[5] = \text{Entropy}(R$, T=T[5], x=x[5]) P[5] = \text{Pressure}(R$, T=T[5], x=x[5]) $	$P[6] = P[3]$ $h[6] = h[5]$ $T[6] = T[3]$ $s[6] = \text{Entropy}(R$, P=P[6], h=h[6]) x[6] = \text{Quality}(R$, T=T[6], h=h[6]) $
$P[7] = P[3]$ $T[7] = T[3]$ $x[7] = 0$ $h[7] = \text{Enthalpy}(R$, T=T[7], x=x[7]) s[7] = \text{Entropy}(R$, P=P[7], x=x[7]) $	$P[8] = P[1]$ $h[8] = h[7]$ $T[8] = T[1]$ $s[8] = \text{Entropy}(R$, P=P[8], h=h[8]) $
$P[8] = P[1]$ $h[8] = h[7]$ $T[8] = T[1]$ $s[8] = \text{Entropy}(R$, P=P[8], h=h[8]) $	$P[9] = P[3]$ $h[9] = x[6] \cdot h[3] + (1 - x[6]) \cdot h[2]$ $T[9] = \text{Temperature}(R$, P=P[9], h=h[9]) s[9] = \text{Entropy}(R$, P=P[9], h=h[9]) $
$Q_{buh} = 10 \text{ [kW]}$ $Q_{buh} = m[1] \cdot (h[1] - h[8]) \cdot (1 - x[6])$ $W_{komp1} = m[1] \cdot ((1 - x[6]) \cdot (h[2] - h[1]))$ $W_{komp2} = m[4] \cdot (h[4] - h[9])$ $W_{top} = W_{komp1} + W_{komp2}$	$m[2] \cdot h[2] + m[3] \cdot h[3] = m[9] \cdot h[9]$ $m[3] = x[6] \cdot m[9]$ $m[1] = m[2]$ $m[2] = m[7]$ $m[7] = m[8]$ $m[4] = m[5]$ $m[5] = m[6]$ $m[6] = m[9]$

$STK=Q_{buh}/(W_{komp1}+W_{komp2})$ $TEWI_{direct}=GWP*(L*N+m_{ref}*(1-\alpha))$ $TEWI_{indirect}=W_{tot}*t*\beta$ $TEWI=TEWI_{direct}+TEWI_{indirect}$ $\beta=0.481$ $L=0.125$ $t=4000$ $\alpha=0.70$ $m_{ref}=m[4]*240$ $N=15$

Tablo 3’te incelenen sistemde kullanılan parametrelerin değerleri listelenmiştir (de Paula vd., 2020; Hacıpaşaoğlu ve Öztürk, 2024).

Tablo 3. İncelenen sistemde kullanılan parametrelerin değerleri

Parametre	Değer/Denklem
Buharlaştırıcı sıcaklığı (T_i), °C	-40, -35, -30, -25, -20
Yoğuşturucu sıcaklığı (T_s), °C	40, 45, 50, 55, 60
Kompresörlerin izentropik verimi (η)	$0.874-0.0135 \times (P_j/P_i)$
Soğutucu akışkan geri kazanım oranı (L),%	70
Soğutma kapasitesi ($\dot{Q}_{buh}$), kW	10 kW
Soğutucu akışkan miktarı (m_{ref}), kg	$m \times 240$ (s)
Soğutucu akışkanın yıllık sızıntı oranı (α), %	12.5
Sistemin çalışma süresi (t), saat/yıl	1000-4000
Sistemin servis ömrü (N), yıl	15
Elektrik dönüşüm faktörü (β), kg·CO ₂ /kWh	0.481

3. Termodinamik ve Çevresel Analiz Sonuçları

Bu bölümde R131I ve R134a soğutucu akışkanlarını kullanan flaş soğutuculu iki kademeli genleşme sisteminin termodinamik ve çevresel analiz sonuçları sunulmuştur. Tablo 4 ve 5’te sırasıyla R131I ve R134a soğutucu akışkanlarını kullanan flaş soğutuculu iki kademeli genleşme sisteminin her bir noktasına ait sıcaklık, basınç, entalpi, entropi, kütsel debi ve kuruluk derece değerleri verilmiştir. Tablolar oluşturulurken buharlaştırıcı sıcaklığı ve yoğuşturucu sıcaklığı sırasıyla -30°C ve 45°C olarak alınmıştır.

Tablo 4. R131I soğutucu akışkan kullanılan sistemin her bir noktasına ait termodinamik değerler

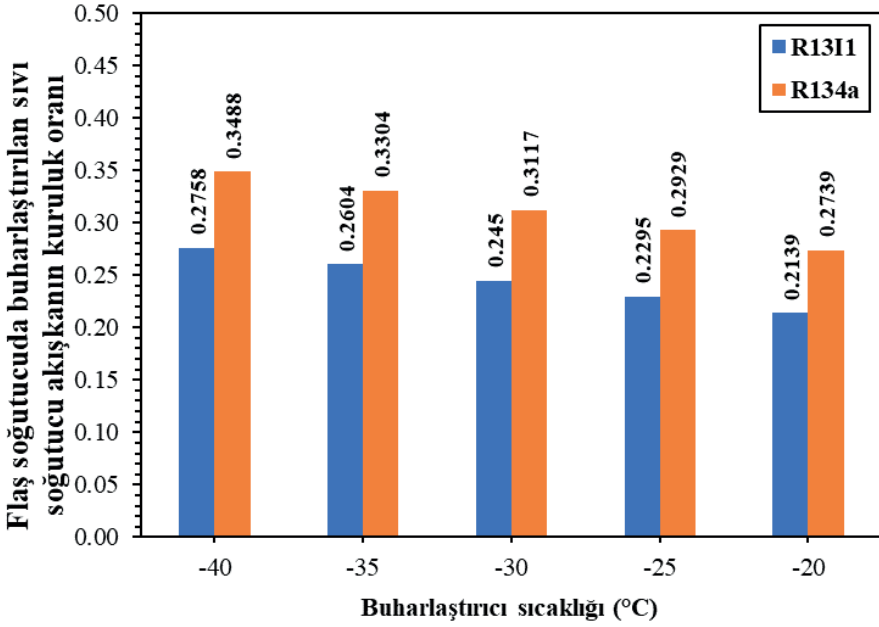
i	T, °C	P, kPa	h, kJ/kg	s, kJ/kg/°C	m, kg/s	x, -
1	-30	71,91	290,6	1,376	0,148	1
2	22,42	244,4	306,4	1,386	0,148	-
3	2,073	244,4	299	1,36	0,048	1
4	80,67	830,7	323,8	1,392	0,1961	-
5	45	830,7	225,1	1,084	0,1961	0

6	2,073	244,4	225,1	1,091	0,1961	0,245
7	2,073	244,4	201,1	1,004	0,148	0
8	-30	71,91	201,1	1,008	0,148	-
9	17,44	244,4	304,6	1,379	0,1961	-

Tablo 5. R134a soğutucu akışkan kullanılan sistemin her bir noktasına ait termodinamik değerler

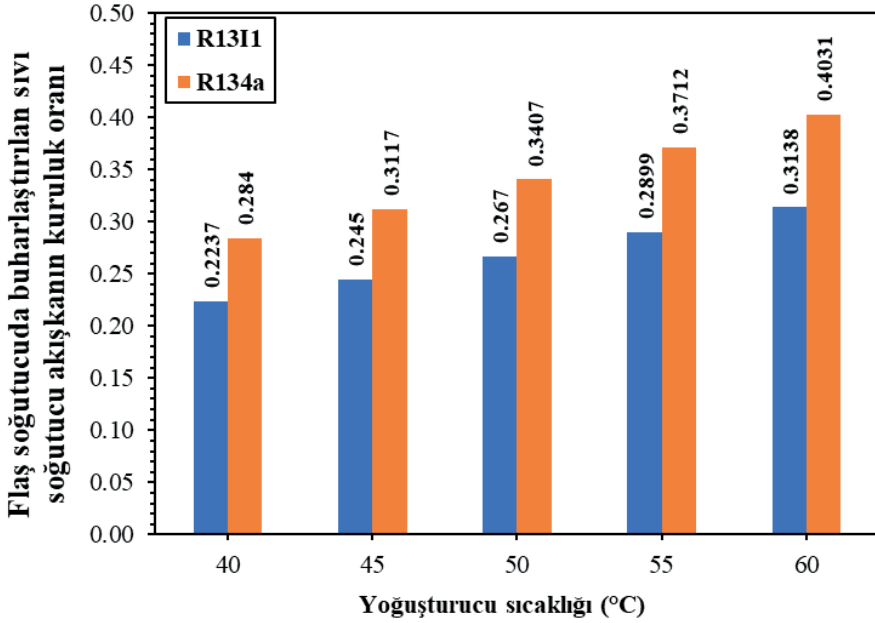
Düğüm noktası	T, °C	P, kPa	h, kJ/kg	s, kJ/kg/°C	m, kg/s	x, -
1	-30	84,43	232,2	0,9558	0,0817	1
2	16,02	313	264,3	0,9755	0,0817	-
3	1,838	313	251,5	0,9304	0,037	1
4	66,06	1161	297	0,9856	0,1187	-
5	45	1161	115,8	0,4183	0,1187	0
6	1,838	313	115,8	0,4369	0,1187	0,3117
7	1,838	313	54,33	0,2134	0,0817	0
8	-30	84,43	54,33	0,2244	0,0817	-
9	11,59	313	260,3	0,9617	0,1187	-

Şekil 2’de buharlaştırıcı sıcaklığı ile değişen flaş soğutucuda buharlaştırılan sıvı soğutucu akışkanın kuruluk oranı verilmiştir. Analiz yapılırken yoğuşturucu sıcaklığı 45°C olarak alınmıştır. Genel olarak buharlaştırıcı sıcaklığı arttıkça her iki soğutucu akışkan için de kuruluk derecesinin azaldığı görülmektedir. Bu, daha yüksek evaporatör sıcaklıklarında soğutucudaki sıvı faz oranının arttığını ve bunun da flaş odasındaki fazların ayrılmasını etkilediğini gösterir. İki soğutucu akışkan karşılaştırıldığında R134a, incelenen her sıcaklıkta R1311’e göre daha yüksek bir kuruluk derecesine sahiptir. Örneğin, R1311 için -40°C’deki kuruluk seviyesi 0,2758 iken R134a için yaklaşık %26,5’lik bir artışla 0,3488’e ulaşır. Buharlaştırıcı sıcaklığının -20°C’de olduğu durumda ise R1311 için kuruluk seviyesi 0,2139 iken R134a için 0,2739’dur, yani yaklaşık %28’lik bir fark oluşmuştur. Artan sıcaklıkla birlikte kuruluk derecesindeki genel azalma, etkili faz ayrımı için sıcaklık kontrolünün önemini doğrulamaktadır.



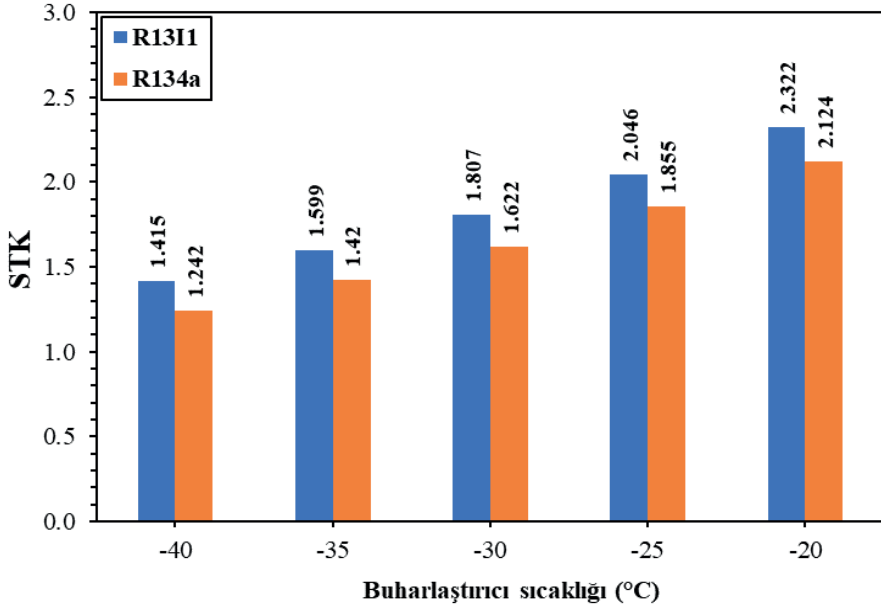
Şekil 2. Buharlaştırıcı sıcaklığı ile değişen flaş soğutucuda buharlaştırılan sıvı soğutucu akışkanın kuruluk oranı

Şekil 3'te yoğuşturucu sıcaklığı ile değişen flaş soğutucuda buharlaştırılan sıvı soğutucu akışkanın kuruluk oranı verilmiştir. Analiz yapılırken buharlaştırıcı sıcaklığı -30°C olarak alınmıştır. Buharlaştırıcı sıcaklığıyla yapılan önceki analizin aksine, burada her iki soğutucu akışkan için yoğuşturucu sıcaklığının artmasıyla kuruluk derecesinin arttığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, daha yoğuşturucu sıcaklıklarının, soğutucu akışkanın termodinamik özelliklerini etkilemesi ve böylece flaş odası prosesinde daha fazla buhar fazının üretilmesidir. İki soğutucu akışkan karşılaştırıldığında, R134a'nın tüm yoğuşturucu sıcaklıklarında R1311'den daha yüksek bir kuruluk derecesine sahip olması, iki soğutucu akışkanın farklı faz geçiş özelliklerine işaret etmektedir. 40°C 'lik bir yoğuşturucu sıcaklığında, R1311 için kuruluk derecesi 0,2237 iken R134a için yaklaşık %27'lik bir artışla 0,284'tür. Sıcaklık arttıkça bu fark devam eder ve 60°C 'deki değerler R1311 için 0,3138'e ve R134a için 0,4031'e ulaşır. Burada fark %28,5 civarındadır. Sonuçlar, daha yüksek yoğuşturucu sıcaklıklarının, flaş odasındaki kuruluk derecesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



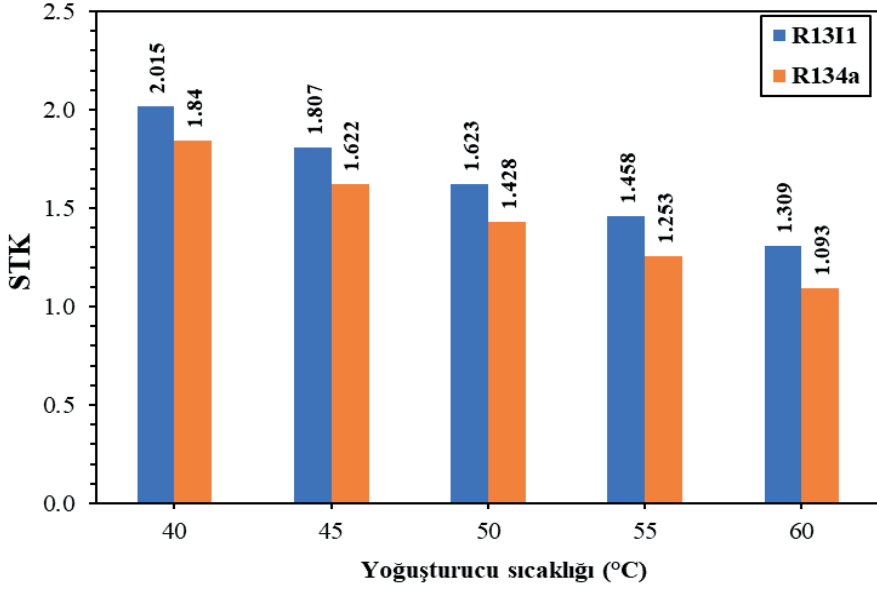
Şekil 3. Yoğusturucu sıcaklığı ile değişen flaş soğutucuda buharlaştırılan sıvı soğutucu akışkanın kuruluk oranı

Şekil 4'te buharlaştırıcı sıcaklığı ile değişen STK değerleri verilmiştir. Yoğusturucu sıcaklığı 45 °C olarak alınmıştır. Genel olarak her iki soğutucu akışkan için de buharlaştırıcı sıcaklığı arttıkça STK değerinin arttığı görülmektedir. Bu, daha yüksek buharlaştırıcı sıcaklıklarının daha verimli enerji kullanımına yol açtığını ve bunun da genel sistem performansı açısından faydalı olduğunu göstermektedir. İki soğutucu akışkanın karşılaştırılması, R1311'in tüm sıcaklık aralıklarında R134a'dan daha yüksek bir STK değerine sahip olduğunu gösterir; bu da daha iyi termodinamik verimliliğe işaret eder. Örneğin, -40°C'lik bir evaporatör sıcaklığında R1311 için STK değeri 1,415 iken R134a için 1,242'dir, bu da yaklaşık %14'lük bir iyileşmedir. Bu avantaj sıcaklık arttıkça da devam eder. -20°C'de R1311, 2,322 STK değerine ulaşırken R134a, yaklaşık %9'luk bir farkla 2,124'e ulaşır. Sonuçlar, R1311'in özellikle yüksek buharlaştırıcı sıcaklıklarında daha verimli çalıştığını, R134a'nın ise daha düşük bir STK değerine sahip olduğunu göstermektedir; bu durum, daha yüksek kayıplar veya daha az verimli ısı transferi nedeniyle olabilir.



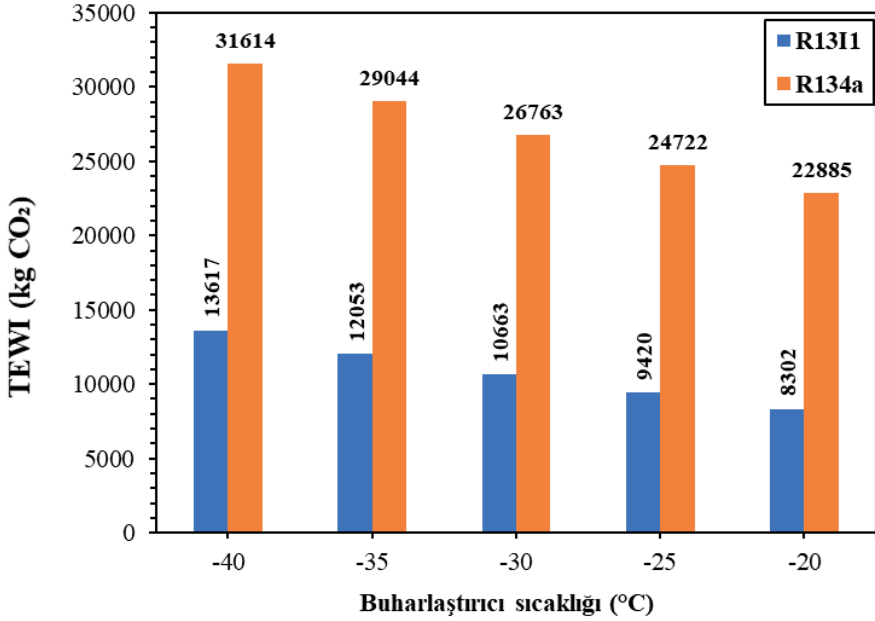
Şekil 4. Buharlaştırıcı sıcaklığı ile değişen STK değeri

Şekil 5'te yoğuşturucu sıcaklığı ile değişen STK değerleri verilmiştir. Analiz yapılırken buharlaştırıcı sıcaklığı -30°C olarak alınmıştır. Yoğuşturucu sıcaklığı arttıkça her iki soğutucu akışkanın STK değeri sürekli olarak azalır, bu da yüksek yoğuşturucu sıcaklıklarının soğutma sisteminin verimliliğini azalttığını gösterir. Bunun nedeni artan basınç ve buna bağlı olarak kompresör üzerindeki daha yüksek taleplerdir. İki soğutucu akışkanın karşılaştırılması, R1311'in tüm yoğuşturucu sıcaklıklarında R134a'ya göre daha yüksek STK değerlerine ulaştığını gösterir, bu da bu koşullar altında R1311'in daha iyi verimliliğine işaret eder. Örneğin, 40°C 'lik bir yoğuşturucu sıcaklığında R1311 için STK değeri 2,015 iken R134a için 1,84'tür, yani yaklaşık %9,5'lik bir iyileşme meydana gelmiştir. Bu avantaj daha yüksek sıcaklıklarda bile devam eder; R1311 ve R134a için STK değerleri 60°C 'de sırasıyla 1,309 ve 1,093 olup, yaklaşık %16'lık bir iyileşme söz konusudur. Sonuçlar, R1311'in verilen koşullar altında, özellikle de düşük yoğuşturucu sıcaklıklarında daha yüksek performans sunduğunu açıkça göstermektedir. Artan sıcaklıkla birlikte STK değerlerinin genel olarak azalması, soğutma sistemi verimliliği için optimum yoğuşturucu sıcaklığının önemini vurgulamaktadır.



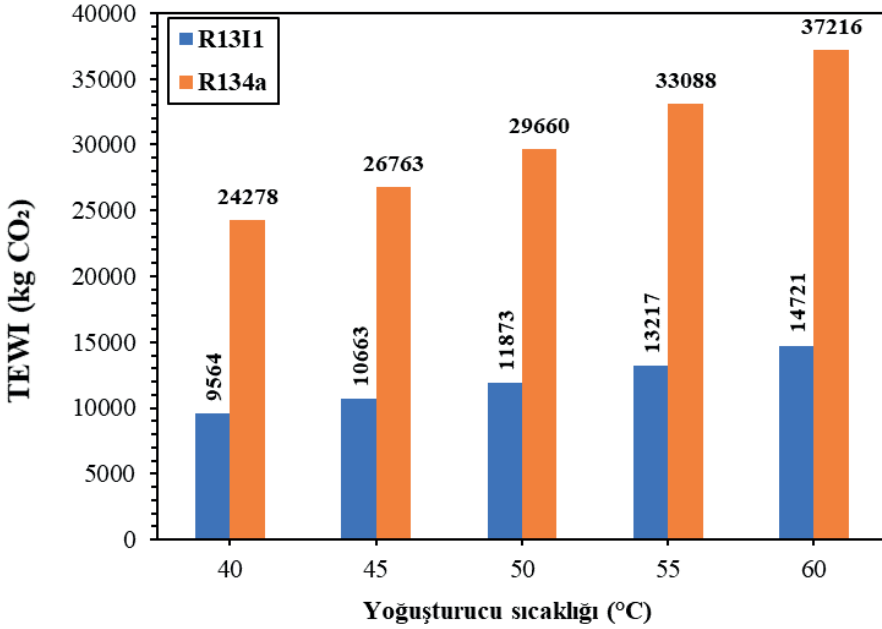
Şekil 5. Yoğuşturucu sıcaklığı ile değişen STK değeri

Şekil 6'da buharlaştırıcı sıcaklığı ile değişen TEWI değeri gösterilmiştir. Yoğuşturucu sıcaklığı 45 °C olarak alınmıştır. Buharlaştırıcı sıcaklığı arttıkça her iki soğutucu akışkanın TEWI değeri azalır; bu da daha yüksek buharlaştırıcı sıcaklıklarının enerji tüketimini azalttığını ve dolayısıyla dolaylı emisyonları azalttığını gösterir. Bununla birlikte R1311'in TEWI değerleri tüm sıcaklıklarda R134a'ya göre önemli ölçüde daha düşüktür. -40°C'de R1311 için TEWI değeri 13,617 kg CO₂ iken R134a için 31,614 kg CO₂ olup, yaklaşık %57'lik bir azalma söz konusudur. Bu fark yüksek sıcaklıklarda da devam eder. -20°C'de R1311 için TEWI değeri 8,302 kg CO₂ iken R134a için 22,885 kg CO₂'dir. Bu sonuçlar R1311'in özellikle yüksek buharlaştırıcı sıcaklıklarında çevresel etki açısından daha verimli olduğunu göstermektedir.



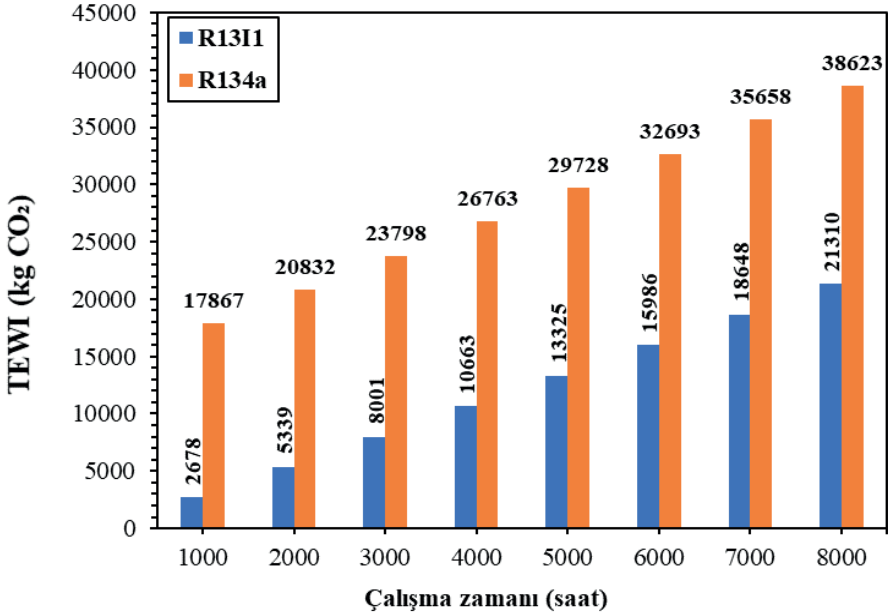
Şekil 6. Buharlaştırıcı sıcaklığı ile değişen TEWI değeri

Şekil 7’de yoğuşturucu sıcaklığı ile değişen TEWI değeri gösterilmiştir. Buharlaştırıcı sıcaklığı -30 °C olarak alınmıştır. Buharlaştırıcı sıcaklığının aksine, yoğuşturucu sıcaklığının artması her iki soğutucu akışkan için de TEWI değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu artışın nedeni, daha yüksek yoğuşturucu sıcaklıklarının enerji tüketimini ve dolayısıyla dolaylı emisyonları artırmasıdır. Burada da R131I tüm sıcaklık aralıklarında R134a’ya göre daha düşük TEWI değerlerine sahiptir. 40°C’de R131I için TEWI değeri 9,564 kg CO₂ iken R134a için 24,278 kg CO₂’dir; bu yaklaşık %60’lık bir azalmadır. 60°C’de R131I için TEWI değeri 14,721 kg CO₂ iken R134a 37,216 kg CO₂ değerine ulaşır. Bu sonuçlar R131I’in özellikle düşük yoğuşturucu sıcaklıklarında çevreye daha faydalı olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 7. Yoğuşturucu sıcaklığı ile değişen TEWI değeri

Şekil 8’de sistemin çalışma süresinin (saat cinsinden) ile değişen TEWI değeri gösterilmiştir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu sıcaklıkları sırasıyla -30°C ve 45°C olarak alınmıştır. Çalışma süresi arttıkça, her iki soğutucu akışkanın TEWI değeri de sürekli olarak artar; bu, doğrudan ve dolaylı emisyonların zaman içindeki kümülatif etkisini temsil eder. R1311, tüm dönem boyunca R134a’ya göre önemli ölçüde daha düşük TEWI değerlerine sahiptir; bu, daha düşük doğrudan emisyonlara ve daha yüksek enerji verimliliğine işaret eder. 1000 saatlik çalışma süresiyle R1311 için TEWI değeri 2,678 kg CO₂ iken R134a için 17,867 kg CO₂’ye ulaşıyor. Bu fark çalışma süresinin artmasıyla devam etmekte ve mutlak anlamda artmaktadır. 8000 saatte R1311’in TEWI değeri 21,310 kg CO₂ iken R134a’nın değeri 38,623 kg CO₂ olup, yaklaşık %45’lik bir azalma meydana gelmiştir. Sonuçlar, R1311’in özellikle uzun süreli çalışmalarda önemli ölçüde daha düşük bir çevresel etkiye neden olduğunu göstermektedir. Emisyonlardaki farklılıklar zamanla birikebileceğinden ve önemli çevresel faydalar sağlayabildiğinden, bu, yüksek çalışma süresine sahip sistemler için uygun bir soğutucu akışkan seçmenin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 8. Sistemin yıllık çalışma zamanı boyunca ile değişen TEWI değeri

4. Sonuç

STK analizi, R1311'in R134a'ya kıyasla sürekli olarak daha yüksek verimlilik elde ettiğini göstermektedir. Buharlaştırıcı veya yoğuşurucu sıcaklıklarından bağımsız olarak R1311, tüm çalışma koşullarında daha iyi termodinamik performans sergiler. R1311'in avantajı özellikle düşük yoğuşurucu sıcaklıklarında ve daha yüksek buharlaştırıcı sıcaklıklarında belirgindir ve bu da onu enerji yoğun soğutma sistemleri için daha verimli bir seçim haline getirir. Bu sonuçlar, R1311'in verimlilik açısından üstünlüğünü ve enerji tüketimini en aza indirme yeteneğini vurgulamaktadır.

Elde edilen sonuçlar, R1311 soğutucu akışkanının R134a'ya kıyasla önemli ölçüde daha düşük çevresel etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Buharlaştırıcı ve yoğuşurucu sıcaklıklarının yanı sıra sistemin çalışma süresi analizine bakıldığında, R1311'in sürekli olarak daha düşük TEWI değerlerine ulaştığı görülmüştür. Bunun nedeni daha iyi termodinamik verimlilik ve daha düşük doğrudan emisyonlardır. İki soğutucu akışkan arasındaki farklar artan zamanla önemli ölçüde arttığından, çalışma süresinin etkisi özellikle dikkate değerdir. R134a, daha uzun çalışma süreleri boyunca önemli ölçüde daha yüksek sera gazı emisyonlarına neden olurken, R1311, maksimum çalışma sürelerinde bile ekolojik açıdan avantajlı olmaya devam etmiştir. Özetle R1311, enerji tüketimi, emisyon azaltımı ve genel verimlilik açısından üstündür. Bu nedenle çevresel etkide sürdürülebilir ve uzun vadeli azalma sağlamayı amaçlayan sistemlerde tercih edilen soğutucu akışkan olarak R1311'in kullanılması tavsiye edilmektedir.

Kaynaklar

- Citarella, B., Mastrullo, R., Mauro, A. W., Sfragara, M., & Tammaro, M. (2021). Performance assessment of a two-stage CO₂ small scale MT refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 131, 887-896.
- de Paula, C. H., Duarte, W. M., Rocha, T. T. M., de Oliveira, R. N., & Maia, A. A. T. (2020). Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. *International Journal of Refrigeration*, 113, 10-20.
- Dincer, I. (2017). *Refrigeration systems and applications*. John Wiley & Sons.
- Hacıpaşaoğlu, S. G., & Öztürk, İ. T. (2024). Thermodynamic performance analysis and environmental impact assessment of cascade refrigeration cycles using eco-friendly nano-refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 164, 167-179.
- Kaya, A. M. (2021). Çok Kademeli Buhar Sıkıştırılmalı İdeal Soğutma Çevrimlerinde Farklı Soğutucu Akışkanlar Kullanarak Enerji ve Ekserji Analizi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 42-55.
- Llopis, R., Sánchez, D., Sanz-Kock, C., Cabello, R., & Torrella, E. (2015). Energy and environmental comparison of two-stage solutions for commercial refrigeration at low temperature: Fluids and systems. *Applied Energy*, 138, 133-142.
- Mancuhan, E. (2019). A comprehensive comparison between low and medium temperature application refrigerants at a two-stage refrigeration system with flash intercooling. *Thermal Science and Engineering Progress*, 13, 100357.
- Niu, H., Li, W., Xiao, H., Zhang, X., Zhao, K., Yang, Z., ... & Shi, W. (2023). Numerical simulation of CO₂ two-stage compression refrigeration system with external intercooler. *International Journal of Refrigeration*, 151, 14-25.
- Rodríguez-Jara, E. Á., Sánchez-de-la-Flor, F. J., Expósito-Carrillo, J. A., & Salmerón-Lisén, J. M. (2022). Thermodynamic analysis of auto-cascade refrigeration cycles, with and without ejector, for ultra-low temperature freezing using a mixture of refrigerants R600a and R1150. *Applied Thermal Engineering*, 200, 117598.
- Roy, R., & Mandal, B. K. (2023). Energy, exergy and economic optimization of a two-stage refrigeration system using low-GWP alternative refrigerants for high-temperature lift applications. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(8), 403.
- Saeed, M. Z., Contiero, L., Blust, S., Allouche, Y., Hafner, A., & Eikevik, T. M. (2023). Ultra-Low-Temperature Refrigeration Systems: A Review and Performance Comparison of Refrigerants and Configurations. *Energies*, 16(21), 7274.
- Sun, Z. & Wang, Y. (2022). Comprehensive performance analysis of cascade refrigeration system with two-stage compression for industrial refrigeration. *Case Studies in Thermal Engineering*, 39, 102400.
- Tahmasebzadehbaie, M., & Sayyaadi, H. (2020). Optimal design of a two-stage refrigeration cycle for natural gas pre-cooling in a gas refinery considering the best

allocation of refrigerant. *Energy Conversion and Management*, 210, 112743.

Wang, Q., Li, T., Jia, Y., & Zhang, W. (2021). Thermodynamic performance comparison of series and parallel two-stage evaporation vapor compression refrigeration cycle. *Energy Reports*, 7, 1616-1626.

Zhang, N., Dai, Y., Feng, L., & Li, B. (2022). Study on environmentally friendly refrigerant R13I1/R152a as an alternative for R134a in automotive air conditioning system. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 44, 292-299.

BÖLÜM 8

SÜRTÜNMELİ DELME YÖNTEMİ VE ETKİLİ OLAN TEMEL PARAMETRELER

Cebeli ÖZEK¹

¹Prof. Dr., Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Orcid: 0000-0001-7603-415X

1. Giriş

Geleneksel olmayan bir delme işlemi olarak, sürtünmeli delme, sac metal delik açma, diş uzunluğunun etkinliğini artırma ve vidalı bağlantı için başarıyla kullanılmıştır. İşlenmesi zor malzemeler için sürtünmeli delme işleminin uygulanmasındaki ana zorluklar ve engeller, aşırı takım aşınması ve yetersiz ürün kalitesidir. Sürtünmeli delmede en önemli iki parametre olan devir sayısı ve ilerleme hızının kovan oluşum kalitesi ve delme takımı performansı üzerinde çok önemli bir etkisi vardır. İş mili hızının, işleme ve delme takımı performansını yaygın olarak etkileyen ilerleme hızından daha önemli bir parametre olduğudur. Yüksek mukavemete sahip çelikler iyi bir sürünme-kopma direnci nedeniyle, şekillendirilmiş kovan ve delme takımı performansı ile ilgili olarak büyük bir direnç gösterirken, düşük termal iletkenliği, iş parçası boyunca yetersiz ısı transferine ve dolayısıyla düşük ürün kalitesine ve önemli derecede takım aşınmasına neden olurlar. Öte yandan, ilerleme hızının ve iş mili hızının iş parçaları üzerindeki termal gerilme ve ısı üretiminin dağılımı üzerindeki etkilerinin bilinmesi önemlidir.

Ku ve ark. [1] ilerleme hızı, devir sayısı, sürtünme temas alanı oranı ve sürünme açısından etkilenen kovan yüksekliği araştırmışlardır. Çalışmalarında iş parçası malzemesi SUS304 ve delme takımını ise tungsten karbür kullanmışlardır. Mil hızının kovan yüksekliği için en önemli parametre olduğunu ve sürünme temas alanı oranı, sürtünme açısı ve ilerleme hızının kovan yüksekliği üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ifade etmişlerdir. Swain ve ark [2], Yüksek mukavemetli malzemelerin işlenmesinde verimsiz işleme performansı ve aşırı takım aşınması, havacılık, otomotiv ve tıp gibi farklı endüstrilerdeki malzemeler için zor olduğunu ifade etmişlerdir. Dolin' sek [3], Östenitik paslanmaz çelik AISI304, tıbbi takım, uçak ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan en popüler malzemelerden biri olduğunu, bu malzemenin ana özellikleri, büyük tokluk, düşük ısı iletkenliği, yüksek işleme sertleşmesi, korozyon ve aşınmaya karşı yüksek dirençli olduğunu belirtmiştir. Zhu ve ark [4], Havacılık ve biyomekanik gibi düşük yoğunluğun ve mükemmel korozyon direncinin önemli olduğu yerlerde, Ti-6Al-4V yaygın olarak kullanıldığını ifade etmişlerdir. Yang ve ark [5], Nikel esaslı alaşım Inconel718, aynı zamanda, havacılık ve uçak endüstrilerinde ve gaz türbini kanatlarında yaygın olarak kullanılan, işlenmesi zor olan en iyi bilinen malzemelerden biridir. Bu malzeme, sürünme, termal şok direnci ve korozyon ile yüksek sıcaklık koşulları için çok yaygın bir şekilde kullanıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Nikel esaslı alaşımların işlenmesindeki zorluklar nedeniyle Mar-M247, Haynes-230 ve Inconel718 gibi üç nikel esaslı alaşımın farklı ilerleme hızlarında yüzey pürüzlülüğünü araştırmak için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen sonuçlardan, termal sürtünmeli delme sırasında ilerleme hızı arttığında yüzey pürüzlülüğünün daha da kötüleştiğini belirtmişlerdir. Oluşan kovanda, Nikel esaslı alaşımların son derece yüksek aşınma ve akma dayanımı nedeniyle, delik yüzeyinin aşındığı ve bu duru-

munda uygun olmayan yüzey pürüzlülüğüne neden olduğunu ifade etmişlerdir. Öte yandan, Miller ve ark [6], sürtünmeli delme işleminde delme takımı performansı, işlemdeki en kritik etkileyici işleme parametresidir. İş parçası-takım ara yüzündeki sürtünme ısı oluşumuna, ardından malzemenin yumuşamasına ve son olarak da kovan oluşumuna yol açmaktadır. Dehghan ve ark [7], bu yöntemin, işlenmesi zor malzemelerde kullanılması, işleme performansı ve takım aşınması için çok daha önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Zhu ve ark, Policena ve ark [8, 9], başlıca ve en yaygın delik delme işlemlerinden biri geleneksel delme yöntemidir Sürtünmeli delme ile eski geleneksel delme yöntemlerinde döngüsü süresi, güvenlik ve istikrar, karmaşıklık ve diş uzunluğu etkinliği gibi sorunların üstesinden gelebilir. Bununla birlikte, bu yöntemin ana dezavantajı, delme boyu uzunluğunun önemli olmasıdır. Su [10], somun vida bağlantı tekniğinde etkili diş uzunluğu sorununun sürtünmeli delme ile giderilebileceğini, ancak düşük bağlantı güvenliği ve termal bozulma gibi kritik problemler ve somun perçinleme yöntemi ile ince sacların bağlantılarında bağlantı uzunluğunun yetersizliğinin eski teknikler için dezavantajlar oluşturduğunu belirtmiştir. Ek olarak yüksek üretkenlik çevrim süresi, perçin bükülmesi, düşük stabilite ve işlemin karmaşıklığı gibi bazı önemli problemlerinde bu yöntemde olduğunu ifade etmiştir. Sürtünmeli delme ile birleştirme uygulamasında yük bağlama için diş uzunluğunun ve vidalı bağlantı etkinliğini artıran çeşitli performans alanlarında önemli bir rol oynar ve bağlantı ömrünü artırır. İşlenmesi zor malzemelerin sürtünmeli delinmesinin neden olduğu aşırı takım aşınması nedeniyle Lee ve ark. [11], AISI304'ün sürtünmeli delinmesi için AlCrN ve TiAlN kaplamalı tungsten karbür delme takımının performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İşleme sırasında aksel itme kuvveti, takım aşınması ve matkapların yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkiler de incelenmiştir. AlCrN'nin düşük termal iletkenliğinin ve kaplama yağlama etkisinin, AlCrN kaplı matkabin en yüksek yüzey ısısını, ancak en düşük takım aşınması ile en az aksel itme kuvvetini sağladığını bulmuşlardır. Bununla birlikte, delinmiş delik sayısı arttıkça kaplamalı ve kaplamasız matkaplar arasındaki farklı performans azalmıştır. Pantawane ve ark [12], ısı üretiminde, malzeme yumuşaması ve kovan oluşumunda önemli rol oynayan iki önemli parametrenin ilerleme oranı ve devir sayısı olduğunu ifade etmişlerdir. Hynes ve Kumar [13], galvanizli çelik üzerinde sürtünmeli delme gerçekleştirmiş ve kovan uzunluğunu tahmin etmek için bir yapay sinir ağı modeli oluşturmuşlardır. Kovan yüksekliğini verimli bir şekilde maksimize etmek için iş mili hızının en önemli değişken olduğunu belirtmişlerdir. El-Bahloul ve ark [14], devir sayısı ve ilerleme hızının kovan şekli ve yüksekliği üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Elde edilen sonuçların, sonlu eleman modellemesi ile iyi sonuçlar sağladığını doğrulamışlardır. AISI304'ün sürtünmeli delme işlemi için delme takım çapı da dâhil olmak üzere uygun işlem parametrelerini belirlememişler, ayrıca, itme kuvvetinin deneysel ve sayısal sonuçlarını karşılaştırmak için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Kovan oluşumunu iyileştirmek ve uygun kovan şekline ve yeterli kovan yüksekliğine ulaşmak, sürtünmeli delme işleminde önemli hedeflerden birkaçı-

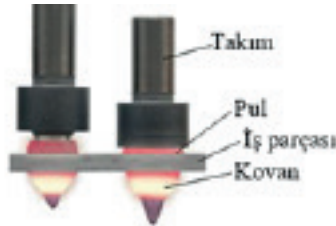
dır. Kovan şekli ve yüksekliği ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Özler ve Doğru [15], deneylerin farklı sürtünme açıları, delme hızları ve ilerleme oranları altında gerçekleştirildiği kovan ve pul oluşumları ve kovan yüksekliğini incelemişlerdir. İş parçası ve delme takımı olarak sırasıyla AIS1010 karbon çeliği ve tungsten karbür kullanmışlardır. Kovan yüksekliğini etkileyen en önemli parametrenin devir sayısı olduğu ve kovan oluşumunu en çok etkileyen parametrenin ise ilerleme hızı olduğu ifade etmişlerdir. Ayrıca, ilerleme hızının kovan yüksekliği üzerindeki etkisinin delme hızına kıyasla ihmal edilebilir olduğunu vurgulamışlardır. Kaya ve ark [16], paslanmaz çelik ST12'nin sürtünmeli delme işleminde ilerleme hızı, devir sayısı, sürtünme açısı ve sürtünme temas alanı oranının iş parçasının yüzey sıcaklığı, itme kuvveti ve döndürme momenti ve kovan şekli üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İlerleme hızı, sürtünme açısı ve sürtünme temas alanı oranı artışına bağlı olarak itme kuvveti ve momentinde kademeli olarak arttığını, mil hızı arttıkça itme kuvvetinin ve torkun azaldığını ifade etmişlerdir. Artan ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini ve kovan yüksekliğini ise düşürdüğünü, sürtünme açısının ve sürtünme temas alanı oranının iş parçası yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisinin önemli olmadığı görülmüştür. Delinmiş deliğin yuvarlaklığı, kovan oluşumunda bir diğer kritik parametredir. Lee ark [17], iş mili hızının yuvarlaklık üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. İş parçası olarak IN-713LC döküm süper alaşım ve delme takımı olarak ta tungsten karbür kullanmışlardır. Artan iş mili hızının daha fazla ısı ürettiğini ve yuvarlaklığı iyileştirdiğini göstermişlerdir. Farklı devir sayıları ve ilerleme hızlarında yüzey pürüzlülüğünü analiz etmek için deneysel çalışmalar uygulamışlardır. Daha yüksek devir sayısı ve ilerleme hızlarında daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edildiğini göstermiştir. Daha yüksek devir sayısı, iş parçasının yüzeyinde daha yüksek ısı oluşumuna neden olur ve daha pürüzsüz bir yüzey meydana getirir. Yüzey pürüzlülüğünü iyileştiren ilerleme hızının artırılması, iş parçası ile delme takımı arasındaki etkileşim süresinin azalmasına neden olur. Sürtünme açısı, sürtünme temas alanı oranı, iş mili hızı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelemişlerdir. İş parçası malzemesi olarak paslanmaz çelik AISI304'ün yüksek devir sayılarında sürtünmeli delinmesinde daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edildiğini göstermişlerdir. Somasundaram ve ark [18], iş parçası olarak alüminyum silisyum karbür metal matris kompoziti ve delme takımı için ise TiN kaplı HSS kullanarak artan iş mili hızına bağlı olarak yuvarlaklığı incelemişlerdir. İş mili hızı 2000 d/d'den 3000 d/d'ye çıkarken yuvarlaklık hatasının kademeli olarak arttığını, bundan sonra iş mili hızı 3000 d/d'den 4000 d/d'ye yükseldiğinde azaldığını tespit etmişlerdir. Genel olarak, yuvarlaklık hatası, daha düşük ve daha yüksek devir sayılarında azalmaktadır. Ayrıca, 50-80 mm/dak aralığında artan ilerleme hızının, yuvarlaklık hatasının artmasına neden olduğu, genelde ilerleme hızı değerlerinin artmasına bağlı olarak yuvarlaklık hatalarında artmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı sürtünmeli delmede işlem parametrelerinin kovan şekil ve yüksekliğine etkisi, sertlik, delik yuvarlaklığı ve delme takım performansı, sürtünmeli delme performansı ve işlenmesi zor malzemelerin sürtünmeli delme işlemindeki zorluklarının araştırılmasıdır. İşlenmesi zor malzemelerin sürtünmeli delinmesi için sürtünmeli delme performansının en ideal sürtünmeli delme durumuna çıkarılması gerekir. “en ideal sürtünmeli delme durumu” ifadesi, homojen delik-duvar kalınlığı ile kovan yüksekliğinin maksimum olduğu durumdur. Kovan ve kovan yapısının oluşumu homojen olmalıdır. İdeal sürtünmeli delmede delik yüzey kalitesi çok iyi ve açılan delik sayısı maksimumdur.

2. Sürtünmeli Delme Yöntemi

Ön bir delme ile matkap aleti iş parçasına doğru ilerlemektedir. Malzeme ile Temas halindeki matkap aleti iş parçasında ısı oluşturur. İş parçası malzemesi yüksek sıcaklık nedeniyle hızlı akmaya başlar ve işlem sonucunda kovan ve pul oluşturur. En sonda matkap geri çekilerek kovan ve pulun tam olarak oluşması tamamlanmış olur. İş parçası malzemesi yüksek sıcaklık nedeniyle akmakta ve sonuç olarak taç ve kök oluşmaktadır.

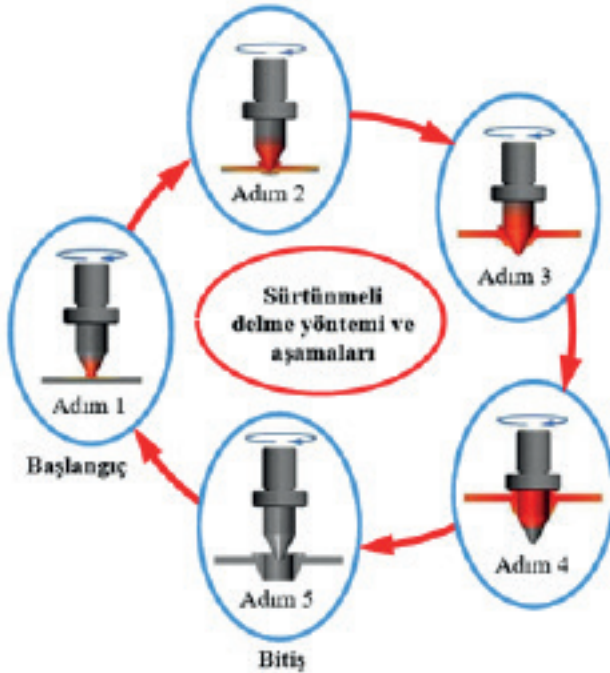
Mekanik üretimde delik delme işlemleri yüksek bir orana sahiptir. HSS takımlarıyla delme işleminde, yoğun ısı oluşur. Bu ısı, takımın körelmesine ve ömrünün kısılmasına sebep olurken, iş parçasının sertleşmesine neden olur. Delme esnasında oluşan talaşlar delinen deliğin iç kısmı cidarına yapışarak delik yüzeyini aşındırır ve yüzey kalitesini olumsuz etkiler. SDY işleminde, soğutma suyu kullanılması gerekmediğinden, soğutma suyunun personel, ortam ve iş tezgâhı üzerindeki olumsuz tesirleri yok olur. İşlem sırasında, yumuşayan ve viskoz hale gelen malzeme, takımın hareket yönüne göre aşağı ve yukarı hareket eder. Delik içerisine doğru sürülen talaşlar bir kovan oluştururken, delik üst yüzüne doğru çekilen talaşlar pul oluşumuna yol açar. Oluşan kovan, kesiti kalın iş parçalarında bağlama boyunu sağlar. Bu durumda üste oluşan pul ise delik ağız bölgesinde sızdırmazlık halkası oluşturur (Şekil 1).



Şekil 1. Sürtünmeli delme işlemi [19].

Sünek malzemelerde, hedeflenen kovan biçimi başarıyla elde edilirken, gevrek malzemelerde taç yaprağı şeklinde, çatlak ve yırtıklarla dolu, istenmeyen bir kovan oluşur. SDY işlemi, beş aşamada tamamlanmaktadır (Şekil 2).

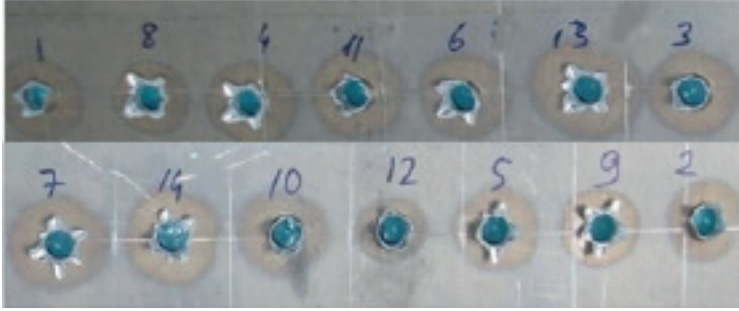
Birinci adımda, takımın uç bölgesi deney malzemesi ile temasa geçer ve takımın uç kısmı tıpkı bir matkap ucu özü şeklinde, dairesel dönerek kesiciye aşağı doğru yön tespit eder. İkinci adımda, takımın uç kısmı tam olarak iş plakaya dalmış olur. Bu esnada, maksimum seviyeye çıkan eksenel itme kuvveti takım ile iş plaka ara yüzeyindeki temas bölgesi, sürtünmelerden kaynaklı kuvvet ve ısı sıcaklık yükselir. Sonuç olarak, viskoz hale gelen malzeme takım-daki hareketin zıt yönünde ilerleyerek delik üst kısmına doğru hareket eder. Üçüncü adımda, yüzeyi konik olan takım plakaya dalarak içerisine girer ve viskoz olan malzeme, ilerleme hareketi doğrultusunda akmaya başlar ve kovanın oluşmasını sağlar. Dördüncü adımda, takımın silindirik bölgesi tam olarak plakaya girer ve takımın üst omuz kısmı, delik üst kısmına doğru akan talaşları plakanın üst yüzey bölgesine sıvayarak pulu meydana getirir. Beşinci adımda ise takım yukarıya doğru çıkartılarak ve pul ve kovan oluşumu sağlanarak işlem tamamlanmış olur.



Şekil 2. Sürtünmeli delme işleminin adımları [20].

SDY’de, deliklerin eşit aralıklarla ve belirli bir sıra ile plakada oluşan sıcaklığın oda şartlarındaki sıcaklığa kadar düşmesi ve ihtiyaç duyulan süre kaybını engellemek için plakalar üstündeki delik delme sırasının ard arda ve birbirlerinden uzakta delinmesi önemlidir. Bu şekilde işlem sırasında plakanın

sıcaklığı oda şartlarındaki sıcaklığa kadar düşmüş ve ihtiyaç duyulan zaman kaybı önlenmiş olmaktadır. Bunun için Şekil 3'te iki adet iş parçası, üzerinde numaralar ve delik delme sırası gösterilmiştir. İş parçası delme işleminden önce dikkatli ve ölçülü bir şekilde markalanmalı, sıra sıra numaralar yazılmalı ve bir kalıp aracılığı ile tezgâh tablasına düzenli ve sağlam bir biçimde bağlanarak sabitlenmelidir.



Şekil 3. SDY'de, sac plakalara delik işleme sırası [36].

2.1. Sürtünmeli Delme Yöntemi'nin Kullanıldığı Yerler

SDY, kesitleri ince olan her çeşit plaka ve sacların delinmesinde tercih edilen bir üretim metodudur. Paslanmaz çelikler, yapı çelikleri, bronz, alüminyum, bakır ve manyetik malzemeler ve genel olarak aşınmaya karşı yüksek direnç ve deformasyon sertleşmesi gösteren malzemeler üzerinde uygulanabilir. Sürtünmeli delme işlemlerinin kullanıldığı alanlar şunlardır:

- Kesitleri ince boru ve plakaların vidalı bağlantıları,
- Yüzeyleri geniş ve düzgün lehim bağlantıları,
- Sıvı, gaz vb. sızdırmazlık gerektiren ince cidarlı boru bağlantıları,
- Güneş enerjisi sistemlerinin yüksek mukavemetli kaymalı yatak mekanizmaları,
- Kaymalı yataklar ve Rulmanların kesitleri ince olan plakalara, borulara ve içi boş ince profilli saclarla oturtulması,
- Kaynaklı bağlantılar,
- Su ve basınç tankları,
- Profillerin iç içe geçirilmesi, boru vb. aynı eksenli since ve silindirik parçalara deliklerin açılması uygulamaları,
- Otomotiv endüstrisi,
- Çelik konstrüksiyon mobilyaların bağlantı yerleri.

2. 2. Sürtünmeli Delme Yönteminin Avantajları

SDY, ince kesitli malzemelere delik açmada ve dış açmada önemli bir üstünlük sağlar. Her ne kadar üretimde yaygın olarak kullanılsa da, kullanıldığında üretime önemli katkılar sağlar. Yöntemin avantajları maddeler halinde aşağıdaki gibi açıklanabilir:

1. GDY, malzemeye mekanik kuvvet uygulanarak plastik şekil değişimi ve kayma gerilmeleri oluşturur ve kesme işlemi metodu ile deliklerin açılmasını sağlar. SDY ise iş parçası ile kesici takım ara yüzeyinde meydana gelen sürtünmenin sonucunda ortaya çıkan ısı nedeniyle malzemenin viskoz hale gelmesi ve takımın rahat olarak plakaya dalması sonucu işlem gerçekleşir. Bu yüzden yüksek aşınma direnci ve deformasyon sertleşmesi olan plakalar bu metotla kolayca delinebilir.

2. SDY, kesitleri ince olan plakaların bağlantı işlemlerinde kovan oluşturarak bağlantı boyunu artırır ve ek işlem gerektirmediğinden (kaynatma, perçinleme, puntalama) üretim giderleri önemsiz ve zaman kaybı azdır.

3. Kesitleri ince olan malzemelerin plakalar ile bağlantılarında ek oluşan gerilmeler SDY ile giderilir.

4. SDY’de oluşan kovan şekli, elde edilen deliğin devamında kaldığından, kesitleri ince profil, boru ve plakalara vida dişi açmayı daha kolay hale getirir.

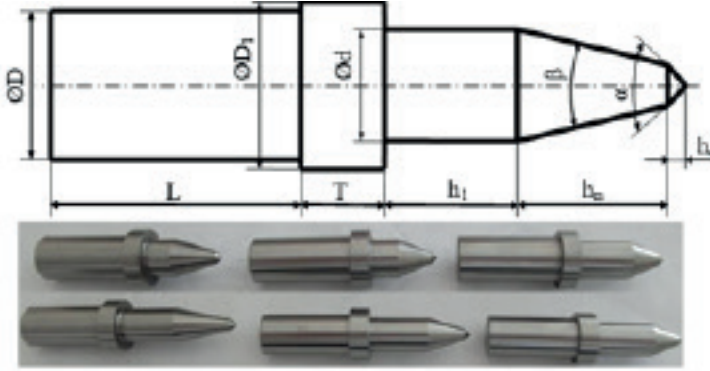
5. SDY’de soğutma suyu kullanılmasına ihtiyaç duyulmadığından, soğutma suyunun personel, tezgâh ve ortam üzerindeki negatif etkileri yok olur.

6. İşleme süresi kısa, işlem hızı yüksek ve takımın ömrü uzundur.

7. Klavuz çekme operasyonlarının seri imalatında zaman ve maliyet tasarrufu sağlar, boru bağlantılarında güvenli bir imkân sunar [21, 22].

2.3. Sürtünmeli Delme Yöntemi’nde Kullanılan Takımlar

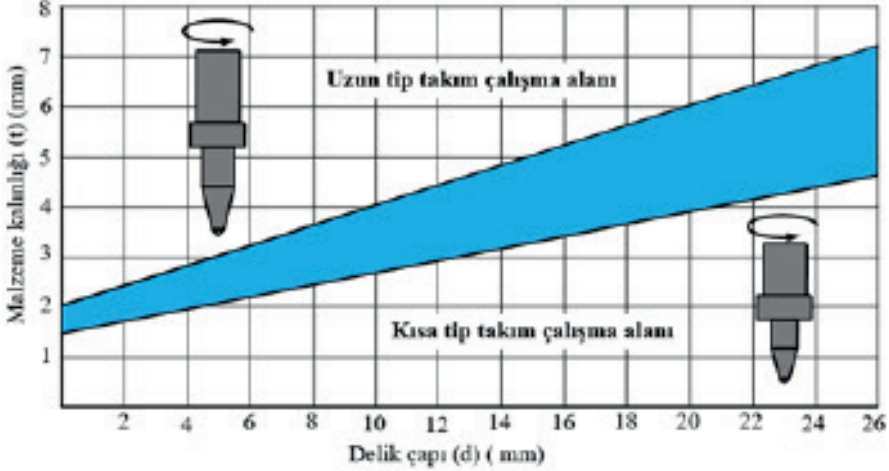
SDY’de, HSS, WC ve TiAlN ile AlCrN kaplamalı takımlar kullanılmaktadır [23, 24, 25, 26, 27]. İşlemden önce kullanılacak takımların çalışma sıcaklığı, delik açılacak iş parçasının ergime sıcaklığının en az %70’i kadar olmalıdır. Şekil 4’de SDY’de kullanılan bir takım geometrisi görülmektedir.



Şekil 4. Sürtünmeli delme yönteminde kullanılan takım geometrisi ve boyutları [23, 24, 25, 28, 29, 36].

SDY’de takımın iş parçasına ilk temas eden kısmı ve sürtünmenin başladığı nokta, takımın uç kısmıdır (h_c). Matkap ucunun özü gibi, takım ucu delme işleminde sadece ilerleme doğrultusuna kılavuzluk yapar ve sürtünme kuvveti oluşması için takım ile iş parçasının temas alanında teğetsel kuvvetler meydana getirir. Uç açısı α , tüm çalışmalarda 90° olarak seçilmiştir. Uç açısının değeri küçüldükçe, delme işleminin başlangıcında meydana gelen itme kuvveti azalır. Takım ucu, SDY’de deformasyon mekaniğinin başlangıcını oluşturur. SDY takımının konik bölgesinin (h_n) koniklik açısı β , uzunluğu ise h_n ’dir. Takımın, uç açısının değeri koniklik açısının değerinden büyüktür ($\beta < \alpha$). Bu bölge, iş parçası ile temas ederek sürtünme kuvvetini artırır ve viskoz haldeki malzeme-yi takımın ilerleme yönünde iter, böylece kovanın meydana gelmesine imkân sağlar. β koniklik açısı değeri düştükçe, takım ve plaka arasındaki temas alanı artar [29]. Sürtünmeli delme yönteminde, silindirik bölgesinin (h_1) uzunluğu ve çapı ϕ_d olarak belirtilir; bu çap, delinen deliğin çapına eşittir. İş parçası malzemesinin kesit kalınlığı ile kovan yüksekliği toplamı h_1 boyundan daha fazla olması gerekir. İşlem sırasında oluşan kovan yüksekliği, iş parçası kesit kalınlığının yaklaşık 2-3 katı olur. Bu durumda, takımın silindirik bölgesinin uzunluğu (h_1) malzeme kalınlığının yaklaşık $h_1 \geq (3...4) \cdot t$ kadar olmalıdır. Eğer silindirik bölgenin uzunluğu yetersiz olursa, takımın konik kısmı kovanın içinden tamamen çıkamaz ve delinen delik konik olur. Sürtünmeli delme yönteminde; T, takımının omuz bölgesinin boyu, ϕ_{d1} çapı ve L’de uzunluğudur. Takım omuzu, ilerleme hareketinin tersine çıkan talaşı iş parçasının yüzeyine bastırarak sızdırmazlık halkası olarak adlandırılan pulu meydana getirir. ϕ_d ve ϕ_{d1} çapları omuz çapı ϕ_{d1} ’den daha küçük seçilir. Omuz çapı, yukarı çıkan talaşları delik üst kenarlarından taşmayacak biçimde altına sıkıştırarak iş plakanın yüzeyine bastırarak bir değerde olması gerekir. Bu nedenle, sürtünmeli delme yönteminde omuz çapı, delinecek malzemenin kesit kalınlığı ve delik çapına göre belirlenmelidir. Omuz boyu (T) ise, işlem anında malzemenin

bastırılması sırasında oluşan basma kuvvetini karşılayacak mukavemet değerine sahip olacak şekilde seçilir. SDY takımının sap bölgesinin uzunluğu (L), takımın tezgâha bağlanmasını sağlar. Takım çapı, bağlama türüne göre; uzunluğu ise takım tutucusunun geometrik boyutlarına göre belirlenir. Tutucunun takımın yeterince kavrayabilmesi için takımın L boyunun yeterli bir boyda olmasına dikkat edilmelidir [29]. Sürtünmeli delme takımları, kesici boyunlu ve kesici ağızlı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Her iki kategori de kendi içinde kısa tip ve uzun tip delme takımları olarak sınıflandırılır.



Şekil 5. Malzeme kalınlığına göre sürtünmeli delme takımı seçme grafiği [30].

Düz silindirik deliklerin oluşturulmasında uzun tip sürtünmeli delme takımları kullanılır. Uzun tip sürtünmeli delme takımlarının silindirik bölgesi uzun olduğu için özellikle kesit kalınlığı 2 mm ve üzeri ($t \geq 2$ mm) olan plakaların delinmesinde kullanılırlar [30]. Malzeme kalınlığına göre sürtünmeli delme takımlarının seçilmesi en önemli parametrelerden biridir. Sürtünmeli delmede kullanılacak olan kısa ve uzun tüm takımlar, plaka kalınlıkları (t)'ye göre seçilir (Şekil 5).

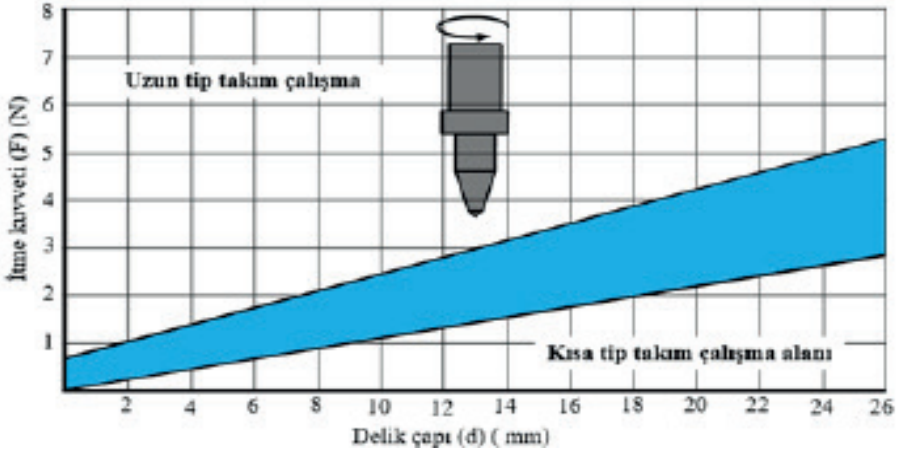
Kısa tip sürtünmeli delme takımlarının silindirik bölgesi, diğerlerine göre daha kısa bir yapıya sahiptir. Bu takımlar kullanılarak gerçekleştirilen sürtünmeli delme işlemlerinde, vida dişi açmak için yeterli konik çapta kovanlar üretilir. Eğer sürtünmeli delme işleminin sonunda deliklere vida dişi açılması veya sıvama kılavuzlarının kullanılması planlanıyorsa, kısa tip takımlar tercih edilir. Bu takımlarla delinen deliklerin çapı, delik alt kısmına doğru incelmetedir. Genellikle bu takımlar, sürtünmeli delme kılavuzlarıyla birlikte kullanılır ve kovanın iç çapının konik şekli, vida dişi çekerken kılavuzu zorlayabilir. Ayrıca, deliğin konik olmaması durumunda malzemenin kesit kalınlığının az olması nedeniyle oluşan kovanın kesit kalınlığı, vida dişi çekme işlemi için yetersiz kalabilir. Bu takımlar, kalınlığı 2 mm'den az olan ($t \leq 2$ mm) plakalara delik

açılmasında etkilidir [30]. Grafikte mavi renkle boyanan bölge, uzun ve kısa tip takımların kesişim noktasıdır. Bu alandan seçilerek kullanılacak takım, delinecek deliğin nerede kullanılacağına göre seçilir.

3. Sürtünmeli Delme Yöntemi'nde Etkili olan Parametreler

3.1. İtme Kuvveti F (N)

SDY'nin başlangıcında, takım ucu iş parçasına temas ettiği anda itme kuvveti hızlı bir şekilde artış gösterir ve iş parçasının tamamen içine girdiği an geldiğinde maksimum seviyeye ulaşır. Ancak, sıcaklık yükseldikçe ve iş parçası yumuşadıkça itme kuvveti azalır, bu esnada ilerleme hızı yükselir. Takımın ilerleme doğrultusunun tersi yönünde takım omuz bölgesi çıkan talaşları iterek, delik ağız bölgesinde iş plakanın üst kısmına baskı yaptığı anda itme kuvveti tekraren yükselir. Takım geri çekildiğinde ise itme kuvveti azalır ve işlem tamamlandığında sıfıra iner. Dayanıklılığı yüksek malzemelerin SDY sürecinde itme kuvveti de yüksek olacaktır. İş parçasının ön ısıtma sıcaklığı ile devir sayısı, malzeme kalınlığının (t) delik çapına (d) oranı (t/d) ve işlenmiş delik sayısı arttıkça itme kuvveti (F) azalma gösterir; bu durumda artan ilerleme hızı, işlem süresini kısaltır [24, 25, 31, 32]. Şekil 6'da, Sürtünmeli delme yönteminde delik çapına bağlı olarak itme kuvvetinin değişimi verilmiştir.

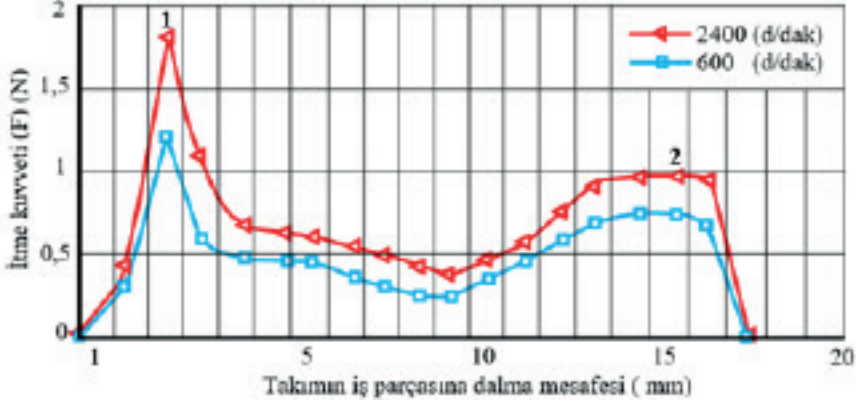


Şekil 6. SDY'de itme kuvvetinin delik çapına bağlı olarak değişimi [30].

SDY'de itme kuvveti dört adımda oluşur. İlk adımda, takımın uç bölgesi plaka ile temasa geçtiğinde bu sırada itme kuvveti aniden artar ve bu kuvvet maksimum bir değere çıkmış olur. İkinci adımda, viskoz haldeki plakaya takım daldıkça itme kuvvetinde bir düşüş meydana gelir. Üçüncü adımda, takımın ilerleme ve dönme hareketlerinin etkisiyle viskoz hale gelmiş olan malzeme aşağı ve yukarı doğrultuda ilerleyerek plakanın üstünde pul ve alt kısmında kovan oluşumuna yol açar. Bu adımda, yukarıya akan malzemeyi takımın

omuz bölgesi iş plakanın üzerine bastırdıkça itme kuvveti tekrar artar. Son olarak, dördüncü aşamada delme işlemi tamamlandığında takım geri çekilir, itme kuvveti düşer ve sonuçta sıfıra iner [24, 25, 31, 32].

Grafikte mavi renkle gösterilen alan, çapa göre oluşabilecek itme kuvvetini belirler. Eğer itme kuvveti çok yüksek olursa, iş parçasında oluşan ısı miktarı, şekil değişimi ve takımındaki ısıl gerilme yükselir. Bu durumda mekanik olarak zorlanan takım ucu ve mikro yapısı bozulan malzemenin ve aynı zamanda deliğinde iç yüzey kalitesi bozulur, kaba bir hal alır [25, 30, 31, 32]. Çok düşük bir itme kuvvetinin meydana gelmesi halinde, yeterince ısınamamış iş parçası viskoz hale gelemmez. Bu da, takım ucunun çok fazla ısınmasına ve aşınmasına yol açarak, takım ömrünün kısalmasına neden olur [30]. SDY'de ortaya çıkan itme kuvvetinin değeri, işlemin ilk anında ve son anında sıfırdır. İşlem esnasında, itme kuvveti iki kez artış gösterir. İlk artış, takım ucunun iş parçasına daldığı sırada maksimum seviyeye ulaşırken (Şekil 7'de 1 noktası), ikinci artış ise takımın omuz kısmının yukarıya doğru akan malzemeyi iş parçasının yüzeyine bastırdığı anda gerçekleşir (Şekil 7'de 2 noktası). Bu durumda, 1 noktasındaki itme kuvveti her zaman 2 noktasındaki itme kuvvetinden daha yüksek olmaktadır [24, 25, 30, 31, 32].

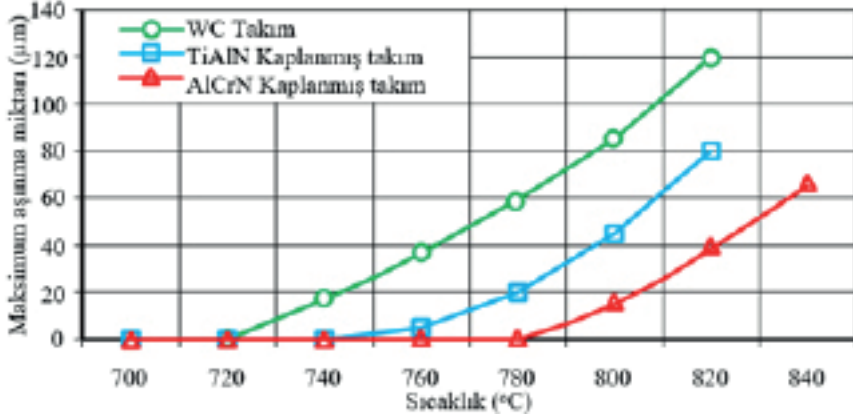


Şekil 7. SDY'de takımın dalma mesafesine bağlı olarak itme kuvvetinin değişimi [30].

3.2. Takım Yüzey Sıcaklığı ve Takım Aşınması

Sürtünmeli delme yönteminde kullanılan takımların yüzey sıcaklığını etkileyen birkaç önemli parametre bulunmaktadır. Bu parametreler arasında, delinen delik sayısı, devir sayısı, takım malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısı yer alır. Artan devir sayısı, takım ile iş parçası arasındaki temas noktasında oluşan ısı miktarını artırır. Öte yandan, takım malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısının azalması, üretilen ısıнын takım tarafından iletilmemesine ve bu ısıнын takımın yüzeyinde birikmesine neden olur. İletkenlik katsayısı yüksek takımlar, AlCrN, TiAlN gibi ısıl iletkenlik katsayısı düşük kaplama malzemeleri ile kaplandığında, yüzey sıcaklıklarının yükselmesi sonucu takımların bünyesindeki Cr, Co gibi elementler iş parçasına geçebilir. Aynı şekilde, iş par-

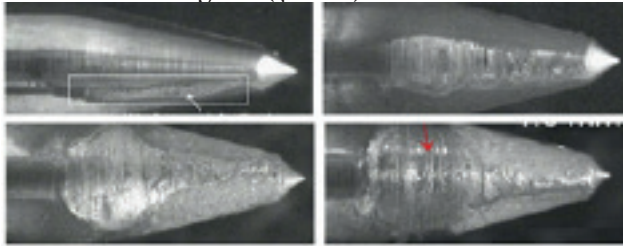
çasında bulunan Fe gibi elementler de difüzyon ve yapışma etkisiyle takıma geçiş yapar. Fe gibi elementlerin yapışma etkisiyle takıma geçmesi, takımın aşınmasına ve dolayısıyla ömrünün kılalmasına yol açar (Şekil 8) [24, 31].



Şekil 8. 6000 (d/dak) için SDY’de sıcaklığa bağlı olarak takım aşınmasının değişimi [24].

SDY’de aşınma mekanizmaları olarak adhezyon, difüzyon, oksidasyon ve abrasyon öne çıkmaktadır. Takımın konik ve uç bölgelerinde adhezyon ve oksidasyon nedeniyle oluşan silindirik oyuklar, abrasyon aşınmasını artıran bir etken haline gelir. Devir sayısı ve delinen delik sayısının artması, temas alanında meydana gelen ısı miktarını da artıracığından, bu durum takım aşınmasını beraberinde getirir. Çok yüksek devir sayılarında, kaplanmış ve kaplanmamış takımların yüzey sıcaklıkları ile aşınma miktarları arasındaki fark ise giderek azalır.

Kaplanmış takımlarda, kaplamanın sağladığı katı yağ tabakası, işlem sırasında aşınmayı azaltarak takım ömrünü uzatmaktadır. Takım ucunda oluşan aşınma, ucun sivriliğini azaltarak (uç açısının değerini düşürerek) itme kuvvetini, gerekli güç ile harcanan enerji miktarını ve dönme momentini düşürmektedir [24, 31]. SDY’de takımın konik bölgesi ve takım ucu, aşınma bakımından en fazla etkilenen alanlardır. Uç bölgesinin ardından, en fazla aşınmaya maruz kalan kısımlar sırasıyla uç bölgesinin orta kısmı, konik-silindirik bölgelerin geçiş bölgesi ve silindirik bölgedir (Şekil 9).



Şekil 9. SDY’de, takım konik ve konik-silindirik bölgesinin aşınmış resimleri [31].

SDY'de delik sayısının artması, takımın aşınmasına ve kütle kaybına yol açar. İlk işlenen deliklerde malzeme, takımın ağırlığını artırır. Ancak delik sayısı ilerledikçe aşınma mekanizması devreye girer, bu da takımın daha fazla aşınmasına ve kütle kaybının artmasına neden olur [31]. Şiddetli takım aşınması, işlenmesi zor malzemelerin sürtünmeli delinmesinde önemli bir problemdir. İlerleme hızının ve iş devir sayısının delme takımını koruyabilmesini ve uygun kovan oluşturmasını sağlamak için takım aşınması dikkate alınmalıdır. Ayrıca, delme takımının yüzeyi, yüksek iş mili hızında pürüzlü ve tırtıklı bir görünüm oluşturur. İlerleme hızının takım aşınması üzerindeki etkisi, takım devir sayısı kadar önemli olmasa da, uygun değerden daha yüksek ve daha düşük ilerleme hızı, etkileşim süresini kısaltır ve uzatır ve buna bağlı olarak delme takım performansı üzerinde önemli bir hasar meydana getirir.

3.3. İş Parçasının Sıcaklığı ve Kovan Biçimi

SDY işleminde, iş parçasının maksimum sıcaklığı, malzemenin ergime sıcaklığının yaklaşık 1/3 ila 1/2'si arasında olmalıdır. Sıcaklığın büyük bir kısmı devir sayısı tarafından üretilir ve bu ısı, iş parçasına transfer edilerek yumuşatır ve sünekliğini artırır. Yüksek ısıl iletkenlik katsayısı olan iş parçası ve takım malzemeleri, meydana gelen ısıyı temas bölgesinden transfer ederek, ergime için gerekli ısıyı düşürür ve böylece sıcaklığı azaltır. Yeteri derecede sünek ve viskoz olmayan bir iş malzemedede, elde edilen kovan şekli bozulabilir [24, 25, 32, 33]. Bu durumda, malzemenin sünek veya gevrek olmasına göre farklı türde kovanlar elde edilir. Şekil 10'da, SDY'de Gevrek (Al380) ve Sünek (AISI 1020) malzemelerde oluşan kovan tipleri verilmiştir.



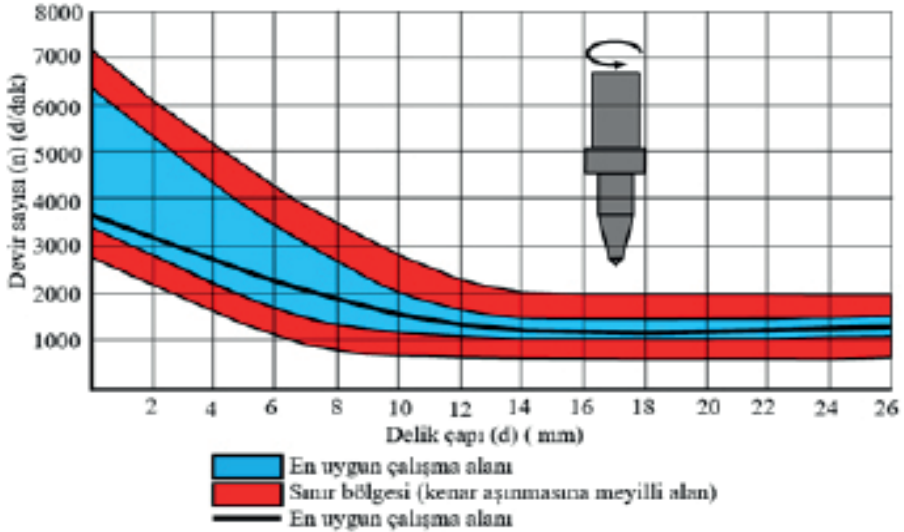
Şekil 10. SDY'de oluşan kovan biçimleri: a) Gevrek (Al380) malzeme, b) Sünek (AISI 1020) malzeme [25].

SDY'de kovanın şeklini ve delik derinliğini ölçmek, zorlu ancak son derece önemli iki parametredir. Bu parametreler, SDY'deki kaliteyi belirleyen kovanın şekli, daireselliği, pul kalınlığı, yüksekliği ve delik yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Taç yaprağı biçiminde oluşan kovanda çatlakların yoğunluğu nedeniyle bağlantı uzunluğu kısalmaktadır. (t) iş parçası kalınlığının (d) delik çapına oranı olan (t/d) azaldıkça, kovandaki çatlak sayısı artar ve kovanın taç yaprağı şeklinde oluşma olasılığı yükselir (Şekil 10a) [23,

24, 32, 33]. SDY'de oluşan kovan şekli, gevrek malzemelerde taç yaprağı formunda iken, sünek malzemelerde çatlakların görülmediği, silindirik bir yapı oluşturarak bağlantı uzunluğunu artıracak şekilde gelişir. Ancak, iş parçasının ön ısıtılması durumunda sünekliliği ve meydana gelen kovanın kalitesi artırılabilir (Şekil 10b) [23, 24, 25].

3.4. Devir Sayısının Önemi

Devir sayısı, meydana gelen ısı miktarı ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en önemli etkiye sahip parametredir. SDY uygulamalarında devir sayısının artması, itme kuvvetini, dönme momentini ve yüzey pürüzlülüğünü (Ra) azaltırken, kovanın şeklinin değişmemesi dikkat çekicidir. Aynı zamanda, takım ile iş parçası arasındaki temas bölgesinde sıcaklık yükselir ve bu durum, kovanın taç yaprağı şeklinde oluşma olasılığını artırır. Şekil 11'de, SDY'de devir sayısının delik çapına bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 11. Sürtünmeli delme delik çapına bağlı olarak devir sayısının değişimi [30].

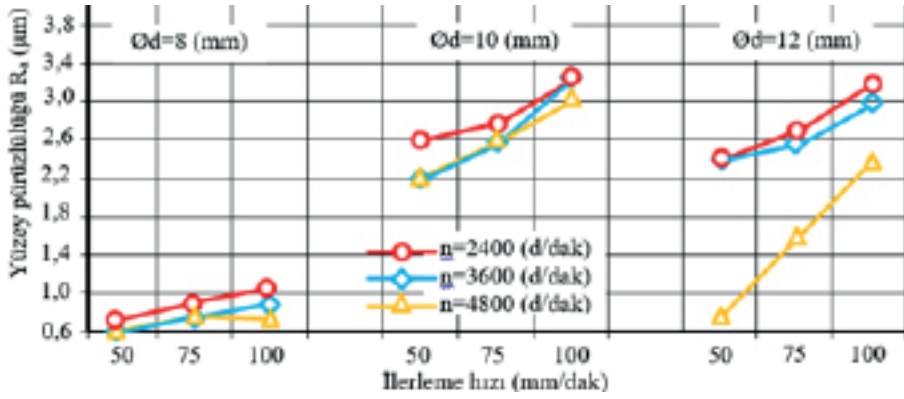
Devir sayısının yüksek olması, ergimiş malzemenin delik yüzeylerine düzgün bir şekilde yapışmasını ve yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Ancak, SDY işlemlerinde, iş parçasının kalınlığı ve delinecek delik çapına uygun olarak seçilen devir sayısı, takım ömrünü artırmada önemli bir rol oynamaktadır [23, 25]. SDY'de takım ile iş parçası arasındaki temas bölgelerinde meydana gelen ısı, devir sayısına bağlı olarak değişiklik gösterir. Devir sayısı düşük olduğunda, yüzey temas alanında yeterli ısının oluşmaması nedeniyle iş parçası malzemesi yeterince erimez ve bu da itme kuvvetinin artmasına yol açar. İtme kuvvetindeki bu artış, uygun olmayan bir kovan şeklini ortaya çıkarır [13]. Isıl iletkenlik katsayısı yüksek olan malzemelerin SDY'de delinmesi

için daha yüksek devir sayıları tercih edilmelidir. Öte yandan, yüksek gerilme dayanımına sahip yüksek alaşımlı ve paslanmaz çelikler gibi malzemelerin delinmesinde daha düşük devir sayıları kullanılması önerilir. Delme işleminin ardından takım geri çekildiğinde, düşük sıcaklık nedeniyle yeterli derecede viskoz hale gelmemiş ve takım yüzeyine yapışmış olan çapaklar, aşınma etkisi yaparak delik iç kısmındaki pürüzlülüğü artırarak takımın ömrünü düşürür. En uygun devir sayısı takım çapına bağlı olarak Şekil 11'deki grafikten alınabilir [30].

3.5. İlerleme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne (Ra) Etkisi

SDY'de, deliklerin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktör sıcaklıktır. Sıcaklık, malzemenin ısı etkisiyle yumuşamasını ve viskoz hale gelerek takım tarafından aşağıya doğru itilmesini sağlar. Bu süreçte, devir sayısı (d/dak), ilerleme hızı (mm/dak), takımın koniklik açısı, iş parçasının ve takımın ısıl iletkenlik katsayıları, delik çapı ve iş parçasının kalınlığı gibi parametreler, dolaylı olarak takım ile iş parçası arasındaki temas alanında ortaya çıkan ısı miktarını etkileyerek pürüzlülüğü belirler.

İlerleme hızının artması, itme kuvvetinin ve gerekli güç miktarının da artmasına neden olur. İtme kuvvetinin hızlı bir şekilde artması, pratikte yüksek bir ilerleme hızını göstermektedir. Takımın iş parçasına dalma süresi ise ilerleme oranına bağlıdır. Bununla birlikte, SDY'de harcanan enerji miktarı, ilerleme hızından bağımsızdır [8]. Yüksek ilerleme hızlarında, takım-iş parçası arasındaki ısı oluşumu azalır, bu da iş parçasının yeterince yumuşamasını engeller. Sonuç olarak, ergimemiş malzeme deliğin yüzeyine yapışır ve bu durum yüzey kalitesini bozar. Düşük devir sayılarında ise ilerleme hızının deliğin daireselliği üzerindeki etkisi daha belirgindir. İlerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ve deliğin daireselliği üzerindeki etkisi, devir sayısının etkisine göre daha azdır. İlerleme hızının çok düşük olması halinde, temas alanında oluşan ısı miktarı artar ve delme süresi uzar. Bu durum delinen deliğin yüzeyinde farklı soğuma bölgeleri meydana getirebilir. Özellikle deliğin giriş kısmına yakın yüzeyin alt kısımları daha hızlı soğuduğundan, takım iş parçasına yapışma eğilimi artar ve bu da yüzey kalitesinin düşmesine neden olur [23, 24, 28]. İlerleme hızının artmasıyla birlikte, takım ile iş parçası arasındaki temas alanında oluşan ısı miktarı azalır. Bu durum, malzemenin yeterince ergimeyerek delik yüzeyine sıvanmasına ve dolayısıyla yüzey kalitesinin olumsuz etkilenmesine sebep olur. Öte yandan, devir sayısının artmasıyla aynı temas alanında oluşan ısı miktarı artar. Bu sayede malzeme yeterince yumuşar, viskoz bir hale gelir ve yüzey kalitesi iyileşir. Şekil 12'de farklı devir sayıları ve takım çapları için ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi verilmiştir.



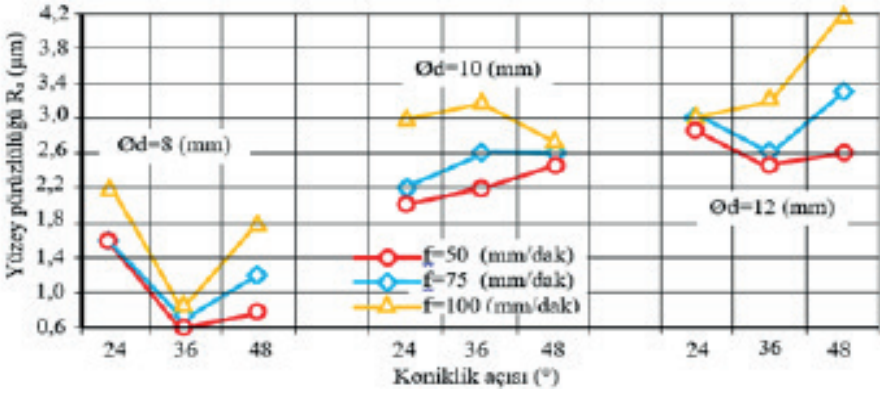
Şekil 12. $t=6$ mm, $h_f=16$ mm, ve $\beta=36^\circ$ için ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi [36].

Şekilde görüldüğü gibi takım çapı/delik çapı arttığında ve devir sayısı ise düştüğünde yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği, ancak yüksek devir sayılarında daha iyi bir yüzey kalitesinin elde edildiği, dolayısıyla delik çapının negatif, devir sayısının ise yüzey pürüzlülüğü üzerinde pozitif etkisinin olduğu görülmektedir.

Artan ilerleme hızı, işlem sırasında meydana gelen ısı geçişini azalttığı için malzemenin ısı etkisiyle yeterince yumuşayıp akabilmesi sağlanamamaktadır. Bu durum, delme işlemi sırasında deformasyon etkilerinin artmasına yol açmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, akan malzemenin delik yüzeyine sıvanması nedeniyle olumsuz etkilenmektedir. Ancak devir sayısının artmasıyla birlikte, takımın konik şaft kısmı ile iş parçası arasındaki temas alanında oluşan ısı miktarı artmakta ve malzeme, bu artan ısı etkisiyle yeterli derecede yumuşayıp akışkan hale gelmektedir. Böylece akan malzeme, delik yüzeylerine sıvanmadan, takımın ilerleme doğrultusunda aşağı doğru hareketini kolaylaştırmakta ve bu da yüzey kalitesinin iyileşmesini sağlamaktadır.

3.6. Takım Koniklik Açısı (β)'nın Yüzey Pürüzlülüğüne (R_a) Etkisi

Koniklik açısının azalması, takım ile iş parçası arasındaki temas alanında meydana gelen ısı miktarını artırmıştır. Takım koniklik açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 13'de gösterilmiştir. Takım çapı, koniklik açısı ve ilerleme hızındaki artış, takım ile iş parçası arasındaki temas alanını ve oluşan ısı miktarını azaltmaktadır. Bunun sonucunda, devir sayısının artması ile birlikte büyük çaplı deliklerin SDY yöntemiyle delinmesinde yüzey kalitesi de iyileşmektedir. A7075-T651 malzemesinin SDY ile delinmesi sırasında, en uygun koniklik açısının 360 derece olduğu belirlenmiştir.

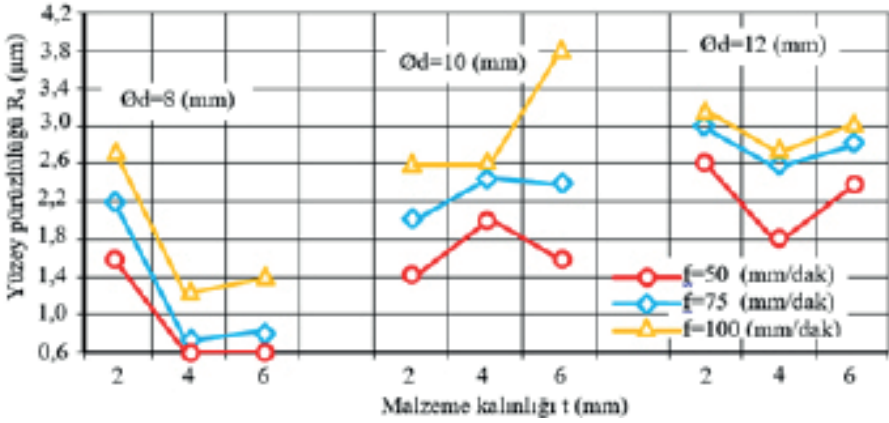


Şekil 13. $h_f=16$ mm, $t=6$ mm ve $n=3600$ d/dak için koniklik açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi [36].

SDY takımlarının koniklik açısı, takım ile iş parçası arasındaki temas alanını belirleyen kritik bir parametredir. Koniklik açısının daha küçük bir değere ayarlanması, konik bölgenin uzunluğunu ve takım ile iş parçası arasındaki temas alanını artırırken; koniklik açısının büyümesi, temas alanını azaltmaktadır [24]. Temas alanının artışı, takım-iş parçası arasındaki sürtünme enerjisinin neden olduğu ısı miktarının artmasına yol açar. Bu durum, işlem sırasında dengeli bir ergimenin sağlanmasını ve deliğin yüzey kalitesinin iyileşmesini mümkün kılar [25, 29].

3.7. Malzeme Kalınlığının Yüzey Pürüzlülüğüne (R_a) Etkisi

Malzeme kalınlığı ve delik çapı arttıkça, SDY'de takım ile iş parçası arasındaki temas alanı genişlerken, aynı zamanda ortaya çıkan ısı miktarı da artmaktadır. Isı miktarının artması, işlem sırasında malzemenin daha fazla erimesine ve daha viskoz bir hale gelmesine yol açmakta, bu da boşalan malzeme miktarını artırmaktadır. Ancak, ortaya çıkan ısı yetersiz olduğunda, iş parçası yeterince yumuşamamakta; bu durum sonucunda takım tarafından yüzeye uygulanan baskı ile yüzey pürüzlülüğü artmakta ve elde edilen sonuçlar t/d oranına uygun olmaktadır. Malzeme kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 14'deki ayrı ayrı gösterilmiştir.



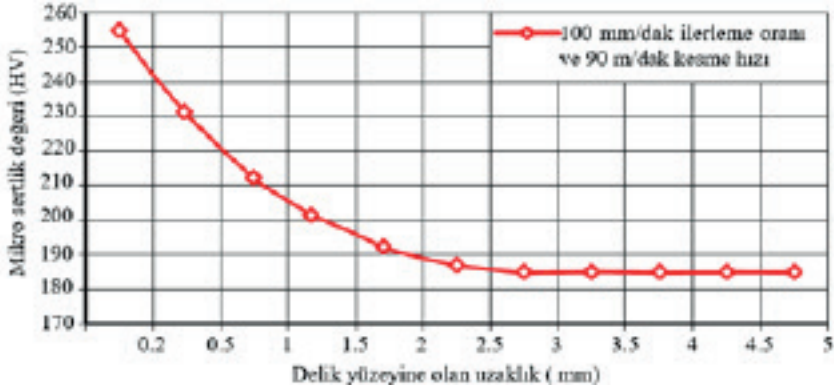
Şekil 14. $h_f=8$ mm, $\beta=36^\circ$ ve $n=4800$ d/dak için malzeme kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi [36].

En düşük yüzey pürüzlülüğünün, malzeme kalınlığı $t=4$ mm ve 8 mm çapındaki delik yüzeyinde, 36° takım koniklik açısı ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, malzeme kalınlığının ve ilerleme oranlarının artmasıyla birlikte yüzey kalitesindeki kötüleşmenin azaldığı tespit edilmiştir.

4. Mikro Yapı ve Malzemenin Mikro Sertliği

İş parçası malzemesinin ısı iletkenliği, sürtünmeli delme işlemi için sertlik değişimleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Delik duvardan uzaklaştıkça sertlik giderek artar. Kovan tamamlanmasından ve delme takımının delinmiş delikten geri çekilmesinden sonra, ısı delik kenarına en yakın alanda üretilir. Delinmiş delik kenar mesafesi arttıkça sıcaklık önemli ölçüde artmaz. Daha yüksek ısı üretimi için daha fazla soğutma süresi gerekir. Ardından, soğuma süresi ne kadar uzun olursa, tane boyutunun büyümesi için gereken süre de o kadar uzun olur. İri tane boyutunun düşük sertlik, ince tane boyutunun ise yüksek sertlik anlamına geldiğini belirtmekte fayda vardır. Bu nedenle, delinmiş delik kenarından uzaklaştıkça sertlik kademeli olarak artar.

Delme işlemi tamamlandıktan sonra, delik yüzeyi hızla hava akımına maruz kalarak soğumaya başlar. Bu süreçte delik yüzeyi, iç bölgelere kıyasla daha çabuk soğur. Sonuç olarak, en küçük tane boyutları ve en yüksek mikro sertlik değerleri delik yüzeyinde oluşur. Şekil 15'de, mikro sertlik değerinin delik yüzeyine olan mesafeye bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 15. SDY'de mikro sertlik değerinin delik yüzeyine olan mesafeye bağlı olarak değişimi [23].

Delik yüzeyinden uzak olan bölgeler, hava akımına doğrudan maruz kalmadıkları için iş parçasının ısıl iletkenlik katsayısına bağlı olarak daha yavaş bir şekilde soğur. Bu durum, delik yüzeyinden iç bölgelere doğru ısı transferinin ve ısıl işlem süresinin uzamasına neden olur; sonuç olarak, daha iri taneli ve yumuşak bir mikro yapı oluşur. Öte yandan, ısıl iletkenlik katsayısı yüksek olan malzemelerde ise ısının ara yüzeyden uzaklaşma süresi ve ısıl işlem süresi oldukça kısadır. Bu nedenle, bu tür malzemelerde tane boyutu küçülürken, mikro sertlik değeri ise artar [23]. Delik duvarındaki yüksek sertlik değeri, malzemenin takım içinde akarken iş parçasının iç kısımlarına doğru preslenmeye maruz kalması, en yüksek sıcaklığın meydana geldiği [36] takım-iş parçası ara yüzünde [34, 35] deformasyon etkisi ile ince eksenli tane şekillerinin yeniden boyutlandırmasından kaynaklanmaktadır. İlerleme hızının sertlik üzerinde devir sayısından daha az bir etkisi olmasına rağmen, ilerleme hızının artması sertliği artırır. Yüksek ilerleme hızı soğutma süresini azaltır ve buna bağlı olarak tane boyutu büyüyemez. Aksine, devir sayısının sertlik üzerinde büyük bir etkisi vardır. Devir sayısının artması sertliği azaltır. Devir sayısı, ısı üretiminde önemli bir rol oynadığından, artan devir sayısı, delinmiş delik bölgesindeki sıcaklığı artırır. Düşük ısıl iletkenliğin ısıtma ve soğutma fazlarının uzamasındaki rolü ile ilgili olarak, tane boyutunun büyümesi için yeterli süre vardır ve bu durumda sertliği artırır. Termal iletkenliği düşük olan malzemelerde, delik kenarına en yakın bölge daha düşük bir sertliğe sahiptir. Bu durumda delik kenarının yavaş ısınmasına ve soğumasına neden olur [11]. Düşük termal iletkenlik, soğuma süresinin uzamasına neden olur ve deliğin kenarı boyunca büyük taneler oluşturarak, düşük sertlik ile sonuçlanır. Daha fazla ısı üreten daha yüksek iş mili hızı, mikro sertliği artırır. Aksine, ilerleme hızının (etkileşim süresi) sertlik üzerindeki etkisi önemli değildir.

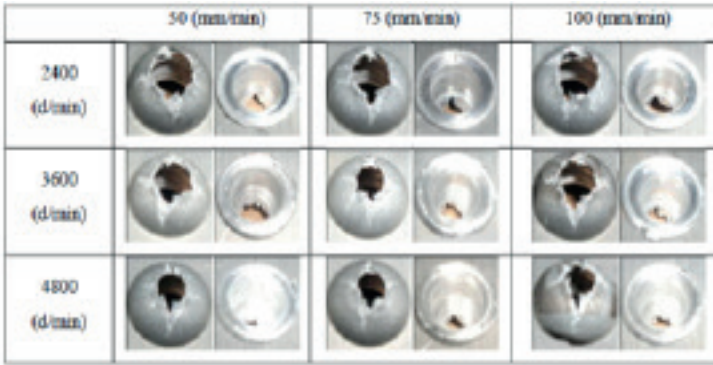
5. Kovan Yüksekliği (h_a), Kovan Dış Çapı (d), Kovan ve Pul Biçimleri

SDY ile delik delmenin temel amacı, bağlantı uzunluğunu artıran kovan oluşumunu sağlamaktır. Elde edilen kovanın yüksekliği arttıkça, bağlantı uzunluğu ve dış çapı da artar; bu durum kovanın et kalınlığını yükseltir. Et kalınlığındaki bu artış, deliğe vida açıldığında bağlantının mukavemetini güçlendirir.

5.1. İlerleme Hızının Kovan Yüksekliğine (h_a), Kovan Dış Çapına (d), Kovan ve Pul Biçimine Etkisi

Artan ilerleme hızı, kovan ve pul biçimlerinde yırtılmalara yol açmakta; bu da deformasyon etkisini artırmaktadır. Viskoz hale gelen malzeme, delik etrafında dairesel olarak yayılır ve bu durum kovanın yüksekliğinde bir azalmaya neden olur. Sonuç olarak, kovanın dış çapı ve çeper kalınlığı artar. Devir sayısındaki artış, ergime sıcaklığını yükselterek malzemenin yeterince yumuşamasını sağlamaktadır. Ancak, ergimiş malzeme yüksek devir sayılarında dönme momentinin etkisiyle deliğin çevresine doğru akmaktadır. Böylece, kovanın yüksekliği azalırken dış çapı artmakta ve kovan ile pul biçimlerinde yeni yırtılmalar ortaya çıkmaktadır.

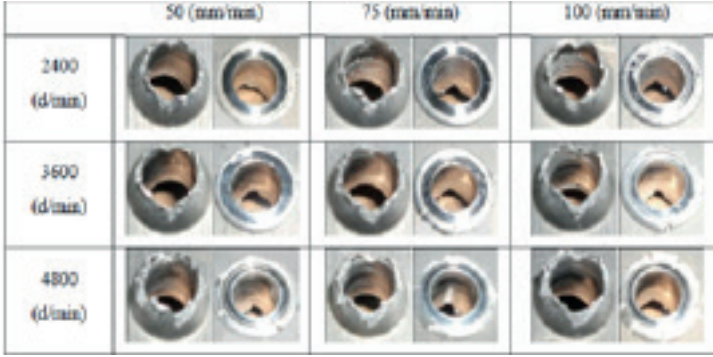
Şekil 16'da $t=4$ mm kalınlığında A7075-T651 alaşımı için farklı ilerleme hızları ve devir sayılarında elde edilen kovan ve pulun biçimleri verilmiştir. Malzeme kalınlığı ve takımın silindirik olan bölgesinin boyu yetmediğinden eriyen malzeme delik içerisinde düşey yönde rahat bir biçimde akamadığından kovan şekilleri konik olarak ortaya çıkmıştır. Malzeme yukarı aktığından pul oluşumunu sağlayan sızdırmazlık halkası daha büyük olmuştur.



Şekil 16. $t=4$ mm kalınlığında A7075-T651 alaşımı için farklı ilerleme hızları ve devir sayılarında elde edilen kovan ve pul biçimleri [36].

Şekil 17'de $t=10$ mm kalınlığında A7075-T651 alaşımı için farklı ilerleme hızları ve devir sayılarında elde edilen kovan ve pulun biçimleri verilmiştir. İlerleme hızının artmasıyla birlikte, kovanın yüksekliği azalırken dış çapı art-

mıştır. Ayrıca, devir sayısındaki artış da kovanın yüksekliğini azaltmış ve dış çapını büyütüştür. Bununla birlikte, pul ve kovan biçimlerinde yırtılmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir.

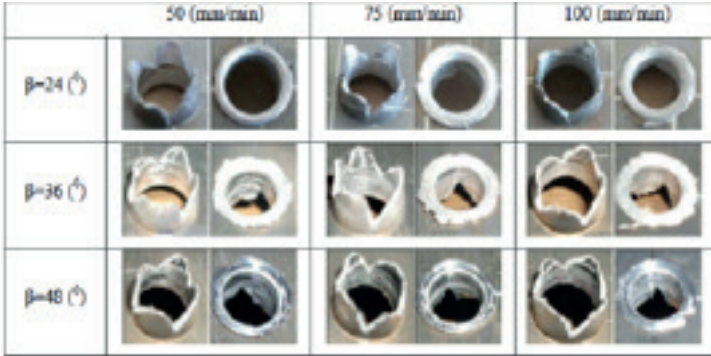


Şekil 17. $t=10$ mm kalınlığında A7075-T651 alaşımı için farklı ilerleme hızları ve devir sayılarında elde edilen kovan ve pul biçimleri [36].

5.2. Takım Koniklik Açısının Kovan Boyutlarına ve Yapısına Etkisi

Şekil 18'de $t=4$ mm kalınlığında A7075-T651 alaşımı için farklı ilerleme hızları ve takım koniklik açılarında elde edilen kovan ve pulun biçimleri verilmiştir.

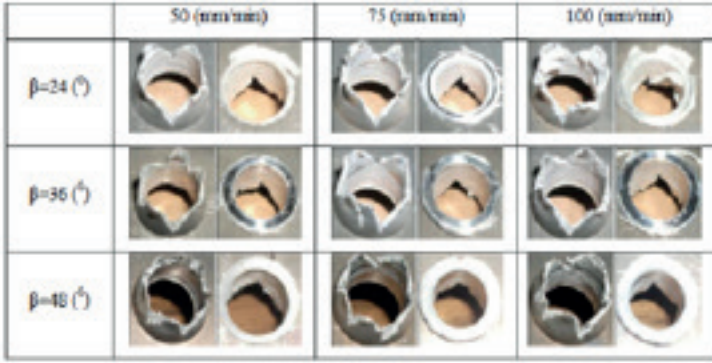
Takım-iş parçası temas alanı, takım koniklik açısının artması ile ortaya çıkan ısı değeri azalmıştır. Dolayısıyla istenilen miktarda malzeme ergime-mekte, akmamakta ve pul ve kovan şekillerinde hasarların olması gerçekleşmemektedir. Kovan yüksekliği azalmış ve kovan dış çapı ise artmıştır.



Şekil 18. $t=4$ mm kalınlığında A7075-T651 alaşımı için farklı ilerleme hızları ve takım koniklik açılarında elde edilen kovan ve pul biçimleri [36].

Şekil 19'da $t=10$ mm kalınlığında A7075-T651 alaşımı için farklı ilerleme hızları ve takım koniklik açılarında elde edilen kovan ve pulun biçimleri verilmiştir.

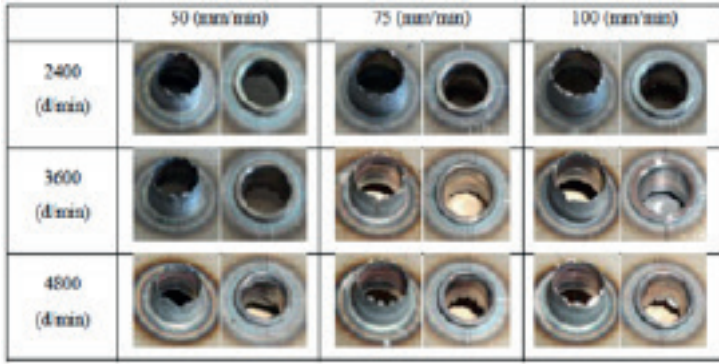
Delik çapı 12 mm olarak belirlendiğinde, kovan oluşumunu sağlayan malzeme miktarı artmakta; bu durum kovan yüksekliğini artırırken, kovanın dış çapını ise azaltmaktadır. Takım çapı veya delik çapı büyüdüğünde, maksimum kovan yüksekliği ve minimum kovan dış çapı değerleri 36° koniklik açısında elde edilmektedir. Bu nedenle, kovan ve pul biçimlerinde en fazla çatlakların 24° koniklik açısında meydana geldiği gözlemlenmektedir.



Şekil 19. $t=10$ mm kalınlığında A7075-T651 alaşımı için farklı ilerleme hızları ve takım koniklik açılarında elde edilen kovan ve pul biçimleri [36].

Şekil 20'de $t=4$ mm kalınlığında St37 çeliği için farklı ilerleme hızları ve takım koniklik açılarında elde edilen kovan ve pulun biçimleri verilmiştir.

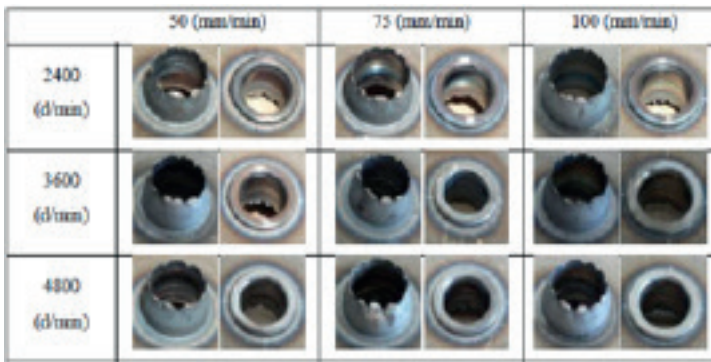
St37 çeliği, sünek bir malzeme olduğu için artan ilerleme hızıyla birlikte kovanın yüksekliği düzenli bir şekilde artış göstermiştir. 3600 dev/dak ve 50 mm/dak hızında maksimum kovan dış çapına ulaşılmıştır; ancak ilerleme hızının artmasıyla kovanın dış çapı azalmıştır. St37'nin sünekliliği sayesinde kovan ve pul şeklinde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.



Şekil 20. $t=4$ mm kalınlığında St37 çeliği için farklı ilerleme hızları ve takım koniklik açılarında elde edilen kovan ve pul biçimleri [36].

Yüksek devir sayısı aşırı ısınmaya neden olur. Aşırı ısı üretimi, aynı zamanda, malzeme yumuşamasını uygunsuz hale getirmek için kovan şekli üzerinde çok olumsuz bir etkiye sahiptir. Aşırı malzeme yumuşaması yuvarlaklığı artırır, buda delik-duvar kalınlığını azaltır ve kovan oluşumunu etkisiz hale getirir. Düşük devir sayıları yetersiz ısı üreten, taç yaprak sayısı ve boyutuna uygun olmayan kovan oluşturduğu gözlemlenebilir. Ayrıca, yüksek devir sayısı, daha fazla ısı üretir ve malzemeyi aşırı derecede yumuşatır, delinmiş deliğin etrafındaki etkilenen bölgeyi ısıtmak, daha az sayıda taç yaprağı oluşturur ve taç yaprağı boyutunu küçültür. İlerleme hızının kovan oluşum kalitesi üzerindeki etkisi devir sayısı kadar önemli olmasa da yetersiz ilerleme hızı, kovan oluşum kalitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.

Şekil 21’de, $t=10$ mm kalınlığında St37 çeliği için farklı ilerleme hızları ve takım koniklik açılarında elde edilen kovan ve pulun biçimleri verilmiştir.



Şekil 21. $t=10$ mm kalınlığında St37 çeliği için farklı ilerleme hızları ve takım koniklik açılarında elde edilen kovan ve pul biçimleri [36].

$t=10$ mm kalınlığındaki plakada takım-iş parçası temas alanı ve meydana gelen ısı miktarı artmış olduğundan maksimum yükseklikte kovan elde edilmiştir. 75 mm/dak'den küçük ilerleme oranlarında ise kovan yüksekliği azalmıştır. Artan ilerleme hızı ile kovan dış çapı ise artmıştır.

Düşük ilerleme hızı, delik duvarının yüzey kalitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir ve delik duvar kalınlığını azaltmaktadır. Daha yüksek bir ilerleme hızı, yetersiz ısı üretmekte ve kovan yüksekliğini düşürmektedir. Ayrıca, delme takımının yüzeyi, yüksek iş mili hızında pürüzlü ve tırtıklı bir görünüm oluşturur. İlerleme hızının takım aşınması üzerindeki etkisi, takım devir sayısı kadar önemli olmasa da, uygun değerden daha yüksek ve daha düşük ilerleme hızı, etkileşim süresini kısaltır ve uzatır ve buna bağlı olarak delme takım performansı üzerinde önemli bir hasar meydana getirir.

Yetersiz ısı üretimi, kovan yüksekliğini kısaltabilir, delik duvarının kalınlığını artırabilir, taç yaprağı sayısını azaltabilir ve taç yaprağı boyutunu büyütebilir. Aksine, şiddetli ısı oluşumu malzemeyi eritebilir, kovan yüksekliğini artırabilir, delik duvarının kalınlığını azaltabilir ve taç yapraklarının boyutunu azaltabilir. Düşük termal iletkenliği olan malzemelerde, yavaş ısı transferine neden olur ve ısıyı delinmiş delik ve takım çevresinde toplar, takım-iş parçası ara yüzünde daha az ısı transferi ve sürtünme bölgesinde ısı birikimi ile sonuçlanır. Bu da kovan oluşumunu uygunsuz hale getirir. Ayrıca, düşük ısı iletkenliği, iş parçası malzemesinin düşük ilerleme hızı ve delme takımının yüksek devir sayısı, takım-iş parçası temas alanındaki ısınmayı artırır, kovan ve taç yaprağı düzgün şekillenemez. Aşırı malzeme yumuşaması, kovan yüksekliği ve delik-duvar kalınlığı üzerinde hasar oluşturacak bir etkiye sahiptir. Malzemenin aşırı yumuşaması, kovan yüksekliğini artırır ve delik-duvar kalınlığını azaltır.

6. Sonuçlar

Bu çalışma, sürtünmeli delme yönteminin önemini, avantaj ve dezavantajları ile sürtünmeli delmenin geleneksel delme yöntemlerinden farklılıklarını göstermek için yapılmıştır.

Mevcut yöntemlerle karşılaştırıldığında, sürtünmeli delmede, kovan oluşturma kalitesi ve delme takımı performansı açısından işlenmesi zor malzemelerin sürtünmeli delinmesi için işlem parametrelerinin belirlenmesi için geniş bir çerçeve geliştirilmiştir. Bu çalışmada iş mili hızının ve ilerleme hızının ısı üretimini, termal gerilimi, kovan oluşum kalitesini ve delme takımı performansını nasıl etkilediği belirlenmiştir. İş mili hızı ve ilerleme hızının sürtünmeli delmede ısı üretimi üzerindeki etkisinin ve kovan oluşumunda termal gerilimin ve delme takımı bozulmasını nasıl etkilediği ve temel sürtünmeli delme parametreleri ele alınmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen en belirgin bulgular aşağıda özetlenmiş ve listelenmiştir.

1. İş parçası-takım ara yüzünde sürtünmeli ısı oluşumunun önemli ölçüde sürtünmeli delme performansını iyileştirdiği kanıtlanmıştır.

2. Kovan yüksekliği üzerinde, iş mili hızının sürtünme ısısı üretimi üzerindeki etkisinin, ilerleme hızı etkisinden çok daha önemlidir. Ayrıca, kovan yüksekliği üzerinde iş mili hızı ve ilerleme hızı arasında bağlı bir etkileşim vardır.

3. Yüksek ısıl iletkenliği olan malzemelerde, sürtünmeli delme işleminde genel olarak delinmiş deliğin yanındaki bitişik alan, sürtünmeli delme işlemi sırasında ısı üretildiğinden, ana malzemeye kıyasla daha yüksek bir sertliğe sahipken, düşük ısıl iletkenliğe sahip malzemelerde delinmiş delik kenarına yakın bölgede minimum sertliğe sahiptir.

4. Tekrarlayan temas alanını artıran daha yüksek iş mili hızı ve işlem döngü süresini artıran daha düşük ilerleme hızları, sürtünmeli ısı üretimini arttırmakta ve böylece oluşturulan kovanda termal gerilmenin azaldığı tespit edilmiştir.

5. Yüksek mukavemetli malzemelerin sürtünmeli delme işlemindeki mükemmel kovan oluşturma kalitesi ve üstün delme takımı performansı, düşük mukavemetli malzemeler ile karşılaştırıldığında, sürtünmeli delme için büyük bir potansiyele sahip oldukları ve özellikle yüksek mukavemetli malzemelerin sürtünmeli delme için elverişli olduğu belirlenmiştir.

Düşük mukavemetli malzemelerin sürtünmeli delme işleminde düşük kovan oluşum kalitesi ve şiddetli takım aşınmasının, bu malzemelerin sürtünmeli delme için uygun olmadığını göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Ku WL, Hung CL, Lee SM, Chow HM. 2011, Optimization in Thermal Friction Drilling for SUS 304 Stainless Steel. *Int J Adv Manuf Technol*, 53(9–12):935–44.
- [2] Swain N, Venkatesh V, Kumar P, Srinivas G, Ravishankar S, Barshilia HC. 2017, An Experimental Investigation on The Machining Characteristics of Nimonic 75 Using Uncoated and TiAlN Coated Tungsten Carbide Micro-End Mills. *CIRP J Manuf Sci Technol*, 16:34–42.
- [3] Dolinšek S. 2003, Work-Hardening in The Drilling of Austenitic Stainless Steels. *J Mater Process Technol*, 133(1–2):63–70.
- [4] Zhu Z, Sui S, Sun J, Li J, Li Y. 2017, Investigation on Performance Characteristics in The Drilling of Ti6Al4V Alloy. *Int J Adv Manuf Technol*, 93(1–4):651–60.
- [5] Yang LD, Ku WL, Chow HM, Wang DA, Lin YC. 2012, Mar-M247, Haynes-23, and Inconel-718 Study of Machining Characteristics for Ni-Based Superalloys on Friction Drilling. *Adv Mater Res*, 459:632–7.
- [6] Miller SE, Shih AJ. 20026, Friction drilling: A Chipless-hole-Making Process. *Int Conf Manuf Sci Eng (ASME)*.
- [7] Dehghan S, Ismail MISB, Ariffin MKABM, Baharudin BHTTB, Parnianifard A. 2019, Experimental Investigation on Friction Drilling of Stainless Steel AISI 304. *Int J Mach Mach Mater*, 21(4):279–99.
- [8] Zhu Z, Sun J, Li J, Li Y. 2017, Investigation on Performance Characteristics in The Drilling of Ti6Al4V Alloy. *Int J Adv Manuf Technol*, 93(1–4):651–60.
- [9] Policena MR, Trindade A, Fripp WH, Israel CL, Fronza G, de Souza AJ. 2019, Fatigue Failure Analysis of HSLA Steel Sheets Holed by Conventional And Flow Drilling Processes. *Rev Mater*, 24(2).
- [10] Su K-Y. 2015, Experimental Investigations of Improving Bushing Quality And Joining Sheet Metals in Friction Drilling. Texas A&M University.
- [11] Lee SM, Chow HM, Huang FY, Yan BH. 2009, Friction Drilling of Austenitic Stainless Steel by Uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-Coated Tungsten Carbide Tools. *Int J Mach Tools Manuf*, 49(1):81–88.
- [12] Pantawane PD, Ahuja BB. 2011, Experimental Investigations and Multi-Objective Optimization of Friction Drilling Process on AISI 1015. *Int J Appl Eng Res Dev*, 2(2):448–61.
- [13] Hynes NRJ, Kumar R. 2017, Process Optimization for Maximizing Bushing Length in Thermal Drilling Using Integrated ANN-SA Approach. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng*, 39(12):5097–108.
- [14] El-Bahloul SA, El-Shourbagy HE, El-Bahloul AM, El-Midany TT. 2018, Experimental and Thermo-Mechanical Modeling Optimization of Thermal Friction Drilling for AISI 304 Stainless Steel. *CIRP J Manuf Sci Technol*.
- [15] Özler L, Dogru N. 2013, An Experimental Investigation of Hole Geometry in Friction Drilling. *Mater Manuf Process*, 28(4):470–5.

- [16] Kaya MT, Aktas A, Beylergil B, Akyildiz HK. 2014, An Experimental Study on Friction Drilling of ST12 Steel. *Trans Can Soc Mech Eng*, 38(3):319-29.
- [17] Lee S, Chow H, Yan B. 2007, Friction Drilling of IN-713LC Cast Superalloy. *Mater Manuf Process*, 22(7):893-7.
- [18] Somasundaram G, Rajendra Boopathy S, Palanikumar K. 2012, Modeling and Analysis of Roundness Error in Friction Drilling of Aluminum-Silicon Carbide Metal Matrix Composite. *J Compos Mater*, 46(2):169-81.
- [19] Bustilloa, A., Urbikainb, G., Perezc, J. M., Pereirab, O. M., Lopez de Lacaleb, Luis N., (2018), Smart Optimization of A Friction-Drilling Process Based on Boosting Ensembles, *Journal of Manufacturing Systems* 48, 108-121.
- [20] Lee, S. M., Chow, H. M., Huang, F. Y., Yan, B. H., 2009, Friction Drilling of Austenitic Stainless Steel by Uncoated and PVD AlCrN – TiAlN Coated Tungsten Carbide Tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 81-88.
- [21] Brinksmeier, E., 1990, Prediction of Tool Fracture in Drilling, *Ann CIRP* 39, 97-100.
- [22] Cantero, J. L., Tardío, M. M., Canteli, J. A., Marcos, M., and Miguel, M. H., , 2005, Dry Drilling of Ti-6Al-4V Alloy, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 1246-1255.
- [23] Chow, H. M., Lee, S. M., and Yang, L. D., 2008, Machining Characteristics Study of Friction Drilling on AISI 304 Stainless Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 207, 180-186.
- [24] Lee, S. M., Chow, H. M., Huang, F. Y., Yan, B. H., 2009, Friction Drilling of Austenitic Stainless Steel by Uncoated and PVD AlCrN – TiAlN Coated Tungsten Carbide Tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 81-88.
- [25] Miller, S. F., Tao, J., Shih, A. J., 2006, Friction Drilling of Cast Metals, *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 46 1526-1535.
- [26] Gopal Krichna, P. V., Kishore, K., and Satyanarayana, V. V., 2010, Some Investigations in Friction Drilling AA6351 Using High Speed Steel Tools, *ARPN Journal Engineering and Applied Sciences*, 5, 1819-6608.
- [27] Doğru, N., 2010, AISI1010 Çelik Malzemenin Sürtünmeli Delme Yöntemiyle Delinmesinde İşleme Karakteristiklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [28] Miller, S. F., Blau, P., Shih, A. J., 2005, Microstructural Alterations Associated with Friction Drilling of Steel, Aludakum and Titanium, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14, 647-653.
- [29] Lee, S. M. Chow, H. M., and Yan, B. H., 2007, Friction Drilling of IN-713LC Cast Superalloy, *Materials and Manufacturing Process* , 22, 893-897.
- [30] Dekkers, G., 1993, Flowdrill Prosesi Firma Katalogları, Copyright by Flowdrill B. V. Holland, 1-30.

- [31] Miller, S. F., Blau, P. J., Shih, A. J., 2007, Tool Wear in Friction Drilling,, International of Machine Tool and Manufacture, 47, 1636-1645.
- [32] Miller, S. F. Wang, H., and Shih, A. J., 2006, Experimental and Numerical Analysis of the Friction Drilling Process, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 128, 802-810.
- [33] Miller, S. F., and Shih, A. J., 2007, Thermo – Mechanical Finite Element Modelling of the Friction Drilling process, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor MI 48109, 129, 531-538.
- [34] Ünal, E., Özek, C., 2017, A Study on The Wall Thickness in The Angular Deep Drawing Process, Materials Testing, 59, 2.
- [35] Ünal, E., 2018, Influence of drilling parameters on temperature and surface roughness of AISI O2 steel, Materials Testing, 60 (2).
- [36] Demir, Z., 2012, A7075-T651 Alüminyum Alaşımının ve ST37 Çelik Malzemesinin Sürtünmeli Delme Yöntemi İle Delinmesinin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

BÖLÜM 9

BOBİN MANYETİK ALAN VERİLERİNİN RADYAL BAZ FONKSİYONLAR KULLANILARAK İKİ BOYUTLU UZAYDA İTERPOLASYONU

Hüseyin YILDIZ¹

Yasemin POYRAZ KOÇAK²

1Dr. Öğr. Üyesi; İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü huseyin.yildiz@iuc.edu.tr ORCID No: 0000-0002-0575-3904
2 Araş. Gör. Dr.; İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Teknolojileri Bölümü yasemin.poyraz@iuc.edu.tr ORCID No: 0000-0002-1502-7260

Giriş

Radyal Baz Fonksiyon (RBF) interpolasyonu, çok boyutlu, düzensiz veya eşit aralıklı olmayan verilerden bir fonksiyon oluşturmak için kullanılan temel yöntemlerden biridir. Fonksiyon, her bir veri noktasından yayılan ve uzaklığa bağlı olarak değişen "radyal tabanlı" fonksiyonlar (örneğin Gaussian, Multiquadric) ile ifade edilir. RBF yöntemlerinin, rastgele dağılmış verileri işleme, birden fazla uzay boyutuna kolayca genelleme yapma ve spektral doğruluk sağlama yeteneği, onu birçok farklı uygulama türünde popüler hale getirmiştir. Bu yöntem, özellikle çok boyutlu verilerde (2B ve 3B) manyetik alan modelleme, yüzey analizleri ve mühendislik uygulamalarında kullanılır. Bu uygulamaların en yenileri arasında kartografya, sinir ağları, tıbbi görüntüleme ve parçacık diferansiyel denklemlerin (PDE) sayısal çözümü yer almaktadır. RBF interpolasyonu, doğruluk ve esneklik açısından avantajlıdır ancak büyük veri kümelerinde hesaplama maliyeti yüksektir. Literatürde RBF interpolasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş çok sayıda uygulama bulunmaktadır.

(Fornberg ve Flyer, 2015)'deki çalışma, RBF'lerin algoritmik evrimi, sonlu fark (FD) ve psödospektral (PS) yöntemlerine kısa girişle başlayarak global RBF'ler ile devam edip ardından RBF tarafından üretilen FD (RBF-FD) yöntemleri ile sonlandırılmıştır. Ayrıca, RBF ve RBF-FD yöntemlerinin jeoloji bilimindeki uygulamaları kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. (Tanbay, 2024)'deki çalışmada, 2B, çok gruplu nötron difüzyon problemlerini çözmek için ağsız RBF kollokasyon algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ile bir gruplu harici kaynak durumu, iki gruplu fizyon kaynağı durumu ve dört gruplu fizyon kaynağı durumu olmak üzere üç problem çözülmüştür. Multiquadric fonksiyon RBF olarak belirlenmiştir. Ayrıca interpolasyon düğüm ve işlemci sayısının algoritmanın hızlanması ve hesaplama verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Geliştirilen algoritma ile elde edilen hızlanma çok çekirdekli bilgisayarın bellek miktarı ile sınırlandırılrsa da paralel yaklaşım CPU'nun yoğun olarak kullanıldığı problemlerde önemli oranda zaman tasarrufu sağladığı görülmüştür.

(Tao vd., 2020)'de uydu ölçüm ve kontrol sistemi, navigasyon ve konumlandırma sistemi, jeodezik hassas ölçüm ve astronomik ölçüm alanlarında kullanılmak üzere Troposferik atmosferik kırılma (TAR) profili yöntemi önerilmiştir. Multiquadric RBF ve k-means kümeleme yönetiminin birlikte kullanıldığı bu çalışmada, 10 yıl süresince Çin'deki farklı 132 meteoroloji istasyonundan elde edilen ölçüm verileri kullanılmıştır. Farklı interpolasyon yöntemleriyle elde edilen tahmin verileri ile gözlem verileri arasındaki hata değerleri MAE ve RMSE ile hesaplanmıştır.

RBF, dağınık veri noktalarını interpolate etmek veya yaklaşmak için yüzey yeniden yapılandırma yöntemlerinde de kullanılmaktadır. (Liu ve Wang, 2012)'de büyük bir doğrusal sistemi çözmeden örtük yüzeyleri yeniden yapılandırılabilen, RBF'ye dayalı bir yarı-interpolasyon çerçevesi sunulmaktadır. Uyarlanabilir bölümlene tekniği ile düzgün olmayan ve gürültülü nokta kümeleri üzerindeki yüzeyleri başarılı bir şekilde yeniden yapılandırılmıştır. (Liu ve Wang, 2012)'de geliştirilen yarı-enterpolasyon yöntemi baz alınarak yeniden kontrollü yüzey yapılandırmasını gerçekleştirebilmek amacı ile (Zeng ve Zhu, 2022)'de interpolasyon ve yaklaşımı birleştiren, gürültüye karşı dayanıklı, benzer sürede daha iyi yeniden yapılandırma sonuçları sunan Kompakt Destekli Radyal Baz Fonksiyonu (CSRBF) adlı yöntem geliştirilmiştir.

(Xu-Guang vd., 2022)'de Lagrangian içinde bulunan kuantum akışkan dinamik denklemlerini çözmek için çok değişkenli, multiquadrics ve shifted-thinplate spline RBF interpolasyon tekniği sunulmuştur. Kuantum mekaniğinin ilkelerini kullanarak geliştirilen kuantum bilgisayarların avantajlarından yararlanarak (Cui vd., 2023)'de Dağınık veri interpolasyonu için kuantum RBF algoritması geliştirilmiştir. Algoritma, yoğun interpolasyon matrisini oluşturmak için cohorent durumlar, matrisin tersini elde etmek için nonsparse matrix exponentiation, yeni veriler üzerinde değerlendirme yapmak için swap-test işlemlerini gerçekleştirmiştir. Klasik bilgisayar ile performans karşılaştırıldığında, RBF interpolasyonun kuantum versiyonunun, veri sayısında ikinci dereceden bir iyileştirme gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.

(Golbabai ve Nikpour, 2016)'daki çalışmada, uygun başlangıç ve Dirichlet sınır koşullarıyla sürekli alanlarda 2B doğrusal olmayan Schrödinger denkleminin çözümü diferansiyel kareleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Diferansiyel kareleme yöntemindeki önemli nokta olan, uzamsal noktaların yaklaşık olarak hesaplanmasında ağırlık katsayılarının belirlenmesi işlemi Multiquadric RBF ile gerçekleştirilmiştir.

Vektör alanı, her noktayı vektör ile temsil eden bir fonksiyondur. Vektör alanı veri setleri, çoğunlukla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Sonlu Elemanlar Yönteminden elde edilir ve çok sayıda örnek noktası içerir. Ayrıca bu veri setlerinin gelecekteki kullanımı için depolanması gerekir. (Smolik ve Skala, 2021)'deki çalışmada, veriye duyarlı sıkıştırma ve kademeli ayrıntı görselleştirmesi sunan yeni bir ağsız çok seviyeli RBF (ML-RBF) yaklaşımı önerilmiştir. Radyal baz fonksiyonlarının merkezleri, önceki ayrıntı vektör alanı yaklaşımının yaklaşım hatasının dağılımına göre yerleştirilmiştir.

Mikro robot yapılarının kontrolünde manyetik alan bilgisi kontrolcü performansını doğrudan etkileyen temel parametrelerdendir. Özellikle doğrusal olmayan (non-linear) kontrol algoritmalarının uygulanmasında kritik rol oynamaktadır. Silindirik (Yu ve Sebo, 1996) ve kartezyen koordinatlarda (Misakian, 2000) hava nüveli düzgün geometriye sahip bobinler için analitik manyetik alan modelleri bulunmaktadır. Ancak güçlü manyetik alan oluşturulması ve manyetik alanın yönlendirilebilmesi için manyetik nüveler kullanıldığında analitik olarak çözmek mümkün olmaz. Bu durumda sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method) veya Sonlu farklar metodu (Finite Difference Method) kullanan paket programlar tarafından hesaplamalar yapılır. Ancak kontrol sistemlerinin zamana bağlı sistemler olması nedeni ile her zaman adımı için tüm hesaplamaların yapılması yüksek hesaplama maliyetlerine sebep olacağı gibi, gerçek zamanlı kontrol uygulamaları için kullanışsızdır.

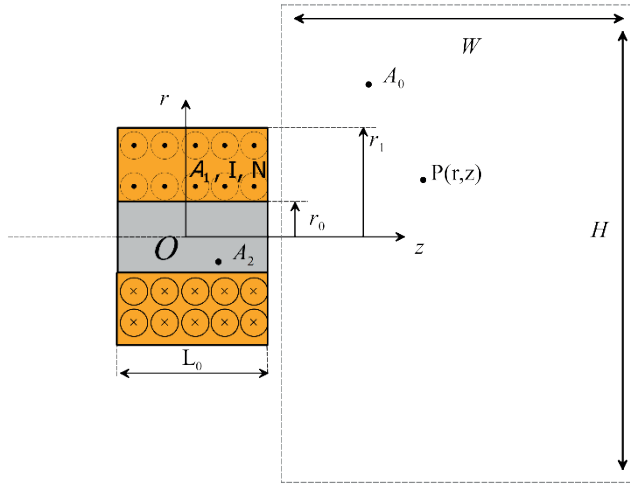
Bu çalışmada, gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında kullanılmak üzere sayısal analiz veya deney verilerinden elde edilen manyetik alan sonuçlarının interpolasyonu ele alınmıştır. Çalışmada iki boyutlu uzayda polinom interpolasyonu ve Radyal baz fonksiyon temelli interpolasyon

yöntemlerinin temelleri açıklanarak dairesel bobin için her iki yöntemin sonuçları kıyaslanmıştır. Düşük frekanslarda manyetik alan akım ile doğrusal bağlandığından bobin modeli geometrik dönüşümler uygulanarak birden fazla bobin durumunda sonuçlar toplanabilir (süperpozisyon). Çalışmada düzlem üzerinde farklı konumlarda ve farklı akımlarda bobinler için manyetik alan sonuçları gösterilmiştir.

Materyal ve Metot

Elektromekanik Denklemler

Elektromıknatıslar kontrol alanında genellikle kontrol bölgesinin dışında yer alacak şekilde konumlanır (Şekil 1). Şekil 1’de eksenel simetriye sahip bir elektromıknatıs yapısı silindirik koordinatlarda verilmiştir. A_1 iletken bobin sargısı, A_2 manyetik nüve etrafına homojen ve düzgün bir şekilde sarılmıştır (Şekil 1). A_1 bölgesinde N adet sargı bulunmakta olup, tüm sargılar seri olarak birbirine bağlı ve içerisinden I akımı geçmektedir. A_0 , yükseklik(H) ve genişliği(W) bilinen çözüm alanını temsil etmektedir.



Şekil 1. Manyetik çekirdekli bobin sargısı

Doğrusal, izotropik geçirgen ve iletken malzemelerden oluşan elektromanyetik sistemler için Maxwell denklemlerinin diferansiyel formu Eş. 1 ile verilmiştir (Griffiths, 1998).

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot \mathbf{E} &= \rho \\
 \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\
 \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\
 \nabla \times \mathbf{B} &= \mu \mathbf{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Burada, μ ve ϵ , ortamın manyetik geçirgenlik sabiti ve dielektrik geçirgenlik sabiti, ρ ve J ise serbest elektrik yük yoğunluğu ve akım yoğunluğudur. Akım yoğunluğu terimi dışarıdan uygulanan akımları ve elektrik iletkenliğinden oluşan akımları içermektedir. Elektrik ve manyetik alanlar $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{B}$ skaler ve vektör potansiyeli ϕ ve $\mathbf{A}$ cinsinden ifade edilebilir (Jackson, 1962).

Böylece Eş. (1) ile verilen denklemler otomatik olarak sadeleşir. Elektrik alan ve manyetik alan ifadeleri $\mathbf{A}$ vektörü türünden yazılır (Clayton, 2010).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E} &= -i\omega \mathbf{A} \\
 \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\
 \nabla^2 \mathbf{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} &= -\mu \mathbf{J}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Eş. (2) İletken, homojen ve izotropik ortamlar için geçerli olup, sistemin genel elektromanyetik davranışını veren diferansiyel denklemdir. Dairesel yapıya sahip homojen yapılarda Vektör potansiyelinin ($\mathbf{A}$) r ve z bileşenleri 0 olur. Bu durumda silindirik koordinatlarda eksenel simetri kabulü altında $\mathbf{A}$, r ve z değişkenlerine bağlı olup sadece radyal (ϕ) bileşenine sahiptir (Eş. 3).

$$\mathbf{A} = A_{\phi}(r, z) \quad (3)$$

$\nabla^2 \mathbf{A}$; vektör potansiyelinin vektör laplasyanu olarak bilinir ve silindirik simetri bir sistemde Eş. 4 ile ifade edilir.

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \frac{\partial^2 \mathbf{A}_{\phi}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}_{\phi}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{A}_{\phi}}{\partial r} - \frac{\mathbf{A}_{\phi}}{r^2} \quad (4)$$

Düşük frekansta çalışan sistemlerde zamana bağlı terim ihmal edilir ve böylece Eş. 2 ve Eş. 4 dikkate alındığında problemi ifade eden kısmi diferansiyel denkleme ulaşılır (Eş. 5).

$$\frac{\partial^2 \mathbf{A}_{\phi}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}_{\phi}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{A}_{\phi}}{\partial r} - \frac{\mathbf{A}_{\phi}}{r^2} + \mu \mathbf{J} = 0 \quad (5)$$

İnterpolasyon

Eş. 5 ile verilen diferansiyel denkleminin Şekil 1’de verilen geometri için analitik çözülmesi mümkün olmaz. Bu nedenle ANSYS Maxwell veya Finite Element Method Magnetics (FEMM) gibi sonlu elemanlar analizi kullanan programlar ile çözülür. Ne var ki sonlu elemanlar çözümleri kontrol sistemine dahil edilebilecek basitlikte değildir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar daha basit ve kontrol sistemine adapte edilebilir basit yapıya dönüştürülmelidir.

Sonlu elemanlar analizi sonuçlarını en iyi temsil edecek şekilde iki değişkenli bir fonksiyon belirlenmesi gerekir. Bu durumda önerilen yaklaşık çözümün genel formu Eş. 6 ile verilmiştir.

$$f_n(r, z) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m C_{i,j} \varphi_{i,j}(r, z) \quad (6)$$

Burada $\varphi_{i,j}(r, z)$ baz fonksiyonu olarak bilinir ve $n = \infty$ için referans verilerini sağlayan bir fonksiyon türetilmiş olur. Günümüzde bilinen en bilinen baz fonksiyon üstel polinom formudur (Eş. 7). Ancak

yüksek mertebeden terimler kullanıldığından polinom değeri çok hızlı değişir bu nedenle genellikle düşük mertebeli polinomların temsil edilmesinde kullanılır. Hızlı değişen ve karmaşık değişimlerin bulunduğu sistemlerde kullanımı oldukça zordur.

$$\varphi_{i,j}(r, z) = r^i z^j \quad (7)$$

Hızlı değişen fonksiyonların doğrusal olamayan davranışını temsil etmek ve yakınsak bir fonksiyon elde etmenin en kullanışlı yollarından biri Radyal baz fonksiyona sahip bir çekirdek fonksiyonu seçmektir. Radyal baz fonksiyonlar belirlenen merkez noktaları etrafında etki eden, merkezde en büyük değere olup, merkezden uzaklaştıkça değeri küçülen fonksiyonlardır. Çözüm bölgesi içerisinde sürekli ve her dereceden türevi alınabilir fonksiyonlar olmaları nedeni ile son yıllarda öne çıkmıştır (Altınkaynak 2020, Fasshauer ve McCourt, 2015). Bu nedenle katsayı optimizasyonu işlemlerinde genellikle iraksama problemi ile karşılaşmaz. Sıkça kullanılan RBF fonksiyonları Tablo 1 ile verilmiştir (Fornberg ve Flyer, 2015).

Tablo 1. Bazı RBF fonksiyonu örnekleri.

	Yapı	Koşullar
Gauss	$\phi_i(r_i) = e^{-(\varepsilon r_i)^2}$	$\varepsilon > 0$
General Multiquadric	$\phi_i(r_i) = (1 + (\varepsilon r_i)^2)^\beta$	$\varepsilon > 0, \beta \in \mathbb{R}$
Multiquadric	$\phi_i(r_i) = \sqrt{1 + (\varepsilon r_i)^2}$	$\varepsilon > 0$
Inverse quadric	$\phi_i(r_i) = \frac{1}{1 + (\varepsilon r_i)^2}$	$\varepsilon > 0$
Inverse multiquadric	$\phi_i(r_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\varepsilon r_i)^2}}$	$\varepsilon > 0$

$$\varphi_{i,j}(r, z) = e^{-\varepsilon^2((r_i - r_m)^2 + (z_j - z_m)^2)} \quad (8)$$

Eş. 8, gauss tipi RBF fonksiyon olarak bilinir. Burada, r_m ve z_m baz fonksiyona ait merkez nokta koordinatlarını, ε ise fonksiyonun genliğini temsil eden şekil parametresidir. Merkez noktalar genellikle problemin geometrisine ve fiziğine bağlı olarak belirlenir. Fonksiyonun hızlı değiştiği sınır bölgelerinde ve malzeme yapısının değiştiği bölgelerde daha sık olarak sisteme eklenir. ε , keyfi bir büyüklük olmakla birlikte birkaç farklı şekilde belirlenebilir. En sık kullanılan yöntem merkez noktaların ortalama mesafesini baz alır. d sistemde bulunan merkez noktaların ortalama mesafesi olmak üzere $\varepsilon = \frac{1}{d}$ olarak seçildiğinde genellikle kararlı sonuçlar verir.

En Küçük Kareler Metodunun Uygulanışı

Eş. 6 tekrar incelenir ise polinom interpolasyonu ve RBF fonksiyon interpolasyonlarının her ikisi için de baz fonksiyonların bilinmesi durumunda problem katsayıların doğru tespit edilmesine indirgenmiş olur. Yaklaşık çözüm fonksiyonunun katsayılarla doğrusal bağlı olması çözümü oldukça basitleştirir. İşlemleri kolaylaştırmak adına Eş. 6 ile verilen fonksiyonu tek sıralı bir dizi olarak ele alalım (Eş. 9).

$$f_n(r, z) = \sum_{i=0}^{n*m} C_i \varphi_i(r, z) \quad (9)$$

f ; örnek noktaları temsil eden fonksiyon, f_n ; yaklaşık çözüm fonksiyonu olmak üzere her iki fonksiyonun r_j, z_j koordinatlarında elde edilen hatası Eş.10 ile verilmiştir. En küçük kareler yöntemini kullanırsak kayıp fonksiyonu Eş. 11 olarak elde edilir.

$$e = f - f_n \quad (10)$$

$$L = \frac{1}{2} e^2 \quad (11)$$

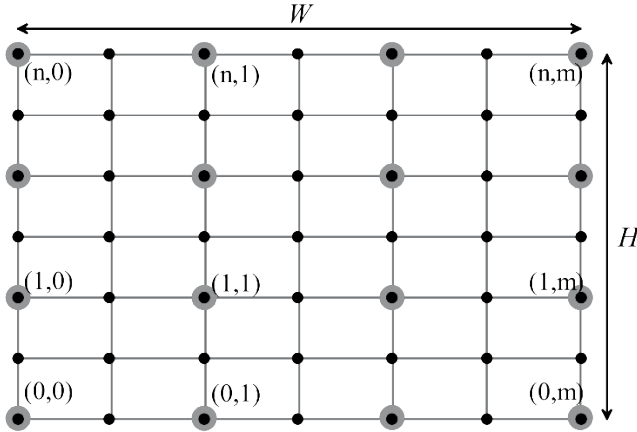
Eş. 9 ile verilen katsayıları kayıp fonksiyonu (loss function) en küçük yapacak şekilde seçmek üzere her bir katsayı için farklı r_j, z_j noktalarında Eş. 12 sağlanmalıdır.

$$\frac{\partial L}{\partial C_j} = \frac{\partial e_j}{\partial C_j} (f - f_n)_j = 0 \quad (12)$$

Ara işlemler yapılır ise problem sadeleşir.

$$f(r_j, z_j) = \sum_{i=0}^{n^*m} C_i \varphi_i(r_j, z_j) \quad (13)$$

Şekil 2’de kontrol alanı üzerinde kontrol noktaları (siyah) ve merkez noktaları (gri) gösterilmiştir. Örnek noktalar, sonlu farklar yöntemi ile elde edilmiş çözüm sonuçlarını temsil etmektedir. Baz fonksiyonun polinom olması durumunda, yalnızca kontrol noktalarında optimum katsayılar elde edilmesi yeterli olur. RBF tabanlı bir baz fonksiyon seçilmesi durumunda geometri üzerinde fonksiyonu oluşturacak merkez noktalar da belirlenir. Her iki durum içinde p nokta sayısı olmak üzere, her bir kontrol noktası için Eş. 13 uygulanır ise Eş 14 ve Eş. 15 ile verilen matris formu elde edilir.



Şekil 2. Çözüm bölgesinde örnek noktalar (siyah) ve merkez noktalar (gri)

$$\begin{pmatrix} \varphi_0(r_0, z_0) & \varphi_1(r_0, z_0) & \dots & \varphi_{nm}(r_0, z_0) \\ \varphi_0(r_1, z_1) & \varphi_1(r_1, z_1) & \dots & \varphi_{nm}(r_1, z_1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \varphi_0(r_p, z_p) & \varphi_1(r_p, z_p) & \dots & \varphi_{nm}(r_p, z_p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_{nm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(r_0, z_0) \\ f(r_1, z_1) \\ \vdots \\ f(r_M, z_M) \end{pmatrix} \quad (14)$$

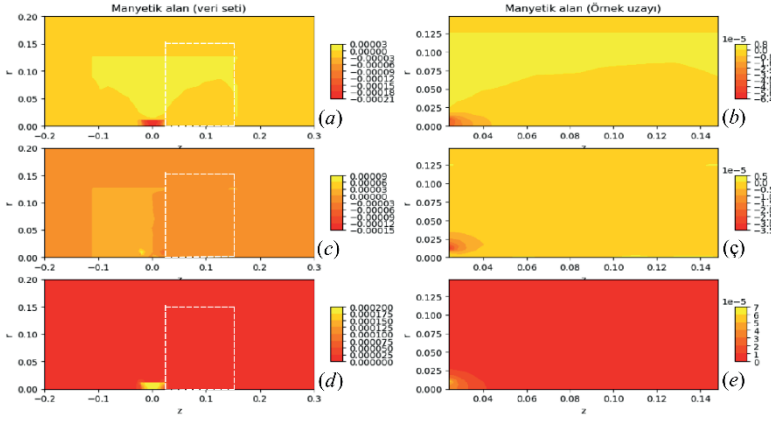
$$[A][C] = [B] \quad (15)$$

Eş. 14 -15 te A ve B matrisleri kontrol noktalarından elde edilen matrisler olup, bilinen lineer cebir yöntemleri ile çözülerek bilinmeyen katsayılar (C) elde edilir.

Bulgular

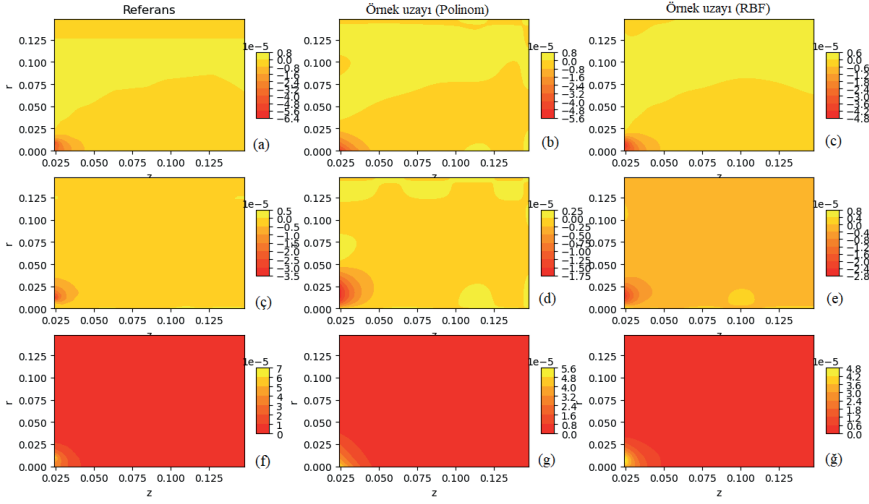
Şekil 1’de tanımlanan aksenal simetrik bobin sargısı için parametreler; çözüm alanı boşluk olup manyetik geçirgenliği ($\mu = \mu_0$) $4\pi 10^{-7}$, sargı bölgesi (A_1) için $\mu = \mu_0$ ve demir çekirdek (A_2) için $\mu = 4000\mu_0$, nüve yarıçapı (r_0) 10mm, sargı çapı (r_1) 50 mm, bobin uzunluğu (L_0) 45mm, sargı akımı (I) 1A ve sargı sayısı (N) 1 dir. Düşük frekanslarda manyetik alan bileşenleri akım ve sargı sayısı ile doğrusal değiştiğinden, farklı akım ve sargı sayılarında elde edilen manyetik alan verileri kolaylıkla ölçeklenebilir. Bu nedenle 1A akım geçen tek sargılı bir bobin için yapılan analizler farklı akım ve sargı sayıları için kullanılabilir. Bobin sargısının oluşturduğu manyetik alan bileşenleri ANSYS Maxwell sonlu elemanlar analizi (SEA) programında hesaplanmış olup, 2 mm aralıklarla örnek noktalar interpolasyon verisi olarak alınmıştır (Şekil 3a,c,d). Manyetik alanın çekirdek üzerinde yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. Her ne kadar bobinin oluşturduğu tüm manyetik alan verisi kullanılabilir olsa da bobin civarında ani geçişlerin olması tüm çözüm bölgesinde interpolasyon yapmayı büyük oranda zorlaştırmaktadır. Böyle durumlarda manyetik alana maruz kalacak çalışma bölgesine ait manyetik alan verileri göz önüne alınarak çalışma bölgesi için oluşabilecek

hatalar düşük tutulur (Şekil 3b,ç,e). İnterpolasyon örnek uzayı Şekil 3'te kesikli çizgiler ile gösterilmiştir.

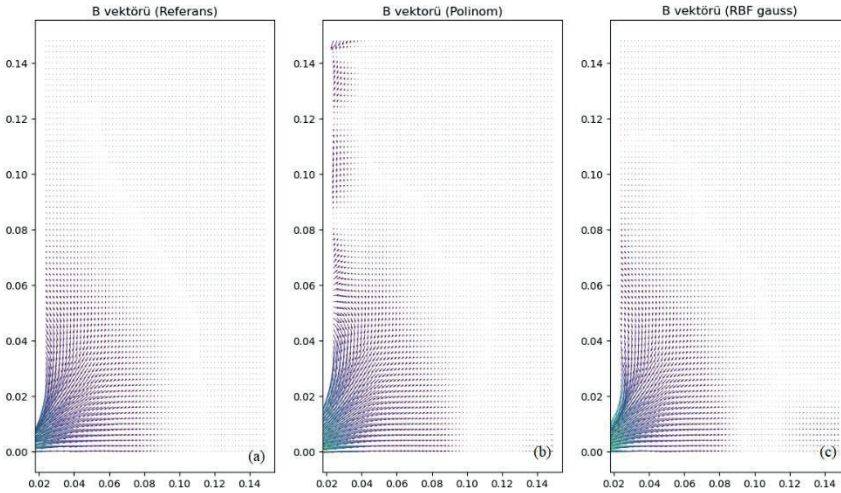


Şekil 3. Tüm çözüm alanında manyetik alan vektörü $\mathbf{B}$ (a,c,d). Çalışma bölgesinde manyetik alan vektörü $\mathbf{B}$ (b,ç,e).

Sonlu elemanlar analizi ile r ve z koordinatlarına bağlı olarak manyetik alan verileri ayrı ayrı elde edilerek her iki eksen için manyetik alan bileşenleri (B_r, B_z) ayrı ayrı polinom ve RBF fonksiyon olarak türetilmiştir. Her iki interpolasyon yöntemi için de 36 katsayı kullanılmıştır. Şekil 4'ile manyetik alan bileşenleri (B_r, B_z) ve manyetik alan büyüklüğü $|\mathbf{B}|$, Şekil 5 ile manyetik alan vektörleri $\mathbf{B}$ referans veriler ile birlikte verilmiştir. Manyetik alan büyüklükleri ve vektör dağılımı incelendiğinde özellikle bobin merkezine yakın bölgelerde ve interpolasyon alanı sınırlarında RBF fonksiyon interpolasyonunun Polinom interpolasyon yöntemine göre referans değerleri daha iyi temsil ettiği açıkça görülür.



Şekil 4. Referans manyetik alan bileşenleri B_r , B_z , $|B|$ (a,ç,f). Polinom interpolasyon sonuçları (b,d,g). Gauss tipi RBF interpolasyon sonuçları (c,e,ğ).



Şekil 5. Referans manyetik alan vektörleri $\mathbf{B}$ (a). Polinom interpolasyon manyetik alan vektörleri $\mathbf{B}$ (b). Gauss tipi RBF interpolasyon manyetik alan vektörleri $\mathbf{B}$ (c).

Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error MAE) (Yücel vd., 2018), Ortalama karesel hata (Mean Square Error MSE) (Yıldız vd., 2024) ve Ortalama karesel hatanın karekökü (Root Mean square error RMSE) (Özçelep vd., 2020) iki serinin benzerliğini kontrol etmekte kullanılan en yaygın parametrelerdir (Yıldız vd., 2020). Burada referans veriler y_n ve hesaplanan veri $\bar{y}_n$ ve D örnek sayısı olmak üzere Denk. 16-18 ile hesaplanır. Farklı polinom interpolasyon ve farklı tipte RBF fonksiyonlar için hata kıyaslaması Tablo 1’de verilmiştir. Eşit sayılarda parametre kullanıldığında homojen olarak dağıtılmış merkez noktalı gauss tipi interpolasyon sonuçları polinom interpolasyon sonuçlarına göre daha iyi sonuç vermiştir.

$$MAE = \frac{1}{D} \sum_{n=1}^D |y_n - \bar{y}_n| \quad (16)$$

$$MSE = \frac{1}{D} \sum_{n=1}^D (y_n - \bar{y}_n)^2 \quad (17)$$

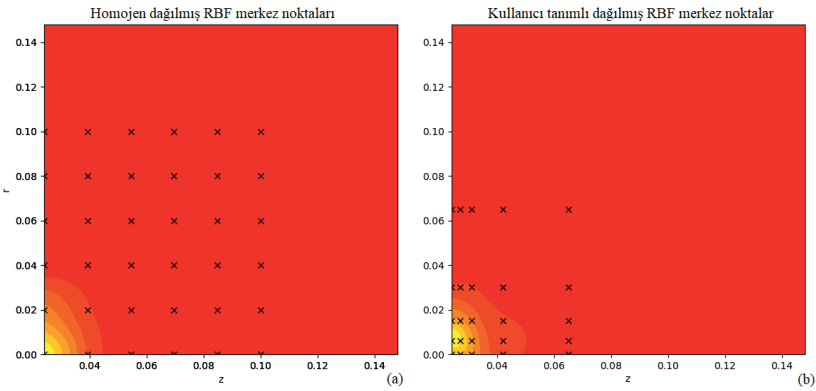
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{n=1}^D (y_n - \bar{y}_n)^2} \quad (18)$$

Tablo 1. Hata tablosu

		Polinom		RBF kullanıcı tanımlı merkez noktalar (25 parametre)			
		İnterpolasyon	Gauss tipi RBF homojen merkez noktalar	gauss	Multi quadric	Inverse quadric	Inverse multiquadric
		(36 parametre)	(36 parametre)				
B_x	MAE	1.75E-07	7.76E-08	8.91E-08	1.30E-07	8.16E-08	1.29E-07
	MSE	6.39E-13	1.37E-13	1.99E-13	3.12E-13	1.30E-13	2.03E-13
	RMSE	8.00E-07	3.70E-07	4.47E-07	5.59E-07	3.60E-07	4.51E-07
B_y	MAE	1.83E-07	7.34E-08	8.24E-08	1.42E-07	7.59E-08	1.09E-07

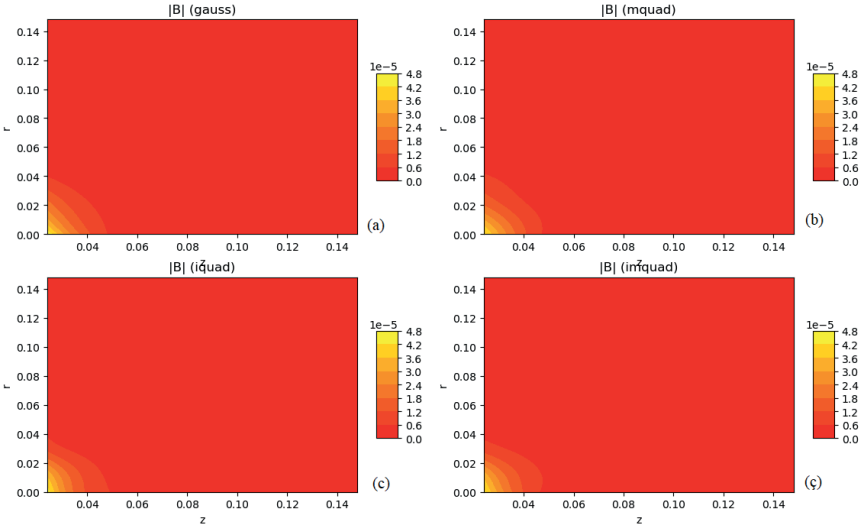
MSE	4.33E-13	1.06E-13	1.08E-13	3.08E-13	9.79E-14	1.29E-13
RMSE	6.58E-07	3.25E-07	3.29E-07	5.55E-07	3.13E-07	3.59E-07

İnterpolasyon için Radyal Baz Fonksiyon kullanıldığında merkez noktalar örnek uzayına keyfi olarak veya eşit aralıklarla homojen olarak dağıtılabileceği gibi (Şekil 6a) kullanıcı tanımlı olarak da tanımlanabilir (Şekil 6b). Bu durum örnek verinin hızlı değiştiği bölgelerde merkez noktaların yoğunlaştırılmasını ve yavaş değiştiği bölgelerde ise daha az nokta ile temsil edilmesine olanak sunar.



Şekil 6. Homojen dağılmış merkez noktalar (a). Kullanıcı tanımlı merkez noktalar (c).

Şekil 7 ile farklı tipte RBF fonksiyon ile 25 parametrelili interpolasyon sonuçları gösterilmiştir. Uygulanan dört fonksiyonun sonuçları oldukça yakındır. Tablo 1 ile verilen hata parametreleri incelendiğinde ters kuadratik (Invers quadratic) fonksiyon sonuçlarının diğer fonksiyon tiplerine göre daha iyi olduğu, daha az nokta kullanılmasına karşın 36 parametrelili homojen merkez noktalı interpolasyona çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 7. Farklı RBF fonksiyonları için manyetik alan büyüklüğü sonuçları.

Tartışma ve Sonuç

Mühendislik problemlerinde karşılaşılan en büyük zorluk çeşitli nedenlerden dolayı doğrusal olmayan olarak karşımıza çıkan fonksiyonları temsil etmektir. Genellikle problemin yapısına göre adi veya kısmi diferansiyel denklemlerin çözümlerine ihtiyaç duyulur. Pek çok durumda problem geometrisi veya diferansiyel denklem sistemi nedeni ile doğrusal olmayan yapılar oluşur. Sonlu elemanlar analizi (SEA) ve Sonlu farklar analizi (SFA) yöntemleri genel olarak problemin çözümünde oldukça etkindir. Ancak genellikle çözüm uzun zaman alır. Gerçek zamanlı kontrol uygulamaları gibi analiz sürecinde geometrinin değiştiği durumlarda tüm çözümün tekrar tekrar yapılması ve kontrolcü için gerekli fiziksel büyüklüğün elde edilmesi zaman kayıplarına sebep olur ve kullanışlı değildir. Bu gibi durumlarda manyetik alan büyüklüğünün bilinen veriler ile modellenerek kontrol girdisi olarak kullanılması sıklıkla karşılaşılan yöntemlerdendir.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar analizi ile elde edilen manyetik alan verilerinin radyal baz fonksiyonlar kullanılarak interpolasyon fonksiyonu elde edilmesi süreci açıklanmıştır. RBF fonksiyonlar kullanılarak elde

edilen interpolasyon fonksiyonlarının polinom interpolasyona göre daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Radyal baz fonksiyon yapıları sadece düzenli veri gruplarının temsil edilmesi için değil, dağınık veri gruplarının interpolasyonu için de kullanılabilen, matematik alt yapısı nedeni ile programlamaya kolayca adapte edilebilen bir yöntemdir. En büyük dezavantajı şekil parametresidir, şekil parametresinin merkez noktaların ortalama mesafesi olarak alınması genellikle iyi sonuçlar verse de daha iyi çözümler için her noktada farklı şekil parametresinin kullanımı ilgi çekici bir çalışma konusudur. En büyük özelliği ise merkez noktaların keyfi dağıtılabilmesi ve geometrik problemlerde çok kullanışlı sonuçlar elde edilebilmesidir.

REFERANSLAR

- Altınkaynak A. (2020). Ağsız Yöntem Uygulamaları için Trigonometri Tabanlı Radyal Özeelliğe Sahip Yeni Bir Temel Fonksiyon. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*. 32(1). 96-110. doi: 10.7240/jeps.581959.
- Clayton P. R. (2010). *Inductance Loop and Partial*, John Wiley and Sons. ISBN: 978-0-470-46188-4. New Jersey A.B.D., Bölüm 3.
- Cui, L., Wu, Z. ve Xiang, H. (2023). Quantum radial basis function method for scattered data interpolation. *Quantum Inf Process*. 22(84). doi:10.1007/s11128-023-03833-5.
- Fasshauer G.E., ve McCourt M.J. (2015). *Kernel-based approximation methods using Matlab*. *Interdisciplinary Mathematical Sciences*. 19. World Scientific Publishing Company.
- Fornberg B., ve Flyer N. (2015). *A Primer on Radial Basis Functions with Applications to the Geosciences*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA. doi:10.1137/1.9781611974041.
- Fornberg B., ve Flyer N. (2015). Solving PDEs with radial basis functions. *Acta Numerica*. 24. 215-258. doi:10.1017/S0962492914000130.
- Griffiths, D. J. (1998). *Introduction to Electrodynamics*, Prentice Hall, New Jersey, 3th ed., ISBN 0-13-805326-X.
- Golbabai A., ve Nikpour A. (2016). Computing a numerical solution of two dimensional non-linear Schrödinger equation on complexly shaped domains by RBF based differential quadrature method. *Journal of Computational Physics*. 322. 586-602. ISSN:0021-9991. doi:10.1016/j.jcp.2016.07.003.
- Jackson, J. D. (1962). *Classical electrodynamics*, John Wiley and Sons, Inc, New York, Chapter 5, LCCCN:62-8774.
- Liu, S.J., ve Wang, C.C.L. (2012). Quasi-interpolation for surface reconstruction from scattered data with radial basis function. *Computer Aided Geom. Des*. 29(7). 435-447.

- Misakian, M. (2000). Equations for the magnetic field produced by one or more rectangular loops of wire in the same plane. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 105(4), 557.
- Özçelep Y., Sevgen S., ve Şamlı R. (2020). A study on the hydrogen consumption calculation of proton exchange membrane fuel cells for linearly increasing loads: Artificial Neural Networks vs Multiple Linear Regression. *Renewable Energy*. 156. 570-578. ISSN: 0960-1481. doi:10.1016/j.renene.2020.04.085.
- Smolik M., ve Skala V. (2021). Radial basis function and multi-level 2D vector field approximation. *Mathematics and Computers in Simulation*. 181. 522-538. ISSN: 0378-4754. doi:10.1016/j.matcom.2020.10.009.
- Tanbay T. (2024). Parallel Meshless Radial Basis Function Collocation Method for Neutron Diffusion Problems. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Bursa Uludağ Üniversitesi*. 29(1). 173–190. doi: 10.17482/uumfd.1325198z.
- Tao M., Heng L., ve Yu Z. (2020). A Method for Establishing Tropospheric Atmospheric Refractivity Profile Model Based on Multiquadric RBF and k-means Clustering. *Engineering Letters*. 28(3).
- Xu-Guang H., Tak-San H., Rabitz H., ve Askar A. (2022). Multivariate radial basis interpolation for solving quantum fluid dynamical equations. *Computers and Mathematics with Applications*. 43(3). 525-537. ISSN: 0898-1221. doi:10.1016/S0898-1221(01)00303-0.
- Yıldız, E. Yüksel, M. E., ve Sevgen, S. (2024). Investigating the effect of loss functions on single-image GAN performance. *Journal of Innovative Science and Engineering (JISE)*. 8(2). 213-225.
- Yildiz, H., Korkmaz Can, N., Ozguney, O. C., ve Yagiz, N. (2020). Sliding mode control of a line following robot, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 42(11). 561. doi:10.1007/s40430-020-02645-3.
- Yu, Q. I. N., ve Sebo, S. A. (1996). Simplified magnetic field modeling and calculation of large air-core reactor coils. *IEEE Transactions on magnetics*. 32(5). 4281-4283.
- Yücel M., Öncü-Davas S., Nigdeli S., Bekdas G., ve Sevgen S. (2018). Estimating of analysis results for structures with linear base isolation systems using artificial neural network model. 3. 50-56.

Zeng Y., ve Zhu Y. (2022). Implicit surface reconstruction based on a new interpolation/approximation radial basis function. Computer Aided Geometric Design. 92. ISSN:0167-8396. doi: 10.1016/j.cagd.2021.102062.

BÖLÜM 10

BIYODİZEL ÜRETİMİNDE HETEROJEN YEŞİL KATALİZÖR OLARAK YENİLENEBİLİR BİR KAYNAK OLAN DENİZ KABUĞU KULLANIMI

Mehmet Ali Biberçi¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali BİBERCİ; Çankırı Karatekin Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Makine Mühendisliği Bölümü, Enerji A.B.D. m.alibiberçi@karatekin.edu.tr, ORCID:0000-0002-0328-9538.

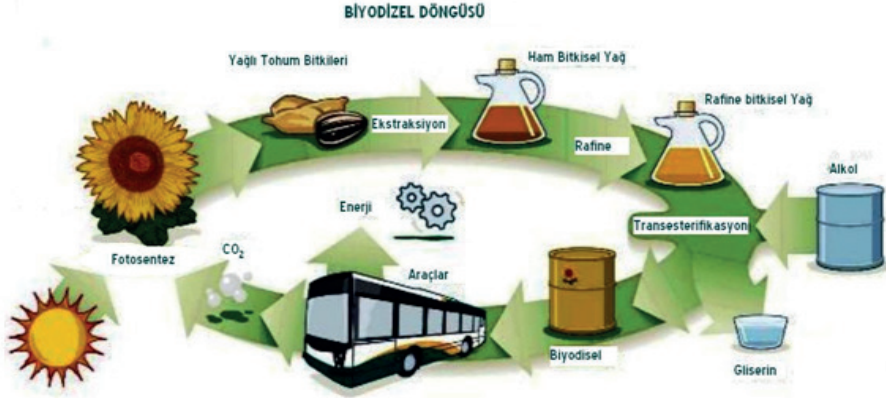
Küresel ısınma, dünya genelinde iklim değişikliğine yol açan ve çevresel sorunları artıran önemli bir sorundur. Fosil yakıtların aşırı kullanımı, sera gazı emisyonlarının artmasına ve dolayısıyla küresel ısınmanın hızlanması-na neden olmaktadır. Bu bağlamda, biyodizel, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak, fosil yakıtların yerini alabilecek alternatif bir enerji kaynağı olarak görülmektedir.

Biyodizel, bitkisel yağlar veya hayvansal yağlardaki trigliseritlerin transesterifikasyonu yoluyla üretilen yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir bir yakıttır. Biyodizel üretimi ile ilgili geleneksel süreç, genellikle sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit gibi homojen katalizörler kullanılmasıyla gerçekleşmektedir. Bu katalizörlerin kullanımı biyodizel üretiminde etkili olmasına rağmen, ürünlerin ayrıştırılması ve katalizörün geri kazanılması açısından bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir (Jaiyen et al. (2015)). Buna karşın, kalsiyum oksit (CaO) deniz kabuklarından elde edilen bir katalizör olarak, toksik olmayan doğası, çevre dostu özellikleri ve maliyet etkinliği gibi avantajları nedeniyle öne çıkmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, deniz kabuğu kaynaklı CaO katalizörlerinin biyodizel üretimindeki sentezini, özelliklerini ve uygulamalarını keşfederek, son gelişmelerin ve optimizasyon stratejilerinin vurgulanmaktadır.

1. Biyodizel

Biyodizel, yenilenebilir bir biyoyakıttır ve çeşitli hammadde kaynaklarından üretilmektedir. Biyodizel üretimi, genellikle transesterifikasyon adı verilen bir kimyasal süreçle gerçekleştirilir. Bu süreçte, trigliseritler alkol ile reaksiyona girerek yağ asidi metil esterleri (FAME) ve gliserol üretir (Şekil 1). Biyodizel üretiminde kullanılan hammadde türleri genellikle üç ana nesle ayrılmaktadır: birinci nesil, ikinci nesil ve üçüncü nesil hammadde kaynakları (Tablo 1). Birinci nesil biyodizel hammadde kaynakları, genellikle yenilebilir yağlar olan soya, kanola ve palm yağı gibi bitkisel yağlardır. Bu kaynaklar yüksek yağ içeriği ve bulunabilirlikleri nedeniyle tercih edilmektedir; ancak, bu yağların kullanımı gıda güvenliği ve gıda üretimi ile rekabet konularında endişelere yol açmaktadır (Fasanya et al., 2021). Bu nedenle, araştırmacılar, alternatif hammadde kaynakları olarak yenilebilir olmayan yağları ve atık malzemeleri keşfetmeye yönelik çalışmalara yoğunlaşmışlardır.



Şekil 1. Biyodizel Döngüsü (www.google.com.tr)

İkinci nesil biyodizel hammadde kaynakları, yenilebilir olmayan yağlar ve atık malzemeleri içermektedir. Bu kategori, *Jatropha curcas* gibi bitkilerden elde edilen yağları ve atık yemek yağlarını kapsamaktadır. Yenilebilir olmayan yağların kullanımı, gıda ile yakıt arasındaki ikilem sorununu azaltmaya yardımcı olur, çünkü bu hammadde kaynakları gıda kaynakları ile rekabet etmez (Widiarti et al., 2017). Özellikle, atık yemek yağları, düşük maliyetleri ve bulunabilirlikleri nedeniyle biyodizel üretiminde popülerlik kazanmıştır (Niju et al., 2019). Bu hammadde kaynaklarının biyodizel üretimine dönüştürülmesi, alternatif bir enerji kaynağı sağlamanın yanı sıra, atık yönetimi sorunlarını da ele almaktadır (Widiarti et al., 2017).

Üçüncü nesil biyodizel hammadde kaynakları, mikroalgler ve diğer mikroorganizmalar üzerine odaklanmaktadır. Mikroalgler, yüksek lipid içeriği ve hızlı büyüme oranları nedeniyle biyodizel üretimi için umut verici kaynaklar olarak ortaya çıkmıştır. Mikroalgler, önemli miktarda nötr lipid biriktirebilir ve bu lipidler, transesterifikasyon yoluyla biyodizel üretiminde kullanılabilir (Pongraktham, 2024). Mikroalglerin, tarıma uygun olmayan arazilerde yetiştirilebilmesi ve çeşitli atık substratları kullanabilmesi, sürdürülebilirliklerini artırmaktadır (Reddy et al., 2017). Mikroalglerin yetiştirilmesi ve hasat süreçlerinin optimize edilmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir; bu, verimliliği artırmayı ve üretim maliyetlerini düşürmeyi amaçlamaktadır (Reddy et al., 2015).

Hammadde seçimi, biyodizel üretiminin ekonomik yönlerini de etkiler; hammadde maliyetleri toplam üretim maliyetinin %70'ine kadar çıkabilir (Surayaputra et al., 2013). Bu nedenle, düşük maliyetli hammadde kaynaklarının, atık yağlar ve yenilebilir olmayan bitkiler gibi, biyodizelin fosil yakıtlarla rekabetçi bir alternatif olabilmesi için kullanılması esastır. Ayrıca, biyodizel üretimi sırasında oluşan yan ürünlerin, örneğin gliserolün, değerli ürünlere dönüştürülmesi, sürecin genel kârlılığını artırabilir (Ling et al., 2019). Gliserol, yaygın

bir yan ürün olup, değerli ürünlere dönüştürülebilir; bu da atıkları azaltır ve biyodizel üretiminin sürdürülebilirliğini artırır (Mohiddin et al., 2020).

Tablo 1. Biyodizel sentezi için farklı hammaddeler (Babadi ve ark. 2022).

Birinci Nesil Hammaddeler	İkinci Nesil Hammaddeler	Üçüncü Nesil Hammaddeler
Soya fasulyesi	<i>Jatropha curcas Linnaeus</i>	Ototrofik mikroalgler
Hurma yağı	<i>Pongamia pinnata</i>	Heterotrofik mikroalgler
Kolza tohumu	Deniz mangosu	Belediye kanalizasyon çamuru
Kanola	Don yağı	Mayalar
Ayçiçeği	Kümes hayvanları	Mantarlar
Pamuk tohumu	Nil tilapyası	Bakteriler
Fıstık	Hint yağı	
Mısır	Kauçuk tohumu	
Zeytin	Atık Yemeklik Yağ (AYE)	
Hindistan cevizi yağı	Erimiş yağ	
Kabak	Domuz yağı	
Keten tohumu		
Yer fıstığı		
Susam		

2. Deniz Kabuklarının Katalizör Kaynağı Olarak Kullanımı

Biyodizel, esas olarak bitkisel yağlar veya hayvansal yağlardaki trigliseritlerin transesterifikasyonu yoluyla üretilen yenilenebilir bir yakıttır. Transesterifikasyon süreci, trigliseritlerin alkol, genellikle metanol ile, bir katalizör varlığında reaksiyona girmesiyle gerçekleşir ve bu işlem sonucunda yağ asidi metil esterleri (FAME) ve gliserol üretilir. Geleneksel biyodizel üretim yöntemleri genellikle sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit gibi homojen katalizörler kullanır; bu katalizörler etkili olsalar da ürünlerin ayrıştırılması ve katalizörün geri kazanılması ile ilgili zorluklar sunmaktadır (Sagiroglu et al. (2011)). Buna karşın, doğal atık malzemelerden, özellikle deniz kabuklarından elde edilen heterojen katalizörler, bu sorunları hafifleten sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır (Rostami-Vartooni, 2017). Deniz kabukları esas olarak kalsiyum karbonat (CaCO_3) içermektedir ve bu, kalsinasyon süreciyle CaO 'ya dönüştürülebilir. Bu dönüşüm genellikle 700°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşir ve bu, yalnızca etkili değil, aynı zamanda çevresel olarak sürdürülebilir bir katalizör sağlar (Mukherjee et al., 2019). Deniz kabuklarındaki yüksek kalsiyum içeriği, genellikle %95 civarında, onları katalizör üretimi için ideal bir hammadde haline getirir (Szabolcs et al., 2013). Deniz kabuklarının katalizör olarak kullanımı, yalnızca atık yönetimi sorununu ele almakla kalmaz, aynı zamanda biyodizel üretimi için maliyet etkin bir çözüm

sunar (Kobayashi et al., 2016).

CaO'nun deniz kabuklarından sentezi, toplama, yıkama, kurutma ve kalsinasyon gibi birkaç adımı içerir. Elde edilen CaO, X-ışını difraksiyonu (XRD) ve Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) gibi çeşitli tekniklerle karakterize edilebilir (Vu et al., 2018). Çalışmalar, katalizörün yüzey alanı ve parçacık boyutunun, katalitik aktiviteyi önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir; daha küçük parçacıklar genellikle transesterifikasyon reaksiyon hızını artırmaktadır (Jaiyen et al., 2015). Örneğin, Jindapon ve arkadaşları, deniz kabuğundan elde edilen Ca, Zn ve Al karışımlarının palm yağının metanol ile transesterifikasyonunda yüksek katalitik aktivite gösterdiğini ortaya koymuştur (Jindapon et al., 2016).

Deniz kabuğu kaynaklı CaO katalizörleri, biyodizel üretiminde etkileyici katalitik aktivite göstermiştir. Örneğin, Suryaputra ve arkadaşları, atık yemek yağının transesterifikasyonunda Capiz (*Amusium cristatum*) kabuklarını kullanarak %96 biyodizel verimi elde etmiştir (Suryaputra et al., 2013). Benzer şekilde, Reddy ve arkadaşları, *Jatropha* yağından elde edilen CaO kullanarak %90 biyodizel dönüşüm oranı elde etmiştir (Reddy et al., 2015). Bu katalizörlerin etkinliği, yüksek bazlıkları ve metanolde düşük çözünürlükleri ile ilişkilidir; bu özellikler, transesterifikasyon sürecini kolaylaştırmak için kritik öneme sahiptir (Mazaheri et al., 2021).

Reaksiyon koşullarının optimize edilmesi, biyodizel verimini maksimize etmek için esastır. Metanol-yag mol oranı, katalizör yüklemesi ve reaksiyon süresi gibi faktörler, transesterifikasyon sürecinin verimliliğinde önemli rol oynamaktadır. Örneğin, Jaiyen ve arkadaşları, 12:1 metanol-yag oranı ve %10 katalizör yüklemesi ile %97 biyodizel verimi elde etmiştir (Jaiyen et al., 2015). Ayrıca, deniz kabuğu kaynaklı katalizörlerin yeniden kullanılabilirliği vurgulanmış, bu katalizörlerin birden fazla reaksiyon döngüsü boyunca aktivitelerini korudukları gösterilmiştir; bu durum, ekonomik geçerliliklerini daha da artırmaktadır (Mittal, 2024).

Deniz kabuklarının katalizör olarak kullanılması, yalnızca atık yönetimine katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda biyodizel üretim maliyetlerini de azaltır. Deniz kabuğu kaynaklı CaO'nun düşük maliyetli doğası, yüksek katalitik verimlilik ile birleştiğinde, biyodizel endüstrisinde tercih edilen bir seçenek haline gelmektedir (Cerón-Ferrusca et al., 2023). Ayrıca, atık malzemelerin kullanımıyla elde edilen çevresel faydalar, küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu olup, deniz kabuğu kaynaklı katalizörleri yenilenebilir enerji üretiminde değerli bir varlık haline getirmektedir.

Ümit verici sonuçlara rağmen, deniz kabuğu kaynaklı katalizörlerin kullanımıyla ilgili bazı zorluklar bulunmaktadır. Deniz kabuklarının bileşimindeki değişkenlik, katalitik performansta tutarsızlıklara yol açabilir. Ayrıca, bu katalizörlerin stabilitesini ve yeniden kullanılabilirliğini artırmak için daha

fazla araştırma gerekmektedir (Zhang et al., 2013). Gelecek çalışmalar, serbest yağ asitlerinin esterifikasyonu ve trigliseritlerin transesterifikasyonunu aynı anda gerçekleştirebilen bifonksiyonel katalizörlerin geliştirilmesine odaklanmalıdır; bu, biyodizel üretimi için uygun hammadde yelpazesini genişletecektir (Kedir, 2024).

Sonuç olarak, deniz kabuğu kaynaklı kalsiyum oksit katalizörleri, biyodizel üretimi için umut verici bir yol sunmakta, verimlilik, sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği sağlamaktadır. Bu katalizörlerin sentezinin ve uygulamalarının optimize edilmesine yönelik devam eden araştırmalar, biyodizel teknolojinin ilerlemesi ve çevresel olarak sorumlu bir şekilde artan enerji taleplerinin karşılanması için esastır.

Teşekkür

Bu çalışma, Çankırı Karatekin Üniversitesi Bireysel Araştırma Projeleri türündeki MF240223B09 numaralı “Doğal grafit tozundan elde edilen grafen oksit ile kalsine edilmiş deniz kabuğundan oluşturulan katalizörün etkisi altında atık yemek yağından üretilen biyodizelin kazanım miktarının incelenmesi” İsimli projenin çıktısı olarak üretilmiştir. Desteklerinden dolayı, Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ediyorum.

KAYNAKLAR

- Babadi, A. A., Rahmati, S., Fakhlaei, R., Barati, B., Wang, S., Doherty, W., & Ostrikov, K. K. (2022). Emerging technologies for biodiesel production: processes, challenges, and opportunities. *Biomass and Bioenergy*, 163, 106521.
- Buasri et al. "Calcium Oxide Derived from Waste Shells of Mussel, Cockle, and Scallop as the Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production" *The scientific world journal* (2013) doi:10.1155/2013/460923
- Dampang et al. "Analysis of Optimum Temperature and Calcination Time in the Production of CaO Using Seashells Waste as CaCO₃ Source" *Journal of ecological engineering* (2021) doi:10.12911/22998993/135316
- Fasanya et al. "Effect of Hydrothermal Treatment on the Properties of Calcium Oxide from Eggshells Used as a Biodiesel Catalyst" *Chemical engineering & technology* (2021) doi:10.1002/ceat.202100377
- Harreh et al. "Production of Karanja Methyl Ester from Crude Karanja Oil Using Meritrix Lyrata Synthesised Active CaO Catalyst" *International journal of automotive and mechanical engineering* (2018) doi:10.15282/ijame.15.3.2018.21.0436
- Jaiyen et al. "Comparative study of natural dolomitic rock and waste mixed seashells as heterogeneous catalysts for the methanolysis of palm oil to biodiesel" *Renewable energy* (2015) doi:10.1016/j.renene.2014.08.050
- Jibrina et al. "Characterization and Physicochemical Properties of Biodiesel Produced from Castor Oil Using Refluxed Calcined Snail Shell" *Journal of energy and environmental sustainability* (2018) doi:10.47469/jees.2018.v06.100060
- Mohammed et al. "Heterogeneously catalyzed transesterification reaction using waste snail shell for biodiesel production" *Heliyon* (2023) doi:10.1016/j.heliyon.2023.e17094
- Niju et al. "Process optimization of Calophyllum inophyllum-waste cooking oil mixture for biodiesel production using Donax deltooides shells as heterogeneous catalyst" *Sustainable environment research* (2019) doi:10.1186/s42834-019-0015-6
- Reddy et al. "Active Razor Shell CaO Catalyst Synthesis for Jatropha Methyl Ester Production via Optimized Two-Step Transesterification" *Journal of chemistry* (2017) doi:10.1155/2017/1489218
- Reddy et al. "Biodiesel Production from Crude Jatropha Oil using a Highly Active Heterogeneous Nanocatalyst by Optimizing Transesterification Reaction Parameters" *Energy & fuels* (2015) doi:10.1021/acs.energyfuels.5b01899
- Widiarti et al. "Catalytic Activity of Calcium Oxide From Fishbone Waste in Waste Cooking Oil Transesterification Process" *Jurnal bahan alam terbarukan*

(2017) doi:10.15294/jbat.v6i2.8335

Yuliana et al. "Utilization of waste capiz shell – Based catalyst for the conversion of leather tanning waste into biodiesel" Journal of environmental chemical engineering (2020) doi:10.1016/j.jece.2020.104012

BÖLÜM 11

ALÜMİNYUM TEMELLİ İŞLEMELERDE TALAŞ AÇISI VE KESME HIZININ YİĞİNTİ TALAŞ VE YİĞİNTİ KATMANI OLUŞTURMASI ÜZERİNE ETKİLERİ

*Ulaş İPEKOĞLU¹,
Can COŞKUN,
Zuhal OKTAY*

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, ulas.ipekoglu@gmail.com, 2217104006@std.idu.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0003-3738-4722>

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, dr.can.coskun@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, zuhal.oktay@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>

1. GENEL BİLGİLER

1. Yapısal Alüminyum Alaşımları

Yapısal alaşımlar, yüksek mekanik özellikler sunduğu için çoğunlukla mühendislik uygulamaları için tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımlar çeşitli işlem teknikleriyle şekillendirilebilmektedir. Bu işlem tekniklerinin başında da ısıtılma işlem teknikleri gelmektedir. Yapısal alüminyum alaşımlarının başlıca türlerinin aşağıdaki biçimde sunulması mümkündür.

1.1. Seri 1xxx (Saf alüminyum): Saf alüminyum alaşımları olarak nitelendirilmektedir. Çoğunlukla %99.00 veya üzeri alüminyum içermektedirler. Bu seri oldukça iyi korozyon direnci ve işlenebilirlik sunmaktadır. Ancak bunun yanında mekanik özellikleri daha düşük seviyededir. Bu seri genellikle elektrik ve yapı malzemeleri sektöründe tercih edilmektedir.

1.2. Seri 2xxx (Bakır içeren alüminyum alaşımları): Bu seri özellikle yüksek dayanıklılık ve sertlik gerektiren havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Yapısında bulunan bakır, bu seriye yüksek mukavemet ve aşınma direnci kazandırmaktadır. Ancak bu seri de korozyon direnci saf alüminyuma göre daha düşük seviyededir.

1.3. Seri 3xxx (Magnezyum ve Manganez içeren alüminyum alaşımları): Bu seri iyi bir korozyon direnci, işlenebilirlik ve orta düzeyde mukavemet özellikleri sunmaktadır. Genellikle ısınmaya duyarlı uygulamalarda, özellikle ev aletleri ve beyaz eşya sektöründe, tercih edilmektedir.

1.4. Seri 5xxx (Magnezyum içeren alüminyum alaşımları): Bu seride alaşım içinde yer alan magnezyum, yüksek korozyon direnci ve iyi işlenebilirlik sağlamaktadır. Denizcilik, deniz taşımacılığı ve dış mekan uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.5. Seri 7xxx (Çinko içeren alüminyum alaşımları): Bu seri yüksek mukavemet özellikleri nedeniyle özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde tercih edilmektedir. Yüksek dayanıklılığa sahip olsalar da korozyon dirençleri bakır içeren alaşımlara göre daha düşük seviyededir.

1.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımları çoğunlukla döküm yöntemiyle şekillendirilmektedir. Döküm alüminyum alaşımları ağırlıklı olarak otomotiv parçaları ve makine imalatı gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Alüminyum döküm alaşımları aşağıdaki biçimde sunulabilmektedir.

1.2.1. Seri 2xx (Silisyum ve bakır içeren alüminyum alaşımları): Bu seri döküm işlemi için oldukça uygundur ve genellikle otomotiv motor parçaları gibi yüksek dayanıklılık ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır.

1.2.2. Seri 3xx (Silisyum içeren alüminyum alaşımları): Bu seri döküm

işlemleri için en çok tercih edilen alüminyum alaşımdır. Yüksek sıvı akışkanlığı ve düşük genleşme katsayısı sunar. Bu nedenle otomotiv ve diğer döküm endüstrilerinde ideal bir alüminyum alaşımı olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.2.3. Seri 7xx (Çinko içeren alüminyum alaşımları): Bu seri özellikle yüksek dayanıklılık gerektiren döküm parçalarında kullanımıyla bilinmektedir.

Alüminyum alaşımlarının kullanım alanları incelendiğinde geniş bir uygulama yelpazesinde sahip olduğu görülmektedir. Başlıca kullanım alanları aşağıdaki biçimde kısaca sunulabilir.

Otomotiv Sektörü: Alüminyum alaşımları; otomobillerde ağırlık azaltma, yakıt verimliliğini artırma ve dayanıklılığın artırılması amacıyla kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe özellikle motor parçaları, şasi, jantlar ve kaportalar alüminyum alaşımlarından üretilmektedir.

Havacılık ve Uzay Endüstrisi: Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle havacılıkta uçak gövdeleri, motorlar ve diğer bileşenlerde alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe kullanılan alaşımlar genellikle 2xxx ve 7xxx serileridir.

İnşaat ve Yapı Sektörü: Alüminyum; bina cepheleri, kapılar, pencereler ve çatı sistemleri gibi inşaat uygulamalarında çoklukla tercih edilmektedir. Korozyon direnci ve hafiflik alüminyum alaşımlarının bu alanda popüler olmasını sağlamaktadır.

Ambalaj Sektörü: Alüminyum alaşımları özellikle içecek kutuları, folyo ve diğer ambalaj malzemelerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlar yiyecek ve içecekleri uzun süre taze tutabilme özelliğine sahiptir.

Elektronik ve Elektrik Endüstrisi: Alüminyum, elektrik iletkenliği nedeniyle kablo ve elektrikli bileşenlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca alüminyumun iyi işlenebilirliği sayesinde elektronik cihazların gövdelerinde de kullanılmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Sekmen ve arkadaşları (Sekmen, M. ve arkadaşları, 2015) yaptıkları çalışmada takım talaş açısı ve kesme hızı parametrelerinin AA 2011 ve AA 7075 alüminyum alaşımlarının işlenmesi noktasında yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini analiz etmişlerdir. Takım talaş açısı ve kesme hızı seçimlerinin yığıntı katmanı ve yığıntı talaş arasındaki etkileşimleri değerlendirilmişlerdir. Testler sırasında kesici takıma hem negatif hem de pozitif açılar verilmiş ve talaş kaldırması sağlanmıştır. İncelenen iki alaşım için 15 ile 20 arasındaki talaş açısının büyük olduğu değerlerinde yüzey pürüzlülük değerleri düşük çıkmıştır. Bunun tam tersine 0 ve -5 gibi talaş açısının düşük olduğu değerlerde özellikle

AA 7075 alaşımında yüzey pürüzlülük değerleri büyük çıkmıştır. SEM ve EDS analizi gibi metalografik yöntemler kullanılarak kaplamasız karbür takım kullanımının talaş açısının ve alaşım içeriğinin yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşumu noktasındaki etkisi incelenmiştir. AA 2011 alaşımının, AA 7075 alaşımına göre daha az yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşturduğu gözlemlenmiştir. Talaş yüzeylerinde EDS analizleri yapılarak ana alüminyum alaşım elementlerinin yapışma aşınma mekanizmaları üzerinde tesiri analiz edilmiştir. Bu nedenle AA 2011 ve AA 7075 alüminyum alaşımlarının 10'a çıkartılıp bunun üzerine yaşlandırma ısı işlemi uygulamışlardır. Isıl işlem sonrası ikincil faz parçacıklarının malzemenin sürekliliğini düşürerek talaş yapışmasını minimize edilebileceğini öngörmüşlerdir. Gökkaya ve Nalbant (Gökkaya ve Nalbant, 2006) yapmış oldukları çalışmada yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşumu noktasında kesme hızının etkisini incelemişlerdir. AA 5052 alaşımı bilgisayarlı sayısal denetimli torna tezgâhında ıslak olmayacak biçimde işlenmiştir. Bu işlem için kaplamasız karbür takım kullanılmıştır. İnceleme sırasında 100, 200, 300, 400, 500 m/dakika olacak biçimde 5 farklı kesme hızı kullanılmıştır. Parçanın işlenmesi sırasında 0.30 mm/devir sabit ilerleme hızı ve 1.5 mm sabit kesme derinliği seçilmiştir. Parçanın işlenmesi sonrasında ulaşılan en yüksek yığıntı katmanı ve yığıntı talaş miktarı 100 mm/dakika kesme hızı ve 0.30 mm/devir ilerleme hızında oluşmuştur. Kesme hızının yükseltilmesi yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşumunun azaltması noktasında pozitif etki sağlamıştır. AA 5052 alaşımın işlenmesi sırasında eğer kaplaması karbür kesici takım seçilirse yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşmasını azaltmak ve/veya ortadan kaldırmak için 500 mm/dakikadan daha yukarı kesme hızlarının tercih edilmesinin daha doğru olacağı ifade edilmektedir. Gökkaya ve Taşkesen (Gökkaya, ve Taşkesen, 2008) yapmış oldukları çalışmada farklı kesme ve besleme hızı koşulları altında alüminyum alaşımlarının takım aşınma seviyesi, yığıntı talaş oluşumu ve işleme verimliliği incelenmiştir. Çalışmada, farklı kesme hızları ve besleme hızlarının işleme yüzey kalitesi üzerine etkisi de irdelenmiştir. Yüksek kesme hızları genel perspektifte daha düşük yığıntı talaş oluşumuna yol açmıştır. Yüksek hızlar, kesici takımı üzerindeki ısının artmasına ve malzemenin daha düzgün bir şekilde kesilmesine neden olduğu görülmüştür. Çalışmada düşük kesme hızlarının yığıntı talaş oluşumunu ve takımın aşınma hızını artırdığını tespit etmişlerdir. Bu durum iş parçasının yüzey kalitesini de olumsuz etkiler ortaya çıkarabilmektedir. Artan besleme hızları takımın daha hızlı aşınmasına ve daha fazla yığıntı talaş oluşumuna neden olabilmektedir. Benzer şekilde düşük besleme hızlarında da yığıntı talaş oluşumu gözlemlenmektedir. Gerçek kullanım koşullarında ideal besleme hızı takım ömrünü uzatmak ve yüzey kalitesini arttırmak için dikkatlice seçilmelidir. Hem yüksek kesme hızı hem de uygun besleme hızı takım aşınmasını en aza indirirken yüzeyde daha iyi bir işleme kalitesi sunmaktadır. Düşük kesme hızları ve yüksek besleme hızları kombinasyonu aşınmayı arttırarak takımın erken yorulmasına yol açmaktadır. Yüksek kesme hızları genellikle daha düşük yığıntı talaş oluşumu ve

daha az aşınma ile ilişkilidir. Besleme hızının da dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Yüksek kesme hızları ve uygun beslenme hızları takım ömrünü arttırmak ve işleme verimliliğini yükseltmek için idealdir. Yığıntı talaş oluşumunu en aza indirmek için optimum kesme hızı ve besleme hızı kombinasyonunun belirlenmesi oldukça önemlidir. Fang ve arkadaşları (Fang ve arkadaşları, 2010) yapmış oldukları çalışmada 2024-T351 alüminyum alaşımının dikey işlenmesinde farklı kesme koşulları altında yığıntı talaş oluşumunu içeren kesme titreşimleri hem zaman hem de frekans temelinde analiz edilmişlerdir. Çalışma kapsamında ulaşılan deneysel veriler, kesme titreşimlerinin farklı desenlere sahip üç farklı yığıntı talaş bölgesine ayrıldığını göstermiştir. Bu üç bölgeden ilki yığıntı talaş bölgesidir. Bu bölgede yığın talaşın oluşmaya başlamakta ve titreşim genliğinin kesme hızının 0.8 ile 4 m/dak arasında değişmesiyle önemli ölçüde değiştiği kısımdır. İkinci bölge durağan yığıntı talaş bölgesi olup; yığıntı talaş oluşum sürecinin düzenli ve sürekli bir şekilde gerçekleştiği ve titreşim genliğinin 4 ile 20 m/dak arasında değiştiği bölgedir. Üçüncü bölge düzensiz yığıntı talaş bölgesidir. Bu bölgede titreşim genliğinin kesme hızı 20 ile 100 m/dk arasında değişmektedir. ANOVA analizinin sonuçları titreşim genliğinin kesme hızı ve besleme hızı değerinden etkilendiğini göstermiştir. Yapılan çalışmada kesme hızının oluşan toplam titreşim değerinin %53'üne, besleme hızı ise toplam titreşimin %33,3'üne sebep olduğu tespit yapılmıştır. Çalışmada durağan ve düzensiz yığıntı talaş oluşumlarını ayırt etmek için bir istatistiksel araç olarak kurtosis (çarpıklık) kullanmanın mümkün olduğu ifade edilmiştir. Bu noktada örnek bir gösterimde çalışmada sunulmuştur. Kesme hızı arttıkça kurtosis değeri azalmakta ve 20m/dk değerinden sonra neredeyse sabit kalmaktadır. Besleme hızı 0,04 mm/dev üzerine çıktıkça kurtosis değerleri oldukça düşük bir değer olan ikinin altına düşmekte ve bu noktada neredeyse sabit kalmaktadır. Bilindiği üzere spektral analiz kullanılarak yapılan frekans analizi çeşitli frekans bileşenleri hakkında daha fazla bilgi edinmemize yardımcı olmaktadır. Sabit bir kesme hızı temelinde farklı besleme hızları için kesme enerjisi düşük olarak nitelendirebileceğimiz 0-3,5 kHz seviyesinde yoğunlaşmaktadır. Sabit beslenme hızı temelinde kesme hızı arttıkça kesme enerjisi yüksek olarak nitelendirebileceğimiz 3,5 kHz üzeri çıkmaktadır. Bican ve Pul (Bican ve Pul, 2021) yapmış oldukları çalışmada piyasada çoğunlukla tercih edilen Al7075, Al6061 ve Al2024 alüminyum alaşımları için tormalanmasında kesici takım aşınma davranışını, talaş şeklini ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Yapmış oldukları tüm deney sonuçlarında neredeyse tüm kesici takımlarda yığıntı talaş oluşumu meydana geldiği görülmüştür. Yığıntı talaş miktarları olarak bakıldığında üç alüminyum alaşım incelendiğinde en yüksek yığıntı talaş oluşumu Al2024'de, en düşük yığıntı talaş oluşumu Al7075'de meydana gelmiştir. Çalışmada kesme hızının artması ile yığıntı talaş miktarlarında azalma görülmüştür. Kesici takımlarda düşük oranda da olsa yan yüzey aşınması tespit edilmiştir. Deneylerde, kısa helisel, uzun helisel, dolaşık ve kavisli bitişik olmak üzere 4 farklı talaş tipi olduğu gözlem-

lenmiştir. Al2024 alüminyum alaşımından yüzey pürüzlülüğü kesme hızı parametresinin artmasıyla azalırken Al6061 alımında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı görülmüştür. Kullanılan kesme parametrelerine göre parçaların işlenebilirliği noktasında Al7075 alüminyum alaşımın diğerlerine göre daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Yağmur ve arkadaşları (Yağmur ve arkadaşları, 2021) alüminyum alaşımlarının işlenmesinde sürekli talaş oluşumunun engellenmesi hedefi doğrultusunda çalışmalar yürütmüşlerdir. Talaş kırıcı formun etkisini görmek üzere çok kristalli elmas takımlar kullanılarak AA 6062 T4 alüminyum alaşımların işlenmesi noktasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri incelenmiştir. İşleme sırasında kullanılan kristalli elmas takımlar için değişik talaş kırıcı formlar tercih edilmiştir. Çalışmada talaş kırıcı formların oluşturulmasında lazer bileme yöntemi kullanılmıştır. İlerleme miktarı 0,14 mm/devir olacak biçimde sabit alınmıştır. 200 ve 400 m/dak olmak üzere iki farklı kesme hızı incelenmiştir. 0,02, 0,06, 0,1, 0,14, 0,2 ve 0,26 mm olmak üzere altı farklı kesme derinliği analiz edilmiştir. İstisnayı birkaç kombinasyon dışında bütün takımlarda kesme derinliğinin artması sonucunda kesme kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmada en düşük kuvveti; 0,4 uyarı çapına sahip SPL-N kodlu takımında, 400 m/dak kesme hızında ve 0,26 mm kesme derinliğinde meydana gelmiştir. En yüksek kesme kuvveti 304 FN kodlu 0,4 mm uç yarı çapına sahip talaş kırıcısız takımında, 400 m/dak kesme hızında ve 0,26 mm kesme derinliğinde meydana oluşmuştur. Artan kesme hızlarının açık kaynaklardaki bilgilere paralel bir şekilde kesme kuvvetlerinde düşüşe yol açtığı gözlemlenmiştir. Kesme derinliği arttıkça talaş kırıcılı ve talaş kırıcısız takımlarda kesme kuvveti değerleri birbirine yaklaştığı gözlemlenmiştir. Testler sonrasında elde edilen kesme kuvvetlerinin değerlendirildiğinde talaş kırıcı formuna kullanılan takımlarla daha düzenli bir dağılım olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda en düşük kesme kuvveti değerlerine talaş kırıcılığı takımlar ile yapılan deneylerde ulaşıldığı gözlenmiştir. Hekimoğlu ve Bayraktar (Hekimoğlu ve Bayraktar, 2022) yürüttükleri çalışmada %0,02, %0,1 ve %1 olmak üzere üç farklı oranlarda Stronsiyum (Sr) içeren 3 adet Al-12Si-Sr alaşımını kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilmiştir. Standart metalografik yöntemlerle kullanılarak imal edilen alaşımların içyapıları tespit edilmiştir. Metalografik incelemelerde, Al-12Si-0,02Sr paylaşımının iç yapısının alfa ötektik alüminyum silisyum Al-Fe-Si gama fazları ile primer silisyum parçacıklarından oluştuğu gözlemlenmiştir. Al-12Si-0,1Sr alaşımının iç yapısının ise Al-12Si-0,02Sr alaşımında gözlenen fazlara ilave olarak Al-Si-Sr fazından oluştuğunu göstermiştir. Parçaların sertlik değerleri Brinell ölçüm yöntemiyle ve çekme dayanım değerleri ise çekme deneyi ile belirlenmiştir. Farklı Sr oranlarına sahip parçalar için kesme parametrelerinin işleme esnasında kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada 200, 300 ve 400 m/dk olmak üzere üç farklı kesme hızı araştırılmıştır. 0,05; 0,1 ve 0,15 mm/dev olmak üzere üç farklı ilerleme incelenmiştir. CVD-TiCN/Al2O3/TiN kaplamalı karbür kesici uç kullanılarak kesme derinliği 1,5 mm

olacak biçimde sabit alınmıştır. Bu incelemede, Al-Si-Sr fazının büyümesine ve parçacıklarının adetinin artmasına stronsiyum oranı artışının sebep olduğu yaklaşımı ortaya konmuştur. İncelenen alüminyum alaşımlar noktasında en yüksek çekme dayanımı ve sertlik değerine Al-12Si-0,1Sr alaşımından ulaşılmıştır. Artan stronsiyum oranındaki artış alüminyum alaşımda kopma uzaması değerinde olumsuz bir etki sağlayarak azalmaya sebebiyet vermiştir. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü ile kesme hızı arasında ters bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun aksine ilerleme hızının artması kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün üzerinde olumlu etki sağlamıştır. Al-12Si-0.1Sr alaşımının işlenmesinde sürecinde en düşük yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri ölçümlenmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri değerleri ise Al-12Si-0.02Sr alaşımının işlenmesi sürecinde rastlanmıştır. Çalışmada inceleme yapılan alüminyum alaşımların işlenmesinde sonrasında yığıntı talaş oluşumu meydana geldiği belirlenmiştir. Yığıntı talaş oluşumunu azaltmak için düşük ilerleme ve yüksek kesme hızı şartlarının sağlanmasının faydalı olabileceği ortaya konulmuştur. Al-12Si-0.1Sr alaşım işlenirken kesici uçta testlerde gözlemlenen en düşük yığıntı talaş oluşumu meydana gelmiştir. Al-12Si-0.02Sr alüminyum alaşımında ise bunun tam tersine yığın talaş oluşumun daha yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen alaşımların mekanik ve yapısal özellikleri detaylı bir biçimde analiz edilmiştir. Çalışmada farklı alaşımları A, B ve C şeklinde isimlendirmişlerdir. Bu isimlendirme Al-12Si alaşımının stronsiyum oranıyla ilgili bir isimlendirmedir. A alaşımı Al-12Si alaşımına %0,1 oranında Sr ilavesi yapılmış alaşım, B alaşımı Al-12Si alaşımına %0,02 Sr ilave edilmiş alaşım ve C alaşımı Al-12Si alaşımına %1 oranında Sr ilavesi ile oluşturulmuş alaşımdır. Yaptıkları çalışmalar neticesinde A ile ifade edilen alaşım Al-Sr-Si (Al4Sr) fazını, intermetalik Al-Fe-Si fazları, ötektik alüminyum silisyum ve primer silisyum parçacıklarından oluşmaktadır. A alaşımındaki Al-Sr-Si (Al4Sr) faz parçacıkları C alaşımının iç yapısındakine göre daha ince bir şekle sahiptir ve daha azdır. Üç alaşım göz önüne alındığında içerisinde en yüksek mukavemet ve sertlik değeri A alaşımında gözlemlenmiştir. B alaşımı, üç alaşım içerisinde en yüksek kopma uzaması değerine ulaşmıştır. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri, kesme hızı ile ters bir değişim gösterirken ilerleme ile doğru bir değişim göstermiştir. Sabit kesme şartları altında A alaşımının işlenmesi sonucunda testler sırasında oluşan en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşılırken en yüksek değerler C alaşımında ulaşılmıştır. Yüksek kesme hızını yükseltmek ve ilerlemeyi düşürmek yığıntı talaş oluşumunu azalttığı belirlenmiştir. Yığıntı talaş oluşumu azalmış olsa da yine de işleme esnasında kesici kenarda yığıntı talaş oluşmuştur. Deneylerde en düşük yığıntı talaş oluşumu A alaşımında tespit edilirken en yüksek yığıntı talaş oluşumu ise B alaşımında tespit edilmiştir. Ulaş (Ulaş, 2019) yapmış olduğu çalışmada AA 6061 alüminyum alaşımının işlenebilirliğini, Varyans analizi ve Taguchi metodu kullanarak değerlendirmiştir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde işleme parametrelerinin etkilerini araştırarak

optimum işleme şartlarının belirlenmesini amaçlamıştır. Bu sebeple işleme parametresi olarak 0.4 mm ve 0.8mm olmak üzere farklı iki kesici takım uç yarıçapı kullanılmıştır. Çalışmada 200,260 ve 320 m/dakika olmak üzere üç farklı kesme hızı dikkate alınmıştır. Deneyler sırasında 0.1, 0.15 ve 0.2 mm/dev olmak üzere üç farklı ilerleme miktarı denenmiştir. 1, 1.5, 2 mm olmak üzere üç farklı talaş derinliği seçilmiştir. Çalışmada deneyler Taguchi L18 (21X33) dizinine göre tasarlanmıştır. Deneyleri ıslak kesme şartları olmadan CNC torna tezgâhında yapılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile istatistiksel analiz sonuçları karşılaştırmış ve birbirlerini destekler nitelikte olduklarına karar vermiştir. Deney sonuçlarına göre ilerleme miktarı yüzey pürüzlülüğü noktasında en etkin parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Etki oranı %68.47 seviyesinde ölçülmüştür. AA 6061 alüminyum alaşım için yapılan denemeler sonucunda optimum yüzey pürüzlülüğü için kesici takım uç yarıçapı 0.8mm, kesme hızı 320 m/dk, ilerleme miktarı 0.1 mm/dev ve talaş derinliği 1.5 mm olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. Elde edilen veriler doğrultusunda optimum yüzey pürüzlülük değeri 0.937 mikrometre olarak ölçülmüştür. 0.8 mm ve 0.4 mm kesici uç yarıçapına sahip takımlarla yapılan deneylerde elde edilen verilere göre yüzey pürüzlülüğü değeri 0.8 mm kesici uç yarıçapı için daha düşük seviyededir. Hekimoğlu ve arkadaşları (Hekimoğlu ve arkadaşları, 2018) yapmış oldukları çalışmada %99.8 saflıkta alüminyum ve çinko elementlerini kullanarak Al-35Zn alüminyum alaşımı üretmişlerdir. Ergitme sürecinde orta frekans indüksiyon ocağı kullanılmışlardır. İndüksiyon ocağından çıkan sıvı metal kokil bir kalıba dökülmüştür. Çalışmada farklı kesme hızı ve ilerleme değerlerinin frezeleme işlemindeki işlenebilirlik üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada 600, 1200, 1800 dev/dak olmak üzere üç farklı kesme hızı dikkate alınmıştır. Deneyler sırasında 0.05, 0.1, 0.15 mm/diş olmak üzere üç farklı ilerleme miktarı denenmiştir. 1.5 mm talaş derinliği seçilmiştir. Çalışmada işleme deneyleri 6 mm çapa sahip TiAlN kaplamalı ve kaplamasız iki ayrı kesici takım ile frezede gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri ölçülen temel kriterler olarak değerleri dikkate alınmıştır. İşleme esnasında kesici takımlarda meydana gelen aşınma Tarama Elektron Mikroskopu (SEM) ile görüntülenerek gerekli analizler yapılmıştır. TiAlN kaplamalı ve kaplamasız iki ayrı kesici takım ile yaptıkları deneyler sonucunda kesme hızının artmasının olumlu bir etki olarak yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetlerinin azalmasını sağladığı görülmüştür. Bunun tersine ilerlemenin artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit etmişlerdir. Hem kesme kuvveti değeri hem de işleme sonucundaki yüzey kalitesi bakımından kaplamasız karbür kesici takımların Al-35Zn alaşımının frezelenmesinde daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Deneylerin sonuçlarına göre Al-35Zn alaşımının içyapısı alüminyumca zengin dendritik alfa fazı ve çinkoca zengin dendritler arası χ fazından oluşmaktadır. Kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile yapılan kesme işleminde kesme hızının artmasıyla kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri azalmakta-

dır. Kaplamasız ve TiAlN Kaplamalı takımlar ile yapılan kesme işleminde kesme hızının artmasıyla yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu azalmaktadır. Al-35Zn alaşımının frezelenmesi sırasında ilerleme oranı arttıkça kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. TiAlN kaplamalı takımlar aynı kesme koşullarında kaplamasız takımlara göre daha yüksek kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ile yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumuna sebep olmaktadır. Yaman ve Tekiner (Yaman ve Tekiner, 2024) yaptıkları çalışmada, kesme derinliği ve ilerleme hızını sabit tutarak kesme hızının yığıntı kenar oluşum mekanizması ve işleme sonrası oluşan talaş morfolojisine olan etkilerini detaylı bir şekilde ele almışlardır. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar sonucunda, kesme hızının yığıntı kenar oluşumunu ve oluşan talaş morfolojisini doğrudan etkilediğini gözlemlemişlerdir. Etkinin boyutu, talaş morfolojisi ve yığıntı kenarın oluşumuyla ilgili detayları, taramalı elektron mikroskop fotoğrafları üzerinden karşılaştırılarak değerlendirmiştir. Aynı zamanda çalışmada, kesme sırasında tezgah monitöründen okunan kesme kuvveti değeriyle kesme hızının ilişkisi de irdelemişlerdir. 0,2 mm/dev sabit ilerleme hızı koşulları altında, minimum yığıntı talaş oluşumunun 150 m/dk kesme hızında gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Kesme hızındaki artış yığıntı talaş oluşumunu ve dolayısıyla yığıntı talaş aşınmasını azaltmıştır. Elde ettikleri çıktılar literatürdeki benzer çalışmalarla tutarlılık arz etmektedir. Kesme hızının 130 m/dk'dan 150 m/dk'ya çıkarılmasının talaşların malzeme üzerinde daha düzgün akmasını kolaylaştırdığını ve bunun sonucunda sürekli talaş kıvrılma yarıçapının 1,58 mm'den 1,20 mm'ye düştüğünü belirlemişlerdir. 0,2 mm/devir sabit ilerleme hızında kesme hızı 130 m/dk'dan 150 m/dk'ya çıkarıldığında ortalama yüzey pürüzlülüğünün 2,880 μm değerinden 2,188 μm 'ye düştüğünü gözlemlemişlerdir. CNC makine eksenlerindeki kuvvetleri analiz ederek kesme hızının 130 m/dak'dan 150 m/dak'ya çıkarılmasıyla kesme kuvvetinin yaklaşık olarak %35'ten %23'e düşmesine neden olduğunu tespit edilmiştir. Yaptıkları çalışmada, kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerinde azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, ilerleme hızındaki artışların kesici takımın talaşa daha fazla nüfuz etmesine sebep olduğunu ve bunun sürtünmenin artmasına ve sonuç olarak kesme kuvvetlerinde artışa yol açtığını belirlemişlerdir. Her iki kesme parametresini kıyaslamaları sonucu ilerleme hızının, kesme hızına göre kesme kuvvetlerinde daha yüksek artışlara neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Yaptıkları çalışma, iş parçası işleme sürecindeki parametrelerin optimize edilmesiyle takım ömrünün uzayacağını, iş parçası yüzeylerinin daha yüksek kalitede olabileceğini ve üretim maliyetlerinin düşürülebileceğini ortaya koymaktadır. Aydın ve Özçatalbaş (Aydın ve Özçatalbaş, 2003) yaptıkları çalışmada, yaşlandırma (T6) ısıtma işlemi uygulamış, 134 BSD sertliğe ve 507 N/mm² çekme dayanımına sahip AA2014 alaşımının işlenebilirlik özelliklerini incelemiştir. Farklı iki geometriye sahip kesici takımla tornaladıkları malzemenin yüzey pürüzlülüğünü, tornalama kuvvetlerini ve farklı kesme hızlarında oluşan talaş kökü morfolojilerini belirlemişlerdir. Düşük kesme hızlarında, 6° gibi küçük

talaş açılı takım ile işleme yapıldığı sırada yığıntı talaş oluşumunun yüksek olduğunu ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir. 30° gibi büyük talaş açılı takım ile işleme yapıldığında ise yığıntı talaş oluşumu miktarında, yüzey pürüzlülüğünde ve kesme kuvvetlerinde azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan her iki işlemede de yüzey pürüzlülüğü değerinin 61 m/dak kesme hızına kadar belirgin bir düşüş gösterdiğini, ancak 61 m/dak'dan büyük kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kesme hızından etkilenme boyutunun çok daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Minimum yüzey pürüzlülüğü değerine büyük talaş açılı takım ile işlemede ulaşmışlardır. İkinci takım ile işleme sonucu elde ettikleri talaş kaldırma kuvveti değerleri, yüksek pozitif talaş açısı dolayısıyla daha düşük çıkmıştır. Talaş kökü morfolojisi ve mikroyapı incelemesi yaptıklarında birinci takım ile işlemede 171 m/dak kesme hızında, ikinci takım ile işlemede ise 87 m/dak kesme hızında yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşmadığını tespit etmişlerdir. Çalışmalarının sonuçlarına dayanarak T6 ısıtma işlemi AA2014 malzemenin talaşlı işlenmesinde kullanılacak takımın büyük talaş açılı olmasını, talaş kaldırma kuvvetlerinin minimumda tutulmaya çalışılmasını ve bitirme yüzey kalitesinde artış sağlanabilmesi için kesme hızının 100 m/dak üzerinde olmasını tavsiye etmişlerdir.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yığıntı talaş (BUE) ve yığıntı katmanı (BUL) oluşumu üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Alüminyum alaşımları, yüksek plastislikleri ve düşük sertlikleri nedeniyle işlenebilirlik açısından avantajlı olmakla birlikte, yığıntı talaş oluşumu, işleme sürecinde hem yüzey kalitesini hem de takım ömrünü olumsuz etkileyebilmektedir. Deneysel analizler ve literatürdeki çalışmalar (Akgün ve ark., 2017; Asiltürk ve Akkus, 2011; Cönger ve ark., 2019; Çakır ve ark., 2020; Deepak ve Rajendra, 2015; Demir ve Gündüz, 2009; Fang ve ark., 2010; Gök ve ark., 2010; Haddag ve ark., 2016; Korkut ve ark., 2007; Meral ve Günay, 2019; Ranganath ve ark., 2015; Yağcı ve ark., 2021) ışığında, kesme hızının ve talaş açısının bu oluşumlar üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Kesme Hızının Yığıntı Talaş ve Katmanı Üzerindeki Etkisi; Kesme hızının, yığıntı talaş oluşumu üzerinde belirgin bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Düşük kesme hızlarında yığıntı talaş oluşumu sıkça gözlemlenmiştir. Bunun temel nedenlerinden biri, düşük hızlarda kesme bölgesindeki sıcaklık artışının sınırlı kalmasıdır. Bu durum, alüminyum alaşımın yapışma eğilimini artırarak takım ile iş parçası arasında yığıntı talaşın oluşmasına neden olmaktadır.

Kesme hızının artmasıyla birlikte yığıntı talaş boyutunda önemli bir azalma gözlemlenmiş, belirli bir kritik hızın üzerinde yığıntı talaş oluşumunun neredeyse tamamen ortadan kalktığı görülmüştür. Bu durum, yüksek kesme hızlarında malzemenin kesme sıcaklığındaki artışla birlikte plastik deformas-

yona karşı direncinin azalması ve yapışma kuvvetlerinin zayıflamasıyla açıklanabilir. Ayrıca yüksek hızlarda talaşın daha kolay akışkan hale geldiği ve kesici yüzeyi temiz bir şekilde terk ettiği tespit edilmiştir.

Talaş Açısının Yığıntı Talaş ve Katmanı Üzerindeki Etkisi; Talaş açısının yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumunda kritik bir parametre olduğu belirlenmiştir. Pozitif talaş açıları, kesme sırasında daha az deformasyon ve daha az temas alanı yaratarak yığıntı talaş oluşumunu önlemiştir. Pozitif açılar, talaşın kesme kenarından daha düzgün bir şekilde akmasına izin vererek yüzey kalitesini iyileştirmiştir. Negatif talaş açılarında ise yığıntı talaş ve katmanın boyutunun belirgin şekilde arttığı, bu durumun ise işleme yüzeyi üzerinde olumsuz etkiler yarattığı gözlemlenmiştir.

Yığıntı Talaş ve Katmanın İşleme Sürecine Etkisi; Yığıntı talaş ve yığıntı katmanının varlığı, işleme sırasında birkaç önemli soruna yol açmaktadır:

- **Yüzey Kalitesi:** Yığıntı talaş ve katmanlar, iş parçası yüzeyinde düzensizliklere neden olarak yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. Bu durum, işlenen parçanın nihai kullanım performansını olumsuz etkilemektedir.
- **Kesici Takım Performansı:** Yığıntı talaş, kesici takımın yüzeyine yapışarak kesme kenarının geometrisini bozmuş ve kesme kuvvetlerinde artışa neden olmuştur. Bu durum, takım aşınmasını hızlandırmış ve takım ömrünü kısaltmıştır.
- **Enerji Tüketimi:** Yığıntı talaşın varlığı, kesme kuvvetlerini artırarak işleme sırasında enerji tüketimini yükseltmiştir.

Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu; Deneysel veriler, kesme hızının artırılması ve pozitif talaş açılarının kullanılması durumunda yığıntı talaş ve katman oluşumunun minimize edilebildiğini göstermektedir. Yüksek kesme hızları ve uygun talaş açıları ile daha düzgün yüzeyler elde edilmekte, aynı zamanda kesici takım ömrü uzatılabilmektedir. Bu bulgu hem işleme kalitesini artırmak hem de maliyetleri düşürmek açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Akgün, M., Özlü, B., Demir, H. (2017) Döküm Yöntemiyle Üretilmiş Al-12Si Alaşımlarının Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu. 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Proceedings, 344-348.
- Asilturk, I., Akkus, H. (2011) Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning Using the Taguchi Method. Measurement. 44, 1697-1704.
- Aydın B, Özçatalbaş Y. (2003). AA2014 (T6) Alaşımının İşlenebilirlik Özelliklerine Kesici Takım Geometrisinin Etkisi. MATİM. ,5(2), 89-95.
- Bican, O., Pul, M. (2021). Farklı Alüminyum Alaşımlarının Tornalanmasında Alaşım Cinsinin Kesici Takım Davranışı, Talaş Biçimi ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 3(1), 9-17. <https://doi.org/10.46387/bjesr.787725>
- Cönger, D. B., Emiroğlu, U., Uysal, A., Altan, E. (2019) Alüminyum 6061 malzemenin MQL yöntemi ile frezelenmesinde nano MoS2 katkılı kesme sıvısı kullanımının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 17, 31-37.
- Çakır, A., Duran, A., Şeker, U. (2020) The Effect of different cooling methods to hole quality and tool life in the drilling of AA7075 and AA2024 aluminum alloys. Manufacturing Technologies and Applications, 1, 1-13.
- Deepak, D., Rajendra, B. (2015) Investigations on the surface roughness produced in turning of Al 6061 (as-cast) by taguchi method. International Journal of Research in Engineering and Technology, 4(8), 295-298.
- Demir, H., Gündüz, S. (2009) The Effects of Aging on Machinability of 6061 Aluminum Alloy. Materials and Design, 30, 1480-1483.
- Fang, N., Pai, P.S., Mosquea, S. (2010) The effect of built-up edge on the cutting vibrations in machining 2024-T351 aluminum alloy. Int J Adv Manuf Technol 49, 63-71. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2394-z>
- Gök, K., Erdem, M., Gök, A. (2010) AISI 1006 çeliğinin tornalama sürecinde kesici takım uç yarıçapının kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti üzerindeki etkisinin numarik olarak incelenmesi. TÜBAV Bilim Dergisi, 4, 1-8.
- Gökkaya, H., Nalbant, M. (2006) The effects of cutting tool coating on the surface roughness of AISI 1015 steel depending on cutting parameters. Turkish J. Eng. Env. Sci, 30, 307-316.
- Gokkaya, H., Taşkesen, A. (2008) The effects of cutting speed and feed rate on BU-E-BUL formation, cutting forces and surface roughness when machining Aa6351 (T6) alloy. Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 54.
- Haddag, B., Atlati, S., Nouari, M., Moufki, A. (2016) Dry Machining Aeronautical Aluminum Alloy AA2024- T351: Analysis of Cutting Forces, Chip Segmentation and Built-Up Edge Formation. Metals, 6, 197.

- Hekimoğlu, A. P., Bayraktar, Ş. (2022). CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN Kaplamalı Kesici Uç ile Al-12Si-(0,02-1) Sr Alaşımlarının Tornalanmasında Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine DeneySEL Çalışma. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 10(1), 50-62. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1025239>
- Hekimoğlu, A. P., Bayraktar, Ş., Turgut, Y. (2018). Kesme Hızı ve İlerlemenin Al-35Zn Alaşımının İşlenebilirliğine Etkisinin İncelenmesi. In *SETSCI-Conference Proceedings*, 3, 77-83.
- Korkut, I., Donertas, M. A. (2007) The Influence of Feed Rate and Cutting Speed on The Cutting Forces, Surface Roughness and Tool–Chip Contact Length During Face Milling. *Materials & Design*, 28, 308-312.
- Meral, T., Günay, M. (2019) Kaplamalı ve kaplamasız karbür matkap ile ferritik paslanmaz çeliğin delinebilirlik analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5, 159-166.
- Ranganath, M. S., Vipin, Vp., Mishra, R. S., Dhar, N. R. (2015) Optimization of Surface Roughness in CNC Turning of Aluminium 6061 Using Taguchi Techniques. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 5(5), 42-50.
- Sekmen, M., Günay, M., Şeker, U. (2015). Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 18(3), 141-148.
- Ulaş, H. B. (2019). AA 6061 Alüminyum Alaşımının Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Analizi Ve Optimizasyonu. *Technological Applied Sciences*, 14(2), 48-56.
- Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., Korkmaz, A. (2021) Alüminyum Döküm Alaşımlarına Dair Son Yıllardaki Akademik Ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış Ve Değerlendirme. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1191-1210. <https://doi.org/10.17482/uumfd.882586>
- Yağmur, S., Kaya, M. K., Şeker, U. (2021) AA-6082 T4 Alaşımının Tornalamasında Çok Kristalli Elmas (ÇKE) Takımlara Uygulanan Talaş Kırıcı Formlarının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *GJES*, 7(1), 51–57.
- Yaman, K., Tekiner, Z. (2024). Investigation of the effect of built-up edge on chip morphology at the cutting edge during turning operation. *Politeknik Dergisi* 1-1

BÖLÜM 12

ATIKLAŞTIRILACAK SUYUN PV-T HİBRİT SİSTEMLERDE FOTOVOLTAİK PANELLERİN VERİMİNİ YÜKSELTMEDE KULLANILMASI

Enes AKÇAY¹

Necdet Buğra YILMAZ²

¹ Bayburt Üniv. Lisansüstü Eğitim Enst. Makine Mühendisliği Pr.
E-mail: enes_akcay.61@outlook.com

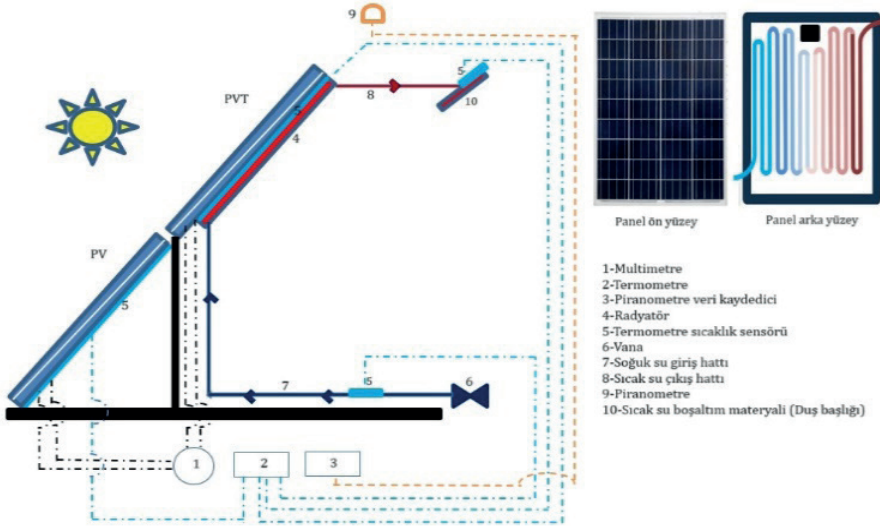
1. Giriş

Dünya nüfusunun artışı, teknolojik ilerleyiş enerji talebinde her geçen gün artışa neden olmaktadır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak için fosil kaynaklar sürekli olarak kullanılmakta ve hızla tüketilmektedir. Kaynakların azalması ve enerji ihtiyacının artması neticesinde farklı kaynaklara olan yönelimler de artmıştır Bu yüzden ülkemizde de olduğu gibi tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımlar ve güç üretimleri konusunda çalışmalar başlatılmıştır [1, 2, 3]. Bu çalışmaların yanında verim artırmaya yönelik kojenerasyon yani aynı anda elektrik ve ısı üretimi, atık ısılardan daha fazla yararlanma ve bunlardan organik Rankine çevrimleri vasıtasıyla güç üretimi, atık ısının ısıtmada ve absorpsiyonlu soğutmada kullanımı ve bunların enerji ve ekserji analizi ve optimizasyonu ile alternatif yakıtlardan biyodizel ve biyo yağlayıcılar ile kriyojenikte dahil olmak üzere farklı soğutma çevrimlerine de yönelmeler ve çalışmalar artmıştır [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Yine Dünya'da en çok ülkemizde bulunan Bor ve Bordan enerji üretimi üzerine çalışmalar, ayrıca kayıpların azaltılmasına yönelik süper iletkenler ve malzemeleri üzerine analiz deneyler hız kazanmıştır [11, 12, 13, 14, 15]. Türkiye'de birçok yenilenebilir enerji potansiyeline sahip olması enerji üretimi için çok fayda sağlamıştır. Yenilenebilir enerji konusunda en çok enerji üretimi Hidroelektrik, Rüzgâr ve Güneş enerjisi güç üretim tesisi olarak güneş enerjisini üçüncü sırada potansiyele sahip kılmiştir. Güneş enerjisinden elektrik üretim tesislerinin kurulu gücündeki yüzdelik artış miktarı diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla gelişim göstermiştir. Türkiye'de coğrafi konumunun kazandırdığı güneş enerjisi potansiyeli diğer birçok ülkeye göre daha üst seviyelerdedir ve güneş potansiyeline bakıldığında; yıllık olarak toplam güneşlenme süresi 2737 saat olduğu görülmektedir. Bu da metrekaareye yıllık 1527kWh enerji sağladığını göstermektedir. Bu değerler de ülkemizin güneş enerji potansiyeli konusunda ön plana çıkartmıştır [16, 17]. Güneş enerjisinden elektrik üretimi 2 ana yöntemle yapılmaktadır. Bunlardan biri dolaylı yöntem bir diğeri ise doğrudan yöntemdir. Dolaylı yöntemde güneş enerjisini yoğunlaştırıcı sistemlerle odaklayıp, kızgın buhar elde ederek geleneksel yöntemleri kullanmaktır. Doğrudan yöntemde ise fotovoltaiik, termoelektrik ve termoiyonik çeviriciler yer almaktadır. Fakat büyük miktarda elektrik üretiminde sadece fotovoltaiik sistemler kullanılmaktadır [18]. Fotovoltaiik-termal paneller, iki tür geleneksel türü birleştiren hibrit sistemlerdir. Bir PV-T paneli, bir güneş termal (ST) ve bir fotovoltaiik (PV) panelin avantajlarını tek bir panelde birleştirir. Üretilen termal ve elektrik enerjisi arasında elde edilebilecek optimal bir denge vardır. Bu nedenle ikisi arasındaki ilişkiyi ve karşılıklı bağlantıyı kurmak önemlidir. Bir PV-T panelinin bağımsız fotovoltaiik (PV) panellere göre bazı önemli avantajları vardır. PV panelinde önemli ısı kayıpları meydana gelir. Kayıplar, daha yüksek enerji taşıyan fotonların ısılaşması yolu ile olur. Yarı iletken malzemenin bant aralığı yeterli enerji taşımayan, absorpsiyonsuz fotonlar elektrik üretiminde telafi

edilemeyen kayıplar, elektrik kayıpları olarak nitelendirilir. Bununla birlikte, termal kayıplar geri kazanılarak, toplam güneş enerjisinden enerji dönüşüm verimliliği iyileştirilir ve kullanılabilir faydalı termal enerji üretilir. Termal enerji ısıtma, soğutma, sıcak su gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir. Ayrıca, PV tarafı, standart bir PV panele kıyasla daha yüksek bir elektrik verimliliği gösterir [19]. İşletim süresinin artmasıyla birlikte PV elektrik verimi düşer. Başka bir deyişle, hücre malzemesi ısındıkça elektrik gücü çıkışı azalır. Hücrenin ısısı bir soğutucu madde vasıtasıyla uzaklaştırılarak faydalı termal enerji elde edilir ve PV verimliliği artırılır. PVT panellerinin çalışması ve geliştirilmesi 1970'lerde başladı. O zamandan beri PV-T'nin ilerletilmesi ve verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik önemli araştırma çalışmaları yapılmıştır. Meteorolojik durum (güneş radyasyonu, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı) ve PV-T panelinin yapıcı parametreleri (yalıtım, kanal tipi ve genişliği, cam, paketleme faktörü) hücrenin sıcaklığını etkileyen ve dolaylı olarak elektriksel verimliliği etkileyen faktörlerden bazılarıdır. Bir PV-T panelinin geometrik tasarımı da enerji çıktısında önemli bir faktördür. Çeşitli geometrik konfigürasyonların elektriksel ve termal verimliliklere dolayısıyla genel enerji verimliliğine etkisini araştırmak için önemli araştırmalar yapılmıştır. (direkt akış, serpantin tasarımı, paralel serpantin tasarımı, salınımlı akış, spiral akış, web tasarımı) Yani fotovoltaiik hücreler güneşten soğrulan foton enerjisini, yarı iletkenlerden imal edilmiş PV panellerle elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılmaktadır. Fakat fotovoltaiik hücrelerde enerji dönüşümü için kullanılan foton enerjisinin büyük bir kısmı elektrik enerjisine değil ısı enerjisine dönüşmektedir. Bu ısınma fotovoltaiik hücrelerde verimin düşmesine ve elde edilen gücün azalmasına neden olmaktadır. Fotovoltaiik hücrede oluşan bu sıcaklığın bir akışkan yardımıyla sistemden çekilmesi, sıcaklıktan dolayı oluşan kayıpların azalmasını sağlayarak panelden daha çok güç elde edilmesi ni sağlayacaktır. Bu şekilde yapılan sistemlerde hem ısı enerjisi hem de elektrik enerjisi elde edilirken panellerde üretilen gücün de artması sağlanmaktadır [20, 21].

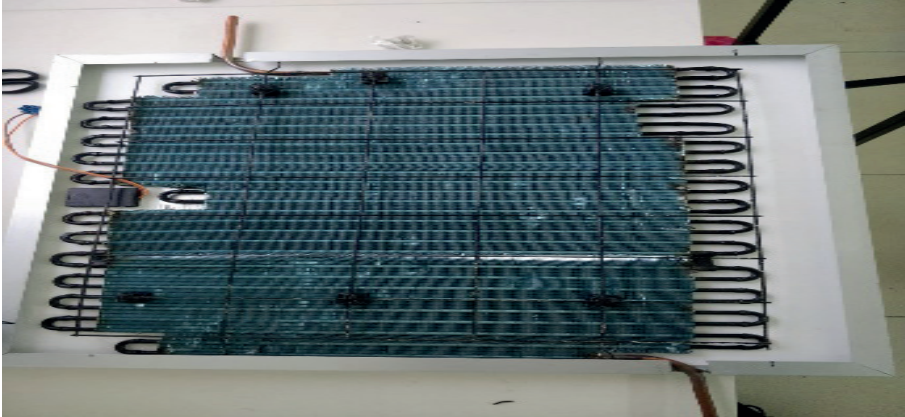
2. Materyal ve Metot

Çalışmada 2 adet fotovoltaiik (PV) polikristal 60Wp gücünde panel kullanılmıştır. Bu panellerin markaları ve güçleri birbirleriyle aynıdır. Her iki panel de aynı özelliklere sahip olmalarına rağmen panellerden birinin sıcaklıkla oluşan verim kaybını azaltmak için arkasına radyatör yerleştirilmiştir (Şekil 1.).



Şekil 1. Fotovoltaik termal (PV-T) sistem

Radyatör panel (Şekil 2.) yüzeyine kanatlar vasıtasıyla temas etmektedir. Radyatörün ölçüleri 480*620*20'dir ve bakır boruyu çevreleyen alüminyum kanatçıklardan oluşmaktadır. Şebekeden gelen temiz su radyatör ile soğutulan panelin alt tarafından girip üst tarafından çıkmaktadır. Bunun yapılabilmesi için soğutulan panelin, belirlenen bölgelerdeki alüminyum çerçevesinin üst ve alt köşelerden 25mm kesilerek bakır borular panel yüzeyine sabitlenmiştir. Ayrıca radyatör yüzeyinin güneş paneline tam olarak temas etmesi için "metal ızgara" şeklindeki bir malzeme kullanılmış ve radyatörün tüm yüzeyinin panel yüzeyine temas ettirilmesi sağlanmıştır. Burada kullanılan ızgara şeklindeki metal malzemeye radyatörden ısı transferi olmaması için plastik 6 adet bacakla sabitlenmiş ve ısı transferi en az seviyeye indirilmiştir. Giriş ve çıkış suyunda izolasyonlu borular kullanılarak ölçümlerin daha net alınması hedeflenmiştir.



Şekil 2. Arkasına radyatör yerleştirilmiş PV panel

Her iki güneş paneli de gölge almayacak biçimde güney cepheye dönük ve 38° eğim ile sabitlenmiştir. Güney yönünün tam olarak net alınması için pusula (Şekil 3.) kullanılırken güneş ışınım miktarının ölçülmesinde Eko MS-602 (Şekil 3.) model piranometreden faydalanılmıştır.



Şekil 3. Pusula ve piranometre

Piranometrede alınan değerlerin okunması ve kaydedilmesi için HİOKİ LR5041 voltaj data loggeri (Şekil 4.) kullanılmıştır. Bu değerler cihazda anlık olarak gözlemlenmiş, yarım saat arayla alınmıştır.



Şekil 4. Piranometre data loggeri

Çalışmada her iki güneş panelinin arka yüzey sıcaklığı suyun giriş ve çıkış sıcaklığı sürekli olarak ölçülmüştür. Ölçümde Leybold 524 005 Mobile-Classy hassas termometre kullanılırken sıcaklık ölçüm problemlerinden biri soğutulmayan yalın güneş panelinin arkasına, bir diğer uç ise su ile soğutulan (hibrit) güneş panelinin arkasına yerleştirilmiştir. Diğer iki ölçüm probu ise suyun giriş ve çıkış sıcaklığı ölçülmede kullanılmıştır.

Her iki güneş paneli de yarım saatlik periyotlarda özdeş multimetreler ile ölçülmüştür. Çalışmada MCP MU58A model multimetreden yararlanılırken suyun tahliyesi için duş başlığı ve su ile soğutulan güneş panelinin belirli eğimlerde durmasını sağlayan demir profil konstrüksiyon kullanılmıştır. Konstrüksiyon yere terazili bir şekilde oturtularak 38° derece panel açısıyla her iki panel de sabitlenmiştir. Radyatörün bakır borusu 25mm dış çapa ve 6mm et kalınlığına sahiptir. Bakır borulara ve panel yüzeyine temas eden alüminyum kanatlar bakır boruları çevrelemektedir. Yani kanatlı bir boru olarak düşünün-

lebilir. Öncelikli olarak radyatörlü panel konstrüksiyon üzerine oturtulmuş ve elektronik terazi yardımıyla 38 derece açıda olduğu görülmüştür. Radyatörsüz panel de yine aynı şekilde zemine 38 derece açı ile sabitlenmiş ve koşulların birbirine çok yakın olması sağlanmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada her iki panel de pusula yardımıyla güney yönüne bakacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 5. PV Radyatörlü panel ve radyatörsüz (yalın) panel

3. Bulgular ve Tartışma

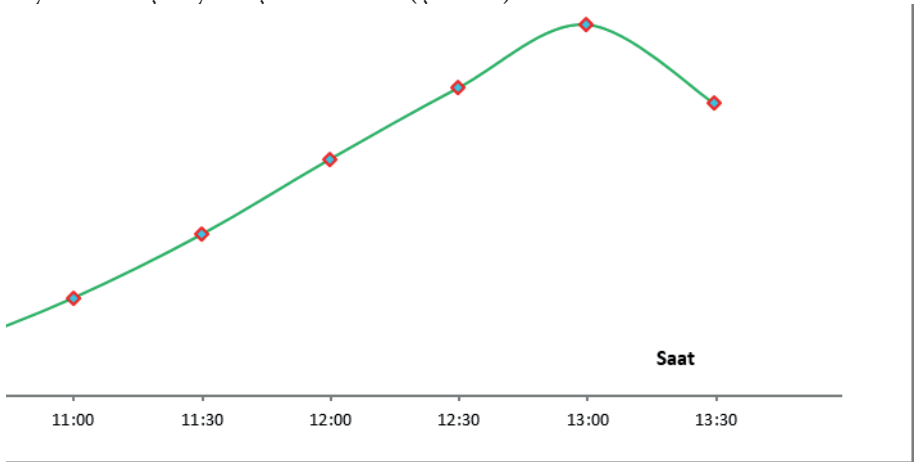
Panellerdeki açı ve konum işlemlerinin bitmesiyle şebekeden gelen su mavi renkli boruya oradan radyatörün alt taraftaki girişine, kırmızı renkli boru ise radyatörün üst taraftaki çıkışından alınarak duş başlığını besleyen boruya bağlanmıştır. (Şekil 6). Suyun debisini 2litre/dakika olarak ayarlanmış deney boyunca suyun kütesel debisi daima sabit kalmıştır. Termometrenin bir probu yalın panelin arkasına yapıştırılmış diğeri ise aynı şekilde radyatörlü panelin arka yüzüne yapıştırılarak tutturulmuştur. Termometrenin diğer iki probu ise ortam sıcaklığı, giriş ve çıkış su sıcaklığını ölçmek için ayrılmıştır. Şebeke suyu açılarak saat 10.30'dan 13.30'a kadar her yarım saatte bir tüm verilerle ölçülerek kaydedilmiştir.



Şekil 6. Su akış ve çıkış sıcaklığı ölçümü

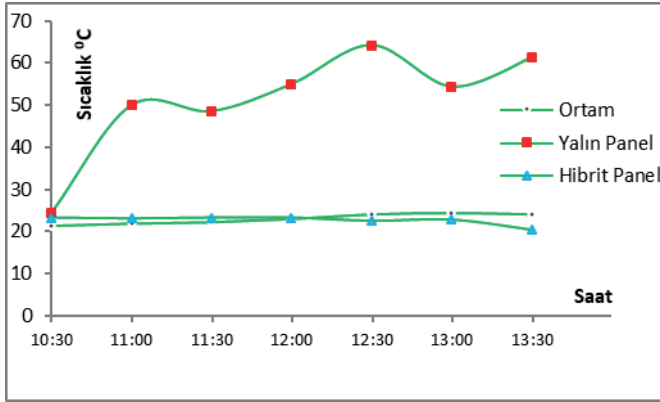
Sıcaklık ölçümleri, ısıtım miktarı ölçümü, akım-gerilim ve güç ölçümleri 10.30, 11.00, 11.30, 12.00, 12.30, 13.00, 13.30 saatlerinde, hava sıcaklığı en düşük 17°C , en yüksek 25°C olduğu saatlerde alınmıştır.

Verilere göre ısıtımın en yüksek olduğu saatler 13.00 dolaylarıdır. En düşük olduğu saatler ise 10:30 saatleridir. Çalışmanın yapıldığı gün saat 13:00'ten sonra ısıtım değerleri kademeli olarak azalmaya başlamıştır. Isıtım değerlerindeki artış panellerde üretilen elektrik enerjisini arttırırken, sıcaklıkla verim kaybı da oluşmaya başlamaktadır (Şekil 7.).



Şekil 7. Saatlere göre ısıtım miktarı (W/m^2)

Saat 10.30'da deney yapılmaya başlandıktan sonra her iki panelin de sıcaklıkları ve diğer değerleri birbirine yakın düzeydedir. Yalın panel ilk başlangıçta $24,5^{\circ}\text{C}$ iken su ile soğutulan panelin sıcaklığı $23,3^{\circ}\text{C}$ 'dir. Saat 11.00 da ısıtımın artmasıyla yalın panelin yüzeyi ciddi derecede ısınmaya başlarken, su ile soğutulan panel ise daha düşük sıcaklıklara gerilemiştir. Saat 11.30'da yalın panelin sıcaklığı $48,6^{\circ}\text{C}$ iken su ile soğutulan panelin yüzey sıcaklığı $23,3^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Saat 13.30'da en son alınan ölçümlere göre ortam sıcaklığı 24°C iken yalın panelin yüzeyi $61,3^{\circ}\text{C}$, hibrit panelin yüzeyi ise $20,3^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 8.). Çalışmada elde edilen değerler giriş suyu ile çıkış suyu arasında ortalama $4,2^{\circ}\text{C}$ 'lik farklılıklar olduğunu göstermiştir. Yani güneş panelinin yüzeyinde oluşan ısı, radyatör yardımıyla suya geçmiştir. Elde edilen değerlerde giriş ve çıkış suyu sıcaklığı arasındaki fark en fazla saat 13.00 civarında $5,8^{\circ}\text{C}$ ile olmuş, en düşük sıcaklık farkı ise $3,3^{\circ}\text{C}$ ile saat 11.30'de olmuştur.

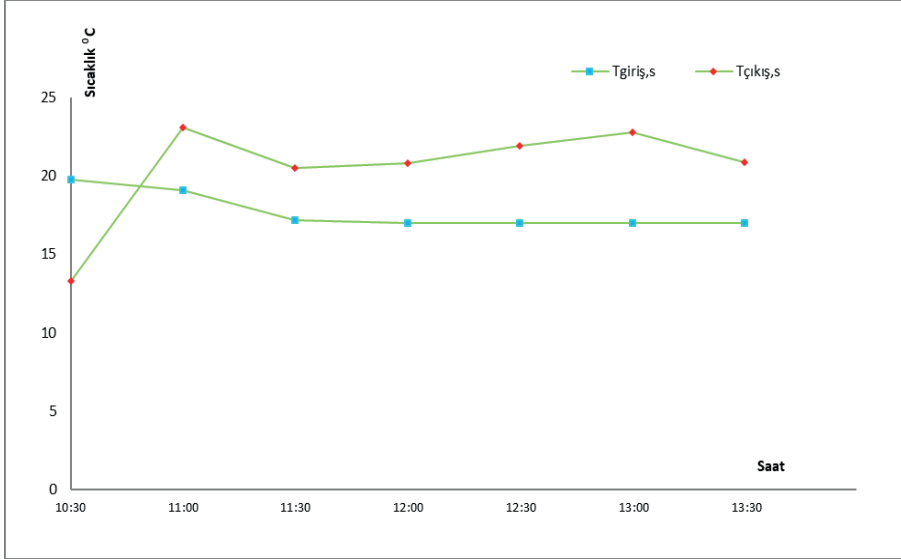


Şekil 8. Ortam sıcaklığına göre panellerin davranışları

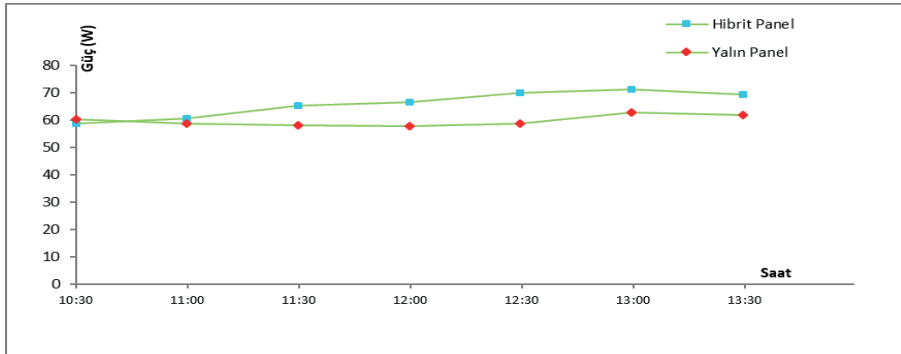
Deneydeki bir diğer amaç da duşta kullanılacak suyu ısıtmaktır. Bu genellikle plajlar vb sürekli akışlı sistemler için uygundur. Denizden çıkan kişilerin duş alma ihtiyacı vardır fakat duşa girildiğinde duş suyunun deniz suyundan daha soğuk olduğuyla karşılaşmak mümkündür. Çalışmada elde edilen değerler giriş suyu ile çıkış suyu arasında ortalama $4,2^{\circ}\text{C}$ 'lik farklılıklar olduğunu göstermiştir. Yani güneş panelinin yüzeyinde oluşan ısı, radyatör yardımıyla suya geçmiştir. Düşük bir artış da olsa küçümsenemeyecek bir sıcaklık elde edilmiştir. Ayrıca projenin Karadeniz bölgesinde ve bahar mevsiminde yapıldığı düşünüldüğünde gayet güzel değerler olduğu görülmektedir. Elde edilen değerlerde giriş ve çıkış suyu sıcaklığı arasındaki fark en fazla saat 13.00 civarında $5,8^{\circ}\text{C}$ ile olmuş, en düşük sıcaklık farkı ise $3,3^{\circ}\text{C}$ ile saat 11.30 da olmuştur.

Güç değerleri yalın panel ve radyatörle soğutulan panelde karşılaştırıldığında başlangıç anında yalın panelin daha fazla güç ürettiği gözükmemektedir. Zaman ilerledikçe durum tam tersine dönüşmeye başlamaktadır. Saat 11.00'de

yalın panelin radyatörlü panele göre 1,61W daha yüksek güç elde ettiği gözük-mektedir. 11.00'de yalın panelin ısınmasıyla birlikte radyatörlü panelin 1,9W daha fazla güç ürettiği gözük-mektedir. 11.30 saatlerinde bu fark artarak 7,16W, 12.00 'de 8,89W, 12.30' de 11,38W, 13.00'de 8,52W, 13:30'de ise 7,34W olarak ölçülmüştür.

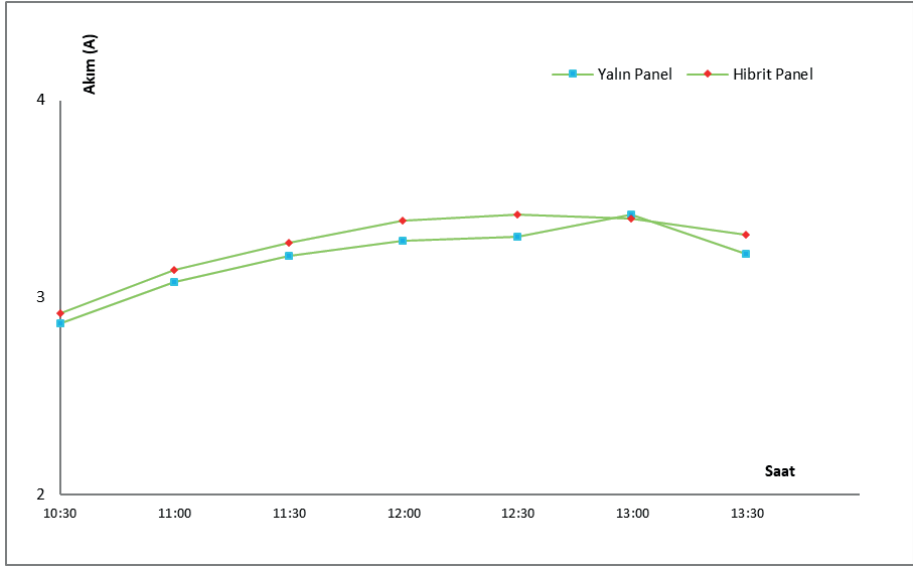


Şekil 9. Hibrit panel akışkan (su) giriş ve çıkış sıcaklığı

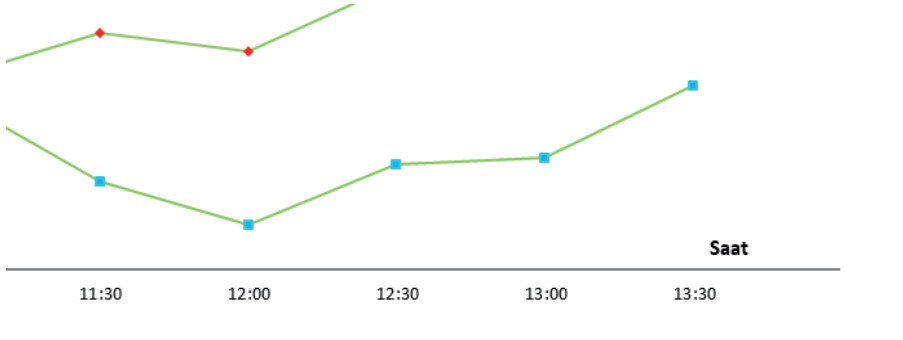


Şekil 10. Yalın ve Hibrit panelin güç karşılaştırmaları

Yalın panel ve hibrit panel akım, gerilim değerleri gözlemlendiğinde yalın panelde ısıtımın artışı ve yüzey sıcaklığının artmasıyla birlikte artan akım ve düşen gerilim değerleri oluşurken (Şekil 11), hibrit panelde akım ve gerilim değerlerinde artış gözlenmiştir (Şekil 12). Isıtım miktarının en yüksek olduğu saat 13.00'de yalın panelde 3,42 amper akım ve 18,35 volt gerilim oluşmuşken hibrit panelde 3,40 amper ve 20,97 volt gerilim olduğu görülmüştür.



Şekil 11. Yalın ve hibrit panel akım karşılaştırması



Şekil 12. Yalın ve hibrit panel gerilim karşılaştırması

4. Sonuç

Fotovoltaik panellerin şebeke suyu ile soğutulması panellerde üretilen enerji miktarının arttırılmasına olanak sağlamış ve alternatif bir yöntem olabileceği gerçeğini gözler önüne sermiştir. Bu çalışma Türkiye göz önünde bulundurulduğunda en az güneşlenme süresine sahip Karadeniz bölgesinde bulunan Sinop ilinde yapılmıştır. Ortam hava sıcaklığı 24C iken panel yüzey sıcaklığının 61,3C olması, GES'in en yoğun olduğu Doğu Anadolu, Akdeniz, İç Anadolu gibi bölgelerde çok daha yüksek sıcaklıklara çıkabileceğini göstermektedir. Literatürde de yapılan çalışmalarda sahada olup soğutulmayan panellerin 90C yüzey sıcaklıklarına ulaştığı görülmektedir [5].

• Çalışmada Her iki panel, düz zeminde sabitlenmiş konstrüksiyon üzerine 38° eğim açısı olacak şekilde yerleştirilmiş ve aynı güneş ışınımı alınması sağlanmıştır. Panellerin marka, model ve güç miktarları özdeş olarak seçilmiş-

tir.

- Her yarım saatte bir yapılan ölçümlerde 2litre/dakika sabit kütleli debisi olan su ile soğutulan panelin gücü ısıtım miktarının artmasıyla artmış ve sıcaklık ile oluşan verim kayıpları soğutulmayan panele göre daha az olmuştur.

- Sıcaklık ölçümleri, ısıtım miktarı ve güç ölçümleri 10.30, 11.00, 11.30, 12.00, 12.30, 13.00, 13.30 saatlerinde, hava sıcaklığı en düşük 21,5°C, en yüksek 24,3°C olduğu saatlerde alınmıştır.

- Su ile soğutulan panel ölçüme başlanılan ilk saatte 23,3°C yüzey sıcaklığı ile 58,54W güç üretirken, soğutma işlemi uygulanmayan panel 24,5°C ile 60,15W güç değeriyle daha yüksek güç üretimi sergilemiştir.

- Farkın en yüksek olduğu saat olan 12.30'de su ile soğutulan panelin yüzey sıcaklığı 22,5C, gücü 70W iken soğutulmayan panelin yüzey sıcaklığı 64,2C ve gücü 68,65W seviyelerinde gözlemlenmiştir. 60W güce sahip bir panelde soğutma işlemiyle birlikte 11,35W güç farkı meydana gelmiştir.

- Akım değerlerine bakıldığında panel yüzeyindeki sıcaklık artışı akım değerinde yükselttiği görülürken gerilim değerinde düşürdüğü görülmektedir. Büyük ges'lerde oluşacak bu problem akımla beraber enerjinin panellerden transformatörlere uzanan hatlarında hem daha yüksek kesitli bir kablo kullanımı getirecek hemde daha fazla güç kaybı oluşacağı düşünülmektedir.

Tablo 1. Hibrit ve yalın panelin sıcaklık performansları
Table1. Temperature performances of hybrid and plain panel

Saat	Yalın Panel (Yüzey Sıcaklığı)		Soğutulan Panel (Yüzey Sıcaklığı)		Isıtım Miktarı (W/m ²)	Orta m Sıcaklığı (C°)	Su Giriş Sıcaklığı (C°)	Su Çıkış Sıcaklığı (C°)
	Sıcaklık (C°)	Güç (W)	Sıcaklık (C°)	Güç (W)				
10:30	24,5	60,15	23,3	58,54	1004,29	21,5	19,8	23,3
11:00	50	58,78	23,1	60,68	1031,9	22	19,1	23,1
11:30	48,6	58	23,3	65,16	1065,64	22,3	17,2	20,5
12:00	55	57,69	23,3	66,58	1105,53	23	17	20,8
12:30	64	58,65	22,5	70	1143,37	24	17	21,9
13:00	54,4	62,77	22,8	71,29	1177,12	24,3	17	22,8
13:30	61,3	61,89	20,3	69,23	1135,19	24	17	20,9

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Teşekkür

Makale değerlendirme süreci için bu bölüm boş bırakılmalıdır.

Yazar katkılarının beyanı

Makale değerlendirme süreci için bu bölüm boş bırakılmalıdır.

Kaynaklar

- [1] Keven, A., Karaali, R. Investigation of an alternative fuel for diesel engines. *Acta Physica Polonica A*, vol.128, no:2B, 2015, pp:282 – 286. DOI: 10.12693/AP-hysPolA.128.B-282
- [2] Karaali Rabi, Keven Arzu, “Analysis of Some Tribological Properties of Hazelnut Oil in Gasoline Engines”, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, -vol.15, no:1, pp:75 - 83, 2022
- Karaali, R., Keven, A. Evaluation of four different cogeneration cycles by using some criteria. *Applied Rheology* 2022; 32: 122–137. <https://doi.org/10.1515/arh-2022-0128>
- Atasbak M., Karaali R., Keven A (2022). Exergy analyses of two and three stage cryogenic cycles. *Applied Rheology*, 32;194 – 204. DOI: 10.1515/arh-2022-0134
- Yılmaz Metin, Cimşit Canan, Keven Arzu, Karaali Rabi, “Energy, Exergy, Environmental, and Enviroeconomic (4e) Analysis of Cascade Vapor Compression Refrigeration Systems Using Nanorefrigerants”, *Energy Reports*, Q2, vol.12, pp:5521 - 5528, 2024
- Yılmaz Metin, Cimşit Canan, Keven Arzu, Karaali Rabi, “Analysis of Cascade Vapor Compression Refrigeration System Using Nanorefrigerants: Energy, Exergy, and Environmental (3e)”, *Case Studies in Thermal Engineering*. Vol.57, pp:1 - 10, 2024
- Keven Arzu, Karaali Rabi, “Exergetic Analyses of Air-Fuel Preheated Cogeneration Plants in Food Production”, *BIO Web of Conferences*, vol.85, pp:1 - 4, 2024
- Karaali Rabi, Keven Arzu, “Performance Analyses of Basic Cogeneration Basic Cogeneration Plants in Agriculture and Food Production”, *BIO Web of Conferences*, vol.85, pp:1 - 4, 2024
- Karaali Rabi, Keven Arzu, “Performance Analysis of Air Fuel Heating Effects on Cogeneration Cycles”, *European Journal of Science and Technology*, no:43, pp:91 - 96, 2022
- [3] Karaali Rabi, Keven Arzu, “Exergy Analysis of Inlet Air Absorption Cooling Effects on Basic Cogeneration Systems”, *European Journal of Science and Technology*, -no:43, pp:97 - 103, 2022
- [4] Düz İsmahan, Güner Sait Barış, Erdem Özge, Demir İmren, Kapucu Volkan, Çelik Şükrü, Öztürk Kemal, Md Shahriar A. Hossain, Gencer Ali, Yanmaz Ekrem, “-Comparison of Levitation Forces of Bulk MgB₂ Superconductors Produced by Nano Boron and Carbon-Doped Nano Boron”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Q4, vol.27, no:10, pp:2241 - 2247, 2014
- [5] Erdem Özge, Abdioğlu Murat, Güner Sait Barış, Çelik Şükrü, Küçükömeroğlu Tayfur, “Improvement in Levitation Force Performance of Bulk MgB₂ Superconductors Through Coronene Powder Adding”, *Journal of Alloys and Compounds*, Q1, vol.727, pp:1213 - 1220, 2017
- [6] Abdioğlu Murat, Kabaer Mehmet, Öztürk Kemal, Erdem Özge, Çelik Şükrü, “La-

teral Position Effect of Auxiliary Permanent Magnets on the Magnetic Force Properties of Cylindrical Ybco“,Journal of Superconductivity and Novel Magnetism,Q4,vol.30,no:10,pp:2933 - 2938, 2017

- [7] Erdem Özge, Yanmaz Ekrem,“Effect of Laser İrradiation on Activation Energy, İrreversibility Field and Upper Critical Magnetic Field of Bulk Mgb2 Superconductor“,Journal of Materials Science: Materials in Electronics,Q2,vol.27,-no:6,pp:6502 - 6510, 2016
- [8] Erdem Özge, Abdioğlu Murat, Aydoğdu Yıldırım, Yanmaz Ekrem,“Production of Ni Ti Shape Memory Alloys and Their Properties“,Balkan Physics Letters,-vol.20,no:201020,pp:173 - 180, 2012
- [9] Keskinçilç, S. 2019. Yenilenebilir Enerji- Ekonomik Büyüme İlişkisi Türkiye Örneği. Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s, Karaman.
- [10] Alcan, Y., Demir, M., Duman, S. 2018. Sinop İliin Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyelinin Ülkemiz ve Almanya ile Karşılaştırılarak İncelenmesi, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 5, s. 35-44. DOI: 10.31202/ecj-se.340459
- [11] Öztürk, H., Kaya, D. 2019. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Fotovoltaik Teknoloji. Umuttepe Yayınları, Kocaeli, 531 s.
- [12] Barbu, M., Darie, G., Siroux, M. 2020. A Parametric Study Of A Hybrid Photovoltaic Thermal (PVT) System Coupler With a Domestic Hot Water (DHW) Storage Tank, University Politehnica of Bucharest, Energies, Cilt. 13, s. 6481. DOI:10.3390/en13246481
- [13] Gül, M., Akyüz, E. 2019. Fotovoltaik-termal (PV/T) Bir Sistemin Deneysel Performansının İncelenmesi. BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, Cilt. 21, s. 444-458. DOI: 10.25092/baunfbed.548728
- [14] Kabul, A., Duran, F., 2014. Isparta İlinde Fotovoltaik/Termal (PV/T) Hibrit Sistemin Performans Analizi. SDU International Technologic Science, Cilt. 6, s .31-43.

BÖLÜM 13

MAKİNE ÖĞRENMESİ MODELLERİ İLE KOMBİNE ÇEVİRİMLİ ELEKTRİK SANTRALİ İÇİN ELEKTRİK ÜRETİMİ TAHMİNİ VE OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI

Mücahit Emin KARAGÖZ¹

Barış KAVASOĞULLARI²

Kemal ADEM³

1 Araş. Gör.; Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, mucahitkaragoz@sivas.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-6503-9518

2 Dr. Öğr. Üyesi; Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Mühendisliği Bölümü, bkavasogullari@sivas.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-6086-8923

3 Doç. Dr., Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, kemaladem@cumhuriyet.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-3752-7354

1. Giriş

Son yıllarda, kombine çevrimli elektrik santralleri yakıt ısıtmasındaki azalmayla artan verimlilikleri nedeniyle popülerlik kazanmıştır. Yakıtın düşük ısıl değeri nedeniyle, kullanılan elektrik santrallerinin çoğu genellikle yaklaşık %47 gibi düşük bir verimliliğe sahiptir (Eriksen, 2017). Son yıllarda, yapay zekâ ve enerji çalışmalarını birleştiren çok sayıda çalışma daha verimli, sürdürülebilir ve çevre dostu elektrik üretimi elde etmek için iki ana alana odaklanmıştır. Birincisi, günlük elektrik üretimi için güvenilir değerlendirme modelleri geliştirmek. Bu modelin kullanımı aşırı elektrik üretimini önlemek için iyi bir alternatiftir. İkincisi ise elektrik talebi için doğru tahmin modelleri oluşturmak. Elektrik üretimini ve tüketimini iyi bir şekilde uyumlu hale getirmek için ciddi bir avantaja sahiptir. Geleneksel yöntemler, gerçek mühendislik problemlerini çözmek için çok sayıda varsayım gerektirir. Bu varsayımlar olmadan, bu tür problemlerin çözümleri son derece zaman alıcı ve karmaşık birçok denklemi barındırır. Yapay zekâ uygulamaları, son gelişmeler ışığında bu zorlukların üstesinden gelmeye yardımcı olabilir. Makine öğrenimi yaklaşımları, özellikle regresyon uygulamalarında, geleneksel yöntemlere alternatif olarak yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çözülmesi zaman alan ve keyfi başlangıç ve ortam koşullarına sahip sistemleri analiz etmede ciddi avantajlar sağlamaktadır (Kesgin ve Heperkan, 2005).

Gerçek değere yakın bir değer tahmin etmeye regresyon denir ve bu, makine öğreniminde yaygın olarak çalışılan bir konudur. Makine öğreniminde, algoritmalar sistem yanıtlarını modellemek ve sayısal veya gerçek değerli hedef özelliklerin tahminini sağlamak için kullanılır. Makine öğrenimi yaklaşımları, tahmin modelleri geliştirmek için birçok gerçek probleme uygulanabilmektedir (Güvenir, 2000).

Bu çalışmada, bir kombine çevrimli elektrik santralinin elektrik üretimini tahmin etmek için makine öğrenimi yöntemleri uygulanmıştır. Kombine çevrimli elektrik santrali iki gaz türbini, bir buhar türbini ve iki atık ısı geri kazanım sisteminden oluşmaktadır (Tüfekçi, 2014). Verimli ve ekonomik bir işlem sağlamak için elektrik üretimi tam yükte doğru bir şekilde tahmin edilmelidir. Bir elektrik santralinin elektrik üretimi büyük ölçüde ortam sıcaklığına, ortam basıncına ve bağıl neme bağlıdır. Bir türbinin güç üretimi çıkıştaki ortam koşullarına da bağlıdır. Literatürde, yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak ortam koşullarının etkileri araştırılmıştır. Kesgin ve Heperkan (2005) ve Kaya, Tüfekçi ve Gürgeç (2012) tarafından yapılan çalışmalarda, elektrik üretimini tahmin etmek için bir YSA modeli geliştirmek amacıyla santrallerden ölçülen veriler analiz edilmiştir. Analiz sırasında ortam basıncı, ortam sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgâr hızı gibi değişkenler dikkate alınmıştır. Rahnema, Ghorbani ve Montazeri (2012), farklı çalışma noktalarında ve tüm yük aralıklarında gaz türbinlerinin davranışını tahmin etmek için YSA tabanlı bir teknik önermiştir. Refan, Taghavi ve Afshar (2012), başlangıç aşamasında gaz türbinlerinin

davranışını modellemek için Çok Katmanlı Algılama (MLP) ve Radyal Baz Fonksiyonu (RBF) ağlarını kullandı. Ek olarak, Kumar, Srivastava, Banerjee ve Goel (2012), YSA modellerinin performans analizi ve anormallik tespiti için gaz türbinlerine uygulanmasının güvenilir olduğunu gösterdi.

Bu çalışmada, bir kombine çevrimli elektrik santralının elektrik üretimini tahmin etmek için çeşitli makine öğrenimi yöntemleri uygulandı. Daha sonra, modelin doğruluğunu artırmak ve Kök Ortalama Kare Hatasını (RMSE) azaltmak için Bayes optimizasyonu (BayesOpt) kullanıldı.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Veri seti

Veri seti, tam yükte çalışan bir kombine çevrimli elektrik santralinden 9568 veri noktasını içerir. Veri seti, ortam değişkenlerinin saatlik ortalamaları olarak farklı özelliklerden oluşur: sıcaklık (T), ortam basıncı (AP), bağıl nem (RH) ve egzoz havası vakumu (V). Bu özellikler, saatlik net elektrik üretimini (EP) tahmin eder. Bir santralin verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için tek bir çevrimde gaz türbinleri, buhar türbinleri ve atık ısı buhar jeneratörlerini içerir. Elektrik, gaz ve buhar türbinlerinin birlikte çalışması ve aralarında enerji aktarmasıyla üretilir. Ortam koşulları, buhar türbininin ve gaz türbininin performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Tüfekçi, 2014).

2.2. Makine Öğrenme Yöntemleri

2.2.1. Ensemble Tree, Bagged

“Ensemble Bagging Tree”, karar ağaçlarını kolektif öğrenme ve “bagging” ile birleştiren bir makine öğrenme yöntemidir. Bu teknik, aşırı uyum ve eğitim verilerindeki değişikliklere duyarlılık gibi bireysel karar ağacı modellerinde bulunan sınırlamaları ele alır (Ruiz-Abellón, Gabaldón ve Guillaumon, 2018).

Kolektif öğrenme: Bu yaklaşımda, birden fazla model (genellikle karar ağaçları) aynı anda eğitilir. Çeşitliliklerinden yararlanarak, bu modeller tahminlerin doğruluğunu ve sağlamlığını iyileştirmek için birlikte çalışır.

Karar Ağaçları: Temel modeller olarak hizmet veren karar ağaçları, tahminlerde bulunmak için girdi alanını özellik değerlerine göre yinelemeli olarak böler. Etkili olsa da karar ağaçları aşırı uyuma eğilimlidir ve gerçek sinyal yerine eğitim verilerinden gelen gürültüyü yakalar.

Bagging (Bootstrap Toplama): Bagging, eğitim verilerinin çeşitli alt kümelerini oluşturan bir yeniden örnekleme tekniği olan önyüklemeyi kullanır. Her karar ağacı benzersiz bir önyükleme örneği üzerinde eğitilir. Daha sonra bireysel ağaçlardan gelen tahminler, genellikle ortalama alma (regresyon görevleri için) veya oylama (sınıflandırma görevleri için) yoluyla toplanır ve nihai çıktı üretilir.

Karar ağaçları, kolektif öğrenme ve bagging kombinasyonu, öngörü doğruluğunu artırır, farklılıkları azaltır ve aşırı uyum riskini azaltır.

2.2.2. Gaussian Process Regression, Exponential GPR

“Gaussian Process Regression” (GPR), bilinmeyen işlevleri modellemek, keşfetmek ve kullanmak için tasarlanmış makine öğreniminde parametrik olmayan bir Bayes tekniğidir. GPR, işlevler üzerinde dağılımlar üreterek keşif ve kullanım gerektiren senaryolarda özellikle değerlidir. Girdiler ve çıktılar arasındaki karmaşık ilişkileri yakalar ve bu da onu bilinmeyen işlevleri modellemek için güçlü bir araç haline getirir. Ek olarak, GPR aktif öğrenmeyi ve optimizasyonu kolaylaştırır ve getirileri en üst düzeye çıkaran girdilerin etkili bir şekilde tanımlanmasını sağlar (Schulz, Speekenbrink ve Krause, 2018).

“Exponential GPR”, “Square Exponential GPR” ile yakından ilişkili olan GPR’in bir çeşididir. Birincil ayrım, Öklid mesafesi (Euclidean Distance) nasıl işlendiği konusundadır; Exponential GPR, Öklid mesafesini karelemez. Bunun yerine, Square Exponential GPR’dekilerden daha az hızlı çekirdekler kullanılır ve temel fonksiyonların iç ürünlerini değiştirir. Bu, Exponential GPR’yi özellikle minimum hatayla düzgün fonksiyonları yönetmede başarılı kılar. Ancak kesintili fonksiyonlara uygulandığında performansı daha zayıf olduğu için zorlanmaktadır (Zhang, Xiong, Zhong ve Leatham, 2018).

2.2.3. Bayesian Optimization

BayesOpt, değerlendirilmesi işlemciyi zorlayan veya zaman alıcı olan hedef fonksiyonlarını optimize etmek için tasarlanmış bir tekniktir. Özellikle 20’den az boyuta sahip kesintisiz alanların optimizasyonu için etkilidir. BayesOpt, özellikle pahalı, kara kutu, türevsiz fonksiyonları içeren durumlarda, kapsayıcı optimizasyonlar için uyarlanmış bir yöntemdir. Bu yaklaşım, hiper parametre ayarlaması için makine öğrenimi, mühendislik sistemi tasarımı, malzeme tasarımı, model kalibrasyonu ve destekli öğrenme dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Süreç, belirsizliği ölçmeye yardımcı olan GPR yoluyla bir muadil model oluşturmayı ve yeni örneklerin seçimini kolaylaştırmak için bir kazanım fonksiyonu kullanmaktadır (Frazier, 2018).

3. Sonuçlar ve Tartışma

Veri seti, tam yükte çalışan bir kombine çevrimli elektrik santralinden alınan 9568 veri noktasını içermektedir. Veri seti, ortam fiziksel özelliklerinin saatlik ortalamalarından oluşmaktadır: sıcaklık (T), ortam basıncı (AP), bağıl nem (RH) ve egzoz havası vakumu (V). Bu özellikler kullanılarak saatlik net elektrik üretimi (EP) tahminlenmektedir. İlk olarak, bir kombine çevrimli elektrik santralinin elektrik üretimini tespit edebilmek için farklı makine öğrenimi regresyon yöntemleri uygulandı. Daha sonra, modelin doğruluğunu artırmak ve RMSE’yi azaltmak için, optimizasyon yöntemlerinden biri olan,

BayesOpt modele uygulandı.

İşleme başlamadan önce, çapraz doğrulama değeri 10 olarak belirlendi ve çalışmanın ilk aşamasında 10 farklı regresyon modeli eğitildi. Regresyon yöntemlerinin eğitilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de de görüldüğü üzere, Bagged Tree ve Exponential GPR tüm yöntemler arasında en yüksek doğruluğa sahip oldukları görülmektedir. RMSE değerleri, Bagged Tree ve Exponential GPR için sırasıyla 3,4661 ve 3,55852'dir. Bu iki yöntem tahminleme performansı arasındaki fark dikkat değer bir seviyede değil ancak Tablo 1'de görüldüğü gibi, Bagged Tree, Exponential GPR'ye göre 21 kat daha az eğitim süresine sahiptir.

Tablo 1. Tahminleme yöntemleri için sonuçlar

	RMSE	R-Kare	MSE	MAE	MAPE, %	Tahmin Hızı, obs/s	Eğitim Süresi, s
Ensemble, Bagged Tree	3,4661	0,96	12,014	2,5037	0,6	39000	11,049
Gaussian Process Regression, Exponential GPR	3,5585	0,96	12,663	2,5931	0,6	17000	232,24
SVM, Fine Gaussian SVM	3,7178	0,95	13,822	2,6859	0,6	71000	33,905
Gaussian Process Regression, Rational Quadratic GPR	3,9312	0,95	15,454	2,9871	0,7	14000	353,48
Gaussian Process Regression, Matern 5/2 GPR	3,9332	0,95	15,47	2,9898	0,7	13000	207,98
Tree, Medium Tree	3,9537	0,95	15,632	2,8985	0,6	160000	2,1353
Tree, Fine Tree	3,9613	0,95	15,692	2,7993	0,6	150000	2,2897
SVM, Medium Gaussian SVM	3,9915	0,95	15,932	3,0164	0,7	42000	19,2
Gaussian Process Regression, Squared Exponential GPR	4,0762	0,94	16,615	3,1415	0,7	18000	211,48
Tree, Coarse Tree	4,091	0,94	16,737	3,0781	0,7	180000	1,8438

Çalışmanın ikinci aşamasında ise doğruluk değeri artırmaq için BayesOpt ve başka optimizasyon yöntemleri uygulandı. En yüksek doğruluğu sağlayan optimizasyon yönteminin sonuçları ve en başarılı iki regresyon yönteminin sonuçlarıyla birlikte Tablo 2’de verilmiştir. Bu çalışmada üç farklı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. “The Random Search Method” doğruluğu artırmak yerine azaltmış ve “The Grid Search Method” çalışması ise bir haftadan fazla sürmesine karşın veri seti kümesi boyutunun büyük olması nedeniyle tamamlanamamıştır. Buna karşın, BayesOpt optimizasyon yöntemi, özellikle 50 olmak üzere nispeten az sayıda iterasyon ile doğruluğu önemli ölçüde iyileştirmiştir. BayesOpt GPR kullanılarak RMSE değeri 2,6566 değerine düşürülebilmıştır.

Tablo 2. Tahminleme ve optimizasyon yöntemlerinin sonuçları

	Optimizasyon	RMSE	R-Kare	MSE	MAE	MAPE, %	Tahmin Hızı, obs/s	Eğitim Süresi, s
Ensemble, Bagged Tree	Yok	3,4661	0,96	12,014	2,5037	0,6	39000	11,049
Gaussian Process Regression, Exponential GPR		3,5585	0,96	12,663	2,5931	0,6	17000	232,24
Gaussian Process Regression	BayesOpt	2,6566	0,98	7,106	1,7241	0,4	7300	60513
Ensemble		5,2254	0,91	27,305	4,0393	0,9	290000	104,36

Tablo 1 ve Tablo 2 incelendiğinde görüleceği üzere optimizasyon uygulanmış modelin doğruluğu ciddi ölçüde artmıştır. Günümüzde, fosil yakıtların azalması ve fosil yakıt kullanımının çevreye olan olumsuz etkileri nedeniyle elektrik üretimi alanında farklı elektrik üretim yöntemleri üzerine çok fazla çalışma yapılmaktadır. Ancak güneş enerji santralleri, rüzgâr türbinleri vb. gibi süreksiz enerji üretim yöntemleri iyi bir alternatif olarak görölse de verimli ve ekonomik enerji depolama sistemlerine sahip olana kadar etkin enerji üretim yöntemlerine olan ihtiyacımız gözle görülür seviyede azalmayacaktır ve bu bağlamda, sahip olduğumuz enerji üretim santrallerinin verimliliğinin en üst seviyeye çıkarılması ve operasyonel kayıpların ve çevre koşulları nedeniyle gerçekleşen aşırı enerji üretimin en aza indirilmesi sürdürülebilir bir çevre için önem arz etmektedir. Aşırı enerji üretimini düşürmek için dikkat etmemiz gereken diğer bir şey ise enerji üretimi ve tüketimi arasında bir bağlantı kurularak, üretimin ve tüketimin bir dengede tutulmasıdır. Bu amaç doğrultusunda makine öğrenimi gibi yüksek doğruluğa sahip tahminleme yöntemlerinden faydalanmak, karşılaşacağımız problemlerde bizlere kolaylık

sağlayacaktır. Yüksek doğruluklu tahminler daha başarılı enerji üretim yönetimini mümkün kılar ve potansiyel olarak sera gazları etkisini, hava kirliliğini ve küresel ısınmayı azaltmakla birlikte, elektrik üretiminin ve tüketiminin daha ekonomik olmasını sağlar.

4. Sonuç

Bu çalışmada, bir kombine çevrimli elektrik santralının elektrik üretimini tahmin etmek için çeşitli makine öğrenimi yöntemleri uygulanmıştır. Daha sonra, modelin doğruluğunu artırmak ve RMSE'yi azaltmak için farklı optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Sonuçlar, en düşük RMSE değerinin 3,4661 olduğunu ve bu değer “Ensemble, Bagged Tree” modeli kullanıldığında elde edildiğini göstermektedir. Ancak, BayesOpt optimizasyon yöntemi uygulandıktan sonra, “Ensemble” yöntemi için RMSE 5,2254'e yükselirken, GPR yöntemi için RMSE 3,5585'ten 2,6566'ya düştüğü görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda BayesOpt optimizasyon yönteminin modelin performansını iyileştirmedeki etkinliği görülmektedir.

5. Kaynakça

- Eriksen, V. L. (Ed.). (2017). *Heat recovery steam generator technology*. Woodhead Publishing.
- Kesgin U, Heperkan H. Simulation of thermodynamic systems using softcomputing techniques. *Int J Energy Res* 2005;29:581–611.
- Güvenir HA. Regression on feature projections. *Knowl-Based Syst* 2000;13:207–14.
- Tüfekci, P. (2014). Prediction of full load electrical power output of a base load operated combined cycle power plant using machine learning methods. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 60, 126-140.
- Kaya H, Tüfekci P, Gürgen FS. Local and global learning methods for predicting power of a combined gas & steam turbine. In: *International conference on emerging trends in computer and electronics engineering (ICETCEE'2012)*, Dubai, March 24–25, 2012.
- Rahnama M, Ghorbani H, Montazeri A. Nonlinear identification of a gas turbine system in transient operation mode using neural network. In: *4th Conference on thermal power plants (CTPP)*, IEEE Xplore; 2012.
- Refan MH, Taghavi SH, Afshar A. Identification of heavy duty gas turbine startup mode by neural networks. In: *4th Conference on thermal power plants (CTPP)*, IEEE Xplore; 2012.
- Kumar A, Srivastava A, Banerjee A, Goel A. Performance based anomaly detection analysis of a gas turbine engine by artificial neural network approach. In: *Proceed. annual conference of the prognostics and health management society*; 2012.
- Ruiz-Abellón, M. D. C., Gabaldón, A., & Guillamón, A. (2018). Load forecasting for a campus university using ensemble methods based on regression trees. *Energies*, 11(8), 2038.
- Schulz, E., Speekenbrink, M., & Krause, A. (2018). A tutorial on Gaussian process regression: Modelling, exploring, and exploiting functions. *Journal of Mathematical Psychology*, 85, 1-16.
- Zhang, N., Xiong, J., Zhong, J., & Leatham, K. (2018, June). Gaussian process regression method for classification for high-dimensional data with limited samples. In *2018 Eighth International Conference on Information science and technology (ICIST)* (pp. 358-363). IEEE.
- Frazier, P. I. (2018). A tutorial on Bayesian optimization. *arXiv preprint arXiv:1807.02811*.

BÖLÜM 1

ALÜMİNYUM TEMELLİ İŞLEMELERDE TALAŞ AÇISI VE KESME HIZININ YİĞİNTİ TALAŞ VE YİĞİNTİ KATMANI OLUŞTURMASI ÜZERİNE ETKİLERİ

Ulaş İPEKOĞLU¹

Can COŞKUN²

Zuhal OKTAY³

1 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye,
ulas.ipekoglu@gmail.com, 2217104006@std.idu.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0003-3738-4722>

2 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye,
dr.can.coskun@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>

3 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye,
zuhal.oktay@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>

1. GENEL BİLGİLER

1. Yapısal Alüminyum Alaşımları

Yapısal alaşımlar, yüksek mekanik özellikler sunduğu için çoğunlukla mühendislik uygulamaları için tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımlar çeşitli işlem teknikleriyle şekillendirilebilmektedir. Bu işlem tekniklerinin başında da ısıtılma işlemi teknikleri gelmektedir. Yapısal alüminyum alaşımlarının başlıca türlerinin aşağıdaki biçimde sunulması mümkündür.

1.1. Seri 1xxx (Saf alüminyum): Saf alüminyum alaşımları olarak nitelendirilmektedir. Çoğunlukla %99.00 veya üzeri alüminyum içermektedirler. Bu seri oldukça iyi korozyon direnci ve işlenebilirlik sunmaktadır. Ancak bunun yanında mekanik özellikleri daha düşük seviyededir. Bu seri genellikle elektrik ve yapı malzemeleri sektöründe tercih edilmektedir.

1.2. Seri 2xxx (Bakır içeren alüminyum alaşımları): Bu seri özellikle yüksek dayanıklılık ve sertlik gerektiren havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Yapısında bulunan bakır, bu seriye yüksek mukavemet ve aşınma direnci kazandırmaktadır. Ancak bu seri de korozyon direnci saf alüminyuma göre daha düşük seviyededir.

1.3. Seri 3xxx (Magnezyum ve Manganez içeren alüminyum alaşımları): Bu seri iyi bir korozyon direnci, işlenebilirlik ve orta düzeyde mukavemet özellikleri sunmaktadır. Genellikle ısınmaya duyarlı uygulamalarda, özellikle ev aletleri ve beyaz eşya sektöründe, tercih edilmektedir.

1.4. Seri 5xxx (Magnezyum içeren alüminyum alaşımları): Bu seride alaşım içinde yer alan magnezyum, yüksek korozyon direnci ve iyi işlenebilirlik sağlamaktadır. Denizcilik, deniz taşımacılığı ve dış mekan uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.5. Seri 7xxx (Çinko içeren alüminyum alaşımları): Bu seri yüksek mukavemet özellikleri nedeniyle özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde tercih edilmektedir. Yüksek dayanıklılığa sahip olsalar da korozyon dirençleri bakır içeren alaşımlara göre daha düşük seviyededir.

1.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımları çoğunlukla döküm yöntemiyle şekillendirilmektedir. Döküm alüminyum alaşımları ağırlıklı olarak otomotiv parçaları ve makine imalatı gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Alüminyum döküm alaşımları aşağıdaki biçimde sunulabilmektedir.

1.2.1. Seri 2xx (Silisyum ve bakır içeren alüminyum alaşımları): Bu seri döküm işlemi için oldukça uygundur ve genellikle otomotiv motor parçaları gibi yüksek dayanıklılık ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır.

1.2.2. Seri 3xx (Silisyum içeren alüminyum alaşımları): Bu seri döküm işlemleri için en çok tercih edilen alüminyum alaşımıdır. Yüksek sıvı akışkanlığı ve düşük genleşme katsayısı sunar. Bu nedenle otomotiv ve diğer döküm endüstrilerinde ideal bir alüminyum alaşımı olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.2.3. Seri 7xx (Çinko içeren alüminyum alaşımları): Bu seri özellikle yüksek dayanıklılık gerektiren döküm parçalarında kullanımıyla bilinmektedir.

Alüminyum alaşımlarının kullanım alanları incelendiğinde geniş bir uygulama yelpazesinde sahip olduğu görülmektedir. Başlıca kullanım alanları aşağıdaki biçimde kısaca sunulabilir.

Otomotiv Sektörü: Alüminyum alaşımları; otomobillerde ağırlık azaltma, yakıt verimliliğini artırma ve dayanıklılığın artırılması amacıyla kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe özellikle motor parçaları, şasi, jantlar ve kaportalar alüminyum alaşımlarından üretilmektedir.

Havacılık ve Uzak Endüstrisi: Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle havacılıkta uçak gövdeleri, motorlar ve diğer bileşenlerde alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe kullanılan alaşımlar genellikle 2xxx ve 7xxx serileridir.

İnşaat ve Yapı Sektörü: Alüminyum; bina cepheleri, kapılar, pencereler ve çatı sistemleri gibi inşaat uygulamalarında çoklukla tercih edilmektedir. Korozyon direnci ve hafiflik alüminyum alaşımlarının bu alanda popüler olmasını sağlamaktadır.

Ambalaj Sektörü: Alüminyum alaşımları özellikle içecek kutuları, folyo ve diğer ambalaj malzemelerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlar yiyecek ve içecekleri uzun süre taze tutabilme özelliğine sahiptir.

Elektronik ve Elektrik Endüstrisi: Alüminyum, elektrik iletkenliği nedeniyle kablo ve elektrikli bileşenlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca alüminyumun iyi işlenebilirliği sayesinde elektronik cihazların gövdelerinde de kullanılmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Sekmen ve arkadaşları (Sekmen, M. ve arkadaşları, 2015) yaptıkları çalışmada takım talaş açısı ve kesme hızı parametrelerinin AA 2011 ve AA 7075 alüminyum alaşımlarının işlenmesi noktasında yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini analiz etmişlerdir. Takım talaş açısı ve kesme hızı seçimlerinin yığıntı katmanı ve yığıntı talaş arasındaki etkileşimleri değerlendirilmiştir. Testler sırasında kesici takıma hem negatif hem de pozitif açılar verilmiş ve talaş kaldırması sağlanmıştır. İncelenen iki alaşım için 15 ile 20 arasındaki talaş açısının büyük olduğu değerlerinde yüzey pürüzlülük değerleri düşük çık-

mıştır. Bunun tam tersine 0 ve -5 gibi talaş açısının düşük olduğu değerlerde özellikle AA 7075 alaşımında yüzey pürüzlülük değerleri büyük çıkmıştır. SEM ve EDS analizi gibi metalografik yöntemler kullanılarak kaplamasız karbür takım kullanımının talaş açısının ve alaşım içeriğinin yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşumu noktasındaki etkisi incelenmiştir. AA 2011 alaşımının, AA 7075 alaşımına göre daha az yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşturduğu gözlemlenmiştir. Talaş yüzeylerinde EDS analizleri yapılarak ana alüminyum alaşım elementlerinin yapışma aşınma mekanizmaları üzerinde tesciri analiz edilmiştir. Bu nedenle AA 2011 ve AA 7075 alüminyum alaşımlarının 10'a çıkartılıp bunun üzerine yaşlandırma ısıl işlemi uygulamışlardır. Isıl işlem sonrası ikincil faz parçacıklarının malzemenin sürekliliğini düşürerek talaş yapışmasını minimize edilebileceğini öngörmüşlerdir. Gökkaya ve Nalbant (Gökkaya ve Nalbant, 2006) yapmış oldukları çalışmada yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşumu noktasında kesme hızının etkisini incelemişlerdir. AA 5052 alaşımı bilgisayarlı sayısal denetimli torna tezgâhında ıslak olmayacak biçimde işlenmiştir. Bu işlem için kaplamasız karbür takım kullanılmıştır. İnceleme sırasında 100, 200, 300, 400, 500 m/dakika olacak biçimde 5 farklı kesme hızı kullanılmıştır. Parçanın işlenmesi sırasında 0.30 mm/devir sabit ilerleme hızı ve 1.5 mm sabit kesme derinliği seçilmiştir. Parçanın işlenmesi sonrasında ulaşılan en yüksek yığıntı katmanı ve yığıntı talaş miktarı 100 mm/dakika kesme hızı ve 0.30 mm/devir ilerleme hızında oluşmuştur. Kesme hızının yükseltilmesi yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşumunun azaltılması noktasında pozitif etki sağlamıştır. AA 5052 alaşımın işlenmesi sırasında eğer kaplaması karbür kesici takım seçilirse yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşmasını azaltmak ve/veya ortadan kaldırmak için 500 mm/dakika-dan daha yukarı kesme hızlarının tercih edilmesinin daha doğru olacağı ifade edilmektedir. Gökkaya ve Taşkesen (Gökkaya, ve Taşkesen, 2008) yapmış oldukları çalışmada farklı kesme ve besleme hızı koşulları altında alüminyum alaşımlarının takım aşınma seviyesi, yığıntı talaş oluşumu ve işleme verimliliği incelenmiştir. Çalışmada, farklı kesme hızları ve besleme hızlarının işleme yüzey kalitesi üzerine etkisi de irdelenmiştir. Yüksek kesme hızları genel perspektifte daha düşük yığıntı talaş oluşumuna yol açmıştır. Yüksek hızlar, kesici takımı üzerindeki ısının artmasına ve malzemenin daha düzgün bir şekilde kesilmesine neden olduğu görülmüştür. Çalışmada düşük kesme hızlarının yığıntı talaş oluşumunu ve takımın aşınma hızını artırdığını tespit etmişlerdir. Bu durum iş parçasının yüzey kalitesini de olumsuz etkiler ortaya çıkarabilmektedir. Artan besleme hızları takımın daha hızlı aşınmasına ve daha fazla yığıntı talaş oluşumuna neden olabilmektedir. Benzer şekilde düşük besleme hızlarında da yığıntı talaş oluşumu gözlemlenmektedir. Gerçek kullanım koşullarında ideal besleme hızı takım ömrünü uzatmak ve yüzey kalitesini arttırmak için dikkatlice seçilmelidir. Hem yüksek kesme hızı hem de uygun besleme hızı takım aşınmasını en aza indirirken yüzeyde daha iyi bir işleme kalitesi sunmaktadır. Düşük kesme hızları ve yüksek besleme hız-

ları kombinasyonu aşınmayı arttırarak takımın erken yorulmasına yol açmaktadır. Yüksek kesme hızları genellikle daha düşük yığıntı talaş oluşumu ve daha az aşınma ile ilişkilidir. Besleme hızının da dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Yüksek kesme hızları ve uygun beslenme hızları takım ömrünü arttırmak ve işleme verimliliğini yükseltmek için idealdir. Yığıntı talaş oluşumunu en aza indirmek için optimum kesme hızı ve besleme hızı kombinasyonunun belirlenmesi oldukça önemlidir. Fang ve arkadaşları (Fang ve arkadaşları, 2010) yapmış oldukları çalışmada 2024-T351 alüminyum alaşımın dikey işlenmesinde farklı kesme koşulları altında yığıntı talaş oluşumunu içeren kesme titreşimleri hem zaman hem de frekans temelinde analiz edilmişlerdir. Çalışma kapsamında ulaşılan deneysel veriler, kesme titreşimlerinin farklı desenlere sahip üç farklı yığıntı talaş bölgesine ayrıldığını göstermiştir. Bu üç bölgeden ilki yığıntı talaş bölgesidir. Bu bölgede yığın talaşın oluşmaya başlamakta ve titreşim genliğinin kesme hızının 0.8 ile 4 m/dak arasında değişmesiyle önemli ölçüde değiştiği kısımdır. İkinci bölge durağan yığıntı talaş bölgesi olup; yığıntı talaş oluşum sürecinin düzenli ve sürekli bir şekilde gerçekleştiği ve titreşim genliğinin 4 ile 20 m/dak arasında değiştiği bölgedir. Üçüncü bölge düzensiz yığıntı talaş bölgesidir. Bu bölgede titreşim genliğinin kesme hızı 20 ile 100 m/dk arasında değişmektedir. ANOVA analizinin sonuçları titreşim genliğinin kesme hızı ve besleme hızı değerinden etkilendiğini göstermiştir. Yapılan çalışmada kesme hızının oluşan toplam titreşim değerinin %53'üne, besleme hızı ise toplam titreşimin %33,3'üne sebep olduğu tespiti yapılmıştır. Çalışmada durağan ve düzensiz yığıntı talaş oluşumlarını ayırt etmek için bir istatistiksel araç olarak kurtosis (çarpıklık) kullanmanın mümkün olduğu ifade edilmiştir. Bu noktada örnek bir gösterimde çalışmada sunulmuştur. Kesme hızı arttıkça kurtosis değeri azalmakta ve 20m/dk değerinden sonra neredeyse sabit kalmaktadır. Besleme hızı 0,04 mm/dev üzerine çıktıkça kurtosis değerleri oldukça düşük bir değer olan ikinin altına düşmekte ve bu noktada neredeyse sabit kalmaktadır. Bilindiği üzere spektral analiz kullanılarak yapılan frekans analizi çeşitli frekans bileşenleri hakkında daha fazla bilgi edinmemize yardımcı olmaktadır. Sabit bir kesme hızı temelinde farklı besleme hızları için kesme enerjisi düşük olarak nitelendirebileceğimiz 0-3,5 kHz seviyesinde yoğunlaşmaktadır. Sabit beslenme hızı temelinde kesme hızı arttıkça kesme enerjisi yüksek olarak nitelendirebileceğimiz 3,5 kHz üzeri çıkmaktadır. Bican ve Pul (Bican ve Pul, 2021) yapmış oldukları çalışmada piyasada çoğunlukla tercih edilen Al7075, Al6061 ve Al2024 alüminyum alaşımları için tornalanmasında kesici takım aşınma davranışını, talaş şeklini ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Yapmış oldukları tüm deney sonuçlarında neredeyse tüm kesici takımlarda yığıntı talaş oluşumu meydana geldiği görülmüştür. Yığıntı talaş miktarları olarak bakıldığında üç alüminyum alaşım incelendiğinde en yüksek yığıntı talaş oluşumu Al2024'de, en düşük yığıntı talaş oluşumu Al7075'de meydana gelmiştir. Çalışmada kesme hızının artması ile yığıntı talaş miktarlarında

azalma görülmüştür. Kesici takımlarda düşük oranda da olsa yan yüzey aşınması tespit edilmiştir. Deneylerde, kısa helisel, uzun helisel, dolaşık ve kavisli bitişik olmak üzere 4 farklı talaş tipi olduğu gözlemlenmiştir. Al2024 alüminyum alaşımından yüzey pürüzlülüğü kesme hızı parametresinin artmasıyla azalırken Al6061 alımında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı görülmüştür. Kullanılan kesme parametrelerine göre parçaların işlenebilirliği noktasında Al7075 alüminyum alaşımın diğerlerine göre daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Yağmur ve arkadaşları (Yağmur ve arkadaşları, 2021) alüminyum alaşımlarının işlenmesinde sürekli talaş oluşumunun engellenmesi hedefi doğrultusunda çalışmalar yürütmüşlerdir. Talaş kırıcı formun etkisini görmek üzere çok kristalli elmas takımlar kullanılarak AA 6062 T4 alüminyum alaşımların işlenmesi noktasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri incelenmiştir. İşleme sırasında kullanılan kristalli elmas takımlar için değişik talaş kırıcı formlar tercih edilmiştir. Çalışmada talaş kırıcı formların oluşturulmasında lazer bileme yöntemi kullanılmıştır. İlerleme miktarı 0,14 mm/devir olacak biçimde sabit alınmıştır. 200 ve 400 m/dak olmak üzere iki farklı kesme hızı incelenmiştir. 0.02, 0.06, 0.1, 0.14, 0.2 ve 0.26 mm olmak üzere altı farklı kesme derinliği analiz edilmiştir. İstisnai birkaç kombinasyon dışında bütün takımlarda kesme derinliğinin artması sonucunda kesme kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmada en düşük kuvveti; 0,4 uyarı çapına sahip SPL-N kodlu takımda, 400 m/dak kesme hızında ve 0,26 mm kesme derinliğinde meydana gelmiştir. En yüksek kesme kuvveti 304 FN kodlu 0,4 mm uç yarı çapına sahip talaş kırıcısız takımda, 400 m/dak kesme hızında ve 0,26 mm kesme derinliğinde meydana oluşmuştur. Artan kesme hızlarının açık kaynaklardaki bilgilere paralel bir şekilde kesme kuvvetlerinde düşüşe yol açtığı gözlemlenmiştir. Kesme derinliği arttıkça talaş kırıcılığı ve talaş kırıcısız takımlarda kesme kuvveti değerleri birbirine yaklaştığı gözlemlenmiştir. Testler sonrasında elde edilen kesme kuvvetlerinin değerlendirildiğinde talaş kırıcı formuna kullanılan takımlarla daha düzenli bir dağılım olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda en düşük kesme kuvveti değerlerine talaş kırıcılığı takımlar ile yapılan deneylerde ulaşıldığı gözlenmiştir. Hekimoğlu ve Bayraktar (Hekimoğlu ve Bayraktar, 2022) yürüttükleri çalışmada %0,02, %0,1 ve %1 olmak üzere üç farklı oranlarda Stronsiyum (Sr) içeren 3 adet Al-12Si-Sr alaşımını kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilmiştir. Standart metalografik yöntemlerle kullanılarak imal edilen alaşımların iç yapıları tespit edilmiştir. Metalografik incelemelerde, Al-12Si-0,02Sr paylaşımlarının iç yapısının alfa ötektik alüminyum silisyum Al-Fe-Si gama fazları ile primer silisyum parçacıklarından oluştuğu gözlemlenmiştir. Al-12Si-0,1Sr alaşımının iç yapısının ise Al-12Si-0,02Sr alaşımında gözlenen fazlara ilave olarak Al-Si-Sr fazından oluştuğunu göstermiştir. Parçaların sertlik değerleri Brinell ölçüm yöntemiyle ve çekme dayanım değerleri ise çekme deneyi ile belirlenmiştir. Farklı Sr oranlarına sahip parçalar için kesme parametrelerinin işleme esnasında kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi ince-

lenmiştir. Yapılan çalışmada 200, 300 ve 400 m/dk olmak üzere üç farklı kesme hızı araştırılmıştır. 0.05; 0.1 ve 0.15 mm/dev olmak üzere üç farklı ilerleme incelenmiştir. CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN kaplamalı karbür kesici uç kullanılarak kesme derinliği 1,5 mm olacak biçimde sabit alınmıştır. Bu incelemede, Al-Si-Sr fazının büyümesine ve parçacıklarının adetinin artmasına stronsiyum oranı artışının sebep olduğu yaklaşımı ortaya konmuştur. İncelenen alüminyum alaşımlar noktasında en yüksek çekme dayanımı ve sertlik değerine Al-12Si-0,1Sr alaşımından ulaşılmıştır. Artan stronsiyum oranındaki artış alüminyum alaşımda kopma uzaması değerinde olumsuz bir etki sağlayarak azalmaya sebebiyet vermiştir. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü ile kesme hızı arasında ters bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun aksine ilerleme hızının artması kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün üzerinde olumlu etki sağlamıştır. Al-12Si-0.1Sr alaşımının işlenmesinde sürecinde en düşük yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri ölçümlenmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri değerler ise Al-12Si-0.02Sr alaşımın işlenmesi sürecinde rastlanmıştır. Çalışmada inceleme yapılan alüminyum alaşımların işlenmesinde sonrasında yığıntı talaş oluşumu meydana geldiği belirlenmiştir. Yığıntı talaş oluşumunu azaltmak için düşük ilerleme ve yüksek kesme hızı şartlarının sağlanmasının faydalı olabileceği ortaya konulmuştur. Al-12Si-0.1Sr alaşım işlenirken kesici uçta testlerde gözlemlenen en düşük yığıntı talaş oluşumu meydana gelmiştir. Al-12Si-0.02Sr alüminyum alaşımında ise bunun tam tersine yığın talaş oluşumun daha yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen alaşımların mekanik ve yapısal özellikleri detaylı bir biçimde analiz edilmiştir. Çalışmada farklı alaşımları A, B ve C şeklinde isimlendirmişlerdir. Bu isimlendirme Al-12Si alaşımının stronsiyum oranıyla ilgili bir isimlendirmedir. A alaşımı Al-12Si alaşımına %0,1 oranında Sr ilavesi yapılmış alaşım, B alaşımı Al-12Si alaşımına %0,02 Sr ilave edilmiş alaşım ve C alaşımı Al-12Si alaşımına %1 oranında Sr ilavesi ile oluşturulmuş alaşımdır. Yaptıkları çalışmalar neticesinde A ile ifade edilen alaşım Al-Sr-Si (Al₄Sr) fazını, intermetalik Al-Fe-Si fazları, ötektik alüminyum silisyum ve primer silisyum parçacıklarından oluşmaktadır. A alaşımındaki Al-Sr-Si (Al₄Sr) faz parçacıkları C alaşımının iç yapısındakine göre daha ince bir şekle sahiptir ve daha azdır. Üç alaşım göz önüne alındığında içerisinde en yüksek mukavemet ve sertlik değeri A alaşımında gözlemlenmiştir. B alaşımı, üç alaşım içerisinde en yüksek kopma uzaması değerine ulaşmıştır. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri, kesme hızı ile ters bir değişim gösterirken ilerleme ile doğru bir değişim göstermiştir. Sabit kesme şartları altında A alaşımının işlenmesi sonucunda testler sırasında oluşan en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşılrken en yüksek değerler C alaşımında ulaşılmıştır. Yüksek kesme hızını yükseltmek ve ilerlemeyi düşürmek yığıntı talaş oluşumunu azalttığı belirlenmiştir. Yığıntı talaş oluşumu azalmış olsa da yine de işleme esnasında kesici kenarda yığıntı talaş oluşmuştur. Deneylerde en düşük yığıntı talaş oluşumu A alaşımında tespit edilirken en yük-

sek yığıntı talaş oluşumu ise B alaşımında tespit edilmiştir. Ulaş (Ulaş, 2019) yapmış olduğu çalışmada AA 6061 alüminyum alaşımın işlenebilirliğini, Varyans analizi ve Taguchi metodu kullanarak değerlendirmiştir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde işleme parametrelerinin etkilerini araştırarak optimum işleme şartlarının belirlenmesini amaçlamıştır. Bu sebeple işleme parametresi olarak 0.4 mm ve 0.8mm olmak üzere farklı iki kesici takım uç yarıçapı kullanılmıştır. Çalışmada 200,260 ve 320 m/dakika olmak üzere üç farklı kesme hızı dikkate alınmıştır. Deneyler sırasında 0.1, 0.15 ve 0.2 mm/dev olmak üzere üç farklı ilerleme miktarı denenmiştir. 1, 1.5, 2 mm olmak üzere üç farklı talaş derinliği seçilmiştir. Çalışmada deneyler Taguchi L18 (21X33) dizinine göre tasarlanmıştır. Deneyleri ıslak kesme şartları olmadan CNC torna tezgâhında yapılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile istatistiksel analiz sonuçları karşılaştırmış ve birbirlerini destekler nitelikte olduklarına karar vermiştir. Deney sonuçlarına göre ilerleme miktarı yüzey pürüzlülüğü noktasında en etkin parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Etki oranı %68.47 seviyesinde ölçülmüştür. AA 6061 alüminyum alaşım için yapılan denemeler sonucunda optimum yüzey pürüzlülüğü için kesici takım uç yarıçapı 0.8mm, kesme hızı 320 m/dk, ilerleme miktarı 0.1 mm/dev ve talaş derinliği 1.5 mm olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. Elde edilen veriler doğrultusunda optimum yüzey pürüzlülük değeri 0.937 mikrometre olarak ölçülmüştür. 0.8 mm ve 0.4 mm kesici uç yarıçapına sahip takımlarla yapılan deneylerde elde edilen verilere göre yüzey pürüzlülüğü değeri 0.8 mm kesici uç yarıçapı için daha düşük seviyededir. Hekimoğlu ve arkadaşları (Hekimoğlu ve arkadaşları, 2018) yapmış oldukları çalışmada %99.8 saflıkta alüminyum ve çinko elementlerini kullanarak Al-35Zn alüminyum alaşımı üretmişlerdir. Ergitme sürecinde orta frekans indüksiyon ocağı kullanılmışlardır. İndüksiyon ocağından çıkan sıvı metal kokil bir kalıba dökülmüştür. Çalışmada farklı kesme hızı ve ilerleme değerlerinin frezeleme işlemindeki işlenebilirlik üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada 600, 1200, 1800 dev/dak olmak üzere üç farklı kesme hızı dikkate alınmıştır. Deneyler sırasında 0.05, 0.1, 0.15 mm/diş olmak üzere üç farklı ilerleme miktarı denenmiştir. 1.5 mm talaş derinliği seçilmiştir. Çalışmada işleme deneyleri 6 mm çapa sahip TiAlN kaplamalı ve kaplamasız iki ayrı kesici takım ile frezeleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri ölçülen temel kriterler olarak değerleri dikkate alınmıştır. İşleme esnasında kesici takımlarda meydana gelen aşınma Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile görüntülenerek gerekli analizler yapılmıştır. TiAlN kaplamalı ve kaplamasız iki ayrı kesici takım ile yaptıkları deneyler sonucunda kesme hızının artmasının olumlu bir etki olarak yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetlerinin azalmasını sağladığı görülmüştür. Bunun tersine ilerlemenin artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit etmişlerdir. Hem kesme kuvveti değeri hem de işleme sonucundaki yüzey kalitesi bakımından kaplamasız karbür kesici takımların Al-35Zn alaşımının frezelenmesinde daha iyi bir

performans gösterdiği görülmüştür. Deneylerin sonuçlarına göre Al-35Zn alaşımının içyapısı alüminyumca zengin dendritik alfa fazı ve çinkoca zengin dendritler arası χ fazından oluşmaktadır. Kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile yapılan kesme işleminde kesme hızının artmasıyla kesmek kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri azalmaktadır. Kaplamasız ve TiAlN Kaplamalı takımlar ile yapılan kesme işleminde kesme hızının artmasıyla yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu azalmaktadır. Al-35Zn alaşımının frezelenmesi sırasında ilerleme oranı arttıkça kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. TiAlN kaplamalı takımlar aynı kesme koşullarında kaplamasız takımlara göre daha yüksek kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ile yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumuna sebep olmaktadır. Yaman ve Tekiner (Yaman ve Tekiner, 2024) yaptıkları çalışmada, kesme derinliği ve ilerleme hızını sabit tutarak kesme hızının yığıntı kenar oluşum mekanizması ve işleme sonrası oluşan talaş morfolojisine olan etkilerini detaylı bir şekilde ele almışlardır. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar sonucunda, kesme hızının yığıntı kenar oluşumunu ve oluşan talaş morfolojisini doğrudan etkilediğini gözlemlemişlerdir. Etkinin boyutu, talaş morfolojisi ve yığıntı kenarın oluşumuyla ilgili detayları, taramalı elektron mikroskop fotoğrafları üzerinden karşılaştırılarak değerlendirmiştir. Aynı zamanda çalışmada, kesme sırasında tezgah monitöründen okunan kesme kuvveti değeriyle kesme hızının ilişkisi de irdelemişlerdir. 0,2 mm/dev sabit ilerleme hızı koşulları altında, minimum yığıntı talaş oluşumunun 150 m/dk kesme hızında gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Kesme hızındaki artış yığıntı talaş oluşumunu ve dolayısıyla yığıntı talaş aşınmasını azaltmıştır. Elde ettikleri çıktılar literatürdeki benzer çalışmalarla tutarlılık arz etmektedir. Kesme hızının 130 m/dk'dan 150 m/dk'ya çıkarılmasının talaşların malzeme üzerinde daha düzgün akmasını kolaylaştırdığını ve bunun sonucunda sürekli talaş kıvrılma yarıçapının 1,58 mm'den 1,20 mm'ye düştüğünü belirlemişlerdir. 0,2 mm/devir sabit ilerleme hızında kesme hızı 130 m/dk'dan 150 m/dk'ya çıkarıldığında ortalama yüzey pürüzlülüğünün 2,880 μm değerinden 2,188 μm 'ye düştüğünü gözlemlemişlerdir. CNC makine eksenlerindeki kuvvetleri analiz ederek kesme hızının 130 m/dak'dan 150 m/dak'ya çıkarılmasıyla kesme kuvvetinin yaklaşık olarak %35'ten %23'e düşmesine neden olduğunu tespit edilmiştir. Yaptıkları çalışmada, kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerinde azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, ilerleme hızındaki artışların kesici takımın talaşa daha fazla nüfuz etmesine sebep olduğunu ve bunun sürtünmenin artmasına ve sonuç olarak kesme kuvvetlerinde artışa yol açtığını belirlemişlerdir. Her iki kesme parametresini kıyaslamaları sonucu ilerleme hızının, kesme hızına göre kesme kuvvetlerinde daha yüksek artışlara neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Yaptıkları çalışma, iş parçası işleme sürecindeki parametrelerin optimize edilmesiyle takım ömrünün uzayacağını, iş parçası yüzeylerinin daha yüksek kalitede olabileceğini ve üretim maliyetlerinin düşürülebileceğini ortaya koymaktadır. Aydın ve Özçatalbaş (Aydın ve Özçatalbaş, 2003)

yaptıkları çalışmada, yaşlandırma (T6) ısıtma işlemi uygulamış, 134 BSD sertliğe ve 507 N/mm² çekme dayanımına sahip AA2014 alaşımının işlenebilirlik özelliklerini incelemiştir. Farklı iki geometriye sahip kesici takım ile tormaladıkları malzemenin yüzey pürüzlülüğünü, tormalama kuvvetlerini ve farklı kesme hızlarında oluşan talaş kökü morfolojilerini belirlemişlerdir. Düşük kesme hızlarında, 6° gibi küçük talaş açılı takım ile işleme yapıldığı sırada yığıntı talaş oluşumunun yüksek olduğunu ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir. 30° gibi büyük talaş açılı takım ile işleme yapıldığında ise yığıntı talaş oluşumu miktarında, yüzey pürüzlülüğünde ve kesme kuvvetlerinde azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan her iki işlemede de yüzey pürüzlülüğü değerinin 61 m/dak kesme hızına kadar belirgin bir düşüş gösterdiğini, ancak 61 m/dak'dan büyük kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kesme hızından etkilenme boyutunun çok daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Minimum yüzey pürüzlülüğü değerine büyük talaş açılı takım ile işlemede ulaşmışlardır. İkinci takım ile işleme sonucu elde ettikleri talaş kaldırma kuvveti değerleri, yüksek pozitif talaş açısı dolayısıyla daha düşük çıkmıştır. Talaş kökü morfolojisi ve mikroyapı incelemesi yaptıklarında birinci takım ile işlemede 171 m/dak kesme hızında, ikinci takım ile işlemede ise 87 m/dak kesme hızında yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşmadığını tespit etmişlerdir. Çalışmalarının sonuçlarına dayanarak T6 ısıtma işlemi AA2014 malzemenin talaşlı işlenmesinde kullanılacak takımın büyük talaş açılı olmasını, talaş kaldırma kuvvetlerinin minimumda tutulmaya çalışılmasını ve bitirme yüzey kalitesinde artış sağlanabilmesi için kesme hızının 100 m/dak üzerinde olmasını tavsiye etmişlerdir.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yığıntı talaş (BUE) ve yığıntı katmanı (BUL) oluşumu üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Alüminyum alaşımları, yüksek plastiklikleri ve düşük sertlikleri nedeniyle işlenebilirlik açısından avantajlı olmakla birlikte, yığıntı talaş oluşumu, işleme sürecinde hem yüzey kalitesini hem de takım ömrünü olumsuz etkileyebilmektedir. Deneysel analizler ve literatürdeki çalışmalar (Akgün ve ark., 2017; Asiltürk ve Akkus, 2011; Cönger ve ark., 2019; Çakır ve ark., 2020; Deepak ve Rajendra, 2015; Demir ve Gündüz, 2009; Fang ve ark., 2010; Gök ve ark., 2010; Haddag ve ark., 2016; Korkut ve ark., 2007; Meral ve Günay, 2019; Ranganath ve ark., 2015; Yağcı ve ark., 2021) ışığında, kesme hızının ve talaş açısının bu oluşumlar üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Kesme Hızının Yığıntı Talaş ve Katmanı Üzerindeki Etkisi; Kesme hızının, yığıntı talaş oluşumu üzerinde belirgin bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Düşük kesme hızlarında yığıntı talaş oluşumu sıkça gözlemlenmiştir. Bunun temel nedenlerinden biri, düşük hızlarda kesme bölgesindeki sıcaklık artışının sınırlı kalmasıdır. Bu durum, alüminyum alaşımın yapışma eğili-

mini artırarak takım ile iş parçası arasında yığıntı talaşın oluşmasına neden olmaktadır.

Kesme hızının artmasıyla birlikte yığıntı talaş boyutunda önemli bir azalma gözlemlenmiş, belirli bir kritik hızın üzerinde yığıntı talaş oluşumunun neredeyse tamamen ortadan kalktığı görülmüştür. Bu durum, yüksek kesme hızlarında malzemenin kesme sıcaklığındaki artışla birlikte plastik deformasyona karşı direncinin azalması ve yapışma kuvvetlerinin zayıflamasıyla açıklanabilir. Ayrıca yüksek hızlarda talaşın daha kolay akışkan hale geldiği ve kesici yüzeyi temiz bir şekilde terk ettiği tespit edilmiştir.

Talaş Açısının Yığıntı Talaş ve Katmanı Üzerindeki Etkisi; Talaş açısının yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumunda kritik bir parametre olduğu belirlenmiştir. Pozitif talaş açıları, kesme sırasında daha az deformasyon ve daha az temas alanı yaratarak yığıntı talaş oluşumunu önlemiştir. Pozitif açılar, talaşın kesme kenarından daha düzgün bir şekilde akmasına izin vererek yüzey kalitesini iyileştirmiştir. Negatif talaş açıları ise yığıntı talaş ve katmanın boyutunun belirgin şekilde arttığı, bu durumun ise işleme yüzeyi üzerinde olumsuz etkiler yarattığı gözlemlenmiştir.

Yığıntı Talaş ve Katmanın İşleme Sürecine Etkisi; Yığıntı talaş ve yığıntı katmanının varlığı, işleme sırasında birkaç önemli soruna yol açmaktadır:

- **Yüzey Kalitesi:** Yığıntı talaş ve katmanlar, iş parçası yüzeyinde düzensizliklere neden olarak yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. Bu durum, işlenen parçanın nihai kullanım performansını olumsuz etkilemektedir.
- **Kesici Takım Performansı:** Yığıntı talaş, kesici takımın yüzeyine yapışarak kesme kenarının geometrisini bozmuş ve kesme kuvvetlerinde artışa neden olmuştur. Bu durum, takım aşınmasını hızlandırmış ve takım ömrünü kısaltmıştır.
- **Enerji Tüketimi:** Yığıntı talaşın varlığı, kesme kuvvetlerini artırarak işleme sırasında enerji tüketimini yükseltmiştir.

Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu; Deneysel veriler, kesme hızının artırılması ve pozitif talaş açılarının kullanılması durumunda yığıntı talaş ve katman oluşumunun minimize edilebildiğini göstermektedir. Yüksek kesme hızları ve uygun talaş açıları ile daha düzgün yüzeyler elde edilmekte, aynı zamanda kesici takım ömrü uzatılabilmektedir. Bu bulgu hem işleme kalitesini artırmak hem de maliyetleri düşürmek açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Akgün, M., Özlü, B., Demir, H. (2017) Döküm Yöntemiyle Üretilmiş Al-12Si Alaşımlarının Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu. 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Proceedings, 344-348.
- Asilturk, I., Akkus, H. (2011) Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning Using the Taguchi Method. Measurement. 44, 1697-1704.
- Aydın B, Özçatalbaş Y. (2003). AA2014 (T6) Alaşımının İşlenebilirlik Özelliklerine Kesici Takım Geometrisinin Etkisi. MATİM. ,5(2), 89-95.
- Bican, O., Pul, M. (2021). Farklı Alüminyum Alaşımlarının Tornalanmasında Alaşım Cinsinin Kesici Takım Davranışı, Talaş Biçimi ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 3(1), 9-17. <https://doi.org/10.46387/bjesr.787725>
- Cönger, D. B., Emiroğlu, U., Uysal, A., Altan, E. (2019) Alüminyum 6061 malzemenin MQL yöntemi ile frezelenmesinde nano MoS2 katkılı kesme sıvısı kullanımının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 17, 31-37.
- Çakır, A., Duran, A., Şeker, U. (2020) The Effect of different cooling methods to hole quality and tool life in the drilling of AA7075 and AA2024 aluminum alloys. Manufacturing Technologies and Applications, 1, 1-13.
- Deepak, D., Rajendra, B. (2015) Investigations on the surface roughness produced in turning of Al 6061 (as-cast) by taguchi method. International Journal of Research in Engineering and Technology, 4(8), 295-298.
- Demir, H., Gündüz, S. (2009) The Effects of Aging on Machinability of 6061 Aluminum Alloy. Materials and Design, 30, 1480-1483.
- Fang, N., Pai, P.S., Mosquea, S. (2010) The effect of built-up edge on the cutting vibrations in machining 2024-T351 aluminum alloy. Int J Adv Manuf Technol 49, 63-71. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2394-z>
- Gök, K., Erdem, M., Gök, A. (2010) AISI 1006 çeliğinin tornalama sürecinde kesici takım uç yarıçapının kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti üzerindeki etkisinin numetik olarak incelenmesi. TÜBAV Bilim Dergisi, 4, 1-8.
- Gökkaya, H., Nalbant, M. (2006) The effects of cutting tool coating on the surface roughness of AISI 1015 steel depending on cutting parameters. Turkish J. Eng. Env. Sci, 30, 307-316.
- Gokkaya, H., Taşkesen, A. (2008) The effects of cutting speed and feed rate on BU-E-BUL formation, cutting forces and surface roughness when machining Aa6351 (T6) alloy. Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 54.
- Haddag, B., Atlati, S., Nouari, M., Moufki, A. (2016) Dry Machining Aeronautical Al-

- minum Alloy AA2024- T351: Analysis of Cutting Forces, Chip Segmentation and Built-Up Edge Formation. *Metals*, 6, 197.
- Hekimoğlu, A. P., Bayraktar, Ş. (2022). CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN Kaplamalı Kesici Uç ile Al-12Si-(0,02-1) Sr Alaşımlarının Tornalanmasında Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Deneysel Çalışma. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 10(1), 50-62. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1025239>
- Hekimoğlu, A. P., Bayraktar, Ş., Turgut, Y. (2018). Kesme Hızı ve İlerlemenin Al-35Zn Alaşımının İşlenebilirliğine Etkisinin İncelenmesi. In *SETSCI-Conference Proceedings*, 3, 77-83.
- Korkut, I., Donertas, M. A. (2007) The Influence of Feed Rate and Cutting Speed on The Cutting Forces, Surface Roughness and Tool–Chip Contact Length During Face Milling. *Materials & Design*, 28, 308-312.
- Meral, T., Günay, M. (2019) Kaplamalı ve kaplamasız karbür matkap ile ferritik paslanmaz çeliğin delinebilirlik analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5, 159-166.
- Ranganath, M. S., Vipin, Vp., Mishra, R. S., Dhar, N. R. (2015) Optimization of Surface Roughness in CNC Turning of Aluminium 6061 Using Taguchi Techniques. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 5(5), 42-50.
- Sekmen, M., Günay, M., Şeker, U. (2015). Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katman Oluşumu Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 18(3), 141-148.
- Ulaş, H. B. (2019). AA 6061 Alüminyum Alaşımının Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Analizi Ve Optimizasyonu. *Technological Applied Sciences*, 14(2), 48-56.
- Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., Korkmaz, A. (2021) Alüminyum Döküm Alaşımlarına Dair Son Yıllardaki Akademik Ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış Ve Değerlendirme. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1191-1210. <https://doi.org/10.17482/uumfd.882586>
- Yağmur, S., Kaya, M. K., Şeker, U. (2021) AA-6082 T4 Alaşımının Tornalamasında Çok Kristallli Elmas (ÇKE) Takımlara Uygulanan Talaş Kırıcı Formlarının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *GJES*, 7(1), 51-57.
- Yaman, K., Tekiner, Z. (2024). Investigation of the effect of built-up edge on chip morphology at the cutting edge during turning operation. *Politeknik Dergisi* 1-1