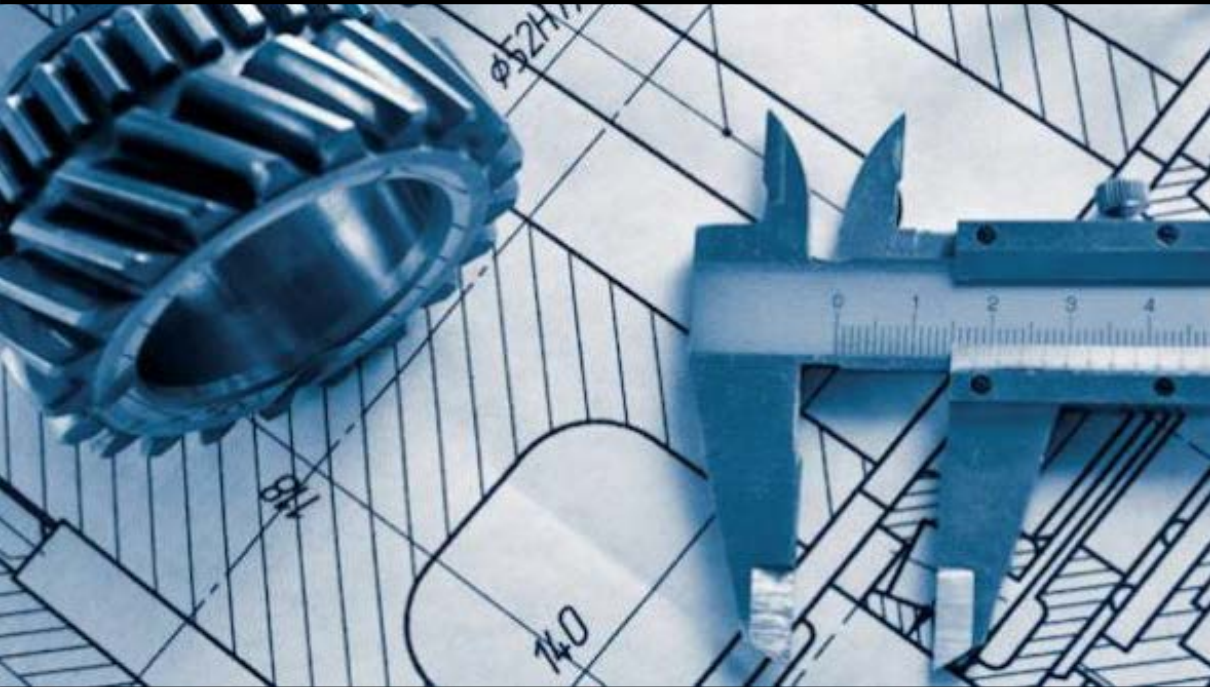


TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK ALANINDA YAŞANAN GELİŞMELER

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet TEMİZ



**TEORİ VE UYGULAMADA
MÜHENDİSLİK ALANINDA
YAŞANAN GELİŞMELER**

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet TEMİZ

yaz
yayınları

2023

**TEORİ VE UYGULAMADA
MÜHENDİSLİK ALANINDA YAŞANAN
GELİŞMELER**

Editor: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet TEMİZ

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayımlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-6524-80-4

Aralık 2023 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

İÇİNDEKİLER

- Yarıiletken İnce Filmler, Üretim Teknolojileri ve Uygulama Alanları1**
Mehmet TEMİZ, Hacı SERİN
- Yenilenebilir Enerjide Hibrit Teknolojinin Kullanımı ve Geleceği.....21**
Hacı SERİN, Mehmet TEMİZ
- İnce Film Biriktirme Süreçlerinde Kaplama Verimliliğini Artıran Etkenler39**
Enes NAYMAN, Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL
- İş Kazalarını Önlemede Uzman Sistem Yaklaşımı67**
Ömer ASAL, Yunus KAYIR, Hakan DİLİPAK
- AISI 1050 Malzemesinin Tornalanmasında Takım Ömrü ve Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi.....89**
Hakan DİLİPAK, Yunus KAYIR, Ömer ASAL, Derya ULUĞ
- BWM ve COCOSO Yöntemleriyle Risklerin Önceliklendirilmesi103**
Simge MUTLUOĞLU, Tülay KORKUSUZ POLAT
- Döküm İmalatında Besleyici Gömlek Kullanımı.....125**
Muhammet Emin KESKİN, Murat ÇOLAK
- Rastgele Olasılıksal Değişken Üretme Teknikleri143**
Abdullah SEVİN
- Ergimiş Tuz Reaktörleri ve Türkiye159**
Hüseyin ŞAHİNER

Atık Yönetim Sistemlerinde Dijital & Yeşil Rotalama ...179
Sevilay TEKİN, Ayten YILMAZ YALÇINER

**Endüstriyel Kupol Atığının Duvar Karosu Sır
Reçetelerinde Etkisinin İncelenmesi.....199**
Yiğit BALBAĞ, Hale YILDIZAY, Eda TAŞÇI

Nikel Krom Esaslı Dental Malzemeler215
Zeynep KESKİN, Serap GÜMÜŞ, Rıdvan YAMANOĞLU

**SLM IN625 Alaşımında Isıl İşlemin Mekanik
Özellikler Üzerine Etkisi.....233**
Rıdvan YAMANOĞLU, Mertcan KIRAÇ, İdris GÖKALP

**Polyester Reçine Üretim Tesisinde Risk Analizi:
Hazard Rating Number System (HRNS)251**
Engin BARUT, Özkan AYAN, Emine CAN

**Görüntülerde Anomali Tespiti ile İlgili Kapsamlı
İnceleme.....267**
Oğuz BULUT, Yılmaz ATAY

**Fe-Bazlı Süperiletken Sistemler ve Teknolojik Olarak
Uygulanabilirlikleri.....309**
Kübra YAKINCI

**Süper Alaşımların Borlama İşlemi ile Yüzey
Özelliklerinin Geliştirilmesi327**
İlyas TÜRKMEN, Fatih SARGIN, Kürşat KANBUR

**Seramik Sektöründe Atıksular ve Arıtım
Teknolojileri.....353**
Sercan GÜLMEZ, Bekir Fatih KAHRAMAN, Ahmet ALTIN

YARIİLETKEN İNCE FİLMLER, ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

Mehmet TEMİZ¹

Hacı SERİN²

1. GİRİŞ

İnce filmler bir altlık üzerine atomların tabakalar halinde kaplanması ile oluşturulurlar. Genel olarak 1 µm den daha incedirler(Brendel, 2003). Bilimsel ve endüstriyel çalışmalar için önemli bir yere sahip olan filmler, ilk olarak cam ve seramiklerde süsleme amacıyla kullanılmıştır. Ardından, gümüş tuzları kullanılarak cam yüzeylere gümüş filmler kaplanmıştır. On dokuzuncu yüzyıldan itibaren bilimsel çalışmalardaki artış, yeni ve daha modern ince film üretim yöntemlerini beraberinde getirmiştir. İlk ince film elektroliz yöntemi kullanılarak 1838 yılında ve kimyasal reaksiyon yöntemi kullanılarak 1852 yılında Bunsen tarafından üretilmiştir. Faraday'in inert gazda buharlaştırma yöntemi kullanarak ince film büyütmesinden sonra, Nahrwold ve Kundt joule ısıtma yöntemini kullanmıştır(Sönmezoğlu et al., 2012).

Yarıiletkenlerin ince film formunda kullanımı, transistörlerin ve diğer yarıiletken tabanlı elektronik cihazların gelişmesine katkı sağlamıştır. 1950'lerde ve 1960'larda yarıiletken ince filmler, elektronik cihazların daha küçük ve daha

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Karapınar Aydoğanlar MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Konya, Türkiye, mehmettemiz@selcuk.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2974-8824.

² Öğr. Gör. Selçuk Üniversitesi, Karapınar Aydoğanlar MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Konya, Türkiye, haci.serin@selcuk.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7962-3478.

hızlı olması için önemli bir rol oynamıştır. Yarıiletken ince filmler, başlangıçta silikon gibi malzemelerin ince film formunda kullanımıyla sınırlı olsa da sonraki yıllarda bu alanda önemli gelişmeler yaşanmıştır. Endüstride yarıiletken ince film üretimi ve karakterizasyonu konusunda büyük ilerlemeler kaydedilmiştir.

1980'lerin sonlarından itibaren, nanoteknoloji alanındaki ilerlemeler yarıiletken ince filmlerin kullanımını daha da artırmıştır. Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte yarıiletken ince filmler, nanoelektronik cihazların, nanosensörlerin ve diğer nanoteknolojik uygulamaların temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir.

Yarı iletken filmler yapısal mükemmelliğine ve kusurlarına bağlı olarak tek kristal filmler, çok kristal filmler ve amorf filmler olmak üzere üç ana grupta incelenebilir(Koelmans, 1971). Tek kristalli filmler yüksek maliyetli ve yüksek teknoloji gerektiren tekniklerle üretilirken, polikristal filmler pratik ve düşük maliyetli tekniklerle elde edilir.

Tek kristalli filmler, tek bir büyük kristal yapıdan oluşur ve bu nedenle üretimleri oldukça zor ve pahalı olabilir. Bu filmler, genellikle yüksek performanslı elektronik cihazlar gibi hassas uygulamalar için tercih edilir.

Öte yandan, polikristal filmler birden çok kristal yapısından oluşur ve bu yapılar tane sınırları ile ayrılır. Daha ekonomik ve pratik üretim teknikleri kullanılarak elde edildikleri için maliyetleri daha düşüktür. Bu filmler, güneş pilleri gibi geniş kullanım alanlarına sahip olan ve daha az hassas uygulamalarda tercih edilen yarı iletken cihazlarda sıkça kullanılır.

Polikristal filmler, geniş yüzeyli metal, cam, seramik, grafit tabanları üzerinde büyütülebilen yarı iletken malzemelerdir ve elektriksel ve optik özellikleri nedeniyle güneş hücresi, yarı iletken fotodetektörler, diyotlar gibi birçok uygulamaya sahiptir.

Polikristal filmler, farklı tabanlara büyütülebilme esnekliği sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu filmler, büyük yüzey alanına sahip malzemelere uygulanabilir, böylece büyük ölçekli uygulamalarda kullanılacak kapasitede olabilirler. Güneş hücreleri, yarı iletken fotodetektörler ve diyotlar gibi farklı uygulamalarda kullanılarak, elektriksel iletkenlik ve optik özelliklerinden faydalanılır(S. M. Sze . Kwok K. Ng, 1981).

2. YARI İLETKEN İNCE FİMLERİN YAPISAL SINIFLANDIRMASI

Yarı iletken ince filmler yapısal mükemmelliğine ve kusurlarına bağlı olarak üç ana grupta incelenebilir.

2.1.Tek Kristalli Filmler

Bu filmler, tüm film boyunca son derece düzenli, homojen bir atomik yapı sergiler. Minimum tane sınırı ve kusur içerirler, bu da onları yüksek performanslı elektronik ve optoelektronik cihazlar için uygun hale getirir. Kristal yapının homojenliği, üstün elektriksel ve optik özelliklere katkıda bulunur.

2.2.Polikristal Filmler

Bu filmler, tane sınırları ile ayrılmış birden fazla kristalin bölge içerir. Tek kristalli filmlerin homojenliği olmasa da kristal malzemelerin bazı istenen özelliklerini korurlar. Polikristal filmler, tek kristalli filmlere göre daha kolay üretilebilir ve performans gereksinimlerinin daha az sıkı olduğu çeşitli yarı iletken cihazlarda kullanılır.

2.3.Amorf Filmler

Amorf yarı iletken filmler, kristal filmlerin aksine atomik yapılarında belirgin uzun menzilli bir düzen eksikliği gösterir. Düzensiz bir atomik düzenlemeye sahiptirler, bu da benzersiz

optik ve elektriksel özelliklere yol açar. Amorf filmler genellikle üretim kolaylığı ve esneklik, kristal kalitesinden daha fazla önceliklendirildiği ince film transistörleri ve güneş pilleri gibi uygulamalarda kullanılır.

3. YARI İLETKEN İNCE FİMLERİN TEMELLERİ

Yarı iletken malzemeler, iletkenler ve yalıtkanlar arasında bulunan bir malzeme sınıfıdır. Bu malzemeler, iletkenler gibi elektriği iletebilme özelliğine sahiptir, ancak yalıtkanlar gibi elektriği çok iyi iletemezler. Bu özellikleri, yarı iletkenlerin elektronik cihazlar için ideal bir malzeme sınıfı olmalarını sağlar. Yarı iletkenler, transistörler, diyotlar, entegre devreler ve sensörler gibi birçok elektronik cihazın temel yapı taşı oluştururlar.

İnce film kavramı ise yarı iletken malzemelerin nano ölçekte ince bir tabaka halinde kullanılması anlamına gelir. Bu ince filmler, geleneksel yarı iletken malzemelerin belirli uygulamalar için uygun hale getirilmesini sağlar. Yarı iletken ince filmlerin özellikleri, film kalınlığı ve yapısal özelliklerine bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Bu filmlerin üretiminde kullanılan çeşitli teknikler, film kalınlığını kontrol etmek ve istenen elektriksel veya optik özellikleri elde etmek için tasarlanmıştır.

İnce film, bir malzemenin nanometre (nm) ile mikrometre (μm) arasındaki kalınlıklarda olabilen bir tabakasıdır. İnce film, geleneksel malzeme özelliklerini değiştirme veya geliştirme potansiyeline sahiptir. Önemli kavramlar şunları içerir:

- Yarı iletken ince filmler, yarı iletken malzemelerin ince tabakalarıdır. Bu filmler, çeşitli uygulamalarda

elektriksel, optik ve termal özellikleri optimize etmek için kullanılır.

- İnce filmler, büyük yüzey alanına sahip materyallerde kullanılabilir ve daha az malzeme tüketerek üretim maliyetini azaltabilir.
- İnce film teknolojisi, elektronik, optoelektronik, enerji depolama, güneş enerjisi, mikroelektronik ve daha birçok alanda geniş uygulama potansiyeline sahiptir.

4. YARI İLETKEN İNCE FİLMLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Yarıiletken ince film teknolojisi, yarıiletken malzemelerin bir tabaka halinde, genellikle bir alt tabaka üzerine, çok ince bir tabaka şeklinde uygulanması sürecidir. Bu teknoloji, transistörler, güneş pilleri, sensörler ve görüntüleme cihazları gibi birçok elektronik cihazın üretiminde kritik bir role sahiptir.

Yarıiletken ince film üretim yöntemleri, özellikle malzeme ve uygulamanın özelliklerine bağlı olarak tercih edilir. Bu teknolojiler, yüksek performanslı, verimli ve güvenilir elektronik ve optik cihazların üretiminde kritik bir rol oynamaktadır.

Yarıiletken ince film üretim yöntemleri genellikle aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

4.1.Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemleri

Fiziksel buhar biriktirme (PVD), malzemenin buharlaştırılarak bir yüzeye çöktürülmesini içeren bir film kaplama işlemidir. Bu yöntem genellikle vakum altında gerçekleştirilir ve malzemenin katı halinden doğrudan buharlaşmasıyla başlar. Bu buhar daha sonra bir alt tabakaya veya hedef yüzeye taşınır ve orada yoğunlaşarak katı bir filme dönüşür.

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi, aşağıdaki alt kategorilere ayrılabilir:

4.1.1. Döküm (Evaporation)

Döküm, bir malzemenin ısıtılarak doğrudan buharlaştırılması işlemidir. Malzeme, genellikle bir direnç veya elektron bombardımanı yoluyla ısıtılır. Isıtma sonucunda malzeme buharlaşır ve ardından substrat üzerine yoğunlaşır.

4.1.2. Damıtma (Sputtering)

Bu yöntemde, gaz halindeki bir malzeme, bir inert gazın (genellikle argon) iyonlaştırılması yoluyla bir hedef yüzeyden parçacıklar koparır. Bu parçacıklar daha sonra bir alt tabakaya çöktürülür. Damıtma, DC, RF, manyetron ve iyon demeti gibi farklı tekniklere dayalı olarak farklı türlere ayrılabilir.

4.1.3. Püskürtme (Spraying)

Bu yöntemde, bir malzeme genellikle bir katot olarak bilinen bir elektriksel kısmın püskürtülmesi yoluyla bir alt tabakaya uygulanır. Püskürtme, fiziksel buhar biriktirme yöntemleri arasında en yaygın olanlardan biridir.

Bu teknikler, ince film kaplamalarının üretiminde kullanılan temel yöntemlerdir. Fiziksel buhar biriktirme, ince filmlerin istenilen özellikleri elde etmek için kontrol edilmesi ve işlem parametrelerinin optimize edilmesi açısından kritik bir rol oynar. Bu yöntemler, yarıiletkenler, metalik kaplamalar, optik kaplamalar ve dekoratif kaplamalar gibi birçok uygulama alanında kullanılır.

4.2. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemleri

Kimyasal buhar biriktirme (KBB), bir veya daha fazla gaz bileşiğinin, genellikle bir alt tabakaya veya bir hedef yüzeye uygulanarak kimyasal reaksiyon sonucunda yarıiletken filmin oluşturulduğu bir ince film kaplama tekniğidir. Bu yöntem,

yüksek saflıkta ve karmaşıklıkta ince filmlerin üretilmesi için oldukça etkili bir yöntemdir.

KBB yöntemi, aşağıdaki alt türlere ayrılabilir:

4.2.1. Hidrotermal KBB

Bu yöntemde, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında bir sıvı fazda bulunan bileşikler, bir yüzeye veya substrata uygulanır. Bu işlem, çeşitli seramiklerin, nanopartiküllerin, ince filmlerin ve nanotüplerin sentezlenmesinde kullanılır.

4.2.2. Metalorganik KBB (MOKBB)

Bu teknikte, bir veya daha fazla metal organik bileşiğin ve genellikle bir veya daha fazla taşıyıcı gazın reaksiyonu sonucunda ince film oluşur. Bu yöntem, yarıiletkenlerin, optik cihazların, manyetik cihazların ve diğer ince filmlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır.

4.2.3. Düşük Basıncı KBB

Bu türde, KBB işlemi genellikle düşük basınçta gerçekleştirilir. Bu, düşük basınçta çalışmanın avantajlarından yararlanarak, daha homojen ve kontrol edilebilir bir ince film üretimini sağlar.

KBB yöntemi, yüksek saflıkta ve homojen ince filmler üretmek için oldukça verimli bir yöntemdir. Bu teknik, yarıiletkenler, seramikler, metaller, pürüzsüz ve ince kaplamalar gibi birçok farklı malzeme grubunun üretiminde kullanılır. KBB, film kalınlığının, kristal yapı ve bileşiminin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak sağlayarak birçok endüstriyel uygulamada kritik bir role sahiptir.

4.3.Sıvı Faz Biriktirme (SFB) Yöntemi

Sıvı faz biriktirme (SFB), sıvı fazda bulunan bir yarıiletken malzemenin genellikle bir substrat üzerine çöktürüldüğü bir ince film kaplama yöntemidir. Bu yöntem,

çözünür bileşiklerin kullanıldığı belirli kimyasal işlemler içerir. Bu işlem genellikle düşük sıcaklık ve basınçta gerçekleştirilir ve çözünür malzeme, bir substrat üzerine çökeltilir.

Sıvı faz biriktirme yöntemi, aşağıdaki adımları içerir:

4.3.1. Hazırlık

İlk adım, uygun kimyasal çözeltinin hazırlanmasıdır. Bu çözelti genellikle bir çözücü içinde çözünmüş olan istenen yarıiletken malzemesini içerir.

4.3.2. Çöktürme

Hazırlanan çözelti, genellikle bir substrat üzerine dökülür veya püskürtülür. Daha sonra, sıvı fazdaki malzeme çözücüden ayrılarak substrat üzerine çöker.

4.3.3. Kurutma ve Isıl İşlem

Çöktürülen malzeme genellikle kurutulur ve ardından belirli sıcaklık ve zaman aralıklarında ısıl işleme tabi tutulur. Bu işlem, istenen kristal yapıyı ve film kalınlığını elde etmek için gereklidir.

Sıvı faz biriktirme yöntemi, düşük maliyetli ve görece düşük işlem sıcaklıkları ile ince film kaplamalarının üretilmesi için kullanışlıdır. Bu yöntem, belirli yarıiletkenlerin, seramiklerin, metal oksitlerin ve diğer malzemelerin ince film üretimi için tercih edilebilir. Ayrıca, SFB, çeşitli şekillerde şekillendirilebilen ve farklı substratlara uygulanabilen esnek bir tekniktir.

4.4. Moleküler Demet Epitaksi (MDE)

Moleküler demet epitaksi (MDE), ince film epitaksinin (kristal yapısının çekirdeklenmesi ve büyümesi) vakum altında gerçekleştiği bir tekniktir. Bu yöntem, yarıiletkenlerin, metalik ve seramik ince filmlerinin üretimi için kullanılır. MBE, atomik veya

moleküler akışların hassas bir şekilde kontrol edilmesi yoluyla ince film büyümesini sağlar.

MDE'nin temel adımları şunlardır:

4.4.1. Hazırlık

İlk adım, substratın temizlenmesi ve hazırlanmasıdır. Yüzeyin temizliği, istenen kristal büyümesi için kritik öneme sahiptir. Substrat, genellikle yarıiletken malzemelerden oluşur.

4.4.2. Isıtma ve Vakum

Substrat, vakum altında ısıtılır ve bu şekilde temizlenir. Vakum altında işlem, istenmeyen kontaminasyonun önlenmesine yardımcı olur.

4.4.3. Atomik veya Moleküler Akış

MDE sistemi, istenen materyalin atomik veya moleküler akışını sağlar. Bu akışlar, substratın yüzeyine ince bir şekilde çökerir ve atom veya moleküller birikerek kristal yapının büyümesini oluşturur.

4.4.4. Kontrol ve Monitörizasyon

MDE sırasında, malzeme akışı, basınç, sıcaklık ve diğer işlem parametreleri sürekli olarak kontrol edilir ve izlenir. Bu, istenen kristal yapı, kalınlık ve diğer özelliklerin hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar.

Moleküler demet epitaksi, yüksek saflıkta ve atomik ölçekte ince film üretimi sağlayan güçlü bir tekniktir. Bu yöntem, yarıiletkenlerin, manyetik malzemelerin, optik cihazların ve diğer ileri teknoloji uygulamalarının üretiminde yaygın olarak kullanılır. MDE'nin temel avantajları, yüksek kristal kalitesi, ince film kontrolü ve atomik ölçekte hassas büyüme kontrolüdür.

5. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

Yarıiletken ince filmler, modern teknolojinin birçok alanında kritik bir rol oynayan temel malzemelerdir. Elektronik, fotovoltaik (güneş enerjisi), optoelektronik ve sensör uygulamaları gibi birçok alanda kullanılan yarıiletken ince filmler, belirli özelliklere sahip olmalı ve belirli gereksinimleri karşılamalıdır. Bu nedenle, yarıiletken ince filmlerin karakterizasyonu, üretim süreçlerinin optimize edilmesi, kalite kontrolünün sağlanması ve uygulama performansının artırılması için büyük önem taşır. Bu amaçla, X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Raman spektroskopisi gibi karakterizasyon teknikleri, yarıiletken ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin belirlenmesinde ve analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknikler, malzeme bilimi ve yarıiletken teknolojisindeki gelişmelerde önemli bir rol oynamaktadır.

5.1.X-Işını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), kristal yapısal analizlerde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Yarıiletken ince filmlerin XRD ile incelenmesi, malzemenin kristal yapısal özelliklerini ve özgün kristal yönelimlerini belirlemek için önemli bilgiler sağlar. Bu teknik, malzemenin kristal yapısının karakterizasyonunda ve analizinde kullanılan temel bir araçtır.

Yarıiletken ince filmler üzerinde XRD kullanarak şu bilgiler elde edilebilir:

5.1.1. Kristal Yapı

XRD, kristal yapıyı belirlemek için kullanılır. Malzemenin kristal yapısal özellikleri, kristal yapının türü, kristal yapının boyutu ve düzeni gibi bilgiler XRD analizi ile belirlenebilir.

5.1.2. Kristal Boyutu ve Yönelimi

XRD, malzemenin kristal boyutu, tane sınırı oryantasyonu ve tane yönelimi gibi özelliklerin belirlenmesinde kullanılır. Bu bilgiler, malzemenin yapısal homojenliği ve kristal büyümesi sürecindeki potansiyel kusurlar hakkında bilgi sağlar.

5.1.3. Gerilmeler ve Deformasyonlar

XRD analizi, malzemenin içsel gerilmelerini ve deformasyonlarını belirlemek için kullanılır. Bu, malzemenin mekanik ve yapısal özelliklerini anlamak ve geliştirmek için önemlidir.

5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu

Elbette, taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüzeyin morfolojisini, topografyasını ve bileşimini incelemek için kullanılan yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme tekniğidir. Yarıiletken ince filmlerin SEM ile incelenmesi, malzemenin yüzey özelliklerinin detaylı bir analizini sağlar. Bu teknik, yüzeydeki tane boyutu dağılımı, film kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, tane sınırları ve kusurlar gibi önemli özelliklerin belirlenmesine olanak tanır.

SEM, yarıiletken ince filmlerin yapısının karakterizasyonunda ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesinde kritik bir rol oynar. Bu teknik, malzemenin üretimindeki kalite kontrolünü sağlamak, yüzey özelliklerini optimize etmek ve malzeme performansını artırmak için vazgeçilmez bir araçtır.

Yarıiletken ince filmler üzerinde SEM kullanarak şu bilgiler elde edilebilir:

5.2.1. Film Kalınlığı ve Tane Boyutu Dağılımı

Film kalınlığı, malzemenin tabaka kalınlığı veya kaplama kalınlığıdır. SEM, malzemenin film kalınlığını ölçmek için yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek amacıyla kullanılır.

Bu, üretilen ince filmlerin istenen kalınlık toleranslarına ve homojenliğe sahip olup olmadığını belirlemek için önemlidir.

Tane boyutu dağılımı, malzemenin içindeki kristal yapıların boyutları ve dağılımı hakkında bilgi verir. Bu, malzemenin kristal yapısının homojenliğini ve büyüme sürecindeki olası kusurları belirlemek için kritiktir. SEM, tane boyutu dağılımını belirleyerek malzemenin kristal yapısının homojenliğini değerlendirir ve yapısal özelliklerin optimize edilmesine yardımcı olur.

Bu özelliklerin belirlenmesi, malzemenin üretim süreçlerindeki performansını artırmak, kalite kontrolünü sağlamak ve yapısal homojenliği sağlamak için kritik öneme sahiptir. SEM, yarıiletken ince filmlerin üretiminde ve karakterizasyonunda film kalınlığı ve tane boyutu dağılımının analizinde güçlü bir araçtır.

5.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü

SEM analizi, yarıiletken ince filmlerin yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmek için yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek amacıyla kullanılır. Bu analiz, malzemenin yüzey kalitesini değerlendirmek, yüzey düzgünlüğünü belirlemek ve üretim süreçlerini optimize etmek için kritik bir adımdır.

Yüzey pürüzlülüğü analizi, malzemenin yüzeyinin istenilen düzeyde düzgün olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Bu, malzemenin yüzey kalitesini, optik özelliklerini, yüzey kaplamasının performansını ve malzemenin diğer uygulamalardaki performansını belirlemek için kritik öneme sahiptir.

SEM analizi, yarıiletken ince filmlerin üretiminde yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi ve iyileştirilmesinde kullanılan temel bir tekniktir. Bu analiz, yüzey kalitesinin optimize edilmesine, malzeme performansının artırılmasına ve ilgili uygulamalarda istenen özelliklerin sağlanmasına yardımcı olur.

5.2.3. Tane Sınırları ve Kusurlar

SEM analizi, yarıiletken ince filmlerin tane sınırlarını belirlemek için yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek için kullanılır. Bu analiz, malzemenin tane sınırlarının yoğunluğunu, dağılımını ve yapısal homojenliğini değerlendirir. Ayrıca, malzemenin içindeki kusurları, çatlakları, boşlukları ve diğer yapısal anormallikleri belirlemek için kullanılır.

Bu bilgiler, malzemenin yapısal kalitesini ve homojenliğini belirlemek, üretim süreçlerindeki olası hataları veya kusurları tanımlamak ve malzemenin performansını artırmak için kullanılır. Tane sınırları ve kusurların belirlenmesi, malzemenin yapısal bütünlüğünü korumak ve istenen performans özelliklerini sağlamak için kritik bir adımdır.

SEM analizi, yarıiletken ince filmlerin tane sınırları, kusurları ve yapısal anormalliklerinin belirlenmesi ve analiz edilmesinde kritik bir araçtır. Bu analiz, malzemenin yapısal kalitesinin değerlendirilmesine ve iyileştirilmesine yardımcı olur ve malzemenin istenen performans özelliklerine sahip olmasını sağlar.

5.3.Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, malzemenin moleküler, kristal ve elektronik özelliklerini incelemek için kullanılan güçlü bir analiz tekniğidir. Yarıiletken ince filmler üzerinde Raman spektroskopisi kullanılarak, malzemenin birçok temel özelliği belirlenebilir.

Raman spektroskopisi, yarıiletken ince filmlerin analizinde aşağıdaki bilgilerin belirlenmesine yardımcı olur:

5.3.1. Kristal Yapı

Kristal yapı belirleme Raman spektroskopisinin önemli bir uygulama alanıdır. Raman spektroskopisi, malzemenin moleküler ve kristal yapısının karakterizasyonunda kullanılan bir analiz tekniğidir. Kristal yapı, bir malzemenin atomların düzenli bir kristal ızgarada nasıl düzenlendiğini ve bu ızgaranın türünü belirler. Bu ızgaranın türü, malzemenin özelliklerini ve davranışını büyük ölçüde etkiler.

Raman spektroskopisi, malzemenin kristal yapısını belirlemek için malzemeyle lazer ışığının etkileşimini kullanır. Bu etkileşim sonucunda malzemenin moleküler titreşimleri Raman saçılma spektrumu olarak adlandırılan bir spektrumda görüntülenir. Bu spektrum, malzemenin kristal yapısına dair önemli bilgiler içerir.

Raman spektrumu, malzemenin kristal yapısını tanımlayan karakteristik tepe ve dip değerleri içerir. Bu tepe ve dip değerleri, malzemenin atomlarının düzenli ızgarasını

oluşturan kimyasal bağların titreşimlerinden kaynaklanır. Her malzeme türü, farklı kristal yapılaraya sahip olduğundan, Raman spektrumu bu yapısal farklılıkları ayırt etmek için kullanılır.

Kristal yapıyı belirlemek için Raman spektroskopisi kullanılırken şunlar göz önünde bulundurulur:

5.3.1.1. Tepe Frekansları

Raman spektrumu, malzemenin kristal yapısına dair tepe frekanslarını gösterir. Bu frekanslar, malzemenin kristal yapısının türüne ve düzenliliğine göre değişir.

5.3.1.2. Dip Değerleri

Raman spektrumu, dip değerlerini de içerir. Bu dip değerleri, malzemenin kristal yapısındaki değişiklikleri ve anormallikleri belirlemek için kullanılabilir.

5.3.1.3. Karakteristik Bantlar

Raman spektrumu, malzemenin kristal yapısına özgü karakteristik bantları içerir. Bu bantlar, malzemenin kristal yapısını tanımlayan önemli işaretlerdir.

Raman spektroskopisi, malzemenin kristal yapısının türünü, düzenliliğini ve yapısal özelliklerini belirleme konusunda güçlü bir araçtır. Bu bilgiler, malzemenin yapısının anlaşılmasına, olası değişikliklerin izlenmesine ve belirli uygulamalara uygun hale getirilmesine yardımcı olur.

5.3.1.4. Tane Boyutu

Raman spektroskopisi, malzemenin tane boyutunu belirlemek için kullanılır. Bu, malzemenin kristal yapısal homojenliğini değerlendirmek ve yapısal özelliklerin analizini sağlamak için önemlidir.

5.3.1.5.Gerilmeler ve Kusurlar

Raman spektroskopisi, malzemenin içsel gerilmelerini, kusurlarını ve yapısal anormalliklerini belirlemek için kullanılır. Bu, malzemenin mekanik ve yapısal özelliklerini anlamak ve geliştirmek için önemlidir.

Raman spektrumu, malzemenin yapısının ve özelliklerinin anlaşılmasına yardımcı olur ve malzemenin optimize edilmiş özelliklerinin geliştirilmesine katkıda bulunur. Bu teknik, yarıiletken ince filmlerin kimyasal ve yapısal analizlerinde kritik bir rol oynar ve malzeme üretimi ve karakterizasyonunda önemli bir araç olarak kullanılır.

6. GÜNCEL UYGULAMALAR

Yarıiletken ince filmler, birçok modern teknolojinin temelini oluşturan ve bir dizi yenilikçi uygulama alanında kullanılan önemli malzemelerdir. İşte bu malzemelerin güncel uygulama alanlarından bazıları:

6.1.Yarıiletken İnce Filmlerle Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesi

Yarıiletken ince filmler, güneş hücrelerinin verimliliğini artırmak ve maliyetini düşürmek için kullanılır. Bu filmler, güneş ışığını daha etkili bir şekilde yakalayabilir ve elektrik enerjisine dönüştürebilir. Yüksek performanslı ve ekonomik yarıiletken ince film tabanlı güneş hücreleri, temiz enerji üretiminde önemli bir rol oynamaktadır.

6.2.Yarıiletken Sensörlerin İnce Filmlerle Duyarlılığının Artırılması

Yarıiletken ince filmler, sensör teknolojisinin hassasiyetini artırmak için kullanılır. Bu filmler, çeşitli çevresel değişkenleri algılayabilen duyarlı sensörlerin geliştirilmesine

olanak tanır. Bu sayede, sağlık, çevre ve endüstriyel uygulamalarda daha hassas ve güvenilir sensörler kullanılarak daha güvenli ve verimli sistemler oluşturulabilir.

6.3.Nanoelektronik Cihazların Yarıiletken İnce Filmlerle Performansının İyileştirilmesi

Yarıiletken ince filmler, nanoelektronik cihazların performansını artırmak için kullanılır. Bu filmler, yüksek elektronik ve optik özelliklere sahip olabilir ve bu sayede nanoelektronik cihazların daha hızlı, daha güçlü ve daha verimli olmasını sağlar. Bu uygulamalar, bilgisayarlar, mobil cihazlar, iletişim sistemleri ve diğer birçok endüstriyel uygulama için önemli bir potansiyel sunar.

6.4.Optoelektronik Cihazların Yarıiletken İnce Filmlerle Çalışma Prensipleri

Yarıiletken ince filmler, optoelektronik cihazların çalışma prensiplerini geliştirmek için kullanılır. Bu filmler, ışığı algılayabilen, iletken veya değiştirebilen cihazların yapımında kullanılır. Bu, optik iletişim sistemleri, görüntüleme teknolojileri ve optik algılama sistemleri gibi alanlarda daha gelişmiş ve verimli cihazların geliştirilmesine olanak tanır.

Bu uygulamalar, yarıiletken ince filmlerin modern teknolojiye rolünü ve potansiyelini vurgular. Bu filmler, birçok endüstride kullanılan ve gelecekte daha da genişleyen bir malzeme sınıfını temsil eder.

7. GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Elbette, nanoteknoloji ve yarıiletken ince filmler arasındaki ilişki, gelecekte teknolojik inovasyonların ve ilerlemelerin temelini oluşturacak kritik bir bağlantıyı temsil ediyor. Bu ilişki, nanoölçekteki özelliklerin yarıiletken ince filmlerin üretim süreçleri ve özellikleri üzerindeki etkisinin

artmasıyla daha da güçlenecektir. Bu durum, daha gelişmiş ve hassas cihazların üretilmesine olanak tanıyacak ve nanoteknolojinin sunduğu çığır açıcı uygulamalara zemin hazırlayacaktır.

Öte yandan, ileri elektronik alanında yarıiletken ince filmlerin rolü, daha hızlı işlemci hızları, artırılmış bellek kapasiteleri, düşük güç tüketimi ve küçük boyutlu cihazlar gibi gelişmiş özelliklerin elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Bu gelişmeler, bilgi işlem, iletişim, tıp ve diğer birçok sektörde ileri teknolojilerin hızla gelişmesine katkıda bulunacaktır.

Yarıiletken ince filmlerin gelecekteki potansiyel uygulamaları, esnek elektronik cihazlar, yüksek verimli enerji depolama cihazları, gelişmiş sensör teknolojisi, biyomedikal cihazlar, optik iletişim sistemleri ve yenilenebilir enerji teknolojileri gibi çeşitli alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahip olacak. Bu uygulamalar, yarıiletken ince filmlerin endüstride geniş çapta kullanılmasını sağlayacak ve teknolojik ilerlemelerin hızlanmasına büyük ölçüde katkıda bulunacaktır.

Gelecekte, nanoteknoloji ile yarıiletken ince filmler arasındaki ilişki daha da güçlenecek. Bu ilişki, nanoteknolojinin sunduğu nanoölçekteki özelliklerin, yarıiletken ince filmlerin üretimi ve özellikleri üzerindeki etkisini artıracaktır. Bu birleşme, daha gelişmiş ve hassas cihazların üretilmesine olanak tanıyacak ve nanoteknoloji alanında çığır açıcı uygulamalara yol açacaktır.

İleri elektronik alanında, yarıiletken ince filmler daha da gelişmiş cihazların üretilmesinde kritik bir rol oynayacaktır. Bu filmler, daha hızlı işlemci hızları, daha yüksek bellek kapasiteleri, daha düşük güç tüketimi ve daha küçük boyutlu cihazlar gibi daha gelişmiş özelliklerin elde edilmesini sağlayacaktır. Bu gelişmeler, bilgi işlem, iletişim, tıp ve diğer birçok sektördeki ileri teknolojilerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Yarıiletken ince filmler, gelecekte birçok farklı alanda geniş uygulama potansiyeline sahip olacaktır. Bu potansiyel uygulamalar arasında esnek elektronik cihazlar, yüksek verimli enerji depolama cihazları, gelişmiş sensör teknolojisi, biyomedikal cihazlar, optik iletişim sistemleri ve yenilenebilir enerji teknolojileri gibi alanlar bulunmaktadır. Bu uygulamalar, yarıiletken ince filmlerin geniş bir endüstri yelpazesinde kullanılmasını sağlayacak ve teknolojik ilerlemelerin daha da hızlanmasına katkıda bulunacaktır.

8. SONUÇ

Yarı iletken ince filmler, günümüzün teknolojik gelişmelerinde kritik bir rol oynayan ve geniş bir uygulama alanına sahip olan önemli malzemelerdir. Gelişmiş üretim teknikleri ve karakterizasyon yöntemleri sayesinde bu filmler, nanoelektronik, güneş hücreleri, yarı iletken sensörler, optoelektronik ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır. Gelecekte, yarı iletken ince filmlerin, yeni malzemelerin keşfi ve üretim tekniklerindeki ilerlemelerle birlikte daha da çeşitli uygulamalara sahip olması beklenmektedir. Bu gelişmeler, elektronik, enerji ve endüstriyel sektörlerde daha verimli, esnek ve sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Brendel, R. (2003). *Thin-Film Crystalline Silicon Solar Cells*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/3527603530>
- Koelmans, H. (1971). Application of semiconducting thin films. *Thin Solid Films*, 8, 19–33. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(71\)90093-9](https://doi.org/10.1016/0040-6090(71)90093-9)
- S. M. Sze . Kwok K. Ng. (1981). *Physics of Semiconducting*

Devices. Wiley-Interscience.

Sönmezoğlu, S., Koç, M., & Akin, S. (2012). Thin film Production Techniques. *Erciyes University Journal of Science and Technology*, 28(5), 389–401.

YENİLENEBİLİR ENERJİDE HİBRİT TEKNOLOJİNİN KULLANIMI VE GELECEĞİ

Mehmet TEMİZ¹

Hacı SERİN²

1. GİRİŞ

Günümüzde, enerjiye ve enerji kaynaklarına yönelik artan taleplerle birlikte, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve fosil yakıtlardan kaynaklanan olumsuz etkileri azaltmak için yeni çözümlere olan ihtiyaç giderek büyümektedir. Bu ihtiyacın karşılanmasında etkin ve alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları önemli bir yer almış ve artan bir ivme ile gün geçtikçe daha da yer almaya devam edecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlara alternatif olarak çıkması, bu alanda önemli bir kapıyı açmıştır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının daha özel alanlarda yetersiz kalması ve etkinliğini artırma çabaları karşımıza hibrit teknoloji ile birlikte kullanılması gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının hibrit teknolojiler ile kullanımı, enerji sektöründe bir devrimin kapılarını aralamış ve yakın gelecekte de o kapıyı ardına kadar açacaktır.

Güneş, rüzgâr, su ve biokütle gibi doğal kaynaklar, yenilenebilir enerji üretimindeki temel unsurlardır. Güneş enerjisi, fotovoltaiik hücreler aracılığıyla elektriğe dönüştürülerek

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Karapınar Aydoğanlar MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Konya, Türkiye, mehmettemiz@selcuk.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2974-8824.

² Öğr. Gör. Selçuk Üniversitesi, Karapınar Aydoğanlar MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Konya, Türkiye, haci.serin@selcuk.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7962-3478.

kullanılabileceği gibi, termal enerji sistemleriyle de sıcak su ve ısı üretiminde kullanılabilir. Rüzgâr enerjisi, modern türbin teknolojileriyle elektriğe dönüştürülerek sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlar. Hidroelektrik enerji; barajlar, akarsu ve gelgit enerjisi aracılığıyla elektrik üretimini mümkün kılar. Biokütle enerjisi ise biyolojik atıklar ve organik malzemeler üzerinden enerji elde etmeyi amaçlar.

Hibrit teknoloji, farklı enerji kaynaklarının entegrasyonu ile daha etkili ve sürekli bir enerji üretimini hedefler. Özellikle, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan hibrit araçlar, içten yanmalı motorlarla elektrikli motorları birleştirerek hem çevre dostu bir sürüş deneyimi sağlar hem de enerji verimliliğini artırır. Ayrıca, hibrit enerji depolama sistemleri, enerji talep ve arzını dengede tutarak sürdürülebilir enerji kullanımını destekler. Akıllı şebekeler ve hibrit güç sistemleri ise enerjiyi daha verimli bir şekilde yönetme imkânı sunar.

Ancak, bu yenilikçi teknolojilerin benimsenmesi çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Yüksek maliyetler, altyapı gereksinimleri ve teknolojik entegrasyon süreçlerindeki zorluklar, hibrit teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlandıran faktörler arasında yer alır. Bununla birlikte, sürekli Ar-Ge çalışmaları ve endüstri çabaları, bu zorlukların aşılabileceği ve hibrit teknolojinin gelecekteki enerji dönüşümüne liderlik edeceği bir perspektifi sunmaktadır.

İlerleyen sayfalarda, bu konuları daha ayrıntılı bir şekilde ele alarak, yenilenebilir enerji ve hibrit teknolojinin güçlü ortaklığının, enerji sektöründe nasıl bir dönüşüme sebep olduğunu ve olacağını göreceğiz.

2. ENERJİDE HİBRİT SİSTEM NEDİR?

Hibrit enerji, genellikle farklı enerji kaynaklarının kombinasyonunu ifade eden bir terimdir. Birden çok enerji kaynağı kullanılarak oluşturulan enerji sistemlerine hibrit enerji sistemleri denir. Güneş, rüzgâr, biokütle, hidroelektrik, termal enerji, dizel jeneratör ve bunun gibi enerji sistemlerinin en az ikisinin birlikte kullanılarak oluşturulduğu sistemlere hibrit enerji sistemleri denir.

Hibrit enerji sistemleri, yılın her ayında sürdürülebilir enerji kaynaklarından faydalanarak elektrik ihtiyacını karşılayabilir. Yaz aylarında güneş ışınları en güçlü olduğu zamanlarda, rüzgâr hızı genellikle düşüktür. Kış aylarında ise güneş enerjisi daha az olsa da rüzgâr hızı yüksek olabilir. Bu durum, rüzgâr ve güneş enerjisi sistemlerinde verimli enerji üretiminin günün ve yılın farklı zamanlarında değişiklik gösterdiği anlamına gelir. Yetersiz veya verimsiz rüzgâr hızına sahip günlerde ise alternatif olarak güneş enerjisi kullanılabilir. Bu şekilde, sistemde enerji üretimi sürekli olarak devam eder. Hibrit uygulamalar özellikle yazın ve kışın enerji talebinin yoğun olduğu, kesintiye yer verilemeyen sistemlerde veya kurulu güneş ya da rüzgâr enerji sistemlerinin desteklenmesi gereken yerlerde tercih edilir. Hibrit sistemlerde enerji kaynaklarının sadece ikili değil üçlü ve daha çok kullanımı da mümkündür ve herhangi bir zorluk yoktur. Projenin ihtiyacına bağlı olarak on-grid ya da off-grid olarak tasarlanabilirler.

Hibrit enerji sistemlerinin önemli özelliklerinden biri ise kullanılan farklı sistemlerin birbirleri ile senkronizasyonu, optimize edilmesi ve uygun koşullarda ve şartlarda enerjinin depolanmasıdır. Dolayısıyla enerjinin üretildiği esnada kullanılmadığı durumda depo edilmesi veya enerjiye ihtiyaç duyulduğu anda depolanan enerjinin kullanılması, sistemin verimliliğini artırır. Bu depolama yeteneği, enerji talebinin düşük

olduğu zamanlarda enerji biriktirilerek yoğun talep dönemlerinde kullanılabilir. Ayrıca, hibrit sistemlerin, farklı enerji kaynaklarının bir arada kullanılabilmesi sayesinde enerji arzını daha güvenilir hale getirir ve enerji kesintilerini minimumda tutar. Senkronizasyon ve depolama kapasitesi, hibrit enerji sistemlerini esnek, güvenilir ve çevre dostu bir enerji çözümü haline getirir. Bu özellikler, sistemin değişen enerji ihtiyaçlarına dinamik bir şekilde adapte olmasını sağlayarak sürdürülebilir enerji kullanımını destekler.

3. HİBRİT ENERJİ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

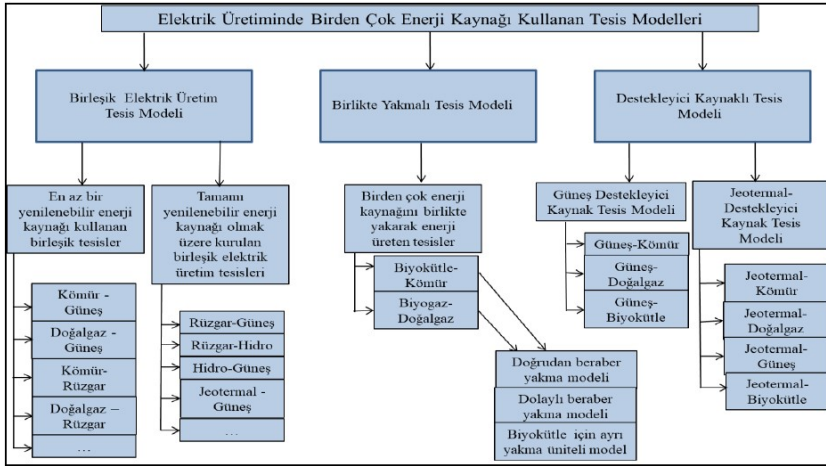
Şu anda, elektrik üretimi genellikle tek bir enerji kaynağı üzerinden gerçekleştirilmektedir, bu da klasik üretim yöntemi olarak adlandırılabilir. Ancak, enerji verimliliğini maksimum düzeye çıkarmak amacıyla giderek daha fazla kullanılan bir yaklaşım da hibrit elektrik üretim yöntemleridir. Bu yöntemlerde, en az iki farklı enerji kaynağı bir araya getirilerek elektrik üretimi sağlanır. Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan alternatif üretim yöntemleri arasında "entegre elektrik üretim yöntemi", "birlikte yanma esaslı elektrik üretim yöntemi" ve "destekleyici kaynak temelli elektrik üretim yöntemi" bulunmaktadır. (Kurtar, Gözen, 2021)

Hibrit enerji üretim modellerinde aslında klasik ve karbon yakıt esaslı üretim modelleri de birlikte kullanılabilir, ancak bu durumun çevre bilincine katkısı olmayacağından dolayı enerji sistemlerinden en az bir tanesini yenilenebilir enerji olarak seçmek, sürdürülebilirlik ve çevre koruma açısından daha etkili olacaktır. Dolayısıyla bu modellerin içindeki enerji sistemlerinden en az bir tanesinin yenilenebilir olması konumuzun ilgi alanına girmektedir. Örneğin zaten kullanılmakta olan bir dizel jeneratöre, yenilenebilir enerji sistemi entegre

edilerek oluşturulacak bir hibrit sistem, her yönden güvenilirliği ve çevre bilincini artırarak verimliliğe katkı sağlayabilecektir.

Aşağıda, Şekil 1’de yaygın olarak kullanılan hibrit elektrik üretim modelleri verildiği gibi, şu an kullanımı olmasa dahi mevcut teknolojik gelişme düzeyi dikkate alınarak olası tüm hibrit elektrik üretim modelleri kapsamına girebilecek alt üretim yöntemlerinin tamamı da verilmiştir. (Kurtar, Gözen, 2021) Dolayısıyla Şekil 1, yenilenebilir enerji sistemlerinin hibrit enerji sistemlerine entegresi için geniş bir perspektifi göstermesi açısından önem arz etmektedir.

Şekil 1. Birden Fazla Kaynağa Dayalı Elektrik Üretim Yöntemleri



Kaynak: (Kurtar, Gözen, 2021)

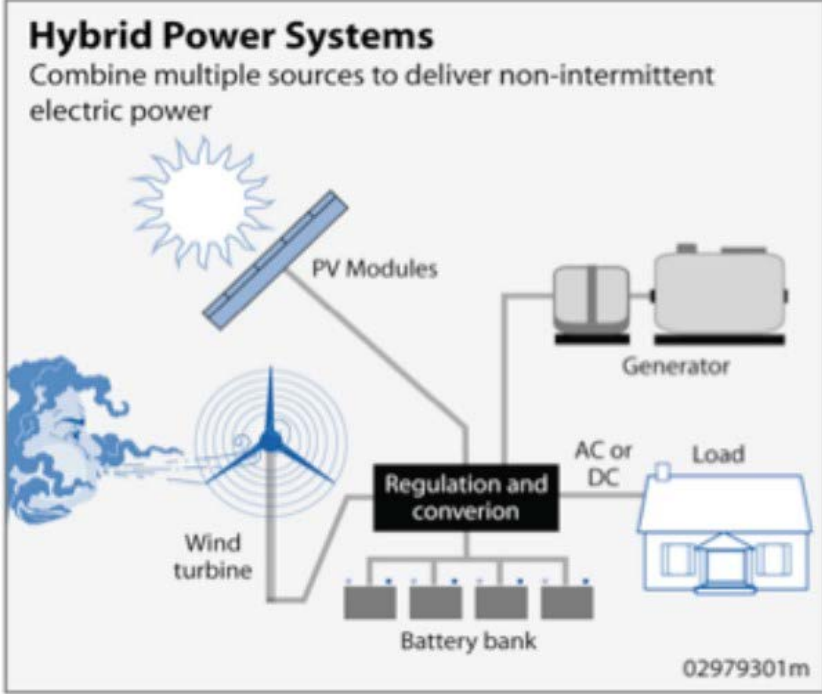
3.1. Entegre Elektrik Üretim Yöntemi

En az iki adet ve birbirinden farklı enerji kaynağının birlikte girdi olarak kullanıldığı sistem, entegre elektrik üretim yöntemi olarak adlandırılabilir (Demircioğlu, 2012). Bu yöntem, karbon esaslı yakıtların yanı sıra farklı türlerdeki birden fazla yenilenebilir enerji kaynağının bir arada kullanıldığı tesisleri kapsar. Bu yaklaşım, çeşitli enerji kaynaklarının birleşimi ile elektrik üretimine ve depolanmasına olanak tanır veya birden çok

kaynağın çeşitli şekillerde kullanımı ile elektrik üretimine imkân sağlar (Kurtar, Gözen, 2021).

Entegre elektrik üretim yönteminin şeması Şekil 2’ de gösterilmiştir.

Şekil 2. Entegre Elektrik Üretim Modeli



Kaynak: (Government, 2011)

Şekilden de anlaşılacağı gibi, bu üretim yöntemi; en az iki farklı yakıtın kullanıldığı ve birbirinden farklı çalışma prensiplerine sahip, ancak birbirini tamamlayan bir tasarıma sahiptir. Bu yöntem genellikle, sürekli ve dengeli üretim için depolama amaçlı bir batarya grubu veya dizel gibi ek bir kaynağa ihtiyaç duyan, tek bir üretim tesisi gibi işlev görür. Ancak depolama teknolojisinin henüz tam olarak gelişmemiş olması, bu modeli benimseyen tesisler için bir yatırım riski oluşturmaktadır. (Manwell, 2004)

Entegre elektrik üretim yöntemini, kendine özgü güçlü ve zayıf yönler içermektedir. Bu yöntem, fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltarak, rüzgâr ve güneş gibi kararsız enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki rolünü artırmaktadır. Bu değişiklikler, uzun vadede elektrik fiyatlarında düşüşe neden olabilir. Ayrıca, bu model sayesinde kırsal bölgelerdeki tüketicilere enerji erişimi kolaylaşırken, elektrik nakil hatlarının uzak bölgelere kadar genişletilmesi için gerekli olan maliyetler azalmaktadır. Ek olarak, dizel jeneratörlerin kullanımı ile sürekli, kaliteli ve güvenilir elektrik enerjisi kırsal bölgelere sağlanabilir. Ortak altyapı kullanımı, ayrı tesisler için özel altyapı kurma ihtiyacını ortadan kaldırdığı için ek şebeke yatırımına gerek duyulmamaktadır. Bu nedenle, bu yöntemde öncelik verilmesi gereken konu, kullanıcıların taleplerini etkin bir şekilde karşılamak için gerekli olan en etkin teknolojiyi kullanmak olacaktır. Örneğin Şekil 2’de verilen güneş ve rüzgâr enerjisi yerine, kullanılacak olan tesisin veya bölgenin durumuna göre; hidroelektrik, deniz akıntısı, jeotermal, biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından herhangi biri olabilmektedir.

Bu üretim yönteminin bazı zayıf yönleri bulunmaktadır. Öncelikle, tek bir kaynak yerine iki veya daha fazla kaynak kullanılması, yatırım maliyetini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu durum, bu yöntem kapsamındaki tesisler için genel finansman temin sürecini uzatarak zorlaştırabilmektedir. Tesisler, tek bir tesis gibi ele alınsa dahi, yerleşim yeri ve kullanılan kaynağa bağlı olarak tesis bazında ayrı çalışmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca, her tesisin özel durumunun, destek programları ve diğer altyapı gereksinimleriyle ilgili çalışmalarda göz önünde bulundurulması önemlidir. Bu nedenle, bu üretim yöntemi çerçevesinde tesis kurulumu planlanırken, tesisin konumuna yönelik detaylı bir çalışma yapılması gerekmektedir.

Bu modelin genişlemesi için tesis kurulumunu geliştirmek amacıyla çeşitli politika ve stratejilerin uygulanması gerektiği

düşünülmektedir. Elektrik alım ve satımında mahsuplaştırma işlemi, özellikle küçük ölçekli üreticilere teşvik sağlamak için benimsenebilir. Bu sayede, üreticiler, ihtiyacından fazla üretim yaparak sistemde sağladıkları elektrik enerjisi için perakende satış fiyatı üzerinden gelir elde edebilirler. Sabit fiyat garantili bir alım modeli, bu çerçevede yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında artışa neden olabilir. Ayrıca, yatırım teşvikleri ve temiz enerji için ayrılan fonlar aracılığıyla bu model kapsamındaki tesis kurulumunu artırmak mümkündür. (Kurtar, Gözen, 2021).

3.2. Birlikte Yanma Esaslı Elektrik Üretim Yöntemi

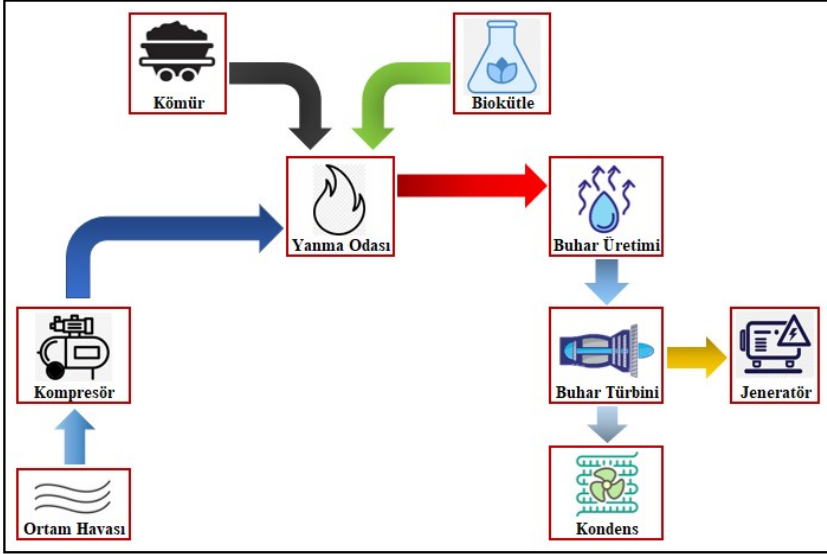
Bu yöntemde, elektrik üretimi için, bir tesisin ünitesinde en az iki kaynak aynı proses sürecinde işleme tabi tutularak, aynı kazanda yakılmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, girdi kaynakları ve işleyiş açısından diğer yöntemlerden ayrılmaktadır. Bu yöntemin odak noktası, biokütle ve biyogaz gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının vurgulanmasıyla birlikte aynı kazanda birden fazla kaynağın yakılmasıyla elektrik enerjisi üretilmesini içerir. Bu yöntem çerçevesinde, kullanılan ana kaynağın biyogaz olması durumunda diğer kaynak doğal gaz olabilirken, biokütle olması halinde ise diğer kaynak kömür olabilmektedir.

Bu yöntem, örneğin bir kömür santralinde teknik bir değişiklik yapmadan kömürün biokütle ile birlikte yakılmasına imkân tanır. Bu yöntemle, kömür ve biokütle önceden bir yakıt hazırlama ünitesinde karıştırılabilir veya farklı bir besleme mekanizması kullanılarak aynı yakma kazanını besleyebilir. Bu yöntem, doğrudan yakma ve gazlaştırma esasına dayalı proseslerde enerji üretimi için uygulama alanı bulmaktadır.

Şekil 3'te kömür ve biokütle kaynakları ile çalışan bir termik elektrik santralinin şeması görülmektedir. Şekil 3' te verilen çevrime göre dışarıdan alınan hava kompresörde sıkıştırılır. Sıkıştırılan hava yanma odasına iletilir. Yanma

odasına kömür ve biokütle yakıtları verilir. Bu yakıtlar, yanma odasına, prosesin durumuna göre aynı anda verilebildiği gibi iki ayrı yanma odasında yakılarak sisteme dahil edilebilir, buradaki temel mantık en yüksek verimde yanmayı gerçekleştirmektir. Yanma odasında yakılan yüksek enerjili yakıt-hava karışımı sayesinde sistemdeki su ısıtılarak yüksek enerjili buhar elde edilir ve bu buhar, türbine iletilerek türbin kanatlarının dönmesi sağlanır ve türbin millerine bağlı olan jeneratör şaftı dönerek elektrik üretilir.

Şekil 3. Kömür ve Biokütle Kaynakları ile Çalışan Termik Elektrik Santrali Şeması

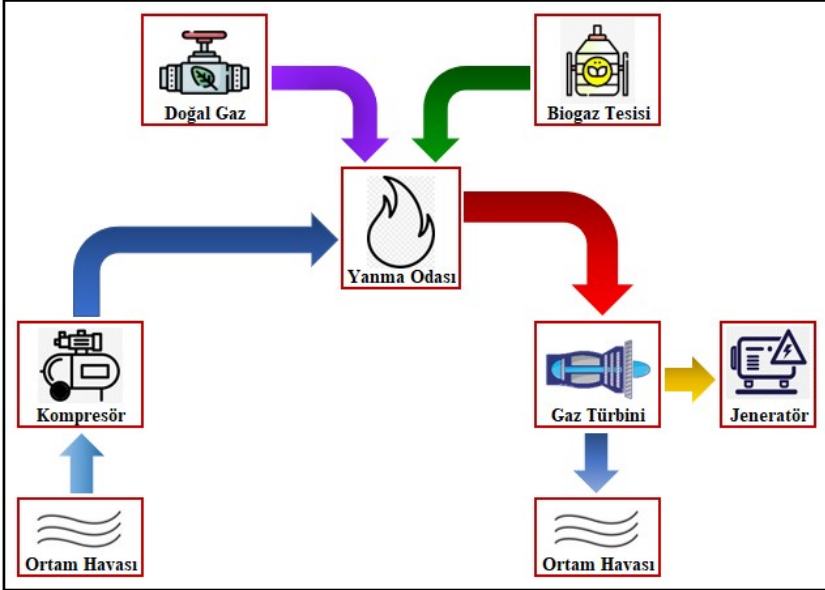


Bu üretim yönteminin öne çıkan avantajlarından biri, yakıtların birlikte yakılması ile mevcut bir tesisin daha verimli çalışabilmesidir. İki ya da daha fazla yakıt kaynağının birlikte kullanılması, optimum yanma sağlayarak yüksek verime ulaşılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, yöntemin diğer avantajı, belediye sorumluluğundaki evsel ve diğer atıkların bu üretim süreciyle bertaraf edilmesi, yerel kaynakların kullanılması ve bu sayede elektrik üretimiyle belediye için istikrarlı bir mali

kaynak oluşturulmasıdır. Öte yandan, bu model altındaki üretim tesisleri anlık yakıt miktarındaki değişikliklere karşı esneklik gösterme kapasitesine sahiptir.

Şekil 4'te doğal gaz ve biyogaz kaynakları ile çalışan bir gaz santralinin şeması görülmektedir. Şekil 4'te verilen çevrime göre dışarıdan alınan hava kompresörde sıkıştırılır. Sıkıştırılan hava yanma odasına iletilir. Yanma odasına mevcut doğal gaz ve biyogaz tesisinden üretilen gaz verilir. Burada da yine temel mantık yanma veriminin yükseltilmesidir. Dolayısıyla Doğal gaz ve biyogaz; aynı yanma odasında yakılacağı gibi prosesin durumuna göre ayrı yanma odalarında yakılarak yüksek enerjili yakıt hava karışımı elde edilir. Yanma odasında veya odalarında yakılan sıcak yüksek enerjili yakıt-hava karışımı gaz türbinine iletilir. Bu gaz karışımı enerjisi türbinde mekanik enerjiye dönüştürüldükten sonra dış ortama atılır. Türbinde üretilen mekanik enerji de jeneratör de elektrik enerjisine dönüştürülür.

Şekil 4. Doğal Gaz ve Biyogaz Kaynakları ile Çalışan Gaz Santralinin Şeması



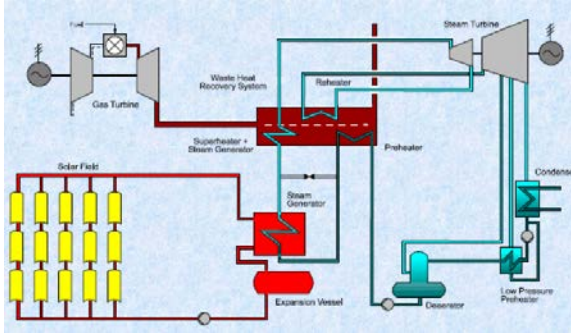
3.3. Destekleyici Kaynak Temelli Elektrik Üretim Yöntemi

Bu yöntem, mevcut bir termik santralde, destekleyici kaynak kullanarak tesisin toplam verimliliğini arttırmayı hedefleyen bir yaklaşım sunar. Termik santrallerde, genellikle kömür veya doğal gaz gibi termal yakıtların yanmasıyla kimyasal enerji mekanik enerjiye dönüştürülür, ardından bu mekanik enerji kullanılarak elektrik enerjisi üretilir. Yani, yüksek sıcaklıklarda termal yakıtların kazanlarda yanması, suyun buharlaşması ve bu buharın türbinler aracılığıyla elektrik üretimi şeklinde gerçekleşir.

Bu yöntemin işleyiş prensibi ise şu şekildedir: Termik santralde kullanılan boru sisteminde, buhar üretimi için gerekli besleme suyu, güneş enerjisi veya jeotermal enerji gibi destekleyici bir kaynak kullanılarak önceden belirlenmiş bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu, buhar üretimi için gerekli enerji ihtiyacında tasarruf sağlar. Bu sayede, tesisin toplam enerji verimliliğini artırarak daha sürdürülebilir bir üretim süreci elde edilmiş olur.

Şekil 5'te destekleyici kaynak temelli elektrik üretim yöntemi kapsamında destekleyici kaynak olarak güneş enerjisinin kullanıldığı elektrik üretimi şematik olarak gösterilmiştir.

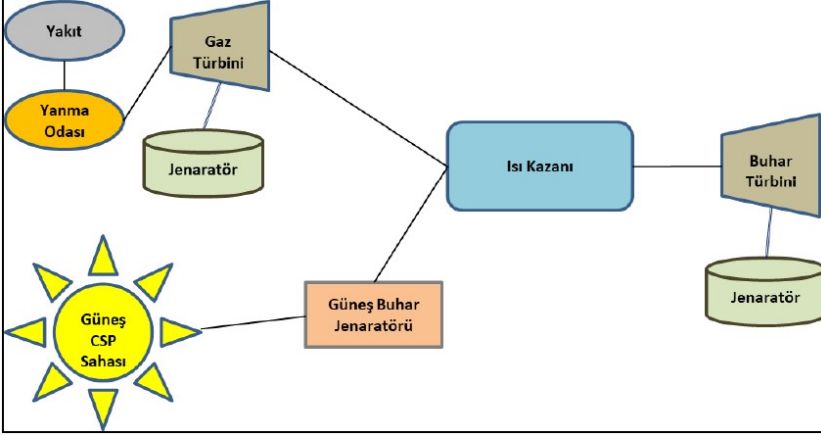
Şekil 5. Destekleyici Kaynak Temelli Elektrik Üretim Yöntemi



Kaynak: (Newenergynews, 2011)

Şekil 5'te gösterilen üretim yöntemi daha basit bir şema ile Şekil 6'da aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

Şekil 6. Destekleyici Kaynak Temelli Elektrik Üretim Yöntemi Basit Şeması



Kaynak: (Kurtar, Gözen, 2021)

Bu üretim yöntemi, tesis içinde kullanılan fosil kaynak miktarında azalmaya ve daha az fosil kaynağın kullanılmasının sonucunda karbon salımında bir düşüşe yol açacaktır. Uzun vadede, azalan fosil kaynak kullanımıyla birlikte bu kaynakların fiyatında düşüş mümkün olabilecektir. Aynı zamanda bu yöntem, kurulu bir termik santralde teknik dönüşüm sağlayarak verimlilik artışını mümkün kılacak ve ek yatırım gerekliliğini ortadan kaldıracaktır.

Diğer bir ifadeyle, bu yöntem çerçevesinde güneş enerjisi veya jeotermal enerji gibi ek kaynaklar kullanılarak üretim sürecindeki buhar üretimi arttırılmaktadır. Bu sistem, güneş enerjisinin gün içinde ve mevsimlere bağlı olarak değişen ışınımına bağlı olduğundan, buhar türbini için gerekli ısı ihtiyacını ana kaynakla dengeleme gerekliliği taşır.

Bu yöntemeye dayalı üretim süreci, daha yüksek basınç ve buhar sıcaklığı ile çalışabilen daha büyük bir buhar türbiniyle birlikte daha etkili bir enerji üretimini mümkün kılar.

Güneş enerjisinin destekleyici kaynak olduğu bir kombine çevrim santralının avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Kesintisiz ve Sürekli Elektrik Üretimi: Güneş enerjisi, gün boyunca sürekli olarak mevcut olduğu için kombine çevrim santrali, elektrik üretimini kesintisiz bir şekilde sürdürebilir.
- Elektrik Üretiminde Artış ve Üretim Maliyetinde Düşüş: Güneş enerjisinin kullanımıyla birlikte, toplam elektrik üretimi artabilir ve bu da genellikle üretim maliyetinde bir düşüşe neden olabilir. Güneş enerjisi, kaynağının ücretsiz olması ve bakım maliyetlerinin genellikle düşük olması nedeniyle ekonomik bir avantaj sağlayabilir.
- Fosil Kaynak Tüketimi ve Sera Gazı Salımında Düşüş: Güneş enerjisi temiz bir enerji kaynağıdır ve bu nedenle kombine çevrim santralının fosil kaynak tüketimini azaltmasına ve sera gazı salımını düşürmesine yardımcı olabilir. Bu, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantajdır.

Bu avantajlar hem enerji güvenliği hem de çevresel etkiler açısından kombine çevrim santrallerinin daha sürdürülebilir ve etkili enerji üretimine katkı sağladığını göstermektedir.

4. YENİLENEBİLİR ENERJİDEKİ HİBRİT TEKNOLOJİNİN GELECEK PERSPEKTİFİ

Günümüzde enerji sektörü, hızla değişen teknolojik gelişmeler, artan enerji talepleri ve çevresel sürdürülebilirlik

baskılarıyla karşı karşıyadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları ve hibrit teknolojiler, enerji sektöründe önemli bir dönüşümü müjdelemektedir. Gelecekte, yenilenebilir enerji kaynakları ile hibrit teknolojilerin entegrasyonu, enerji üretiminde ve tüketiminde çeşitli avantajlar sağlayacaktır.

4.1.Enerji Depolama ve Akıllı Şebekelerin Rolü

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal olarak değişken ve sürekli olmayan bir doğaya sahiptir. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi veya gelgit enerjisi, iklim şartlarına bağlı olarak dalgalanabilir. Bu dalgalanmalar, enerji talebinin sabit olmadığı durumlarda sorunlara yol açabilir. Bu nedenle, enerji depolama sistemleri ve akıllı şebekelerin hibrit enerji sistemlerindeki rolü büyük önem taşır.

Gelecekte, daha gelişmiş ve etkili enerji depolama teknolojileri, hibrit enerji sistemlerinin güvenilirliğini artıracak ve enerji talebi ile arzını dengeleme konusunda kritik bir rol oynayacaktır. Enerji depolama tekniklerinde gelecekte depolama kapasiteleri günümüz teknolojisinden çok daha ileri düzeylere taşınacaktır. Dolayısıyla enerjinin ihtiyaç duyulmadığı anda depolanması, ihtiyaç duyulduğu anda esnek bir şekilde kullanılması her tür enerji kaynağının daha verimli ve optimum bir şekilde kullanılması anlamına gelecektir. Yapay zekanın gün geçtikçe hızla gelişmesiyle birlikte, akıllı şebekeler; enerji üreticileri, tüketiciler ve dağıtım sistemleri arasında veri akışını optimize ederek enerji yönetimini daha etkili hale getirecek ve sistemin karar alma süreçlerini iyileştirecektir.

4.2.İnovasyon ve Ar-Ge Çalışmaları

Gelecekteki hibrit enerji sistemlerinin başarısı, sürekli inovasyon ve Ar-Ge çalışmalarına dayanacaktır. Enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler, verimli enerji dönüşümleri ve yeni enerji çözümleri, hibrit enerji sistemlerini daha rekabetçi ve sürdürülebilir kılacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hibrit sistemlerde kullanılan cihazlar, paneller ve diğer teknolojik bileşenlerdeki sürekli iyileştirmeler, enerji verimliliğini artıracak ve maliyetleri düşürecektir. Bu bağlamda, endüstriyel ve akademik alanlarda gerçekleştirilecek Ar-Ge çalışmaları, hibrit enerji teknolojilerini daha erişilebilir ve uygulanabilir kılacaktır.

4.3.Hibrit Enerji Sistemlerinin Daha Geniş Kullanım Alanları

Hibrit enerji sistemleri, başlangıçta genellikle taşınabilir cihazlardan, araçlara ve binalara kadar çeşitli ölçeklerde kullanılmıştır. Ancak gelecekte, endüstriyel tesislerden büyük enerji altyapılarına kadar daha geniş kullanım alanları bulacaktır.

Özellikle kentsel alanlarda ve kırsal bölgelerde enerji güvenliğini artırmak, çevresel etkileri azaltmak ve sürdürülebilir enerji kullanımını teşvik etmek amacıyla hibrit enerji sistemleri daha yaygın olarak benimsenecektir.

4.4.Küresel Enerji Dönüşümü ve İklim Değişikliği Mücadelesi

Hibrit enerji sistemleri, küresel enerji dönüşümünün önemli bir parçasını oluşturacaktır. Fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminden vazgeçilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme çabaları, hibrit sistemlerin benimsenmesini teşvik edecektir. Bu, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir adım olarak değerlendirilecektir.

Gelecekte, uluslararası düzeyde enerji politikaları ve teşvik önlemleri, hibrit enerji sistemlerini teşvik etmeye yönelik olacaktır. Bu, dünya genelinde enerji sektörünü daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir hale getirme hedefine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, hibrit enerji sistemleri, gelecekte enerji sektörünün şekillenmesinde önemli bir rol oynayacak ve çeşitli

avantajları ile sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlayacaktır. Bu sistemlerin başarısı, teknolojik gelişmelere, inovasyona, küresel iş birliğine ve etkili enerji politikalarına bağlı olacaktır.

5. SONUÇ

Yenilenebilir enerji ve hibrit teknoloji, geleceğimizin temel taşları olarak karşımıza çıkıyor. Bu bölümde, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ve yenilenebilir enerjide hibrit enerji kullanımının çeşitli yöntemleri üzerinde durduk. Geleneksel enerji kaynaklarından uzaklaşıp çevre dostu çözümlere yönelmek, sadece çevremizi korumakla kalmıyor, aynı zamanda enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik konularında da önemli adımlar atmamızı sağlıyor.

Hibrit enerji sistemleri, farklı enerji kaynaklarını akıllıca birleştirerek, güçlü ve verimli bir enerji üretimini mümkün kılıyor. Ele aldığımız hibrit sistemler, bu teknolojinin ne kadar çeşitli alanlarda kullanılabileceğini gösteriyor. Ayrıca otomotiv sektöründen endüstriyel tesislere kadar geniş bir yelpazede, hibrit enerji çözümleri, sürdürülebilirliği ve enerji verimliliğini artırmak adına umut vaat ediyor.

Bununla birlikte enerji depolama sistemleri, enerjinin üretildiği ancak tüketilmediği durumlarda enerjiyi depolayarak kullanılabilir hale getirir. Hibrit enerji sistemlerinde, güneş veya rüzgâr enerjisi gibi faydalı fakat değişken kaynaklarla üretilen enerji, depolama sistemleri aracılığıyla saklanabilir ve ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir. Bu, enerji talebi ile arzını dengelemek ve sürekli enerji sağlamak açısından önemlidir.

Bu konudaki en önemli konulardan biri ise enerji yönetimidir. Akıllı şebekeler ise enerji iletimini ve dağıtımını daha etkili bir şekilde yöneten, enerji tüketimini izleyen ve yöneten sistemlerdir. Hibrit enerji sistemleri, akıllı şebekelerle

entegre edilerek enerji taleplerini daha iyi tahmin etme, enerji akışını optimize etme ve enerji verimliliğini artırma imkânı sunarak enerji yönetiminde etkili bir çözüm olacaktır. Akıllı şebekeler ayrıca, enerji talebinin yüksek olduğu zamanlarda hızlı ve etkili bir şekilde tepki verebilir, böylece enerji kesintilerini minimize eder.

Gelecekte, bu teknolojilerin daha da gelişeceği gayet açıktır. İnovasyon ve araştırma, hibrit enerji kullanımının daha da optimize edilmesine olanak tanıyacaktır. Bu süreçte, küresel enerji dönüşümüne liderlik eden teknolojiler, çevre bilinci ve sürdürülebilirlik konularında dünya genelinde olumlu değişimlere öncülük edecektir.

Sonuç olarak, hibrit enerji kullanımının önemi gün geçtikçe artıyor. Bu alandaki gelişmeleri takip ederek, çevremizi korurken aynı zamanda daha etkili ve verimli bir enerji kullanımına katkı sağlamış olacağız. Geleceğin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için, bu yönde yapılan çalışmalara destek vermek ve hibrit enerji çözümlerini benimsemek, sadece bireysel düzeyde değil, küresel çapta bir sorumluluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

Demircioğlu, M. (2012). Hibrit enerji sistemlerinde güvenilirlik analizi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı.

Government, (2011). US Department of Energy, Small “Hybrid” Solar and Wind Electric Systems (Washington, D.C., US)

Kurtar, O. A., Gözen, Dr. M. (2021). Düzenleme Bakış Açısından Hibrit Elektrik Üretiminin Değerlendirilmesi ve Türkiye

için Öneriler, AÇÜ Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi
Yıl: 2021, Cilt: 7, Sayı:1, ss. 84-100

Manwell, J. F. (2004). Hybrid energy systems. C. Cleveland
içinde, Encyclopedia of Energy (s. 215-229). Elsevier Inc.

Newenergynews (2011). Breaking in big sun in North Africa.
Erişim: 03.12.2023. <http://newenergynews.blogspot.com.tr/2011/04/breaking-in-big-sun-in-north-africa.html>

İNCE FİLM BİRİKTİRME SÜREÇLERİNDE KAPLAMA VERİMLİLİĞİNİ ARTIRAN ETKENLER

Enes NAYMAN¹

Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL²

1. GİRİŞ

İnce film biriktirme işlemleri, modern malzeme biliminde ve nanoteknolojik uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle malzemelerin yüzey özelliklerinin değiştirilmesi, iyileştirilmesi ve yeni özellikler kazandırılması amacı ile tercih edilmektedir (Kumar et al., 2023), (He et al., 2023). Bu işlemler, esnek ve esnek olmayan yüzeylere istenilen malzemelerin birbirinden farklı fiziksel ve kimyasal yöntemler uygulanarak mikro/nano boyutlarda biriktirilmesi ile gerçekleştirilmektedir (Zang et al., 2023), (Bruzzi, Calisi, Enea, Verroi, & Vinattieri, 2023), (Jolivet et al., 2023), (Brathwaite et al., 2023), (Kuroki, Horide, Matsumoto, & Ishimaru, 2023). Filmlerin; kaplanacak olduğu yüzeylere, nihai aşamada istenen özellikler açısından en ideal şekilde uygulanması amaçlanmaktadır. Yani ince film kaplı bir malzeme şekil değiştirilmesi gereken bir zemine uygulanması gerekiyorsa altlık olarak esnek bir malzemenin tercih edilmesi gerekmektedir ya da üretilecek olan ürünün sensör olarak kullanılması isteniyorsa kaplama malzemesinin yarıiletken/iletken sensör özelliklerine

¹ Öğretim Görevlisi Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Söğüt Meslek Yüksekokulu, Moda Tasarımı Bölümü, enes.nayman@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3656-3126.

² Dr. Öğretim Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Söğüt Meslek Yüksekokulu, Moda Tasarımı Bölümü, fatih.gozukizil@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1719-959X.

sahip olması gerekmektedir (Rzaij, 2023), (Amini, Jafari, Vafaei, & Mahmoodian, 2022).

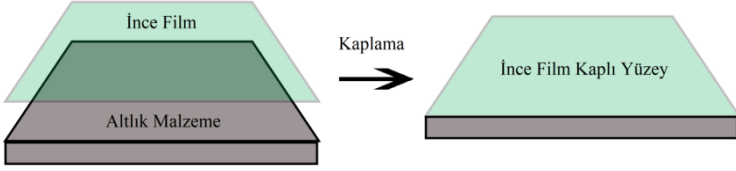
2. İNCE FİLM BİRİKTİRMEDE VERİMLİLİĞİNİN ARTTIRILMASI

İnce film, bir altlık malzemenin yüzeyine nanoboyutlarda çok ince bir katman halinde uygulanan özel bir kaplamadır (Acharya et al., 2023). Bu metot, çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda kullanılır. Malzemenin özelliklerini geliştirmek, korumak veya belirli bir işlevi yerine getirmek amacıyla gerçekleştirilir. İnce film biriktirme, genellikle uygulama olarak birbirini takip eden çok sayıda adımdan oluşan süreçtir. Farklı fiziksel ve kimyasal yöntemlerle elde edilirler (Pawbake, Rondiya, Late, Prasad, & Jadkar, 2023), (Mahana, Mauraya, Singh, & Muthusamy, 2023). Her biri, belirli malzemelerin ve özelliklerin elde edilmesine yönelik avantajları ve sınırlamaları olan kendine has yöntemlerden oluşmaktadır. Biriktirme ve kaplama kelimeleri literatürde birbirlerinin yerine de ifade edilmektedir. Verimlilik değerlendirmesi aynı zamanda kaplama işlemi bitiminde istenilen özelliklere en uygun sonuçları ifade etmektedir. İnce film biriktirmede verimliliği artıracak parametreler şu şekilde sıralanmaktadır.

2.1.Altlık Malzeme

İnce film biriktirme işleminde altlık malzeme ya da diğer adıyla "substrat" ince film tabakasının, yüzeyine uygulandığı malzemedir. İnce film ve altlık malzeme görselleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Belirli bir uygulama veya endüstri gereksinimlerine bağlı olarak seçilir.

Şekil 1. İnce Film ve Altlık Numunesi



Örneğin, mikroelektronik uygulamalarda kullanılan substratlar genellikle silikon bazlı malzemelerdir (Tran et al., 2023). Cam, seramik, plastik veya diğer malzemeler de farklı endüstriyel uygulamalarda substrat olarak kullanılabilir. Esnek substrat olarak kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Ayrıca tekstil ürünleri olan doğal, sentetik ve yarı-sentetik içerikli elyaflar ve kumaşlar ise esnek altlık malzemeler içerisinde en fazla kullanılan malzemelerdendir (Rubežienė et al., 2023), (Park et al., 2023), (Bentis, Boukhriss, Zahouily, Manoun, & Gmouh, 2023). Substrat, ince film biriktirme işleminin sonunda elde edilen ürünün özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynar. Dolayısıyla, substratın seçimi, ince film tabakasının yapısı, kalitesi ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Biriktirme yöntemi, süreçleri ve malzemesi aynı fakat substratları farklı olan çalışmalar incelendiğinde farklı sonuçların alındığı çalışmalar literatürde gözlemlenmiştir. Aynı yöntem ve biriktirme malzemeleri ile biriktirilen kuvars, FTO ve Si substratları farklı kristal boyu, gerilme ve yüzey pürüzlülüğü değerleri alabilmektedir. Si substrat numunesi en küçük yüzey pürüzlülük değerine sahipken, FTO substratının en büyük kristal boyutu değerine sahip olduğu görülmektedir. Farklı büyüklükte kristal yapıya sahip bu substratlar farklı içsel düzenliliğini sağlamakta ve dolayısıyla mekanik özellikleri değişmektedir. Düşük gerilme, malzemenin deformasyona karşı direncini azaltabilmekte ve enerji kayıplarını minimize edebilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü mekanik dayanım, optik ve elektronik özelliklerin iyileştirilmesi açısından değerlendirildiğinde

genellikle düşük değer alması gerekmektedir. Sonuç olarak diğer koşullar sabit tutulup sadece substrat değişikliği yapıldığında ortaya farklı ölçeklerde kaplama kaliteleri çıkmaktadır. Substrat değişikliğinin verimliliği etkilediği açıkça görülmektedir (Sudha, Ashok, Patil, Yadav, & Swaminathan, 2023).

Substrat değişikliklerinin etkili olabilmesi için, kullanılacak işleme ve hedeflenen malzemenin özelliklerine uygun substratları seçmek gerekmektedir. Bu bağlamda, substrat tercihi, verimliliği optimize etmek ve istenilen sonuçları elde etmek adına kritik bir faktördür.

2.2.Biriktirme Malzemesi

Biriktirme ya da kaplama malzemesi, genellikle bir yüzeyi örtmek, korumak, iletkenlik sağlamak veya özel bir işlevi gerçekleştirmek amacıyla kullanılan malzemelerdir. Kaplama malzemesi, özellikle malzemenin uygulama amacına, çevresel koşullara, maliyet faktörlerine ve sürece uygunluğuna bağlı olarak seçilmelidir. Kaplama malzemesi seçiminde ilk adım, uygulama amacını belirlemektir. Örneğin, elektronik cihazlar için kullanılacak bir kaplama malzemesi, yüksek iletkenlik özelliklerine sahip olmalıdır. Diğer yandan, bir koruyucu kaplama malzemesi, çevresel etkilere karşı direnç göstermeli ve malzemenin uzun ömürlülüğünü artırmalıdır. Sıcaklık değişimleri, kimyasal etkileşimler, nem ve diğer çevresel etkenler kaplama malzemesinin performansını etkileyebilir. Bu nedenle, kaplama malzemesi seçiminde uygulamanın çalışma koşulları büyük bir önem arz etmektedir.

İnce film biriktirme işlemleri farklı malzemelerle gerçekleştirilebilir ve malzeme seçimi performansı belirleyici bir parametredir. Örneğin, bir yarıiletken uygulamada silikon bazlı bir malzeme yüksek iletkenlik sağlarken, optik bir uygulama için ise yarı geçirgen bir malzeme seçilebilir

(Gounden, Pillay, Moodley, Nombona, & van Zyl, 2023). Yariletken özellikte bir yüzey elde etmek için yasak enerji aralıkları da dikkate alınarak Ge (Baik, Jiang, Soh, Ahn, & Choi, 2023), Si (Preeti & Kumar, 2023), ZnO (Temel, Gokmen, & Yaman, 2020), CuO (Mehmet Fatih Gözükızıl & Nayman, 2023) gibi malzemeler seçilmektedir. Malzeme seçimi, çalışma gereksinimlerine uygun olarak belirlenmelidir.

Kaplama malzemesinin maliyeti de, genellikle seçim sürecinde önemli bir rol oynar. Ekonomik bir bakış açısıyla, malzemenin maliyeti ve işlemin ölçeklenebilirliği göz önünde bulundurulmalıdır. Yeteri düzeyde kalite koşullarını sağlayan düşük maliyetli bir kaplama malzemesi seçimi, endüstriyel uygulamalarda önemli bir avantaj sağlar. Uygulanacak kaplama malzemesi, dayanıklılık, yapışma özellikleri, ısıl iletkenlik, korozyon direnci gibi fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmalı ve uygulama süresi boyunca uygunluğunu korumalıdır (Wang et al., 2023).

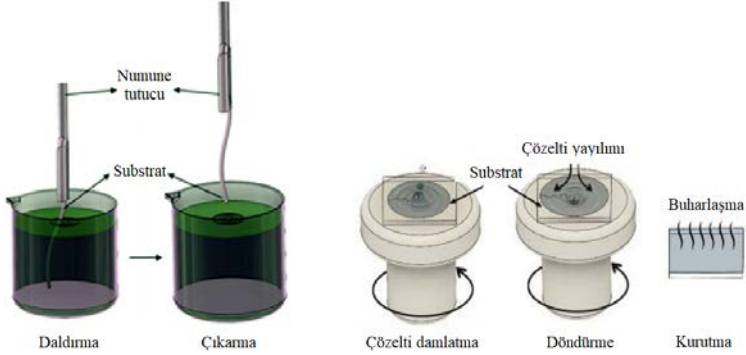
Özetle, kaplama malzemesi, uygulamanın gereksinimlerini karşılayabilen, çevresel koşullara dayanıklı, ekonomik ve işlemin uygunluğunu sağlayan bir malzemenin titiz bir değerlendirmesi sonucunda seçilmelidir. Her bir faktörün dikkatlice göz önünde bulundurulması, ince film biriktirme işlemlerinde başarılı sonuçlar elde etme olasılığını artırır.

2.3.İnce Film Biriktirme Yöntemleri

İnce film biriktirme yöntemleri substrat üzerine kaplanmak istenilen malzemenin uygun şartlar ve metotlar yardımıyla biriktirilmesi işlemidir. Bu yöntemlerdeki farklılıklar her substrata ya da biriktirme malzemesine uygun olmamaktadır. Bu sebeple kaplama işleminde kullanılacak altlık ve kaplama malzemelerinin biriktirme yönteminin şartlarına dayanması ve uygun olması gerekmektedir. Substratların istenilen kriterlere uygun bir şekilde kaplanması için ince film

malzemelerinin substrat yüzeyine mümkün mertebe homojen ve sağlam bir şekilde bağlanması gerekmektedir. Bu bağlanabilmenin kalite kıstaslarından birisi de uygulanan biriktirme malzemesi ve yöntemlerine bağlıdır. Yöntemler uygulanırken bazı dış etken ve malzemelere de ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle kimyasal biriktirme süreçlerindeki bazı durumlarda bazı biriktirme malzemeleri substratlara doğrudan bağlanamamaktadır. Böyle durumlarda hazırlanan ince film çözelti içerisine film performansını olumsuz etkilemeyecek fakat filmin yüzeyde tutunmasını sağlayacak bağlayıcı kimyasal bileşenler kullanılabilir. Proses kontrolü yani biriktirme işleminin her aşamasında süreci kontrol etmek ve yaşanabilecek herhangi bir probleme anında müdahale ederek olumsuz sonuçların önüne geçmek gerekmektedir (Patil, Sankapal, & Almutaser, 2023). İnce film biriktirme yöntemlerinden bazıları Şekil 2’de gösterilmiştir.

Şekil 2. Daldırarak Kaplama ve Döndürerek Kaplama Yöntemleri



Kaynak: (Temel, Gözükizil, Özge Gökmen, & Yaman, n.d.)

Sonuç olarak, ince film biriktirme yöntemi seçimi, substratlarda beklenen özelliklerle de aynı olacak şekilde süreçlerin gerekliliklerini temin edecek, düşük maliyetli, dış faktörlere karşı mukavemetli, hızlı, pratik ve uygulaması kolay olmalıdır. Her bir faktörün dikkatlice göz önünde bulundurulması, ince film biriktirme işlemlerinde istenilen

performansın sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Yüzey kaplama sürecinde biriktirme yöntemi, temizleme ve katkılama aşamaları en önemli parametrelerdendir.

2.3.1. Temizleme İşlemi

İnce film biriktirme işlemi sırasında, substrat genellikle belirli bir temizlik ve hazırlık sürecinden geçirilir. Ardından istenen ince film malzemesi, substratın yüzeyine uygun tekniklerle uygulanır. Steril olmayan substrat malzemelerinin biriktirme işlemi öncesinde yüzey temizliğinin yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde biriktirme süreçlerinde substrat malzeme ile biriktirme malzemesinin tam anlamıyla kaplama oluşturamaması ve kimyasal çözelti içeriğinin değişmesi gibi olumsuz durumlarla karşılaşmaktadır. Substrat temizleme, ince film biriktirme sürecinde yüzeylere uygulanan malzemenin kalitesini ve performansını artırmak amacıyla gerçekleştirilen bir ön hazırlık adımıdır.

Substrat temizleme işleminde kullanılan temizleme yöntemleri, genellikle uygulanacak malzemenin özelliklerine ve sürecin gereksinimlerine bağlı olarak belirlenir. Ancak genel olarak, kimyasal ve fiziksel temizleme yöntemleri tercih edilir. Kimyasal temizlemede, yüzeydeki kirleticileri çözmek ve uzaklaştırmak için çeşitli kimyasal çözeltiler kullanılmaktadır. Fiziksel temizlemede ise yüzeydeki tanecikleri mekanik olarak çıkarmak amacıyla sürtünme, fırçalama veya benzeri yöntemler uygulanmaktadır.

Temizleme işlemi sırasında dikkat edilmesi gereken önemli hususlar bulunmaktadır. İlk olarak, temizleme işlemi substratın özelliklerine uygun olarak seçilmelidir. Temizleme sırasında kullanılan çözelti veya temizleme maddelerinin substrata zarar vermemesi için özen gösterilmelidir. Temizleme işlemi aşamasında kullanılan ekipmanın da temiz olması ve kontamine olmaması gerekmektedir. Ayrıca, temizleme

sonrasında malzemenin bekletildiği ortamın da kontaminasyondan arındırılmış olması önemlidir.

Temizleme işlemi ihmal edildiğinde veya yeterince dikkat gösterilmediğinde bir dizi olumsuz durum yaşanabilmektedir. İlk olarak, kirlenmiş bir substrat, ince film biriktirme sürecinde istenmeyen kimyasal reaksiyonlara veya kusurlara neden olabilir. Ayrıca, yüzeyde kirleticilerin birikmesi, biriktirilen malzemenin istenilen özellikleri kazanmasını engelleyebilir. Yani bu kirleticiler homojen bir kaplamayı önüne geçebilir. Temizleme işlemi yapılmadığında, malzemenin nihai performansında düşüşler yaşanabilir ve ürün kalitesi olumsuz etkilenebilir.

İnce film biriktirmede en çok kullanılan temizleme işlemlerinden bazıları ultrasonik banyolama ve saf su ile temizleme işlemleridir (Ydir et al., 2022), (Bitu, Tanvir, Islam, & Farhad, 2023).

2.3.1.1.Ultrasonik Banyolama

Ultrasonik banyolamada temizlik işlemi genellikle ultrasonik dalgaların substrat üzerine etkisiyle gerçekleşir. Ultrasonik banyolama, yüksek frekansta titreşen ultrasonik dalgaların bir çözelti içinde oluşturduğu basınç değişimlerini kullanarak kirleticilerin ve partiküllerin yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlar. Bu yöntemde, ultrasonik dalgaların substrat yüzeyine iletilmesi, çözeltide bulunan mikro kabarcıkların oluşmasına ve patlamasına neden olur. Bu patlamalar, kavitasyon etkisi oluşturur ve bu sayede yüzeydeki kirleticiler mekanik olarak ayrılır. Genellikle ultrasonik banyolama işleminin etkinliği özel temizlik çözeltileri veya solventlerle birleştirilerek artırılır. Ultrasonik banyolama cihazı Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 3. Ultrasonik Banyolama Cihazı

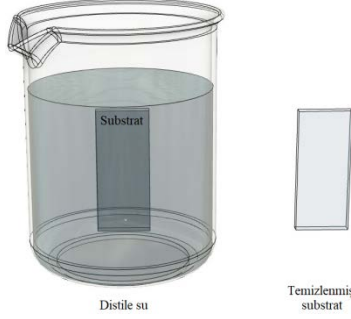


Ultrasonik banyolama, substrat üzerinde mikro düzeyde temizlik sağlayarak malzeme yüzeyinin düzgün ve kontaminasyonsuz bir tabaka biriktirme işlemine hazırlanmasına yardımcı olur. Bu yöntemin avantajları arasında hızlı temizlik, etkili partikül giderimi ve kompleks geometriye yüzeylere ulaşabilme kabiliyeti bulunmaktadır. Ultrasonik banyolama, ince film biriktirme süreçlerinde istenen kalite ve performansı elde etmede önemli bir adım olarak öne çıkar (Saffar, Eshaghi, & Dehnavi, 2022), (Seifi et al., 2023).

2.3.1.2.Saf Su İle Temizleme

Bu temizleme yönteminde, altlık malzemenin yüzeyindeki kirleticileri ve partikülleri uzaklaştırmak için distile su kullanılmaktadır. Distile su, özel bir damıtma işlemi sonucunda elde edilen, saflığı yüksek su türüdür ve çeşitli temizleme uygulamalarında tercih edilir. Distile su ile temizleme işlemi, özellikle malzeme yüzeyindeki mineral veya katı kalıntıların giderilmesi amacıyla kullanılır. Bu işlemde, distile su, yüksek saflığı nedeniyle malzeme yüzeyini kontaminasyondan arındırmak ve biriktirme işlemine uygun hale getirmek için kullanılır. Ayrıca, çözelti içinde çözülmüş tuzları ve diğer kirleticileri uzaklaştırmak için etkili bir temizleme ajanı olarak işlev görür. Distile su ile temizleme işlemi Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4. Distile Su ile Temizleme



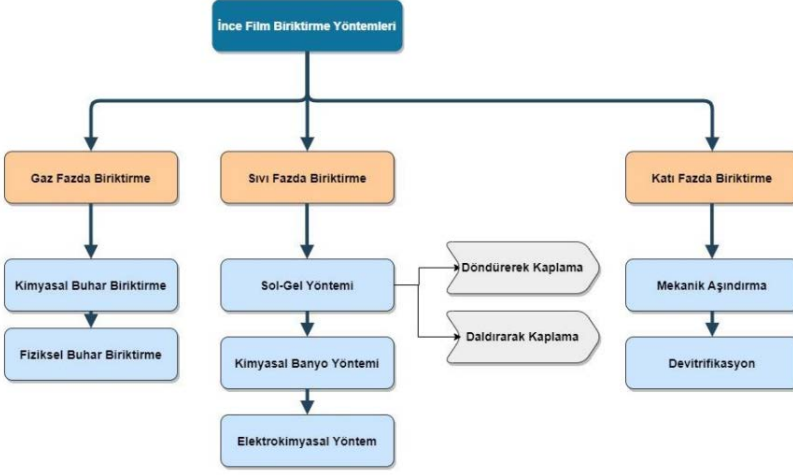
Bu temizleme yönteminin avantajları arasında, kimyasal kalıntıların malzeme yüzeyinde birikmesinin önlenmesi ve biriktirme sürecine uygun bir temizleme sağlaması yer almaktadır. Distile su ile temizleme, özellikle hassas elektronik cihazların üretiminde ve yarıiletken endüstrisinde kullanılan ince film biriktirme işlemlerinde yaygın bir uygulamadır.

Sonuç olarak, ince film biriktirme süreçlerinde altlık malzeme temizleme işlemi, başarılı bir üretim için göz ardı edilemeyecek bir adımdır. Doğru temizleme yöntemlerinin seçilmesi, dikkatli uygulanması ve sürekli kontrol edilmesi, istenilen malzeme özelliklerinin elde edilmesinde ve kaplama kalitesinin artırılmasında önemli bir rol oynar (Halakarni et al., 2023), (Malik et al., 2023).

2.3.2. Yöntemler

İnce film biriktirme süreçleri birbirlerinden farklı yöntemlerle uygulanabilmektedir. Genellikle biriktirme fiziksel, kimyasal ve mekanik yöntemler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bu ana başlıkların altında yine birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Bu sürecin temel amacı substratların yüzeyinde film oluşumu sağlamak için en ideal metodun belirlenmesi ve uygulanmasıdır. İnce film biriktirme yöntemleri şematik olarak Şekil 5'te gösterilmektedir.

Şekil 5. İnce Film Biriktirme Yöntemleri



Kaynak: (Nayman, Gözükızıl, & Temel, 2023)

Gaz fazında biriktirme yöntemleri, genellikle substrat yüzeylerinin topografyasına ve karmaşıklığına bağlı kalmaksızın yüksek saflıkta elde edilmesine olanak sağlar. Yani düzensiz yüzeylere sahip substratların üzerine ince film biriktirilmesinde büyük bir esneklik sunmaktadır ve biriktirilen filmler çoğunlukla istenen özelliklere sahip olmaktadır. Ayrıca, bu yöntemlerin kullanılmasıyla elde edilen filmler genellikle çok incedir ve homojen bir kalınlığa sahiptir. Bu durum, özellikle mikroelektronik cihazlar, sensörler ve optoelektronik uygulamalar gibi alanlarda istenilen özelliklere sahip filmlerin üretilmesinde avantajlıdır. Gaz fazında biriktirme yöntemleri, biriktirme işleminin vakum altında gerçekleşmesine olanak tanıdığı için oksidasyonu azaltır, bu da biriktirilen filmin kalitesini artırır (Grytsenko et al., 2023).

Sıvı fazda biriktirme genellikle kimyasal çözeltiden malzeme biriktirilmesi ile elde edilmektedir. Düşük uygulama sıcaklıkları ve geniş yüzey alanına sahip substratlara kolayca uygulanabilme yetenekleriyle ön plana çıkan bu yöntemlerle organik polimerler, metal oksitler veya nanomalzemeler gibi

farklı türde malzemelerin biriktirilmesi mümkündür. Ayrıca, çözelti bazlı biriktirme işlemleri genellikle düşük maliyetlidir ve büyük ölçekli üretim uygulamalarında ekonomik avantajlar sunar. Bu nedenle, sıvı fazda biriktirme yöntemleri, güneş hücreleri, akıllı kaplamalar ve biyosensörler gibi birçok uygulama alanında tercih edilmektedir. Kimyasal banyolama gibi metodlardaki ince film biriktirme işlemlerinde ise kullanılan malzemenin, substratın, atmosferin, sıcaklık, basınç ve diğer işlem parametrelerinin belirlendiği kritik bir doküman olan reçetede belirtilen özellikler, biriktirme işleminin sonunda elde edilecek filmin oluşumunu ve film kalitesini doğrudan etkilemektedir. İşlem parametrelerinin titizlikle belirlenmesi, malzemenin beklenen kristal yapıya ulaşmasını sağlayarak elektriksel, optik veya mekanik özelliklerin istenilen düzeyde elde edilmesine olanak tanımaktadır (Crivello et al., 2021), (M. Fatih Gözükızıl, 2020).

Katı fazda biriktirme yöntemlerinden mekanik aşındırma, özellikle malzeme yüzeyini düzenleme ve film kalınlığını kontrol etme yeteneği ile film kalitesini etkilemektedir. Mikro ölçekli işlemlerdeki hassasiyeti sayesinde, istenen desenlerin ve yapıların belirli bölgelerde doğrudan oluşturulması mümkün olur. Bu, özellikle mikroçip teknolojisinin geliştirilmesi ve nanoteknolojinin ilerlemesi açısından verimliliği artırabilir. Devitrifikasyon süreci, özellikle cam malzemelerde belirli bir sıcaklık ve vakum koşullarında malzeme içinde istenilen kristal yapıların oluşturulmasına olanak tanır. Bu, malzemenin elektriksel, optik veya mekanik özelliklerini daha hassas bir şekilde kontrol etme imkânı sunar. Sonuç olarak, mekanik aşındırma ve devitrifikasyon gibi katı fazda biriktirme yöntemleri, doğru substratların da seçimi ile belirli uygulamalarda verimliliği artmasına olanak sağlamaktadır (Hamed, Eldiasty, Seyedi-Sahebari, & Abou-Ziki, 2023), (Bhattacharya, Tiwari, Krishna, & Bhattacharyya, 2022).

Proses sıcaklık ve basınç kontrolü de verimliliği artırmada önemli bir rol oynar. İnce film biriktirme işlemleri genellikle belirli sıcaklık ve basınç koşullarında gerçekleşir. Optimal sıcaklık ve basınç, malzemenin istenen özelliklerini en iyi şekilde kazanmasını sağlar. Bu kontrol, film kalınlığı ve homojenliği üzerinde olumlu bir etki yapabilir. İnce film biriktirme işlemlerinde kullanılan ekipmanın kalitesi ve hassasiyeti de büyük bir öneme sahiptir. Yüksek kaliteli ekipmanlar, prosesin daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini ve daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlar. Ayrıca, ekipmanın bakımı düzenli olarak yapılmalıdır ki bu da sürekli ve etkili bir üretimi destekler. Doğru deneysel araçların seçimi de süreci hızlandırarak kaplama verimliliğini artırabilmektedir. Ancak, bu durumda kalite kontrolü kaybedilmemelidir. Yüksek hızlı bir biriktirme işlemi, film kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir, bu nedenle optimum hız belirlenmeli ve bu hızda tutarlı sonuçlar elde edilmelidir. Vakumlu uygulamalarda uygun vakum seviyesi dikkate alınmalıdır. Vakum, istenmeyen reaksiyonların ve kontaminasyonun önlenmesine yardımcı olur. Fakat yüksek vakum yüzeylere zarar verebilmektedir.

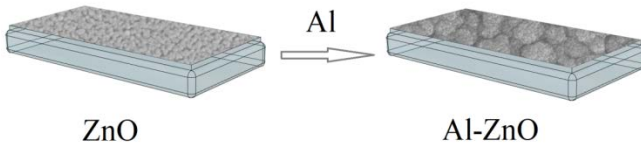
Son olarak, kaplama malzemesi seçiminde olduğu gibi, ince film biriktirme yöntemi seçiminde de önceki deneyimler ve başarılar dikkate alınmalıdır. Eğer belirli bir ince film biriktirme yöntemi önceki uygulamalarda başarıyla kullanılmışsa, bu yöntemin benzer bir uygulama için uygun olma olasılığı yüksektir. Ayrıca sürekli bir Ar-Ge ve yenilik süreci, ince film biriktirme işlemlerinde verimliliği artırmak için kritik bir unsurdur. Yeni malzemelerin keşfi, proses iyileştirmeleri ve teknolojik yenilikler, biriktirme işlemlerinin daha verimli ve etkili hale getirilmesine katkı sağlar. Bu sebeple özellikle özgün akademik çalışmalar da güncel olarak takip edilmelidir (Sai, Swain, & Pradhan, 2023).

2.3.3. Katkılama

İnce film biriktirme işlemleri malzemelere belirli özellikler kazandırmaktadır. Substratlar üzerine biriktirilen ince film malzemeleri ile elde edilen özelliklerin daha da iyileştirilmesi ya da farklı yeni özellikler kazandırılması amacıyla katkılama işlemi yapılmaktadır (Mehmet Fatih Gözükızıllı & Birelli, 2023). Katkılama işlemi substratların üzerlerine film biriktirme sırasında farklı malzemelerin ilave edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Yani bir malzemenin özelliklerini istenen hedeflere ulaştırmak veya geliştirmek amacıyla üzerine eklenen diğer maddelerin entegrasyonunu ifade etmektedir.

Malzemelerin iletkenlik, optik özellikler, mekanik dayanıklılık, termal iletkenlik, kimyasal direnç, yüzey pürüzlülüğü, yapışma özellikleri, korozyon direnci, biyoyoum, UV direnci, mıknaıslanma, dielektrik, hidrofobik/hidrofilik özelliklerini, yüksek sıcaklık dayanımı ve radyasyon direnci gibi bir dizi mevcut özelliğini iyileştirmek ya da ilave etmek amacıyla gerçekleştirilir. Farklı altlıklar üzerine biriktirilen yarıiletken ince filmlere çeşitli metallerin ilave edilmesiyle yasak enerji aralıkları değiştirilmektedir (Starowicz et al., 2023), (Dejam et al., 2023), (Doghmane, Chettibi, Doghmane, Othmane, & Touam, 2023), (Patel & Chauhan, 2023). Filmlere metal katkılanması ile kristal yapıda kusurlar oluşabilir, daha yüksek hidrofillik ve fotokatalitik aktivite gibi özellikler elde edilebilir. Katkılama işlemi Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 6. ZnO bileşiğine Al Katkılamasının Etkileri



Katkılama işlemlerinde dikkat edilmesi gereken önemli hususlar vardır. İlk olarak, katkı maddeleri, substratın ve biriktirme malzemelerinin özellikleriyle uyumlu olmalıdır. Ayrıca, katkılama işlemi sırasında kullanılan miktarların doğru bir şekilde belirlenmesi ve kontrol edilmesi önemlidir. Katkılama maddelerinin çözeltilerde homojen bir şekilde dağılması da kritiktir, çünkü homojen olmayan bir dağılım malzemenin istenmeyen özelliklere sahip olmasına neden olabilir.

Katkılama işlemlerinin olumlu yönleri, malzemenin özelliklerini istenilen şekilde yönlendirebilme yeteneği ve geniş uygulama alanlarında kullanılabilme esnekliğidir. Örneğin, bir malzemenin iletkenliğini artırmak veya mekanik dayanıklılığını geliştirmek amacıyla katkı maddeleri eklemek mümkündür. Ancak, olumsuz durumlar da yaşanabilmektedir. Yanlış katkı maddesi seçimi veya yanlış miktarlarda eklenmesi, malzemenin istenmeyen özelliklere sahip olmasına ve performansının düşmesine neden olabilir. Ayrıca, katkılama işlemi sırasında oluşabilecek kimyasal reaksiyonlar veya homojen dağılımın sağlanamaması gibi sorunlar, ürün kalitesini olumsuz etkileyebilir.

Sonuç olarak, katkılama işlemleri, ince film biriktirme süreçlerinde malzemenin özelliklerini belirgin şekilde etkileyebilen önemli bir aşamadır. Doğru katkı maddelerinin seçimi, uygun miktarlarda eklenmesi ve homojen bir dağılımın sağlanması, istenen malzeme özelliklerini elde etmekte ve ürün kalitesini artırmaktadır (Oke & Jen, 2022), (Sreeja, Sreeja, & Annieta Philip, 2023).

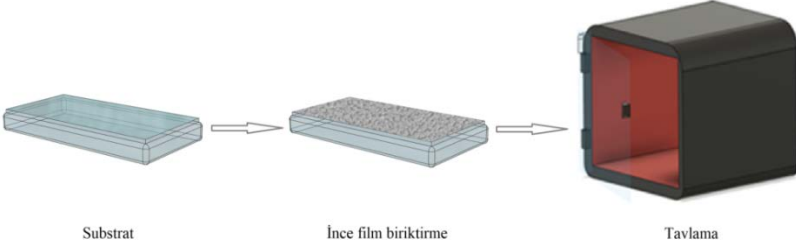
2.3.4. Tavlama

Tavlama, ince film biriktirme süreci içerisinde ya da sonrasında genellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bir ısıl işlem sürecidir. Tavlama işlemi, biriktirilmiş ince filmin kristal

yapılarını düzenleme, faz değişiklikleri ve iç gerilmelerin giderilmesi gibi çeşitli etkileri sağlayarak malzemenin özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar. Ayrıca, biriktirilen malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini daha stabil bir hale getirerek, mekanik dayanıklılığı, iletkenliği veya diğer istenilen özellikleri artırabilmektedir (Salaheldeen et al., 2023), (Zheng et al., 2023).

Verimliliği artırmak için, ilk olarak, doğru sıcaklık ve süre kombinasyonunun seçilmesi önemlidir. İnce film biriktirme malzemesinin türüne, uygulama amacına ve istenilen özelliklere bağlı olarak optimal tavlama koşullarının belirlenmesi gereklidir (Srivastava et al., 2023). Tavlama sürecinin verimliliğini artırmak için bir diğer strateji, atmosfer kontrolüdür. Uygun bir atmosfer seçimi, malzemenin oksidasyonunu önleyebilir ve istenmeyen reaksiyonları azaltarak biriktirme malzemesinin performansını artırabilir. Ancak, tavlama işleminin dezavantajları ve olumsuz durumları da göz önünde bulundurulmalıdır. İlk olarak, yüksek sıcaklıkların kullanılması enerji maliyetlerini artırmakta, malzemenin kristal yapılarını iyileştirirken bazı durumlarda olumsuz iç gerilmeler oluşturabilmektedir. Bu durum substrat veya biriktirme malzemelerinin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemekle beraber çatlakların oluşmasına neden olabilmektedir. Düşük sıcaklıklar ise beklenen iyileştirmeye yeterli gelmeyebilir. Ayrıca, bazı malzemelerin belirli sıcaklık aralıklarında kararlılığını kaybetmesi veya bozulmaya uğraması olasılığı nedeniyle dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. İnce film biriktirme ve tavlama işlemi Şekil 7’de gösterilmiştir.

Şekil 7. İnce Film Biriktirme ve Tavlama İşlemi



Özet olarak tavlama işlemi, ince film biriktirme işlemlerinde malzemenin özelliklerini iyileştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir termal işlem sürecidir. Özetle verimliliği artırmak için doğru sıcaklık, süre ve atmosfer kontrolünün yanı sıra iç gerilmelerin ve olumsuz reaksiyonların önlenmesine odaklanmak önemlidir. Ancak, yüksek enerji maliyetleri, iç gerilmelerin oluşma riski ve atmosfer kontrolündeki zorluklar gibi bazı dezavantajlar göz önünde bulundurulmalıdır (Bura et al., 2022).

Çalışmada bahsedilen tüm değişkenler ince film biriktirmenin verimliliğini büyük ölçüde etkileyen kalite niteleyicileridir.

3. SONUÇ

Bu çalışma, ince film biriktirme işlemlerinin önemini ve bu işlemlerde verimliliği artırmak amacıyla kullanılacak malzeme, yöntem ve stratejileri ele almaktadır. İnce film biriktirme, malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirmek ve yeni özellikler kazandırmak için kullanılan bir tekniktir. Yüzeyle homojen dağılım, altlık malzemelere tutunma yeteneği, dayanıklılık gibi faktörlerin dikkate alındığı biriktirme işlemleri, endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır.

İnce film biriktirme süreçlerinde verimliliği artırmada altlık malzeme seçimi, biriktirme malzemesi seçimi ve

biriktirme yöntemleri en önemli kalite faktörleri arasında yer almaktadır. Substratın istenilen nihai ürüne uyacak niteliklere haiz olması, biriktirme malzemesinin substrat yüzeyine homojen bir şekilde kaplanması ve biriktirme yöntemlerinin de hem iki malzeme arasında hızlı, pratik ve sağlam bir bağ oluşturması hem de maliyet açısından avantajlı olması gerekmektedir.

Gaz fazında biriktirme yöntemleri, genellikle substrat yüzeylerinin topografyasına bağlı kalmaksızın yüksek saflıkta film elde etme avantajı sunar. Sıvı fazda biriktirme yöntemleri ise düşük uygulama sıcaklıkları ve geniş yüzey alanlarına kolay uygulanabilme yetenekleri ile öne çıkar. Katı fazda biriktirmede mekanik aşındırma ve devitrifikasyon gibi yöntemlere uygun substrat seçimi ince film kalitesini etkileyen parametrelerdir.

Temizleme işlemi, ince film biriktirme sürecinde substratın yüzeyini kaplamaya hazırlamak için önemli bir adımdır. Temizleme işlemi sırasında kullanılan kimyasal ve fiziksel temizleme yöntemleri, biriktirilen malzemelerden alınacak verimliliği artırmada kritik bir rol oynamaktadır.

KAYNAKÇA

- Acharya, T. R., Chaudhary, D. K., Gautam, S., Singh, A. K., Shrestha, R., Adhikari, B. C., ... Choi, E. H. (2023). Influence of nanoparticle size on the characterization of ZnO thin films for formaldehyde sensing at room temperature. *Sensors and Actuators A: Physical*, 351, 114175. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2023.114175>
- Amini, A., Jafari, A., Vafaei, M., & Mahmoodian, M. (2022). Stability enhancement of polypyrrole thin film ammonia sensor by camphor sulfonic acid dopant. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(3),

1293–1306. Retrieved 5 December 2023 from <https://doi.org/10.1007/S10854-021-07442-9/FIGURES/13>

Baik, S., Jiang, M., Soh, H., Ahn, D., & Choi, W. (2023). Effect of SiO₂ capping on the solid-phase-crystallized Ge thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 165, 107682. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.MSSP.2023.107682>

Bentis, A., Boukhriss, A., Zahouily, M., Manoun, B., & Gmouh, S. (2023). Functionalization of cotton fabrics by sol-gel method using ionic liquids with high-hydrophobic, excellent water repellent, oil/water separation, and self-cleaning properties. *Cellulose*, 30(10), 6719–6740. Retrieved 2 December 2023 from <https://doi.org/10.1007/S10570-023-05276-8/FIGURES/16>

Bhattacharya, D., Tiwari, N., Krishna, P. S. R., & Bhattacharyya, D. (2022). Evolution of local atomic structure accompanying devitrification of amorphous Ni-Zr alloy thin films. *Thin Solid Films*, 762, 139544. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2022.139544>

Bitu, M. N. A., Tanvir, N. I., Islam, S., & Farhad, S. F. U. (2023). Effect of substrate surface on the wide bandgap SnO₂ thin films grown by spin coating. *MRS Advances*, 8(5), 194–200. Retrieved 5 December 2023 from <https://doi.org/10.1557/S43580-023-00515-3/FIGURES/4>

Brathwaite, K. G., Wyatt, Q. K., Atassi, A., Gregory, S. A., Throm, E., Stalla, D., ... Young, M. J. (2023). Effects of film thickness on electrochemical properties of nanoscale polyethylenedioxythiophene (PEDOT) thin films grown

- by oxidative molecular layer deposition (oMLD). *Nanoscale*, 15(13), 6187–6200. Retrieved 30 November 2023 from <https://doi.org/10.1039/D3NR00708A>
- Bruzzi, M., Calisi, N., Enea, N., Verroi, E., & Vinattieri, A. (2023). Flexible CsPbCl₃ inorganic perovskite thin-film detectors for real-time monitoring in protontherapy. *Frontiers in Physics*, 11, 1126753. Retrieved from <https://doi.org/10.3389/FPHY.2023.1126753/BIBTEX>
- Bura, M., Singh, G., Gupta, D., Malik, N., Salim, A., Kumar, A., ... Aggarwal, S. (2022). Transition in the preferred orientation of RF sputtered ZnO/Si thin films by thermal annealing: Structural, morphological, and optical characteristics. *Optical Materials*, 133, 113024. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2022.113024>
- Crivello, C., Sevim, S., Graniel, O., Franco, C., Pane, S., Puigmarti-Luis, J., & Munoz-Rojas, D. (2021). Advanced technologies for the fabrication of MOF thin films. *Materials Horizons*, 8(1), 168–178. Retrieved from <https://doi.org/10.1039/D0MH00898B>
- Dejam, L., Kulesza, S., Sabbaghzadeh, J., Ghaderi, A., Solaymani, S., Țălu, Ștefan, ... Sari, A. hossein. (2023). ZnO, Cu-doped ZnO, Al-doped ZnO and Cu-Al doped ZnO thin films: Advanced micro-morphology, crystalline structures and optical properties. *Results in Physics*, 44, 106209. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.RINP.2023.106209>
- Doghmane, N. E. A., Chettibi, S., Doghmane, M., Othmane, D. Ben, & Touam, T. (2023). Comparative investigations of structural, electronic, optical, and thermoelectric properties of pure and 2 at. % Al-doped ZnO. *Journal of Molecular Modeling*, 29(11), 1–15. Retrieved 26

November 2023 from <https://doi.org/10.1007/S00894-023-05750-X/FIGURES/2>

- Fatih Gözükızıl, M. (2020). pH effect on structural, morphological and optical properties of ZnO thin films produced by chemical bath deposition method. *European Chemical Bulletin*, 9(10–12), 335–338. Retrieved 7 December 2023 from <https://doi.org/10.17628/ECB.2020.9.335-338>
- Fatih Gözükızıl, Mehmet, & Birelli, A. (2023). Al, Cu Katkılı, Katkısız TiO₂ İnce Film Biriktirme ve Katkılamanın Film Özelliklerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 1–1. Retrieved 30 November 2023 from <https://doi.org/10.2339/POLITEKNİK.1208648>
- Fatih Gözükızıl, Mehmet, & Nayman, E. (2023). CO₂ Gaz Sensörü Uygulamaları için CuO İnce Film Üretimi ve Karakterizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(4), 2246–2254. Retrieved 5 December 2023 from <https://doi.org/10.29130/DUBITED.1184293>
- Gounden, D., Pillay, M. N., Moodley, V., Nombona, N., & van Zyl, W. E. (2023). Fabrication and processing of bacterial cellulose/silvernanowire composites as transparent, conductive, and flexible films for optoelectronic applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(30). Retrieved 5 December 2023 from <https://doi.org/10.1002/APP.54090>
- Grytsenko, K., Kolomzarov, Y., Lytvyn, P., Kondratenko, O., Sopinsky, M., Lebedyeva, I., ... Schrader, S. (2023). Optical and Mechanical Properties of Thin PTFE Films, Deposited from a Gas Phase. *Macromolecular Materials and Engineering*, 308(6), 2200617. Retrieved 5 December 2023 from <https://doi.org/10.1002/MAME.202200617>

- Halakarni, M. A., Poliseti, V., Samage, A. A., Mahto, A., Svagan, A. J., Hedenqvist, M. S., & Nataraj, S. K. (2023). Design of selective and self-cleaning iron aminoclay thin film nanocomposite membranes. *Chemical Engineering Journal*, 456, 140941. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.140941>
- Hamed, H., Eldiasty, M., Seyedi-Sahebari, S. M., & Abou-Ziki, J. D. (2023). Applications, materials, and fabrication of micro glass parts and devices: An overview. *Materials Today*, 66, 194–220. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2023.03.005>
- He, S., Bahrami, A., Zhang, X., Julin, J., Laitinen, M., & Nielsch, K. (2023). Low-temperature ALD of highly conductive antimony films through the reaction of silylamide with alkoxide and alkylamide precursors. *Materials Today Chemistry*, 32, 101650. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2023.101650>
- Jolivet, A., Labbé, C., Frilay, C., Debieu, O., Marie, P., Horcholle, B., ... Cardin, J. (2023). Structural, optical, and electrical properties of TiO₂ thin films deposited by ALD: Impact of the substrate, the deposited thickness and the deposition temperature. *Applied Surface Science*, 608, 155214. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2022.155214>
- Kumar, D., Lal, C., Veer, D., Singh, D., Kumar, P., & Katiyar, R. S. (2023). Study the hall effect and DC conductivity of CdSe and Te doped CdSe thin films prepared by RF magnetron sputtering method. *Materials Letters: X*, 18, 100204. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.MLBLUX.2023.100204>
- Kuroki, M., Horide, T., Matsumoto, K., & Ishimaru, M. (2023). Nano- to microscale structural and compositional

heterogeneity of artificial pinning centers in pulsed-laser-deposited YBa₂Cu₃O_{7-y} thin films. *Journal of Applied Physics*, 134(4). Retrieved 30 November 2023 from <https://doi.org/10.1063/5.0155145/2904010>

Mahana, D., Mauraya, A. K., Singh, P., & Muthusamy, S. K. (2023). Evolution of CuO thin films through thermal oxidation of Cu films prepared by physical vapour deposition techniques. *Solid State Communications*, 366–367, 115152. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.SSC.2023.115152>

Malik, P., Sarker, D., Kumar, D., Schwartzkopf, M., Srivastava, P., & Ghosh, S. (2023). Tuning LSPR of Thermal Spike-Induced Shape-Engineered Au Nanoparticles Embedded in Si₃N₄ Thin-Film Matrix for SERS Applications. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 15(38), 45426–45440. Retrieved 5 December 2023 from https://doi.org/10.1021/ACSAMI.3C08834/SUPPL_FILE/AM3C08834_SI_001.PDF

Nayman, E., Gözükızıllı, M. F., & Temel, S. (2023). Metal Oksit Yarıiletken Gaz Sensörlerinin Üretim Parametreleri ve Sensör Kalitesini Belirleyen Faktörler. In Prof. Dr. Gülден Başyığıt Kılıç (Ed.), *Mühendislik Alanında Gelişmeler* (First, pp. 375–401). Ankara: Platanus Publishing. Retrieved from <https://doi.org/10.5281/zenodo.10022096>

Oke, J. A., & Jen, T. C. (2022). Atomic layer deposition and other thin film deposition techniques: from principles to film properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2481–2514. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.10.064>

Park, J., Kim, C. Y., Kim, M. J., Choi, S., Hwang, Y. H., & Choi, K. C. (2023). Flexible, Transparent, High Mobility

- Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Film Transistors Fabricated on Textile. *ACS Applied Electronic Materials*, 5(3), 1606–1614. Retrieved 2 December 2023 from https://doi.org/10.1021/ACSAELM.2C01672/SUPPL_FILE/EL2C01672_SI_001.PDF
- Patel, N. P., & Chauhan, K. V. (2023). Impact of deposition time and working pressure on delay of ice formation on aluminum doped zinc oxide thin films. *Thin Solid Films*, 769, 139750. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2023.139750>
- Patil, S. L., Sankapal, S. R., & Almontaser, F. M. A. (2023). Dip Coating: Simple Way of Coating Thin Films. *Simple Chemical Methods for Thin Film Deposition*, 425–447. Retrieved 5 December 2023 from https://doi.org/10.1007/978-981-99-0961-2_10
- Pawbake, A., Rondiya, S., Late, D., Prasad, M., & Jadkar, S. (2023). Hot wire-CVD grown molybdenum disulfide (MoS₂) thin films for photodetector and humidity sensing applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(17), 1–12. Retrieved 1 December 2023 from <https://doi.org/10.1007/S10854-023-10761-8/TABLES/4>
- Preeti, & Kumar, S. (2023). Extraction and analysis of TCO coated glass from waste amorphous silicon thin film solar module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 253, 112227. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2023.112227>
- Rubežienė, V., Varnaitė-Žuravliova, S., Sankauskaitė, A., Pupeikė, J., Ragulis, P., & Abraitienė, A. (2023). The Impact of Structural Variations and Coating Techniques on the Microwave Properties of Woven Fabrics Coated with PEDOT:PSS Composition. *Polymers*, 15(21), 4224.

Retrieved 2 December 2023 from
<https://doi.org/10.3390/POLYM15214224/S1>

Rzaij, J. M. (2023). A novel room-temperature nitrogen dioxide gas sensor based on silver-doped cerium oxide thin film. *Sensors and Actuators A: Physical*, 363, 114748. Retrieved from
<https://doi.org/10.1016/J.SNA.2023.114748>

Saffar, M. A., Eshaghi, A., & Dehnavi, M. R. (2022). Superhydrophobic ZnO thin film modified by stearic acid on copper substrate for corrosion and fouling protections. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 101(3), 672–682. Retrieved 5 December 2023 from
<https://doi.org/10.1007/S10971-022-05749-5/FIGURES/14>

Sai, L. K., Swain, K. K., & Pradhan, S. K. (2023). Thin Film Fabrication Techniques. *Metal Oxide Nanocomposite Thin Films for Optoelectronic Device Application*, 155–177. Retrieved 5 December 2023 from
<https://doi.org/10.1002/9781119865636.CH6>

Salaheldeen, M., Garcia-Gomez, A., Corte-Leon, P., Gonzalez, A., Ipatov, M., Zhukova, V., ... Zhukov, A. (2023). Manipulation of magnetic and structure properties of Ni₂FeSi glass-coated microwires by annealing. *Journal of Alloys and Compounds*, 942, 169026. Retrieved from
<https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2023.169026>

Seifi, A., Salari, D., Khataee, A., Çoşut, B., Arslan, L. Ç., & Niaei, A. (2023). Enhanced photocatalytic activity of highly transparent superhydrophilic doped TiO₂ thin films for improving the self-cleaning property of solar panel covers. *Ceramics International*, 49(2), 1678–1689. Retrieved from
<https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2022.09.130>

- Sreeja, C., Sreeja, S., & Annieta Philip, K. (2023). The effect of Zn doping on the optical properties and conductivity of SnS thin film formed by chemical bath deposition. *Materials Today: Proceedings*. Retrieved 5 December 2023 from <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.11.057>
- Srivastava, N., Mehrotra, S., Búran, M., Hušek, I., Sharma, D., Kováč, P., & Santra, S. (2023). Interfacial reactions and critical current density of Cu-sheathed Cu-doped MgB₂ wire with Ti diffusion barrier. *Journal of Alloys and Compounds*, 966, 171657. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2023.171657>
- Starowicz, Z., Zięba, A., Ostapko, J., Wlazło, M., Kołodziej, G., Jakub Szczerba, M., ... Piotr Socha, R. (2023). Synthesis and characterization of Al-doped ZnO and Al/F co-doped ZnO thin films prepared by atomic layer deposition. *Materials Science and Engineering: B*, 292, 116405. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2023.116405>
- Sudha, A., Ashok, A., Patil, S., Yadav, S. K., & Swaminathan, P. (2023). Improving the photoresponse of magnetron sputtered titania films by optimizing substrate and electrode configuration. *Solar Energy*, 266, 112163. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2023.112163>
- Temel, S., Gokmen, F. O., & Yaman, E. (2020). Antibacterial activity of ZnO nanoflowers deposited on biodegradable acrylic acid hydrogel by chemical bath deposition. *Bulletin of Materials Science*, 43(1), 1–6. Retrieved 5 December 2023 from <https://doi.org/10.1007/S12034-019-1967-1/TABLES/2>
- Temel, S., Gözükizil, F., Özge Gökmen, F., & Yaman, E. (n.d.).

Comparison of gas sensor properties by producing ZnO thin films with different techniques. *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS*, 25(6), 282–288.

- Tran, M. P., Beitia, C., Moon, S. I., Lundgren, J., Wild, A., Fontaine, H., & Gonzalez-Aguirre, P. (2023). Diffusivity and solubility of HF gas in polymers and nanocomposites used for automated handling containers of silicon substrates in microelectronic industry. *Microelectronic Engineering*, 267–268, 111910. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.MEE.2022.111910>
- Wang, Y., Huang, X., Liu, Y., Zhang, X., Yang, B., & Yue, Y. (2023). Thermal and mechanical characterization of under-2- μm -thick AlCrNbSiTi high-entropy thin film. *Energy Storage and Saving*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.ENSS.2023.06.002>
- Ydir, B., Ben Hmamou, D., Ait-Wahmane, Y., Ihlal, A., Bousseta, M., & Lahlou, H. (2022). Design, implementation, and characterization of an automated SILAR system: validation with ZnO thin film deposition. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(3–4), 1189–1201. Retrieved 5 December 2023 from <https://doi.org/10.1007/S00170-022-10207-1/FIGURES/13>
- Zang, J., Ma, Y., Zhao, Y., Guo, R., Liu, Y., Liu, D., & Xue, C. (2023). Effect of post-annealing treatment on the thermoelectric properties of Ag₂Se flexible thin film prepared by magnetron sputtering method. *Results in Physics*, 45, 106222. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.RINP.2023.106222>
- Zheng, Z., Zhao, H., Sun, L., Liu, Y., Fu, L., Bilek, M. M., ...

Liu, Z. (2023). Phase decomposition of AlCrFeCoNiCu_{0.5} HEA thin films by vacuum annealing. *Surfaces and Interfaces*, 43, 103541. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2023.103541>

İŞ KAZALARINI ÖNLEMEDE UZMAN SİSTEM YAKLAŞIMI¹

Ömer ASAL²

Yunus KAYIR³

Hakan DİLİPAK⁴

1. GİRİŞ

İş kazalarının birçok tanımı bulunmakla birlikte Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) tarafından "belirli bir zarar veya yaralanmaya yol açan, önceden planlanmamış beklenmedik bir olaydır" şeklinde tanımlanmıştır [1].

İş kazalarının önlenmesi, iş sağlığı ve güvenliği açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, iş yerlerinde geleneksel yöntemler kullanılarak işçilerin güvenliği sağlanmaya çalışılır. Bu yöntemler arasında, işçilere düzenli eğitimler vermek, potansiyel tehlikeleri belirleyerek risk analizi yapmak, kişisel koruyucu donanım kullanımını sağlamak, yasal düzenlemelere uyum sağlamak ve düzenli denetimler yapmak yer alır [2].

Klasik kaza önleme metodlarının yetersiz kaldığı gerçeği, iş kazalarının önlenmesinde yeni yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Geleneksel yöntemlerin iş kazalarına

¹ 4. Uluslararası Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresinde özet sunumu yapılmıştır.

² Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, omerasal@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6339-9202.

³ Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, ykayir@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6793-7103.

⁴ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, hdilipak@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3796-8181.

engel olamaması, araştırmacıları ve şirketleri teknolojik çözümler aramaya yöneltmiştir. Bu doğrultuda, iş yapış şekillerini değiştiren ya da yapay zeka tekniklerinin kullanıldığı teknolojik yöntemlerin iş kazalarını azaltmada önemli bir rol oynayacağı öngörülmüştür. Örneğin, kişisel koruyucu donanımların yetersiz kaldığı durumlarda, teknolojinin sunduğu alternatif çözümler daha güvenli bir çalışma ortamı sağlayabilir.

Bilgisayar ve elektronik bilimlerdeki hızlı teknolojik gelişmeler, işletmelerin ve organizasyonların faaliyetlerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu gelişmeler, birçok alanda verimlilik artışı sağlamak için kullanılan ürünlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu ürünler, üretim, dağıtım, yönetim, tasarım, planlama, projelendirme, araç-gereç seçme, kontrol, bakım, teşhis ve analiz gibi değişik amaçlar için kullanılabilir. Özellikle bilgisayar bilimlerinde yaşanan yazılım ve donanım alanındaki hızlı gelişmeler, insan gibi düşünen ve davranan sistemlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu alanda 1950'li yıllardan itibaren yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıkan yapay zeka teknolojisi, insanın düşünme yapısını anlamayı ve bunun benzerini ortaya çıkaracak bilgisayar programlarını geliştirmeyi amaçlamaktadır [3]. Yapay zeka teknolojisi, insan faktöründen kaynaklanan olumsuzlukları en aza indirerek ve olabildiğince verimli çalışmayı sağlayarak işletmelere büyük katkı sağlamaktadır [4]. Karmaşık problemleri çözmek için bilgi tabanından yararlanarak insanın karar verme yeteneğine benzemeye çalışan muhakeme sistemlerine uzman sistem denilmektedir. Uzman sistemlerde, yapılan istatistiksel çalışmalar sonucunda üretimin arttığı, kalitenin yükseldiği ve maliyetin azaldığı görülmüştür [5]. Uzman sistemlerin birçok farklı alandaki zor seviyede sayılabilecek problemleri başarılı bir şekilde çözüme kavuşturması, dikkat çekmelerindeki en önemli unsur olmuştur. Bu sayede işletmeler, uzman sistemleri kullanarak daha verimli ve başarılı bir şekilde çalışabilmekte ve

rekabet avantajı elde edebilmektedir [6]. Sonuç olarak, yapay zeka teknolojisi ve uzman sistemler gibi gelişmiş teknolojiler, işletmelerin verimliliklerini artırmak ve başarılı olmak için kullanabilecekleri önemli araçlardır. Bu teknolojilerin doğru bir şekilde kullanılması, işletmelere büyük faydalar sağlayacaktır.

Bu çalışmada, yapay zeka teknolojisi altındaki uzman sistemlerle ilgili literatür taraması yapılarak detaylıca incelenmiştir. Araştırmalar, uzman sistemlerin iş kazalarını önlemede diğer tekniklere göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Bu sistemler, işyerindeki riskleri belirleyerek, alınması gereken önlemleri otomatik olarak önermektedir. Uzman sistemlerin kullanımıyla birlikte, işyerlerindeki güvenlik seviyesi artmakta, iş kazalarının sayısı azalmaktadır. Bu sayede, işletmeler hem çalışanlarının güvenliğini sağlamakta hem de maddi kayıplarını minimize etmektedir.

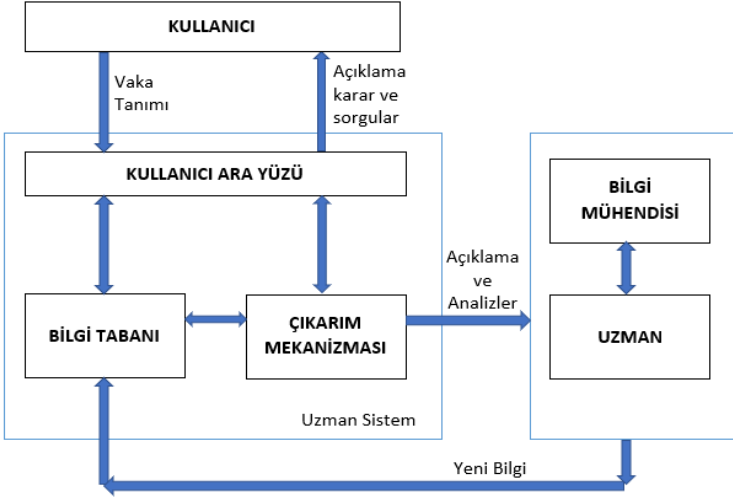
2. UZMAN SİSTEMLER

Uzmanlık gerektiren problemler karşısında, uzman kişilerin yerini alabilen uzman sistemler, kapsamlı bilgiye sahip olma ve görevleri gerçekleştirebilme özelliklerini yapay zekâ algoritmaları aracılığıyla bilgisayar programlarına entegre ederek çözüm üretirler. İnsan muhakemesine yakın sonuçlar sunabilen bu sistemler, hem karar elemanı olarak hem de karmaşık problemlerde karar destek elemanı olarak kullanılabilirler. US, ilgili alandaki uzman kişi gibi davranarak sınırlı problem karşısında etkili bir çözüm sunarlar ve öneri sunma yeteneğiyle de işlevselliklerini artırır [7]. US, Edward Feigenbaum tarafından geliştirilen bir program ile ilk kez hayatımıza girmiştir. Bu program, karar mekanizmalarına benzer bir süreci taklit ederek uzman kabiliyetleri ile yeni yargılar ve tavsiyeler oluşturabilmektedir. US, bilgi tabanına daha önceden aktarılan uzman bilgi ve tecrübeleri kullanarak insan karar verme sürecine

benzer bir şekilde problemlere çözüm getirirler. Bu sistemler, uzman olmayan kişilerce kullanıldığında destekleyici nitelik taşıırken, uzmanlar tarafından kullanıldığında kararları pekiştirici nitelik taşırlar. Uzman sistemlerin bu özellikleri sayesinde, birçok alanda kullanım alanı bulmuş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [7]. US, karmaşık problemleri çözmek için bilgi tabanından yararlanarak insanın karar verme yeteneğine benzemeye çalışan muhakeme sistemleridir. Bu sistemler, hiyerarşik bir yaklaşım izleyerek farklı kaynaklardan gelen düşük seviyeli bilgileri birleştirir ve mevcut uzmanlık bilgisini çoğaltır. Uzman sistemlerin temel bileşenleri veri tabanı, kurallar, kullanıcı ara birimi ve çıkarım mekanizmasıdır. Bilgi tabanında saklı olan uzmanlık alanı bilgileri, çıkarım mekanizması ile filtrelenir, yorumlanır ve sonuç elde edilir. Sonuç, kullanıcı ara birimi aracılığıyla kullanıcıya ulaştırılır. Uzman sistemler, karar verme sürecinde etkili bir araçtır ve birçok alanda kullanılmaktadır [7].

Uzman sistemlerin çalışma prensibi, yeni bilginin uzman veya bilgi mühendisi tarafından alınarak, uzman sistem aracılığıyla bilgi tabanına aktarılması ve burada kullanıcıdan gelen vaka tanımına uygun çıkarımlar yaparak açıklama ve analizlerle bunları teyit ederek kullanıcı ara yüzü ile kullanıcıya kararı açıklamasını içermektedir. Bu genel işleyiş, Şekil 1' de görselleştirilerek uzman sistemlerin çalışma sistemi daha net bir şekilde anlaşılabilir hale getirilmiştir. Uzman sistemleri, birçok farklı alanda kullanmak mümkündür ve bu sistemler, verimlilik ve doğruluk açısından oldukça avantajlıdır. Uzman sistemleri, karmaşık karar verme süreçlerinde kullanıcıya destek sağlayarak, hızlı ve doğru kararlar alınmasını sağlar. Bu nedenle, uzman sistemleri kullanarak iş süreçlerini optimize etmek ve verimliliği artırmak mümkündür.

Şekil 1. Uzman Sistemlerin Genel İşleyiş Yapısı [7].



Uzman sistemler, gerekli bilgiyi biriktirerek akıllı karar verme programları olarak birçok alanda kullanılmaktadır. İyi geliştirildiğinde, uzman sistemler konusunda uzman olan kişilerin işlevlerini yerine getirerek planlama, tasarım yapma, yorumlama, özetleme ve kontrol etme gibi işlemleri gerçekleştirebilirler. Bununla birlikte, sistem karmaşıklığı arttıkça maliyeti de yüksek olmaktadır. Girdi verileri ile kuralları tam olarak eşleştirme zorunluluğu, muhakeme durumunu hassas hale getirmekte olup doğru ve hızlı bir şekilde çözüm üretmeyi amaçlamaktadır. Uzman kişilerin yerine geçen bu sistem, çalışma verimliliğini ve alınan kararların kalitesini artırmaktadır. Uzman sistemlerin güvenilir bilgi ve öneri sunması, mantıksal neden-sonuç ilişkisine dayanması, belirsiz veri ve kurallarla çalışabilmesi güçlü yönleri arasında yer almaktadır. Ancak, bilgi edinmenin zorluğu, öğrenerek kendilerini yenileyemiyor olmaları ve geliştirmenin maliyetinin yüksek olması zayıf yönleri olarak kabul edilmektedir [7].

Literatürde iş kazalarını minimize etmek için US tekniğinden yararlanan çalışmalar detaylıca incelenmiştir.

Prof. Winn ve ekibi, Texpert adını verdikleri bir web tabanlı uzman sistem geliştirerek, tasarım mühendislerinin güvenlikle ilgili bilgilere hızlı ve kolay bir şekilde erişebilmelerini sağlamışlardır [8]. Bu sistem sayesinde, riskli olaylar ve riskleri azaltmak için gereken bilgiler uzman grup tarafından hazırlanmış ve bilgisayar grubu tarafından programlanarak web ortamında kullanıma sunulmuştur. Texpert'in geliştirilmesi için iki ayrı grup oluşturulmuştur. Uzman grup, sorunların listesi ve gerekli verileri hazırlarken, bilgisayar grubu da programlama ve web ortamında çalışabilmesi için gerekli ayarları yapmıştır. Kabuk olarak MultiLogic's Resolver tercih edilmiştir. Yapılan araştırmalar, proje tasarım aşamasında riskleri kontrol altına almanın ve önlemenin, proje bitiminden sonra ortaya çıkabilecek zararların önlenmesi için kullanılan yöntemlere göre daha etkili ve ekonomik olduğunu ortaya koymaktadır. Texpert, tasarım mühendislerinin işlerini kolaylaştıran ve güvenlik konusunda önemli bir adım atan bir uzman sistemdir. Profesyonel ekipler tarafından geliştirilmiş olması, kullanıcılarına güvenilir bir hizmet sunmaktadır. Bu tür sistemlerin yaygınlaşması, gelecekte daha güvenli ve sağlam yapılar inşa etmemize yardımcı olacaktır.

Risk değerlendirmesi, bir organizasyonun başarısını etkileyen faktörleri belirlemek ve bunlarla ilgili önlemler almak için kritik bir süreçtir. Bu süreç, disiplinler arası bir yaklaşım gerektirir ve her bir bileşenin doğru bir şekilde anlaşılması ve yönetilmesi önemlidir. Ekip tarafından geliştirilen küresel ontoloji tabanlı bütünleştirici araçlar, risk değerlendirmesi sürecindeki her bir bileşenin doğru bir şekilde anlaşılmasını ve yönetilmesini sağlar [9]. Global ontoloji yapısı, risk değerlendirmesi sürecindeki her bir bileşenin ilişkilerini daha iyi açıklamak ve anlamak için kullanılır. Böylece, risk değerlendirme

süreci modellemesi geliştirilmiştir. Bu araçlar sayesinde, organizasyonlar daha iyi bir risk yönetimi stratejisi oluşturabilirler ve başarılarını artırabilirler. Uzman sistem ve web platformu, risk değerlendirmesi için bütünleştirici araçlar olarak sunulmuştur. Uzman sistem, risk seviyesini belirlemeye yardımcı olurken, web platformu farklı bölümlerdeki çalışanların sürece katılmasını sağlar. Global ontoloji tabanlı bütünleştirici araçlar, organizasyonların başarısını etkileyen faktörleri belirlemek ve risklerle ilgili önlemler almak için önemli bir yardımcıdır.

Endüstriyel sektörlerde risk analizi, işletmelerin güvenliği için oldukça önemlidir. Bu alanda yapılan çalışmaların etkinliği, doğru yöntemlerin kullanılmasıyla artırılabilir. Baron ve arkadaşları tarafından geliştirilen uzman sistem [10], endüstriyel risk analizlerinde kullanıcılarına güvenilir sonuçlar sunan etkili bir araçtır. Sistem, risk değerlendirme sonuçlarının entegrasyonunu sağlayan Bilgisayar Destekli İşlem Planlama Sistemi (Sysklass) için bir gözetim aracı olarak tasarlanmıştır. Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) ve Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP) yöntemleri kullanılarak risklerin tanımlanması ve değerlendirilmesi sistematik bir şekilde gerçekleştirilir. Sysklass'ın sunduğu otomatikleştirilmiş işlemler sayesinde risk analiz süreci daha hızlı ve daha doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Sistem, endüstriyel sektörlerdeki risk analizleri için önemli bir araç olmasının yanı sıra, farklı sektörlerde de kullanılabilir. Enerji, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde Sysklass'ın sağladığı avantajlar büyük önem taşımaktadır. Potansiyel risklerin önceden tespit edilmesi ve önlemlerin alınması, işletmelerin güvenliği açısından kritik bir adımdır.

İnşaat sektörü, çalışanların güvenliği için alınması gereken önlemlerin hayati önem taşıdığı yüksek riskli bir alandır. Ancak, inşaattan düşme kazaları hala sıkça görülmektedir. Bu soruna çözüm olabilecek DSafe adlı kural tabanlı uzman sistem,

Birgönül ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [11]. Sistem, inşaattan düşme kazalarında hata oranlarının belirlenmesi ve uzman tanık raporlarının subjektifliğinin azaltılması için tasarlanmıştır. 2003-2005 yılları arasında hazırlanan 84 tetkik raporu incelenerek Türkiye'deki inşaatlarda meydana gelen kazaların kök nedenleri tespit edilmiştir. Bu kök nedenlere bağlı olarak hazırlanan değerlendirme formları, 20 inşaat güvenlik uzmanı tarafından değerlendirilmiştir. DsSafe, tüm karar süreçlerinin hızlandırılmasına yardımcı olması ve kolay kullanılabilir olması için tasarlanmıştır. Ancak, sistemin evrensel olmaması nedeniyle farklı ülkelerde kullanımı için uyarlama gerektirebilir. Sonuç olarak, DsSafe uzman sistemi, inşaattan düşme kazalarının önlenmesinde etkili bir araç olabilir ve kazaların kök nedenleri belirlenerek alınacak önlemler daha etkili hale getirilebilir.

Amiri ve ekibi, inşaat endüstrisindeki mesleki risk değerlendirme problemlerine çözüm bulmak için bulanık olasılık kurallarına dayalı bir uzman sistem geliştirmiştir [12]. Bu sistem, rastlantısallığı birleştirerek yetkililerin tehlikeleri proaktif bir şekilde yönetmelerini sağlayarak pratik faydalar sunmaktadır. FMEA metodolojisi kullanılarak risk analizi yapılmıştır. Ancak, klasik FMEA yönteminin eksikliklerini gidermek için bulanık mantık yaklaşımı da kullanılmıştır. Bu sayede belirsiz kavramlar ve kesin olmayan bilgi durumlarında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bulanık Uzman Sistem (FES) sayesinde, geleneksel FMEA yöntemi uzmanların görüşlerini yansıtmakta yeterli esnekliğe sahip olmadığından, yeterli esneklik sağlanmıştır. Veri olarak 2014'te yapılmış bir yayının sonuçları kullanılmış ve en az 20 yıllık tecrübeye sahip olan inşaat güvenliği uzmanları ve akademisyenler ile röportajlar yapılmıştır. Uzman sistemin avantajlarından biri de, uzmanların bilgilerini kaydedebilmesidir. Bu da bilgi tabanını şantiye personelinin eğitimi için kullanılabilir hale getirmektedir.

Hadipriono, zemin açıklıklarındaki kasıtsız inşaat düşüşlerini simüle etmek ve araştırmak amacıyla çerçeve tabanlı bir hata ağacı uzman sistemi (FTES-FALL) geliştirmiştir [13]. Bu sistem, daha önce yapılan bir çalışmada oluşturulan hata ağacı modelleri kullanılarak oluşturulmuştur ve bilgi tabanı uzmanlardan ve literatürden elde edilen verilerle oluşturulmuştur. FTES-FALL, zemin açıklıklarındaki inşaat düşüşlerini önleme konusunda önemli bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Kullanıcının sonuca ulaşmak için gereken bilgileri ve kanıtları bulmasını sağlamak amacıyla sorgulama özelliği tasarlanmıştır. Bu sayede, kullanıcılar sistemi daha etkili bir şekilde kullanabilirler. FTES-FALL, inşaat sektöründe güvenlik konusunda önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Lilic ve ekibi, maden ocaklarında güvenlik analizleri için yapay zekâ yöntemlerinin kullanılması üzerinde çalışmıştır. Bu alandaki uzmanlık gerektiren konunun karmaşıklığına yönelik olarak, PROTECTOR adı verilen bir hibrit sistem geliştirilmiştir [14]. Sistem, sinir ağı ve uzman sistem teknolojilerinin bir arada kullanımıyla oluşturulmuş ve maden güvenliği alanındaki uzman bilgilerinden oluşan bir bilgi tabanına sahiptir. PROTECTOR, Sırbistan'daki herhangi bir maden ihtiyacına göre uyarlanabilen Maden Güvenliği Bilgi Sistemi (MISS) adlı Teknolojik Bilgi Sistemi (TIS) modülünün bir parçasıdır. Sistem, Coad-Yourdan Nesneye Dayalı Çözümleme Modeli'nin bir modifikasyonu kullanarak maden ortamlarının güvenliğinin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Program, açık ocak maden işletmelerinde de başarıyla uygulanmıştır. Bu sistem, madencilik sektöründe güvenliği artırmak için önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Meciarova tarafından geliştirilen uzman sistemlerden biri, metal işleme sıvılarının tehlikelerini değerlendirmek ve maruziyet riskini en aza indirmek amacıyla tasarlanmıştır [15]. Bu sistem, kullanıcıya gerekli olan bilgileri ortaya çıkarmak için sorular sorar ve sebep-sonuç kurallarını kullanarak riskleri

değerlendirir. Ücretsiz olarak sunulan e2gLite adında bir yazılımı bir Java olarak uygulanmış ve uzman sistemi kullanmak için yüklenen bir uygulama ve bilgi tabanını tanımlayan bir web sayfası gerekmektedir. Bu sayede, metal işleme sınırlarıyla ilgili tehlikelerin değerlendirilmesi ve risklerin azaltılması süreci daha etkili bir şekilde yönetilebilmektedir. Metal işleme sınırlarına maruziyet riski taşıyan işletmelerin, bu uzman sistemini kullanarak iş sağlığı ve güvenliği konusunda daha bilinçli ve tedbirli olması sağlanabilir. Bu da çalışanların sağlığına ve işletmenin karlılığına olumlu etki yapacaktır.

Pavlovic ve ekibi, işe bağlı kas-iskelet sistemi bozukluklarının önlenmesi amacıyla SONEX adlı bir uzman sistem geliştirmişlerdir [16]. Bu sistem, ergonomik riskleri tanımlamak ve uzman tavsiyesi sağlamak için bilgi veri tabanı ve karar kuralları veri tabanı üzerine inşa edilmiştir. SONEX, bir ergonomist için karar destek sistemi olarak kullanılabilirdiği gibi, işçiler gibi profesyonel olmayan kullanıcılar için de ergonomik analiz önerileri sunabilen bağımsız bir uzman olarak da hizmet verebilmektedir. Sistem, kural tabanında 140'dan fazla soru barındırmaktadır ve bilgi tabanında ise 200'den fazla risk faktörü bulunmaktadır. Bu sayede yaklaşık 500 farklı olası cevap üretilebilmektedir. SONEX, konvansiyonel ergonomik analiz metotları kullanılarak 3-4 saat sürebilecek sonuçları sadece 10 dakikada elde etme imkanı sunmaktadır. Bu hızlı sonuç alma özelliği, sistemin en büyük avantajlarından biridir. Ayrıca, SONEX kullanılarak her biri ayrı ayrı bir uzman sistem olan bilgi tabanı modüllerine erişmek mümkündür. Bu da sistemin esnekliğini ve kullanıcı dostu yapısını artıran bir özelliktir. Pavlovic ve ekibi tarafından geliştirilen SONEX, işe bağlı kas-iskelet sistemi bozukluklarının önlenmesinde etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Kas-iskelet sistemi bozukluklarının önlenmesi için yapılan bilimsel çalışmalar oldukça değerlidir. Bu çalışmaların

bir örneği, Nunes tarafından gerçekleştirilmiştir [17]. Araştırma, ergonomik denetim faaliyetlerini desteklemek amacıyla tasarlanmış olan FAST ERGO_X adlı ergonomik analiz aracını sunmaktadır. FAST ERGO_X, işe bağlı kas-iskelet sistemi bozukluklarının ilerlemesine neden olabilecek risk faktörlerini objektif ve subjektif veriler kullanarak değerlendiren bir bulanık uzman sistemdir. Ayrıca, bu faktörleri ortadan kaldırmak veya azaltmak için öneriler sunmaktadır. Bu araştırmada, bir süpermarket örneği vaka çalışması olarak ele alınmıştır. Süpermarketlerde çalışanların sağlığının korunması ve iş performansının artırılması açısından bu tür çalışmalar son derece önemlidir. FAST ERGO_X gibi ergonomik analiz araçları, işyerlerindeki çalışanların sağlığını ve refahını önemseyen bir yaklaşımın bir parçasıdır. Bu tür araçlar, risk faktörlerini belirlemek ve müdahale etmek için etkili bir yol sunar. Sonuç olarak, kas-iskelet sistemi bozukluklarının önlenmesi için yapılan bilimsel çalışmalar işyerlerindeki çalışanların sağlığını korumak ve iş performansını artırmak için hayati öneme sahiptir. Nunes'in gerçekleştirdiği araştırma, FAST ERGO_X gibi ergonomik analiz araçlarının kullanımının işyerlerindeki ergonomi yönetimine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Bu tür araçlar, risk faktörlerini belirlemek ve müdahale etmek için etkili bir yol sunarak çalışanların sağlığını ve refahını korumaktadır.

Shavarani ve arkadaşı, bilgisayar kullanıcılarının sağlığı ve güvenliği açısından oldukça önemli bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ergonomi standartlarına uygun şekilde analiz etmek ve değerlendirmek için kural tabanlı bir uzman sistem tasarlamışlardır [18]. Bu sistem için bilgi tabanı, Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı (OSHA) ve Washington eyaleti ergonomik standartlarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Geliştirilen uzman sistem, farklı iş pozisyonlarından seçilen 20 kadın ve 80 erkek katılımcı tarafından kullanılmıştır. Bu sayede sistem, 100 bilgisayar kullanıcısı için kullanılabilir hale

getirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, OSHA standartlarıyla karşılaştırılmış ve üretilen sistemin etkinliği doğrulanmıştır. Tasarlanan uzman sistem sayesinde, çalışanların iş ortamında daha sağlıklı ve güvenli bir şekilde çalışmaları sağlanabilir. Bu nedenle, bu tür çalışmaların devam etmesi ve benzer sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, bilgisayar kullanıcılarının sağlığına büyük katkı sağlamaktadır ve bu alanda daha fazla çalışma yapılması gerektiğini göstermektedir.

Azadeh ve ekibi, bir gaz rafinerisinde sağlık, güvenlik, çevre (HSE) ve ergonomi sistem faktörlerinin performans değerlendirmesi için bir bulanık uzman sistem tasarlamayı amaçlamıştır [19]. Bu sistem, HSE ve ergonomi performansının sürekli olarak değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi için sağlam bir kontrol mekanizması sağlayacaktır. Bu çalışmanın önemi, HSE ve ergonomi için performans verilerinin yorumlanması ve değerlendirilmesi için resmi bütünleşik metodolojilerin mevcut olmamasından kaynaklanmaktadır. Bulanık uzman sistemleri kullanmanın üç önemli nedeni; insan hatasının azaltılması, uzman bilgisi oluşturulması ve belirsiz verilerin büyük miktarda yorumlanmasıdır. Bu çalışmanın amacına ulaşmak için, HSE ve ergonomi faktörlerinin değerlendirilmesi için standart göstergeler ve teknik toleranslar belirlenir. Veriler toplanır ve her gösterge için "kabul", "düşük sapma", "orta sapma" ve "yüksek sapma" olarak tanımlanan dört koşul belirlenir. Her bulanık koşul (küme) için bir üyelik fonksiyonu tanımlanır ve uzman sistem, Veri Motoru ile yapılandırılan bulanık kurallar kullanmaktadır. Bu çalışma, bütünleşik bir HSE ve ergonomi uzman sistemini bulanık mantık aracılığıyla tanıtmaktadır ve önceki çalışmalardan farklı olarak bu alanlarda resmi metodolojilerin eksikliğini gidermektedir.

Li ve arkadaşları, bir petrokimya şirketinin sağlık, güvenlik ve çevre (SÇG) yönetimindeki başarısını ölçmek için kullanılan bir performans değerlendirme sistemi tasarlama

amaçlamışlardır [20]. Bu sistem, manuel ve karmaşık değerlendirme sürecini basitleştirerek, grafikler ve analiz raporları otomatik olarak oluşturmayı hedeflemektedir. Geleneksel yöntemlerin pratik uygulamadaki eksikliklerini aşmak için, bulanık kapsamlı ve uzmanların ağırlıklarının bir kombinasyonu kullanılmaktadır. Tasarlanan bu uzman sistem, insan hatalarını azaltarak, manuel ve karmaşık değerlendirme sürecini basitleştirerek iş verimliliğini artırır. Ayrıca, farklı ağırlıklara sahip uzmanların SÇG performans puanları konusunda anlaşmaya varmalarına gerek yoktur. Bunun yerine, her bir SÇG göstergesi ayrı ve bağımsız olarak puanlanabilir, görüşleri ve puanları sentezlenebilir. Bu sayede, şirketin sağlık, güvenlik ve çevre yönetimindeki başarısı objektif bir şekilde ölçülebilir ve iyileştirme için gerekli adımlar atılabilir.

Bu makalede Hindistan'da inşaat, çelik ve refraktör sektöründe kazaların tahmin edilebilmesi için bulanık mantık tabanlı uzman bir sistem geliştirme amaçlanmıştır [21]. Çalışma belirsiz bir ortamda farklı türdeki kazaların (ölümcül olanlardan hafif olanlara kadar) tahmin edilmesi için bir yapay zeka yaklaşımı sunmaktadır. İş yerinde kazaların meydana gelme olasılığı rastgele bir olgudur ancak sağlık hizmetlerine yapılan harcamalar, güvenlik eğitimi, araç ve gereçlerin yenilenmesi ile güvenlik ekipmanlarına ve araçlarına yapılan harcamalar gibi çeşitli özelliklere akıllı yatırımlar, kaza oranının azaltılmasına yol açabilmektedir. Kaza türleri ile yatırım arasındaki ilişki, tahmin edilebilir bir kural izlemedikleri için tahmin edilmesi zordur, bunun yerine non-lineer şekilde ilişkilendirilirler. Bu durumda, bulanık mantık, girdi ve çıktıları verimli bir şekilde eşleştirmeye yardımcı olarak çeşitli kazaların tahmin edilmesi için çıkarım motorunun oluşturulmasına yardımcı olur. Çeşitli kazaların tahmin edilmesi, yöneticilerin güvenlik performansını iyileştirmek için kurumsal politikalar geliştirmelerine yardımcı olmaktadır. Çalışmada İSG durumunun iyileştirilebilmesi için

kaza analizinin ve tahminlerinin modellenmesi için sistematik bir bütünleşik yaklaşım sunulmuştur.

Bu çalışmada, insansız hava araçları sistemlerinde bakım ve uçuş faaliyetleri sırasında oluşabilecek risklerin analizi yapılmış ve operasyonel açıdan riskli sahalar incelenmiştir. Genel olarak risk analizi metodolojisi ele alınarak, örnek bir risk yönetimi modeli geliştirilmiştir [22]. Model, insansız hava araçları sistemleri üzerinde uzmanlaşmış personelin tecrübelerinden yararlanılarak, uluslararası havacılık şirketlerinin kullandığı beş adımdan oluşan risk yönetim tekniği kullanılarak oluşturulmuştur. Geliştirilen model, uzman sistem kullanılarak hazırlanan bir bilgisayar programında test edilmiştir. Bu modelle birlikte bakım ortamındaki tehlikelerin belirlenmesi, şiddet ve sıklık ölçütleri baz alınarak analiz edilmesi, gerek ortamın bütünü ve gerekse icra edilen belirli faaliyetler için geçerli bir risk haritası oluşturulması, personelin bilinçlendirilmesi ve yönetim sürecine dahil edilmesi, kazalara yol açabilecek faktörlerin potansiyel halde iken teşhisi, bertaraf edilmesi ve nihayet oldukça yüksek maliyetli olmalarının yanı sıra ikame edilmeleri de bir hayli güç olan uzman personel, hava aracı ve yardımcı sistemlerin hasar, yaralanma ya da kaybının önüne geçilebileceği veya azaltılabileceği düşünülmektedir. Bu çalışma, insansız hava araçları sektöründe faaliyet gösteren tüm kurum ve kuruluşlara yol gösterici olacak niteliktedir.

Uçuş Operasyonları Risk Değerlendirme Sistemi (FORAS), risk faktörlerini ve aralarındaki ilişkileri bulanık bir uzman sistem olarak temsil eden bir risk modelleme metodolojisidir [23]. FORAS risk modeli, potansiyel tehlikelerin tek bir uçuş operasyonu üzerindeki birikimli etkisini temsil eden bir niceliksel göreceli risk indeksi sağlamaktadır. Sistem insan uzmanlığını elde etme sürecini sistematik hale getirerek, uzman sistemde bilginin doğal bir temsilini sağlar ve risk değerlendirme sürecini otomatikleştirir. Sistem havayolu güvenlik departmanları

için risk eğilimlerini incelemekte, her uçuşla ilişkili riskleri değerlendirmek için pilotlara ve görevlilere yardımcı olmakta ve güvenlikle ilgili değişikliklerin etkilerini nicelendirmek için havayolu yönetimine değerli bir araç sağlamaktadır. FORAS tarafından oluşturulan niceliksel göreceli risk indeksi, uçuşlar arasında karşılaştırmalar yapmayı ve güvenlik konularının organizasyon içinde iletilmesini kolaylaştırmaktadır.

Raylı taşımacılık, büyük ve kalabalık şehirler için en önemli toplu taşıma türlerinden biridir. Raylı taşımacılık sistemlerinde, paydaşlar atölyelerde, istasyonlarda, hatlarda ve çevrelerinde ve genel ofis binalarında ciddi sorunlarla karşı karşıya kalırlar. Fine-Kinney yöntemi ile bulanık kural tabanlı bir uzman sistemi birleştiren bu çalışmada, artan farkındalık ve daha iyi iş sağlığı ve güvenliği (İSG) yönetimine ulaşmak için yeni bir risk değerlendirme yaklaşımı önerilmektedir [24]. Bu yaklaşım, Fine-Kinney yöntemi ile bir bulanık kural tabanlı uzman sistem kombinasyonunu içerir. Fine-Kinney parametreleri arasındaki doğrusal olmayan nedensel ilişkileri yakalar. İSG risk değerlendirme verilerinde yüksek bir belirsizlik düzeyi olduğundan, olasılık, maruziyet ve sonuç için kural tabanlı uzman sistem risk puanını değerlendirmek için geliştirilmiştir. İstanbul/Türkiye'deki bir raylı taşımacılık sisteminde bir vaka çalışması yapılmış ve klasik Fine-Kinney yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Vaka çalışmasının sonuçları dikkate alınması gereken risk kümelerini ve ilgili kontrol önlemlerini ortaya çıkarmaktadır. Çalışma, metodolojik olarak bilgiye risk değerlendirmesine katkıda bulunurken, gerçek bir raylı taşımacılık sisteminde yapılan vaka çalışması, güvenliği iyileştirmek için toplu taşıma endüstrisine bir bakış açısı sunmaktadır.

3. UZMAN SİSTEMLERİN İŞ KAZALARINDAKİ ETKİNLİĞİ

Literatür taraması bir bütün olarak ele alındığında iş kazalarını önlemede veya minimize etmede geleneksel yöntemlerin yanında yapay zeka teknolojilerinden yararlanmanın kaçınılmaz olduğu varsayımıyla incelemeler yapılmıştır. Uzman sistem teknikleri ele alındığında bulanık mantık tabanlı yaklaşımların kazaların önlenmesinde etkin rol aldığı görülmüştür. Hindistan’da inşaat sektöründe kazaların tahmin edilebilmesi için bulanık mantık tabanlı uzman bir sistem geliştirilmiş, çeşitli kazaların tahmin edilmesi ve yöneticilerin güvenlikle ilgili performansını iyileştirmede etkin bir rol aldığı görülmüştür [21].

Web tabanlı bir uzman sistem geliştirilmiş [8], tasarım mühendislerinin güvenlikle ilgili bilgilere hızlı ve kolay bir şekilde erişebilmelerini sağlama maksatlı, proje tasarım aşamasında riskleri kontrol altına almanın ve önlemenin, proje bitiminden sonra ortaya çıkabilecek zararların önlenmesi için kullanılan yöntemlere göre daha etkili ve ekonomik olduğu görülmüştür. Başka bir çalışmada ise risk değerlendirme süreci modellenmesi geliştirilmiştir [9]. Daha iyi bir risk yönetimi stratejisi oluşturmak ve başarı artırmak amaçlı uzman sistem ve web platformu, risk değerlendirmesi için bütünleştirici araçlar olarak sunulmuştur. Uzman sistem, risk seviyesini belirlemeye yardımcı olurken, web platformu farklı bölümlerdeki çalışanların sürece katılmasını sağlamaktadır. Burada da görülmüştür ki web ortamında çalşıılan bir US daha verimli hale gelmektedir.

Kazaların önlenmesi, üretim verimliliğinin artırılması ve işletme maliyetlerinin azaltılması gibi amaçlar için kullanılan US, sektörel bazda ele alındığında endüstri sektöründe sıkça kullanıldığı görülmüştür. Yine bir çalışmada inşaat endüstrisindeki mesleki risk değerlendirme problemlerine çözüm

bulmak amaçlı bulanık olasılık kurallarına dayalı bir uzman sistem geliştirilmiş [12], yetkililerin tehlikeleri proaktif bir şekilde yönetmeleri sağlanmıştır. Bu amaçla FMEA risk analizi yapılmış, uzman bilgilerinin kaydedilmesiyle şantiye personelinin eğitimine katkı sağlandığı görülmüştür.

Sağlık sektörüyle ilgili başka bir çalışmada, kas-iskelet sistemi bozukluklarının ilerlemesine neden olabilecek risk faktörlerini karma veriler kullanarak ele alan bir uzman sistem tasarlanmıştır [15]. Ergonomiyle ilgili olan bu çalışmayla birlikte süpermarket çalışanlarının duruş pozisyonlarındaki değişikliklerin, kas yapılarındaki olumlu değişimlere neden olacağı öngörülmüştür. Bu çalışmayla birlikte farklı sektörde çalışan işçilerde de ergonomik açıdan olumlu geri dönüşler alınabileceğini göstermektedir.

Genel olarak incelendiğinde inşaat, imalat, sağlık, ulaşım, maden, metal ve petrokimya gibi birçok sektörde kullanılan uzman sistemlerin, gerekli bilgi biriktirme ve kapsam sınırlaması yaparak akıllı karar verme programları olarak birçok alanda kullanıldığı görülmüştür. Uzman sistemlerin iyi geliştirildiklerinde, konusunda uzman olan kişilerin işlevlerini yerine getirerek planlama, tasarım, yorumlama, özetleme ve kontrol etme gibi birçok işlemi gerçekleştirebilmektedirler. Ancak sistem karmaşıklığı arttıkça, maliyetleri de yükselmektedir. Bunun yanı sıra, girdi verileri ile kuralları tam olarak eşleştirme zorunluluğu, muhakeme durumunu hassas hale getirmekte ve bilgi edinmenin zorluğu da zayıf yönleri arasında sayılabilmektedir. Bununla birlikte, uzman sistemlerin mantıksal neden-sonuç ilişkisine dayanması, güvenilir bilgi ve öneri sunması, belirsiz veri ve kurallarla çalışabilmesi gibi güçlü yönleri de bulunmaktadır. Uzman sistemlerin, uzman kişilerin yerine geçerek problemlerin doğru ve hızlı bir şekilde çözülmesini amaçlayarak çalışma verimliliğini ve alınan kararların kalitesini artırdığı görülmüştür. Ancak geliştirmenin

maliyetinin yüksek olması ve öğrenerek kendilerini yenileyemiyor olmaları gibi zayıf yönleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

4. SONUÇ

Yapılan literatür taramaları, uzman sistemlerin iş kazalarının önlenmesinde etkili olduğunu göstermektedir. Bu sistemin kullanımıyla birlikte, insan hatalarının minimize edildiği, iş süreçlerinin hızlandırıldığı ve karar verme süreçlerinin daha etkili hale geldiği tespit edilmiştir. Uzman sistemlerin, iş kazalarının önlenmesinde gerekli olan tedbirlerin belirlenmesinde, iş güvenliği uzmanlarının hızlı ve doğru karar almasında etkili olduğu anlaşılmıştır.

Uzman sistemlerin iş kazalarını önlemede, geleneksel(klasik) yöntemlerle birlikte kullanıldığında daha etkili sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında uzman sistem tasarımında ne kadar çok veri işlenirse o kadar sağlam bir uzman alt yapısı olacağı görülmüştür. Bulanık mantık tabanlı uzman sistemler, iş kazalarının önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, işyerlerindeki risk faktörlerini belirleyerek, işçilerin güvenliği için alınması gereken önlemleri önererek işverenlere yardımcı olabilmektedir. Ayrıca, bu sistemler, işyerindeki verileri analiz ederek kazaların nedenlerini tespit edebilir ve gelecekte benzer kazaların önlenmesi için öneriler sunabilmektedir. Literatür özeti sunan bu çalışmanın, iş kazalarının önlenmesinde ya da minimize edilmesinde uzman sistem kullanan araştırmacılara faydalı olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Largent, E. J. (1983). Encyclopaedia of occupational

health and safety.

2. Horozoğlu, K. (2017). İş kazalarının iş sağlığı ve güvenliği açısından analizi. *Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 265-281.

3. Asal, Ö., Kayır, Y., & Mergen, R. (2019). Rulman Seçimi İçin Bir Uzman Sistem. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(3), 216-226.

4. Zeyveli, M., & Gültaş, A. (2004). Taşlama Operasyonları İçin Uzman Sistem Destekli Zimpara Taşı Seçimi. *Teknoloji*, 7(2).

5. Adalı, E., “Üretimde Uzman Sistem Çözümü”, Proceedings of the First Turkish Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, 1996. 525-535, s.30-31.

6. Dalmış, S., “Bilgisayar Destekli Üretim Sistemleri Ve Bir Ekici Çark Tasarımı”, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2000

7. Önal, M. (2022). *COVID-19 sürecinde kullanılan yapay zeka teknikleri* (Master's thesis, Altınbaş Üniversitesi/Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).

8. Winn, G. L., Gopalakrishnan, B., Akladios, M., & Becker, P. E. (2002). Texpert: A tool for safety professionals & design engineers. *Professional Safety*, 47(10), 32.

9. Draghici, A., & Draghici, G. (2013). Cross-disciplinary approach for the risk assessment ontology design. *Information Resources Management Journal (IRMJ)*, 26(1), 37-53.

10. Baron, P., Brázda, P., Dobránsky, J., & Kočiško, M. (2012). Expert system approach to safety management. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 44, 77-88.

11. Talat Birgonul, M., Dikmen, I., Budayan, C., &

Demirel, T. (2016). An expert system for the quantification of fault rates in construction fall accidents. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 22(1), 20-31.

12. Amiri, M., Ardeshir, A., & Zarandi, M. H. F. (2017). Fuzzy probabilistic expert system for occupational hazard assessment in construction. *Safety science*, 93, 16-28.

13. Hadipriono, F. C. (1992). Expert system for construction safety. II: knowledge base. *Journal of performance of constructed facilities*, 6(4), 261-274.

14. Lilić, N., Obradović, I., & Cvjetić, A. (2010). An intelligent hybrid system for surface coal mine safety analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(4), 453-462.

15. Meciarova, J. (2011). Expert system for assessing health hazards of metalworking fluids. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 461-463.

16. Pavlovic-Veselinovic, S., Hedge, A., & Veselinovic, M. (2016). An ergonomic expert system for risk assessment of work-related musculo-skeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 53, 130-139.

17. Nunes, I. L. (2009). FAST ERGO_X—a tool for ergonomic auditing and work-related musculoskeletal disorders prevention. *Work*, 34(2), 133-148.

18. Shavarani, S. M., & Korhan, O. (2015). Expert system assessment of work-related musculoskeletal disorders for video display terminal users. *Applied Research in Quality of Life*, 10, 205-216.

19. Azadeh, A., Fam, I. M., Khoshnoud, M., & Nikafrouz, M. (2008). Design and implementation of a fuzzy expert system for performance assessment of an integrated health, safety, environment (HSE) and ergonomics system: The case of a gas refinery. *Information Sciences*, 178(22), 4280-4300.

20. Li, W., Liang, W., Zhang, L., & Tang, Q. (2015). Performance assessment system of health, safety and

environment based on experts' weights and fuzzy comprehensive evaluation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 95-103.

21. Beriha, G. S., Patnaik, B., Mahapatra, S. S., & Padhee, S. (2012). Assessment of safety performance in Indian industries using fuzzy approach. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3311-3323.

22. Başak, H., Şahin, İ., & Gülen, M. (2008). İnsansız Hava Aracı Kazalarının Önlenmesi İçin Uzman Sisteme Dayalı Risk Yönetimi Modeli. *Teknoloji*, 11(3).

23. Hadjimichael, M. (2009). A fuzzy expert system for aviation risk assessment. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 6512-6519.

24. Gul, M., & Celik, E. (2018). Fuzzy rule-based Fine–Kinney risk assessment approach for rail transportation systems. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(7), 1786-1812.

AISI 1050 MALZEMESİNİN TORNALANMASINDA TAKIM ÖMRÜ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN İNCELENMESİ¹

Hakan DİLİPAK²

Yunus KAYIR³

Ömer ASAL⁴

Derya ULUĞ⁵

1. GİRİŞ

Kesici takımlar, imalat sektöründe ürün maliyetini etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Talaş kaldırma işleminde, iki metalin birbiriyle teması söz konusu olduğu için takım aşınması kaçınılmaz bir hale gelmektedir. Kesme işleminin, sert olan takımın daha az sert olan takımı aşındırması şeklinde gerçekleşmektedir. Aşınmış takım, kesme işleminin kötü şartlarda gerçekleşmesine, ürünün yüzey kalitesinin olumsuz etkilenmesine ve ürünün istenilen toleranslar dâhilinde imal edilmemesine sebep olmaktadır. Bu gibi nedenlerle, kesici takım ömrünün bilinmesi ve aşınma işleminin gerçekleştiği anda yeni

¹ Derya Uluğ, Kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür takımlar için takım ömrü modeli'ndeki 'n' üstel değerinin deneysel olarak araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, hdilipak@gazi.edu.tr, 0000-0003-3796-8181.

³ Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, ykayir@gazi.edu.tr, 0000-0001-6793-7103.

⁴ Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, omerasal@gazi.edu.tr, 0000-0002-6339-9202.

⁵ Y. Lisans Öğ. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Bölümü, deryaulug@gmail.com, 0009-0002-6518-6371.

bir kesici takım talaş kaldırma işlemine devam edilmesi son derece önemlidir.

Talaşlı imalatta, kesici takım aşınmasının zamanında tespit edilememesi, istenen parça boyutları ve yüzey kalitesinin elde edilememesi gibi sorunlara neden olabilmektedir. Ayrıca, keskinliğini kaybetmiş olan kesici takıma etkiyen direnç kuvvetlerinin artması, kesme işlemi için gereken talaş kaldırma kuvvetlerini de artırmaktadır. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğünü de etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle, kesici takım aşınması, kesme işleminin verimliliğine olan etkisinden dolayı göz önünde bulundurulması gereken en önemli kıstaslardan biridir.

Kesme işlemi sırasında oluşan sürtünme, ısı, kuvvet vb. etkenler, kesici takımın uç ve yan yüzeylerinde aşınmalara neden olabilir. Bu aşınmalar, yüzey kalitesinde bozulmalara yol açabilir ve kesici takım değiştirilmeden kullanılmaya devam edilirse, üretim sürecinde maliyet artışına neden olabilir.

Takımın kısa sürede aşınması, kesici uç maliyetini artırmakta ve imalat süresinin uzamasına neden olur. Bu nedenle, takım aşınmasının belirlenmesi ve takım ömrünün arttırılması yönünde gerek Ar-Ge ve gerekse akademik anlamda birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya da devam etmektedir.

Bir kesici takımın aşınmadığının kontrolü için serbest yüzey aşınması (V_B) değeri dikkate alınmaktadır. ISO 3685'e göre serbest yüzey aşınma değeri $V_B=0,3$ mm olması durumunda takım aşınmış olarak kabul edilmektedir [1, 2]. İmrek ve Oral, DIN 1.2379 malzemesinin kuru ve kesme sıvısı kullanarak torna tezgahında seramik takımlar ile değişken ilerleme şartlarında işlenmesinde takım aşınmasını incelemiştir [3]. Bacak ve Karabıyık, AISI 4140 çeliğini farklı özelliklerdeki kesme sıvısı kullanarak tornalayarak takım ömrü yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti değişimlerini incelemiştir [4]. Kyung-Hee ve Kwon,

kaplamalı takımlarla AISI 1045 çeliğinin işlenmesinde aşınmayı incelemişlerdir [5]. Avila ve diğerleri AISI 4340 çeliğinin kaplamalı takımlarla tornalanmasında takım performanslarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda serbest yüzey aşınmasının en fazla olduğu takım TiAIN kaplamalı takımlar olarak belirtilmiştir [6]. Oh ve diğerleri farklı özelliklerdeki kaplamalı takımlardaki aşınmaları incelemişlerdir [7]. Talaşlı imalatta işlenen parçanın kalitesi açısından yüzey pürüzlülüğü oldukça önemli bir etkidir. İyi bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olan bir parça, kullanıldığı yerde daha az aşınmasına, daha az sürtünmeye ve daha az gürültü oluşumunu sağlamaktadır. İyi bir yüzey pürüzlülüğü, işlenen parçanın daha az aşınmasına, daha az sürtünmeye ve daha az gürültüye neden olur [8]. Yüzey pürüzlülüğünün incelenmesine yönelik birçok çalışmanın da yapıldığı görülmektedir [9-11].

Gerçekleştirilen bu çalışmada, referans malzeme olan AISI 1050 üzerinde kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlarla talaş kaldırma işlemleri yapılarak takım ömrü çalışmaları gerçekleştirilmiştir. $V_B=0,3$ mm yan kenar aşınması referans alınmıştır. Sabit ilerleme hızı, sabit kesme derinliği ve dört farklı kesme hızı değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada AISI 1050 malzemesinden talaş kaldırma deneyleri yapılmıştır. Takım ömrü üzerindeki en önemli parametre kesme hızı olması sebebiyle, kesme hızındaki artışın takım ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler gerçekleştirilmesinde “TSE 10329 (ISO 3685) Torna Kalemleri Ömür Deneyi” standardı referans alınmıştır.

Malzeme olarak AISI 1050 (DIN 1.1210) karbon çeliği tercih edilmiştir. AISI 1050, düşük alaşımlı veya alaşımsız olarak bilinir ve imalat çeliği olarak da kullanılır. Kalıp setlerinde,

dişliler, cıvatalar, somunlar, miller, saplamalar ve şaftlarda kullanılmakta olup yüzey sertleştirmeye elverişli bir malzemedir. Ø100x530 mm ebatlarında temin edilen malzemeye ait kimyasal kompozisyon Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. AISI 1050 Malzemesine Ait Kimyasal Kompozisyon

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
0,49	0,19	0,79	0,022	0,025	0,057

Deney malzemeleri üzerinden 1 mm talaş kaldırıldıktan sonra bir ucuna punta deliği açılarak ayna - punta arasında işlenebilmeye uygun hale getirilmiştir.

SANDVIK firmasının ürettiği SNMG formundaki 0,8 mm uç yarıçapına sahip QM talaş kırıcı geometrisine sahip kaplamasız ve kaplamalı takımlar kullanılmıştır. Takım tutucu olarak, mekanik sıkımalı tip ISO P20 kalitesine karşılık gelecek şekilde bir takım tutucu kullanılmıştır.

Kesme parametreleri takım üretici firma verileri ve TS 10329 önerileri dikkate alınarak belirlenmiştir. Deneyler, 315 – 350 - 390 ve 450 m/dak değerlerinde dört farklı kesme hızı, 0,25 mm/dev sabit ilerleme hızı ve 2,5 mm sabit kesme derinliğinde kuru kesme olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir deney için yeni bir kesici kenar kullanılmıştır. Deneyler esnasında takım tutucu hiç sökülmemiş ve yerinden oynatılmamıştır. Sadece kesici uç sökülerek yan yüzey aşınmaları ölçülmüştür. Deney numune ve düzeneği Resim 1’de gösterilmiştir.

Resim 1. Deney Numunesi ve Deney Düzeneği



Kesici uç aşınmalarını ölçmek için 0,01 mm hassasiyetinde WF 20X takım mikroskobu kullanılmıştır. Her kesme hızı değerlerinde, belirli aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Aşınma değeri 0,3 mm'ye ulaştığında takım aşındığı kabul edilerek o kesici uç için deney tamamlanmıştır.

Mahr Perthometer M1 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırılan yüzeylerin 3 farklı bölgesinden 5,6 mm değerlendirme uzunluğu ile yüzey ölçümleri yapılmış olup elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen yan kenar aşınma değerleri Excel programı ile tabloya dönüştürülmüştür. Kesme hızı ve takım aşınma süreleri logaritmik on tabanında hesaplanarak tabloda ilgili sütunlara yazılmıştır. Daha sonra Log V / Log T grafiği oluşturulup, doğrusal bir formül elde edilmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu deneysel araştırmada 4 farklı kesme hızında (315, 350, 390, 450 m/dak), 0,25 mm/dev ilerleme hızı ve 2,5 mm kesme derinliğinde $V_B=0,3$ mm kesici uç yan kenar aşınması dikkate alınarak CNC torna tezgâhında talaş kaldırma işlemleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü değerleri değerlendirilmiştir.

3.1. Takım Ömrü

$V_B=0,3$ mm yan kenar aşınması kıstası esas alınmış olup aşınma değerleri takımçı mikroskobu ile ölçülmüştür. Takım ömrü deneylerinden elde edilen veriler Çizelge 2'de gösterilmiştir.

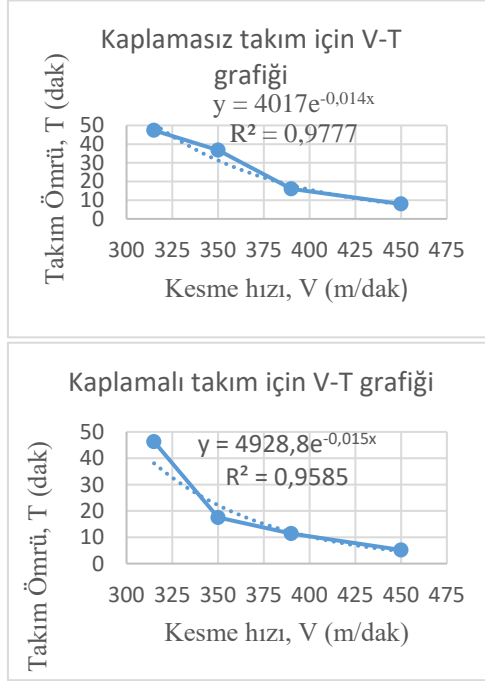
Çizelge 2'deki aşınma süreleri incelendiğinde kaplamasız ve kaplamalı takımlar için kesme hızı değerlerinin artması takım sürelerinin ciddi oranda azalmasına sebep olmaktadır.

Çizelge 2. Takım Ömrü Değerleri

D. No	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Derinliği (mm)	Takım	Kesme Hızı (m/dak)	Aşınma Süresi (dak)
1	0,25	2,5	Kaplamasız	315	46,326
2				350	17,52
3				390	11,416
4				450	5,171
5			Kaplamaalı	315	47,341
6				350	36,787
7				390	16,067
8				450	7,965

Şekil 1'deki kaplamasız ve kaplamaalı takımlar için elde edilen takım ömrü değerleri görülmektedir.

Şekil 1. Kaplamasız ve Kaplamaalı Takımlar için V-T Grafiği



Şekil 1 incelendiğinde, kesme hızındaki artışın takım ömrü üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu görülmektedir. Kesme hızının artması sürtünmenin artmasına sebep olmakta ve böylece kesici yan yüzeyinde oluşan aşınma miktarı da artmaktadır [12,13]. Kaplamaalı takım için kaldırılan talaş hacimleri açısından

en iyi sonuç ise 350 m/dak kesme hızıyla 8056,58 mm³ talaş kaldırılarak elde edilmiştir. Literatürde de benzer sonuca ulaşılmıştır [14]. Kaplamasız takım için, farklı kesme hızlarında takım aşınıncaya kadar kaldırılan talaş hacimleri açısından en iyi sonuç ise 315 m/dak kesme hızıyla 86989,58 mm³ talaş kaldırılarak elde edilmiştir. Yüksek kesme hızı değerlerinden yapılan talaş kaldırma işlemlerinde takım yüzeyinde oluşan sıcaklığın uygun tekniklerle giderilmesi gerektiği, yüksek sıcaklık değerlerinin takımdaki aşınmayı ve takım malzeme taneciklerinin arasındaki kopmaları hızlandıracağı belirtilmiştir [15]. 315 m/daklık kesme hızı değerinin kaplamasız ve kaplamalı takımlarda en yüksek takım ömrü değerini verdiği görülmektedir.

Taylor takım ömrü denklemi $C=V_x T^n$ dir. Bu denklemde C sabiti, bir dakikalık takım ömrü için kesme hızı (m/dak) , V kesme hızı (m/dak), T takım ömrü (dak) ve n ise paso derinliği iş parçası malzemesi, takım malzemesi ve kullanılan takım ömrü kriterine bağlı olarak belirlenen bir sabittir ve bu araştırma için kaplamasız takım için $n=0,17$ ve kaplamalı takım için $n=0,19$ alınmıştır. Taylor denklemi ile C sabiti kaplamasız takımlar için 586,71 m/dak ve kaplamalı takımlar için 670,94 m/dak olarak hesaplanmıştır.

Takım ömrü için Taylor denklemi kullanılarak ve Şekil 1’de elde görüldüğü üzere Excel kullanılarak elde edilen grafiğe ait üstel formül ile Takım ömürleri hesaplanmış ve kıyaslanması yapılarak Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Takım Ömrünün Taylor ve Üstel Denklem İle Kıyaslanması

D.No	T (dak) (Deneysel)	n	C	Cort	T (dak) (Taylor)	Taylor %Fark	T (dak) Üstel	Üstel % Fark
1	46,326	0,169262	602,936	586,710	39,430	14,886	48,827	5,399
2	17,52	0,169262	568,265		21,159	20,769	29,913	70,736
3	11,416	0,169262	588,927		11,164	2,204	17,087	49,672
4	5,171	0,169262	594,283		4,794	7,298	7,376	42,650
5	47,341	0,190288	656,278		53,170	12,312	43,722	7,645
6	36,787	0,190288	695,026	670,940	30,563	16,919	25,864	29,693
7	16,067	0,190288	661,515		17,307	7,718	14,194	11,655
8	7,965	0,190288	667,878		8,159	2,432	5,771	27,545

Çizelge 2 incelendiğinde Taylor denkleminin Takım ömrünü tahmininde etkili bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır.

3.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Yüzey Pürüzlülüğü Deneysel Verileri, Tahmini ve Kıyaslanması

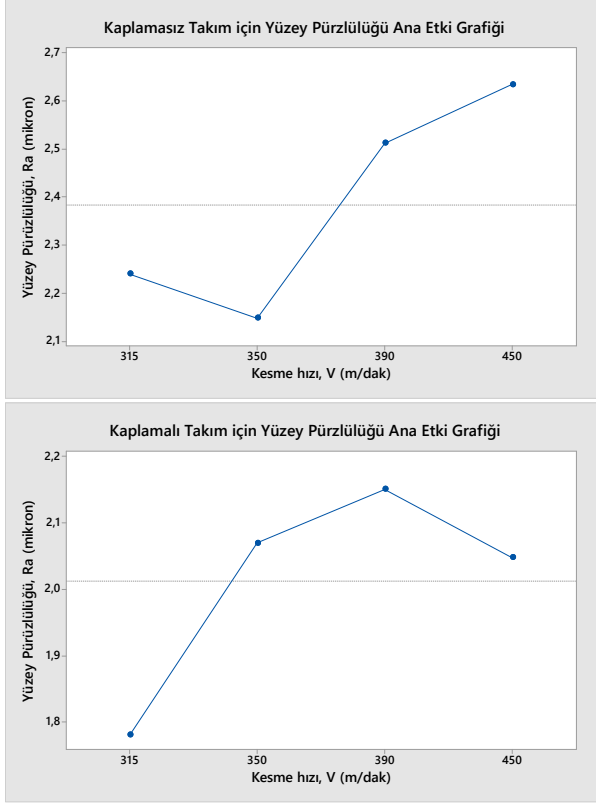
D. No	Ra (µm) (Deneysel)	Ra (µm) Regresyon Tahmini	Regresyon Tahmini % Fark	Ra (µm) Excel Tahmini	Excel Tahmini % Fark
1	2,24	2,168	3,199	2,171	3,063
2	2,149	2,291	6,584	2,294	6,743
3	2,512	2,430	3,260	2,434	3,109
4	2,634	2,640	0,209	2,644	0,376
5	1,781	1,909	7,167	1,906	6,990
6	2,07	1,969	4,903	1,965	5,072
7	2,151	2,037	5,305	2,033	5,486
8	2,048	2,140	4,468	2,135	4,248

Kaplamalı ve kaplamasız takımlar için Minitab programında ortalama yüzey pürüzlülüğünü ifade eden ana etki grafiği oluşturulmuş (Şekil 2) ve aynı zamanda regresyon eşitliği elde edilmiştir (Çizelge 4). Aynı zamanda Excel programında doğrusal tahmin eşitliği elde edilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Kaplamalı ve Kaplamasız Takımlar İçin Regresyon ve Doğrusal Tahmin Eşitlikleri

Kesici Takımlar	Regresyon Eşitliği	Excel Doğrusal Tahmin Eşitliği
Kaplamasız Takım	$Ra=1,069+0,00349.V$	$Ra=0,0035.V+1,0689$
Kaplamalı Takım	$Ra=1,370+0,00171.V$	$Ra=0,0017.V+1,370$

Şekil 2. Kaplamalı ve Kaplamasız Takımlar İçin Yüzey Pürüzlülüğü Ana Etki Grafiği



Şekil 2'deki ana etki grafiklerinde de görüldüğü üzere kaplamasız takımlarda kesme hızı 315 m/dak dan 350 m/dak ya çıktığında yüzey pürüzlülük değeri azalarak en iyi değere 2,149 μm ye ulaşmıştır. Bunun sebebi, yüksek hızlarda yüksek hızlarda sıcaklığın artması kesme bölgesinde deformasyonunun kolaylaşması ve dolayısıyla herhangi bir yırtılma olmadan şekillendirilmesi olarak açıklanabilir. Daha sonraki kesme hızı değerlerinde ise yüzey pürüzlülük değerlerinde bir artış söz konusudur. Aynı şekilde Kaplamalı takımlarda kesme hızının 315-350 m/dak arasındaki artışlarla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bunların sebebinin, kesme hızının artması ile oluşan yüksek ısı ve basınçtan kaynaklanan

aşınma mekanizmalarının yüzey pürüzlülük değerini artırdığı düşünülmektedir. Kaplamalı takımlarda en düşük yüzey pürüzlülük değeri 2,149 μm ile 315 m/dak kesme hızı değerinde elde edilmiştir.

Yüzey pürüzlülük değerinin tahmini amacıyla Minitab programı ile regresyon eşitliği ve Excel programı ile doğrusal tahmin eşitlikleri elde edilmiştir (Çizelge 4). Bu eşitlikler ile yüzey pürüzlülük değeri tahmin edilmiş deneysel Ra değerleri ile tahmin edilen Ra deneyleri ve kıyaslaması Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 3 incelendiğinde regresyon eşitliği ile doğrusal tahmin eşitliğinin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Kaplamalı ve kaplamasız takımlarla, sabit kesme derinliği, sabit ilerleme hızı ve dört farklı kesme hızı değerlerinde takım ömrü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda yüzey pürüzlülük değişimi ve tahminine yönelik istatistiksel bir inceleme de gerçekleştirilmiştir. Takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğüne yönelik elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kesme hızının takım ömrü üzerinde önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.
- Deneysel sonuçlar neticesinde kesme hızının artmasıyla yanak aşınmasının arttığı görülmüştür.
- Kaplamalı ve kaplamasız takımlar için en düşük kesme hızında en yüksek takım ömrü elde edilmiştir.
- Kaplamasız takımlarda kesme hızı değerinin 315 m/dak'tan %11,11 artırılması ile takım ömründe %62,18; kesme hızının %23,81 artırılması ile takım ömründe %75,36 ve kesme hızının %42,86 artırılması ile de takım ömründe %88,84 oranında bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

- Takım ömrü tahminin de Taylor teoreminin üstel yöntemden daha etkili olduğu görülmüştür.
- Kaplamalı takımlarda kesme hızı değerinin 315 m/dak'tan %11,11 artırılması ile takım ömründe %22,29; kesme hızının %23,81 artırılması ile takım ömründe %66,06 ve kesme hızının %42,86 artırılması ile de takım ömründe %83,18 oranında bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Kesme hızı artışının takım ömrünü çok büyük oranlarda olumsuz olarak etkilediği tespit edilmiştir. Bu bağlamda azalan takım ömrü yüzey pürüzlülük değerinin de artmasına sebep olmuştur.
- Yüzey pürüzlülüğünün tahmininde regresyon eşitliği ile doğrusal eşitliğin birbirine çok yakın tahminler yaptığı görülmüştür.

KAYNAKÇA

1. Altıntaş Y., Üretim Otomasyonu, Translated by İsmail Lazoğlu and Erhan Budak from “Manufacturing Automation” by Yusuf Altıntaş, ISBN: 978-605-9389-87-7, Koç Universty Press, 2017.
2. Özdemir K., “İlk aşınma bölgesinde takım aşınmasını etkileyen parametrelerin deneysel analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2008.
3. İmrek, B., Oral, A., “DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliğinin değişken ilerlemeli tornalanmasında serbest yüzey aşınmasının deneysel olarak incelenmesi, değişken ilerleme seviyelerinin optimizasyonu”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38:1, 409-419, 2023.

4. Karabıyık, Ö., Bacak, S., “AISI 4140 Çeliğinin Tornalanmasında Atomize Edilmiş Bitkisel Esaslı Kesme Sıvılarının Performansının Analizi”, Journal of Technical Sciences, Volume 9, Issue 1, 26-31, 2019.
5. Kyung-Hee, P., and Kwon, P.Y., “Flank wear of multi-layer coated tool”, Wear, cilt 270, sayı 11, s. 771-780, 2011.
6. Avila, R.F., Godoy, C., Abroa, A.M., Lima, M.M., “Topographic analysis of the crater wear on TiN, TiCN and TiAlN coated carbide tools”, Wear, cilt 265, s. 49-56, 2008.
7. Oh, S.M., Rhee, B.G., “Wear behaviors of ceramics TiN, TiC and TiCN with arc iron plating”, KSME International Journal, cilt 17, sayı 12, s. 1904-1911, 2003.
8. Işık, Y., Çakır, M., C., “Hız çeliği takımlar için kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin deneysel olarak incelenmesi”, Teknoloji, Sayı 1-2, 111-118, 2001.
9. Gökkaya, H., Sur G. ve Dilipak H., “PVD ve CVD kaplamalı sementit karbür kesici takımların işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi”, Teknoloji Dergisi, 7(3): 473-478, 2004.
10. Gökkaya, H., Sur G., Dilipak H., “PVD ve CVD kaplamalı sementit karbür kesici takımların işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi”, Teknoloji Dergisi, 7(3):473-478, 2004.
11. Gezgin, A., Dilipak, H., “AISI D3 Çeliğinin Frezelenmesinde, Kesici Uç Sayısı, Kesme Hızı ve İlerleme Miktarının Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması”, Journal of Polytechnic, Vol: 13 No:1 pp. 29-32, 2010.

12. Koçak, H., “GGG 90 küresel grafitli dökme demirin işlenebilirliğinin kesme kuvvetleri yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından değerlendirilmesi” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-80, (2011).
13. Parlak, Ş., “Çelik Talaşları ile Takviyeli Dökme Demir Kompozitlerinin İşlenebilirliklerin Deneysel Olarak İncelenmesi” Yüksek Lisans Tez, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-173, 2006.
14. Şeker, U., Hasırcı, H., “Evaluation of Machinability of Austempered Ductile Irons in terms of Cutting Forces and Surface Quality”, Journal of Materials Processing Technology, 173:260-268, 2005.
15. Şeker, U., “Takım tasarımı ders notları”, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, 59-102, 1997.
16. Uluğ, D., “Kaplmalı ve kaplamasız sementit karbür takımlar için takım ömrü modeli'ndeki "n" üstel değerinin deneysel olarak araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-91, 2012.
17. Uluğ, D., Dilipak, H., “Kaplmalı ve Kaplamasız Sementit Karbür Takımlar İçin Takım Ömrü Modeli'ndeki “n” Üstel Değerinin Deneysel Olarak Araştırılması”, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 04-05 Ekim, Ankara, 251-258, 2012.

BWM VE COCOSO YÖNTEMLERİYLE RİSKLERİN ÖNCELİKLENDİRİLMESİ

Simge MUTLUOĞLU¹

Tülay KORKUSUZ POLAT²

1. GİRİŞ

Riskler, beklenmedik olayların, istenmeyen sonuçların ortaya çıkmasına neden olur ve tüm süreçlerde karşımıza çıkan veya çıkabilecek unsunlardır. Bu sebepten başarılı bir organizasyon veya süreç yönetimi, risklerin doğru bir şekilde yönetilmesiyle mümkün olmaktadır. Bu nedenle, riskleri doğru bir şekilde tanımlamak, değerlendirmek ve önceliklendirmek, başarıya giden yolda kritik bir adımdır. Risklerin doğru bir şekilde yönetilmesi ise risklerin değerlendirme aşamasında riskleri doğru bir şekilde önceliklendirmeyle sağlanmaktadır.

Risk önceliklendirmesinin organizasyona sunduğu katkılara değinecek olursak; Bir organizasyonun kaynakları sınırlıdır ve risk önceliklendirmesi, bu kaynakların etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Önceliklendirme, risklerin olası etkilerini dikkate alarak, kaynakların en kritik risklere odaklanmasını sağlar. Bu sayede, sınırlı kaynaklar doğru yerlere yönlendirilir ve risklere karşı etkin önlemler alınır. Organizasyonların potansiyel riskleri belirlemelerine ve bunları önceden tespit etmelerine yardımcı olur. Bu sayede, risklerin

¹ Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, simge.mutluoglu@ogr.sakarya.edu.tr, ORCID: 0009-0003-1224-4846.

² Doç. Dr., Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, korkusuz@sakarya.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6693-7873.

ortaya çıkmasını önlemek veya etkilerini azaltmak için erken önlemler alınabilir.

Erken müdahale, risklerin büyümesini ve kontrol edilemez hale gelmesini engeller. Beklenmeyen olaylar veya riskler gerçekleştiğinde, kriz yönetimi becerisi hayati önem taşır. Risk önceliklendirmesi, organizasyonlara kriz durumlarında nasıl hareket edeceklerini belirleme ve planlama imkanı sağlar. Önceden tanımlanmış risk öncelikleri ve hazırlık önlemleri, kriz durumlarında etkin bir şekilde kullanılabilir ve hasarın en aza indirilmesine yardımcı olur. Organizasyonun veya projenin risklerle başa çıkması için gereken kaynakları belirlemesine yardımcı olur. Öncelikli risklere yönelik önlemler almak, bu risklerin etkisini azaltır ve daha az kaynak gerektirir. Böylece, kaynakların etkin ve verimli bir şekilde kullanılması sağlanırken, gereksiz maliyetlerden kaçınılır. Bu etkenler göz önüne alındığında risk önceliklendirmenin, bir organizasyon veya süreç yönetiminde oldukça büyük bir öneme sahip olan bir uygulama olduğu ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak, risk önceliklendirmesi, organizasyonların riskleri tanımlamasına, değerlendirmesine ve yönetmesine olanak tanır. Bu süreç, kaynak yönetimini optimize eder, risklerin önlenmesi veya azaltılması için erken önlemler alır, hedeflere odaklanır, kriz yönetimi için hazırlıklı olmayı sağlar ve kaynak sağlama sürecini iyileştirir. Risk önceliklendirmesi, bir organizasyonun sürdürülebilirlik, güvenlik ve başarı açısından kritik bir unsurdur.

Bu çalışmada, bir firmanın Endüstri Mühendisliği departmanı iş tanımlarından yola çıkarak doğru bir risk analizi yaparak risk azaltma kaynaklarını optimize bir şekilde kullanabilmek için; etkide bulunduğu departmanlarda ortaya çıkabilecek riskler değerlendirilmiştir. Çok kriterli karar verme tekniklerinden, BWM (Best-Worst Method) ve CoCoSo

(Combined Compromise Solution) yöntemleriyle riskler önceliklendirmiş ve bu önceliklendirme sırasına göre risk stratejileri oluşturulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çok fazla sayıda alternatifin çok fazla sayıda kriter kullanılarak değerlendirildiği problemlerin çözümü daha az sayıda alternatif ve kriterin olduğu problemlere göre nispeten daha zordur. Bu tarz problemlerin çözümünde çok sayıda kriterin değerlendirmesini yapabilen Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri kullanılmaktadır.

Literatürde çok kriterli karar verme teknikleri ile yapılmış farklı sektörlere ait çalışmalara rastlamak mümkündür. KorkusuzPolat ve Kara (2021) çalışmalarında Bulanık DEMATEL (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory) ve Bulanık VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje) yöntemlerini entegre şekilde kullanarak personel seçimi yapmışlardır. YılmazYalçın ve Çaylak (2020) yaptıkları çalışmalarında çok kriterli karar verme tekniklerinden AHP (Analytic Hierarchy Process) ve TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemlerini kullanarak dijital dönüşüm açısından sektörel sıralama yapmışlardır. Çelik ve Arslankaya (2023) çalışmalarında bir cam üretim işletmesi için Bulanık DEMATEL yöntemini kullanarak kalite kontrol kriterlerinin analizini yapmışlardır. Görçün ve Küçükönder (2022) BMW ve CoCoSo yöntemleri kullanılarak kentlerin raylı sistem performanslarının karşılaştırmalı analizini yapmışlardır. Modelin uygulanması sonucunda, elde edilen bulgular dikkate alındığında en yüksek performansa sahip kent A2 Saint Petersburg, ikinci en iyi kent ise A6 Kiev olarak belirlenmiştir. Ayrıca yöntemler için duyarlılık analizi yapmışlar ve elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, önerilen hibrit

modelin uygulanabilir ve güvenilir bir yaklaşım olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Arslankaya ve Çelik (2021) çalışmalarında Bulanık AHP ve Bulanık MOORA (Multiobjective Optimization On the basis of Ratio Analysis) yöntemlerini kullanarak çelik kapı endüstrisi için yeşil tedarikçi seçimi yapmışlardır. Demir ve Bircan (2020) kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden BWM ve FUCOM (Full Consistency Method) yöntemlerinin karşılaştırılmalı uygulamasını yapmışlardır. BWM ile yapılan uygulama sonucunda ideal özel okul seçimini etkileyen kriterler içinde başarı durumu 0,2947 ağırlığı ile en önemli kriter olurken okulun vizyonu/misyonu 0,0212 ağırlığı ile en önemsiz kriter olmuştur. FUCOM ile yapılan uygulama sonucunda ideal özel okul seçimini etkileyen kriterler içinde bütçe 0,317 ağırlığı ile en önemli kriter olurken okulun vizyonu/misyonu 0,056 ağırlığı ile en önemsiz kriter olmuştur. Rezai (2015) BWM ve AHP yöntemlerinin karşılaştırılmalı olarak cep telefonu seçimi probleminde kullanmıştır. İstatistiksel sonuçlardan hareketle, BWM' nin tutarlılık oranı ve diğer değerlendirme kriterleri olan minimum ihlal, toplam sapma ve uygunluk açısından AHP' den önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır. Zolfani ve ark. (2019) uygun satın alma kararlarının verilebilmesi için çelik endüstrisinde tedarikçi değerlendirmesi ve seçimini BWM ve CoCoSo yöntemlerinin hibrit modeliyle yapmışlardır. Sonuçlar, önerilen modelin karmaşık sürdürülebilirlik sorunlarını çözme potansiyelini göstermektedir. Munim ve ark. (2022) Arktik güzergahında konteyner taşımacılığı için çeşitli otonom gemi kategorilerinin rekabet edebilirliğini 4 gemi kategorisi ve 8 kriterli çok kriterli karar verme modeliyle araştırmıştır. Modelde BWM yöntemi belirlenen kriterler setini kullanarak gemi alternatiflerinin her birinin rekabet edebilirliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Çakır ve Can (2019) Alanya ilçesinde faaliyet gösteren bir konaklama işletmesinin dış kaynak seçiminde göz önünde bulundurduğu kriterlerin önem dereceleri BWM yöntemiyle belirlenerek, ARAS (Additive Ratio Assessment)

yöntemiyle konaklama işletmesi için en uygun dış kaynağın belirlenmesi amaçlanmaktadır. Yazdani ve ark. (2019) Fransa'da lojistik ve nakliye şirketlerinin seçilmesinde CoCoSo yöntemini kullanmıştır. Uygulamanın sonunda yapılan duyarlılık analiziyle önerilen modelin uygulanabilir ve güvenilir olduğu sonucuna ulaşmıştır. Bilgiç ve ark. (2021) yenilenebilir enerji kaynak yatırım planlamasında BWM yöntemiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Uygulamada kullanılan yöntemin bu tür problemleri çözmek için güvenilir ve hızlı sonuç verdiği doğrulanarak yatırım için güneş enerjisinin en iyi yenilenebilir enerji alternatifi olduğu tespit edilmiştir. Deveci ve ark. (2021) trafik yönetim sistemlerinin iyileştirilmesi için yaptığı çalışmada 13 alt kriter kullanarak yönetim sistemlerini CoCoSo yöntemiyle önceliklendirmiştir. Yöntemin esnekliğini doğrulamak için sonuçlar doğrulanmıştır. Özdağoğlu ve ark. (2020) 166 alternatif üniversitenin seçilen 5 kritere göre performanslarının karşılaştırmasını CoCoSo ve MARCOS (Measurement Alternatives and Ranking according to COMpromise Solution) yöntemleri ile yapmıştır (Daha fazla uygulama için Topal (2021), Ulutas ve Karaköy, (2019), YılmazYalçiner (2021) incelenebilir)

Risk değerlendirme çalışmaları da son yıllarda sadece iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili değil, aynı zamanda da üretim fonksiyonlarında risk değerlendirme olarak da oldukça yaygın olarak yapılmaya başlanmıştır. KorkusuzPolat (2019) çalışmasında bir tekstil işletmesi için üretim risklerini değerlendirmiş ve Bulanık Mantık yaklaşımından destek almıştır. Çok kriterli karar verme tekniklerinin risk değerlendirme çalışmalarında kullanıldığı uygulamalara da sıklıkla rastlanmaktadır. Tomak ve KorkusuzPolat (2022) çalışmalarında başarı faktörleri temelli risk önceliklendirme yapmışlar ve risk önceliklendirme modelini çok kriterli karar verme teknikleri ile geliştirmişlerdir. Singer ve ÖverÖzçelik (2022) çalışmalarında

metalik biyomalzemelerde risk değerlendirme için risk değerlendirme tekniklerinden HTEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) yöntemini bulanık olarak uygulamış ve Bulanık AHP ve bulanık EDAS (Evaluation Based On Distance From Average Solution) yöntemleri ile entegre etmiştir. Singer ve ÖverÖzçelik (2023) çalışmalarında ortopedik implant üretimindeki riskleri bulanık karar ortamında değerlendirmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada, 10x10'luk risk değerlendirme uygulaması yapılmıştır. Bir lastik firmasında Endüstri Mühendisliği departmanının görev ve sorumluluklarından hareketle ortaya çıkabilecek riskler ve bu risklerden etkilenecek departmanlar iş tanımlarından yola çıkarak belirlenmiştir. Ardından risklerin olasılığını ve etkisini gösteren 1-10 arası ölçeklendirilmiş olasılık ve etki şablonu oluşturulmuştur. Bu şablonlara göre katlanılabilir riskler 1 ile 30 arasında, orta düzey riskler 36 ile 64 arasında, önemli riskler 70 ile 90 arasında ve katlanılamaz riskler ise 100 risk puanı olarak belirlenmiştir.

Endüstri Mühendisliği departmanı görev ve sorumlulukları dikkate alındığında belirlenen riskler aşağıdaki gibidir;

Risk 1: Kapasitenin eksik hesaplanmasından kaynaklı siparişlerin gecikmesi.

Risk 2: Kapasitenin fazla hesaplanmasından kaynaklı ürünlerin gereğinden fazla üretilmesi.

Risk 3: İşgücü planlamasının eksik hesaplanmasından kaynaklı üretimin aksamaması için fazla mesai maliyetlerinin artması.

Risk 4: İşgücü planlamasının yanlış yapılması nedeni ile gereğinden fazla işgücünden kaynaklı işgücü maliyetlerinin artması.

Risk 5: Standart zamanın yanlış hesaplanmasından kaynaklı üretim planlamasının yanlış yapılması, bu sebepten üretimin aksaması.

Risk 6: Yeni kod standartlarının zamanında oluşturulmaması kaynaklı üretim standartlarının bilinmemesi, yanlış zamanda ve hatalı ürün üretilmesi.

Risk 7: Rotalamanın yanlış yapılması kaynaklı üretimin aksaması.

Risk 8: Lay-out düzenlemelerinin/güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı makine yatırımlarının yapılamaması/yanlış yapılması dolayısı ile stratejik hedeflerin belirlenememesi.

Risk 9: Lay-out düzenlemelerinin/güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı hattın düzensizliğinden kaynaklı üretimde verimsizliğin ve yavaşlamanın ortaya çıkması.

Risk 10: Üretim hedeflerinin yanlış belirlenmesi sonucunda performans değerlendirmelerinin yanlış yapılmasından kaynaklı çalışma ortamının bozulması.

Risk 11: Zaman etütlerinin yanlış yapılması sonucu standart zaman güncellemelerinin yapılamaması ve bu sebepten kapasitenin yanlış hesaplanması ile üretimin yavaşlaması.

Risk 12: Mevcut kapasite analizlerinden hareketle yatırım ihtiyaçlarının belirlenmemesi/yanlış belirlenmesiyle darboğaz proseslerin ortaya çıkması sonucu üretimin yavaşlaması.

Risk 13: Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı verimsizliğin ortaya çıkması.

Risk 14: Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı üretimin aksaması.

Şekil 1’de risk değerlendirmede kullanılacak matris yöntemi için oluşma olasılıkları, Şekil 2’de ise risklerin oluşuktan sonraki etkileri 1-10 arası ölçeklendirilmiş şablonla gösterilmiştir.

Şekil 1. Risklerin Olasılık Şablonu

Riskin ortaya çıkma olasılığı :		
Ortaya çıkma sıklığı		Ortaya çıkma olasılığı
Nicel değeri		
10	Sıklığı 151 kereden fazla	Her an etki gösterebilecek dereceli olasılık (Ortalama haftanın her günü gerçekleşen)
9	Sıklığı 100-150 kere arasında	Çok yüksek dereceli olasılık (Ortalama haftada 3 kez gerçekleşen)
8	Sıklığı 50-99 kere arasında	Yüksek dereceli olasılık (Ortalama haftada 2 kez gerçekleşen)
7	Sıklığı 40-49 kere arasında	Yüksek-Orta dereceli olasılık (Ortalama haftada 1 kez gerçekleşen)
6	Sıklığı 30-39 kere arasında	Orta dereceli olasılık (Ortalama ayda 3 kez gerçekleşen)
5	Sıklığı 20-29 kere arasında	Orta-Küçük dereceli olasılık (Ortalama 2 haftada 1 gerçekleşen)
4	Sıklığı 10-19 kere arasında	Küçük dereceli olasılık (Ortalama ayda 1 gerçekleşen)
3	Sıklığı 5-9 kere arasında	Çok küçük dereceli olasılık (Ortalama 2 ayda 1 gerçekleşen)
2	Sıklığı 1-4 kere arasında	Nadir-Çok küçük dereceli olasılık (Ortalama çeyrekte 1 gerçekleşen)
1	Sıklığı bir kere	Nadiren etki gösterebilecek dereceli olasılık (Ortalama senede 1 gerçekleşen)

Şekil 2. Risklerin Etki Şablonu

Riskin Etkisi :		
Nicel değeri		Derecelendirme
10	Olağanüstü	Üretimin durmasına sebebiyet veren
9	Çok ciddi	Üretimin aksamasına sebebiyet veren
8	Ciddi	Üretimin yavaşlamasına sebebiyet veren
7	Orta-Ciddi	Üretimi yavaşlatma ihtimali olan
6	Orta	Üretime doğrudan etkisi olan
5	Orta-Hafif	Üretime etkisi az olan
4	Hafif	Üretime etkisi yok denecek kadar az olan
3	Çok hafif	Üretime etkisi doğrudan olmayan
2	Etkisi neredeyse yok	Üretime yardımcı kollara etkisi olan
1	Etkisiz	Üretime etkisi olmayan

Risklerin Değerlendirilmesi

Oluşturulan olasılık ve etki şablonları kullanılarak Endüstri Mühendisliği departmanının iş tanımlarından elde edilen risklerin olasılık ve etki değerleri belirlenmiş; ardından matris risk değerlendirme yöntemine göre olasılık ve etki değerleri birbiriyle çarpılarak her bir risk için risk puanları bulunmuştur. Risklerden etkilenen departman ve riske ait mevcutta bir önlemin olup olmadığı da risk değerlendirmesi uygulamasına dahil edilmiştir. Şekil 3’de risklerin hesaplanan risk puanları gösterilmiştir.

Şekil 3. Risk Değerlendirmesi

No	Risk	O	Ş	R
1	Kapasitenin eksik hesaplanmasından kaynaklı siparişlerin gecikmesi	8	10	80
2	Kapasitenin fazla hesaplanmasından kaynaklı ürünlerin gereğinden fazla üretilmesi	8	3	24
3	İşgücü planlamasının eksik hesaplanmasından kaynaklı üretimin aksamaması için fazla mesai maliyetlerinin artması	8	6	48
4	İşgücü planlamasının yanlış yapılması nedeni ile gereğinden fazla işgücünden kaynaklı işgücü maliyetlerinin artması	8	2	16
5	Standart zamanın yanlış hesaplanmasından kaynaklı üretim planlamasının yanlış yapılması, bu sebepten üretimin aksamaması	7	7	49
6	Yeni kod standartlarının zamanında oluşturulmaması kaynaklı üretim standartlarının bilinmemesi, yanlış zamanda ve hatalı ürün üretilmesi	9	10	90
7	Rotalamanın yanlış yapılması kaynaklı üretimin aksamaması	9	9	81
8	Lay-out düzenlemelerinin/güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı makine yatırımlarının yapılamaması/yanlış yapılması dolayısı ile stratejik hedeflerin belirlenememesi	4	4	16
9	Lay-out düzenlemelerinin/güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı hattın düzensizliğinden kaynaklı üretimde verimsizliğin ve yavaşlamanın ortaya çıkması	4	8	32
10	Üretim hedeflerinin yanlış belirlenmesi sonucunda performans değerlendirmelerinin yanlış yapılmasından kaynaklı çalışma ortamının bozulması	1	5	5
11	Zaman etütlerinin yanlış yapılması sonucu standart zaman güncellemelerinin yapılamaması ve bu sebepten kapasitenin yanlış hesaplanması ile üretimin yavaşlaması	10	8	80
12	Mevcut kapasite analizlerinden hareketle yatırım ihtiyaçlarının belirlenmemesi/yanlış belirlenmesiyle darboğaz proseslerin ortaya çıkması sonucu üretimin yavaşlaması	2	7	14
13	Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı verimsizliğin ortaya çıkması	5	8	40
14	Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı üretimin aksamaması	5	9	45

BWM ve CoCoSo Yöntemleri

Risklerin değerlendirilmesinin ardından hangi risklere risk azaltma kaynaklarının daha çok ayrılacağı konusu oldukça kritiktir. Her risk puanı yüksek öncelikli risk olarak değerlendirilemez. Riskler değerlendirilirken puanı veya olasılığına göre değil, etkilerine göre önceliklendirilmelidir. Literatürde risklerin önceliklendirmesi konusunda birçok yöntem mevcuttur. Bu uygulamada risklerin önceliklendirilmesi çok kriterli karar verme tekniklerinden BWM ve CoCoSo yöntemleri entegre olarak kullanılarak yapılacaktır. Bu yöntemlerin uygulama adımları BWM yöntemiyle başlayarak aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Gupta ve Barua, 2017; Gupta, 2018; Rezai ve ark., 2018; Pamucar ve ark., 2020; Çakır ve Can, 2019).

Adım 1: Kriterlerin Belirlenmesi: Risklerin etki alanlarına göre riskleri önceliklendirmek üzere değerlendirilecek kriter seti belirlenir.

Adım 2: En İyi ve En Kötü Kriterlerin Belirlenmesi: Belirlenen kriterler arasından en yüksek ve en düşük riskli kriterler en iyi ve en kötü olarak belirlenir.

Adım 3: En İyi ve En Kötü Kriterlerin Diğer Kriterler ile Karşılaştırılması: Seçilen en iyi ve en kötü kriterler diğer kriterle ikili olarak kıyaslanır. Bu kıyaslama 1-9 arasındaki değerlendirme ölçeği kullanılarak yapılır (**1:** Eşit önem değerine sahip, **2:** Eşit ve orta derece arasında önem değerine sahip, **3:** Orta dereceden daha yüksek önem değerine sahip, **4:** Orta ve önemli derece arasında önem değerine sahip, **5:** Kesinlikle daha yüksek önem değerine sahip, **6:** Yüksek ve çok yüksek önem değerine sahip, **7:** Çok yüksekten daha yüksek önem değerine sahip, **8:** Çok yüksek ve kesinlikle çok yüksek derece arasında önem değerine sahip, **9:** Kesinlikle çok yüksek önem değerine sahip)

Adım 4: En İyi Değer ve En Kötü Değer Vektörlerinin Oluşturulması: En iyi ve en kötü kriterlerin diğer kriterlerle kıyaslanması sonucunda 1 ve 9 arasında değerlerden oluşan; en

iyi kriter için satır vektörü, en kötü kriter için ise sütun vektörü elde edilir. Aşağıda 1 ve 2 numaraları denklemlerde satır ve sütun vektörleri ifade edilmiştir.

$$\Omega_B = (\omega_{B1}, \omega_{B2}, \dots, \omega_{Bn}) \quad (1)$$

$$\Omega_W = (\omega_{1W}, \omega_{2W}, \dots, \omega_{nW}) \quad (2)$$

Adım 5: Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması: Elde edilen en iyi (satır) ve en kötü (sütun) vektörleriyle denklem (3) 'deki formül kullanılarak her bir kriter için kriter ağırlıkları hesaplanmaktadır.

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{\omega_B}{\omega_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{\omega_j}{\omega_w} - a_{jW} \right| \right\} \text{S.İ.}$$
$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1; \omega_j \geq 0 \forall j \quad (3)$$

Denklem (3)'de verilen modelin Denklem (4)'de gösterilen forma dönüştürülerek çözümlenmesi sonucunda değerlendirme kriterleri için optimal ağırlıklar ve ξ değeri elde edilmektedir.

$$\min \xi \quad \text{s.t.} \quad \left| \frac{\omega_B}{\omega_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j; \left| \frac{\omega_j}{\omega_w} - a_{jW} \right| \leq \xi, \forall j;$$
$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1; \omega_j \geq 0 \forall j \quad (4)$$

ξ Değerinin Tutarlılık indeksine oranlamasıyla (CR= ξ /Tutarlılık indeksi) tutarlılık oranı (CR) hesaplanmaktadır. Eğer $CR \leq 0,10$ ise sonuçlar tutarlı olarak kabul edilmektedir (Demir ve Bircan, 2020).

Kriterlerin ve ağırlıklarının belirlenmesinin ardından risklerin önceliklerinin belirlenmesi ve bu önceliklere göre sıralanması için CoCoSo yönteminden yararlanılmıştır. CoCoSo yönteminin aşamaları aşağıda verilmektedir (Khan ve Haleem (2020), Ulutaş ve ark. (2020), Peng ve Huang (2020), (Görçün ve Küçükönder (2022)):

Aşama 1: Karar Matrisinin Oluşturulması: Her bir risk, seçilen kriterler bazında değerlendirilerek 1-9 arası skala

değerlerinden oluşan karar matrisi Denklem (5)'de gösterildiği şekilde oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{2n} \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Aşama 2: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi:

Uzlaşık normalizasyon yaklaşımı uygulanarak kriterlerin yönlerine göre karar matrisinin elemanları normalize edilir. Bunun için Denklem (6) kullanılmaktadır.

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} & \text{if } j \in B \\ \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} & \text{if } j \in C \end{cases} \quad (6)$$

Aşama 3: ξ_i ve Θ_i değerlerinin hesaplanması: Denklem (7) kullanılarak, toplam ağırlıklı karşılaştırılabilirlik (Θ_i) ve Denklem (8) kullanılarak toplam güç ağırlıklı karşılaştırılabilirlik (ξ_i) değerleri hesaplanır.

$$\Theta_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij} w_j) \quad (7)$$

$$\xi_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (8)$$

Aşama 4: Alternatiflerin göreceli önem değerlerinin hesaplanması: Risklerin göreceli önemlerinin hesaplanması için sırasıyla Denklem (9), (10), (11) kullanılarak, ağırlıklı toplam metodunun toplamının aritmetik ortalaması, en iyi karar alternatifine kıyasla ağırlıklı çarpım ve ağırlıklı toplam skorlarının toplamı, nihai olarak da ağırlıklı çarpım metodu ile ağırlıklı toplam metodunun dengelenmiş skor değeri hesaplanır.

$$M_{ia} = \frac{\Theta_i + \xi_i}{\sum_{i=1}^m (\Theta_i + \xi_i)} \quad (9)$$

$$M_{ib} = \frac{\Theta_i}{\min \Theta_i} + \frac{\xi_i}{\min \xi_i} \quad (10)$$

$$M_{ic} = \frac{\lambda(\Theta_i) + (1-\lambda)(\xi_i)}{\lambda \max \Theta_i + (1-\lambda)(\max \xi_i)} ; 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (11)$$

Denklem (11)' de yer alan λ parametresi 0 ila 1 arasında değer almaktadır. Uygulamada genel olarak her duruma eşit şans verebilmek için 0,5 olarak alınmaktadır

Aşama 5: Alternatiflerin performanslarının belirlenmesi: Risklerin elde edilen görelî önem değerleri ile her bir risk için görelî önem skoru Denklem (12) yardımıyla belirlenir.

$$M_i = (M_{ia} \times M_{ib} \times M_{ic})^{\frac{1}{3}} + (M_{ia} + M_{ib} + M_{ic}) \frac{1}{3} \quad (12)$$

Aşama 6: Alternatiflerin Sıralandırılması: Denklem (12) ile elde edilen görelî önem skorları ile riskler, en yüksek önem değerine sahip riskten başlamak üzere sıralanır. Bu sayede risklerin önem sırası, risk azaltma kaynaklarının kullanım önceliği ve ağırlığını da belirlemiş olur.

4. UYGULAMA

Bu bölümde, BWM ve CoCoSo yöntemleri hibrit bir şekilde uygulanarak Endüstri Mühendisliği departmanı iş tanımlarına ait risk yönetimi çalışmasında risklerin önceliklendirmesinde kullanılması anlatılacaktır. İlk aşamada BWM yöntemiyle önceliklendirme hesaplamaları için girdi olarak kullanılmak üzere risklere ait kriterlerin belirlenmesi ve ağırlıkların oluşturulması adımları aşağıdaki şekilde izlenmiştir:

Adım 1. Kriterlerin Belirlenmesi: Bu adımda Endüstri Mühendisliği departmanı iş tanımlarına ait risklerin en çok etkide bulunacağı departmanlar riskleri önceliklendirmede kullanılacak kriterler olarak belirlenmiştir. Belirlenen 4 kriter arasından en yüksek riskli kriter Üretim, en düşük riskli kriter Mühendislik olarak Tablo 1'de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo -1 Kriterlerin Belirlenmesi

Kriter Numarası:	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4
Kriterler	Üretim	Kalite	Maliyet	Mühendislik

Adım 2. En İyi ve En Kötü Kriterlerin Diğer Kriterler ile Karşılaştırılması: En iyi ve en kötü kriterler diğer kriterlerle karşılaştırılarak her bir kriter 1-9 arasında en iyi ve en kötü kritere göre derecelendirilerek üretim kriteri için satır vektörü, mühendislik kriteri için ise sütun vektörü Tablo 2 ve 3 şeklinde oluşturulmuştur.

Tablo -2 En İyi Kriter Satır Vektörü

En İyi Kritere Göre Diğer Kriterler	Üretim	Kalite	Maliyet	Mühendislik
Üretim	1	1	4	9

Tablo -3 En Kötü Kriter Sütun Vektörü

En Kötü Kritere Göre Diğer Kriterler	Mühendislik
Üretim	9
Kalite	8
Maliyet	1
Mühendislik	1

Adım 3. Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi: Bu adımda oluşturulan satır ve sütun vektörlerinden hareketle MS Excel→Veri→Çözücü eklentisi kullanılarak belirlenen 4 kritere ilişkin ağırlıklar Tablo 4'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo -4 Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Kriterler	Üretim	Kalite	Maliyet	Mühendislik
Ağırlıklar	0,3714	0,5143	0,0571	0,0571

Tablo 4 kriter ağırlık verileri incelendiğinde kriterler arasında kalite kriterinin ($w=0,5143$) diğer kriterlere göre daha önemli kriter olduğu, ikinci sırada ağırlık değeri 0,3714 değeri ile üretim kriterinin diğer kriterlere göre daha önemli olduğu görülmektedir. Ağırlık değerleriyle hesaplanan tutarlılık oranı ise 0,0694 olarak bulunmuştur. 1-9 arası derecelendirme skalasından elde edilen ilişkili eşik değeri ise 0,2681 olarak bulunmuştur. Tutarlılık oranı ilişkili eşik değerinden düşük olması ($CR=0,0694 < 0,2681$) ağırlıkların tutarlı olduğunu göstermektedir.

Uygulamanın ikinci aşamasında: BWM tekniği kullanılarak elde edilen kriter ağırlıkları, risklerin sıralamasında kullanılan CoCoSo tekniğinde kullanılmıştır.

Adım 4. Risklerin Önem Sıralamalarının Belirlenmesi: Bu adımda her bir risk değeri 1-9 skalasından yararlanılarak 4 kriter bazında Tablo 5’de görüldüğü üzere derecelendirilmiştir. Ardından bu değerler Denklem (6) denklemine göre üretim ve kalite kriterleri fayda şartlı formülüyle, maliyet ve mühendislik kriterleri maliyet şartlı formülüyle normalize edilerek risklerin önem derecelerine göre performans değerlerinin belirlenmesinde kullanılacak girdiler Tablo 6’da elde edilmiştir. Ardından bu girdiler kullanılarak CoCoSo tekniği ile risklerin nihai önem skorları ve sıralamaları Tablo 7’de elde edilmiştir (Tablo 5-6-7’de Ü: Üretim, Ka: Kalite, Ma: Maliyet, Mü: Mühendislik olarak kısaltılmıştır).

Tablo -5 Karar Matrisi

	Ü	Ka	Ma	Mü
Kapasitenin eksik hesaplanmasından kaynaklı siparişlerin gecikmesi	8	9	4	1
Kapasitenin fazla hesaplanmasından kaynaklı ürünlerin gereğinden fazla üretilmesi	3	1	9	1
İşgücü planlamasının eksik hesaplanmasından kaynaklı üretimin aksamaması için fazla mesai maliyetlerinin artması	4	1	9	1
İşgücü planlamasının yanlış yapılması nedeni ile gereğinden fazla işgücünden kaynaklı işgücü maliyetlerinin artması	3	1	9	1
Standart zamanın yanlış hesaplanmasından kaynaklı üretim planlamasının yanlış yapılması, bu sebepten üretimin aksamaması	9	1	4	1
Yeni kod standartlarının zamanında oluşturulmaması kaynaklı üretim standartlarının bilinmemesi, yanlış zamanda ve hatalı ürün üretilmesi	8	9	7	1
Rotalamanın yanlış yapılması kaynaklı üretimin aksamaması	9	1	4	1
Lay-out düzenlemelerinin/güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı makine yatırımlarının yapılamaması/yanlış yapılması dolayısı ile stratejik hedeflerin belirlenememesi	2	1	8	9
Lay-out düzenlemelerinin/güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı hattın düzensizliğinden kaynaklı üretimde verimsizliğin ve yavaşlamanın ortaya çıkması	8	1	2	3
Üretim hedeflerinin yanlış belirlenmesi sonucunda performans değerlendirmelerinin yanlış yapılmasından kaynaklı çalışma ortamının bozulması	6	1	7	9
Zaman etütlerinin yanlış yapılması sonucu standart zaman güncellemelerinin yapılamaması ve bu sebepten kapasitenin yanlış hesaplanması ile üretimin yavaşlaması	8	1	2	1

Teori ve Uygulamada Mühendislik Alanında Yaşanan Gelişmeler

Mevcut kapasite analizlerinden hareketle yatırım ihtiyaçlarının belirlenmemesi/yanlış belirlenmesiyle darboğaz proseslerin ortaya çıkması sonucu üretimin yavaşlaması	8	1	2	8
Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı verimsizliğin ortaya çıkması	8	1	2	1
Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı üretimin aksaması	9	1	4	1

Tablo – 6 Normalize Değerlerle Karar Matrisi

	Ür	Ka	Ma	Mü
Ağırlıklar	0,371	0,514	0,057	0,057
Kapasitenin eksik hesaplanmasından kaynaklı siparişlerin gecikmesi	0,857	1	0,714	1
Kapasitenin fazla hesaplanmasından kaynaklı ürünlerin gereğinden fazla üretilmesi	0,143	0	0	1
İşgücü planlamasının eksik hesaplanmasından kaynaklı üretimin aksaması için fazla mesai maliyetlerinin artması	0,286	0	0	1
İşgücü planlamasının yanlış yapılması nedeni ile gereğinden fazla işgücünden kaynaklı işgücü maliyetlerinin artması	0,143	0	0	1
Standart zamanın yanlış hesaplanmasından kaynaklı üretim planlamasının yanlış yapılması, bu sebepten üretimin aksaması	1	0	0,714	1
Yeni kod standartlarının zamanında oluşturulmaması kaynaklı üretim standartlarının bilinmemesi, yanlış zamanda ve hatalı ürün üretilmesi	0,857	1	0,286	1
Rotalamanın yanlış yapılması kaynaklı üretimin aksaması	1	0	0,714	1
Lay-out düzenlemelerinin/güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı makine yatırımlarının yapılamaması/yanlış yapılması dolayısı ile stratejik hedeflerin belirlenememesi	0	0	0,143	0
Lay-out düzenlemelerinin/güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı hattın düzensizliğinden kaynaklı üretimde verimsizliğin ve yavaşlamanın ortaya çıkması	0,857	0	1	0,750
Üretim hedeflerinin yanlış belirlenmesi sonucunda performans değerlendirmelerinin yanlış yapılmasından kaynaklı çalışma ortamının bozulması	0,571	0	0,286	0
Zaman etütlerinin yanlış yapılması sonucu standart zaman güncellemelerinin yapılamaması ve bu sebepten kapasitenin yanlış hesaplanması ile üretimin yavaşlaması	0,857	0	1	1
Mevcut kapasite analizlerinden hareketle yatırım ihtiyaçlarının belirlenmemesi/yanlış belirlenmesiyle darboğaz proseslerin ortaya çıkması sonucu üretimin yavaşlaması	0,857	0	1	0,125
Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı verimsizliğin ortaya çıkması	0,857	0	1	1
Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı üretimin aksaması	1	0	0,714	1

Tablo -7 Risklerin Nihai Önem Skorları ve Sıralaması

	Θ_i	ζ_i	M_a	M_b	M_c	M_i	Sıra
Kapasitenin eksik hesaplanmasından kaynaklı siparişlerin gecikmesi	0,920	3,925	0,11	117,08 7	1,950	42,714	2
Kapasitenin fazla hesaplanmasından kaynaklı ürünlerin gereğinden fazla üretilmesi	0,110	1,485	0,039	15,160	1,448	6,496	9
İşgücü planlamasının eksik hesaplanmasından kaynaklı üretimin aksaması için fazla mesai maliyetlerinin artması	0,163	1,628	0,044	21,81 9	1,477	8,899	8
İşgücü planlamasının yanlış yapılması nedeni ile gereğinden fazla işgücünden kaynaklı işgücü maliyetlerinin artması	0,110	1,485	0,039	15,16 0	1,448	6,496	9
Standart zamanın yanlış hesaplanmasından kaynaklı üretim planlamasının yanlış yapılması, bu sebepten üretimin aksaması	0,469	2,981	0,084	60,83 2	1,756	22,96 7	3
Yeni kod standartlarının zamanında oluşturulmaması kaynaklı üretim standartlarının bilinmemesi, yanlış zamanda ve hatalı ürün üretilmesi	0,930	3,875	0,117	118,256	1,940	43,096	1
Rotalamanın yanlış yapılması kaynaklı üretimin aksaması	0,469	2,981	0,084	60,832	1,756	22,967	3
Lay-out düzenlemelerinin/ güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı makine yatırımlarının yapılamaması/yanlış yapılması dolayısı ile stratejik hedeflerin belirlenememesi	0,008	0,895	0,022	2,000	1,326	1,504	10
Lay-out düzenlemelerinin/ güncellemelerinin yapılmaması kaynaklı hattın düzensizliğinden kaynaklı üretimde verimsizliğin ve yavaşlamanın ortaya çıkması	0,418	2,928	0,081	54,522	1,745	20,760	5
Üretim hedeflerinin yanlış belirlenmesi sonucunda performans değerlendirmelerinin yanlış yapılmasından kaynaklı çalışma ortamının bozulması	0,229	1,743	0,048	29,948	1,501	11,970	7
Zaman etütlerinin yanlış yapılması sonucu standart zaman güncellemelerinin yapılamaması ve bu sebepten kapasitenin yanlış hesaplanması ile üretimin yavaşlaması	0,433	2,944	0,082	56,291	1,748	21,380	4
Mevcut kapasite analizlerinden hareketle yatırım ihtiyaçlarının belirlenmemesi/yanlış belirlenmesiyle darboğaz proseslerin ortaya çıkması sonucu üretimin yavaşlaması	0,383	2,832	0,078	50,040	1,725	19,170	6
Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı verimsizliğin ortaya çıkması	0,433	2,944	0,082	56,291	1,748	21,380	4
Hat dengeleme çalışmalarının yapılmaması kaynaklı üretimin aksaması	0,469	2,981	0,084	60,832	1,756	22,967	3

5. SONUÇ

Risk değerlendirme firmalar için iş süreçlerinin her aşamasında kullanılması gereken kritik bir uygulamadır. Fakat risk değerlendirmesinin yanlış yapılması firmaların yanlış stratejiler ve kararlar vermesine neden olacaktır. Bu sebepten sübjektif değerlendirmelerden uzak, analize ve sayısal verilere dayalı bir değerlendirme yaparak; oluşabilecek her riske aynı kaynağı ayırmaktansa etki açısından öncelikli risklere risk azaltma kaynağı ayrılmalıdır. Bunun için risk analizi ekibi karşılaştırmalı olarak öncelik analizi yapabilmesi için etkili ve uygulanabilir, buna ek olarak sonuçları açısından güvenilir bir karar modeline ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada bu ihtiyaçlara cevap bulunabilmesi adına BWM ve CoCoSo yöntemlerinin entegresinden oluşan bir model ile uygulama yapılmıştır.

Model uygulaması sonucunda, elde edilen bulgular dikkate alındığında Endüstri Mühendisliği Departmanı iş tanımlarının ilgili bölümlere etkisine göre en yüksek önceliğine sahip risk “Yeni kod standartlarının zamanında oluşturulmamasından üretim standartlarının bilinmemesi, yanlış zamanda ve hatalı ürün üretilmesinden kaynaklanan müşteri şikayetleri” olarak belirlenmiştir. Bu model ilgili riskten başlanarak risk azaltma kaynakları dağılımının önceliklendirme sırasına göre yapılması gerektiğini önermiştir. Bu çalışma sonucunda risk yönetiminde risklere önlem planları oluşturulmadan önce risk önceliklendirmesinin BWM ve CoCoSo yöntemleriyle yapılarak başarılı bir risk yönetim stratejisinin oluşturulması önerilmiştir. Bu makale ile bu yöntemlerin risk yönetiminde ve karar verme problemlerinde daha geniş bir kullanım alanına ulaşılacağı umulmaktadır. Gelecek çalışmalarda, kriter sayısı artırılarak ve modele alt kriterler eklenerek çalışmalar zenginleştirilebilir. Bu sayede yöntemlerin öncelik değerleri birbirinden daha net ayrılacak ve yöntemin önceliklendirme başarısı artacaktır.

KAYNAKÇA

1. KorkusuzPolat, T. ve Kara, N. (2021). Personel seçiminde Bulanık DEMATEL ve Bulanık VIKOR yöntemlerinin uygulanması, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı 23, 376-385.
2. YılmazYalçın, A. ve Çaylak, İ. (2020). Türkiye’de Dijital dönüşüme başlangıç için AHP ve TOPSIS yöntemleri ile Sektörel sıralama, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8-2, 258-265.
3. Çelik, M.T. ve Arslankaya, S. (2023). Analysis of quality control criteria in an business with the fuzzy DEMATEL method: Glass business example, *Journal of Engineering Research*, 11, 100039.
4. Görçün, F. Ö. ve Küçükönder, H. (2022). BWM ve CoCoSo Yöntemleri Kullanılarak Kentlerin Raylı Sistem Performanslarının Karşılaştırmalı Analizi, *Kent Araştırmaları Dergisi*, Sayı:36, Cilt:13, 824-856.
5. Arslankaya, S. ve Çelik, M.T. (2021). Green supplier selection in the steel door industry using fuzzy AHP and fuzzy MOORA methods, *Emerging Materials Research*, Vol 10(4), page 357-369.
6. Demir, G. ve Bircan, H. (2020). Kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden BWM ve FUCOM yöntemlerinin karşılaştırılması ve bir uygulama, *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 21(2), 170-185.
7. Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega* (United Kingdom), 53, page 49-57.
8. Zolfani, H. S., Chatterjee, P. and Yazdani, M. (2019). A Structured Framework for Sustainable Supplier Selection Using A Combined Bwm-Cocoso Model.

Contemporary Issues in Business, Management and Economics Engineering.

9. Munim, H. Z., Saha, R., Schøyen, H., Ng, Y.K., and Notteboom, E.T. (2022). Autonomous Ships for Container Shipping In The Arctic Routes, *Journal of Marine Science and Technology*, vol 27, pages 320–334.
10. Çakır, E. ve Can, M. (2019). Best-Worst yöntemine dayalı ARAS yöntemi ile dış kaynak kullanım tercihinin belirlenmesi: turizm sektöründe bir uygulama. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 1273–1300.
11. Yazdani, M., Zarate, P. Zavadskas, K. E. and Turskis, Z. (2019). A Combined Compromise Solution (CoCoSo) Method for Multi-Criteria Decision-Making Problems. *Management Decision*, 57 (9). 2501-2519.
12. Bilgiç, S., Torğul, B. ve Paksoy, T. (2021). Sürdürülebilir Enerji Yönetimi için BWM Yöntemi ile Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi. *Verimlilik Dergisi*, Sayı: 2, 95-110.
13. Deveci, M., Pamucar, D. and Gokasar, I. (2021). Fuzzy Power Heronian function based CoCoSo method for the advantage prioritization of autonomous vehicles in real-time traffic management. *Sustainable Cities and Society*, Volume 69.
14. Özdağoğlu, A., Ulutaş, A. ve Keleş, K. M. (2020). The Ranking of Turkish Universities with Cocoso and Marcos. *Journal of Economics, Business & Organization Research, Proceedings of the Third EBOR Conference 2020*, pp. 374-392.

15. Topal, A., (2021). Çok kriterli karar verme analizi ile elektrik üretim şirketlerinin finansal performans analizi: Entropi tabanlı CoCoSo yöntemi, *BMIJ*, 9(2), 532-546.
16. Ulutaş, A. ve Karaköy, Ç., (2019). G-20 Ülkelerinin lojistik performans endeksinin çok kriterli karar verme modeli ile ölçümü, *S.C.Ü İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, cilt 20, sayı 2.
17. YılmazYalçın, A., (2021). Determination of the cost-effective lot-sizing technique for perishable goods: A case study, *International Journal of Management and Administration*, vol 5(9), page 33-46.
18. KorkusuzPolat, T. (2019). Risk priority with Fuzzy Logic: Application of a Textile Factory, *Sakarya University Journal of Science*, Vol 23(2), page 203-212.
19. Tomak, N. and KorkusuzPolat, T. (2022). Risk prioritization model driven by success factor in the light of multicriteria decision making, *Open Chemistry*, vol 20(1), page 759-776, <https://doi.org/10.1515/chem-2022-0188>
20. Singer, H. ve ÖverÖzçelik, T. (2022). Bir risk temelli karar verme yaklaşımı ile metalik biyomalzeme değerlendirme, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 37, Sayı 2, 641-654.
21. Singer, H. and ÖverÖzçelik, T. (2023). A risk-based decision making framework to analyze the properties of cobalt-chromium alloys, *Emerging Materials Research*, vol 12(4), page 1-14.
22. Gupta, H. and Barua, M.K. (2017). Supplier selection among SMEs on the basis of their green innovation ability using BWM and fuzzy TOPSIS, *Journal of Cleaner Production*, 152, page 242-258.

23. Gupta, H. (2018). Assessing organizations performance on the basis of GHRM practices using BWM and Fuzzy TOPSIS, *Journal of Environmental Management*, 226, page 201-216.
24. Rezai, J., Kothadiya, O., Tavasszy, L. and Kroesen, M. (2018). Quality assessment of airline baggage handling systems using SERVQUAL and BWM, *Tourism Management*, 66, page 85-93.
25. Pamucar, D., Ecer, F., Cirovic, G. and Arlasheedi, M.A. (2020). Application of improved Best Worst Method (BWM) in Real-World problems, *Mathematics*, 8(8), 1324, <https://doi.org/10.3390/math8081342>
26. Demir, G., ve Bircan, H. (2020). Kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden BWM ve FUCOM yöntemlerinin karşılaştırılması ve bir uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 21(2), 170–185.
27. Khan, S. and Haleem, A. (2020). Investigation of circular economy practices in the context of emerging economies: a CoCoSo approach, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol 14(3), page 357-367.
28. Ulutaş, A. Karakuş, C.B. and Topal, A. (2020). Location selection for logistic center with fuzzy SWARA and CoCoSo methods, *Journal of Intelligent&Fuzzy Systems*, vol 38(4), page 4693-4709.
29. Peng, X. and Huang, H. (2020). Fuzzy decision making method based on CoCoSo with critic for financial risk evaluation, *Technological and Economic Development of Economy*, 26(4), page 695-724.

DÖKÜM İMALATINDA BESLEYİCİ GÖMLEK KULLANIMI

Muhammet Emin KESKİN¹

Murat ÇOLAK²

1. GİRİŞ

Ergitilmiş sıvı metalin hazırlanmış kalıp boşluğuna aktarılması, takip eden katılma ve soğuma süreçleri sonrası parça imalatı döküm olarak bilinmektedir. Birçok avantajı sayesinde en eski imalat yöntemlerinden biri olan döküm yöntemi halen endüstride vazgeçilmez bir konumda yerini almaya devam etmektedir. Bu yöntem temel olarak sıvının bulunduğu kabın şeklini alma prensibine göre uygulanmaktadır. Sıvının bulunduğu kabın şeklini alması yöntemin en büyük avantajı olmakla birlikte katılma sürecinin kontrolü yöntemin başarılı olmasını sağlayan en önemli etkidir [1-3].

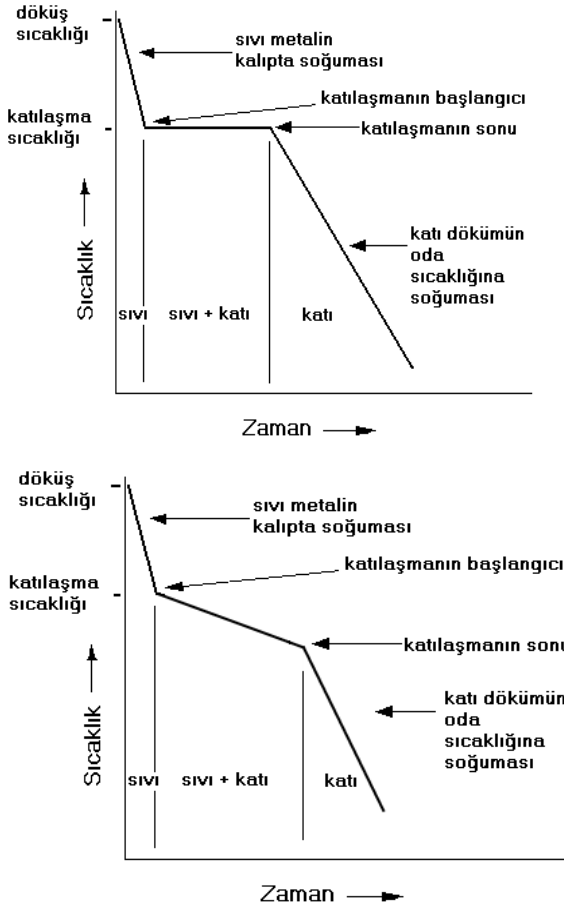
Döküm yöntemi ile parça imalatında sıvı metalin kalıp boşluğuna dolmasının ardından soğuma başlayacak ve bu soğuma sırasında başta katılma olmak üzere bir takım fiziksel olaylar gelişecektir. Bu olaylar döküm parçanın ölçüsünü, şeklini, kimyasal bileşimini ve tane büyüklüğünü önemli ölçüde belirleyecektir. Bu olayları etkileyen başlıca faktörler, alaşımın kendisi, alaşımın ve kalıbın termal özellikleri, döküm parçanın

¹ Makine Mühendisi.; Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, emnkskn47@hotmail.com, ORCID NO: 0000-0003-4342-6303

² Doç. Dr.; Bayburt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, mcolak@bayburt.edu.tr, ORCID NO: 0000-0002-8255-5987

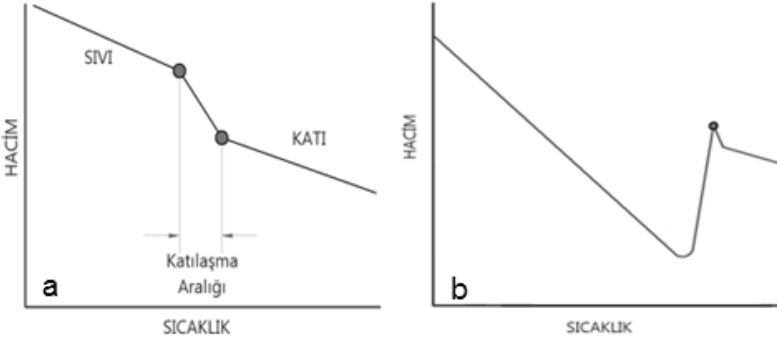
hacim ve yüzey alanı arasındaki orantı ve kalıbın geometrik şeklidir. Kullanılacak alaşımın saf metal ya da alaşım olma durumuna göre katılaşma durumu da değişkenlik gösterecektir. Saf metaller kendilerine özgü bir sıcaklıkta ergir ve katılaşırken alaşımlarda belirli bir katılaşma aralığında katılaşma durumu söz konusudur. Şekil 1’de saf metal ve alaşımların katılaşması şematik olarak verilmiştir [2-4].

Şekil 1. a) Saf Metallerin, b) Alaşımların Katılaşmasını Gösteren Zaman-Sıcaklık Diyagramı.



Alaşımın katılaşması sıcaklığın ergime çizgisinin altına düşmesi ile başlar, katılaşma noktasına gelmesi ile son bulur. Bu aralıkta ise alaşım yarı katı olarak adlandırılan sıvı-katı durumundadır. Saf metallerin özelliklerinin geliştirilmesi için malzemelerin büyük bir çoğunluğu alaşım olarak kullanılmaktadır. Alaşımlarda Şekil 1’de görüldüğü gibi genelde tek yönlü hacimsel değişim göstermektedir. Ancak döküm endüstrisinde en yaygın kullanım dökme demirlerde katılaşma sırasında çekinti ve genişlemenin bir arada görülmektedir. Bu durum döküm sıcaklığı, parça modülü, kimyasal bileşim, kalıp malzemesi, aşılama kalitesi vb. birçok faktörden etkilenmektedir [4-6]. Şekil 2’de düzenli hacimsel küçülme davranışı göstererek katılaşan bir alaşımın hacimsel değişim eğrisi ile küresel grafitli dökme demirin katılaşma esnasındaki hacimsel değişim eğrileri verilmiştir [6-8].

Şekil 2. a) Tek Yönlü Hacimsel Değişim Gösteren Bir Alaşımın, b) Karmaşık Hacimsel Değişim Gösteren Dökme Demirin Katılaşma Sırasındaki Hacimsel Değişim Eğrileri [5].



Katılaşma esnasında grafitin çökmesi yoğunluğunun çevrelediği demirden daha az olmasından dolayı genişlemeye neden olur. Birçok dökme demir dökümünde sadece genişleme basıncı kontrol edilerek besleyici tasarımında avantaj elde edilebilir. Genleşme basıncının kontrolü dökme demirlerde besleyici boğazının sıvı çekmeyi karşılayıncaya kadar açık

kaldıktan sonra sıvı metalin genleşmeye başlamasıyla katılaşılarak kapanmasına dayalı bir tasarım anlamına gelmektedir. Dökme demirlerde genleşme ve çekme davranışı alaşımın bileşimi, soğuma hızı, aşılama şartları, dökümün geometrik yapısı ve kalıp malzemesi gibi birçok parametre ile doğrudan ilişkilidir [5,9,10]. Döküm parça imalatında sağlam parça imalatı için kalıplama tasarımı oldukça önemlidir.

2. KALIPLAMA TASARIMI

Döküm yöntemi ile parça üretimi model tasarımı, akıcılığa dair yolluk tasarımı ve besleyici tasarımı şeklinde aşamalı süreçleri içermektedir. İlk olarak dökülecek parçanın çekme, işleme, eğimler, maça yuvaları ve kalıplama metotları dikkate alınarak hazırlanmış bir kopyası olan model tasarımı gerçekleştirilmelidir. Model kalıp boşluğunun hazırlanmasında kullanılır. Kalıcı kalıplarda ilgili boşluk doğrudan kalıp üzerine işlenerek de hazırlanabilir [11]. İkinci aşama ise parçanın sağlam imal edilmesinde en önemli etken olan ve doğrudan dökümcüyü ilgilendiren yolluk ve besleyici tasarımını içeren kalıplama tasarımıdır.

Döküm yönteminde kalıp boşluğundaki ergimiş metal katılma esnasında hacimsel olarak küçüldüğünden, çekilmenin telafi edilmesi için ilave ergiyik metal ile beslenmelidir. Beslenemediğinde, ergimiş metalin hacimce küçülmesinin bir sonucu olarak çekme boşluğu ve gözeneklilik kusurları oluşarak parçanın hurdaya ayrılmasına sebep olur [12,13]. Kalıplama tasarımının bir bileşeni olarak sıvı metalin kalıp boşluğuna doldurulma biçimi kritik öneme sahiptir. Bir dizi akış kanalından oluşan yolluk sistemlerinin, geometrik yapısı dökümün yöntemine ve şekline göre değişiklik gösterse de her bir yolluk sisteminden en az beş temel görevi yerine getirmesi beklenmektedir [4]. Bunlar;

- Kalıbı istenen sürede ve hızda doldurabilmesi,
- Kalıba sadece sıvı metali göndermesi (hava, oksit, cüruf, kum vb. katışıkları ayırması),
- Girdap ve yüzey türbülanslarını minimize etmesi,
- Ekonomik boyutlarda olması
- Katılaşmanın yönlenmesine katkıda bulunması,
- Döküm sonrası kolay ayrılma

İyi tasarlanmış bir yolluk sisteminden yukarıda sayılan temel görevleri yerine getirmesi beklenmelidir. Buna karşılık, yolluk sistemi yukarıda sayılan görevlerin tamamını veya bir kısmını yerine getiremeyecek şekilde tasarlanan dökümler genellikle mikro gözenek ve inklüzyon hataları ve düşük mukavemet/yorulma değerleri, yetersiz besleme, gereksiz besleyici gibi sorunlar göstermektedir [1,2,14]. Günümüz döküm endüstrisi, birçok diğer üretim sektöründe olduğu gibi en düşük maliyetle en iyi üretimi yapma zorunluluğu altında faaliyet göstermektedir. Bu yüzden, döküm kalitesi, hurda oranı ve dolayısı ile döküm maliyetleri üzerinde birincil derecede etkiye sahip yolluk sistemi tasarımına gereken önemin verilmesi sağlanmalıdır [15,16].

Kalıplama tasarımında en önemli olan bir diğer bileşen besleyici tasarımıdır. Besleyici döküm prosesinde kalıbın içine sıvı metali döktükten sonra çekinti esnasında ortaya çıkan sıvı metal ihtiyacını karşılamak üzere ilave edilen yeterli miktarda sıvı metal bulunan ve bu sıvı metali yeterince sürede katılaşmadan tutabilme kabiliyetine sahip olan unsura verilen isimdir. Şekil 3'te döküm prosesinde besleyiciyi doğru şekilde tasarlanmadığında karşılaşılabilecek olası problemlere yönelik görseller verilmiştir.

Şekil 3. Döküm Parçaların Hurdaya Ayrılmasına Sebep Olan Çekinti Hatalarına Örnekler [17].



Şekil 3'te görülen kesit içerisindeki hatalar fark edilmediğinde döküm kalitesi ve kullanım ömrüne doğrudan etki etmektedir. Bu yüzden parçalar kusurlarından ötürü reddedilerek hurdaya ayrılırlar. Bu durumun engellenebilmesi için imalat işlemlerinde gerekli besleyici kriterlerine uygun olarak kalıplama tasarımları yapılması gerekmektedir.

3. BESLEYİCİ TASARIM KRİTERLERİ

Döküm yönteminde sağlam parça imalatı için doğru besleyici tasarımı yapılmalıdır. Bu kapsamda besleyici tasarımında kullanılan 4 temel kriter söz konusudur. Bunlar sıcak nokta kriteri, katılma zamanı modül kriteri, besleme yolu kriteri, hacim kriteri şeklindedir [4]. Bu kriterler hem klasik hesaplama metotlarında hem de bilgisayar destekli döküm simülasyon yazılımlarında kullanılmaktadır [18-22].

Bu kriterlerin içerisinde sıcak nokta kriteri besleyicilerin konumlarının ve kaç adet besleyici kullanılması gerektiğinin

tespitinde kullanılmaktadır. Sıcak nokta terimi parçanın doğal katılma rejimi içerisinde en son katılma bölgelerinin tespit edilerek ilgili bölgelerin besleyicilere aktarılması şeklinde düşünülebilir. Uygun bir kalıplama tasarımında en son katılma bölgelerin parça üzerinde değil besleyicilerde sonlanması beklenmektedir. Besleme yolu kriteri ile ilgili besleyicinin katılma tamamlanmadan besleyebileceği bölgenin tespiti anlamında düşünülebilir. Özellikle silindirik veya kesit kalınlıkları benzer geometrilerde parçalarda da besleyicide yeterince sıvı metal bulunmasına rağmen katılma esnasında yarı katı bölge süresince sıvı metal besleme görevi görememektedir. Buna bağlı olarak besleyicinin ne kadar bir mesafe besleneceği tespit edilmeli buna göre besleyici sayısı belirlenmelidir. Sıcak nokta ve besleme yolu kriteri besleyici konum ve sayısı ile ilgili iken modül ve hacim kriteri besleyici ebatları ile ilgilidir [12-15].

Modül kriteri ise besleyicilerin döküm parçadan daha geç katılması gerekliliği prensibine dayanmaktadır. Bu kapsamda döküm içerisinde katılma durumu düşünüldüğünde sıvı alaşımın kalıba dökümünü takiben ısı kaybetmesi ile katılma başlar. Sıvı metal kalıp içerisinde kalıp kenarlarından ısını kaybederek soğumaya ve katılma sıcaklığının altına inilmesi ile katılmaya başlar. Dolayısıyla en ince kesitli kalıp kenarları ilk olarak katılırken, katılma kalın kesitlere doğru yönlendirilerek devam eder. Bu kapsamda kum kalıba yapılan dökümlerde, döküm kesitinin katılma zamanı; kesit hacmini yüzey alanına oranlayan Chvorinov yaklaşımı ile hesaplanabilir [23].

$$t = k(V/A)^2 \quad (\text{Eşitlik 1})$$

İlgili eşitlikte; V olarak ifade edilen döküm hacminin, A olarak ifade edilen yüzey alanına bölünmesi modül olarak ifade edilir. Modülün karesinin kalıp malzemesine bağlı ısı iletim katsayısı olan k ile çarpımı bize t olarak formülize edilen

katılma zamanını vermektedir. Dolayısıyla modül değerinin tek başına bile katılma işleminin süresi konusunda belirleyici olduğu bilinmektedir. Genel olarak modülü yüksek olan kesitin katılma süresinin modülü düşük olan bölgeden daha uzun olacağı bilinmelidir. Chvorinov çalışmaları neticesinde katılacak malzemenin karakterleriyle bağlantılı olan birtakım katsayılar da hesaplamıştır. Bu kapsamda örnek verecek olursak çelik döküm k değeri; 2-2,4 dk/cm², gri dökme demirde 3,2-3,5 arasındadır. Bu değerlerden hareketle modülünün 2 cm olarak hesaplandığı bir dökümde katılma zamanı çelik için 8-9,6 dk iken gri dökme demirde 12,8-14 dk arasında olduğu söylenebilir. Dolayısıyla katılma zamanını biliyor olmamız besleyici hesaplamaları yapmamızı mümkün kılacaktır. Ayrıca yukarıdaki formüle göre, örneğin, daha büyük bir küre daha küçük bir küreye göre çok daha uzun bir sürede katılacaktır. Bunun nedeni şudur; kürenin hacmi yarıçapının küpü ile orantılı iken kürenin yüzey alanı yarıçapının karesi ile orantılıdır. Bu formüle göre aynı ağırlığa ve hacme sahip iki sıvıdan küp şeklinde bir kalıba döküleni küre şeklinde bir kalıba dökülenden daha erken katılacaktır. Besleyici tasarımında ilgili modül kriteri kullanımı için besleyicinin modülünün döküm parçanın modülünden en az 1,2 kat daha fazla olması gerekliliği şeklinde ifade edilmektedir [13-23].

Besleyici ebatlarının belirlenmesi yönelik diğer bir kriter ise hacim kriteridir. Hacim kriterini katılma esnasında alışım çeşidine bağlı olarak hacimsel çekme olarak adlandırılan kaybın besleyici ile sağlanması şeklinde düşünülebilir. Bilindiği üzere döküm alışımları birkaç istisna dışında katılma ve soğuma esnasında hacimsel olarak azalma gösterirler. Kalıplama tasarımında bu kaybın telafi edilmesi gereklidir. Ancak bu durumda hesaplanırken besleyicilerin belirli bir besleme kapasiteleri olduğu düşünülmalıdır. Besleyicilerin besleme için

kullanılabilecek bu limit değerleri aşağıda verilen formülle hesaplanabilmektedir [13].

$$V_b = \alpha V_d / \varepsilon - \alpha \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Bu eşitlik ile sağlam bir döküm için bir besleyicinin sahip olması gereken asgari metal miktarı belirlenebilmektedir. Besleyicilerin bu hacimden daha küçük olmaması gerekmektedir. Burada V_b verilen bir döküm için gerekli olan besleyici hacmidir. V_d tek bir besleyici kullanılacaksa döküm parçanın, birden fazla besleyici kullanılacaksa besleyici bağlanacak kısmın hacmidir. α döküm alaşımının % hacimsel çekme oranıdır. ε ise besleyicinin toplam hacminin % olarak harcayabildiği besleme metalidir ve “besleyici verimi” olarak tanımlanabilir. Besleyici verimi aynı kalıp malzemesi ile kullanılan dökümlerde %14 iken izolasyon gömleklili besleyicilerde %25, ekzotermik malzemelerden oluşan gömleklerin kullanıldığı besleyicilerde ise %40 üzerindeki oranlarına kadar yükselebilmektedir [24,25]. Diğer kriterlerde parça geometrisinden dolayı müdahale imkânı kısıtlı iken bu kriterde kullanılacak besleyici yalıtım malzemesine bağlı olarak ebatlarda tasarıma bağlı farklılıkla daha olası olduğu görülmektedir. İstenen bir kalıplama tasarımı ancak verilen kriterlerin tamamının uygun bir şekilde gerçekleştirilmesiyle sağlanabilecektir. Ancak besleyici gömlek kullanımı ile kalıplama verimi artırılarak maliyet avantajı sağlanabilir.

4. BESLEYİCİ SİSTEMLERİ

Besleyicilerden beklenen en temel görevlerden biri bağlı bulunduğu kesitin kaybının olabileceği düşünülen hacimsel çekintiyi önlemeye yetecek kadar sıvı metal bulundurmasıdır. Besleyici malzemelerde doğal kalıp malzemesi kullanıldığında hacimsel olarak döküm parçayı beklenildiği kadar desteklemediği bilinmektedir. Bu sebeple yerlerini besleme verimliliğini arttıran yalıtkan özellikli malzemelere bırakmaktadır. Yalıtım

elemanlarının özelliklerini, özgül ısısının yüksek oluşu, ısı geçirgenliğinin düşük oluşu, döküm sıcaklığından katılaşana kadar ve ekzotermik reaksiyon ile elde edilen ısı ile faz dönüşümlerinin oluşu, sıvı metal ile etkileşime girmemesi ve nem tutma oranı az olması şeklinde sıralayabiliriz. Yalıtkan malzemeler, besleyicinin ısı kaybetmesini önlemeye ve döküm malzemeye daha yüksek hacimlerde katkı sağlamaya yardımcı olan yapılardır [26].

Yalıtım ve ekzotermik özellikli bir döküm besleyici gömleğinin temel bileşenlerini, ısı elde etmek için ekzotermik reaksiyon elemanlarıdır. Ayrıca ekzotermik reaksiyonu başlatmak ve iletirmek için ateşleyici sistem ve ısının yayılımını azaltmak için yalıtım elemanları gerekmektedir. Bir diğer önemli husus olarak da kalıpta rijit kalabilmesidir bu kapsamda çeşitli bağlayıcılar kullanılması gerekliliği söz konusudur. Besleyici gömlekler, ekzotermik reaksiyon sonucu ortaya çıkan yüksek enerji sayesinde, ergimiş metal katılaşmasını geciktiren bir ısıtma yüzeyi oluşturmaktadır. Besleyici gömlekler, besleyicinin katılaşma zamanını artırmaya yönelik katkıları mevcuttur. Besleyici mekanizmasının soğuma hızı düşürülerek, besleyicinin daha geç katılaşması ve modülünün büyüme etkisi ile daha uzun süre boyunca sıvı kalması sağlanır [27, 28].

Ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin kullanımına yönelik yapılan bir çalışmada farklı yalıtım özellikli besleyici gömlek kullanımı incelenmiştir. İlgili döküm parçanın sağlam imal edilmesi için kılıfsız yapılan dökümde 23 kg besleyici kullanılması gerekirken ekzotermik özellikli besleyici kullanımında yaklaşık 1/3 oranında besleyicinin yeterli olduğu tespit edilmiştir. Mini besleyici kullanılması ile gerekli miktarın 1/5'in altına indiği ifade edilmektedir. Aynı çalışmada kullanılan besleyici gömlek ile taşlama yüzeylerinde de çok ciddi kazanım elde edildiği vurgulanmıştır. Besleyici sistemlerindeki verim artışı, kalıplama hattındaki performansı arttırmakla birlikte

parçadan ayırma işlemi, taşlama işçiliği ve malzeme maliyetinin azalttığı ifade edilmiştir [27].

Besleyici gömleklerin termal özellikleri kapsamında hızlı katılaşmayı önlemek için tutuşma zamanı oldukça çabuk, doğru enerji miktarını verecek hızda yanma hızı, 1550 °C'den daha yüksek ısı ve toplam ısı üretiminin yüksek olması beklenmektedir. Aynı hacimde sıvı metalin doğal kum kalıp malzemesi ile açık olarak, besleyici tozu kullanılarak ve aynı şekilde ekzotermik besleyici gömlek kullanılarak yapılan deneylerle katılaşma zamanı ölçülmüştür. Katılaşma zamanı doğal kum kalıp malzemesinde 29 dk, besleyici tozu ilavesi ile 39-40 dk, ekzotermik besleyici ile 45-46 dk ya ve hem ekzotermik besleyici ve besleyici toz kullanımı ile ilgili katılaşma süresinin 73 dk ya çıktığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak ekzotermik besleyici ve toz kullanımı ile sıvı metali daha uzun süre sıvı tutarak verimli dökümler yapmak mümkün olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ekzotermik besleyici kullanımı ile besleyicinin parçaya temas ettiği toplam alanı ve daha sonradan kesilip taşlanması gereken alanları azalmasına fayda sağlanmaktadır [29].

Bütün ekzotermik besleyiciler, toz metalik alüminyum ile demir oksit arasındaki ısıveren bir reaksiyonla elde edilmektedir. Bununla birlikte, reaksiyon başlatıcı olarak kullanılan Kriyolit ve Florit gibi bazı maddelerle oluşacak reaksiyonun şiddetini artırabilmektedir [27, 28]. Besleyici gömleklere ısı metotermik reaksiyon sonucu ortaya çıkmaktadır. Burada kullanılan metal bileşen metal oksit ile reaksiyona girerek ısı vermesini sağlar. Seçilecek metal oksidin; döküm şartlarında indirgenebilir olması, kolay reaksiyona girmesi, enerji verimliliğinin yüksek olması ve reaksiyon ürünlerinin metal üzerine etkisinin en az olması beklenmektedir [29].

5. BESLEYİCİ GÖMLEK SEÇİMİ

Besleyici gömlek uygulamalarında farklı döküm alaşımları için farklı besleyici gömleklerinin kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda alaşım çeşidine göre katılma aralığında geçen süre önem arz etmektedir. Dökme demirlerde ergime ve katılma sıcaklığına ulaşana kadar ciddi bir süre geçmekte ve buna bağlı olarak reaksiyona girecek olan besleyicinin reaksiyon süresinin bir miktar daha uzun olması gerekmektedir. Farklı bir alaşım olarak karbon çeliğinde döküm sıcaklığından hemen sonra katılma noktasına geldiği görülmektedir. Bu nedenle bu çeliklerde kullanılacak besleyici gömleklerin hızlıca reaksiyona girmesi daha doğru olacaktır. Paslanmaz çelik alaşımlarında da karbon çeliği alaşımlarına benzer şekilde döküm sıcaklığından çok kısa bir süre sonra likidüs sıcaklığına ulaşılır. Bu nedenle paslanmaz çelik alaşımlarının dökümünde hızlı reaksiyona giren besleyici gömlekler kullanılmalıdır. Fakat hem paslanmaz çelik alaşımlarında hem de karbon içeriği alaşımlarında besleyici gömleğin büyük olması durumunda orta ekzotermik besleyici gömleklerin kullanımı tercih edilmelidir. Beşeri durumlara ait önemli olan parametreler incelendiğinde ilk olarak ısı geçiş katsayıları, reaksiyon süresi, yoğunluk, en yüksek sıcaklık ve özgül ısı değerleri göze çarpmaktadır. Bu verilere bağlı olarak kullanılacak olan besleyici gömlek döküm alaşımına göre farklılık göstermelidir. Uygun besleyici gömlek seçiminde alaşımın katılma eğrisi önemli bir parametredir [29].

Yalıtkan ve ekzotermik özellikli besleyici malzeme kullanımının önemi yapılan açıklamalar doğrultusunda aşikârdır. Bu kapsamda ülkemizdeki özellikle kaliteli parçalar üreten firmalar bu noktada rekabet edebilirlik, kaliteli sağlam parça imalatı, verimlilik, maliyet azaltılması vb. birçok hususu dikkate alarak besleyici gömlek kullanmaktadır.

Döküm endüstrisine hizmet etmekte olan besleyici gömlek firmaları besleme elemanının daha sıcak kalarak katılma zamanının artırılması, buna bağlı olarak daha küçük hacimde besleyici ile sağlam parça imalatına odaklandığı bilinmektedir. Modül genişletme faktörü olarak ifade edilen teknik 1900'li yılların başından beri kullanılan patenti alınmış bir tekniktir. Firma bazlı tasarımlar, sistemler, kullanılan malzemeler değişkenlik göstermekle birlikte temel amaç maliyeti, işçiliği azaltmak, kaliteli ürünler üretilmesine yardımcı olmaktadır [30].

Bu kapsamda son zamanlarda birkaç teknolojinin faydalarının bir araya getirilerek yeni nesil besleyici gömlek tasarımı çalışmaları devam etmektedir. Metal kırıcı boyun teknolojisi, parça yüzeyi ile bağlantı alanını azaltarak en karmaşık döküm parçaların en dar yerlerine dahi rahatlıkla konulabilmesi sağlamakta ve böylece taşlama maliyetlerinin azaltmasına yardımcı olmaktadır. İlgili besleyici uygulamada da kolaylıklar sağlayıp operatör kaynaklı hataların minimize edilmesine yardımcı olacak niteliktedir. Ayrıca, aynı çapta metal boyunla parçaların gereksinimlerine göre farklı hacimlerde besleyici kullanma imkânı da bu sayede mümkün olabilmektedir. Tarihçesine bakıldığında yalıtkan malzemelerin ilk kullanıma girdiği zamanlardan itibaren besleyici malzemelerin işlevsellikleri ve performansları için yapılan geliştirme ve iyileştirmelerin sürekli devam ettiği anlaşılmaktadır. Bu gelişim sadece prosese bağlı gelişmeler olmayıp, birçok yönden gerekliliklere bağlı devam etmektedir. Dökümcülerin beklentisi, bu malzemelerin kullanımının, sadece döküm kalitesini ve performansını arttırmak için değil, bütün maliyetleri güvenli ve etkin şekilde azaltacak bir araç olması yönündedir. Gelişen teknoloji ve dökümhanelerin rekabet şartlarına bağlı olarak ve döküm malzeme kalitesinin artırılması beklentilerinden dolayı besleyici malzeme tasarımları da pek çok faydanın bir arada bulunması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Döküm

endüstrisinin besleyici ekipmanlarından beklentilerini sıralayacak olursak;

- Besleyici bağlantı noktalarının etkin bir şekilde sıcak kalacak şekilde daha küçük alanlarda olması,
- Ağırlıklarının azaltılması,
- Kullanılan malzemeler itibari ile insan sağlığına zararlı etkilerinin ortadan kaldırılması,
- Besleyici verimlerinin artırılması,
- Maliyetlerinin düşürülmesi,
- Kullanımda operatör kaynaklı hataların önüne geçilmesi,
- Döküm sonrası taşlama işçiliğinin azaltılması gibi birçok husus karşımıza çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Campbell, J. (2004). Casting Practice: The 10 Rules, Butterworths/Heinemann. Oxford, London.
- [2] Campbell, J. (2015). Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Butterworth-Heinemann.
- [3] Gwyn, M. A. (1998). "Cost-Effective Casting Design. Modern Casting, 88(5), 32-36.
- [4] Kayıkcı, R. (2008). Büyük Kütleli Bir Çelik Parçanın Dökümünde Klasik Ve Bilgisayar Destekli Mühendislik Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(2), 257-265.
- [5] Schmidt, D. C. (2007, February). The Basics of Solidification. In Gating and Riser Design of Cast Irons, AFS Wisconsin Regional Conference, Finite Solutions Inc Slinger WI, February (Vol. 8).

- [6] Meredith, J. F. (2008). Solving porosity problems in graphitic iron castings. Casting Solutions Pty Ltd Moorebank, NSW, Australia.
- [7] Stefanescu, D. M. (2005). Solidification and modeling of cast iron—A short history of the defining moments. *Materials Science and Engineering: A*, 413, 322-333.
- [8] Lacaze, J. (1999). Solidification of spheroidal graphite cast irons: III. Microsegregation related effects. *Acta Materialia*, 47(14), 3779-3792.
- [9] Çolak, M., Arslan, İ., & GAVGALI, E. (2018). Gri Dökme Demirlerin Katılma Modellemesi Ve Gerçek Dökümler İle Karşılaştırması. *Engineering Sciences*, 13(4), 280-290.
- [10] Çolak, M., & Kaya, S. (2021). Investigation of the effect of inoculant and casting temperature on fluidity properties in the production of spheroidal graphite cast iron. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74, 205-214.
- [11] Çolak, M., & Kayıkçı, R. (2005). Döküm simülasyon programları üzerine bir değerlendirme. *Metal Dünyası*, 189, 2-4.
- [12] Guleyupoglu, S. (1998). Casting process design guidelines. *Transactions-American Foundrymens Society*, 869-876.
- [13] Kayıkçı, R., Akar, N. (2007). Farklı kesit kalınlıklarına sahip büyük hacimli bir çelik dökümün simülasyon teknikleri ile tasarlanması. *Politeknik Dergisi*, 10(4), 395-401.
- [14] Hsu, F. Y., Jolly, M. R., & Campbell, J. (2006). Vortex-gate design for gravity casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 19(1), 38-44.

- [15] Çolak, M., Şirin, S., Kocaman, E., & Kayıkcı, R. (2013). Effect of Dimentioanş Scaling on the Casting Soundness of Sand Cast A360 Al Alloy, Eurotecs' 13, 12.
- [16] ÇOLAK, M. (2020). OPTICast yazılımı ile döküm endüstrisinde kalıplama tasarımı optimizasyonu uygulaması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(3), 545-551.
- [17] <https://dokumhane.net/dersler/dokum-isleminde-besleyici-sistemleri/>
- [18] Franssman, H. (2007). Hızlı ve Doğru Yolluk ve Besleyici Dizaynı için Döküm Simülasyon Programlarının Pratik Kullanımı. Metal Dünyası, 164, 30-31.
- [19] Ransing, R. S. (2005). Review of optimization methods for casting simulation. JOM, 56(11), 250-253.
- [20] Stefanescu, D. M. (2005). Computer simulation of shrinkage related defects in metal castings - a review. International Journal of Cast Metals Research, 18(3), 129-143.
- [21] Teke, Ç., Çolak, M., Taş, M., & İpek, M. (2019). Modeling of the impact of initial mold temperature, Al5Ti1B and Al10Sr additions on the critical fraction of solid in die casting of aluminum alloys using fuzzy expert system. Polish Acad Sciences Inst Physics.
- [22] Wlodawer, R. (1966). Directional Solidification of Steel Castings (Çeviren: Yaman, M., Çelik Dökümlerde Besleyici ve Soğutucu Hesapları, TMMOB Metalurji Müh.Odası, 1985 ed.). Oxford: Pergamon Press.
- [23] Chvorinov, N. (1940). Theory of Solidification of Castings, Giesserei. 27, 177-225.

- [24] Çolak, M., & Kayıkcı, R. (2009). AlTiB Mastır Alaşımı İlavesinin Etial160 Döküm Alaşımı Üzerinde Tane İnceltme Etkisinin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Semp.(IATS'09), 13-15.
- [25] Kayıkcı, R., & Çolak, M. (2009). Kuma Dökülen Etial160 Alüminyum Alaşımında Tane İnceltmenin Beslenebilirlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, 5th. In International Advanced Technologies Symposium, May (pp. 13-15).
- [26] Fischer, S. A., Horvath, L. R., & Showman, R. E. (2012). Döküm parça kalitesini arttıran yüksek performanslı besleyici gömleklerinin gelişimi. ASK Chemicals: AFS Transactions.
- [27] Aufderheide, R. C., Mathias, J. M., & Waters, K. (2007). New Hot Topping Techniques Improve Riser Feeding Consistency. AFS Transaction, 07-098.
- [28] Aufderheide, R. C., Showman, R. E., & Twardowska, H. (1998). New developments in riser sleeve technology. In One Hundred Second Annual Meeting of the American Foundrymen's Society (pp. 395-400).
- [29] <https://dokumhane.net/dersler/dokum-isleminde-besleyici-gomlekleri/>
- [30] Uslu, E. Keskin, M. E., Çolak, M. (2023), Döküm Kalıp Tasarımında Besleyici Gömlek Kullanımının Modelleme Teknikleri ile İncelenmesi, 5th. International Blacksea Modern Scientific Research Congress, November 8-10, (pp. 1485-1493).

RASTGELE OLASILIKSAL DEĞİŞKEN ÜRETME TEKNİKLERİ

Abdullah SEVİN¹

1. GİRİŞ

Rastgele olasılıksal değişken, rastgele bir değişkenin belirli bir sonucu veya gerçekleşmesidir. Rastgele değişken, rastgele bir deneyin olası her sonucuna sayısal bir değer atayan matematiksel bir fonksiyondur. Daha basit bir ifadeyle, rastgele olasılıksal değişken, bir rastgele değişkenin alabileceği belirli bir değerdir. Rastgele olasılıksal değişkenler olasılık teorisinde, simülasyonlarda, kuyruk teorisinde ve istatistik gibi birçok pratik uygulamada çeşitli olayların belirsizliğini ve değişkenliğini modellemek için kullanılır.

Rastgele olasılıksal değişken, düzgün dağıtılmış rastgele sayılardan üretilen bir değişkendir. Fakat rastgele olasılıksal değişken düzgün veya düzgün olmayan herhangi bir dağılıma sahip olabilir. Rastgele sayılar, belli aralıklar arasında düzgün dağılmış bir rastgele değişkenden alınan örneklerdir ve eşit oluşma olasılıklarına sahiptirler. Rastgele sayılar iki temel istatistiksel özelliğe sahiptirler; düzgünlük ve bağımsızlık. Rastgele sayıların 0 ile 1 arasında eşit dağılım özelliği düzgünlük olarak ifade edilir. Belirli bir aralıkta üretilen bir rastgele sayının gözlemlenme olasılığı, daha önce üretilen rastgele sayıdan etkilenmemesi bağımsızlık olarak ifade edilir (Law, vd., 2007). Sözde rastgele sayılar ise bilinen bazı matematiksel işlemler ile elde edilen ve rastgele sayı özelliklerini taşıyan sayılardır.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, asevin@sakarya.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9694-0870.

Böylelikle gerçek rastgele sayıların gerekliliklerini ortadan kaldırarak farklı hesaplama ortamlarında kullanılabilen, yinelenabilir, uzun döngüye sahip ve hızlı üretilebilen sayı dizileri oluşturulabilir. Rastgele olasılıksal değişken üretme tekniği, sözde rastgele sayıları kullanarak herhangi bir istatistiksel dağılıma sahip değişkeni veya deneysel verileri üretebileceğimiz yöntemleri kapsamaktadır.

Rastgele olasılıksal değişkenler, iki ana türe ayrılabilir: kesikli rastgele değişkenler ve sürekli rastgele değişkenler. Kesikli rastgele değişkenler, bir sayı dizisi içinde belirli değerleri alabilen değişkenlerdir. Bu değerler genellikle sayılabilir ve ayrık noktalarda değerler alabilmektedirler. Örnek olarak, bir kuyruk sisteminde bekleyen kişi sayısı (1, 2, 3, 4, 5) bir kesikli rastgele değişken örneğidir. Sürekli rastgele değişkenler, bir aralıktaki herhangi bir değeri alabilen değişkenlerdir. Bu tür değişkenler genellikle ölçülebilir ve aralarında sonsuz sayıda değer alabilir. Örnek olarak, bir kişinin boyu, ağırlığı veya bir süre içerisindeki hızı sürekli rastgele değişken örnekleridir. Her iki tür rastgele değişken de olasılık dağılımları ile ilişkilidir (Ross, 2014).

Rastgele olasılıksal değişken üretmek için tanımlanan teknikleri temelde üç kategoriye ayrırabiliriz; ters dönüşüm tekniği, kabul-ret tekniği ve özel yöntemler. Her tekniğin kendisine ait teorik temelleri, belirli bir kapsamı ve sağladığı avantajlar bulunmaktadır. Bazı dağılım modelleri için uygun olan bir teknik diğer dağılım modelleri için uygun olmayabilmektedir. Araştırmacılar ve uygulayıcılar için bu tekniklerin özelliklerini, kapsamlarını ve güçlü yönlerini öğrenmek önemli bir konudur. Teorik olarak uygulanabilir gözükken bir yöntemin uygulama sırasında gerçekleşmesinin özellikle bilgisayar ortamında karşılaşılabileceği zorlukları aşabilmesi için konunun uygulama yönleriyle de ele alınması gereklidir.

2. RASTGELE OLASILIKSAL DEĞİŞKEN ÜRETME TEKNİKLERİ

Simülasyonlar, kuyruk ve olasılık teorisi, istatistik gibi günümüz uygulamalarında kullanılan rastgele olasılıksal değişken üretme işlemi herhangi bir hesaplama ortamında rastgele sayıları kullanarak gerçekleştirilir. Herhangi bir rastgele sayı üreticinin ürettiği rastgele sayı dizisi $[0,1]$ aralığında değer almaktadır. Sonradan bu sayı belirli matematiksel işlemler gerçekleştirilerek istenilen aralığa dönüştürülebilmektedir. Bu rastgele sayı dizisi kullanılarak seçilen bir yöntem ile istenen rastgele olasılıksal değişken üretilebilmektedir. Rastgele olasılıksal değişken üretmek için temelde üç teknik bulunmaktadır (Banks, 1998);

- Ters dönüşüm tekniği
- Kabul-Ret tekniği
- Özel yöntemler

Bu teknikler, rastgele olasılıksal değişkenlerin farklı dağılımlara dönüştürülmesi için kullanılan yaygın yöntemleri temsil etmektedir. Her bir teknik, belirli bir dağılım modelini elde etmek için uygun olmaktadır. Farklı dağılım modelleri için birden fazla üretim tekniği bulunabilmektedir. Uygulayıcı, uygulama ortamına ve senaryoya uygun olarak gerekli tekniği seçmesi gerekmektedir.

2.1. Ters Dönüşüm Tekniği

Ters dönüşüm tekniği, prensip olarak herhangi bir dağılım modeli için kullanılabilir. Rastgele sayı (r) $[0,1]$ aralığında değer almaktadır. Rastgele sayı, düzgün dağılıma sahip olduğundan dolayı (u) ile de gösterilmektedir. Herhangi bir istatistiksel dağılım modeline sahip bir değişkenin birikimli dağılım fonksiyonu $F(x)$ 'de $[0,1]$ aralığında değer almaktadır. Birikimli dağılım fonksiyonu herhangi bir a değerine kadar olan tüm

olasılıkların toplamını ifade etmektedir. Burada rastgele sayı dizisi ile birikimli dağılım fonksiyonu değerleri örtüşmektedir. Eğer $r = F(x)$ gibi bir fonksiyon yazılabiliyor ise elde edilecek ters fonksiyon ile $x = F^{-1}(r)$ gibi bir eşitlik sağlanabilir (Devroye, 2006). Temelde bu elde edilen x rastgele olasılıksal değişkeni, dağılım modeline ait birikimli dağılım fonksiyonunun tersinden elde edilmiş olur. Ters dönüşüm tekniğine ait gerekli adımları sırasıyla şu şekilde ifade edebiliriz;

- 1) İstenilen X rastgele değişkeni için birikimli dağılım fonksiyonunun hesaplanması
- 2) X aralığında $F(X) = R$ 'nin ayarlanması
- 3) Denklemin çözülerek ters fonksiyonun hesaplanması, $X = F^{-1}(R)$
- 4) Rastgele sayıların üretilmesi $R_1, R_2, R_3, R_4, \dots$ ve $X_i = F^{-1}(R_i)$ eşitliği ile ters fonksiyona rastgele sayılar konularak istenilen rastgele değişkenin hesaplanması

Ters dönüşüm tekniği, üstel dağılım, düzgün dağılım, Weibull dağılımı, üçgensel dağılım, geometrik dağılım, lojistik dağılım, Pareto dağılımı, uç değer dağılımı gibi sürekli veya kesikli dağılımlarda kullanılmaktadır. Tablo 1'de bu rastgele değişken dağılımlarına ait birikimli dağılım fonksiyonları ve hesaplanan ters dönüşüm fonksiyonları verilmiştir. Birikimli dağılım fonksiyonları rastgele değişkenlerin olasılık yoğunluk/kitle fonksiyonlarından elde edilmektedir. Sürekli rastgele değişkenlerde elde edilecek birikimli dağılım formülü olasılık yoğunluk fonksiyonundan $F(a) = \int_{-\infty}^a f(x)dx$ olacak şekilde elde edilmektedir. Kesikli rastgele değişkenlerde ise elde edilecek birikimli dağılım formülü olasılık kitle fonksiyonundan $F(a) = \sum_{tüm x \leq a} p(x)$ olacak şekilde elde edilmektedir (Banks, vd., 2005).

Tablo 1. Dağılımlara Ait Ters Dönüşüm Fonksiyonları

Dağılım	Birikimli Dağılım Fonksiyonu	Ters Dönüşüm Fonksiyonu
Üstel	$1 - e^{-\lambda x}$	$-\frac{1}{\lambda} \ln(1 - u)$
Geometrik	$1 - (1 - p)^x$	$\left\lceil \frac{\ln(u)}{\ln(1 - p)} \right\rceil$
Lojistik	$1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{x-\mu}{b}}}$	$\mu - b \ln\left(\frac{1}{u} - 1\right)$
Uç değer	$1 - e^{-e^{\frac{x-a}{b}}}$	$a + b \ln \ln(u)$
Pareto	$1 - x^{-a}$	$1/u^{1/a}$
Weibull	$1 - e^{-(x/a)^b}$	$a (\ln u)^{1/b}$
Düzgün	$\frac{x-a}{\beta-a}$	$a + (\beta - a)u$

2.1.1. Üstel Dağılım Üretim Uygulaması

Üstel dağılım, bir sürekli dağılımdır ve olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ ile gösterilmektedir. Buradan birikimli dağılım fonksiyonu $F(x) = P(X \leq x) = \int_0^x \lambda e^{-\lambda y} dy = 1 - e^{-\lambda x} = r$ olarak hesaplanır. Birikimli dağılım fonksiyonun tersi $x = F^{-1}(r) \Rightarrow x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - r)$ olarak bulunur. Eğer $(1 - r)$ düzgün dağılıma sahip ise (r) 'de düzgün dağılıma sahip olacağından pratik uygulamalarda bir işlem yükünden kurtulmak için formül $x = -\frac{1}{\lambda} \ln(r)$ şeklinde yazılabilir.

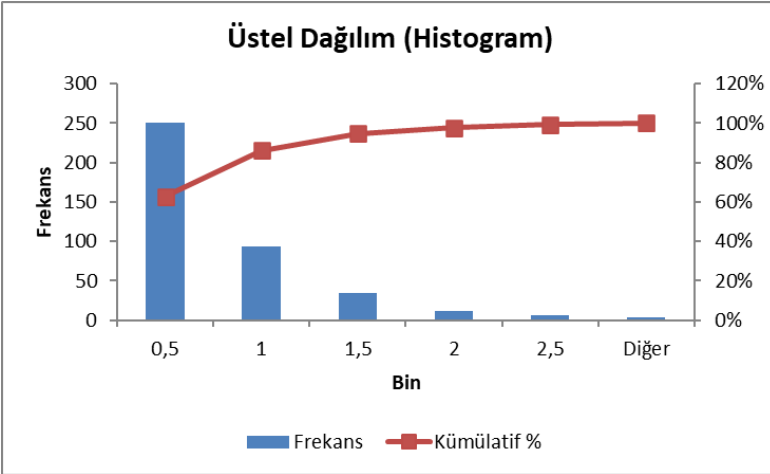
Bu işlemden sonra istenilen herhangi bir rastgele sayı dizisi ters fonksiyona yerleştirilerek üstel dağılıma sahip bir rastgele değişken üretilmiş olur. Rastgele değişken üretiminde kullanılacak olan parametreler (üstel dağılım için λ) örnek bir veri dizisinin ortalama değerinden $(E[X])$, $\lambda = \frac{1}{E[X]}$ eşitliğini sağlayacak şekilde elde edilir. Tablo 2' de örnek olarak, belirli rastgele sayılar kullanılarak ters dönüşüm tekniği ile üretilen üstel dağılıma sahip rastgele değişken değerleri gösterilmektedir.

Tablo 2. Üstel Dağılım Rastgele Değişken Değerleri ($\lambda = 2$)

İterasyon (i)	Rastgele sayı (R_i)	Rastgele Değişken (X_i)
1	0,247875591	0,142426766
2	0,73277276	0,659827947
3	0,440566853	0,290415622
4	0,387840725	0,245381388
5	0,697693753	0,598157356
6	0,946678436	1,465707224
7	0,210094475	0,117920965
8	0,393426809	0,24996494
9	0,07068875	0,036655779
10	0,185034411	0,102304695

Rastgele sayı adedini 400 olarak aldığımız bir dizi için ters dönüşüm tekniği ile üretilen üstel dağılım değişken değerlerinin grafiği Şekil 1’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 0,5 adım aralığı ile oluşturulan sayı değerlerinin frekans dağılımı, üstel dağılıma ait bir yapıda oluştuğu görülmektedir. Bu dağılım grafiği yeterli rastgele sayı kullanıldığında yüksek oranda örtüşmektedir.

Şekil 1. Üstel Dağılım Histogramı ($\lambda = 2$)



2.1.2. Weibull Dağılımı Üretme Uygulaması

Weibull dağılımı modellemede sık kullanılan önemli bir dağılımdır. Weibull dağılımı sürekli bir dağılımdır ve olasılık

yoğunluk fonksiyonu $f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x-v}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x-v}{a}\right)^b}$ olarak hesaplanmaktadır. Fonksiyondaki (b) şekil parametresini, (a) ölçek parametresini ve (v) konum parametresini ifade etmektedir. Buradan birikimli dağılım fonksiyonu $F(x) = \int_0^x \frac{b}{a} \left(\frac{y-v}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{y-v}{a}\right)^b} dy = 1 - e^{-(x/a)^b} = r$ olarak hesaplanır. Birikimli dağılım fonksiyonun tersi ise $x = F^{-1}(r) \Rightarrow x = a(-\ln r)^{1/b}$ olarak bulunur. Weibull dağılımında şekil parametresi değiştirilerek üstel veya normal dağılıma yakın dağılımlar üretilebilmektedir.

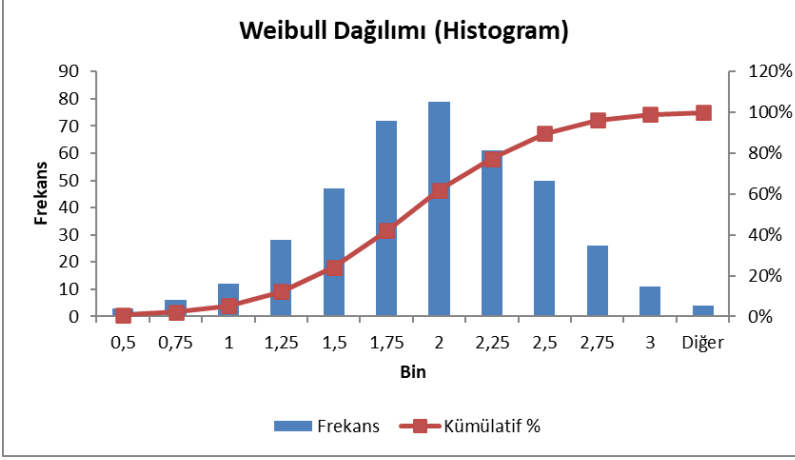
Bu işlemden sonra istenilen herhangi bir rastgele sayı dizisi kullanılarak Weibull dağılımına sahip bir rastgele değişken üretilmiş olur. Tablo 3' te örnek olarak, belirli rastgele sayılar kullanılarak ters dönüşüm tekniği ile üretilen Weibull dağılımına sahip rastgele değişken değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3. Weibull Dağılımı Değişken Değerleri ($b = 4, a = 2, v = 2$)

İterasyon (i)	Rastgele sayı (R_i)	Rastgele Değişken (X_i)
1	0,657897	1,60882
2	0,520514	1,797827
3	0,939148	1,001128
4	0,788037	1,397238
5	0,863457	1,237996
6	0,928403	1,044148
7	0,903761	1,128014
8	0,981443	0,739903
9	0,123503	2,40516
10	0,04577	2,650412

Rastgele sayı adedini 400 olarak aldığımız bir dizi için üretilen Weibull dağılımı değişken değerlerinin grafiği Şekil 2'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 0,5 adım aralığı ile oluşturulan sayı değerlerinin frekans dağılımı, Weibull dağılımına ait bir yapıda oluştuğu görülmektedir. Yukarıda verilen örnekte şekil parametresi ($b = 4$), ölçek parametresi ($a = 2$) ve konum parametresi ($v = 2$) olarak alınmıştır.

Şekil 2. Weibull Dağılımı Histogramı



2.1.3. Geometrik Dağılım Üretme Uygulaması

Her birisinin başarılı olma olasılığı p olan bağımsız deneyler yapılsın. Deney başarılı olana kadar gerçekleştirilen tekrar sayısını gösteren rastgele değişkene geometrik rastgele değişken denir. Geometrik dağılım kesikli bir dağılımdır ve olasılık kitle fonksiyonu $p(x) = (1 - p)^{i-1}p$ olarak hesaplanmaktadır. Buradan birikimli dağılım fonksiyonu $F(a) = \sum_{\text{tüm } x \leq a} p(x) = 1 - (1 - p)^x = r$ olarak hesaplanır. Birikimli dağılım fonksiyonunun tersi $x = F^{-1}(r) \Rightarrow x = \left\lceil \frac{\ln(u)}{\ln(1-p)} \right\rceil$ olarak bulunur.

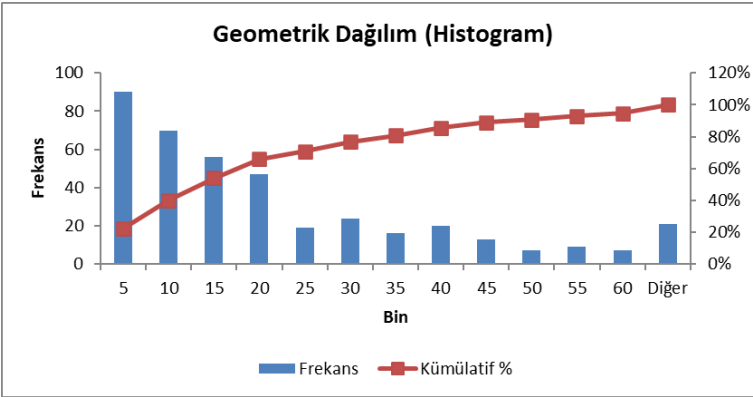
Bu işlemden sonra istenilen herhangi bir rastgele sayı dizisi kullanılarak Geometrik dağılımına sahip bir rastgele değişken üretilmiş olur. Tablo 4' te örnek olarak, belirli rastgele sayılar kullanılarak ters dönüşüm tekniği ile üretilen geometrik dağılımına sahip rastgele değişken değerleri gösterilmektedir. Olayın gerçekleşme olasılığını temsil eden değer ($p = 0,05$) olarak alınmıştır.

Tablo 4. Geometrik Dağılım Değişken Değerleri

İterasyon (i)	Rastgele sayı (R_i)	Rastgele Değişken (X_i)
1	0,31	23
2	0,97	1
3	0,07	53
4	0,96	1
5	0,12	41

Rastgele sayı adedini 400 olarak aldığımız bir dizi için üretilen geometrik dağılım değişken değerlerinin grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 5 adım aralığı ile oluşturulan sayı değerlerinin frekans dağılımı, geometrik dağılıma ait bir yapıda oluştuğu görülmektedir.

Şekil 3. Geometrik Dağılım Histogramı



2.2.Kabul-Ret Tekniği

Kabul-Ret tekniği, rastgele değişken üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu tekniğin amacı, özellikle birikimli dağılımın kapalı formda tersinin alınamadığı, rastgele değişkenin üretiminin zor veya pratik olmadığı durumlarda, belirli bir olasılık dağılımından rastgele sayılar üretmektir.

Kabul olasılığı yöntemin verimliliği açısından çok önemlidir. Önerilen dağılım hedef dağılıma yakınsa, kabul olasılığı daha yüksek olur, bu da daha az reddetme ve daha verimli bir örnekleme sağlar. Kabul-Ret tekniği, hedef ve

önerilen dağılım olasılıklarının oranına bağlı olarak her bir örnekleme olasılıksal olarak kabul veya reddederek oluşturulan örneklerin istenen dağılımı takip etmesini sağlayan bir tekniktir. Örnek olarak 0,25 ile 1 arasında düzgün dağılmış bir X rastgele değişkeni üretmek istersek aşağıdaki adımları gerçekleştirmemiz gerekmektedir.

- 1) 0-1 arasında bir rastgele sayı üret
- 2) Eğer $R \geq 0,25$ ise Kabul, $X = R$
- 3) Eğer $R \leq 0,25$ ise Ret, adım 1'e dön

2.2.1. Poisson Dağılım Üretim Uygulaması

Poisson dağılımı, sabit bir zaman aralığında meydana gelen olayların sayısını tanımlayan bir olasılık dağılımıdır. Poisson dağılımı genellikle birbirinden bağımsız olarak gerçekleşen seyrek olayları modellemek için kullanılır. Poisson dağılımı, çok kısa bir zaman aralığında birden fazla olayın meydana gelme olasılığının ihmal edilebilir olduğu seyrek olayların modellenmesi için en uygun dağılım modelidir (Schmeiser, 1980).

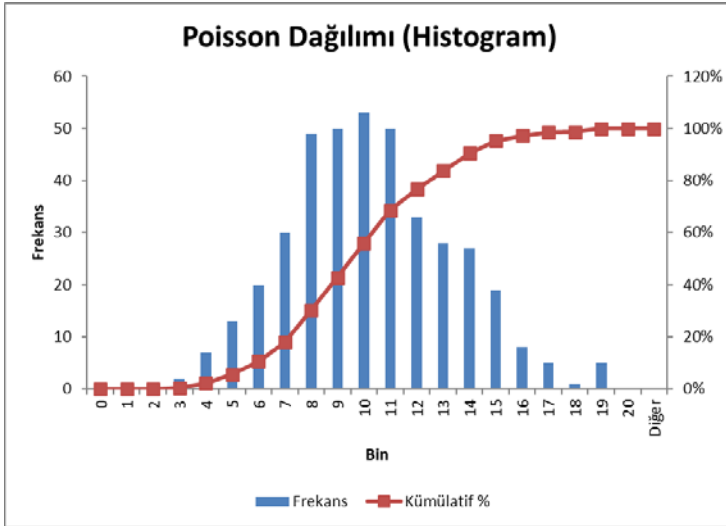
Poisson dağılımı kesikli bir rastgele değişkendir ve olasılık kitle fonksiyonu $p(x) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!}$, dir. Poisson rastgele değişken için ölçekleme sonrası kabul sınırı $P \leq e^{-\lambda}$ ile hesaplanır. Tablo 5'te λ değeri 1,4 olan poisson rastgele değişken için üretilen X rastgele değişken değerleri hesaplanmıştır. Böylelikle sınır değerimiz $P \leq e^{-1,4} = 0,246596$ olarak alınır.

Tablo 5. Kabul-Ret Tekniği ($\lambda = 1,4$)

İterasyon (n)	Rastgele sayı (R_{n+1})	Olasılık (P)	Kabul veya Ret	Rastgele Değişken (X_i)
0	0,02	0,02	Kabul	$X = 0$
0	0,82	0,82	Ret	
1	0,81	0,6724	Ret	
2	0,7	0,47068	Ret	
3	0,41	0,19297	Kabul	$X = 3$
0	0,14	0,14	Kabul	$X = 0$
0	0,33	0,33	Ret	
1	0,65	0,2145	Kabul	$X = 1$
0	0,05	0,05	Kabul	$X = 0$
0	0,72	0,72	Ret	
1	0,5	0,36	Ret	

Rastgele sayı adedini 400 olarak aldığımız bir rastgele sayı dizisi ile üretilen poisson dağılım değişken değerlerinin grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 0 ile 20 arasındaki her bir kitle değerlerinin frekans dağılımı, poisson dağılımına ait bir yapıda oluştuğu görülmektedir. Veri setinin ortalaması ($E[X] = 10$) olarak alınmıştır. Buradan da λ değeri ortalama değerine eşit olacağından dolayı $\lambda = 10$ olarak alınmıştır.

Şekil 4. Poisson Dağılım Histogramı



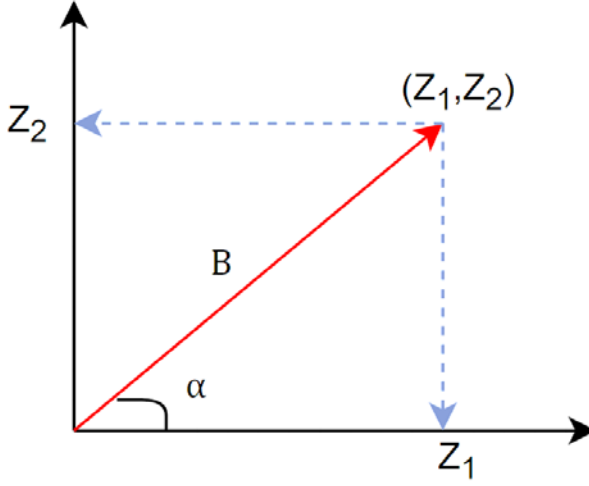
2.3.Özel Yöntemler

Ters dönüşüm tekniği ve Kabul-Ret teknikleri gibi genel yaklaşımların yanı sıra kesikli veya sürekli dağılıma sahip rastgele değişkenlerin her birisinin kendisine özgü yöntemler geliştirilmiştir. Örnek olarak kutupsal koordinatları kullanarak normal dağılıma sahip rastgele değişken üreten Marsaglia polar metodu (Marsaglia ve Bray, 1964), Erlang ve binom rastgele değişkeni üretmek için kullanılan konvolüsyon metotları ve bağımsız düzgün rastgele değişken çiftlerinden bağımsız standart normal dağıtılmış rastgele değişken çiftleri oluşturmak için kullanılan Box-Muller dönüşümü (Box ve Muller, 1958) gibi yöntemler verilebilir.

2.3.1. Normal Dağılım Üretme Uygulaması

Normal dağılım için birikimli dağılım formülünün kapalı formada tersini alamadığımız için normal dağılıma sahip rastgele değişken üretimi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Doğrudan dönüşüm yöntemi ile oluşturulmak istenilen iki tane (Z_1, Z_2) rastgele değişken olduğunu varsayalım. Bu rastgele değişkenlerin belirli bir kutupsal koordinat üzerinde Şekil 5'teki gibi gösterelim. Buradan $Z_1 = B \cos(\alpha)$ ve $Z_2 = B \sin(\alpha)$ ifadesi yazılabilir. Sonra ise $B^2 = Z_1^2 + Z_2^2$ eşitliğini 2 serbestlik derecesine sahip Ki-kare değişkenine yakınlştırırsak yarıçap $B = \sqrt{-2 \ln R}$ eşitliği ile ifade edilebilir. B yarıçapı ve α açısı birbirinden bağımsız olduğundan $Z_1 = \sqrt{-2 \ln R_1} \cos(2\pi R_2)$ ve $Z_2 = \sqrt{-2 \ln R_1} \sin(2\pi R_2)$ rastgele değişkenleri oluşturulur. Oluşturulan rastgele değişkenler standart normal dağılıma sahiptir.

Şekil 5. Kutupsal Koordinatlar



Eğer normal dağılıma sahip bir rastgele değişken üretilmesi isteniyorsa $X_i = \mu + \sigma Z_i$ eşitliği ile elde edilen standart normal dağılıma sahip değişkenden türetilebilir. Bu aşamadan sonra eğer Log-normal dağılıma sahip bir rastgele değişken üretilmek isteniyorsa $Y_i = e^{X_i}$ eşitliği ile üretilir. Tablo 6’da ortalaması (μ değeri) 0 ve standart sapması (σ) 1 olan standart normal rastgele değişken için üretilen X rastgele değişken değerleri hesaplanmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi rastgele sayı çiftlerinden X rastgele değişken çiftleri oluşturulmuştur.

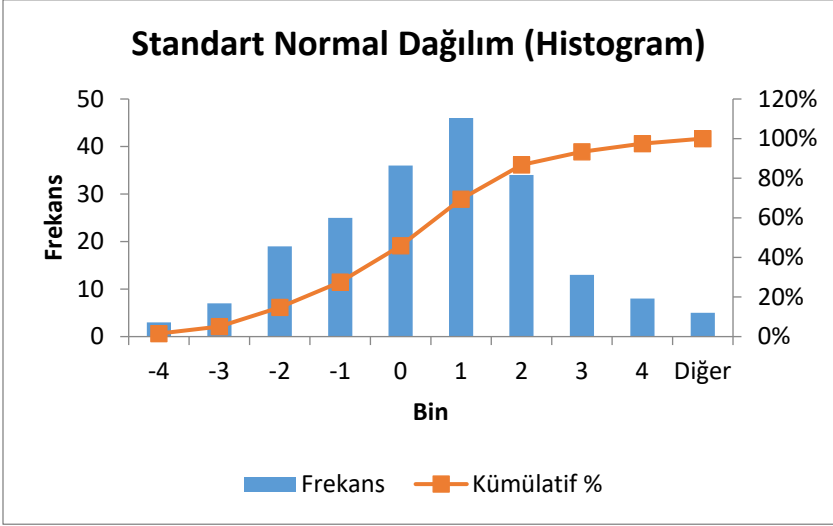
Tablo 6. Standart Normal Dağılım Üretme ($\mu = 0, \sigma = 1$)

İterasyon	$(R_{1,3,5...i})$	$(R_{2,4,6...i+1})$	$(X_{1,3,5...i})$	$(X_{2,4,6...i+1})$
1	0,74662982	0,52415290	-1,511312	-0,2311295
2	0,45183733	0,26244413	-0,196913	2,5133025
3	0,41886831	0,06770982	2,4032880	1,08894272
4	0,7475035	0,92718029	1,3688782	-0,6740195
5	0,9064298	0,03940030	0,8595012	0,21723365

Rastgele sayı adedini 400 olarak aldığımız bir rastgele sayı dizisi ile doğrudan dönüşüm metodu kullanılarak üretilen standart dağılım değişken değerlerinin grafiği Şekil 6’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi -4 ile +4 arasındaki her bir

aralık değerlerinin frekans dağılımı, standart normal dağılıma ait bir yapıda olduğu görülmektedir. Veri setinin ortalaması ($\mu = 0$) ve standart sapması ($\sigma = 1$) olarak alınmıştır.

Şekil 6. Standart Normal Dağılım Histogramı



3. SONUÇ

Sonuç olarak, bu çalışmada çeşitli rastgele olasılıksal değişken üretme tekniklerinin kapsamlı bir analizi ve değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Yaygın kullanıma sahip Ters dönüşüm tekniği, Kabul-Ret tekniği ve geliştirilen özel yöntemler incelenerek, güçlü ve zayıf yönleri ile farklı dağılımlarda uygulamaları gösterilmiştir. Bu teknikler kullanılarak kesikli veya sürekli rastgele dağılım değişkenleri oluşturulmuştur. Bu rastgele değişkenlerin frekans dağılımları incelenerek uygunluk oranları incelenmiştir.

Ters çevirme ve Kabul-Ret gibi klasik yöntemler sağlam ve geniş çapta uygulanabilirliği bulunmaktadır. Fakat rastgele değişkenlere özgü geliştirilen özel yöntemler ise güçlü bir alternatif ve bazı durumlarda gereklilik olarak karşımıza

çıkılmaktadır. Bu kapsamda rastgele değişken üretme alanında gelecekteki araştırmalar için temel zorlukların ve potansiyel yolların belirlenmesi için mevcut yapıların analizi önemli bir rol oynamaktadır.

KAYNAKÇA

- Banks, J. (1998). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. New York: John Wiley & Sons.
- Banks, J., Carson II, J. S., & Barry, L. (2005). *Discrete-event system simulation* (Dördüncü Baskı), New Jersey: Prentice Hall Press
- Box, G. E., & Muller, M. E. (1958). A note on the generation of random normal deviates. *The annals of mathematical statistics*, 29(2), 610-611.
- Devroye, L. (2006). Nonuniform random variate generation. *Handbooks in operations research and management science*, 13, 83-121.
- Marsaglia, G., & Bray, T. A. (1964). A convenient method for generating normal variables. *SIAM review*, 6(3), 260-264.
- Law, A. M., Kelton, W. D., & Kelton, W. D. (2007). *Simulation modeling and analysis* (Vol. 3). New York: Mcgraw-hill.
- Ross, S. M. (2014). *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists* (Beşinci Baskı). San Diego: Academic Press.
- Schmeiser, B. W. (1980). Random variate generation: A survey. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 79-104

ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİ VE TÜRKİYE

Hüseyin ŞAHİNER¹

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler daha çok enerji ihtiyacını açığa çıkarırken, enerji kaynaklarının da sürdürülebilir olması göz ardı edilemeyecek bir sorundur. Kaynakların sürdürülebilirliği kadar temiz çevrenin de sürdürülebilir olması gerekmektedir. Nükleer reaktörler sıfır karbon salınımı (enerji kimyasal proseslerle değil, nükleer reaksiyonlarla elde edilir), yüksek güç yoğunluğu (birim hacimde üretilen enerji), yüksek kapasite faktörü ve ekonomik olması ile ön plana çıkmaktadır. Ancak nükleer reaktörler için hala nükleer atık, termodinamik verim, doğadaki uranyumun miktarının sınırlı olması, nükleer silahlanmaya karşı direnç gibi sorunlar mevcuttur. Uluslararası bir çaba olarak kurulan Generation IV International Forum (GIF), bu sorunların üstesinden gelebilecek yeni nesil altı reaktör tasarımı belirlemiştir (URL1, 2023). Bu tasarımlardan bir tanesi de Ergimiş Tuz Reaktörü (ETR)' dir.

ETR' nin tarihi gelişiminde birçok kaynak çalışma olsa da ABD' de Oak Ridge ulusal laboratuvarında (ORNL) geliştirildiği söylenebilir. Homojen yakıtlı (tercihen sıvı yakıt) reaktör geliştirme çalışmaları daha sonra yüksek sıcaklıklarda eriyik tuzların kullanımını ve sıvı yakıtlı reaktörlerin uygulamaya dökülebileceğini göstermiştir. Bu doğrultuda ORNL' de Deneysel Ergimiş Tuz Reaktörü (MSRE) 1960' lı yıllarda

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Nükleer Enerji Mühendisliği, hsahiner@sinop.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3191-1590.

geliştirildi ve ilk defa 1965 yılında kritik² hale getirildi. 1966 yılında ise tam güçte (7.34 MW) çalıştırıldı. 1969 yılına kadar da çalışmaya devam eden reaktör yapısal malzemelerindeki radyasyon hasarı nedeni ile durdurulmuştur (Bulmer vd., 1956). GIF (Generation IV International Forum)' in eforuyla birlikte son yıllarda bu reaktörlere de ilgi yeniden artmıştır (URL1, 2023). Bununla birlikte birçok ülkede ETR çalışmaları ile bu reaktörler ticari boyuta gelmeye çok yaklaşmıştır. ABD, Rusya, Fransa, Kanada, Japonya, Çin, Güney Kore, Çek Cumhuriyeti ve İsviçre gibi ülkeler kendi tasarımları ile ETR reaktörlerini ticari boyuta getirmeye için çalışmalar yürütmektedir (Generation IV International Forum [GIF], 2014). Geliştirilen tasarımlardan ticari boyutta enerji üretecek tasarım olarak Fransa' nın geliştirdiği EVOL (Brovchenko vd., 2019) tasarımı öne çıkmaktadır.

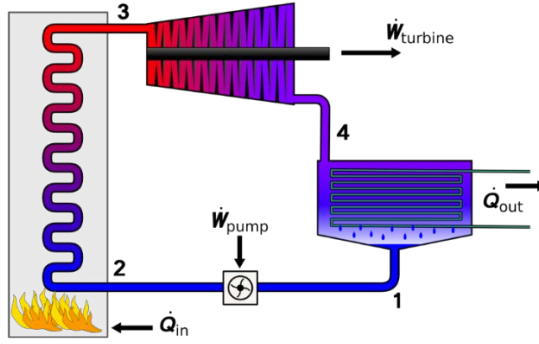
2. ETR'LERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Enerji üretiminde termodinamik sistemlerin kullanıldığı reaktörlerin genel olarak çalışma prensipleri aynıdır. Bu prensip, bir ısı kaynağından üretilen ısının buhara dönüştürülmesi, bu buharın oluşan yüksek basınçla bir türbini döndürmesi, türbin çıkışında basıncı düşen buharın yoğunlaştırılarak su haline getirilmesi ve pompa ile tekrar ısı kaynağına gönderilmesi döngüsünden oluşur. Bu esnada buharın döndürdüğü türbine bir elektrik jeneratörünün bağlanması ile dönme hareketi elektrik enerjisine çevrilmiş olur. Bu enerji döngüsü Şekil 1' de gösterilmiştir. Aslında bu işlem gündelik hayatta kaynayan demlikteki buhar üretimi ile aynıdır. Burada tek fark oluşan buharın kapalı bir sistemde tutulması ile basıncının artması sağlanır. Basıncı artan buhara mekanik iş yaptırma özelliği kazandırılmış olur. Termodinamik olarak enerji üreten

² Kritiklik: Zincir reaksiyonlarının kendi kendine devam edebildiği durum.

sistemlerde ısının kaynağı istenildiği gibi değiştirilebilir. Termik santrallerde bu işlem kömür yakılması ile üretilir. Kömürün yakılması kimyasal bir işlemdir. Yani ısı enerjisi kimyasal bir işlem sonucunda açığa çıkar. Biyokütle santralleri de benzer şekilde ısı üretimi sağlar. Fosil yakıt kullanarak ısı üretimi gerçekleştiren sistemlerin tamamı Şekil 1' de verilen döngü ile elektrik enerjisi üretilir.

Şekil 1: Termodinamik sistemler için enerji dönüşümü³. (1-Yoğuşan buhar (su), 2-Isı kaynağına gönderilen su, 3-Yüksek basınçlı buhar, 4-Düşük basınçlı buhar veya buhar-su karışımı)



Kimyasal süreçlerle fosil yakıtların yakılması (karbonun oksijenle yakılması) yani karbon atomunun oksijen molekülü ile kimyasal tepkime vermesi ile Hess yasasına göre yaklaşık 4.1 eV enerji üretilir (Davik, 1980). Buna karşın ısı üretimi nükleer süreçlerle de üretilebilir. Nükleer süreçlerde bir fisil⁴ atomun çekirdeğinin iki veya daha fazla çekirdeğe bölünmesi ile enerji üretimi gerçekleşir. Uranyum-235 çekirdeğinin fisyon sonucu yaklaşık 180-200 MeV enerji açığa çıkmaktadır. Bu enerji kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan enerjinin yaklaşık 46 milyon katıdır. Bir atomdan elde edilebilecek kimyasal reaksiyonlar ve nükleer reaksiyonlar arasındaki bu fark nükleer

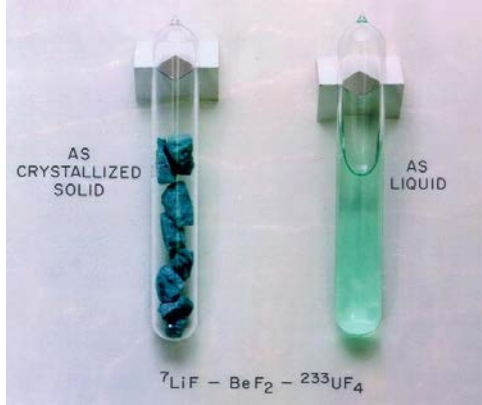
³ Şekil anonim olarak CC BY-SA lisansı ile korunmaktadır.

⁴ Fisil: Nötron soğurduğunda çekirdeği iki veya daha fazla çekirdeğe bölünebilme özelliği

reaktörlerden enerji üretimini kaçınılmaz kılmaktadır. Ancak ısı kaynağı ile türbinler arasında su kullanan reaktörlerde bazı teknik sorunlar vardır. Bu sorunların kaynağında yakıtın genellikle seramik (UO_2 katı) formda olması yatmaktadır. Katı yakıtlı nükleer reaktörlerde nükleer reaksiyonlar yakıtın katı formunu bozmaktadır. Katı formu bozulan yakıtta yeterince ısı iletimi meydana gelmezse yakıtın içerisinde lokal erimeler (sıvı form) meydana gelebilir. Bu durum önce reaktörün kontrolünün kaybedilmesine, sonra da kaza durumuna yol açabilir. Yakıtı halihazırda sıvı olan bir reaktör olduğunda ise bu durum çözülmüş olur (Bulmer vd., 1956).

Tuzlar yapısal olarak oda sıcaklığında katı halde iken yüksek sıcaklıklarda sıvı hale geçerler. Uranyumun flor ile oluşturacağı tuz halinin yakıt olarak kullanılması ve reaktörün yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması fikri ile ETR'lerin çalışmaları başlamış olur. ETR'lerde yakıtın kendisi aynı zamanda soğutma sıvısı olarak iş görmektedir. Şekil 2' de $LiF-BeF_2-UF_4$ (FLiBe) tuz FLiBe ile oluşturulmuş yakıt tuz karışımının katı ve sıvı hali gösterilmektedir.

Şekil 2: FLiBe tuzunun katı ve sıvı hali (ORNL fotoğrafı)

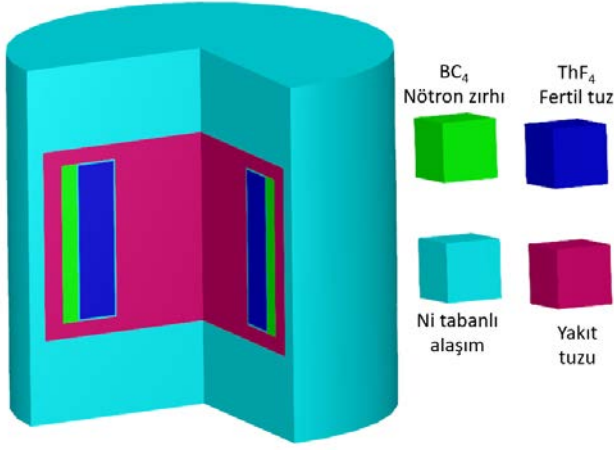


ETR'lerde yakıt tuzunun yanında termal iletkenliği artırılması ve reaktöre yüklenecek fisil madde miktarının

azaltılması için yakıtın içine florür, klorür gibi diğer elementlerin tuzları da eklenerek yakıt-tuz sistemleri oluşturulabilir (Rosenthal vd., 1972; Sohal vd., 2010). ETR' lerde yakıt aynı zamanda soğutma sisteminin de kendisidir. Bu da yakıtın yakıt kuru dışında ısı eşanjörlerinde dolaşacağı anlamına gelir.

ETR' ler termal (nötronların enerjilerinin termal seviyelerde olduğu durum) olarak çalışabileceği gibi hızlı (nötronların enerjilerinin termal üstü enerjilerde olduğu durum) olarak da çalıştırılabileceği gösterilmiştir (Sahin vd., 2023). Reaktör kuru içerisinde yakıt ve tuzun homojen karışımı homojen reaktör tasarımını oluşturur (Bulmer vd., 1956). Nükleer reaksiyonlar ile yakıtta ısı üretimi gerçekleşir. Isınan yakıt-tuz karışımı reaktör korunun dışına çıkarak ısı eşanjörlerine gider. Burada ısı değişimi ile bir ikinci tuz döngüsü (soğutma döngüsü), buhar oluşumu için üçüncü bir su döngüsüne buhar üretimi için gönderilir. İkinci bir tuz döngüsü kullanımının amacı radyasyon taşınımını hapsedmektir. Birinci döngüde yakıtın kendisi de olacağı için nötron üretimi bu sıvı içerisinde devam etmektedir. Nötronların ortamda oluşu temas ettiği (reaksiyon yaptığı) diğer malzemeleri de radyoaktif hale getirir. Ancak radyoaktif malzemeler temas ettikleri bir malzemeyi radyoaktif yapmazlar sadece radyasyon hasarı oluştururlar. Böylelikle üçüncü döngüdeki su radyoaktiviteden uzak bir soğutma sıvısı görevi görür. Üçüncü döngüdeki suda ısı eşanjörü sayesinde buhar üretimi gerçekleşir ve türbinleri döndürebilecek mekanik enerji oluşur. Bu dönem hareketi daha önce de bahsedildiği gibi jeneratör yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Şekil 3' silindirik basit geometriye (nötronik hesaplamalar için geliştirilmiştir) sahip bir ETR reaktörünün geometrisi ve reaktör korunun temel bileşenleri verilmiştir.

Şekil 3: ETR ana bileşenleri



Bahsedilen termodinamik süreçlerde sıcaklıkların yüksek değerlere ulaşması termodinamik verimi artırır. Yakıt-tuz karışımlarının erime ve kaynama sıcaklıkları arasında çok fark olması (FLiBe için yaklaşık 1000 derece) çalışma aralığının da yüksek olması anlamına gelir (Williams vd., 2006). Bununla birlikte her mühendislik sistemlerinin avantajları ve dezavantajları olduğu unutulmamalıdır.

3. ETR'LERİN AVANTAJLARI

ETR'lerin yakıtı hali hazırda eriyik olduğu için katı yakıtlı diğer reaktör türlerindeki yakıt erimesi problemi ortadan kaldırılmış olur. Yakıtın eriyik veya sıvı formda olması yakıtın homojen olmasını sağlar. Yakıtın homojen olması ise yakıtta bölgesel yanmalar olmasının önüne geçer. Bundan dolayı nükleer yakıtta yanma oranları (burnup) daha homojen olur. Bölgesel yanmaların farklı olmadığı bir reaktörde ise yakıt karıştırma (fuel shuffling) işlemine ihtiyaç duyulmaz. Yakıt karıştırma işlemi katı yakıtlı reaktörler için uranyum-235 çekirdeğinden maksimum fayda için gereklidir.

Aslında karıştırma işlemi sıvı yakıt-tuz sisteminin birinci döngüde dönmesi ile gerçekleşmesi anlamına gelir. Böylelikle yakıtın içerisinde duran uranyum-235 çekirdeklerinin tamamından yararlanılabilir. Katı yakıtlı reaktörlerde ise yakıt hücresinin şeklinde çatlaklar oluşması ile termal iletkenliği düştüğü için yakıtın içerisinde uranyum-235 miktarı bitmese bile reaktörden çıkarılması gerekir. Çıkarılan yakıt demetleri artık kullanılmış yakıt olarak depolanmaları gerekir. ETR'lerde bu durum ortadan kaldırıldığı için nükleer atık miktarında da azalma sağlanır.

Ergimiş yakıt reaktör çalıştırılırken beklenmedik bir sıcaklık artışına maruz kaldığında sıvı yakıtta genleşme meydana gelir. Reaktör kuru üzerine yerleştirilebilecek bir genleşme tankı ile genleşen yakıt burada toplanabilir. Genleşen yakıt genleşme tankında toplanması ile reaktör kuru içerisinde fisil yakıt miktarı azalacaktır. Fisil yakıtın azalması ise nükleer reaksiyonların miktarında da azalma meydana getirir. Nükleer reaksiyonların azalması üretilen ısının da azalması demektir. Üretilen ısı azaldığında ise genleşme tankındaki yakıt tekrar reaktör koruna aktığında reaktör kuru içerisinde nükleer reaksiyonların normal çalışma koşullarına dönmesini sağlar. Sıvıların ısınca genleşmesi ve akışkan olması ETR' ler için kendi kendini kontrol edebilen pasif bir güvenlik mekanizması olur. Burada bahsedilen güvenlik mekanizmasına ek olarak tahliye tankı ile de güvenlik sağlanabilir. Reaktör korunun altında (yer çekiminin etki edebileceği bir bölgede) tahliye tankı sisteme dahil edilebilir. Tahliye tankı ile reaktör kuru arasındaki bağlantıya erime sıcaklığı reaktörün çalışma sıcaklığından çok daha yüksek bir sıcaklıkta farklı bir tuzdan tıpa amaçlı kullanılabilir. Buradaki tuzun erime sıcaklığı çalışma sıcaklığından daha yüksek seçileceği için reaktör normal şartlarda çalışırken tuz katı formda olur. Çalışma sıcaklıklarının üstüne kontrolsüz bir çıkış olduğunda ise bu sıcaklık tıpa olarak kullanılan tuzun erime

sıcaklığına ulaştığında tıpa erir ve tahliye kendiliğinden başlar. Tahliye tankları yakıt ile dolduğunda, tankın geometrisinin yakıtın tekrar kritik olmayacak bir geometriye sahip olması gerekir. Bu güvenlik fonksiyonunda işi tamamen yer çekimi yerine getirir. Böylece pasif bir başka güvenlik sistemi de ETR'lerde uygulanabilir.

Pasif güvenlik sistemlerinin yanında aktif güvenlik sistemleri de ETR'lere kolaylıkla uygulanabilir. Yakıt, sıvı bir yakıt-tuz karışımından oluştuğu için anlık olarak veya zaman adımlarıyla birlikte karışımın içerisindeki yakıt-tuz konsantrasyonu ayarlanabilir. Konsantrasyonun ayarlanabilir olması nükleer reaksiyonların birim zamandaki miktarının da ayarlanmasını sağlar. Bu şekilde reaktörün içerisindeki yakıt miktarı azaltılarak veya tuz miktarı artırılarak reaktörde gerçekleşen nükleer reaksiyonlar yavaşlatılabilir ya da durdurulabilir. Benzer şekilde reaktöre düzenli olarak taze yakıt yüklemesi reaktör kapatmaya gerek kalmadan yapılabilir. Bu görevi yerine getirmek için reaktör korunun dışında kimyasal ayrıştırma işlemlerini gerçekleştirecek bir sisteme ihtiyaç vardır. Bu sistem kimyasal ayıklama sistemidir. Bu sistem sayesinde reaktör koru dışında dönen yakıt-tuz karışımından tıp (görüntüleme), sanayi (tahribatsız muayene), gibi sektörlerde ihtiyaç duyulabilecek radyoaktif izotoplar kimyasal olarak ayrıştırılabilir. Faydalı olabilecek radyoaktif izotopların ayrıştırılabileceği gibi nükleer reaksiyonlar açısından zararlı olabilecek çekirdeklerin de sistemden uzaklaştırılması sağlanabilir. Bazı atom çekirdeklerinin nötron soğurma olasılıkları uranyum-235 in nötron soğurma olasılığından daha yüksektir. Bu çekirdeklerin reaktörde kalması reaktörün içindeki nötron ekonomisi açısından büyük kayıptır.

Reaktörün yakıtının homojen olması reaktör yakıtının içerisine fertil⁵ yakıtın da eklenmesine kolaylık sağlar. Fertil yakıt olarak kullanılabilen önemli bir aday toryumdur. Toryumun kütle numarası 232' dir. Bir nötron soğuran toryum-232 önce protaktinyum-232' ye dönüşür. Protaktinyum-232 ise beta ışınması yaparak uranyum-233' e dönüşür. Bu radyoaktif bozunma seri sonucunda fertil olan toryum-232' den, fisil olan uranyum-233 meydana gelir. Uranyum-233 ile uranyum-235 kimyasal olarak aynı özelliklere sahip olmasına rağmen uranyum-233, uranyum-235' den iki nötron daha azdır. Ek olarak uranyum-233' ün fisil özellikleri uranyum-235' den daha iyi bir izotoptur. Nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilir. Dolayısıyla ergimiş tuz reaktörleri toryum kullanımı ile kendi yakıtını üretebilen reaktörler haline getirilebilir. Uranyum-233' ün sadece iki nötron daha az olması ise nükleer reaktörlerde yarılanma ömrü çok daha kısa fisyon ürünlerinin oluşmasına neden olur. Yarılanma ömrü çok daha kısa nükleer atık çevreye daha az zararlı demektir.

Nükleer reaksiyonlar sonucu reaktörde oluşacak güçlü bir nötron soğurucu olan ksenon-135, gaz formunda olması da avantajlardan bir diğeridir. Ksenon-135 gibi gaz formunda olan istenmeyecek atom çekirdeklerinin sıvı ortamdan fiziksel olarak ayrıştırılması kimyasal süreçlerden daha kolay olacaktır (Andrews vd., 2021).

Yakıt olarak doğal uranyum veya zenginleştirilmiş uranyum kullanan reaktörlerin içerisinde uranyum-238 izotopu önemli miktarda bulunmaktadır. Uranyum-238 reaktör içerisinde üretilen nötronlardan soğurduğunda uranyum-239 oluşur. Uranyum-239 ise kararsız bir çekirdek olduğu için başka kararsız çekirdek olan neptinyum-239' a bozunur. Neptinyum-239 da

⁵ Fertil: Fisil olmayan, ancak nötron soğurduğunda fisil bir atom çekirdeğine dönüşebilme özelliği

bozularak plutonyum-239' u meydana getirir. Plütinyum-239 nükleer silah malzemesi olarak kullanılabilen bir izotoptur. ETR' lerde yakıt içeriğinde uranyum-233 kullanılması, silah amaçlı kullanılacak plütinyum-239 izotopunun oluşmasını da engellemektedir. Böylece ETR' ler doğal olarak silahlanmaya karşı yayılma direnç özelliği olan reaktörler olmuş olurlar.

4. ETR'LERİN DEZAVANTAJLARI

Toryum içerikli reaktörlerde (kendi yakıtını üretebilen üretken reaktör) uranyum-233 kullanılacaksa, ETR' lerin başlangıç için başka bir nükleer yakıt ile başlaması gerekmektedir. Bunun nedeni uranyum-233' ün doğada bulunan bir izotop olmamasıdır (Betzler vd., 2017). Yakıtın başlangıçta doğada bulunur olmaması ETR' lerin dezavantajlarının başında gelir.

ETR'lerde yakıtın içinde aynı zamanda tuz da olacağı için tuzu oluşturulan tüm atomlar radyasyon ışınlanmasına maruz kalırlar. Yakıtın içeriğinde bulunan tuz, yakıttan açığa çıkacak ekstra nötronlarla reaksiyon verdiklerinde nükleer reaksiyonlara katılmış olurlar. Reaktörde kullanılan tuzların içerisinde LiF (lityum tuzu) kullanılması reaktörde trityum oluşumuna sebep olur. Trityum hidrojenin iki nötronu izotopudur ve kimyasal olarak hidrojen ile aynı davranışı gösterir. Florür ile TF (HF-hidrojen florür) bileşiği yaparak güçlü bir asit oluşturur. TF bileşiğinin etkilediği asidik ortam reaktörün yapısal malzemelerinde önemli bir korozyon etkisi meydana getirir (Andrews vd., 2021). Lityumun doğada üç nötronlu ve dört nötronlu olmak üzere iki izotopu vardır. Li-6 nötronla trityum oluşturan reaksiyonu egzotermik reaksiyonken li-7' nin reaksiyonu endotermik reaksiyondur. LiF tuzu lityum-7 izotopu ile oluşturulduğunda reaktörün içinde trityum üretim miktarı azalır. Trityum üretimine ek olarak yakıtın fisyon sonucu

oluşturacağı fisyon ürünleri (yeni atom çekirdekleri) yeni tuz bileşenleri oluşturabilirler (Betzler vd., 2017). Yeni oluşan tuzlar eğer çalışma sıcaklığından daha yüksek erime sıcaklığına sahipse tuz çökelekleri oluşabilir. Bu çökelekler sıvı yakıtın içerisinde katı partiküllerin oluşmasını tetikler. Diğer bir deyişle akışkan yakıtın akışkan özellikleri değişebilir (Delpech vd., 2009). Akışta meydana gelecek değişiklikler reaktörde kararsız durumlara sebep olabilir. ETR'lerde sıvı yakıtın hareketli olması, sıvı yakıtın içindeki gecikmiş nötron üreteçlerinin⁶ akışkan ile sürüklenmelerine sebep olur. Gecikmiş nötronlar reaktör kontrolü için önemli bir parametredir (Betzler vd., 2017). Yakıtın reaktör kuru dışına da çıkması reaktivite kaybına yol açar. Reaktivite kaybı da reaktörü kararsız duruma getirebilir (Shen vd., 2018)

Katı yakıtlı reaktörlerde radyoaktif fisyon ürünleri yakıtın içerisinde hapsolürken, ETR'lerde fisyon ürünleri yakıt ile reaktör korunun dışına çıkmaktadır. Radyoaktivitenin reaktör korunun dışına çıkması ekstra zırhlama önlemlerine ihtiyaç duyulması anlamına gelir. Bu zırhlama hem canlı ve çevre için hem de reaktörün yapısal bileşenlerini korumak için gereklidir.

Ticari anlamda kullanılan katı yakıtlı nükleer santrallerde dünya yeterince tecrübeye sahiptir. Ancak sıvı yakıtlı reaktörlerde yeterince tecrübe yoktur ve komplekslikler çoktur. LiF+ThF tuzunun özellikleri yakıt için kullanılan tuzlara göre yeterince bilinmemektedir. Yüksek sıcaklıklarda bu tuzların korozyon etkileri yeterince çalışılmamıştır. Yüksek sıcaklıklarda yapısal malzemelerin nasıl davranacağı da açık değildir. Bütün bu dezavantajların yanında bu zorlukların etkilerini önceden tahmin edecek bilgisayar programlarının eksikliği de önemli bir dezavantajdır (Betzler vd., 2017).

⁶ Gecikmiş nötron üreteçleri: Fisyon sonucu oluşan büyük çekirdekler nötronca zengin çekirdeklerdir. Bu çekirdekler zaman içerisinde dışarıya nötron yayarlar.

5. ETR'LERDEKİ AR-GE FAALİYETLERİ

ETR' ler ile ilgili Türkiye de dahil birçok ülkede araştırma ve geliştirme faaliyetleri hızla devam etmektedir. Akademik anlamda yapılan yayınların artarak devam etmesi bunun açık bir göstergesidir. ETR' lerin ticarileşmesi için de birçok yüklenici firmalar bu araştırmaları desteklemektedir. Kanada firmalarından Terrestrial Energy (URL2, 2023) ve Moltex Energy (URL3, 2023) sektördeki önemli şirketlerdendir. Çin' de Şangay Uygulamalı Fizik Enstitüsü (SINAP), 2011'de toryum kullanımına yönelik toryum ETR' leri (TMSR) programını yeniden başlattı. Bu program, Gen IV ETR' lerin güvenli ve ekonomik kullanımı ile toryum kaynağının verimli kullanımını sağlamayı amaçlamaktadır. TMSR prototipi inşasını biten ve çalışma izni alınmış 2 MW_{termal} güce sahip bir reaktördür. 2030 yılına kadar faaliyeti beklenen smTMSR-400 reaktörü çalışmaları da hızla devam etmektedir (URL4, 2023). Çek Cumhuriyeti' nde ETR' lerin kimyası ile ilgili yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar başlangıçta nükleer atıkların ETR' ler ile yakılması araştırmaları ile başlamıştır. Daha sonra bu çalışmalar Th-U yakıt çalışmalarına evrilmiştir. Çek Cumhuriyeti Ulusal Araştırma Enstitüsü tarafından özellikle yürütülen çalışmalar bulunmaktadır (Kostall vd., 2016). Avrupa Komisyonu'nun Ortak Araştırma Merkezi (JRC), 2004'te sıvı tuz reaktörü (MSR) teknolojisi üzerine araştırmaları desteklemeye başlamıştır. Euratom fonlu projelerde kullanılan tesislerin geliştirilmesini içeren çalışmalar için Joint Research Centre Molten Salt Database (JRCMSD) adlı kapsamlı bir termodinamik veri tabanı oluşturulmuştur. Bu çalışmalar, Avrupa içinde ve dışında birçok kuruluşla iş birliği içinde ve florür ve klorür tuzları da içeren çeşitli yakıt ve soğutucuları ele alarak devam etmektedir (URL5, 2023). Fransa' nın Ulusal Araştırma ve Bilim Merkezi (CNRS) 20 yıldan daha uzun bir süredir hızlı ETR' ler üzerinde Avrupa ortaklığı ile çalışmalar yapmaktadır. Ticari olarak yapımı yakın bir reaktör

tasarımı olan EVOL 18 m³ hacimdeki florür yakıt tuzu kullanarak 700°C ortalama yakıt tuzu sıcaklığında çalışan 3000 MW_{termal} bir reaktördür. 2018' den itibaren küçük modüler ETR' ler üzerine faaliyetler yoğunlaşmıştır. U-Pu yakıt döngüsünde bir üretici veya aktinit yakıcısı olarak çalışması ve klorür tuzu kullanması planlanmaktadır (Gerardin vd., 2018).

Türkiye' de de son yıllarda ETR' ler üzerine araştırmalar artmaktadır (Tiftikci vd., 2022; Sahin vd., 2023). Bu araştırmalarda daha çok U-Th (fisil-fertil) yakıt tuzlarına odaklanılmıştır. Türkiye toryum rezervi açısından tüm Avrupa' nın sahip olduğundan daha fazla toryum rezervine sahip olması bir avantajdır. Dünyada uranyum madeninin kısıtlı olması ve uranyum madenindeki uranyum-235 miktarının az olması nükleer yakıt için zenginleştirme gerektirmesi nükleer reaktörler için gelecekte açığa çıkacak önemli sorunlardandır. Bu soruna rağmen temiz enerji, sıfır karbon, ekonomiklik, verim düşünüldüğünde nükleer reaktörleri terk etmek biraz zor olacaktır. Toryumun ETR' lerde kullanılması kendi yakıtını üreten bir reaktör tasarımı oluşturması Türkiye adına önemli bir avantaj olmaktadır.

Türkiye' de elektrik tüketiminin yaklaşık %49' unun sanayi tarafından (Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Genel Müdürlüğü [TEDAŞ], 2023) gerçekleştiriliyor olması enerji üretiminde sanayinin önemli bir paydaş olduğu sonucunu doğurur. Ancak Türkiye' deki sanayicilerin bunun farkında olması onların temiz enerji teknolojilerine ve nükleer enerjiye verdikleri önemden anlaşılabilir. Bu konuda Ankara Sanayi Odası özellikle ETR'lerle ilgili çalışmalara dahil olma fırsatı aramaktadır. Buna ek olarak OSTİM Organize Sanayi Bölgesi ile Ankara Elektrik Mühendisleri Odası (EMO) enerji üretimi ve ETR'ler ile ilgili çalıştaylar yapmakta ve desteklemektedir (URL6, 2023). Yine kamu kuruluşu olan Enerji Bakanlığı, Nükleer Düzenleme Krumu (NDK), Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK), Türkiye Bilimsel ve

Teknolojik Araştırma Kurumu-Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK-MAM) gibi kurumlar da ETR'ler ile ilgili araştırmalar yapmakta ve destekler sunmaktadır. Enerji Bakanlığı konu ile ilgili yetişmiş uzman ihtiyacını karşılamak üzere eğitim desteği vermektedir. NDK eriyik yakıtlı reaktörlerin lisanslama çalışmaları için alt yapı oluşturmaktadır. TÜBİTAK-MAM, ETR'ler ile ilgili yoğun çalışmalar yapmakta ve sürdürmektedir. TENMAK son yıllarda önemli destek çağrılarını açmaktadır. Tüm bu destek ve araştırma faaliyetleri Türkiye' de kurulacak toryum tabanlı ETR için önemli teknolojik hazırlık seviyelerine hizmet edecektir.

Bu alt yapının gerçekleştirilmesi için üniversite ve araştırma merkezlerinin temel hesaplama ve teori, çözüm geliştirme gibi alanlarda yoğun destek ve araştırmaları gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Nötronik ve termalhidrolik analizleri bütünlük olarak gerçekleştirebilecek araçlara duyulan ihtiyaçlar üniversitelerde geliştirilebilir (Park ve Munk, 2022). Yüksek sıcaklıklarda tuzların kimyasal ve termofiziksel özellikleri, tuzların fisyon ürünleri ile çözelti oluşturma davranışlarının öncelikli ve yoğun bir şekilde çalışılması gerekmektedir (Barnes vd., 2019; Ezell vd., 2021). Çevrimiçi yakıt ayrıştırma sisteminin etkisi çok bilinmediğinden geliştirilmesi önem arz etmektedir. Zırhlama çalışmaları yakıt reaktör korunun dışına çıkan bir reaktör türü için gerekmektedir. Bu zırhlama sadece çevreye radyasyon yayılımını engellemek için değil aynı zamanda reaktörün diğer yapısal, mekanik, elektronik bileşenlerini de korumak için olmalıdır.

Türkiye sanayisine reaktörün fiziki inşası, montaj süreçleri ve malzeme geliştirme alanında önemli görevler düşer (Danon vd., 2020). Üretme ve ticarileştirme aşamasında sanayi sektörü önemli rol oynayacağı gibi ekonomik alanda da önemli kazanç elde eder. Test ve doğrulama aşamalarında reaktör performansının doğrulanmasında önemli uzmanlıklar sunarak

güvenilirlik ve güvenlik standartlarında aktif rol oynar. Üniversite ve araştırma merkezlerinde gerçekleştirilecek ar-ge faaliyetlerinin mühendislik aşamalarında katkı sağlayabilir. Ancak bunun için teknolojik bilgi ve uzmanlık, finansal hazırlık, regülasyon ve lisanslama bilgisi, güvenlik standartlarına uyum, iş birlikleri ve çalışma ağları oluşturma yeteneği, risk yönetim yeteneği ve proje yönetim yeteneklerine hazırlıklı olmalıdır. Bütün bunların sonucunda ticari anlamda enerji üreten bir ETR ile sanayide verimlilik artışı, yenilik ve teknoloji, enerji verimliliği, piyasa payı artışı gibi çok ciddi kazanımlara sahip olur. Bu kazanımların yan ürünleri olarak sürdürülebilir ve çevresel verimlilik, iş birlikleri/stratejik ortaklıklar, maliyet azaltma stratejileri, eğitim ve insan kaynakları yönetimi gibi pek çok kazanç da gerçekleşir.

KAYNAKÇA

- ANDREWS, H. B., MCFARLANE, J., CHAPEL, A. S., EZELL, N. D. B., HOLCOMB, D. E., DE WET, D., ... HUMRICKHOUSE, P. W. (2021). Review of molten salt reactor off-gas management considerations. *Nuclear Engineering and Design*, 385, 111529. doi:10.1016/j.nucengdes.2021.111529
- BARNES, J., COUTTS, R., HORNE, T. VE THAI, J. (2019). Characterisation of molten salts for their application to Molten Salt Reactors. *PAM Review Energy Science & Technology*, 6, 38-55. doi:10.5130/pamr.v6i0.1546
- BETZLER, B. R., POWERS, J. J. VE WORRALL, A. (2017). Molten salt reactor neutronics and fuel cycle modeling and simulation with SCALE. *Annals of Nuclear Energy*, 101, 489-503. doi:10.1016/j.anucene.2016.11.040

- BULMER, J.J., GIFT, E.H, HOLL, R.J, JACOBS, A.M., JAYE, S., KOFFMAN, E., MCVEAN, R.L., OEHL, R.G., ROSSI, R.A. (1956), Fused Salt Fast Breeder, Rep. ORNL-CF-56-8-204, Oak Ridge Natl Lab., TN.
- BROVCHENKO, M., KLOOSTERMAN, J.-L., LUZZI, L., MERLE, E., HEUER, D., LAUREAU, A., ... MERK, B. (2019). Neutronic benchmark of the molten salt fast reactor in the frame of the EVOL and MARS collaborative projects. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, 5, 2. doi:10.1051/EPJN/2018052
- DANON, A. E., MURANSKY, O., KARATCHEVTSEVA, I., ZHANG, Z., LI, Z. J., SCALES, N., ... EDWARDS, L. (2020). Molten salt corrosion (FLiNaK) of a Ni–Mo–Cr alloy and its welds for application in energy-generation and energy-storage systems. Corrosion Science, 164, 108306. doi:10.1016/j.corsci.2019.108306
- DAVIK, J. (1980). Teaching Hess's Law. Journal of Chemical Education, 57(12), 895. doi:10.1021/ed057p895
- DELPECH, S., MERLE-LUCOTTE, E., HEUER, D., ALLIBERT, M., GHETTA, V., LE-BRUN, C., ... PÍCARD, G. (2009). Reactor physic and reprocessing scheme for innovative molten salt reactor system. Journal of Fluorine Chemistry, 130(1), 11-17. doi:10.1016/j.jfluchem.2008.07.009
- EZELL, N. D. B., GALLAGHER, R. C., AGCA, C. VE MCMURRAY, J. (2021). Thermal Property Characterization of Molten Salt Reactor–Relevant Salts (No: ORNL/TM-2021/2216). Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). doi:10.2172/1844891

- GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM-GIF (2014). Annual Report 2014.
- GERARDİN, D., ALLİBERT, M., HEUER, D., LAUREAU, A., MERLE-LUCOTTE, E., VE SEUVRE, C. (2018). Design Evolutions of the Molten Salt Fast Reactor. International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA.
- KOSTALL, M., RYPAR, V., MİLCAKK, J., JURİCEK, V., LOSA, E., FORGET, B. VE HARPER, S. (2016). Study of graphite reactivity worth on well-defined cores assembled on LR-0 reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 87, 601-611. doi:10.1016/j.anucene.2015.10.010
- PARK, S. M. VE MUNK, M. (2022). Verification of moltres for multiphysics simulations of fast-spectrum molten salt reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 173, 109111. doi:10.1016/j.anucene.2022.109111
- ROSENTHAL, M. W., HAUBENREİCH, P. N. VE BRİGGS, R. B. (1972). The Development Status of Molten Salt Breeder Reactors (No: ORNL-4812). United States. doi:10.2172/4622532
- SAHIN, S., SAHIN, H. M., TUNC, G. VE SAHINER, H. (2023). Design studies for A 50 MWth molten salt fast reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 166, 104964. doi:10.1016/j.pnucene.2023.104964
- SHEN, D., FRATONİ, M., AUFİERO, M., BİDAUD, A., POWERS, J. VE ILAS, G. (2018). Zero-power criticality benchmark evaluation of the Molten Salt Reactor Experiment. http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:50009239 adresinden erişildi.
- SOHAL, M. S., EBNER, M. A., SABHARWALL, P. VE SHARPE, P. (2010). Engineering Database of Liquid Salt

Thermophysical and Thermochemical Properties (No: INL/EXT-10-18297). Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States). doi:10.2172/980801

TİFTİKCİ, A., SAHİNER, H., SEFERİNOĞLU, M., AYHAN, H. (2022) Investigation of the Effect of Fuel Type and Reflector Material on Neutronic Performance in Molten Salt Reactors. International Nuclear Sciences and Technologies Conference, (Ekim 19-22, 2022), Aydın, Türkiye

TÜRKİYE ELEKTRİK DAĞITIM A.Ş. GENEL MÜDÜRLÜĞÜ - TEDAŞ, (2023) 2022 yılı Türkiye Elektrik Dağıtım Sektör Raporu, 22 Aralık 2023 tarihinde <https://tedas.gov.tr/FileUpload/MediaFolder/f1bb5ed3-88d0-4502-966b-4ecaab4c1270.pdf> adresinden erişildi.

WILLIAMS, D. F., TOTH, L. M., VE CLARNO, K. T. (2006). Assessment of Candidate Molten Salt Coolants for the Advanced High-Temperature Reactor (AHTR). Tech. Rep. ORNL/TM-2006/12

URL1, 18 Aralık 2023 tarihinde https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems adresinden erişildi.

URL2, 18 Aralık 2023 tarihinde <https://www.terrestrialenergy.com/> adresinden erişildi.

URL3, 18 Aralık 2023 tarihinde <https://www.moltenergy.com/> adresinden erişildi.

URL4, 20 Aralık 2023 <http://www.thoriumenergyworld.com/china.html#:~:text=The%20TMSR%20project%20intends%20to,energy%20in%2020%2D30%20years> adresinden erişildi.

URL5, 20 Aralık 2023 https://msrworkshop.ornl.gov/wp-content/uploads/2020/11/27_Kloosterman_MSR_workshop_20201.pdf adresinden erişildi.

URL6, 21 Aralık 2023 https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=143693&sube=14 adresinden erişildi.

ATIK YÖNETİM SİSTEMLERİNDE DİJİTAL&YEŞİL ROTALAMA

Sevilay TEKİN¹

Ayten YILMAZ YALÇINER²

1. GİRİŞ

Küreselleşmenin sanayiye bağlı olarak arttığı bir dönemde nüfusun artması da atık oluşumunun en önemli nedenlerinden biridir. Bundan dolayı atık yönetimi konusu önemini artırmaktadır. Özellikle insan sağlığı ve çevresel koşullar dikkate alındığında bu konunun incelenmesi zorunluluk oluşturmaktadır. Gelişen teknoloji ile akıllı şehirler başlığı altında yapılan çalışmalar atık sektörünü de yakından ilgilendirmektedir.

TÜİK'in 2018 yılı belediye atık istatistiklerine göre, Türkiye'deki bin 399 belediye arasında atık hizmeti verilen bin 395 belediyenin 32 milyon 209 bin ton atık topladığı belirlenmiştir. Kişi başı toplanan günlük ortalama atık miktarı 1.16 kg olarak hesaplanmıştır. Atık hizmeti verilen belediyelerde toplanan 32 milyon 209 bin ton atığın yüzde 67.2'si düzenli depolama tesislerine, yüzde 20.2'si belediye çöplüklerine ve yüzde 12.3'ü geri kazanım tesislerine gönderilirken, yüzde 0.2'si ise açıkta yakılarak, gömülerek, dereye veya araziye dökülerek bertaraf edilmiştir. Bu verilere dayanarak atık sektöründe yapılan çalışmaların verimsiz olduğu kanısına varılmıştır.

¹ Endüstri Mühendisi, (Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği), sevilay.topcuoglu1@ogr.sakarya.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5796-0553

² Doç. Dr. (Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü) ayteny@sakarya.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8160-812X

Kentleşme ve buna bağlı olarak kentlerdeki nüfus artışı çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bunun temel nedeni tüketim ihtiyacının artmasıdır. Toplumun sanayileşme ve teknolojik gelişmeler nedeniyle artan tüketim ihtiyacı fazla atık miktarı oluşumuna neden olmaktadır.²

Oluşan bu problemlerin zamanla hammadde tedarik sıkıntısı oluşturacağı aşıkardır. Bundan dolayı çevre sağlığı için atık dönüşüm sistemleri oldukça önemlidir. Dönüştürülecek atıklardan elde edilecek olan ekonomik kazanç kurulacak olan atık dönüşüm sisteminin maliyetini karşılayacaktır.³

Her gün üretilen atığın çevre ve insan sağlığına vereceği zararları önlemek amacıyla çöpler, yerleşim alanlarından uzaklaştırılmaktadır. Yakma, gömme, yeniden kullanım, geri kazanım gibi farklı yöntemlerle bertaraf edilmektedir. Kentlerde katı atık depolama alanları oluşturulmaktadır. Bu depolarda çöplerin biriktirilmesi metan gazının oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan gaz sıkışmasından çöp patlamaları birçok faciaya yol açabilmektedir.

Atık dönüşüm sistemlerinde son safha atıkların bertaraf işlemidir. Özellikle geri dönüşümü mümkün olmayan ve hiçbir enerji kazanımı sağlayamayacak olan atıklar bertaraf edilir. Eğer mümkünse bu işlemde minimizasyon amaçlanır. Atık yönetim sistemleri bu nedenle çok önemlidir. Atık tasnifi, atık dönüşümü, atık taşınması ve ayrıştırılması bu yönetim biçimlerindedir.⁴

² Şengül, Ü., Atıkların Geri Dönüşümü ve Tersine Lojistik. Paradoks Ekonomi, Sosyoloji ve Politika Dergisi. 6 (1), 2010

³ Koçer, N., Işık, H., Öğrenci Yurdu Katı Atıklarının Geri Kazanımının Ekonomik Açıdan Araştırılması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi., 2005.

⁴ Çelik, B.Y., Demirarslan, K.O., Endüstriyel katı atık yönetimine genel bir bakış. Akademik Platform., 2013.

Atıkların geri dönüşümünde ele alınan optimizasyon problemlerinde ARP teknikleri etkin şekilde kullanılmaktadır. Basit bir şekilde ARP depodaki araçların hizmet gereği müşteriye gidip depoya geri dönmesini sağlayan en kısa rotaların bulunması operasyonudur.⁵

Rotalama problemlerinden ilkinin inceleyecek olursak 1959 yılına gitmemiz gerekir. Dantzig ile Ramser'in bu problemi bugüne kadar bize örneklik teşkil eden klasik bir rotalama işlemidir. Aynı tip araçlar, aynı kapasiteye sahip bir araç filosu merkezden müşteriye gitmektedir ve her araç sadece bir rota izlemektedir. Araçlarda kapasitenin yanı sıra merkezden müşteriye gidip geri merkeze dönmesi zorunludur.⁶

Atıkların toplanması süreçleri bir optimizasyon problemi olarak ele alındığında, Araç Rotalama Problem çözüm teknikleri bu kapsamda etkili araçlardandır.

Araç rotalama ve atık taşıma işlemlerinin bütünü atık yönetimidir. Atıkların araçlarla toplanması ve dağıtılması operasyonlarında optimum rotalama hedeflenir bu da araç rotalamanın en önemli hususudur.⁷

Yapılan araştırmada atıklar incelenirken en az maliyetin hesaplanabilmesi için atıkların optimum rotalanması gerekmektedir. Atıkların toplanmasında incelenen kalemleri dönüştürülebilirlik düzeylerine göre olacağından cam, kâğıt, plastik ve metal gibi geri dönüştürülebilir atıklar incelenmiştir.

⁵ Gencer, C., Yaşa, Ö., "Ulaştırma Komutanlığı Ring Seferlerinin Eş Zamanlı Dağıtım Toplama Karar Destek Sistemi", Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık fakültesi Dergisi, 2007

⁶ Alabaş, Ç., Dengiz, B., "Yerel Arama Yöntemlerinde Yöre Yapısı: Araç Rotalama Problemine Bir Uygulama", Yöneyem Araştırması/Endüstri Mühendisliği- XXIV Ulusal Kongresi, Bildiri Kitabı, 2004

⁷ Ş. Kızıldaş, K.Ü. Sıfır Atık Projesi Kapsamında Geri Dönüşümlü Atıkların Toplanması: Kırıkkale'de Heterojen Çok Araçlı Araç Rotalama Uygulaması, 2019

Çalışmada toplanılması planlanan atıkların konumları belirtilerek aralarındaki mesafeler belirlenmiş, birbirlerine olan uzaklıklarına göre gruplandırılmıştır. Araştırma sonucunda belirlenen adreslerdeki atık oluşturan kişi sayıları ve bunların günlük kişi başı atık miktarı incelenerek geri dönüştürülebilir miktarlar tespit edilmiş ve bu tespit sonucu kullanılarak her bir lokasyonda oluşan atık miktarı araştırmada kullanılmıştır. Çalışmanın dijitalleşme ayağında ise şu aşamalar ele alınmıştır: Atıklar için basınçlı ve sensörlü konteynırların tasarlanması, sensörler aracılığıyla konteynırın hacmi, doluluk miktarı, sıcaklığı hakkında verilerin (Wİ-fi veya GSM üzerinden) merkez birime bildirilmesi. Sensörlü konteynırlarda toplanan atıkların geri dönüşüm araçlarına teslim edilmesi.

Dubai belediyesi atıkları toplarken Litum RFID Sistemini kullanmaktadır. Bu sistemde GPS, GSM ve kamera özellikli mobil RFID okuyucular bulunmaktadır. Bu sistem ile yeri değişen ve hasar gören konteynırlar tespit edilmekte, atıkları toplayan personel araçtan inmeden okuttuğu barkodlar ile konteynırın dolu olup olmadığını öğrenmekte aynı zamanda trafiğin yoğunluğuna göre rotalama yapılmaktadır.⁸

Barcelona “Smart City” Projesi kapsamında Endüstri 4.0 ile uyumlu nesnelerin interneti ve M2M (makinelere öğrenmesi) teknolojisi ile akıllı atık yönetimi sistemini kurmuştur. Bu sistemde çöp konteynırları belirli doluluğa ulaştığında sensörler ile web tabanlı yazılım uygulamasına bildirilmektedir. Böylece en kısa rota hesabı yapılır ve ekip yönlendirilmektedir. Bu sistem ile zaman, para ve yakıt tasarrufu sağlanmaktadır.⁹

⁸ Litum RFID, 2018, 7 Ocak 2021 tarihinde <https://litumrfid.com/tr/rfid-cop-toplama/> adresinden erişildi.

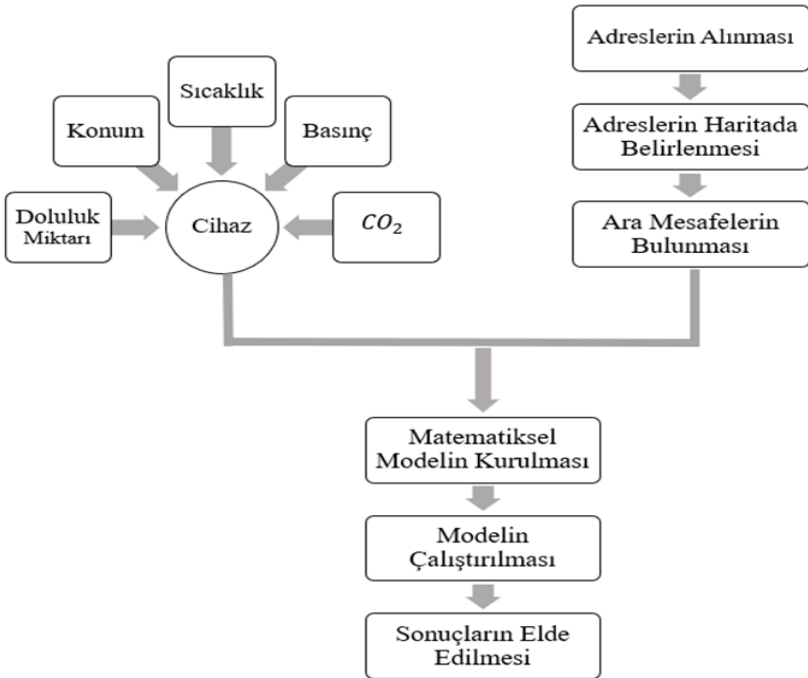
⁹ Hakan Kahraman, 2019, 7 Ocak 2021 tarihinde <https://www.endustri40.com/akilli-atik-yonetimi-ve-geri-donusum-sistemleri/#> adresinden erişildi.

2. YEŞİL ROTALAMA SÜREÇLERİ

Artan tüketim ve kentleşme ile çevre her geçen gün daha fazla kirletiliyor ve bu kirlilik öncelikle insan sağlığını tehdit etmekte, doğaya zarar vermekte ve görsel açıdan da görüntü kirliliğine sebep olmaktadır.

Bu çalışmada Sakarya ilinin Serdivan ilçesine ait belirlenen noktalarda (eğitim kurumlarında, hastanelerde, alışveriş merkezlerinde, kamu kurumlarında ve büyük iş merkezlerinde) oluşan atıkların toplanması ele alınmıştır. Belediye'nin anlaşmalı olduğu atık toplama firması geleneksel atık toplama sistemini kullanmaktadır. Şekil 1'de problemin akış diyagramı verilmiştir.

Şekil 1: Problem Akış Diyagramı



Geleneksel atık toplama sistemi gelişen teknoloji ile akıllı hale getirildiğinde yeni sistemin sağlayacağı kazançlar

araştırılmıştır. Akıllı atık toplama sistemi ile geri dönüştürülebilir kâğıt, cam, plastik ve metal atıkların ayrı ayrı biriktirilmesi ve en az maliyet ile toplanması çalışmanın amacıdır. Etkin şekilde atık yönetim sisteminin uygulanması hedeflenmiştir. Sensör cihazı topladığı verileri oluşturulmuş olan model üzerinde çözdürmek ve rotalama parametresi olarak kullanmak için yollar.

3. UZMAN GÖRÜŞLERİNİN ALINMASI- MEVCUT SİSTEMİN ANALİZ EDİLMESİ

Serdivan Belediyesi Temizlik İşleri Müdürlüğü'nde görev yapan bir çevre mühendisi, Serdivan ilçesinin atıklarını toplayan bir geri dönüşüm ve atık değerlendirme firması'nın yetkilisi ve Serdivan Belediyesi'nin ilgili görevlisi ile görüşülerek atık yönetimi hakkında bazı bilgiler alınmış ve mevcut durum değerlendirmesi yapılmıştır.

Geri dönüşüm ve atık değerlendirme firması, Serdivan ilçesinde bulunan 24 mahallenin evsel atıklarını toplamaktadır.

Konteynırların doluluk oranı tespit edilmeden araçlar her gün her noktayı ziyaret etmektedir. Belirli bir toplama planı kullanılmamaktadır. Gerektiğinde halk veya kurumlar ilgili firmaya ulaşmaktadır. Firmanın 4 adet aracı bulunmaktadır. 3 tanesi 9 m³, 1 tanesi 15 m³ hacme sahiptir. Günlük 5-7 ton arası atık toplanmaktadır. Firmanın Serdivan ilçesinde 150 adet 240 litrelik konteynırı bulunmaktadır. Firmada çalışan personellerin gündüz mesaisi 8.00-18.00, gece mesaisi 18.00-00.00 şeklindedir. Atık toplama araçlarında 1 şoför ve 2 yükleyici personel görev almaktadır. Araçlar günlük ortalama 70 km yol almaktadır. Araçların günlük ortalama 250-350 ₺ yakıt masrafı vardır. Günlük çalışan personelin ortalama 500₺ maliyeti vardır.

3.1.Verilerin Toplanması ve Tablo Oluşturma

Sakarya Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü tarafından hazırlanan Sakarya İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı'nda "Sıfır Atık Yönetim Sistemine Geçmesi Gereken Mahalli İdareler Listesi" rehberliğinde ve uzman görüşleri neticesinde doğru ve etkin konum saptaması için yoğun ve kalabalık olan iş merkezleri ve kamu kurumları ele alınmıştır.

Çalışmada atık verileri incelenen kişi sayılarına kurumlar aranarak ulaşılmıştır. Belirlenen 20 noktanın 5 noktası kurum gizliliğinden dolayı bulunan kişi sayısını ortalama bir değer olarak ifade etmiştir. İlgili bilgiler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1: Belirlenen Noktalar ve Kişi Sayıları

	Kurum, Kuruluş, AVM, Hastane, Okul, Üniversite, Büyük İşyerleri Ve Belediye Hizmet Binasının Adı	Kişi Sayısı
1	SERDİVAN BELEDİYE BAŞKANLIĞI ARABACIALANI, ÇARK CD. NO:328, 54100 SERDİVAN/SAKARYA	150
2	SAKARYA VERGİ DAİRESİ BAŞKANLIĞI İSTİKLAL MAH. KIRIŞHANE CAD. NO:49 54055 SERDİVAN / SAKARYA	345
3	GENÇLİK VE SPOR İL MÜDÜRLÜĞÜ İSTİKLAL, GENÇLİK VE SPOR İL MÜDÜRLÜĞÜ, SAFRANCIK SK. NOR/A, 54050 SERDİVAN/SAKARYA	95
4	SERDİVAN KAYMAKAMLIĞI KEMALPAŞA MAHALLESİ OKUL SK. NO:8 SERDİVAN/ SAKARYA	68
5	SERDİVAN İLÇE EMNİYET MÜDÜRLÜĞÜ İSTİKLAL, 54100 SERDİVAN/SAKARYA	48
6	SAKARYA SERDİVAN AVM ARABACIALANI MAH. MERT SOK. NO: 25 SERDİVAN/SAKARYA	1080
7	ÖZEL ADA TIP HASTANESİ İSTİKLAL, İSTİKLAL MAHALLESİ ŞEHİT MEHMET KARABAŞOĞLU CADDESİ, NO:67, KAZIMPAŞA YOLU ÜZERİ, 54050	500
8	SERDİVAN ANADOLU LİSESİ İSTİKLAL, 2. CD., 54055 SERDİVAN/SAKARYA	1025
9	MEHMET ZORLU İLKOKULU KEMALPAŞA, SOĞUK SU SK. NO:11, 54100 SERDİVAN/SAKARYA	690
10	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ KEMALPAŞA, 2 NOLU RING YOLU, 54050 SERDİVAN/SAKARYA	1295
11	ÖZEL MEDAR HASTANESİ SAKARYA KEMALPAŞA, BAĞLAR CD. NO:116, 54050 SERDİVAN/SAKARYA	540
12	ZÜBEYDE HANIM ORTAOKULU İSTİKLAL, SAKARYA CD., 54050 SERDİVAN/SAKARYA	800
13	T.C. SAĞLIK BAKANLIĞI TOYOTASA ACİL YARDIM HASTANESİ BAHÇELİEVLER, MUHSİN YAZICIOĞLU BLV. 66/A, 54050 SERDİVAN/SAKARYA	975
14	ALTINOVA GARDEN OTEL İSTİKLAL MAH.MUHSİNYAZICIOĞLU BULVARI NO:57/A SERDİVAN/SAKARYA	28
15	YÜKSEKÖĞRETİM KREDİ YURTLAR KURUMU SAKARYA MÜDÜRLÜĞÜ KEMALPAŞA MAH. ÜNİVERSİTE CAD. 185 SOK. NO:3 SERDİVAN/SAKARYA	1256
16	SERDİVAN İLÇE MİLLİ EĞİTİM MÜDÜRLÜĞÜ ARABACIALANI, 535. SK. NO:1/1, 54050 SERDİVAN/SAKARYA	36
17	TUNA TAN AKARYAKIT VE TURİZM DİNLENME TESİSLERİ SANAYİTİCARET LİMİTED ŞİRKETİ BAHÇELİEVLER 2.CAD. D-2, 54100 SERDİVAN/SAKARYA	40
18	ARABACIALANI FILE, ÇARK CD. 254/B D:254/B, 54050 SERDİVAN/SAKARYA	23
19	AGORA ADAPAZARI AVM ARABACIALANI, ESKİ KAZIM PAŞA CD. NO:10, 54050 SERDİVAN/SAKARYA	700
20	SERDİVAN MESLEKİ VE TEKNİK ANADOLU LİSESİ ARABACIALANI, 54050 SERDİVAN/SAKARYA	300

Çalışmada kullanılacak lokasyonlar tablo haline getirildikten sonra Resim-1’de harita üzerindeki konumlarına yer verilmiştir.

Resim 1: Belirlenen 20 Noktanın Haritadaki Konumları



3.2.Önem Derecelerine Göre Sınıflandırma

Lokasyonların belirlenmesinin ardından Pareto analizi yapılmıştır. Rotalama yapılacak 20 lokasyonda bulunan geri dönüştürülebilir hale gelecek atık miktarları bazı lokasyonlarda fazla bazı lokasyonlarda ise daha az miktardadır. Pareto analizinde 80-15-5 kuralına göre noktalar önem derecesine göre A, B ve C olmak üzere 3 gruba ayrılmıştır.

Tablo 2: Pareto Analizi Sonucu Gruplandırma

Adres No	Kurum, Kuruluş, AVM, Hastane, Okul, Üniversite, Büyük İyeleri Ve Belediye Hizmet Binasının Adı	Kişi Sayısı	Ağırlık	Pareto Kuralı	Grup
10	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ	1295	0,1296	0,7826	A
15	YÜKSEKÖĞRETİM KREDİ YURTİÇİ KURUMU SAKARYA MÜDÜRLÜĞÜ	1256	0,1257		
8	SERDİVAN ANADOLU LİSESİ	1025	0,1026		
6	SAKARYA SERDİVAN AVM	1080	0,1081		
13	T.C. SAĞLIK BAKANLIĞI TOYOTASA AÇIL YARDIM HASTANESİ	975	0,0976		
12	ZÜBEYDE HANIM ORTAOKULU	800	0,0800		
19	AGORA ADAPAZARI AVM	700	0,0700		
9	MEHMET ZORLU İLKOKULU	690	0,0690		
11	ÖZEL MEDAR HASTANESİ SAKARYA	540	0,0540		
7	ÖZEL ADA TIP HASTANESİ	500	0,0500		
2	SAKARYA VERGİ DAİRESİ BAŞKANLIĞI	345	0,0345	0,1686	B
20	SERDİVAN MESLEKİ VE TEKNİK ANADOLU LİSESİ	300	0,0300		
1	SERDİVAN BELEDİYE BAŞKANLIĞI	150	0,0150		
3	GENÇLİK VE SPOR İL MÜDÜRLÜĞÜ	95	0,0095		
4	SERDİVAN KAYMAKAMLIĞI	68	0,0068		
5	SERDİVAN İLÇE EMNİYET MÜDÜRLÜĞÜ	48	0,0048	0,0488	C
17	TUNA TAN AKARYAKIT VE TURİZM DİNLENME TESİSLERİ SAĞAŞIĞI ÇARŞI LİMİTED ŞİRKETİ	40	0,0040		
16	SERDİVAN İLÇE MİLLİ EĞİTİM MÜDÜRLÜĞÜ	36	0,0036		
14	ALTINOVA GARDEN OTEL	28	0,0028		
18	FILE MARKET	23	0,0023		
TOPLAM KİŞİ SAYISI		9994			

3.3.Günlük Oluşan Geri Dönüştürülebilir Atık Miktarının Hesaplanması

TÜİK tarafından 2018 yılı için yapılan bir araştırmaya göre günlük kişi başı atık miktarı 1,16 kg verisi esas alınarak bu noktalarda oluşan günlük toplam atık miktarı hesaplanmıştır.

Günlük geri dönüştürülebilir atık miktarı hesaplamasında 2016 TUDAM Teşvik Raporunda belirtilen “Türkiye’de toplamda belediye atıklarının %15-20’si geri dönüşüm ve geri kazanım olarak değerlendirilebilmektedir.” Maksimum değer %20 baz alınarak hesaplamalar yapılmıştır. ¹⁰

Tablo 3: Sınıflarına Göre Geri Dönüştürülebilir Atık Miktarı

Adres No	Kurum, Kuruluş, AVM, Hastane, Okul, Üniversite, Büyük İşyerleri Ve Belediye Hizmet Binasının Adı	Geri Dönüştürülebilir Atık Miktarı	Sınıflarına Göre Atık Miktarı			
			Kağıt	Cam	Plastik	Metal
10	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ	300,44	75,11	75,11	75,11	75,11
15	YÜKSEKÖĞRETİM KREDİ YURTLAR KURUMU SAKARYA MÜDÜRLÜĞÜ	291,39	72,85	72,85	72,85	72,85
8	SERDİVAN ANADOLU LİSESİ	237,8	59,45	59,45	59,45	59,45
6	SAKARYA SERDİVAN AVM	250,56	62,64	62,64	62,64	62,64
13	T.C. SAĞLIK BAKANLIĞI TOYOTASA ACIL YARDIM HASTANESİ	226,2	56,55	56,55	56,55	56,55
12	ZÜBEYDE HANIM ORTAOKULU	185,6	46,4	46,4	46,4	46,4
19	AGORA ADAPAZARI AVM	162,4	40,6	40,6	40,6	40,6
9	MEHMET ZORLU İLKOKULU	160,08	40,02	40,02	40,02	40,02
11	ÖZEL MEDAR HASTANESİ	125,28	31,32	31,32	31,32	31,32
7	ÖZEL ADA TIP HASTANESİ	116	29	29	29	29
2	SAKARYA VERGİ DAİRESİ BAŞKANLIĞI	80,04	20,01	20,01	20,01	20,01
20	SERDİVAN MESLEKİ VE TEKNİK ANADOLU LİSESİ	69,6	17,4	17,4	17,4	17,4
1	SERDİVAN BELEDİYE BAŞKANLIĞI	34,8	8,7	8,7	8,7	8,7
3	GENÇLİK VE SPOR İL MÜDÜRLÜĞÜ	22,04	5,51	5,51	5,51	5,51
4	SERDİVAN KAYMAKAMLIĞI	15,78	3,94	3,94	3,94	3,94
5	SERDİVAN İLÇE EMNİYET MÜDÜRLÜĞÜ	11,14	2,78	2,78	2,78	2,78
17	TUNA TAN AKARYAKIT VE TURİZM DİNLENME TESİSLERİ SANAYİCİCARET LİMİTED ŞİRKETİ	9,28	2,32	2,32	2,32	2,32
16	SERDİVAN İLÇE MİLLİ EĞİTİM MÜDÜRLÜĞÜ	8,35	2,09	2,09	2,09	2,09
14	ALTINOVA GARDEN OTEL	6,50	1,62	1,62	1,62	1,62
18	FİLE MARKET	5,34	1,33	1,33	1,33	1,33
	TOPLAM(kg)	2318,61	579,65	579,65	579,65	579,65

Tablo 3’te hesaplanan “Sınıflarına Göre Atık Miktarı” hesabı yapılırken atıkların ilk aşamada eşit hacimlere sahip olduğu varsayılarak konteynır içerisinde eşit hacimli bölmeler ayrılmıştır.

¹⁰ TUDAM, 2016

3.4. Birim Hacim Ağırlık Hesaplamasının Yapılması

Çalışmada birim hacim ağırlık verileri esas alınarak çözülecek problemler için oluşturulan tablo aşağıdadır.

$$(0,05 * 0,02 = 0,001) \quad (2 \text{ kg}/[0,05\text{kg/l}] = 40,0 \text{ l})$$

$$01 \text{ Plastik Maddeler} = 0,40 \quad 02 \text{ Kağıt Ürünleri} = 0,40$$

$$03 \text{ Cam} = 0,01 \quad 04 \text{ Tenekeler (Metal)} = 0,10$$

Atıkların ilk aşamada eşit hacimlere sahip olduğu varsayılarak konteynır içerisinde eşit hacimli bölme tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarım sensörler yardımı ile genişleyip daralabildiği için formülizasyonu;

“25 ±X (Kağıt), 25 ±Y (Plastik), 25 ±Z (Cam), 25 ±T (Metal)” olarak belirlenmiştir.

Tablo 4: Hacim hesabı

Adres No	Kurum, Kuruluş, AVM, Hastane, Okul, Üniversite, Büyük İşyerleri Vc Belediye Hizmet Binasının Adı	Sınıflarına Göre Atık Miktarı (Kg)				Grup	Hacim (L)				
		Kağıt	Cam	Plastik	Metal		Kağıt	Cam	Plastik	Metal	TOPLAM
10	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ	75,11	75,11	75,11	75,11	A	30,04	0,75	30,04	7,51	68,35
15	YÜKSEKÖĞRETİM KREDİ YURTLAR KURUMU SAKARYA MÜDÜRLÜĞÜ	72,85	72,85	72,85	72,85		29,14	0,73	29,14	7,28	66,29
8	SERDİVAN ANADOLU LİSESİ	59,45	59,45	59,45	59,45		23,78	0,59	23,78	5,95	54,10
6	SAKARYA SERDİVAN AVM	62,64	62,64	62,64	62,64		25,06	0,63	25,06	6,26	57,00
13	T.C. SAĞLIK BAKANLIĞI TOYOTASA AÇIL YARDIM HASTANESİ	56,55	56,55	56,55	56,55		22,62	0,57	22,62	5,66	51,46
12	ZÜBEYDE HANIM ORTAOKULU	46,4	46,4	46,4	46,4		18,56	0,46	18,56	4,64	42,22
19	AGORA ADAPAZARI AVM	40,6	40,6	40,6	40,6		16,24	0,41	16,24	4,06	36,95
9	MEHMET ZORLU İLKOKULU	40,02	40,02	40,02	40,02		16,01	0,40	16,01	4,00	36,42
11	ÖZEL MEDAR HASTANESİ	31,32	31,32	31,32	31,32		12,53	0,31	12,53	3,13	28,50
7	ÖZEL ADA TIP HASTANESİ	29	29	29	29		11,60	0,29	11,60	2,90	26,39
2	SAKARYA VERGİ DAİRESİ BAŞKANLIĞI	20,01	20,01	20,01	20,01	B	8,00	0,20	8,00	2,00	18,21
20	SERDİVAN MESLEKİ VE TEKNİK ANADOLU LİSESİ	17,4	17,4	17,4	17,4		6,96	0,17	6,96	1,74	15,83
1	SERDİVAN BELEDİYE BAŞKANLIĞI	8,7	8,7	8,7	8,7		3,48	0,09	3,48	0,87	7,92
3	GENÇLİK VE SPOR İL MÜDÜRLÜĞÜ	5,51	5,51	5,51	5,51		2,20	0,06	2,20	0,55	5,01
4	SERDİVAN KAYMAKAMLIĞI	3,944	3,944	3,944	3,944		1,58	0,04	1,58	0,39	3,59
5	SERDİVAN İLÇE EMNİYET MÜDÜRLÜĞÜ	2,784	2,784	2,784	2,784		1,11	0,03	1,11	0,28	2,53
17	TUNA TAN AKARYAKIT VE TURİZM DİNLENME TESİSLERİ SANAYİCİLERİ LİMİTED ŞİRKETİ	2,32	2,32	2,32	2,32		0,93	0,02	0,93	0,23	2,11
16	SERDİVAN İLÇE MİLLİ EĞİTİM MÜDÜRLÜĞÜ	2,088	2,088	2,088	2,088		0,84	0,02	0,84	0,21	1,90
14	ALTINOVA GARDEN OTEL	1,624	1,624	1,624	1,624		0,65	0,02	0,65	0,16	1,48
18	FILE MARKET	1,334	1,334	1,334	1,334		0,53	0,01	0,53	0,13	1,21
TOPLAM		579,65	579,65	579,65	579,65						

Gerekli hesaplamalar yapıldığında optimum rotalama için seçilen konteynır hacimleri:

A grubu: 150 Litre A grubuna araçlar iki günde bir atıkları almak için gidecektir.

B grubu: 100 Litre B grubuna araçlar iki günde bir atıkları almak için gidecektir.

C grubu: 50 Litre C grubuna araçlar haftada bir kez atık almak için gidecektir.

3.5.Araç Seçimi

Tablo 5: Toplam Ağırlık Tablosu

Adres No	Kurum, Kuruluş, AVM, Hastane, Okul, Üniversite, Büyük İşyerleri Ve Belediye Hizmet Binasının Adı	Kişi Sayısı	Oluşan Atık Miktarı	Geni Dönüşümlü/Lebilir Atık Miktarı	Sınıflarına Göre Atık Miktarı				Grup	
					Kağıt	Cam	Plastik	Metal		
10	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ	1295	1502,2	300,44	75,11	75,11	75,11	75,11	A	1814,47
15	YÜKSEKÖĞRETİM KREDİ YURTULAR KURUMU SAKARYA MÜDÜRLÜĞÜ	1256	1456,96	291,392	72,848	72,848	72,848	72,848		
8	SERDİVAN ANADOLU LİSESİ	1025	1189	237,8	59,45	59,45	59,45	59,45		
6	SAKARYA SERDİVAN AVM	1080	1252,8	250,56	62,64	62,64	62,64	62,64		
13	T.C. SAĞLIK BAKANLIĞI TOYOTASA AÇIL YARDIM HASTANESİ	975	1131	226,2	56,55	56,55	56,55	56,55		
12	ZÜBEYDE HANIM ORTAOKULU	800	928	185,6	46,4	46,4	46,4	46,4		
19	AGORA ADAPAZARI AVM	700	812	162,4	40,6	40,6	40,6	40,6		
9	MEHMET ZORLU İLKOKULU	690	800,4	160,08	40,02	40,02	40,02	40,02		
11	ÖZEL MEDAR HASTANESİ	540	626,4	125,28	31,32	31,32	31,32	31,32		
7	ÖZEL ADA TIP HASTANESİ	500	580	116	29	29	29	29		
2	SAKARYA VERGİ DAİRESİ BAŞKANLIĞI	345	400,2	80,04	20,01	20,01	20,01	20,01		
20	SERDİVAN MESLEKİ VE TEKNİK ANADOLU LİSESİ	300	348	69,6	17,4	17,4	17,4	17,4		
1	SERDİVAN BELEDİYE BAŞKANLIĞI	150	174	34,8	8,7	8,7	8,7	8,7		
3	GENÇLİK VE SPOR İL MÜDÜRLÜĞÜ	95	110,2	22,04	5,51	5,51	5,51	5,51	C	1132,16
4	SERDİVAN KAYMAKAMLIĞI	68	78,88	15,78	3,944	3,944	3,944	3,944		
5	SERDİVAN İLÇE EMNİYET MÜDÜRLÜĞÜ	48	55,68	11,14	2,784	2,784	2,784	2,784		
17	TUNA TAN AKARYAKIT VE TURİZM DİNLENME TESİSLERİ SANAYİTİCARET LİMİTED ŞİRKETİ	40	46,4	9,28	2,32	2,32	2,32	2,32		
16	SERDİVAN İLÇE MİLLİ EĞİTİM MÜDÜRLÜĞÜ	36	41,76	8,35	2,088	2,088	2,088	2,088		
14	ALTINOVA GARDEN OTEL	28	32,48	6,50	1,624	1,624	1,624	1,624		
18	FILE MARKET	23	26,68	5,34	1,334	1,334	1,334	1,334		
TOPLAM		9994 kişi	11593,04 kg	2318,61 kg	579,65	579,65	579,65	579,65		

Araçların kapasiteleri belirlenirken haftalık yolculuk planı dikkate alınmıştır.

- Çarşamba günü çakışan tek gündür.
- A ve C grubundaki tüm lokasyonları tek araç toplarsa 1927,69 kg'lık kapasiteye ihtiyaç duyacaktır.
- 2000 kg'lık kapasiteye sahip bir araç tüm noktalardaki atıkları toplamaya yeterli olacaktır.
- A grubunda bulunan tüm noktalarda konteynırların tam olduğu varsayılırsa 800 litre atık oluşacaktır.

- 1000 kg'lık kapasiteye sahip bir araç atıkları toplamaya yeterli olacaktır.

Belirlenen lokasyonlarda yapılacak toplama işlemleri için Tablo 6 'da verilen haftalık toplama planı oluşturulmuş ve rotalama işlemi bu plan çerçevesinde yapılmıştır.

Tablo 6: Haftalık Toplama Planı

Haftalık Toplama Planı			
	1. Grup (A)	2. Grup (B)	3. Grup (C)
Pazartesi	+		
Salı		+	
Çarşamba	+		+
Perşembe		+	
Cuma	+		

3.6. Matematiksel Model Üzerinden Optimum Rotalama

Sistemde bulunan konumlara kısa sürede ulaşmak için çok sayıda araç kullanılacak. Yani “Çok Araçlı Rotalama” yapılacaktır.

Filodaki araçların taşıma kapasiteleri farklı olduğu için heterojen gruba girer.

Talep yapısı statiktir çünkü konteynırların kapasitesi bilinmekte ve o kapasiteye ulaşıldığında yola çıkılmaktadır.

Sistem tek depo üzerine kurulu. Rotalama kapalı uçlu, depodan çıkan araç mesai bitimine kadar depoya döner.

Atıkların geri dönüştürülebilir hale geleceği tesis ile geri dönüştürülebilir atıkların ziyaret edileceği lokasyonların gidiş ve dönüş mesafeleri aynı, simetrik.

Atıkların geri dönüştürülebilir hale geleceği tesisten çıkan aracın lokasyonları mesai saatleri içinde ziyaret etme zorunluluğu olduğu için süre kısıtı eklenmiştir.

Problem “Heterojen Çok Araçlı Araç Rotalama Problemi” olarak değerlendirilip çözüm aranmıştır.

3.6.1. Varsayımlar

Çalışmanın varsayımları aşağıdaki gibidir:

1. Lokasyonlardan alınacak geri dönüştürülebilir atık miktarları belirlenmiştir.
2. Atıkların geri dönüştürüleceği tesis ile lokasyonların birbiri arasındaki mesafeler belirli, ve git-gel uzaklıkları aynıdır.
3. Atıkların geri dönüştürüleceği tesis bir adettir.
4. Atık toplama araçlarının kapasiteleri belirlidir.
5. Araç kapasiteleri heterojen olup; 1000 kg (Tip 1) ve 2000 kg (Tip 2) olmak üzere 2 farklı kapasiteye sahip 2 tip araç kullanılmıştır.
6. Geri dönüştürülebilir atıkların toplama süreleri araçlarda dakikada 10 kg'dır. Araçlar saatte 50 km hız ile ilerlemektedir.
7. Mesai saatleri 8 saat (480 dk-gün) olarak belirlenmiştir.

3.6.2. Matematiksel Modelin Kurulması

İndis:

i = atık, j = depo, v = araç

Değişkenler:

C_{ij} : i ve j arası mesafe

p_i : i noktasından toplanacak malzeme miktar

f_v : v tipi aracın maliyeti (sabit)

T_v : v tipi araçlardan kullanılabilir araç sayısı

Q_v : v tipi aracın kapasitesi

R_v : v tipi aracın değişken maliyeti

y_v = filoda v tipiaracı tan seçilecek araç sayısı,

k_{ij} =araçların j düğümüne gelene kadar topladığı yük miktarı

n_j =Alt tur oluşmasını engelleyen değişken

Model:

$$\mathbf{Min} \sum_{i \in J} \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} R_v C_{ij} x_{ijv} + \sum_{v \in V} f_v y_v \quad (4.1)$$

Modelde, Eşitlik 4.1 amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Atık toplayacak araçların tercihinden kaynaklanan maliyetler sabit ve km başı değişken maliyet olarak minimum şekilde incelenmeye çalışılmıştır.

$$\sum_{j \in J, j \neq 0} \sum_{v \in V} x_{ojv} \leq m \quad (4.2); \quad \sum_{i \in J, i \neq 0} \sum_{v \in V} x_{io v} \leq m \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.2 ve 4.3 atıkların toplanacağı tesisten ayrılan araç sayısının dönen araç sayısına eşitliğini sağlar.

$$\sum_{i \in J, i \neq j} \sum_{v \in V} x_{ijv} = 1 \quad (4.4); \quad \sum_{j \in J, i \neq j} x_{ijv} = \sum_{j \in J, i \neq j} x_{jiv} \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.4 belirlenen lokasyon gruplarından herhangi birinden yalnızca bir lokasyon grubuna gelinmesini sağlarken, Eşitlik 4.5 herhangi bir lokasyon grubuna uğrayan ve oradan ayrılan araçların aynı model kullanılan araç olmasını sağlamaktadır.

$$t_{ij} = \sum_{v \in V} Q_v x_{ijv} \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6 araç kapasitesinin aşılmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{j \in J, i \neq j} t_{ij} - \sum_{j \in J, i \neq j} t_{ji} = p_i \quad (4.7)$$

Eşitlik 4.7 atık toplama aracının toplayacağı atığın araç toplama işlemi yaparken araçta yer kalacak şekilde yapılmasını sağlar.

$$\sum_{v \in V} p_i x_{ijv} \leq t_{ij} \leq \sum_{v \in V} (Q_v - p_j) x_{ijv} \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.8 atık toplama aracının toplayacağı atık miktarı için maksimum ve minimum atık değerlerini belirlemektedir.

$$t_{0j} = 0 \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.9 atık toplama aracının toplayacağı atık miktarını sefer başında sıfırlamaktadır.

$$\sum_{v \in V} y_v \leq m \quad (4.10) \quad y_v \leq T_v \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.10 ele alınan modelde maksimum m tane atık toplama aracının belirlenmesini sağlarken, Eşitlik 4.11 her atık toplama araç modelinden maksimum mevcut miktar kadar belirlenebilmesini sağlamaktadır.

$$\sum_{j \in J} x_{0jv} = y_v \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.12 9 atık toplama tesisinden hareket edecek k tipi atık toplama araç sayısının, mevcut iki araç arasından seçilecek k tipi araç sayısına eşit olmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{i,j \in J} p_i x_{ijv} + \sum_{i,j \in J} C_{ij} x_{ijv} \leq 480 \quad (4.13)$$

Eşitlik 4.13 kullanılan atık toplama araçlarında ve bu araçlardaki personellerin belirlenen mesai saatinin geçirilmemesini sağlamaktadır.

$$n_j \geq n_j + 1 - J(1 - \sum_{v \in V} x_{ijv}) \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.14 alt tur eleme kısıdıdır.

$$n_j \geq 0 \quad (4.15) \quad y_v \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad (4.16)$$

$$k_{ij} \geq 0 \quad (4.17) \quad m \geq 0 \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 ise işaret kısıtlarıdır.

3.7.Problemin Çözümü

Matematiksel modelleme işleminde LINGO 18.0 yazılımı kullanılmıştır. Modeller çözülürken yukarıda belirtilen indisler, değişkenler, dotalar, amaç fonksiyonu ve kısıtlar kullanılarak en iyi sonuçlar alınmıştır. Tip araç modelleri için hem değişken hem de sabit maliyetler hesaplanmış ve kullanılmıştır.

3.8.Problemin Senaryoya Göre Çözülmesi

Belirtilen adreslerden uzman görüşlerine ve bölgede yaşayan kişi sayısı ve kişilerin ortalama ürettiği atık miktarına bağlı olarak atık toplanacak 20 bina ele alınmıştır. Belirlenen 20 lokasyonun ve geri dönüştürülebilir atıkların toplanacağı tesis haritada belirlenerek uzaklık matrisi hazırlanmıştır.

Atık miktarları hesaplanmış ve buna uygun olarak Pareto analizi yapılmıştır, çünkü atık yönetiminde maliyetlerin düşürülmesi temel hedefdir. Problemin çözümü için matematiksel model oluşturularak optimum rotalama sonuçları elde edilmiştir. Belirlenen senaryo doğrultusunda ele alınan 20 noktanın Pareto analizi sonucunda gruplandırması Tablo2’de belirtilmiştir.

Tablo 7: Senaryo 1 Pareto Analizi Sonuçları

Gruplar	Noktalar
A	10, 15, 8, 6, 13, 12, 19, 9
B	11, 7, 2, 20
C	1, 3, 4, 5, 17, 16, 14, 18

Tablo 8: Lingo Model Çözümü Sonucunda Oluşturulan Rotalamalar

Gruplar	Atık Oranı	Araç Tipi	Amaç Fonksiyonu	Rotalamalar
A	%20	1	216,123	19-12-13-9
	%20	2	523,456	19-12-6-8-13-9-15-10
B	%20	1	231,566	20-11-7-2
A+C	%20	1	342,567	6-8-1-5-4-15-10-17-3
	%20	2	678,976	19-6-18-8-16-1-12-5-4-9-15-10-17-3-13-14

Konteynırlarda bulunan sensörlerin sisteme iletlediği noktaların rotalaması Tablo 8’de verilmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada oluşan atığın toplanması ve taşınması için gerekli işlemler incelenmektedir. Sakarya ilinin Serdivan ilçesinde yapılmış olup; okullar, üniversite kampüsleri, hastaneler, alış-veriş merkezleri, iş merkezleri için heterojen araç geri dönüştürülebilir atıkların toplanması problemi ele alınmıştır.

Atıkların toplanması işleminde mesai saatlerinin de göz önüne alınarak taşıma işleminin yapılması ile oluşturulan bu kısıtın ekonomik ve insan gücü anlamında sistem rahatlatması sağlanmıştır. Lokasyon olarak belirtilen ve inceleme konusu olan bu noktaların farklı geri dönüştürülebilir atık oranlarına sahip olması da sistemin gerçek hedefine ulaşmasına ne kadar yakın olduğunu ve uygulanabilir bir model olduğunu göstermektedir.

Seçilen lokasyonlar oluşan geri dönüştürülebilir atık miktarlarına ve önem derecelerine göre Pareto analizi ile incelenmiş olup, rotalamaların yapılacağı A, B ve C grupları oluşturulmuştur. Bu amaç fonksiyonu ile matematiksel model oluşturularak, haftalık olarak her bir gün için araç rotalamaları yapılmıştır.

Gruplandırılmaları yapılan lokasyonların birbirleri arasındaki mesafeleri bulunmuştur. Lokasyonlardaki geri dönüştürülebilir atık miktarı 2016 TÜDAM Teşvik Raporunda belirtilen değerler üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

Bu çalışmadaki gibi çok düğümlü ve konumlu araştırmalarda konumların belirli özelliklere göre düzenlenip sınıflandırılması çözümün eldesine çok büyük kolaylık ve katkı sağlamaktadır.

Oluşturulan planda; A grubuna: 3 gün; B grubuna: 2 gün; C grubuna: 1 gün uğranması sağlanmıştır. Yapılan bu planlama ile daha az miktarda atık çıkaran grupların biriktirilmesi ve tek seferde toplanması ile maliyetin daha da azaltılması sağlanmaktadır. Çalışmanın şekline uygun model ve kısıtlar oluşturulmuş, araç sürücüleri ve gidilecek konumlardaki kişilere yönelik çalışma saati kısıtı da belirlenerek modele eklenmiştir. Bu şekilde mesai saatleri içerisinde bu işlemin yapılması sağlanmıştır. Bu şekilde problem geniş zaman sınırlarına sahip bir zaman pencereyi araç rotalama problemi haline gelmiştir.

Tablo 9: Toplam Atık Toplama Maliyetleri

Sabit Maliyet: (Vergi, sigorta, bakım giderleri, personel maaş ve sigortası)	Atık Oranı	Günlük Maliyet	Haftalık Maliyet	Aylık Maliyet
Değişken Maliyet: Kilometre başı yakıt maliyeti	%20	313,8 ₺	2196,5 ₺	8786 ₺

Elde edilen sonuçlara göre atık oluşumu fazla olan AVM ve okul dahil edilmediğinde 1 nolu araç, dahil edildiğinde atık miktarı çok olduğu için en öncelikli noktalar olan A ve C grubunda bulunan noktaların sayısının azaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak okul dahil edildiğinde 2 numaralı araç kullanılır, A ve C grubunda uğranılacak noktalarının sayısının artmasından dolayı maliyetin arttığı belirlenmiştir. Oluşturulan istikamet doğrultusunda okullar haricindeki resmi kurumların olmasından dolayı oluşan atık miktarı az olmaktadır.

Yalnızca C grubu incelendiğinde okul, AVM ve hastane dışındaki kurumlardan dolayı oluşan atık miktarlarının daha az olduğu görülmektedir. Bundan dolayı geri dönüştürülebilir atık miktarı artsa da araç kapasitelerinin altında kalacağı için düşük hacimli araç kullanılarak ve gün sayısı azaltılarak rotalar revize edilmiştir.

Tablo 10: Mevcut Sistem ve Yeni Sistemin karşılaştırılması

Özellikler	Mevcut Sistem	Yeni Sistem
Konteynır Sayısı ve Hacmi	Belediyenin yapmış olduğu çalışma ile belirleniyor.	Günlük kişi başı atık miktarı dikkate alınarak otomatik olarak hesaplanıyor.
Konteynırların Hacmi	240 litrelik	150,100,50 litrelik
Konteynır Özelliği	Kağıt-ambalaj, cam, metal üçlü takım	Kağıt, plastik, cam, metal hacme göre genişleme özellikli
Doluluk Oranı	Doluluk oranına bakılmaksızın her konteynır alınıyor.	IoT sayesinde sensörler ile tespit edilecek.
Toplama Planı	Her gün her nokta ziyaret ediliyor.	Sisteme düşen noktalar ziyaret edilecek. Toplama planına uygun hareket edilecek.
Yakıt Maliyeti	Günlük 250-350 ₺	Her noktaya uğranmadığı için yakıt maliyeti düşecektir.
Atık Toplama	Atıkların hepsi bir toplanıyor.	Atıklar sınıflarına göre toplanacak.

Geleneksel atık toplama sisteminde her konteynır ziyaret edilirken yeni sistemde konteynırlara takılan IoT tabanlı sensörler sayesinde belirli dolum seviyesine gelen konteynırlardan merkeze gelen sinyaller ile günlük rotalama planı ve hangi aracın servise çıkacağı belirlenir. Optimize edilmiş sistem ile daha az noktaya gidileceği için yakıt tasarrufu sağlanır. Gelecek nesillerin sağlığı ve sürdürülebilirliği amaçlandığında uzun vadede yapılacak olan bu konudaki çalışmalar ile sıfır atık yaklaşımının daha fazla benimsenmesi sağlanmalıdır.

Ülkemizde “Sıfır Atık Projesi” kapsamında çalışmalar her geçen gün daha da önemli hale gelmektedir. Bu çalışmalar akıllı atık yönetimi ile entegre edildiğinde daha hızlı ve optimum sonuçların elde edileceği öngörülmektedir.

ENDÜSTRİYEL KUPOLATIĞININ DUVAR KAROSU SIR REÇETELERİNDE ETKİSİNİN İNCELENMESİ¹

Yiğit BALBAĞ²

Hale YILDIZAY³

Eda TAŞÇI⁴

Döküm ürünleri birçok sanayi dalında girdi olarak kullanılmakta ve bu nedenle dökümcülük, üretim sanayisinde önemli bir yerde bulunmaktadır. Döküm yöntemiyle üretilen birçok ürün imalat sanayinin her alanında kullanılmaktadır. Üretilen her sanayi mamulünün % 90'ında en az bir adet döküm ürünü bulunmaktadır. Döküm sektörü Dünya'da ve Türkiye'de, imalat sanayinin temel taşlarından birisidir.

Pik döküm, yüksek sıcaklıklarda ergitilen demir cevherinin, genellikle özel döküm kalıplarına dökülmesi ve soğuyarak katı hale gelmesi işlemidir. Pik döküm, demir çelik

¹ Endüstriyel Atıkların Duvar Karosu Mat Sır Reçetelerinde Renklendirici Pigment Olarak Kullanımı (Yüksek Lisans Tezinden Düzenlenmiştir.) Yazar: Yiğit BALBAĞ, ORTAK DANIŞMAN: Dr.Öğr. Üyesi. Hale YILDIZAY Danışman: PROF. DR. Eda TAŞÇI Yer Bilgisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 10530240 Referans Nolu Tez.

² Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi, BİEN Seramik, 1.Organize sanayii, Bilecik, TÜRKİYE, ybalbag@gmail.com, ORCID: 0009-0007-7997-1158

³ Dr. Öğr. Üyesi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Güzel Sanatlar Meslek Yüksek Okulu, Çini sanatı ve Tasarımı Bölümü, Germiyan Kampüsü, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, hale.yildizay@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3896-9912

⁴ Prof. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Merkez Kampüsü, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, eda.tasci@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3346-8833

üretimi için başlangıç malzemesi olan ham demir üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu işlem, demir cevherinin temizlenmesi ve rafinasyonu ile sonuçlanmaktadır. Pik dökümünden elde edilen ürünler, çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır (Pik döküm, 2023).

Demir pik döküm süreci, öncelikle demir cevherinin temizlenmesi ve hazırlanmasıyla başlar. Bu adımda, cevherdeki istenmeyen maddeler (kum, çakıl, kireçtaşı gibi) uzaklaştırılır ve demir cevheri taşları ezilir veya öğütülür. Hazırlanan demir cevheri, yüksek sıcaklıkta eritme fırınlarına taşınır. Bu fırınlar, demir cevherini ergiten ve yüksek sıcaklıkta sıvı demir elde edilmesini sağlamaktadır. Ergitme işlemi genellikle kok kömürü veya koksaletle yakılan kupol fırında gerçekleştirilmektedir (Kupol ocağı, 2023).

Demir çelik ve döküm sektörü, ergimiş metalin içerisinde boşluk bulunan bir kalıba dökülerek katılaştırılmasıyla istenilen şeklin elde edilmesi yöntemidir. Döküm sektörü bilinen en zor, kirli, tozlu ve tehlikeli bir sektör olmasına rağmen, sağladığı istihdam ve ülke sanayisine katkısı sebebiyle dünya genelinde vazgeçilemez sektörlerden biridir. Otomotiv endüstrisi başta olmak üzere birçok iş kolunda özellikle demir-çelik döküm sanayinde, alüminyum ve bakır içerikli alaşımların üretimi sonrasında büyük miktarlarda atık ortaya çıkmaktadır.

Demisaş, döküm ürünleri üretmek için 1974 yılında kurulmuş ve o zamandan bu zamana halen ülkemizde döküm pazarı için üretim yapan güçlü bir şirkettir. Bilecik'te yer almakta olan üretim tesisleriyle döküm sektöründe standartlarını her zaman yükselterek gelişmiş ve günümüzde Avrupa'da önde gelen döküm şirketlerinden birisi olmuştur. Demisaş, 1990 yıllarından bu zamana artan yatırımlarıyla birlikte döküm sektöründe yıllık 80 bin ton üretim kapasitesine çıkmıştır. Bu büyümenin büyük etkisi, buzdolabı kompresörü, otomotiv parçaları, fren emniyet

parçaları ve ağır taşıt fren parçalarının üretimiyle gerçekleşmiştir. İleri teknolojik alt yapısı olan firma yaptığı döküm parçalarına ek olarak müşterilerine istedikleri ürünlerini işlenmiş olarak sunabilmektedir. Günümüzde Avrupa'daki otomotiv sanayisinin bütün tanınmış markaları döküm ihtiyaçları için Demisaş'la çalışmaktadır (Döküm, 2023).

Demisaş Döküm Emaye Mamülleri Sanayi A.Ş. işletmesinde, metallerin ergitilmesi esnasında kupol fırının kenarlarında biriken demir bir atık olarak ortaya çıkmaktadır (Döküm, 2023). Artan üretim, doğal kaynakların yoğun şekilde kullanılmasına, yoğun atık oluşumuna sebep olmaktadır. En azından atıkların geri dönüşümünü hızlandırmak ve alternatif kullanım alanlarını belirlemek için öncelikle firmaların, şehirlerin ve ülkenin atık yönetimi politikaları ile Ar-ge çalışmaları önem kazanmaktadır. Atık döküm kumlarının arıtma çamuru olarak, beton katkısı olarak, atık depolama sahalarında, agrega çalışmalarında gibi pek çok farklı kullanım alanı mevcuttur.

Duvar yüzeylerini kaplamak ve dekoratif bir görünüm sağlamak için kullanılan duvar karoları banyo, mutfak, oturma odası ve diğer iç mekanlarda duvarları kaplamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemiz seramik duvar ve yer karolarının üretimi ve tüketimi dünya geneline bakıldığında oldukça gelişmiştir (Aydın, 2011; Seramik Sektörü, 2022). Ayrıca seramik karolarının üretim esnasında kullanılan hammadde kaynakları bakımından da oldukça zengin bir ülkedir. Bu rağmen duvar karosu yapımında tüketilen bünye hammaddeleri büyük bir oranda yurtiçinden sağlanırken, bunların dışında kalan sır içerisinde kullanılan bazı malzemeler (boya, kimyasal malzemeler, katkı malzemeleri vb.) büyük sadece yurt dışından temin edilebilmektedir (Ağaçayak, 2009).

Duvar karoları sırlanarak dayanıklı hale gelmektedir. Çok farklı yüzey özelliklerine ve renk dağılımına sahip duvar karosu

sırları, cam yapıcılar, ergiticiler ve dengeleyicilerin bir arada kullanımından oluşmaktadır. Endüstride yaygın olarak kullanılan sır çeşitleri transparan, opak ve mat sırlardır. Bu çalışma kapsamında duvar karosu seramik üretiminde mat sır reçetelerinde kupol atıklarının değerlendirilmesi ve sır reçetelerini bozup bozmadığı incelenmiştir.

1. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada Demisaş Döküm Emaye Mamulleri Sanayi A.Ş. işletmesinde, metallerin ergitilmesi sırasında metal ergitilen kupol fırının kenarlarında biriken bir döküm atığı olarak ortaya çıkan kupol atığı kullanılmıştır (Şekil 1).

Tablo 1’de kullanılan kupol atığının kimyasal analizi verilmiştir. Atıkların kimyasal analizi (XRF) (Spectro X-Lab 2000) marka model XRF cihazı ile yapılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Atıkların Kimyasal Analiz Sonuçları

	Kupol Atığı
MgO	2.30
Al₂O₃	7.50
SiO₂	35.20
P₂O₅	0.06
SO₃	0.90
MnO	2.60
K₂O	0.44
CaO	29.20
Fe₂O₃	2.30
TiO₂	0.60
ZrO₂	0.08
Cr₂O₃	0.08
Co₃O₄	0.01
BaO	0.16
ZnO	0.02
Loi	18,55

Seğeri belli standart iki farklı mat sır reçetesi içerisinde %5-20 aralığında ilave edilen atık karışımı ile hazırlanan sır reçetesinin viskozite ve elek bakiye ölçüm aralığı TSE EN standartları içerisinde yer almaktadır.

Bu amaç doğrultusunda planlanan deneysel çalışmalarda, temin edilen atıkların kimyasal ve mineralojik özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan atık ilaveli mat sırlar, 1150°C’de ilk pişirimi yapılmış olan duvar karosu bünyelerine uygulanmıştır. Uygulama öncesi işletmede hazırlanan litre ağırlığı 1810 gr/lt ve viskozitesi 25 sn. olan engop uygulanmıştır.

Atıklar ağırlıkça % 0, 5, 10, 15 ve 20 oranında işletmede bulunan iki farklı mat duvar karosu sırası içerisinde ilave edilerek homojen olacak şekilde jet değirmende 10 dakika karıştırılmıştır. Atık ilavesiyle hazırlanan sırların litre ağırlığı 1830 gr/lt viskozitesi 25 sn. olacak şekilde ayarlanarak kampana (slayt) çekme yöntemiyle 1175°C’ta bisküvi olarak pişirilmiş duvar karoları bünyeleri üzerine uygulanmıştır. Sırlı duvar karoları daha sonra endüstriyel fırın ortamında 1075°C’de 35 dakika pişirilmiştir.

Tablo 2. Atık Karışım İlaveli Mat Duvar Karosu Sır Reçetelerinin Kodları

Hammadde	% Bileşim				
	0	5	10	15	20
M-1 Kodlu					
Mat Sır	100	95	90	85	80
CMC	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
STPP	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Atık	0	5	10	15	20
M-2 Kodlu					
Mat Sır	100	95	90	85	80
CMC	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
STPP	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Atık	0	5	10	15	20

Seramik sektöründe birbirinden farklı sır bileşimleri bulunmaktadır. Bu sırlar bileşimlerini oluşturan oksitlerin

yüzdelerine göre değil, hesaplanan mol oranlarına göre tanımlanırlar. Bu tanımlamaya sırn seger formülasyonu adı verilmektedir. Bu formülasyonun hesabı sır içerisinde yer alan bazik oksitlerin (tüm alkaliler, toprak alkaliler ve diğer bazik oksitler) mol oranlarının toplamları 1'e eşit olacak şekilde hesaplanır. Bir sırn segerini hesaplayabilmek için, içerisinde bulunan bütün oksitlerin mol oranları bilinmek zorundadır (Arcasoy, 1983; Taçyıldız, 2018). Çalışmada kullanılan duvar karosu M-1 ve M-2 kodlu sırların arasındaki en büyük fark M-1 sırnın içerisinde opaklık özelliğinin olmasıdır. Bu sır yüzeye daha pürüzsüz ve satenimsi bir görüntü kazandırmaktadır. M-1 ve M-2 sırlarının seger analizleri hesaplamaları Tablo 3 ve 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Kullanılan Duvar Karosu M-1 Kodlu Sırn Seger Analizi

Seger Analizi				
Bazik oksitler		Amfoter oksitler	Asidik	
0.05	ZnO			
0.02	MgO	0.076 Al ₂ O ₃	1.22	M-1 Kodlu
	SiO ₂			Mat Sır
0.01	K ₂ O			
0.92	CaO			

Tablo 4. Kullanılan Duvar Karosu M-2 kodlu Sırn Seger Analizi

Seger Analizi				
Bazik oksitler		Amfoter oksitler	Asidik	
0.086	Na ₂ O			
0.086	MgO	0.109 Al ₂ O ₃	1.18	M-2 Kodlu
	SiO ₂			Mat Sır
0,05	ZrO ₂			
0.03	K ₂ O			
0.714	CaO			

Atıklar numunelerine X-ışını floresansı (XRF) (Spectro X-Lab 2000) ile kimyasal analizi yapılmıştır. Ayrıca hazırlanan atık ilaveli duvar karosu mat sır denemelerinin renk dağılımları

PCE instruments colorimeter cihazında PCE-CSM2 model L*a*b* cihazında ölçülerek renk parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca hazırlanan duvar karolarının sırt yüzeylerine NANO SEM 650 ile SEM ve EDX çalışması yapılmıştır.

Çalışılan farklı sırt reçetelerinde pişme sonrasındaki oksitlerin, renklendirici oksitlerin çözünme etkisini gözlemlemek amacıyla kimyasal dayanım testleri yapılmaktadır. Yapılan kimyasal dayanım testleri sırt reçetelerini bazı sınıflandırmalara tabi tutar ve bu sınıflandırmalar sonucunda sırtlı yüzeyler TSE 10545'e göre geçerli ya da geçersiz bir değer olarak gruplandırılabilir.

Çalışmada üretilen duvar karolarına bazı kimyasallarla oluşturulmuş sulu çözeltilerin etkisine maruz bırakılarak belirli bir süre sonunda oluşan hasarlar incelenmiştir. Uygulanan kimyasalların etkisi ayrı ayrı incelenerek bilgileri düzenlenmiştir. Çözelti uygulanan duvar karoları üzerinde analizler sınıflandırılmıştır.

Hazırlanan duvar karoları üzerinde sırasıyla laktik asit, sitrik asit, potasyum hidroksit ve hidroklorik asit kimyasalları uygulanmıştır. Kimyasallara dayanımın saptanabilmesi için, çözeltiler numunelerin üzerinde 24 saat bırakılmıştır. Kimyasallardan potasyum hidroksit dayanımı için, duvar karosu deney çözeltisi ile 4 gün boyunca temas halinde bırakılmıştır.

Atık ilaveli mat sırtlı duvar karolarının kimyasal dayanım analiz sonuçları değerlendirilirken, A sınıflandırması; herhangi etki yok, B sınıflandırması; gözle görülür değişim, C sınıflandırması; kısmen değişim gibi etmenlere bakılarak nicel sınıflandırma yapılmaktadır. Bu sonuçlara göre üretimde kalite sınıflarına karar verilmektedir.

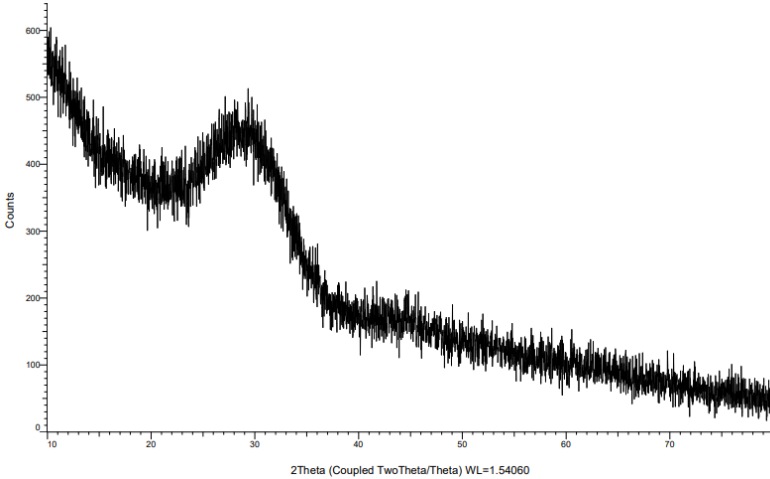
2. KUPOL'UN DUVAR KAROSU MAT SIRLARINDA KULLANIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmada kullanılan kupol atığının görseli Şekil 1'de ve XRD analizi 2'de verilmiştir. XRD analizinde kupol atığında, amorf faza rastlanmıştır.

Şekil 1. Kupol Atığı Tozu



Şekil 2. Kupol Atığının XRD Analizi



Kupol atığı ilave edilmiş duvar karosu M-1 kodlu mat sır numunelerinin görseli Şekil 3'te, Kupol atığı ilave edilmiş duvar

karosu M-1 kodlu mat sır numunelerinin $L^*a^*b^*$ sonuçları Tablo 1’te verilmektedir.

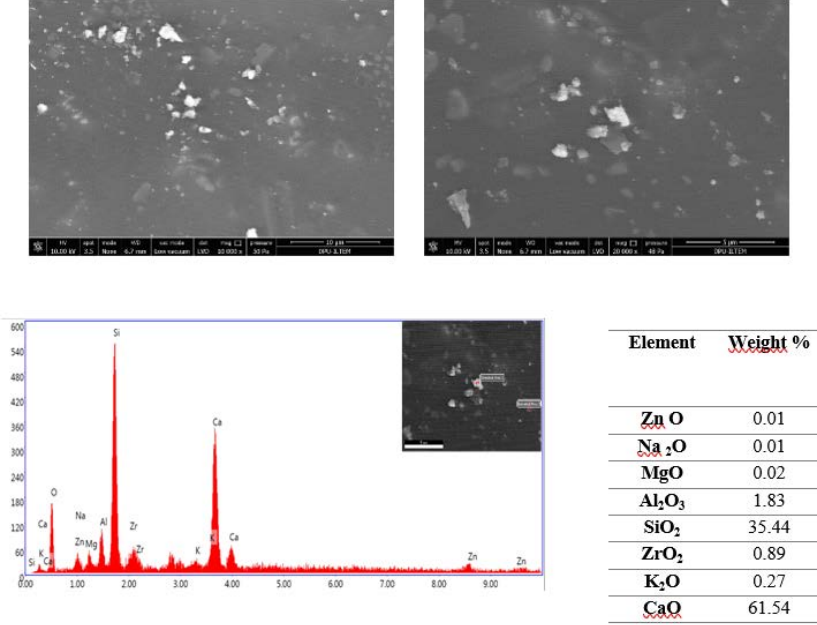
Şekil 3. Kupol Atığı İlave Edilmiş Duvar Karosu M-1 Kodlu Mat Sırındaki Etkileri



Tablo 1. Kupol atığı İlave Edilmiş Duvar Karosu M-1 Kodlu Mat Sır Numunelerinin $L^*a^*b^*$ Sonuçları

Atık Oranı (%)		L^*	a^*	b^*
Mat Sır (M-1)	Std.	92,37	0,08	1,43
	5	91,61	-0,82	1,65
	10	90,57	-1,66	3,21
	15	89,05	-2,23	5,09
	20	87,52	-2,48	6,45

Şekil 4. Kupol Atığı İlave Edilmiş Duvar Karosu M-1 Kodlu Mat Sırın Farklı Bölgelerinden Alınan SEM –EDX Analizleri



Tablo 2. Kupol Atığı İlave Edilmiş Duvar Karosu M-1 Kodlu Mat Sır Numunelerinin Kimyasal Dayanım Sonuçları

Seramik Karolar Kimyasal Dayanıklılık Tayini (TS EN ISO 10545-13)				
Atık Oranı (%)	Laktik Asit	Sitrik Asit	Potasyum Hidroksit	Hidroklorik Asit
0	C	C	A	C
5	C	C	C	C
10	C	C	C	C
M-1 15	C	C	C	C
20	C	C	C	C

3. KUPOL ATIĞI İLAVE EDİLMİŞ DUVAR KAROSU M-2 KODLU MAT SIRINDAKİ ETKİLERİ

Kupol atığı ilave edilmiş duvar karosu M-2 kodlu mat sır numunelerinin görseli Şekil 5'te, kupol atığı ilave edilmiş duvar karosu M-2 kodlu mat sır numunelerinin $L^*a^*b^*$ sonuçları Tablo 3'te verilmektedir.

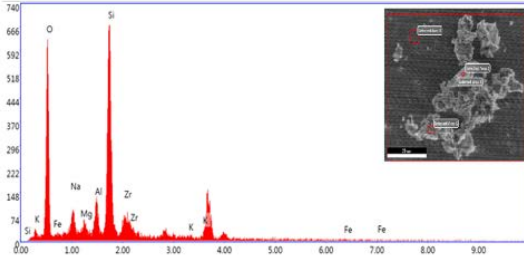
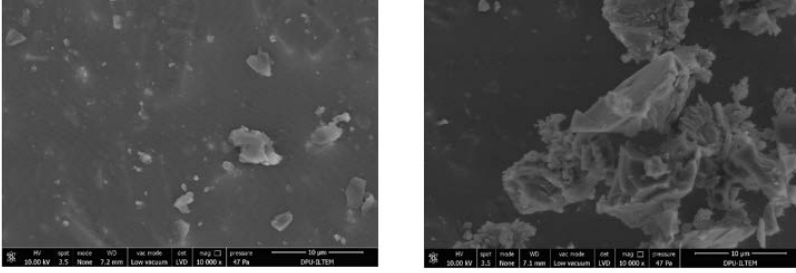
Şekil 5. Kupol Atığı İlave Edilmiş Duvar Karosu M-2 Kodlu Mat Sır Numunelerinin Görseli



Tablo 3. Kupol Atığı İlave Edilmiş Duvar Karosu M-2 Kodlu Mat Sır Numunelerinin $L^*a^*b^*$ Sonuçları

Atık Oranı (%)		L^*	a^*	b^*
Mat Sır (M-2)	Std.	91,94	0,07	2,06
	5	90,62	-0,65	2,87
	10	90,03	-1,58	3,85
	15	89,08	-2,04	4,88
	20	87,46	-2,42	6,19

Şekil 6. Kupol Atığı İlave Edilmiş Duvar Karosu M-2 Kodlu Mat Sırın Farklı Bölgelerinden Alınan SEM –EDX Analizleri



Element	Weight %
Fe ₂ O ₃	0.05
Na ₂ O	5.48
MgO	3.82
Al ₂ O ₃	9.56
SiO ₂	68.35
ZrO ₂	9.82
K ₂ O	2.92

Tablo 4. Kupol Atığı İlave Edilmiş Duvar Karosu M-2 Kodlu Mat Sır Numunelerinin Kimyasal Dayanım Sonuçları

Seramik Karolar Kimyasal Dayanıklılık Tayini (TS EN ISO 10545-13)				
<u>Atık Oranı</u> (%)	<u>Laktik</u> <u>Asit</u>	<u>Sitrik</u> <u>Asit</u>	<u>Potasyum</u> <u>Hidroksit</u>	<u>Hidroklorik</u> <u>Asit</u>
0	C	C	A	C
5	C	C	C	C
M-2 10	C	C	C	C
15	C	C	C	C
20	C	C	C	C

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Atıklar doğa olayları yoluyla çevreye dağılması hava, toprak ve suların kirliliğini meydana getirmektedir. Bu çalışmada kullanılan atık malzemelerin kimyasal özellikleri incelendiğinde atık malzemelerde oransal olarak farklı oksitlerin varlığı görülmektedir. Atık hammaddelerin yapısı içerisinde bulunan

geçiş elementlerinin seramik sektöründeki etkileri seramik prosesin farklı süreçlerinde farklı araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir.

Yapılan bu çalışmada ise endüstriyel mat sır reçetelerindeki renklenme etkisi, sır içerisinde kullanıldığındaki kimyasal dayanım etkileri 2 farklı mat sır reçetesi içerisinde ve farklı sektörlerin atıklarının herhangi bir ön işleme tabi tutulmaksızın sır reçetesi içerisine farklı oranlardaki ilavesi sonucundaki etkileri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiş ve en iyi sonuç elde edilen atık ilaveli reçetelerin %5 atığı içeriğine sahip sırlar olduğu görülmüştür ve bu sırlara analizler uygulanmıştır. Çalışmada elde edilen en iyi yüzey olan %5 katkılı sır reçetelerinin SEM analizleri de incelendiğinde atık hammaddenin sır içerisinde homojen dağıldığı belirlenmiştir. Ayrıca sırların karakterizasyonları yapılarak kimyasal dayanım sonuçları ile sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Kupol atığının iki farklı standart mat sır reçetesine ilave edilerek endüstriyel hızlı pişirim yapılması ile elde edilen $L^*a^*b^*$ renk değişimleri incelendiğinde; reçete içerisindeki artan oranları iki farklı mat sır için benzer şekilde L^* 'de düşüş, a^* ve b^* değerinde artış göstermiştir.

Kupol atığının duvar karosu mat sır reçetelerine ilavesiyle endüstriyel pişirim ortamında pişirilerek elde edilen sırların farklı büyütme oranlarında sağlanan SEM görüntüleri incelendiğinde genel olarak şunlar söylenebilir;

Atık malzemenin sır içinde kullanım miktarı arttıkça sır içindeki kristallenme miktarı artmıştır. Sır içerisinde tabaka halinde oluşan kristal fazın dendritik bir yapıya sahip olduğu söylenebilir ve SEM'in büyütmesinin arttırılmasıyla dendritik kristal yapının daha net görülebildiği söylenebilir.

%5 atık katkılı sırlarda yapılan EDX analizlerinde kristal yapıların ağırlıklı bir şekilde Al, Si, Na, Ca, ve K elementlerini içerdiği görülmüştür. Ayrıca farklı duvar karosu mat sır reçeteleri içerisindeki aynı atık oranı SEM fotoları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde kullanılan atıktan kaynaklı Ca elementi içeriği oldukça yükseldiği görülmüştür.

Yaptığımız çalışmada duvar karosu mat sırlarında renklendirici pigment yerine alternatif olarak %5 oranında kupol atıklarının değerlendirilip, kullanılabileceğini tespit edilmiştir. Seramik sanayinde kullanılan ve özellikle yurtdışından temin edilen bazı seramik sır hammaddelerinin yerine konulabilecek birçok hammadde ile ilgili alternatif malzeme çalışmaları yapılmaktadır ve yapılmaya devam edilecektir. Hem maliyetlerin aşağı çekilmesi hem de tek bir malzemeye bağımlı kalınmaması ve atık değerlendirilmesi açısından bu çalışmaların devam ettirilmesi çok önemlidir.

KAYNAKÇA

- Ağaçayak, T. (2009). Seramik hammaddeler. Selçuk Üniversitesi Yayınları, Konya.
- Arcasoy, A. (1983). Seramik Teknolojisi. Marmara Üniversitesi Yayın No:457, Güzel Sanatlar Fakültesi Yayın No:2, Eskişehir.
- Aydın D. (2011). Kaplama Malzemesi Olarak Seramik Üretiminin Bölgesel Dağılımına Etki Eden Parametrelerin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Döküm (2023, 14. Eylül). Erişim Adresi: <https://demisas.com>
- Kupol ocağı, (2023, 15 Haziran) Erişim Adresi: <https://malzemebilimi.net/kupol-ocagi.html>.

Pik döküm, (2023, 15 Haziran) Erişim Adresi:
<https://www.uslularhadde.com/celik-oksitleme-eritme-yontemleri>.

Seramik Sektörü. (2022, 30 Haziran). *Seramik sektörü dünya ve Türkiye verileri 2020-2021-2022*. Erişim Adresi:
https://serfed.com/upload/sunum/Seramik_Sektörü_Dünya_ve_Türkiye_Verileri_2020-2021-2022.pptx.

Taçyıldız, E. (2018). *Seramik sırrının sırrı* (1. Basım). İstanbul: Hayalperest Yayınevi.

NİKEL KROM ESASLI DENTAL MALZEMELER

Zeynep KESKİN¹

Serap GÜMÜŞ²

Rıdvan YAMANOĞLU³

1. GİRİŞ

Biyomalzeme sektöründeki gelişmeler dental uygulamalarda kullanılan malzemelerin de çeşitlenmesine neden olmuştur (Nazan, 2014). İlk dental malzemelerin üretiminde altın, gümüş katkılı malzemeler tercih edilmiştir (Graziella ve ark., 2019). Kıymetli metallere üretilen biyomalzemenin yüksek maliyetli olması dezavantajlı bir durum yaratmaktadır. Bu nedenle paslanmaz çelik kobalt, nikel ve titanyum esaslı malzemeler sektörde tercih edilmektedir. Sektörde en fazla kabul edilen alaşımlardan bazıları; Co-Cr-Mo, Ti-Al-V, Co-Ni-Cr-Mo-Ti, Ni-Cr (Rodrigo ve ark., 2012).

Dental malzeme üretiminde döküm, toz metalurjisi ve eklemeli imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Dental malzemeler yapıları gereği genel olarak karmaşık geometriye sahiptirler. Özellikle şekil çeşitliliği açısından sınırları neredeyse ortadan kaldıran eklemeli imalat yöntemleriyle üretim üzerine yapılan çalışmalarda son yıllarda önemli derecede artış görülmüştür. Bu sayede kişiye özgü dental malzeme üretimi mümkün olabilmektedir (Bo ve ark., 2014).

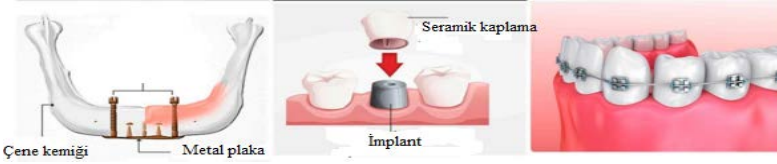
¹ Yüksek lisans öğrencisi, Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

² Dr. Öğr. Üyesi Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

³ Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Nikel ve alaşımlarının sahip olduğu yoğunluk değeri yaklaşık $8.5-9 \text{ g/cm}^3$ iken altının yoğunluğu 19.3 g/cm^3 'tür. Bu iki yoğunluk değeri karşılaştırıldığında nikel esaslı dental malzemeler hafiflik açısından ileriki dönemlerde tercih sebebi olmuştur. Bunun yanında doğal olarak nikel esaslı malzemelerin dental uygulamalarda kullanılmalarının en önemli sebebi maliyettir. (John, Jeanie&Whasun, 2013). Nikelin en önemli avantajlarından birisi de birçok metal ile alaşım oluşturmaya yatkın olmasıdır (Radey, 2012).

Şekil 1. Dental Uygulamalarda Kullanılan Malzemeler



Kaynak: (Saha&Roy,2023).

Dental uygulama söz konusu olduğunda ilk akla gelen nikel esaslı malzeme Ni-Cr alaşımlarıdır. Nikel krom alaşımları, bileşiminde genelde ağırlıkça %62-77 nikel ve %11-22 krom içerirler. Neptune, Rexalloy, Dsign10, Regalloy T, Vera Bond isimli nikel krom alaşımları sektörde tercih edilen başlıca alaşımlardır (Bumgardner&Lucas, 1993). Nikele krom ilavesiyle malzeme yüzeyinde pasif oksit tabaka oluşur, bu tabaka malzemenin korozyon direncinin artmasını sağlar (Mareci ve ark., 2010). Nikel esaslı alaşım ile kaplama malzemesi seramik arasında kuvvetli bir bağ oluşturur. Bunun sebebi nikel ve seramik malzemenin termal genleşme katsayısının birbirine yakın olmasıdır (Radev, 2012). Nikel esaslı dental malzemeler ortodontik tel ve diş protezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nikel esaslı alaşımların mikroyapıları da oldukça karmaşıktır, mikroyapıdaki heterojenlik malzemenin korozyon direnci ve mekanik özelliklerini etkilemektedir (Mareci ve ark., 2011).

2. NİKEL KROM DENTAL MALZEMELERİN BİYOUYUMLULUĞU

Biyoyumluluk hasarlı dokunun yerine kullanılacak olan malzemenin konak canlıda fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak olumsuz bir etki yaratmamasını ifade etmektedir (Elshahawy & Watanabe, 2014). Biyomalzeme vücutta herhangi bir alerjik, mutajenik veya inflamatuvar bir etki göstermeyen dokularla uyumlu malzemeleri kapsamaktadır. Vücutta hasarlı bir dokunun yerine kullanılarak fonksiyonu iyileştirmek, insanların yaşam kalitesinin artırılmasını sağlamak amacıyla biyomalzemeler kullanılmaktadırlar (Gayathry, Manoj&Shiny, 2022).

Metal esaslı biyomalzemelerden salınan iyonlar hastada alerjik bir reaksiyona sebebiyet verebilir. Alerjik reaksiyonla bağışıklık sistemi aktifleşerek inflamatuvar bir yanıt oluşturur. Sonrasında oluşan yumuşak doku değişikliği çeşitli hastalıklara ve implantın dokuya tam bağlanmamasına sebebiyet verebilir. Bu durum hastanın iyileşme sürecinde uzama meydana gelmesine neden olur (Rhusheet, Wesley&Juan, 2022). Stefanos ve ark. bir çalışmada ortopedik implant operasyonu planlanan hastalara metal alerji testi yapılmıştır. Çalışmaya toplamda 100 vaka dahil edilmiştir. Bunlardan 60 tanesinin daha öncesinde dermatolojik öyküsü bulunmakta iken 40 tanesinin dermatolojik öyküsü bulunmamaktadır. Çalışmaya katılan vakalara metal alerjilerinin belirlenmesi için yama testi yapılmıştır, her iki deney grubunda da vakaların en çok alerjik reaksiyon gösterdiği metal %23'le nikel olmuştur (Stefanos ve ark., 2019).

Ortodontik tedavilerde nikel esaslı malzemelerin kullanılmasının olumsuz etkileri olabilmektedir. Ağızın mikrobiyolojik doğası, tükürük pH'ı, yiyecek ve içeceklerin asidik karakterleri ortamı oldukça korozif bir hale getirmektedir. Bunun sonucunda hastaların ağız dokusuna iyon salınımı

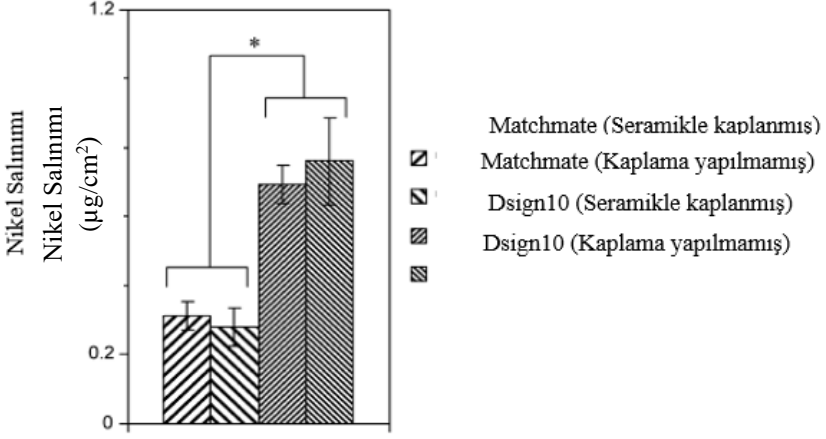
rahatlıkla gerçekleşmektedir (James ve ark., 2006). İyon salınımlarıyla kontakt dermatit, sitotoksikite veya DNA hasarı meydana gelebilmektedir. Nikel esaslı malzemeler alaşımlandırılarak korozyona karşı dirençli hale getirilip iyon salınımı azaltılabilir. Avrupa Kimyasal Ajansı (ECHA) insan vücuduyla uzun süre temas halinde olacak nikel esaslı malzemelerden salınacak nikel miktarını $0.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{hafta}$ olarak belirlemiştir. Nikel esaslı malzemelerden salınan iyon miktarını belirlemek için bir hafta boyunca yapay ter içeren solüsyona nikel esaslı malzeme daldırılır sonrasında atomik absorpsiyon veya endüktif plazma kütle spektrometrisiyle salınan iyon miktarı belirlenir (EN1811). EN 12472 isimli standart ile malzemenin aşınma ve korozyona karşı direnci simüle edilebilir (Giuseppe ve ark., 2020). Christopher ve ark. dental malzeme sektöründe kullanılan nikel esaslı malzemelerin içerdikleri ağırlıkça krom oranına ve numunelerin seramikle kaplanmasına göre özelliklerdeki değişimleri incelemişlerdir (Christopher ve ark., 2007). Kullanılan alaşımların bileşimleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Numunelerin Ağırlıkça Bileşimleri (%).

Malzeme	Ni	Cr	Mo	Al	Si	Fe
Matchmate	62.2	25	9.5	-	3.3	-
Dsign10	75.4	12.6	8	3.3	0.2	0.5

Şekil 2’de belirtildiği gibi ağırlıkça krom miktarı düşük olan Dsign10 isimli numunede nikel salınım miktarı daha fazladır. Bu da numunenin kimyasal kompozisyonunda kromun önemini ortaya koymaktadır. Krom numune yüzeyinde pasif bir oksit tabaka oluşturularak iyon salınımının azaltılmasını sağlamaktadır. Aynı çalışmada 3 ve 6 gün gibi periyotlarda hücrelerin canlılığı kontrol edilmiştir. Canlı hücre sayısında meydana gelen azalmanın en az olduğu numune Matchmate isimli numune olmuştur (Christopher ve ark., 2007). Tablo 2’ de biyomalzeme sektöründe kullanılan nikel esaslı farklı alaşımlar gösterilmektedir.

Şekil 2. Nikel Esaslı Numunelerin Nikel Salınım Miktarı



Kaynak: (Christopher ve ark., 2007).

Tablo 2. Numunelerin Ağırlıkça Bileşimi (%).

Alaşım	Ni	Cr	Mn	Mo	Fe	Al	Diğer
Neptune	61-63	20-23	-	7-9	1-3	-	-
Rexalloy	64-67	12-14	-	6-8	2-4	-	6-8
Regalloy T	72	16	4	4.5	-	3	0.5 Be
Vera Bond	76.9	12.6	-	5	-	2.9	1.75 Be
Vera Soft	62.8	14.5	19.5	-	-	1.6	1.6 Si

3. NİKEL KROM ESASLI DENTAL MALZEMELERİN KOROZYON DİRENCİ

Metaller uygun ortam koşullarında en düşük enerjiye sahip olan kararlı hallerine dönme eğilimindedir (Gülbin, 2023) Bu özelliğinden dolayı metalin yapısındaki iyonlar elektrolit ortama geçiş yaparak ya da kimyasal bileşik oluşturarak malzeme yüzeyinde oksit tabaka oluşturacaktır. Korozyon elektrokimyasal bir olaydır (Omotayo, Samuel&Michael, 2023). Korozyon oluşumu için katyon ve anyon içeren elektrolit bir ortam gereklidir (Gülbin,2023). Korozyondan dolayı oluşan aşınma ve çukurcukların etkisiyle heterojen bir yapı oluşur bu durum

mekanik özellikler açısından dezavantajdır (Omotayo, Samuel&Michael, 2023).

Metalik biyomalzemelerdeki iyonlar vücutta bulunan tükürük, kan gibi korozif sıvılarla etkileşime girerek alerjenik veya kanserojen bir etkiye sebep olabilir. Bu durumun önüne geçmek için malzemeyi oluşturan elementler aracılığıyla metalik biyomalzemenin yüzeyinde devamlı ve kararlı oksit tabaka oluşumu istenmektedir (Deepti ve ark., 2006). Bu oksit tabakanın korunması için aktivasyon enerjisi birbirine yakın elementler seçilebilir. Dental malzemelerde en çok görülen korozyon türleri çukurcuk ve taneler arası korozyondur (Gülbin, 2023).

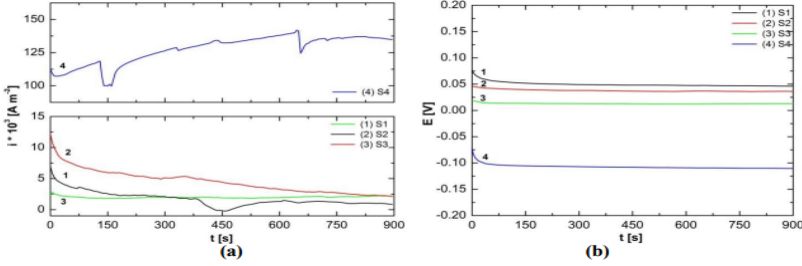
Nikel krom dental malzemelerin korozyon direnci hakkında çok sayıda çalışma yapılmıştır. Kimyasal kompozisyona eklenen elementlerin biyomalzemenin korozyon direnci üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Nikel krom dental malzemelerde korozyon direncini sağlayan en önemli element kromdur. Krom yapısı gereği bulunduğu malzemenin yüzeyinde pasif oksit bir tabaka oluşturur. Oluşan bu tabaka sayesinde malzemenin korozyon direnci yükselir (Helmuth, Natalia&Raul, 2017). Alaşımın kimyasal kompozisyonda minimum ağırlıkça %12 krom bulunmasının pasif oksit tabaka oluşturmak için yeterli olduğunu belirtilmiştir. Fakat yapılan diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre yüzeyde Cr_2O_3 tabakasının oluşması için krom oranının en az ağırlıkça %20 olmasının gerektiği ortaya konmuştur. Krom oranının optimum değerinin altına düşmesiyle yüzeyde NiO veya $NiCr_2O_4$ görülebilmektedir. Yapılan çalışmalarda nikel krom dental alaşımlara ağırlıkça %16-27 krom ve %6-17 molibden eklenmesinin malzeme yüzeyinde homojen ve koruyucu bir oksit tabaka oluşturduğu tespit edilmiştir (Gülbin, 2023).

Porojan ve ark. nikel krom dental alaşımların korozyon davranışını incelemek için in vitro deneyler yapmışlardır. Deneyler için kullanılan numunelerin kimyasal kompozisyonları Tablo 3’de gösterilmektedir (Porojan ve ark., 2018). Deney sırasında kullanılan elektrolitler %1 NaCl, Fusayama yapay tükürük ve Darvells solüsyonudur. Korozyon hızını değerlendirmek için potansiyodinamik polarizasyon yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 3. Numunelerin Ağırlıkça Bileşimi (%).

Numune	Ni	Cr	Mo	Si	Diğer
S1	65	22.5	9.5	-	Nb, Fe, Ce
S2	64.5	22	10	2.1	Nb, Mn, B
S3	66	26.5	5	1.5	Mn, B
S4	61.4	25.9	11	1.5	-

Şekil 3. Tablo 3’te Yer Alan Numunelerin Korozyon Davranışları



Şekil 3’de nikel krom dental malzemelerin oksidasyon davranışlarının farklı olduğu gözlenmiştir. S1, S2 ve S3 isimli numunelere ait Şekil 3(a)’daki grafikte oksidasyon süresince akım yoğunluklarının azalması yüzeyde pasif oksit bir tabaka oluştuğunun kanıtıdır. S4 numunesinin yüzeyinde bulunan tabaka heterojen bir şekilde dağılmıştır. Numunenin gözenekli bir yapıda olduğu söylenebilir dolayısıyla S4 numunesinin korozyon direnci daha düşüktür. Çalışmada yapay tükürük çözeltisine daldırılmadan önce ve sonrasında ait mikroyapılar incelenmiştir.

Yapılan incelemede S2 numunesinde interdendritik hacim oranı diğer numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. S3 ve S4 numunelerinde dökümden kaynaklı porozitelerin mevcut olduğu ve bu kusurların korozyona karşı direnç için olumsuz etki oluşturduğu vurgulanmıştır. Krom ve molibden sayesinde malzemenin yüzeyinde krom oksit ve molibden oksit oluşur. Oluşan bu tabaka alaşımdaki metal iyonlarının çözünmesini engelleyerek malzemeyi korozyona karşı dirençli hale getirir. En yüksek molibden oranına S4 adlı numune sahiptir fakat korozyon direnci en düşük olan numune de S4 isimli numunedir bu sonuçtan malzemenin sahip olduğu korozyon direnci sadece kimyasal kompozisyona değil malzemenin iç yapısındaki porozite, yüzeyde oluşan pasif tabakanın karakterizasyonuna da bağlı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır (Porojan ve ark., 2018).

Dental malzeme sektörünün gelişmesiyle birlikte nikel krom esaslı malzemelerin korozyon davranışını iyileştirmek için çeşitli elementler ilave edilmiştir. Bu çalışmalardan biri Ali Haleem ve ark. tarafından yapılmıştır. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen ağırlıkça aynı oranda nikel, krom, kobalt ve molibden içeren nikel krom esaslı dental alaşımlara 0.4, 0.8 ve 1.2 phr bor ilavesinin korozyon üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Elde edilen sonuçlara göre korozyon direncinin en yüksek olduğu alaşımın 0.8 phr bor içeren numune olduğu ortaya konulmuştur. Bor ilavesinin korozyon direncine olumlu etkisinin nedeni bor atomlarının tane sınırında ayrışıp tane sınırı enerjisinin azalmasını sağlamasıdır. Aynı zamanda bor ilavesi yapıda tane boyutunu inceltmiş ve mekanik özellikler açısından olumlu etki meydana getirmiştir. (Ali, Haydar&Ban, 2021)

Nawal ve ark. yaptığı bir başka çalışmada nikel kroma zirkonyum ilavesinin etkileri araştırılmıştır. Toz metalurjisiyle üretilen numunelerin kimyasal kompozisyonunda krom, kobalt ve molibden oranları sabit tutulmuş alaşıma ağırlıkça % 3, 6 ve 9 oranlarında zirkonyum ilave edilmiştir. Zirkonyum ilavesinin

alaşımın korozyon potansiyelini azalttığı görülmüştür. Ayrıca tükürük çözeltilisi içinde bekletilen numunelerin iyon salınımının zirkonyum ilavesiyle azaldığı gözlenmiştir. Kimyasal kompozisyona ilave edilecek optimum zirkonyum oranının da ağırlıkça % 6 olduğu tespit edilmiştir (Nawal, Kadhim&Hussein, 2021).

Ali Haleem ve Nawal' ın ark. yaptığı iki çalışmada da korozyon direncinin kimyasal kompozisyona eklenen elementlerin artmasıyla sürekli olarak artmayacağı eklenen elementin optimum bir değer aralığı olması gerektiği ortaya konulmuştur.

Demetrios ve ark. yaptıkları bir çalışmada nikel krom ve kobalt krom dental malzemelere ağırlıkça %25 paladyum ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre alaşımlara paladyum ilavesinin çukurcuk korozyonuna neden olduğu bildirilmiştir. Bu çalışmayla beraber dental malzemeye eklenen her elementin korozyon direnci açısından olumlu sonuçlar yaratmayacağı kanıtlanmıştır (Demetrios ve ark., 2011).

Farklı bir çalışmada Tablo 4'te gösterilen farklı nikel krom ve kobalt krom esaslı malzemelerin korozyon davranışları karşılaştırılmıştır (Falcon ve ark.,2021). Elde edilen sonuçlara göre Ni4, Ni5 ve Ni6 numunelerinin korozyon dirençleri diğer numunelere göre daha düşüktür.

Mikroskop ile inceleme sonrasında numunelerde çukurcuk korozyonu gözlenmiştir. Numunelerin korozyon dirençlerinin düşük olmasının nedeni kimyasal kompozisyondaki ağırlıkça krom oranının düşük olması, diğer numunelerden farklı olarak alaşımda molibden elementinin olmaması ifade edilmiştir. Kimyasal kompozisyonda krom ve molibden elementi varlığında çukurcuk korozyonu direncini artırdığı belirtilmiştir. Ni1, Ni2, Ni3, Co1 ve Co2 isimli numunelerin yüzeyindeki pasif oksit tabakanın bozulmadığı tespit edilmiştir. Numunelerden en yüksek

korozyon direncine sahip alaşım Co2 isimli alaşımdır (Carmen ve ark., 2021).

Tablo 4. Numunelerin Ağırlıkça Bileşimleri (%).

	Ni1	Ni2	Ni3	Ni4	Ni5	Ni6	Co1	Co2
Ni	60.1	60.8	63.4	72.1	64.9	53.4	1	-
Co	-	-	-	-	-	-	63.5	63.4
Cr	24.3	23.9	23.2	20	17.9	14.4	27	29
Mo	10.1	8.8	3	-	-	-	5.5	5.2
Fe	2.1	2.4	9	7.5	-	-	2	-
Nb	1	3.8	-	-	-	-	-	-
Cu	-	-	-	-	9.9	9.5	-	-
Mn	2	-	-	-	3.6	19.4	-	-
Al	-	-	-	-	1.5	1.6	-	-
Si	-	-	1	-	1.8	1.5	-	-

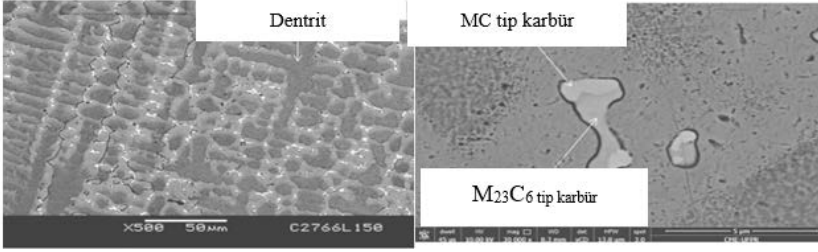
Constantina ve ark. dental uygulamalarda kullanılan Ti6Al4V ve NiCr alaşımlarının korozyon dirençlerini karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada içerisinde FdMn44 bakterisi bulunan ve bakteri bulunmayan yapay 2 tükürük çözeltisi kullanılmıştır. Alaşımlar bu çözeltilere daldırılmış ve korozyon dirençleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre NiCr alaşımının çukurcuk korozyonuna uğrama eğiliminin olduğu tespit edilmiştir. Ti6Al4V alaşımının korozyon direncinin NiCr'a göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Constantina ve ark., 2018).

4. NİKEL KROM ESASLI DENTAL MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Nikel esaslı malzemeler gama (γ) matrisi olarak adlandırılan yüzey merkezli kübik yapılı östenitik fazı içerir. Nikel esaslı malzemelerde bulunan karbürler genel olarak tane sınırına yerleşme eğilimi göstermektedir. Karbürler tane sınırında ince bloklar halinde dağılmışlarsa tane sınırı kaymasına engel olarak mukavemetin artmasını sağlarlar. Fakat karbürler sürekli

filmler halinde tane sınırlarında bulunurlarsa sünekliğin düşmesine neden olurlar. Nikel esaslı malzemelerde bulunan karbür tipleri MC, $M_{23}C_6$, M_6C ve M_7C_3 'tür. Buradaki M; Cr, Mo ve Ti gibi metalleri temsil etmektedir (Gökhan, 2016).

Şekil 4. Nikel Esaslı Malzemede Görülen Karbür Tipleri



Kaynak: (Silva, Karin&Adriona,2015).

MC karbürler, $M_{23}C_6$ ve M_7C_3 ikincil karbürlerin çökmesi için karbon kaynağı sağlarlar. İkincil karbürler;

- İçerdikleri krom oranı bakımından zengindirler,
- Isıl işlem sırasında dislokasyon hareketini engelleyerek mukavemet artışını sağlarlar,
- Tane sınırlarında meydana gelebilecek aşırı kayma olayını kontrol ederek gerilme, kopma ve sürünme mukavemetini olumlu yönde etkilerler.

Tane sınırlarında bulunan karbür miktarlarına dikkat edilmelidir karbürler tane sınırı filmi olarak çöklerlerse çatlak yayılmasını kolaylaştırır (Anup, Chandan&Rahul, 2021). Dental biyomalzemelerde dinamik ve çevrimsel yüklerden kaynaklı yorulma çatlağı ve sürtünme kaynaklı aşınma gibi mekanik problemler sıklıkla gözlenmektedir (Hasan ve ark, 2022). Nidhal ve ark. diş implantlarındaki hasarların yaklaşık olarak %40'ının aşınma ve çatlak oluşumundan kaynaklandığını belirtmiştir (Nidhal ve ark., 2019). Sektörde kullanılan dental malzemelerin mekanik özellikler açısından karşılaştırılması Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Dental Uygulamalarda Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Alaşım	Gerilme Mukavemeti (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Uzama (%)
Ni-Cr	539-919	180-858	141-248	1-32,6
Ni-Cr-Be	778-1355	325-838	165-210	3-23,9
316L	550-600	220-331	190-200	50-55
Ti	240-550	170-480	96-114	7,9-20
Ti-6Al-4V	877-930	830-870	113-137	2,1-12
Au	-	207-434	90	10-39

Nikel kromun, kobalt krom esaslı dental malzemelere göre sektörde tercih edilme nedeni süneklik değerinin daha yüksek olması ve termal genleşme katsayısının seramiğe yakın olmasıdır. Nikel krom dental malzemenin termal genleşme katsayısının seramiğe yakın olması malzemede oluşan sıcaklık değişimlerinde çatlak oluşmasının önlenmesini sağlar. Nikel kromun altına göre elastik modülü daha yüksektir, bu malzemeye rijitlik sağlamaktadır. Nikel krom esaslı dental malzemelerde alüminyum tane inceltici etki yaparak mukavemet artışı sağlar (Michael, 2007). Achitei ve ark. dental uygulamalar için kullanılan VeraSoft isimli alaşıma silisyum ilavesiyle mekanik özelliğinin değişimini incelemiştir. Silisyum oranının artırılmasıyla sertlik değerinin azaldığı gözlenmiştir (Dragos ve ark., 2022).

5. SONUÇ

Bu çalışmada dental uygulamalarda kullanılan nikel esaslı alaşımların biyouyumluluk, elektrokimyasal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Nikel toksik ve kanserojen bir element olarak bilinmektedir. Nikel esaslı alaşımın, kimyasal kompozisyonuna çeşitli elementler ilave edilerek nikel iyonunun vücut içerisine salınımının azaltıldığı sonucuna yapılan çalışmalardan ulaşılmıştır. Nikel içerisine krom ilavesiyle pasif

oksit tabaka oluşur, oluşan bu tabaka sayesinde vücut içerisine iyon salınımı engellenmiş olur. İyon salınımının engellenmesi malzemenin biyouyumluluğu açısından da önemlidir. Nikel esaslı malzemelerin mikroyapısında görülen karbür tipleri mekanik özellikler açısından iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Seramiklerle termal genleşme katsayısının yakın olmasından dolayı dental uygulamalarda Ni-Cr esaslı malzemelerin kullanımı yaygındır. Nikel esaslı dental malzemeler döküm gibi geleneksel yöntemlerle üretilmektedir. Son yıllarda dental malzemelerin SLM gibi yenilikçi yöntemler ile üretilmesi üzerinde yapılan çalışmalar artmıştır. SLM yöntemi sayesinde hem kişiye özel dental malzeme üretimi kolaylaşmış olur hem de mekanik özellikler açısından olumlu sonuçlar elde edilebilir. Nikelin dental uygulamalarda kullanılan diğer malzemelere göre maliyetinin düşük olması aslında sektördeki kullanımı için en önemli etkidir. Bu sonuçlardan dolayı nikel esaslı alaşımlar dental uygulamalarda yüksek potansiyele sahip malzemelerdir.

KAYNAKÇA

- Achitei, D. C., Baltatu, M. S., Vizureanu, P., Sandu, A. V., Benchea, M., & Istrate, B. (2022). Ni-Cr Alloys Assessment for Dental Implants Suitability. Applied Sciences (Switzerland), 12(24).
- Bumgardner, J. D., & Lucas, L. C. (1993). Surface analysis of nickel-chromium dental alloys. Dental Materials, 9(4).
- Dawood, N., Sultani, K., & Jasim, H., (2021). The role of zirconia additions on the microstructure and corrosion behavior of Ni-Cr dental alloys. Materials Research Express, 8.
- Demiryürek, Nazan. Nikel Katkılı Biyomedikal CoCrMo Alaşımlarının Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi.

Yüksek Lisans Tezi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, 2014.

- Elshahawy, W., & Watanabe, I. (2014). Biocompatibility of dental alloys used in dental fixed prosthodontics. *Tanta Dental Journal*, 11(2), 150–159.
- Galo, R., Riberiro R., Rodrigues R., Rocha L., Mattos M. (2012) Effects of Chemical Composition on the Corrosion of Dental Alloys. *Braz Dent J* 23(2),141-14.
- Garcia-Falcon, C. M., Gil-Lopez, T., Verdu-Vazquez, A., & Mirza-Rosca, J. C. (2021). Analysis and comparison of the corrosive behavior of nickel-based and cobalt-based dental alloys. *Materials*, 14(17).
- Gayathry, G., Manoj, K., & Shiny, V. (2022). Biomaterials for Medical Products. In *Biomedical Product and Materials Evaluation: Standards and Ethics*.
- Genchi, G., Carocci, A., Lauria, G., Sinicropi, M. S., & Catalano, A. (2020). Nickel: Human health and environmental toxicology. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 17, Issue 3).
- Haddad, S. F., Helm, M. M., Meath, B., Adams, C., Packianathan, N., & Uhl, R. (2019). Exploring the Incidence, Implications, and Relevance of Metal Allergy to Orthopaedic Surgeons. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons Global Research and Reviews*, 3(4).
- Haleem, A. H., Jamal Al-Deen, H. H. J., & Shanan, B. A. (2021). The Effect of Boron Addition on the corrosion behavior of Ni Cr Modental alloy prepared by powder metallurgy. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1).
- Klapper, H. S., Zadorozne, N. S., & Rebak, R. B. (2017). Localized corrosion characteristics of nickel alloys: A

- review. In *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* (Vol. 30, Issue 4).
- Liliana, P., Elena, S. C., Virgil, C. L., Laurențiu, D. M., & Daniel, P. S. (2018). Corrosion behavior of Ni-Cr dental casting alloys. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(1).
- Mansoor, N. S., Fattah-Alhosseini, A., Shishehian, A., & Elmkhah, H. (2019). Tribological properties of different types of coating materials deposited by cathodic arc-evaporation method on Ni-Cr dental alloy. *Materials Research Express*, 6(5).
- Mareci, D., Sutiman, D., Cailean, A., & Bolat, G. (2011). Electrochemical determination of the corrosion resistance of NiCr dental casting alloys. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 47(1).
- Maurya, A. K., Pandey, C., & Chhibber, R. (2021). Dissimilar welding of duplex stainless steel with Ni alloys: A review. In *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (Vol. 192).
- Özbay, Gülbin. Dişçilikte Kullanılan Paslanmaz Çeliğin Polietilen Glikol (PEG) İçeren Nikel-Krom Alaşımı ile Kaplanması ve Yapay Tükürük Ortamında Korozyon Davranışının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, 2023.
- Pârâu, A. C., Zamfir, S., Zamfir, R. I., & Coleașă, G. (2012). Comparative studies on the corrosion resistance of Ti6Al4V and NiCr alloys in artificial saliva. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 74(4).
- Patel, R., Moore, W., & Jimenez, J. C. (2022). Severe symptomatic nickel allergy following stent graft

implantation requiring excision and external iliac artery reconstruction. *Journal of Vascular Surgery Cases, Innovations and Techniques*, 8(4).

Radev, D. D. (2012). Nickel-Containing Alloys for Medical Application Obtained by Methods of Mechanochemistry and Powder Metallurgy. *ISRN Metallurgy*, 2012.

Roach, M. (2007). Base Metal Alloys Used for Dental Restorations and Implants. In *Dental Clinics of North America* (Vol. 51, Issue 3).

Saha, S., & Roy, S. (2023). Metallic Dental Implants Wear Mechanisms, Materials, and Manufacturing Processes: A Literature Review. In *Materials* (Vol. 16, Issue 1).

Sanni, O., Iwarere, S. A., & Daramola, M. O. (2023). Introduction: Corrosion basics and corrosion testing. In *Electrochemical and Analytical Techniques for Sustainable Corrosion Monitoring: Advances, Challenges and Opportunities*.

Sarantopoulos, D. M., Beck, K. A., Holsen, R., & Berzins, D. W. (2011). Corrosion of CoCr and NiCr dental alloys alloyed with palladium. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 105(1).

Setcos, J. C., Babaei-Mahani, A., Silvio, L. di, Mjör, I. A., & Wilson, N. H. F. (2006). The safety of nickel containing dental alloys. In *Dental Materials* (Vol. 22, Issue 12).

Silva Ferreira, L., Graf, K., & Scheid, A. (2015). Microstructure and properties of nickel-based C276 alloy coatings by PTA on AISI 316L and API 5L X70 steel substrates. *Materials Research*, 18(1).

Song, B., Dong, S., Coddet, P., Liao, H., & Coddet, C. (2014). Fabrication of NiCr alloy parts by selective laser melting: Columnar microstructure and anisotropic mechanical behavior. *Materials and Design*, 53.

- Tımaç, Gökhan. Nikel Esaslı Süperalaşım Köpük Malzemelerin Boşluk Oluşturma Tekniği ile Üretilmesi, Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi,2016.
- Turdean, G. L., Craciun, A., Popa, D., & Constantiniuc, M. (2019). Study of electrochemical corrosion of biocompatible Co–Cr and Ni–Cr dental alloys in artificial saliva. Influence of pH of the solution. *Materials Chemistry and Physics*, 233.
- Upadhyay, D., Panchal, M. A., Dubey, R. S., & Srivastava, V. K. (2006). Corrosion of alloys used in dentistry: A review. In *Materials Science and Engineering: A* (Vol. 432, Issues 1–2).
- Wataha, J. C., Drury, J. L., & Chung, W. O. (2013). Nickel alloys in the oral environment. In *Expert Review of Medical Devices* (Vol. 10, Issue 4).
- Wylie, C. M., Shelton, R. M., Fleming, G. J. P., & Davenport, A. J. (2007). Corrosion of nickel-based dental casting alloys. *Dental Materials*, 23(6).
- Yavuz, H., Kıraç, M., Uzuner, H., Özdemir, Y., Avcu, Y.&Yamanoğlu, R.,Kobalt Esaslı Biyomedikal Malzemeler. 1st International Conference on Innovative Academic Studies,10-13 Sep 2022, Konya,1249-1259.

SLM İLE ÜRETİLEN IN625 ALAŞIMI İÇİN ISIL İŞLEMİN MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ

Rıdvan YAMANOĞLU¹

Mertcan KIRAC²

İdris GÖKALP³

1. GİRİŞ

Nikel esaslı süper alaşımlar mükemmel korozyon direnci ve yüksek mekanik özellikler göstermektedirler. Bundan dolayı nikel esaslı süper alaşımlar zorlu çalışma koşullarında paslanmaz çelik ve titanyum esaslı malzemelere göre tercih sebebi olmaktadır [1,2]. Yüksek sıcaklıklarda üstün özellikler sergilemeleri nikel esaslı süper alaşımları vazgeçilmez bir hale getirmiştir. Özellikle uzay, havacılık, otomotiv ve petrokimya gibi endüstriyel uygulamalarda nikel esaslı süper alaşımlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan nikel esaslı süper alaşımlara Nimonic, Rene, Udimet, Pyromet, Astroloy, Waspaloy Cabot, Haynes ve Inconel serileri örnek verilebilir [3-5]. IN625 alaşımının kimyasal kompozisyonunda yer alan krom (Cr), molibden (Mo) ve Niyobyum (Nb) gibi alaşım elementleri IN625 alaşımını çalışma performansı bakımından oldukça üstün kılmaktadır [6,7].

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ryamanoglu@kocaeli.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-4661-8215

² Ermaksan, Bursa, mertcan.kirac@ermaksan.com.tr, ORCID ID: 0000-0003-0793-8117.

³ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, idris.gokalp@kocaeli.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-5270-696X

Ekleme imalat teknolojileri (Eİ) modern bir üretim yöntemi olarak elektronik, otomobil, uzay, havacılık ve biyomedikal gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Eİ teknolojileri yüksek yoğunlukta ve karmaşık geometriye sahip parça üretimine imkân tanımaktadır [8]. Geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında büyük bir avantaj sağlayan Eİ teknolojileri yüksek enerji yoğunluğu altında katman katman parça üretimi prensibine dayanmaktadır [9]. Eİ teknolojilerinde genellikle hammadde olarak metal tozu kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan Eİ teknolojilerine kıvılcım plazma sinterleme (SPS), elektron ışın ergitme (EBM) seçici lazer ergitme (SLM) yöntemleri örnek olarak verilebilir [10-12]. Bu yöntemler arasında özellikle uzay ve havacılık sektöründe kullanılan malzemelerin üretiminde SLM metodu dikkat çekmektedir. SLM metodu bir tabla üzerine serilen metal tozun ergitilmesi ve ardından hızlı bir şekilde katılaşması ile parça üretiminin gerçekleştiği bir yöntemdir [13]. Diğer Eİ yöntemleri ile karşılaştırıldığında SLM metodu ile daha yüksek yoğunlukta ve mükemmel boyut hassasiyetine sahip yapısal malzemeler üretilebilmektedir. Diğer yandan her ne kadar SLM metodu üstün özelliklere sahip olsa da üretim esnasında füzyon eksikliği ve gaz boşlukları gibi birçok kusur ile karşılaşmaktadır. SLM metodu ile yüksek enerji yoğunluğu altında parça üretimi gerçekleştiğinden dolayı proses parametrelerinin kontrolü oldukça zordur [14].

SLM metodunda üretim parametrelerinin optimizasyonu kritik bir öneme sahip olmaktadır. Optimizasyon işleminde lazer gücü (W) ve tarama hızı (mm/s) en önemli parametrelerdir [15]. Bu parametrelerin malzeme cinsine ve uygulama alanına göre belirlenmesi gerekir. Üretim parametrelerinin optimizasyonuna rağmen her üretim yönteminde olduğu gibi SLM metodu ile üretilen parçalarda da içyapıda homojenliğin sağlanması için ısıl işleme ihtiyaç duyulmaktadır. Uygun ısıl işlem parametrelerinin

belirlenmesi ile homojenliğin yanı sıra içyapıda meydana gelen gerilmeler giderilebilmektedir. Ayrıca ısı işlem mukavemetin artışına katkı sağlamaktadır [16,17].

Bu çalışmada uzay ve havacılık uygulamalarında yüksek mekanik özelliklerinden dolayı tercih edilen IN625 alaşımının SLM metodu ile üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretim parametrelerinin optimizasyonu sonrasında IN625 alaşımında gerilmelerin giderilmesi ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi için ısı işlem uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak ısı işlemin etkisi ortaya konmuştur.

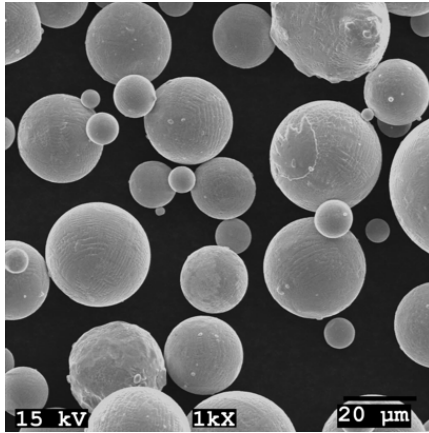
2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada kullanılan IN625 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 1'de ise IN625 alaşım tozunun JEOL JSM-600 model taramalı elektron mikroskobu ile çekilen SEM görüntüleri verilmiştir.

Tablo 1. IN625 Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu (% Ağ.)

Element	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe
%	Kalan	21,54	8,91	3,49	1,07

Şekil 1. IN625 Alaşım Tozunun SEM Görüntüsü



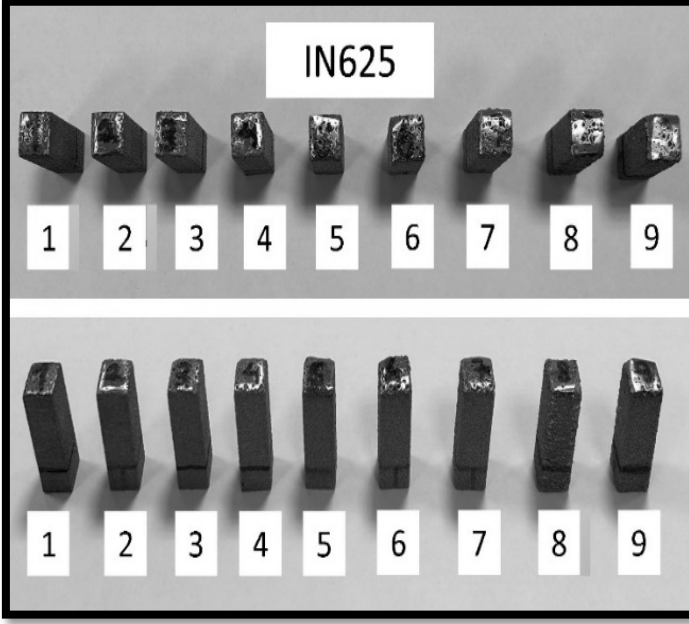
ERMAKSAN firması tarafından geliştirilen Enavision marka 3D yazıcıda SLM metodu ile 10x10x30mm boyutlarında IN625 numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin üretim parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Numunelerin üretim sonrası makro görüntüleri Şekil 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. IN625 Numunelerinin Üretim Parametreleri

Numune No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lazer Gücü (W)	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Lazer Tarama Hızı (mm/s)	450	400	350	300	250	200	175	150	125
LED Değeri (J/mm)	0,78	0,88	1,00	1,17	1,40	1,75	2,00	2,33	2,80

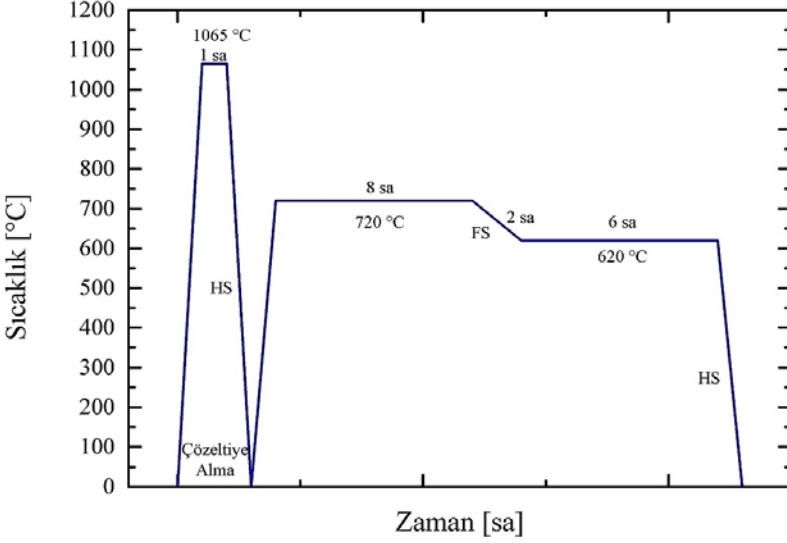
SLM IN625 numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. IN625 numunelerde ısıl işlem etkisinin ortaya konması için kullanılan çevrim Şekil 3’te gösterilmiştir. Isıl işlem parametreleri için seçilen sıcaklıklar ve süreler sırasıyla 1065 °C, 720°C, 620°C ve 1sa, 8sa ve 6sa olarak belirlenmiştir. Numuneler ısıl işlem öncesi ve sonrasında metalografik olarak hazırlanmıştır. Sırasıyla 320, 600, 1000 ve 2000 numara SiC zımparalar ile yüzey parlatılmaya hazır hale getirilmiştir. Parlatma işleminde 9µ ve 3µ elmas solüsyonları kullanılmıştır ve yüzey ayna görüntüsü haline getirilmiştir. Mikroyapının ortaya çıkarılması için 15 ml HCl, 10 ml HNO₃ ve 5 ml CH₃COOH çözeltisi ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu için Olympus BX41M-LED marka ışık mikroskobu kullanılmıştır.

Şekil 2. SLM Metodu ile Üretilen IN625 Numunelerinin Makro Görüntüsü



SLM IN625 numunelerde ısıtılma işleminin mekanik özellikler üzerine etkisinin belirlenebilmesi için sertlik ve çekme testleri yapılmıştır. Numunelerin sertlik testleri Future-Tech EV-700 Vickers sertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Sertlik testi 10 kgf yük altında ve 10s süre ile yapılmıştır. Son olarak oda sıcaklığında çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi Instron 5985 model cihazda gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3. IN625 Numunesi İçin Kullanılan Isıl İşlem Çevrimi



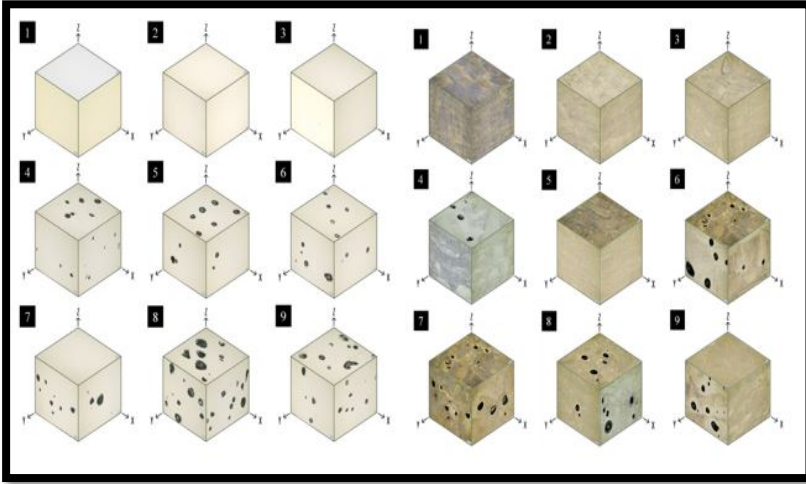
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

SLM metodu ile üretilen IN625 numunelerinin LED değerlerine bağlı yoğunlukları Tablo 3'te verilmiştir. 0,78 J/mm LED değerinde üretilen ve %99,86 g/cm³ yoğunluk değeri ile en yüksek yoğunluğa sahip 1 nolu numune olmuştur. Diğer yandan 0,88 ve 1 J/mm LED değerlerinde üretilen 2 ve 3 nolu numunelerde sırasıyla %99,8 ve %99,71 g/cm³ gibi yüksek yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Bir malzemenin yoğunluk değeri doğrudan içyapıyı ve mekanik özellikleri etkilemektedir. [18]. Yoğunluk değerinin mikroyapı üzerindeki etkisinin net bir şekilde anlaşılabilmesi için Şekil 4'te SLM IN625 numunelerinin parlatılmış ve dağlanmış konumdaki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

Tablo 3. SLM IN625 Numunelerinin Yoğunluk Değerleri

LED (J/mm)	Numune Kodu	Nihai Yoğunluk (g/cm ³)	Relatif Yoğunluk (%)
0,78	1	8,50	99,86
0,88	2	8,49	99,80
1,00	3	8,48	99,71
1,17	4	8,47	99,51
1,40	5	8,46	99,39
1,75	6	8,44	99,22
2,00	7	8,41	98,84
2,33	8	8,35	98,09
2,80	9	8,39	98,57

Şekil 4. IN625 Numunelerinin Parlatılmış ve Dağlanmış Konumdaki Optik Mikroskop Görüntüleri



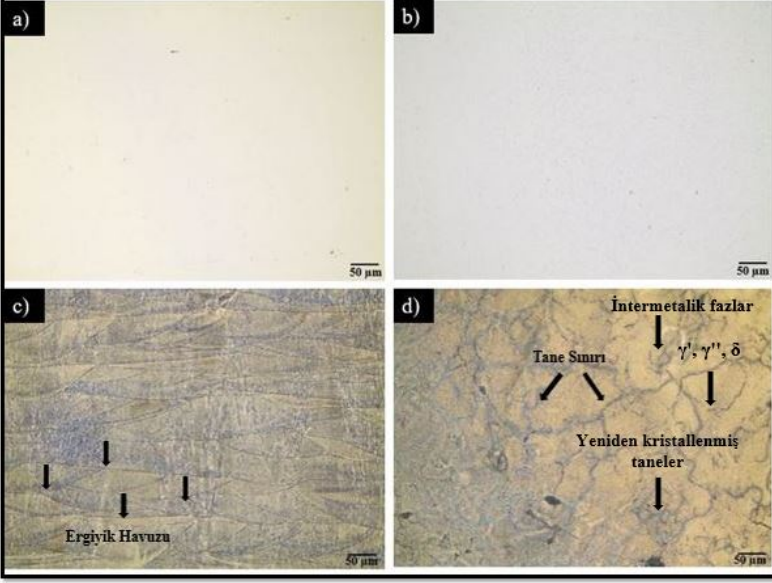
Şekil 4’te IN625 numunelerin optik mikroskop görüntülerinde yüksek yoğunluk değerlerine sahip olan 1, 2 ve 3 nolu numunelerde çok düşük miktarda porozite görülmektedir. Diğer yandan 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 nolu numunelerde ise makro boyutta poroziteler mevcuttur. Porozitelerin oluşması üretim esnasında içyapıda biriken çözünmüş gaz birikiminden kaynaklanmaktadır. SLM metodunda üretim parametrelerine bağlı olarak karşılaşılan malzeme kusurları füzyon eksikliği veya

anahtar deliği gözenekliliğidir. Yüksek LED değerlerinde anahtar deliği gözenekliliği görülmektedir. Düşük LED değerlerinde ise füzyon eksikliği kusuruna rastlanılmaktadır [19,20]. Şekil 4'te verilen mikroyapı görüntülerinde yüksek LED (>1 J/mm) değerlerinde meydana gelen anahtar deliği gözenekliliği dikkat çekmektedir.

Bütün üretim yöntemlerinde olduğu gibi Eİ yöntemlerinde de üretim esnasında içyapı kusurları meydana gelmektedir. Özellikle içyapıda meydana gelen porozite ve iç gerilmeler malzemelerin mekanik davranışlarını olumsuz etkilemektedir. Bu kusurların azaltılması veya ortadan kaldırılması için en çok tercih edilen yöntemlerden biri ısıl işlem yöntemidir. Isıl işlem ile birlikte tavlama sıcaklıklarında iç gerilmeler giderilebilmektedir. Diğer yandan intermetalik fazların çökmesi ile birlikte mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanabilmektedir [21,22]. Bu çalışmada da ısıl işlemin mikroyapıya etkisi Şekil 5'te ısıl işlem öncesi ve sonrası parlatılmış ve dağlanmış konumdaki görüntülerde verilmiştir.

Şekil 5a ve b, IN625 alaşımının sırasıyla ısıl işlem öncesi ve sonrası parlatılmış konumdaki optik görüntüleri temsil etmektedir. Şekil 5c ve d ise IN625 alaşımının ısıl işlem öncesi ve sonrası dağlanmış konumdaki görüntüleri ifade etmektedir.. Şekil 5c'de IN625 numunesinin ısıl işlem görmemiş mikroyapısında yoğun bir şekilde ergiyik havuzlara (melt pool) rastlanmıştır. Ergiyik havuzlar SLM metodunun doğası gereği katman katman parça üretimine dayanmaktadır. Her bir ergiyik havuzu sınırı bir katmanı ifade etmektedir. Diğer yandan Şekil 5d'de IN625 alaşımının ısıl işlem sonrasında ergiyik havuzlarının ortadan kalktığı ve yeniden kristalleşme sayesinde hücresel bir yapının oluştuğu görülmektedir [23].

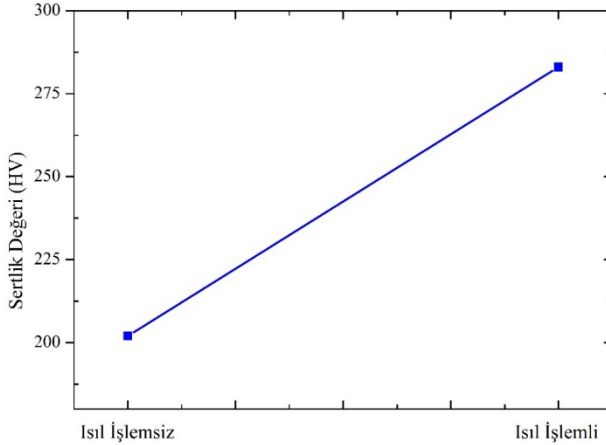
Şekil 5. IN625 Numunelerinin a, c) Isıl İşlem Öncesi ve b, d) Isıl İşlem Sonrası Parlatılmış ve Dağlanmış Konumdaki Optik Mikroskop Görüntüleri



Isıl işlem ile birlikte tane sınırlarında gama ve delta (γ' , γ'' , δ) intermetalik fazları çökelmiştir. Bu intermetalik fazlar tane sınırlarında çökdikleri için tane büyümesinin önüne geçerek ince taneli bir mikroyapının oluşmasında etkin rol oynamışlardır. İntermetalik fazların çökmesi ince taneli bir mikroyapının oluşmasının yanı sıra mekanik özelliklerin de gelişmesine doğrudan etki etmektedir. Lİ ve ark. sırasıyla 870°C, 980°C ve 1150°C sıcaklıklarda ısıl işlemin SLM IN625 alaşımına etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde farklı parametrelerde uygulanan ısıl işlem ile birlikte ergiyik havuzların ortadan kalktığı ve yerine ince taneli bir yapının oluştuğu görülmüştür. İnce taneli yapının oluşumu tane sınırlarında çökelen intermetalik fazlardan kaynaklandığı belirtilmiştir [24]. Diğer bir SLM IN625 çalışmasında Ferraresi ve ark. tarafından yaşlandırma ısıl işleminin SLM IN625 alaşımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Isıl işlem öncesi ve sonrası mikroyapı sonuçları

karşılaştırıldığında ısıtılma işlemi etkisi ile dentritik yapı yerine yeniden kristalleşme ile ince taneli bir mikroyapının oluştuğu görülmüştür. Bu sayede ısıtılma işlemi etkisi ile ince taneli bir içyapı elde edilirken diğer yandan mekanik özelliklerin arttığı sonucu elde edilmiştir [25]. IN625 alaşımında ısıtılma işleminin sertlik değerleri üzerine etkisi Şekil 6'da verilmiştir. ısıtılma işlemi sonrasında dentritik yapı ince taneli bir yapıya dönüşmüştür. Diğer yandan tane sınırlarında γ' ve δ gibi intermetalik fazların çökmesi ile tanelerin büyümesi engellenmiştir. Bundan dolayı sertlik değerlerinde yaklaşık %40 oranında bir artış görülmüştür.

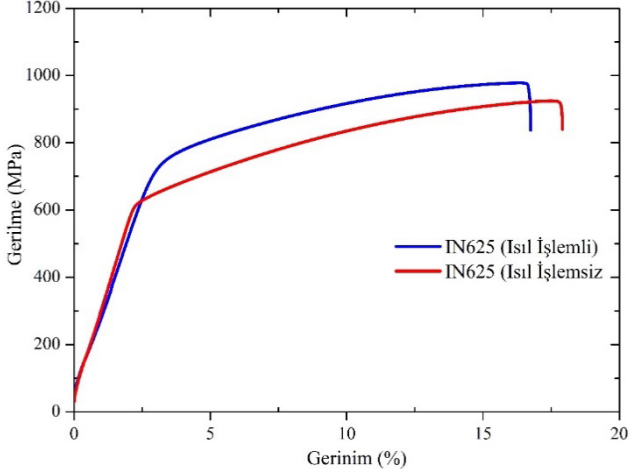
Şekil 6. IN625 Numunelerinin Sertlik Değerleri



Marchese ve ark. tarafından ısıtılma işleminin IN625 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. ısıtılma işlemi sonrası sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. ısıtılma işlemi ile yeniden kristalleşmenin meydana gelmesi ve tane sınırlarında intermetalik fazların çökmesi sertlik değerinin artışında etkili olmuştur [26]. Şekil 7 ısıtılma işleminin gerilme-gerinim değerleri üzerine etkisini göstermektedir. IN625 alaşımında ısıtılma işlemi sonrasında akma dayanımının arttığı diğer yandan yüzde uzama (%) değerinin azaldığı görülmüştür. Yani ısıtılma işlemi sonrası IN625 alaşımının sünekliği azalmıştır. ısıtılma işlemi ile akma dayanımının artması ince taneli bir içyapıdan kaynaklanmaktadır. Özellikle tane

sınırlarında çökelen γ' , γ'' ve δ gibi intermetalik fazlar mukavemet artışına doğrudan etki eden diğer bir etken olmuştur.

Şekil 7. IN625 Numunelerinin Çekme Test Sonuçları



Hu ve ark. IN625 alaşımında çözültü alma ısıl işleminin mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmışlardır. Çözültü alma ısıl işleminde rekristalizasyon sonucu yeni taneler oluşmuştur. Tane sınırının artması ve özellikle tane sınırlarında intermetalik fazların çökmesi ile dislokasyon yoğunluğunda artış meydana gelmiştir. Bundan dolayı mukavemet değerinde artış görülmüştür [27]. Nguejio ve ark. dövme ve SLM yöntemleri ile ürettikleri IN625 alaşımında ısıl işlemin mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Hem dövme hem de SLM IN625 alaşımının ısıl işlem sonrası mekanik özelliklerinin arttığı sonucuna varılmıştır. Diğer yandan SLM ve dövme yöntemleri ile üretilen IN625 alaşımının ısıl işlem sonrası mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde SLM metodu ile üretilen alaşımın çok daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [28].

3. SONUÇ

Bu çalışmada SLM metodu ile IN625 alaşımlarının üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ardından ısıl işlemin etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- SLM metodu ile üretilen 9 adet IN625 numunelerinden 350 W lazer gücü, 450 mm/s ve 0,78 LED değerine sahip 1 numaralı numunenin en yüksek yoğunlukta olduğu tespit edilmiştir.
- SLM metodu doğası gereği üretim esnasında meydana gelen iç gerilmelerin giderilmesi için 1065 °C, 720 °C ve 620 °C sıcaklıklarda sırasıyla 1sa, 8sa ve 6sa süre ile kademeli ısıl işlem gerçekleştirilmiştir.
- Isıl işlem etkisi ile ergiyik havuzlarının ortadan kaybolduğu ve yerine rekristalizasyon sonucu ince taneli bir yapının oluştuğu görülmüştür. Diğer yandan tane sınırlarında γ' , γ'' , δ gibi intermetalik fazların çökeldiği tespit edilmiştir.
- Isıl işlem öncesi ve sonrası sertlik değerleri karşılaştırıldığında sırasıyla 202±3,1 HV ve 283±2,4 HV değerleri elde edilmiştir. Isıl işlem sonrasında sertlik değeri yaklaşık olarak %40 oranında artmıştır.
- Isıl işlem öncesi ve sonrası çekme gerilme değerleri kıyaslandığında sırasıyla 922±4 MPa ve 975±2 MPa olarak elde edilmiştir. Isıl işlem ile birlikte gerilme değerlerinin arttığı ancak sünekliğin azaldığı görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje No: SAYEM 121D015).

KAYNAKÇA

1. Thellaputta, G. R., Chandra, P. S., & Rao, C. S. P. (2017). Machinability of nickel based superalloys: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3712-3721.
2. Yurtkuran, H. (2021). An evaluation on machinability characteristics of titanium and nickel based superalloys used in aerospace industry. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2(2), 10-29.
3. Pollock, T. M., & Tin, S. (2006). Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure and properties. *Journal of propulsion and power*, 22(2), 361-374.
4. Ganji, D. K., & Rajyalakshmi, G. (2020). Influence of alloying compositions on the properties of nickel-based superalloys: A Review. recent advances in mechanical engineering: *Select Proceedings Of NCAME 2019*, 537-555.
5. Patel, S., Debarbadillo, J., & Coryell, S. (2018, May). Superalloy 718: Evolution of the alloy from high to low temperature application. in proceedings of the 9th international symposium on superalloy 718 & derivatives: energy, aerospace, and industrial applications *Cham: Springer International Publishing*, (Pp. 23-49).

6. Agrawal, V., Gajrani, K. K., Mote, R. G., Barshilia, H. C., & Joshi, S. S. (2022). Wear analysis and tool life modeling in micro drilling of Inconel 718 superalloy. *Journal of Tribology*, 144(10), 101706.
7. Zhang, F., Wang, C., Wu, Y., Zhou, L., & Tian, Q. (2022). Microstructural stability and mechanical properties of gh742 Ni-based wrought superalloy for turbine disk applications. *Materials Science and Engineering: A*, 832, 142488.
8. Gökalp, İ., Kırış, M., Avcu, E., & Yamanoğlu, R. Dental uygulamalarda kullanılan CoCr alaşımının tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *BİDGE Yayınları*, 117.
9. Kumar, S. A., & Prasad, R. V. S. (2021). Basic principles of additive manufacturing: different additive manufacturing technologies. In *Additive Manufacturing* (Pp. 17-35). *Woodhead Publishing*.
10. Yamanoglu, R. (2019). Pressureless spark plasma sintering: a perspective from conventional sintering to accelerated sintering without pressure. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57, 513-525.
11. Zhang, L. C., Liu, Y., Li, S., & Hao, Y. (2018). Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 20(5), 1700842.
12. Spears, T. G., & Gold, S. A. (2016). In-Process sensing in selective laser melting (slm) additive manufacturing. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 5(1), 16-40.
13. Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., & Mehrpouya, M. (2019). Metal additive manufacturing in the commercial

- aviation industry: *A Review. Journal of Manufacturing Systems*, 53, 124-149.
14. Bruna-Rosso, C., Demir, A. G., & Previtali, B. (2018). Selective laser melting finite element modeling: Validation with high-speed imaging and lack of fusion defects prediction. *Materials & Design*, 156, 143-153.
 15. Wang, W., Wang, S., Zhang, X., Chen, F., Xu, Y., & Tian, Y. (2021). Process parameter optimization for selective laser melting of Inconel 718 superalloy and the effects of subsequent heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 530-543.
 16. Fayed, E. M., Saadati, M., Shahriari, D., Brailovski, V., Jahazi, M., & Medraj, M. (2021). Optimization of the post-process heat treatment of Inconel 718 superalloy fabricated by laser powder bed fusion process. *Metals*, 11(1), 144.
 17. Mahmood, M. A., Chioibas, D., Ur Rehman, A., Mihai, S., & Popescu, A. C. (2022). Post-Processing techniques to enhance the quality of metallic parts produced by additive manufacturing. *Metals*, 12(1), 77.
 18. Bekoz, N., & Oktay, E. (2013). Mechanical properties of low alloy steel foams: dependency on porosity and pore size. *Materials Science and Engineering: A*, 576, 82-90.
 19. Adjamskyi, S. V., Kononenko, G. A., & Podolskyi, R. V. (2020). Influence of technological parameters of SLM-Process on porosity of metal products. *The Paton Welding J*, 10, 13-18.
 20. Liu, B., Fang, G., Lei, L., & Yan, X. (2022). Predicting the porosity defects in selective laser melting (SLM) by

molten pool geometry. *International Journal of Mechanical Sciences*, 228, 107478.

21. Abouelnour, Y., & Gupta, N. (2022). In-Situ monitoring of sub-surface and internal defects in additive manufacturing: A review. *Materials & Design*, 111063.
22. Laleh, M., Sadeghi, E., Revilla, R. I., Chao, Q., Haghdad, N., Hughes, A. E., & Tan, M. Y. (2023). Heat treatment for metal additive manufacturing. *Progress in Materials Science*, 133, 101051.
23. Schneider, J., Lund, B., & Fullen, M. (2018). Effect of heat treatment variations on the mechanical properties of Inconel 718 selective laser melted specimens. *Additive Manufacturing*, 21, 248-254.
24. Li, C., White, R., Fang, X. Y., Weaver, M., & Guo, Y. B. (2017). Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 705, 20-31.
25. Ferraresi, R., Avanzini, A., Cecchel, S., Petrogalli, C., & Cornacchia, G. (2022). Microstructural, mechanical, and tribological evolution under different heat treatment conditions of Inconel 625 alloy fabricated by selective laser melting. *Advanced Engineering Materials*, 24(4), 2100966.
26. Marchese, G., Lorusso, M., Parizia, S., Bassini, E., Lee, J. W., Calignano, F., & Biamino, S. (2018). Influence of heat treatments on microstructure evolution and mechanical properties of Inconel 625 processed by laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*, 729, 64-75.

27. Hu, Y. L., Lin, X., Zhang, S. Y., Jiang, Y. M., Lu, X. F., Yang, H. O., & Huang, W. D. (2018). Effect of solution heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by laser solid forming. *Journal of Alloys and Compounds*, 767, 330-344.
28. Nguejio, J., Szmytka, F., Hallais, S., Tanguy, A., Nardone, S., & Martinez, M. G. (2019). Comparison of microstructure features and mechanical properties for additive manufactured and wrought nickel alloys 625. *Materials Science and Engineering: A*, 764, 138214.

HRNS İLE POLYESTER REÇİNE ÜRETİM TESİSİNDE RİSK ANALİZİ

Engin BARUT¹

Özkan AYAN²

Emine CAN³

1. GİRİŞ

1.1.Polyester Hakkında Bilgi

Polyester kelimesi, çok anlamına gelen poli ve organik tuzu belirtmek için kullanılan bir terim olan ester kelimelerinden oluşan bileşik bir kelimedir. Dolayısıyla polyester çeşitli organik tuzlar olarak tanımlanabilir. Yapının ester molekül zincirleri de polimer olarak tanımlanabilir. Polyesterler doğada bulunur, ancak genellikle tüm polikarbonatları ve polietilen tereftalatları içeren geniş bir sentetik polyester ailesini içerir. Polyester PES olarak kısaltılır (Yakartepe, 1997).

Polyester üretiminde hammadde olarak petrol türevi olan saf tereftalik asit ve monoetilen glikol, yardımcı maddeler olarak ise antimon triasetat ve titanyum dioksit kullanılmaktadır (Çelebi, 2009). Teraftalik asitin etilen glikol ile polimerizasyonu polyester üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir (Kara, 2011). Polyesterler sertlik, hava koşullarına dayanıklılık ve çeşitli kimyasallara dayanıklılık gibi birçok özelliğe sahip vazgeçilmez

¹ İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı, engin.barut@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1863-1583.

² İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı, ozkanayan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8134-9527.

³ İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı, emine.can@medeniyet.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1192-2994.

ve önemli polimerlerdir. Genel olarak polyesterler, çok işlevli asitlerin, çoğunlukla dibazik asitlerin, glikol ve gliserin gibi polialkollerin veya metil metakrilat, stiren ve diallyl ftalat gibi monomerlerin işlenmesiyle elde edilir (Viksne, 2002). Polyester reçinelerin ana bileşeni olan stiren, reaksiyon sırasında buharlaşan hafif toksik bir malzemedir. Bu sebeple bu alanda çalışanlar için solunması halinde tehlike arz etmektedir (Sınıksaran, 2012).

Tarihte ilk sentetik PES, Birinci Dünya Savaşı sırasında, su geçirmezlik özelliği elde etmek için gliserin ftalat kimyasalı kullanılarak yapılmıştır. Polyester konusundaki en kapsamlı araştırmalar DuPont© şirketinin polimerlere ait yaptığı araştırmalardır (Çirkin, 2006).

Polyester reçineler; Çok fonksiyonlu asitlerin (dikarboksilik asit) ve çok fonksiyonlu alkollerin (glikol) reaksiyonu sonucu oluşan polimerik malzemelerdir. Polyester reçineler, koyu kıvamlı ve zor akan neredeyse renksiz sıvılardır. Sıvı, jel ve film gibi farklı formlarda olabilirler. Kompozit malzemelerden havacılığa, ulaşımdan inşaata, mobilyadan ambalajlamaya ve imalat sektörüne kadar farklı endüstrilerde polyester reçinelerin hafifliklerinden ve hava koşullarına dayanıklılıklarından yararlanılmaktadır. Polyester reçinelerin en çok kullanıldığı alanlardan biri de döküm endüstrisidir. Döküm reçineleri yumuşak ve esnektir. Döküm tipi polyesterler çoğunlukla; Küvet, lavabolar, suni mermer, mutfak tezgâhları, masa kenarları ve ayakları, süs eşyaları, çatı kaplamaları, hediyelik eşyalar, heykeller, el sanatları ürünleri, dolgular, otomobil ve tekne parçaları ve sıhhi tesisatlar vb. üretimde kullanılır. Polyester reçineler kimyasal yapılarına göre doymuş ve doymamış olarak sınıflandırılır (<https://webdosya.csb.gov.tr>; www.craftyapi.com; Akın, 2007).

Doymuş polyester reçinelerde reaksiyon doymuş ve dengelidir. Yani molekülleri başka moleküllere bağlanma eğiliminde değildir. Bunlar, polimerizasyon reaksiyonu sonucu oluşan doymuş karbon atomlarına sahip polyester reçinelerdir. Bu tür reçineler genellikle metilen grupları (CH₂) içerir. Doymuş polyesterlerin en iyi örneği plastik meşrubat şişeleridir (PET). Bu malzeme, plastik özellikler göstererek ısıtıldığında erir ve tekrar şekillenebilir (https://www.kompozit.org.tr; https://webdosya.csb.gov.tr).

Doymamış polyester reçinelerde kimyasal dengesizlik nedeniyle moleküller tam olarak doymamıştır. Bu doymamış bağlar genellikle vinil veya alken gruplarına aittir ve polimerizasyon reaksiyonları sırasında çapraz bağlantılar oluşturabilir. Yapılarında karbon-karbon çift bağları olduğundan sertleştiklerinde ağ yapısı oluşturarak geri dönüşümü mümkün olmayan sert ve sağlam bir malzeme haline gelirler. Doymamış polyester örnekleri: banyo küvetleri ve mutfak tezgâhlarıdır (https://www.kompozit.org.tr; https://webdosya.csb.gov.tr).

1999 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde 0,8 milyar kg'dan fazla polyester reçine tüketilmiştir. Polyester reçineli kompozitler düşük maliyetlidir. Çünkü ucuz kurulum maliyetlerine ve belirli uygulamalarda dayanıklı fiziksel özelliklere sahiptir. Polyester reçine matrisli kompozit malzemelerin avantajları; bitmiş parçalar, fiziksel özellikleri değiştirilmeden farklı şekillerde sertleştirilebilir. Bu nedenle polyester reçine kompozitleri özel pazarlarda rekabet edebilecek özelliklere sahiptir. Ayrıca geniş kullanım alanı boyutsal stabilitesi ve uygun fiyatları rekabet özelliklerini arttırmaktadır (Miracle, Daniel B., Donaldson, Steven L. 2001; Bagherpour, 2012; Park, 2011).

Polyester reçineler kompozit sektörünün lokomotifidir ve kullanılan reçinelerin yaklaşık %75'ini oluşturur (Akın, 2007).

Polyester reçineler istenen özellikleri elde etmek ve kalıplama işlemine uyacak şekilde formüle edilirler. Polyester reçineler çok yönlü olduğundan ve polimer zincirlerinin oluşumu sırasında değiştirilip şekillendirilebildiğinden, kompozit endüstrisinin neredeyse tüm bölümlerinde sınırsız uygulama alanlarına sahiptir. Polyester reçineler 100 °C sıcaklığın altında iyi mekanik ve kimyasal dirence sahiptir ve fiyatları düşüktür. Polyester reçineler kullanım amacına göre genel veya özel amaçlı polyesterler olarak da sınıflandırılır (Yılmaz, 2006).

Genel amaçlı polyesterler, ucuz ve yeterli mekanik ve elektriksel performans sağlayan ürünler olarak tanımlanmaktadır. Genel amaçlı polyesterler orta veya düşük viskozitede üretilir ve yalnızca katalizör ve hızlandırıcı eklenmesine gereksinim duyar. Daha iyi performansın beklenmediği pahalı uygulamalar dışında; Otomobil parçaları, borular, inşaat panelleri, elektrikli ürünler, tekneler, genel kamyon parçaları, mobilya, küvetler, konteynerler, motorlar, makineler ve diğer ürünler dâhil olmak üzere geniş bir ürün yelpazesinde açık kalıplama yoluyla yapılan nihai ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır (Yılmaz, 2006). Genel Amaçlı Polyesterler ticari hacmi en fazla olan ve en düşük maliyetle elde edilen reçinelerdir (Ergin, 2005).

Özel amaçlı polyesterler; Polyesterler birçok uygulamanın gereksinimlerini karşılamak üzere kimyasal bir işlemle üretildiğinden, farklı amaçlara uygun polyesterler mevcuttur. Özel amaçlı polyester örnekleri: Esneklik kazandıran polyesterler, kimyasallara dayanıklı polyesterler, ısıya dayanıklı polyesterler ve alev dayanıklı polyesterlerdir (Yılmaz, 2006).

2. POLYESTER REÇİNE ÜRETİM TESİSİNDEKİ TEHLİKE VE RİSKLER

Polyester reçine üretim tesislerinde iş akış süreçlerinde çeşitli tehlikeler ve riskler bulunmaktadır. Bu tesislerde karşılaşılabilecek potansiyel tehlike ve riskler aşağıdaki gibidir;

2.1. Kimyasal Tehlikeler; Kullanılan kimyasal maddelerin özelliklerine göre (reaktif, yanıcı, toksik) tehlikeli durumlar söz konusudur. Uçucu organik bileşenler, asitler ve bazlar, monomerler, katalizörler ve çözücüler gibi kimyasalların kullanımı ve depolanması tehlikeli olabilir. Reaktörlerde veya borularda meydana gelebilecek sızıntılar sonucunda çeşitli kimyasal maddeler çevreye salınabilir. Bu durum, işçilerin solunum yoluyla veya cilt temasıyla zehirlenmelerine ayrıca çeşitli nedenlerle tesiste patlamaya neden olabilir.

2.2. Yangın ve Patlama Tehlikeleri; Reaktörlerde ve blenderlerde reaksiyon sırasında ortaya çıkabilecek yüksek sıcaklık ve basınç, yangın ve patlama riskini arttırabilir. Üretim süreçlerinde kimyasal malzemelerin işlenmesi ve elde edilen ürünlerin depolanması sırasında patlama ve yangın riski sürekli mevcuttur. Ayrıca malzemelerin forkliftlerle taşınması sırasında statik elektrik birikimi ve çalışanların güvenlik prosedürlerine uymaması ve çalışanların iş ekipmanlarını hatalı kullanması nedeniyle patlama riski her zaman vardır.

2.3. Ekipman Arızaları; Reaktörler, blenderler, pompalar gibi ekipmanlarda oluşabilecek arızalar, kimyasal sızıntılara ve kaçaqlara neden olabilir dolayısıyla çalışanlar kimyasal gazlardan etkilenebilir. Arızalı ekipmanlar aşırı ısınmaya ve kıvılcım oluşmasına neden olabilir bu durumda yanıcı malzemelerle etkileşime girerek yangın ve patlama riskini arttırabilir. Reaktörlerde ve basınçlı ekipmanlarda meydana gelebilecek arızalar patlama riskini beraberinde getirebilir. Malzemelerin boru hatlarındaki akışı esnasında borularda

meydana gelebilecek arızalar nedeniyle sızıntı ve patlama riski her zaman mevcuttur.

2.4. Ergonomik Riskler; Üretim süreçlerindeki tekrarlayıcı hareketler, ağır yük kaldırma, sabit ve zorlayıcı duruş pozisyonlarında uzun süre çalışmak özellikle sırt ve boyun ağrıları ile kas-iskelet sistemi hastalıklarına yol açabilir. Tesis içindeki yüksek gürültü seviyeleri çalışanların işitme kaybına neden olabilir. Üretim süreçlerinde kullanılan araç ve ekipmanların tasarımları çalışanlar için ergonomik olmayabilir. Bu durum çalışanlarda fiziksel rahatsızlıklara neden olabilir. Çalışılan ortamdaki sıcaklık, soğukluk veya nem çalışanların performansını ve sağlığını olumsuz etkileyebilir.

Bu tehlikeler ve riskler, uygun güvenlik önlemleri ve prosedürlerin uygulanması, ekipmanların periyodik bakımları, denetimler, çalışanların eğitimi gibi yöntemlerin uygulanması ile yönetilebilir (Anonim, 2023).

3. POLYESTER REÇİNE ÜRETİM TESİSİNDEKİ ALINMASI GEREKEN ÖNLEMLER

Polyester reçine üretim tesislerindeki potansiyel tehlike ve risklere karşı alınacak önlemler; hem işçi güvenliğini sağlamak hem de çevresel güvenliğini korumak için bir dizi güvenlik protokolünü içerir. Bu tesislerde alınması gereken temel önlemler aşağıdadır;

3.1. Personel Eğitimi; Tüm çalışanlar, iş sağlığı ve güvenliği konusunda düzenli olarak eğitilmelidir. Kimyasal maddelerin doğru kullanımı, depolanması ve işlenmesi konularında eğitimler verilmelidir. Bu eğitimler kimyasal maddelere maruziyet riskini azaltmak, tesiste yanıcı ve patlayıcı ortam oluşmasını engellemek için önemlidir. Tesiste kullanılan makine ve ekipmanların güvenli ve doğru kullanımı konusunda

eğitimler verilmeli ve bu eğitimler değişen koşullarda güncellenmelidir. İş akış süreçleri veya güvenlik standartları değiştiği zaman personelin eğitim programları güncellenmelidir. Ayrıca acil durum prosedürleri ve kişisel koruyucu ekipmanların kullanımı konularında eğitimler verilmelidir.

3.2. Kişisel Koruyucu Donanım; İşçilere uygun kişisel koruyucu donanımlar sağlanmalı, iş sırasında kullanmaları gereken kişisel koruyucu donanımları doğru bir şekilde nasıl kullanacakları öğretilmeli ve bu donanımların kullanımı teşvik edilmelidir. Örneğin, solunum maskeleri, koruyucu elbiseler, gözlükler vb. Kişisel koruyucu donanımlar uygun koşullarda depolanmalı ve düzenli olarak bakımları yapılmalıdır.

3.3. Acil Durum Planları; Acil durum planı oluşturulmadan önce tesisteki potansiyel tehlike ve riskleri belirlemek için risk değerlendirme analizi yapılmalı ve bu risk değerlendirme analizi yönetmelikte belirtilen sürelerde ve tesisteki iş akış süreçlerinde meydana gelebilecek değişiklikler sonrasında güncellenmelidir. Tesis, yangın, patlama, kimyasal sızıntı ve basınçlı ekipman arızaları gibi acil durum senaryolarına karşı hazırlıklı olmalıdır. Çalışanların güvenliği ve tesisteki iş akış sürecinin devam etmesi için bu çok önemlidir. Acil durum senaryolarına karşı acil durum ekipleri oluşturulmalı ve ekipteki üyelere görev tanımları ile ilgili eğitim verilmelidir. Acil durum planlarını test etmek için çalışanlara düzenli olarak tatbikatlar yaptırılmalıdır.

3.4. Uyarı ve Güvenlik İşaretleri; Tesis içindeki tehlikeli bölgelere uygun uyarı ve güvenlik işaretleri yapıştırılmalıdır. Bunun nedeni çalışanlar arasında risk bilincini oluşturmaktır. Çalışanların çevresel riskleri tanımları için, kimyasal depolama alanları, tehlikeli ekipmanlar, yangın ve patlamaya neden olabilecek etkenler ve tehlikeli alanları belirlemek için belirlenen yerlere uygun uyarı ve güvenlik

işaretleri mutlaka asılmalıdır. Tesis içinde uyarı ve güvenlik işaretlerinin doğru şekilde kullanılması işyerinde güvenliği arttırmak ve potansiyel riskleri azaltmak için çok önemlidir.

Bu önlemlerin alınması, iş akış süreçlerinde meydana gelebilecek değişikliklerde ilgili alanlar ile ilgili güncellemeler yapılması ve düzenli olarak süreçlerin takip edilmesi polyester reçine üretim tesislerinde güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için önemlidir (Anonim, 2023).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma da Marmara bölgesinde bulunan bir polyester reçine üretim tesisindeki iş akış süreçlerinde meydana gelebilecek potansiyel tehlike ve riskler çalışanların görüşleri alınarak belirlenmiş ve Hazard Rating Number System (HRNS) ile analiz edilmiştir.

HRNS yöntemi, Çeşitli iş yerlerindeki potansiyel tehlikeleri belirlemek ve derecelendirmek için kullanılan bir risk analiz yöntemidir. Bu yöntemde öncelikli olarak iş yerindeki potansiyel tehlikeler tespit edilir. Tespit edilen tehlikeler belirli kategorilere veya sınıflandırmalara göre düzenlenir. Daha sonra her tehlikenin olasılığı ve etkisi değerlendirilerek risk düzeyleri derecelendirilir. Son olarak tehlikeler öncelik sırasına göre düzenlenir ve en yüksek risk içeren durumlardan başlanarak önlemler alınmaya başlanır.

HRNS yönteminde risk skoru; Olayın meydana gelme olasılığı (Likelihood of Occurrence-LO), Tehlike bölgede bulunma sıklığı yani frekansı (Frequency of Exposure-FE), Yaralanma şiddeti (Degree of Possible Harm-DPH) ve Risk altında kalan kişi sayısı (Number of Pers.-NP) değerleri çarpılarak bulunur.

$$\text{HRNS: LO X FE X DPH X NP}$$

Tablo 1. HRNS Metoduna Göre Risk Skorunun Belirlenmesi

OLASILIK LO (Likelihood of Occurrence)		FREKANS FE (Frequency of Exposure)		ŞİDDET DPH (Degree of Possible Harm)		KİŞİ SAYISI NP (Number of Pers.)	
0,033	Neredeyse İmkânsız	0,5	Yılda bir kez	0,1	Çizilme, sıyrılma	1	1-2 kişi
1	Çok zor olasılık	1	Ayda bir kez	0,5	Hafif hasar, ergonomik zorlanma	2	3-7 kişi
1,5	Zor olasılık	1,5	Haftada bir kez	1	Kesilme, yaralanma, geçici hastalık	4	8-15 kişi
2	Olası	2,5	Günde bir kez	2	Küçük kemik kırılması, 10 gün fazla hastalık	8	16-50 kişi
5	Mümkün	4	Saatte bir kez	4	1-2 parmak kaybı, Büyük Kemik kırılması	12	50+ kişi
8	Muhtemelen	5	Sürekli	8	Kısmi maluliyet, Mes. Hast. başlangıcı		
10	Yüksek ihtimale			10	Önemli Uzun Kaybı, Tam maluliyet, Ciddi Çevre Kazası		
15	Kesin			12	1 kişi ölüm / Kalıcı Meslek Hast		
				15	Toplu Ölüm, Büyük End. Kaza		

Tablo 2. HRNS Metoduna Göre Risk Seviyelerinin Belirlenmesi

RİSK PUANI & RENK SKALASI HRN Hazard Rating Number		RİSK PUANI ZARAR BOYUTU YORUMLARI (Hazard Rating Number Potential Consequences Comments)
0 - 1	İhmal Edilebilir Risk	Mevcut durumda sağlık ve güvenliği tehlikeye atacak risk yok, ilave emniyet tedbirine ihtiyaç yok
2 - 5	Çok Düşük Risk	Mevcut durumda sağlığı ve güvenliği tehlikeye atan çok az risk var, ilave olarak kayda değer bir emniyet tedbirine gerek olmayabilir. Personel koruma ekipmanları kullanılabilir ve eğitimlerle risk azaltılabilir.
6 - 15	Düşük Risk	Az da olsa risk vardır. Emniyet tedbiri için gerekli kontrol ekipmanlarının kullanılması önerilmektedir.
16 - 50	Dikkate Değer Risk	Emniyet tedbirinin alınmasını gerektirecek seviyede risk vardır. İlk fırsatta bu tedbirler uygulanmalıdır.
51 - 100	Yüksek Risk	Acil olarak emniyet tedbirlerinin alınması gerekecek kadar potansiyel tehlike vardır. Bu tedbirler aksiyon planlarına öncelikli olarak alınarak uygulanmalıdır.
101 - 500	Çok yüksek Risk	Çok acil olarak emniyet tedbirleri alınmalıdır. İlgili yönetim birimleri haberdar edilmelidir.
501 - 1000	Aşırı Yüksek Risk	Çok acil olarak emniyet tedbirleri alınmalı, yeterli kontrol tedbirleri alınmaya kadar ekipmanlar kullanılmamalı, makine, proses, ilgili sistem gereksinimleri çalıştırılmamalı insanlar uzak tutulmalı ve ilgili yönetim birimleri haberdar edilmelidir.
1000 - ----	Kabul edilemez	İşin durdurulması kararı alınmalıdır.

Teori ve Uygulamada Mühendislik Alanında Yaşanan Gelişmeler

	Tehlike Potansiyeli (Severity)	Sıklık (Probability of Exposure)	Zaman (Degree of Possibility)	Risk Derecesi (Risk)	ALANIN VE ÇALIŞANIN ENERJİLERİ (Energy Levels of the Area and Worker)	Yüksek Enerji Alanları (High Energy Areas)	Yüksek Enerji Alanları (High Energy Areas)	RİSKİN YÖNETİMİ VE ÖLÜMLÜLÜĞÜ							
								Riskin Kontrolü (Risk Control)	Riskin Önlenmesi (Risk Prevention)						
Yapın Türü :															
Revizyon No :															
Rizik Yürütme No :															
Bölüm Makine: REAKTOR															
No	Tehlikeli Olarak Değerlendirilen	Yüksek Enerji Alanları	Tehlikeli Olarak Değerlendirilen	Çalışma Alanı	A	B	C	RİSK DÜZEYİ	ALINMASI GEREKEN ÖLÇÜMLER, ÖNERİLER, DÜZELTİCİ FAALİYETLER	Yüksek Enerji Alanları	Yüksek Enerji Alanları	Yüksek Enerji Alanları	Yüksek Enerji Alanları	Yüksek Enerji Alanları	Yüksek Enerji Alanları
4.10		Tehlikeli Olarak Değerlendirilen	Tehlikeli Olarak Değerlendirilen	Çalışma Alanı	0	10	20	1	<ul style="list-style-type: none"> Birçok bölgede ve her türlü tehlike potansiyeli göz önünde bulundurulmalıdır. Yüksek Enerji Alanları (HEA) olarak değerlendirilmelidir. Yüksek Enerji Alanları (HEA) olarak değerlendirilmelidir. 	HEA	HEA	HEA	HEA	HEA	HEA
4.10		Tehlikeli Olarak Değerlendirilen	Tehlikeli Olarak Değerlendirilen	Çalışma Alanı	0	10	20	1	<ul style="list-style-type: none"> Birçok bölgede ve her türlü tehlike potansiyeli göz önünde bulundurulmalıdır. Yüksek Enerji Alanları (HEA) olarak değerlendirilmelidir. Yüksek Enerji Alanları (HEA) olarak değerlendirilmelidir. 	HEA	HEA	HEA	HEA	HEA	HEA

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada; Marmara bölgesindeki bir polyester reçine üretim tesisindeki potansiyel tehlike ve riskler için Hazard Rating Number System (HRNS) yönteminin kullanılması araştırılmıştır. Araştırma sırasında çalışanların görüşleri alınmış, tespit edilen riskler HRNS yöntemine göre puanlanmış ve alınacak önlemler belirlenmiştir. Bu yöntemde risk puanlarının hesaplanması için yapılan iş ortamındaki; Olayın meydana gelme olasılığı, Çalışanların tehlikeli bölgede bulunma sıklığı, Yaralanma şiddeti ve Risk altında kalan kişi sayıları çarpılmıştır.

Sonuç olarak; Hazard Rating Number System yöntemiyle polyester reçine üretim tesislerindeki potansiyel tehlike ve riskler tespit edilerek alınması gereken önlemler belirlenmiştir. Özellikle kimyasal malzemelerin kullanılması, depolama alanlarındaki durumlar ve üretim sürecindeki ekipmanlardan kaynaklı yangın, patlama ve kimyasala maruziyet bu tip tesislerdeki en önemli tehlike ve risklerdir. Bu çalışmayla bu tip tesislerdeki iş güvenliği, çevresel uygunluk ve acil durum yönetimi gibi alanlarda iyileştirmeler yapılması için çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Akın, E., 2007, Mermer tozları ve uçucu kül ile polimer esaslı kompozit malzeme üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14-18.
- Aydın Ş, Can E, İltar M.R., Kara H.E., 2022, FRAM ile Fizik Tedavi Hastanelerinde Psikososyal ve Ergonomik Risklerin Analizi, OHS ACADEMY İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi Açık Erişim, Cilt 5, Sayı 3, Sayfa: 165-174
- Bagherpour S., Polyester, Editors: Saleh El-Din H, Şbre Reinforced Polyester Composites, DOI: 10.5772/48697, InTech, 135-166, 2012.
- Çelebi, K. (2009). Polyester Örne Kumaşın Güç Tutuşurluk Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Çirkin, S. (2006). Yalancı büküm tekstüre işleminde tekstüre değişkenlerinin iplik özellikleri üzerindeki etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Erişim adresi: <http://libratez.cu.edu.tr/tezler/5768.pdf>
- Ergin, M.F. (2005), Yığın Kalıplama Bileşimi ile Elde Edilen Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Hollnagel E. FRAM: the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems. Ashgate Publishing Ltd, 2012.
- <https://acesprocess.com/hizmetler/polyester-recine-tesisleri/>
- <https://www.craftyapi.com/bilgi-bankasi/dokum-tipi-polyester-recineleri>

- https://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2018/11/CTP_Teknolojisi.pdf
- <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/5-yuzey-kaplama-endustr-s--20220114142735.pdf>
- Kara, Ş. (2011). Farklı Enine Kesit Şekillerinde Üretilen Kimyasal Liflerin Yapısal Davranışları ve Kullanım Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Miracle, Daniel B., Donaldson, Steven L., Composites, Volume 21 of ASM Handbook, ASM International Handbook Committee, 2001.
- Park S. J., Seo M. K., Interface Science and Composites, 1st edition, Academic Press, USA, 2011.
- Patriarca, R. (2017). Defining the Functional Resonance Analysis space: combining Abstraction Hierarchy and FRAM, Volume 165, 2017, Pages 34-46, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.03.032>.
- Sınıksaran, M. (2012). Volkanik Tüf Tozları ile Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim
- Viksne, A., Berzina, R., Kalnins, M., Rence, L., 2002, Unsaturated polyester resins based on pet waste products from glycolysis by ethylene, propylene and diethylene glycols and their mixtures, Institute of Polymer Materials Riga Technical University Azenes Riga, Latvia, 33-42.
- Yakartepe, M. (1997). Genel Tekstil Terbiyesi. Tekstil Konfeksiyon Araştırma Merkezi Yayınları, 520-600.

Yılmaz, M.G. (2006), Cam Elyaf Katkılı Doymamış Polyester Malzemelerde Mineral Katkıların Mekanik ve Tribolojik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı.

GÖRÜNTÜLERDE ANOMALİ TESPİTİ İLE İLGİLİ KAPSAMLI İNCELEME

Oğuz BULUT¹

Yılmaz ATAY²

1. GİRİŞ

Gerçek dünya problemlerinde görüntü, video ve metin gibi insanlar tarafından otomatik bir şekilde algılanabilen, işlenebilen, yorumlanabilen ve analiz edilebilen bilgiler, makineler tarafından bazı durumlarda aynı doğallıkla işlenemeyebilir. Bunun aksine, bazı yaklaşımlarla makina tarafından analiz edilebilen karmaşık veriler yalnızca programların işleyebildiği kategoride bulunmakta ve bunlar insanlar tarafından kolayca analiz edilememektedir. Son yıllarda yapay zeka yaklaşımları resim, video, ses, metin ve insan duygularının temsil edildiği diğer kategoridekilerdeki büyük verilerin okunup anlamlandırılmasında kritik rollere sahiptir [1]. Yapay zeka teknolojileri sayesinde makineleri girdi verilerine göre eğiten ve onları insan-zeka kabiliyetlerine yakınlaştıran algoritmalar geliştirilmektedir. Bu süreçte uygun modellerin elde edilmesi aşamasında ilgili algoritmaları eğitmek için örnek veri setlerine ihtiyaç vardır. Kullanılan veri setlerinin hatasız, doğru, tutarlı, işlenebilir ve yorumlanabilir olması önemlidir. Bu şekilde işlenebilir veriler üzerinde farklı analizlere yönelik çeşitli araştırma alanları oluşturulmuştur. Bu alanlardan birisi farklı veri türleri üzerinde anomali tespitinin yapılmasıdır.

¹ Bilgisayar Mühendisliği (Mühendislik Fakültesi) Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi

² Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi

Anomali tespit (*anomaly detection*) problemi, herhangi bir veri kümesindeki anomali veya aykırı davranışların tespit edilmesine yönelik bir çalışma imkanı sunar. En temel anlamda ham verilerdeki hataları veya normal dışı örnekleri ortaya çıkarmak için farklı anomali tespit yaklaşımları tercih edilebilmektedir [2].

Görüntü işleme, bilgisayarlı görme, makina öğrenmesi ve derin öğrenme gibi teknolojilerin farklı alanlardaki anomali durumlarının tespitinde kullanılması oldukça popülerdir [3]. Bu çalışmada görüntüler üzerindeki anomalilerin tespitine odaklanılmaktadır. Bu problemle ilgili çeşitli anomali tespit yaklaşımları ele alınmıştır. Anomali tespit yaklaşımları tıp, güvenlik sistemleri, siber güvenlik, dijital iletişim, endüstriyel denetleme ve otomasyon gibi farklı alanlarda çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır [4, 5]. Anomali tespiti için en belirgin ve gelecek vaat eden motivasyon, görüntü, ses, video vb. yapılandırılmamış multimedya verileriyle ilgili sorunların üstesinden gelebilecek yaklaşımların geliştirilmesidir [6]. Özellikle endüstriyel problemlerde görsel hata veya hasar değerlendirmesi, anomali algılama ya da tahmin yaklaşımlarıyla çözülebilmektedir. Bu yaklaşım yoldaki kaldırım taşlarının hasar tespitinden otomotiv parçalarının kalite kontrolüne kadar farklı gerçek dünya problemlerinde kullanılmaktadır. Bu tür problemlerde yüzey üzerindeki çatlaklar ve diğer hasarların bulunması oldukça önemlidir. Burada temel motivasyon, anomali numunelerin normal olarak etiketlenebilecek örneklerden ayrıştırılmasıdır [7]. "Normal" verilerin dağılımından alınan örnekleri kullanan algoritmaların, dağılım dışı (anomali) örnekleri algılamayı amaçladığı, görüntü anomali tespiti için yeni yöntemler literatüre sunulmaktadır [8]. Anomali tespit yaklaşımları ile ilgili uygulamalar incelendiğinde, özellikle akıllı üretim sistemlerinde otomatik görsel denetim çalışmaları ön plana çıkmaktadır [9]. Bir diğer önemli domain

ise medikal alandaki uygulamalardır. Göğüs kanseri ile ilgili biyomedikal görüntülerden manuel yöntemlerle kolaylıkla tespit edilemeyen anomali ve lenf düğümlerindeki metastazlar gibi karmaşık örüntüleri işlemek ve anlamlandırmak için etkili görüntü anomali tespit yöntemleri kullanılmaktadır [10]. Genel olarak sağlık hizmetlerinde anomali tespiti tıbbi görüntülerin bir amaca yönelik işlenmesi, anlamlandırılması, klinik verilerin analizi ve erken teşhis gibi farklı konulara uygulanabilmektedir. Diğer bir çalışma konusunda ise termal kameralarda anomali içeren alanların ve aykırılıkların tespiti ya da sistemdeki arızaların belirlenmesi gibi problemler ele alınmaktadır [11]. Çalışmalar incelendiğinde hiperspektral veriler için anomali tespit yöntemlerinin geliştirilmesi, kalite ve güvenlik kontrolü uygulamalarında anlamlı çıktılar sunabilmektedir. Örneğin, zirai konularda hiperspektral görüntüleme kullanılarak meyvelerdeki anomali tespiti yapılabilmektedir [12]. "Hiperspektral," hiper ve spektral kelimelerinin birleşiminden türetilmiş bir terimdir ve genellikle yüzlerce veya binlerce bant içeren görüntü anlamını taşır." Bu tür veriler kanser dokuları, askeri alanlardaki görüntüler, uydu görüntüleri, meteoroloji verileri gibi farklı domainlerde etkin olarak kullanılmaktadır. Bu tür görüntülerin aykırılık ya da anormal örnek tespitinde etkin olarak kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Anomali tespitinin kullanıldığı diğer bir alan ise tekstil alanındaki problemlerdir. Tekstil endüstrisi alanında kalite kontrol sorunu ele alınmaktadır. Kumaşların iplik kesişme noktaları tarafından oluşturulan şekilleri analiz edilmekte ve şekil değişkenliği ölçülerek anomali tespiti yapılmaktadır [13]. Anomali tespiti biyomedikal, tıp ve mikrobiyoloji gibi alanlarda da çok sık kullanılmaktadır. Bununla ilgili patoloji odaklı anomali tespit çalışmaları bulunmaktadır. Bu tür problemlerde beyindeki patolojik örüntülerin tespitine odaklanılmaktadır. Burada veriler genelde heterojen yapıdadır. Tıbbi görüntülemedeki en zor görevlerden biri olan heterojonik anomalilerin tespiti, yapısal

organizasyonunu karakterize eden karmaşık ve uzun vadeli etkileşimlerin ifade gücü ile ortaya çıkmaktadır [14]. Bu alanda diğer bir çalışmada, ultrasonik veriler üzerinde test edilen çok sayıda derin öğrenme modeli ile anomali tespiti yapılmıştır [15]. Temassız bir görüntüleme teknolojisi olan optik koherens tomografi (OCT), retina hastalıklarının tespitinde yaygın olarak kullanılmakta ve anomali içeren görüntülerin tespitine odaklanılmaktadır [16]. Ayrıca, sağlık alanındaki bir diğer çalışmada beyin tümörünün erken süreçte teşhisi için MR beyin görüntülerindeki tümör değerlendirme için etkin bir anomali tespit yöntemi önerilmiştir [17]. Kablosuz kapsül endoskopi (WCE) türü görüntülerde anomali tespiti ve lokalizasyonu (*anomali konumu ya da pozisyonu*) için derin evrişimli sinir ağı (CNN) tabanlı bir model olan *WCENet* önerilmiştir [18]. Farklı bir çalışma alanı olarak adli tıpta hileli görüntüleri yakalamak için anomali tespiti yöntemi kullanılabilir. Burada, dijital görüntüler kullanıldığı için verilerde yanılma, kasti değiştirme veya hileler yapılabilmektedir [19]. Burada verilen anomali tespiti problem örnekleri farklı alanlarda anomali tespit türlerinin bulunduğunu göstermektedir. Bu yüzden anomali tespit problemi literatürde farklı kategorilerde ele alınmaktadır. Bazı çalışmalarda yöntem bazlı sınıflandırılma yapılırken; diğer çalışmalarda yapısal sınıflandırmalar ele alınmaktadır.

Sınıflandırma tabanlı anomali (*yöntem bazlı*) tespitinde etiketli eğitim verilerine dayanan normal ya da anomali olaylar için bir sınıflandırma modeli oluşturulmaktadır. Bir veri örneğiyle ilişkilendirilen etiketler normal veya anomali olarak nitelendirilir. Etiketleme genellikle bir uzman tarafından manuel olarak yapılır. Bu nedenle etiketli eğitim veri setini elde etmek oldukça zordur. Etiketlerin bulunma derecesine bağlı olarak anomali tespit teknikleri üç farklı sınıflandırma yöntemlerinden birinde çalışabilmektedir. Bunlar denetimli, yarı denetimli ve denetimsiz anomali tespit yöntemleridir. Denetimli anomali

tespiti; normal ya da anomali sınıflarına göre etiketlenmiş eğitim veri setinin kullanılabilirliğini sağlamaktadır. Bu gibi durumlarda tipik yaklaşım, normal ve normal olmayan sınıflar için bir öngörü modeli oluşturmaktır. Yarı denetimli anomali tespiti ise eğitim verilerinin sadece normal sınıfa ait örnekleri işaretlediğini varsayar ve iki türde veri domaininde çalışır. Anomali sınıfı etiket gerektirmediği için bu alanda denetimli anomali tekniklerinden daha yaygın kullanılır. Denetimsiz anomali tespitinde ise etiketli eğitim verisi gerekmez. Bu tür bir darboğaza sahip olmadığı için bu alanda sıklıkla kullanılır. Fakat burada çıktılarının doğruluğunu kontrol etmek daha zordur. Bu kategorideki teknikler, normal örneklerin test verilerindeki anomalilerden daha sık olduğu durumlarda daha karmaşıktır [20]. Denetimli sınıflandırma teknikleri, kolay anlaşılabilen modeller içermesi ve bilinen anomalilerin tespitinde yüksek doğruluk sağlaması bakımından avantajlıdır. Yarı denetimli sınıflandırma teknikleri ise kolay anlaşılabilen modeller içermesi ve normal davranışın doğru bir şekilde öğrenilebilmesi bakımından avantajlı; ancak normal sınıftan etiket gerektirmesi ve daha önce görülmeyen veri kayıtlarının anomaliler olarak algılanması bakımından ise dezavantajlıdır [21]. Denetimsiz anomali tespitinde daha önce görülmemiş nadir nesnelere veya olaylar hakkında önceden bilgi sahibi olunmadan bunları doğru şekilde elde etmeyi ifade eder. Burada önemli olan, veri kümesindeki anomalilerin yüzdesinin küçük ve genellikle yüzde birden az olmasıdır [22]. Anomali örnekleri veri seti içinde düşük oranlarda bulunduğu için eğitim sırasında kullanıcı tarafından kolaylıkla anlaşılabilirler. Çoğu durumda anomali tespiti örnekleri anomali veya normal olarak sınıflandırma için normal veri dağılımını modeller ve anomali tespiti bu alanda bir ölçüm tanımlama problemine indirgenir [23].

Yapısal sınıflandırmalar ise üç grupta incelenir. Bunlar nokta, bağlamsal ve kolektif anomalilerdir. Nokta anomalisi

(point anomaly), veri setindeki örnekler arasında anomali olarak kabul edilebilecek bir örnek olarak nitelendirilmektedir. Nokta anomalileri genellikle rastgele meydana gelen ve özel bir anlamı olmayan düzensizliği veya sapmayı temsil eder. Verilerin geri kalanına (normal olanlara) göre farklılaşan tek bir nokta (örneğin malzeme hatası gibi), normal kabul edilen aralığın dışında kalır. Bağlamsal anomali (contextual anomaly) ise belirli bir içerikte anomali olarak kabul edilebilecek bir örneği ifade eder. Bu tür anomaliler koşullara bağlı olarak saptanan anomali türü olarak da literatürde yer almaktadır. Okunan veri, bazı durumlarda anomaliye işaret ederken; diğer durumlarda normal bir veriye işaret ediyorsa yani özel bir bağlamda anomali davranışı sergiliyorsa bunlar bağlamsal anomali türündendir. Örneğin, verileri zaman bağlamında veya zamanla ilişkili kavramlara göre yılın belli günleri, mevsimler, hafta içi/sonları ve resmi tatiller gibi bağlamlarda görüntüleme, ilişkili anomali davranışlarının ortaya çıkarılmasını sağlayabilir. Kolektif anomali (collective anomaly); genellikle ilişkili, birbirine bağlı veya sıralı örnekler grubu olarak kabul edilebilir. Bu grubun her bir örneğinin anomali içermesi zorunlu olmasa da bunların kolektif oluşumu anomali durumunu ortaya çıkartır. Özetle, bu tür anomaliler koşullara bağlı olarak saptanan anomali türlerini ifade ederler. Birbiriyle ilişkili olan veriler, tüm veri setinde anomali davranışı sergiliyorsa, bunlar kolektif anomali örneğini temsil eder. Burada ilişkili olan bazı veriler, tekil olarak veri setinde anomali kategorisinde değerlendirilmese de bu veriler bir araya geldiğinde anomali oluşturabilirler [23].

2. GÖRÜNTÜLERDE ANOMALİ TESPİTİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde anomali tespiti ile ilgili literatür taraması sunulmaktadır. Çalışmaya uygun olarak kullanılan yaklaşımlar,

görüntüler üzerindeki anomalilerin tespitinde kullanılmaktadır. Aşağıda daha klasik yaklaşımlardan başlayarak daha güncel yaklaşımlara doğru literatür taraması ayrıntılı olarak verilmektedir.

Wilmet ve diğerleri görüntü üzerinde anomali tespiti ile ilgili yaptıkları bir çalışmada, kalite güvence kullanım senaryosuna uygulanan anomali tespiti için denetimli ve denetimsiz öğrenme dahil olmak üzere farklı derin öğrenme yöntemleri araştırılmıştır. Bu çalışmada MVTEC anomali veri seti kullanılmış ve farklı modeller geliştirilmiştir. Bunlar denetimli anormali tespiti için CNN, otomatik kodlayıcı anormallik tespiti için KD-CAE, gürültü kaynaklı anormallik tespiti için NI-CAE ve yeniden yapılandırılmış görüntüler oluşturmak için DCGAN modelleridir. Deneyler sonucunda KD-CAE'nin anomali veri kümelerinde CNN ve NI-CAE'ye kıyasla daha iyi performans gösterdiği ve NI-CAE'nin ise transistor veri kümesinde en iyi performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca yeni eğitim verilerinin oluşturulması için DCGAN yaklaşımı uygulanmış ancak hesaplama maliyeti ve AnoGAN mekaniğinin tahmin edilememesi nedeniyle yalnızca GAN tabanlı görüntülerin oluşturulmasına odaklanılmıştır. Denetimsiz yöntemlerin küçük miktarda anormal verilerin mevcut olduğu veya verilerin etiketlenmemiş olduğu durumda, görüntülerde anomali tespiti için daha güçlü olduğu sonucuna varılmıştır [24].

Bir başka çalışmada [25], denetimsiz anomali tespit yöntemleri kıyaslanmaktadır. Doğal görüntü verilerindeki anomali yapıların tespiti, bilgisayarla görme alanındaki birçok görev için son derece önemli olduğundan bahsedilmektedir. Denetimsiz anomali tespiti için yöntemlerin geliştirilmesi, yeni yaklaşımların eğitilmesi ve değerlendirilmesi için eğitim verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı nesne ve doku kategorilerinin 5354 yüksek çözünürlüklü renkli görüntü içeren MVTEC anomali algılama (MVTEC AD) veri kümesi

sunulmaktadır. Burada eğitim amaçlı normal, yani hatasız görüntüler ve test amaçlı anomalilere sahip görüntüler bulunmaktadır. Bu anomaliler çizikler, ezikler, bozukluklar ve çeşitli yapısal değişiklikler gibi 70'in üzerinde farklı kusur türü tanımlanmıştır. Ek olarak, tüm anomaliler için piksel düzeyinde gerçek örüntüler sağlanmaktadır. Ayrıca, evrişimli otomatik kodlayıcılar (*convolutional autoencoders*), üretken rakip ağlar (*generative adversarial networks*) ve önceden eğitilmiş evrişimli sinir ağlarını kullanan özellik tanımlayıcıları gibi derin mimarilerine dayanan denetimsiz anomali algılama yöntemlerinin kapsamlı bir değerlendirmesi yapılmaktadır [25].

Minhas ve diğerleri kusur/hasar değerlendirmesi için anomli tespit çalışması gerçekleştirmişlerdir. Buradaki görsel kusur değerlendirmesi bir anomali algılama alanıdır. Bu tür bir değerlendirme kaldırım taşları ve otomotiv parçaları gibi çeşitli yüzey inceleme işlemlerindeki çatlaklar ve işaretler gibi hataları bulmak için ele alınmaktadır. Burada yapılmak istenen, anomali numunelerinin normal olanlardan ayrıştırılması işlemidir. Denetimli anomali tespitindeki en büyük zorluklardan ikisi, etiketlenmiş eğitim verilerinin eksikliği ve anomali örneklerinin az olmasıdır. Normal örneklerin altında yatan dağılımı öğrenen ve ardından anomali skoru olarak tahmin edilen modelden sapmayı/farklılığı ölçen yarı-denetimli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, anomali tespit görevi için evrişimli sinir ağları kullanarak ağ tabanlı derin öğrenmenin bir uygulaması önerilmektedir. Çalışmalar incelendiğinde SVM'lerin bir miktar başarı sağladığı görülmektedir. Ancak bu tür sınıflandırma için derin ağlar temelli yaklaşımların daha iyi performans göstereceği düşünülmektedir. Buradaki anomali tespit kıyaslamalarında elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin yüzde 99'luk karakteristik eğri değeri altında yüksek bir ortalama alan elde ederek mevcut gelişmiş yöntemlerden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır [26].

Başka bir çalışmada farklı veri setleri ile görsel veriler üzerinde anomali tespiti yapılmış ve seçilen yöntemler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Kullanıcı etkinlikleri, ana veri işleme hattında işlenemeyen veya eğitim veri kümesine dahil edilemeyen önemli sayıda düşük kaliteli veya alakasız görüntü ve veri vektörü oluşturmaktadır. Bu veri vektörleri, bir uzman tarafından yapılan manuel analizle veya anomali tespit algoritmaları ile elde edilebilmektedir. Bu çalışma [27], görüntü veri kümelerinde sinir ağları için tanımlanan dağıtım dışı örneklerin denetimli ve yarı denetimli tespiti için yöntemler önermektedir. Burada kullanılan yaklaşım, görüntü sınıflandırma problemini çözmek için mevcut bir sinir ağını genişletmektedir. Böylece, genişletilme sonrası sinir ağı, görüntü sınıflandırma ve anomali algılama problemlerini aynı anda çözebilmektedir. Önerilen yaklaşım, kullanılan sinir ağı'nın son gizli katmanındaki derin öznitelik dağılımı üzerindeki etkiye dayanır. Çalışmada, MNIST ve ImageNet-30 veri kümelerinde LeNet ve EfficientNet-B0 için önerilen yöntemlerin analizi sunulmaktadır [27].

Tuluptceva ve diğerleri [28], "normal" verilerin bir dağılımından alınan örnekleri kullanan algoritmaların, dağılım dışı (anomali) örnekleri algılamayı amaçladığı ve görüntü anomali tespiti sağlayan yeni bir yaklaşım önermektedirler. Bu yaklaşım, bir görüntü dağıtımını önceden tanımlanmış bir başka gizli dağıtımla eşleştiren bir yöntem uygular. Bu veri dağılımlarını öğrenmek için Çekişmeli Üretici Ağlarından (GAN-Generative Adversarial Networks) yararlanılmaktadır ve görüntü anomaliliğinin tespiti için algısal kayıp yöntemi kullanılmaktadır. Burada hedefe ulaşmak için görüntüler arasında algılanan benzerliği ifade eden ve görüntü kontrastındaki değişikliklere karşı dayanıklı olan yeni bir benzerlik metriği sunulmaktadır. Ayrıca hiperparametre ayarı için bir doğrulama veri kümesi olmadan çok amaçlı bir kayıp

fonksiyonunun (görüntüyü yeniden yapılandırma ve dağıtım eşleme) ağırlıklarının seçimi için yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. Eğitim işleminden sonra uygulanan bu yaklaşım girdi görüntüsünün anomalisini, görüntü ile modellenen ve veri dağılımını oluşturan en yakın görüntüdeki algısal farklılığa göre ölçmektedir. Önerilen yaklaşım, açık veritabanı üzerinden çeşitli görüntü kıyaslamalarını baz alarak kapsamlı bir şekilde değerlendirme sunmaktadır [28].

Akıllı üretim sistemlerinde otomatik görsel denetim konusunu baz alan bir çalışmada [29], görüntü anomali tespiti için, genel uygulama süreci ele alınmaktadır. Farklı boyutlar, şekiller ve renkler gibi görüntülerdeki olası anomali türleri, otomatik olarak görsellerin incelenmesini zorlaştırır. Görüntü anomali tespiti ile ilgili önceki çalışmalar önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Ancak anomali algılama performansı ve verimliliği hala zorluklar içermektedir. Bu çalışmada, konum temelli kodlamalar ile önceden eğitilmiş özneteliği eşleyerek anomalileri tespit eden ve görüntü anomali algılama problemini ele almak için yeni bir konum kodlamalı gelişmiş özellik eşleme (*position encoding enhanced feature mapping - PEFM*) yöntemi önerilmektedir. İlgili çalışmadaki deney sonuçları, PEFM yaklaşımının MVTEC AD veri kümesinde diğer yöntemlere kıyasla daha iyi performans sağladığını göstermektedir [29].

Literatür incelendiğinde, Shvetsova ve diğerlerinin sunduğu diğer bir çalışmada [30] görüntü anomalilerini tanımlamada kullanılan bir çok yöntemin yetersiz kaldığına değinilmiştir. Bu yöntemler, göğüs ile ilgili biyomedikal verilerde zor görülebilen anomaliler ve lenf düğümlerindeki metastazlar gibi karmaşık tıbbi görüntüleri işleme konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu sorunu çözmek için yeni ve etkili bir görüntü anomali algılama yöntemi sunulmaktadır. Bu süreçte, yüksek çözünürlüklü ve karmaşık görüntüleri işlemek için yeniden tasarlanmış bir eğitim sürecine, klasik otomatik

kodlayıcı yaklaşımına ve bir görüntü anomali puanı hesaplama yöntemine ihtiyaç vardır. Model kurulumu sırasında hiçbir anomali örneği ele alınmadan, tamamen denetimsiz anomalideki zorluklar ele alınmıştır. Yalnızca model hiperparametrelerinin ayarlanması için çok az sayıda sınırlı anomali örneği kullanılmıştır. Çözüm olarak bilinen bir kıyaslama ile doğal görüntü veri kümelerinin yanı sıra radyoloji ve dijital patoloji görüntülerini içeren iki tıbbi veri kümesi üzerinde çalışılmıştır. Önerilen çalışma, görüntü anomali tespiti için yeni ve etkin bir yaklaşım önermekte ve karmaşık tıbbi görüntü analizi görevlerinde diğer yaklaşımlardan daha iyi performans göstermektedir [30].

Bir diğer çalışmada [31] endüstriyel işlemlerde herhangi bir kusuru bulunan görüntüyü normal bir görüntüyle eşleştirmek üzere eğitilmiş bir otomatik kodlayıcı yaklaşımından bahsedilmektedir. Bu yaklaşımda, anomali tespiti yeniden yapılandırma belirsizliğini ele alır. Yeniden yapılandırmanın belirsizliğini iyileştirmek için geçiş bağlantılı bir otomatik kodlayıcı mimarisi kullanılmıştır. Bu model, gerçek kusurların görünümünden bağımsız olarak rastgele seçilen temiz görüntülerin yeniden oluşturulmasını desteklediğini göstermektedir. Burada kullanılan yaklaşımda yapılan doğrulama ile hem piksel hem de görüntü bazlı anomali tespiti için MVTEC AD veri seti üzerindeki test sonuçları karşılaştırılarak yeniden yapılandırma tabanlı yöntemlerin tutarlı çıktıları sunulmaktadır [31].

Piciarelli ve arkadaşları, eğitim için anomali verilerinin mevcut olduğu ancak miktarlarının az olduğu varsayımına göre kapsül ağlarına dayalı bir görüntü anomali tespit sistemi önermektedir. Burada tam denetimli bir derin anomali tespit tekniği önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, her örneğin normal veya anomali olduğu, ancak dengesiz veri setlerinin ek kısıtlamasıyla ikili sınıflandırma problemine indirgendliğini varsayar. Veri

dengeşizliğiyle başa çıkmak için bu çalışmada, çıktı vektörlerinin uzunluk farkına ve yeniden oluşturma hatasına dayalı yeni bir anomali skoru önerilmiştir [32].

Sarafijanovic ve arkadaşlarının sunduğu çalışmada, görüntü üzerinde anomali tespiti yapmak için iki aşamalı bir yaklaşım önerilmiştir. İlk olarak, normal örnekler kullanılarak görüntülerin düşük boyutlu bir temsilini çıkarmak için evrişimli otomatik kodlayıcı (CAE) eğitilir. Burada, CAE'yi tasarlarcken özgün bir mimari seçimi önerilmektedir. Bu mimari, farklı çekirdek boyutlarındaki evrişimli filtreleri birleştirir. İkinci olarak, görüntüler için öğrenilen temsilin düşük boyutlu uzayında mesafe tabanlı bir anomali dedektörü kullanılmaktadır. Ancak tam ve doğru mesafeyi hesaplamak yerine çarpım nicelemeyi kullanarak yaklaşık bir mesafe hesaplanılmaktadır. Bu işlem, mesafe tabanlı anomali dedektörlerinin yüksek bellek ve tahmin süresi maliyetlerini azaltır. Önerilen yaklaşım dört farklı görüntü veri setindeki testlerde göre farklı yöntemlerle karşılaştırılmaktadır. Sonuç olarak önerilen yaklaşımın oldukça başarılı bir performans sergilediği raporlanmıştır [33].

Bir diğer çalışmada ise anomali verilerinin yetersiz kaldığı ya da etiketlemenin mümkün olmadığı durumlarda, denetimsiz anomali tespiti ve yerelleştirme yaklaşımının pratik uygulamalar için önemli olduğundan bahsedilmektedir. Mevcut yaklaşımların çoğu derin evrişimli sinir ağı ile normal görüntü özelliklerini çıkarır ve parametrik olmayan dağılım tahmin yöntemleri ile karşılık gelen dağılımı karakterize eder. Anomali puanı, test görüntü özelliği ile tahmin edilen dağılım arasındaki mesafeyi ölçerek hesaplanır. Ayrıca mevcut yöntemlerin görüntü özelliklerini etkili bir şekilde eşleyemediği düşünölmektedir. Bu amaçla, 2B normalleştirme akışlarıyla uygulanan FastFlow yöntemi önerilmektedir. FastFlow, denetimsiz anomali tespiti ve yerelleştirme için ResNet ve görüntü transformatörü gibi isteğe bağlı derin özellik çıkarım

özelliklerine sahip bir eklenti modülü olarak kullanılmıştır. MVTec AD veri kümesi üzerindeki kapsamlı deneysel sonuçlar, FastFlow'un doğruluk ve çıkarım verimliliği açısından güncel yöntemleri geride bıraktığını göstermektedir. Bu yaklaşım, yüksek çıkarım verimliliği ile anomali tespitinde yüzde 99,4 AUC oranına ulaşır [34].

Başka bir makalede [35], bir görüntü kümesindeki anomalileri güvenilir bir şekilde saptamanın, görsel kalite denetimi, gözetim veya tıbbi görüntü analizi için pratik açıdan oldukça önemli bir görev olduğundan bahsedilmektedir. Otomatik kodlayıcı sinir ağları, normal görüntüleri yeniden yapılandırmayı öğrenir ve bu görüntüleri yeniden yapılandırmada hata meydana geldiğinde oluşan bu hataları anomali olarak sınıflandırabilir. Burada, eğitim seti küçük bir aykırı değer parçası ile bozulduğunda ya da anomali meydana geldiğinde bu yaklaşım temel bir problem ile analiz edilmektedir. Otomatik kodlayıcıların dinamik eğitim süreci, aykırı değerlerin yeniden oluşturulma hatasını azalttığını ve dolayısıyla anomali algılama performansının düşürüldüğünü göstermiştir. Bu etkiye karşı koyabilmek için tipik olarak anomalileri düşük olabilirlik bölgelerine yerleşim sağlayan otomatik kodlayıcı mimarisi uygulanır. Olabilirlik modeli kullanılarak potansiyel anomaliler eğitim sırasında belirlenebilir ya da reddedilebilir. Böylece potansiyel anomalilerin eğitim sırasında aykırı değerlerin varlığına karşı etkili bir anomali dedektörü ortaya çıkardığı gözlemlenir [35].

Zhou ve diğerleri, birçok görüntü analiz yönteminin güç ekipmanları ile ilgili arıza tespitindeki termal anomalileri etkin bir şekilde karakterize edemediğinden bahsettiği bir çalışma sunmuşlardır. Buradan yola çıkılarak yapılan çalışmada, termal anomali tespitine (Re2FAD) yardımcı olunması için diferansiyel görüntü kaydı ve etkin görüntü füzyonu için bir çerçeve önerilmiştir. Uygulama sürecinde ilk olarak Re2FAD, düşük

frekanslı ayrışmadan sonra kaynak görüntülerinin ortak bir histogramını hesaplar ve optimal kayıt parametrelerini çözmek için bir kriter işlevi oluşturur. İkinci olarak, segmentlere ayrılmış bölgelerin etiketlerini netleştirmek için üyelik fonksiyonu oluşturulur. Üçüncüsü, birleştirilmiş görüntüyü yeniden oluşturmak için etikete göre birleştirme stratejisi seçilir. Burada test işlemleri için Shanghai Sanlin 500kV trafo merkezinin güç ekipmanı veri seti oluşturulmuş ve veri setinin diğer görüntü kayıt yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek kayıt doğruluğuna sahip olduğu vurgulanmıştır. Önerilen bu yöntem, veri kümesi üzerinde farklı görüntü birleştirme yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Değerlendirme kriterlerine göre önerilen yöntemin termal anomalileri ortaya çıkarma doğruluğunun diğer yöntemlerden %29,03 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [36].

Literatürde *non-destructive testing* diye ifade edilen *tahribatsız muayene* konusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Tahribatsız muayene (*non-destructive testing, NDT*), inceleme yapılacak olan malzeme ya da parçanın bütünlüğüne zarar vermeden yapılan muayene türüdür [37]. Bu konuda Posilovic ve arkadaşları tahribatsız muayenenin, bileşenlerin bütünlüğünü değerlendirmek için kullanılan bir yöntem grubu olduğundan bahsetmektedir. Çalışmalarında ultrasonik muayene ele alınmıştır. Bu yöntem, kusur ya da hasar aramada malzemenin hem sığ hem de derin kısımlarını görselleştirme kabiliyeti nedeniyle öne çıkmaktadır. Kritik bileşenlerin test edilmesi yorucu ve zaman alan bir görev olabilmektedir. Bu nedenle, inceleme verilerini analiz eden araçlar, anomaliden arınmış verilerin atılmasında ve şüpheli verilerin incelenmesinde etkili olabilir. Böyle bir araç kullanıldığında hatalar daha az görülür, muayene süreleri kısalmır ve tahribatsız muayene daha verimli olur. Bu çalışmada, ultrasonik tahribatsız muayene veri seti üzerinde çok sayıda derin öğrenme tespit yöntemi kullanılmıştır.

Burada AUC skorunun yaklaşık olarak %82 oranında bir ortalama başarı elde edildiği anlaşılmıştır. [37].

Liu ve diğerleri, hiperspektral veriler için denetimsiz anomali tespit yöntemlerinin geliştirilmesi konusunu ele almışlardır. Bu konunun kalite ve güvenlik kontrolündeki uygulamalar için büyük önem taşıdığından bahsedilmektedir. Sık kullanılan bir anomali algılama yöntemi olarak otomatik kodlayıcı (otokodlayıcı) yaklaşımı, yeniden oluşturma hatasını en aza indirmek için eğitilir. Burada önerilen yöntemin performansını artırmak için otokodlayıcı ve kendi kendini denetleyen sınıflandırıcının ortak öğrenmesine dayanan SSC-AE adlı bir anomali tespit yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem ile çileklerdeki çürükler dahil kalite kusurlarının tespiti üzerinde çalışma yapılmıştır. Önerilen mimaride, normal verilerin düşük boyutlu temsillerini ve otomatik kodlayıcıdan çıkarılan sentetik anomali verilerini ayırt etmek için kendi kendini denetleyen bir sınıflandırma yaklaşımı önerildi. Çileklerle ilgili hiperspektral veriler üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları, SSC-AE'nin farklı kapsamlarına göre tek boyutlu otomatik kodlayıcı, varyasyonel otomatik kodlayıcı, iki boyutlu otomatik kodlayıcı, destek vektör makinesi yöntemlerinin iyi anomali tespit performansları gösterdiği anlaşılmıştır. Burada en iyi sonucu iki boyutlu otomatik kodlayıcı yöntemi vermiştir. Ayrıca, üç tür çilek anomalisinin konumlarının ve şekillerinin, spektrumları piksel piksel tahmin edilerek başarılı bir görselleştirme yapılmıştır. SSC-AE yaklaşımının tüm karşılaştırma yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [38].

Mou ve diğerleri çalışmalarında, temassız bir görüntüleme teknolojisi olan OCT'nin retina hastalıklarının tespitinde yaygın olarak kullanıldığına değinmiş ve bu problemle ilgili yöntem önermişlerdir. Özellikle düşük oranlarda karşılaşılan hastalıklar için ilgili retina hastalığının tespitinde

bazı kısıtlar bulunmaktadır. Burada spesifik olmayan retina hastalığı için otomatik bir anomali saptama yöntemi önerilmekte ve eğitim için yalnızca sağlıklı OCT görüntüleri sunulmaktadır. Buradaki yöntem, anomali belirleme kriteri olarak epistemik belirsizliği kullanır. Kullanılan bu yöntem, lezyonun (*organların yapısında görülen bozukluk*) yüksek bir epistemik belirsizlik bölgesi ile ilişkili olduğunu varsayar. OCT görüntülerinin epistemik belirsizliğini elde etmek için Bayes Sinir Ağı (BNN) ve Çok Ölçekli Bayes U-Net (MBU-Net) yöntemleri önerilmektedir. Ayrıca sağlıklı doku bölgeleri tarafından üretilen belirsizliği azaltmak için başka bir algoritma tasarlanmaktadır. Son olarak, girdi verilerinin sağlıklı olup olmadığını ayırt etmek için eşik tabanlı bir işlev tasarlanmıştır. Bu yaklaşımı, açık (*public*) olarak sunulan bir veri seti olan UCSD'de ve bu çalışma için özellikle toplanılan BFHJLU veri seti test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin UCSD veri setinde %94,9 doğruluk ve %97,9 hassasiyet değerlerine ulaşabildiğini göstermektedir. BFHJLU veri setinde ise yöntemin %92,1 doğruluk ve %97,3 hassasiyet değerlerini elde ettiği gözlemlenmiştir. Son olarak yöntemin, mevcut anomali tespit yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır [39].

Biomedical Signal Processing and Control isimli dergide gerçekleştirilen bir çalışmada [40], beyin tümörünün erken prognozu hakkında önceki çalışmalara göre daha iyi yaşam beklentisi sunabileceği ihtimali ele alınmıştır. Prognoz, bir hastalığın seyri hakkında tahmini ve iyileşme şansı olup olmadığı anlamında kullanılan tıbbi bir terimdir. Bu çalışmada prognoz durumu ele alınmaktadır. Etkili bir makine öğrenmesi segmentasyon tekniği ile birleştirilmiş manyetik rezonans görüntülemenin (*MRI*), tümörleri değerlendirmenin güvenilir bir yolu olduğu gösterilmiştir. Segmentasyona ek olarak, istenen sonuçları elde etmek için görüntünün optimize edilmesi gerekir.

Çoğu durumda, tek aşamalı optimizasyon, algoritmaya özgü sınırlamalar nedeniyle arama hedefini tamamlayamamıştır. Bu tür bir kısıtın üstesinden gelebilmek için tümörden etkilenen dokuların tespit edilmesinde metasezgisel optimizasyon teknikleri yaygın olarak kullanılabilir.

Bir diğer çalışmada [41], tekstil endüstrisi alanındaki kalite kontrol problemi ele alınmaktadır. Üretim tesislerinden gelen gerçek etiketli veriler kolaylıkla elde edilemediği için sistem davranışını izleyen ve nominal koşullardan sapmaların ortaya çıkıp çıkmadığını belirleyen farklı tespit yöntemleri kullanılmaktadır. Özellikle, kumaşların iplik kesişme noktaları tarafından oluşturulan şekilleri analiz etme ve şekil değişkenliğini ölçen mesafe ölçümlerini tanımlama süreçlerinde kullanılan özellikleri belirlemek için elastik şekil analizinden teknikler kullanılmaktadır. Önerilen yaklaşım, eğitim aşaması için sadece bazı hatasız görüntülerin bulunduğu dört farklı tekstil ürününe uygulanmıştır. Bu ön çalışmanın sonuçları, önerilen yaklaşımın etkinliğini doğrulamaktadır [41].

Pandey ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, hiperspektral görüntülerde anomali tespiti için temel kavramlar tanıtılmaktadır. Bu çalışmada öncelikle problem gözden geçirilmiş ve ardından tekniğin mevcut durumunun derinlemesine bir incelemesini yapılmıştır. Hiperspektral görüntülerde anomali tespiti için çeşitli yaklaşımları temsil etmek üzere seçilen bir dizi referans yöntemi teorik açıdan incelenir ve ardından deneysel olarak değerlendirilir. Özetle bu çalışmada, bazı gerçek hiperspektral veri setlerine dayalı olarak seçilen yöntemlerin niteliksel ve niceliksel özellikleri ele alınmıştır [42].

Sarıkan ve diğerleri anomali tespitinin akıllı ulaşım sistemlerinin önemli bir parçası olduğundan bahsetmektedirler ve yaptıkları çalışmada, araç hareketlerindeki anomalileri tespit

etmek için görüntü işleme ve makine öğrenmesi tekniklerini kullanılmışlardır. Buradaki anomaliler stabil kalmayı ve ters yönde hareket etmeyi içerir. Görüntüler aracın ön ve arka tarafındaki CCTV kameraları kullanılarak alınır. Bu yöntem, sonuçları operasyonel ve çevresel koşullardaki değişikliklere karşı dayanıklı hale getirir. Hareket algılama için birden çok ardışık çerçeve elde edilir. Kenarlar ve plaka köşe konumları gibi özellikler izleme amacıyla çıkarılır. Trafik akışının yönü eğitilmiş sınıflandırıcıdan elde edilir. Burada K-en yakın komşu sınıflandırıcı model olarak seçilmiştir. Önerilen yöntem gerçek bir veri üzerinde değerlendirilmiş ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir [43].

2021 yılında gerçekleştirilen diğer bir çalışmada [44], otomatik kodlayıcılar gibi mimarilerle görüntünün daha düşük boyutlu verilere dönüştürülerek sinyal ve gürültünün farklı katmanlarda ele alınabileceği formlarda veri temsiline izin verdiği vurgulanmıştır. Buradaki problem çözümünde denetimsiz görüntü anomali tespitinin pozitif etkilerinden bahsedilmektedir. Bu çalışmada endüstriyel görüntülerdeki anomalileri tespit edebilmek için üç farklı yaklaşıma aşağıdaki gibi vurgu yapılmıştır [44].

- Derin öğrenme modelleri, güçlü genellemeler sunabilmelerini sağlayan parametreleri tahmin edebilmek için genellikle büyük veri kategorisinde yüksek sayıda girdilere ihtiyaç duyar. Bu da anomali durumlarının belirlenebilmesi için gereken verilerin yetersizliğinde bu tür yöntemlerin yetersizliğini ifade eder.

- Gerçek veriler genellikle makineler tarafından yorumlanabilir etiketlenmiş formatlarda kodlanarak veya mevcut hali ile bırakılmış olarak etiketlenmemiş bir biçimde sunulur. Bu durum derin sinir ağının eğitilme görevini

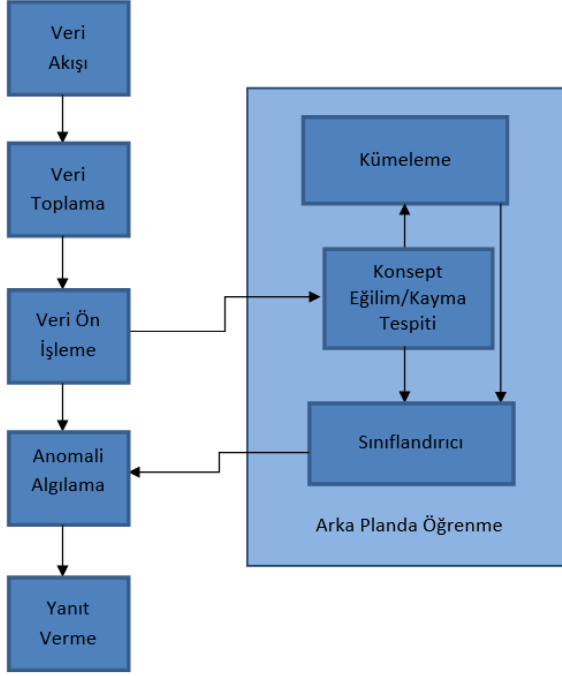
zorlaştırır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için etkili yöntemlerin araştırılması zorunludur.

- Son olarak, sadece derin öğrenmenin bilimsel ve akademik alanıyla sınırlı kalmayan ve aynı zamanda gerçek dünya ortamlarında da uygulanabilir bir problem ele alınmış olur. Burada etkin bir şekilde karşılaştırılan ve odaklanılan modeller iş ve endüstriyel alanlara uygun bir biçimde yansıtılabilir [44].

3. MATERYAL VE METOT

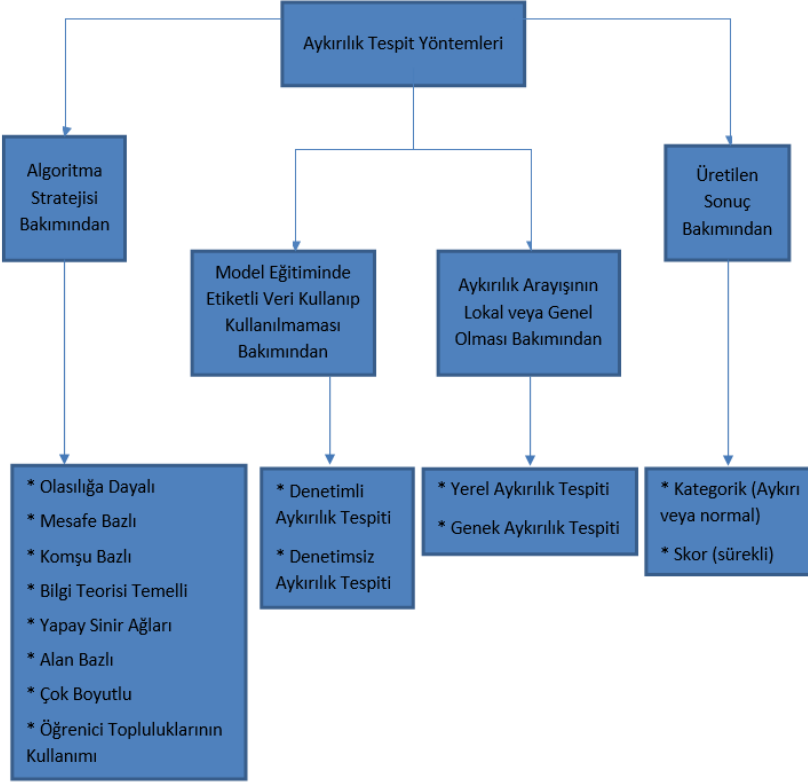
Bir anomali tespit yöntemi genelde iki farklı çıktı üretmektedir. Birincisi, gözlemin anomali olup olmadığına dair kategorik bir etiket değeridir. İkincisi ise bir skor ya da güven değeridir. Skor, etikete göre daha çok bilgi taşımaktadır. Çünkü gözlemin ne kadar büyük anormal olduğunu göstermektedir. Etiketler ise sadece anomali olup olmadığını göstermektedir. Gözetimli yöntemlerde etiket daha yaygın iken gözetimsiz ve yarı gözetimli yöntemlerde skor daha yaygın olmaktadır. Skor kullanılırken genelde skorlar büyükten küçüğe doğru sıralanır ve en anormal olan a gözlemi, en anormal olan b gözlemi şeklinde kullanıcılara sunulmaktadır. Ayrıca istenilmesi durumunda bir eşik değeri kullanılarak skorlar, etiketlere dönüştürülebilmektedir.

Şekil 1: Problem Çözümünde İzlenen Genel Konsept [45]



Şekil 1’de problem çözümünde izlenen genel konsept gösterilmiştir. Burada farklı modüller tanımlanmıştır. Kümeleme modülü, kümeleri yeni gelen veri noktasına göre güncelleyecektir. Sınıflandırıcı modülü, ilk eğitim veri seti ile eğitilir ve yeni gelen veri noktasını etiketler. Kavram sürüklenme modülü kavram kaymasının meydana geldiğini tespit ettiğinde sınıflandırıcı modül, kümeleme modülünden gelen küme bilgisine göre güncellenecektir. Kümeleme modülü veri nesnelere almayı bekler ve kümeleme algoritması ilk kümeleri oluşturur. Bu kümeler veri nesnelere sayısına göre n-küme veya s-küme olarak etiketlenir. Sınıflandırıcı modül, başlangıç eğitim veri setleri ile eğitilir. Veri penceresi yeterli sayıda veri nesnesi aldığı anda, bunlar kavram sapması tespit modülüne gönderilir [45]. Şekil 2’de uygulanan farklı yöntemler verilmiştir.

Şekil 2: Anomali Tespit Yöntemlerinin Sınıflandırılması



Olasılığa Dayalı Yöntemler: Olasılığa dayalı ve istatistiksel modellerde veri, kapalı olasılık dağılımı ile modellenebilir. Bu tür metotlarda modelin parametreleri öğrenilebilir. Bu yüzden, burada kritik konu, özel veri dağılımının seçilmesidir. Örnek vermek gerekirse, Gauss karışık modelde veriler, üretken bir sürecin çıktısıdır. Ayrıca, her nokta k adet Gauss kümesinden birine aittir. Bu Gauss dağılımının parametreleri beklenti maksimizasyonu algoritması ile öğrenilmektedir. Bu yöntemdeki başka bir çıkarım ise, veri noktalarının bir kümeye ait olup olmama ihtimalleri veya yoğunluğa bağlı model ile uyumlu olmasıdır.

Mesafe Bazlı Yöntemler: Bu yöntem, gözlemlerin aynı veya farklı olma durumlarını, aralarındaki mesafeye göre

belirler. Mesafe ölçümü ise öklid gibi yöntemler ile yapılmaktadır.

Komşu Bazlı Yöntemler: Bu yöntemler, karşıt noktaları belirlemek için veri noktalarının çevresini etkin bir şekilde incelerler.

Bilgi Teorisi Modelleri: Veri setini okumayı güçleştiren kayıtlar, anomali ölçütü olarak ele alınmaktadır. Örnek vermek gerekirse, bir kutuda elli kırmızı top bulunsun. Kutu içindeki veriyi tanımlarken elli kırmızı top biçiminde tanımlama yapılırken; kutuya iki mor, üç sarı, iki siyah top eklendiğinde buradaki tanım güçleşecektir. Bu tanımlamanın güçleşmesine neden olan toplar anormal olarak kabul edilebilmektedir.

Yapay Sinir Ağları: Yapay sinir ağlarından yararlanarak da anomali tespiti yapılabilmektedir. Gözetimsiz yöntemlerde en sık kullanılan iki yöntem mevcuttur: Bunlar, ‘Kendini Örgüleyen Ağ’ ve ‘Otomatik kodlayıcı’ yöntemleridir. Kendini Örgüleyen Ağ, düğüm ve kenar ekleme ve çıkarma yöntemlerini kullanarak kendini veriye uydurur ve bu sayede anomaliler tespit edilir. Otomatik kodlayıcı ise orijinal verileri, gürültüyü önemsemeyerek işlemeye başlar. Daha sonra, algoritma orijinal girişe mümkün olduğunca yakın bir görüntü elde edebilmek için ilişkili kodu uygular. Bu arada orijinal giriş ile farklılıklar olabilmektedir. Aykırı değerlerden dolayı yüksek düzeyde yeniden yapılandırma hataları ortaya çıkmaktadır ve buradaki hata değerleri aykırı değerlerin otomatik kodlayıcı kullanılarak bu değerlerin belirlenmesini sağlamaktadır.

Alan Bazlı Yöntemler: Verilerin girdi bölümünü, geriye kalan kısımdan ayıran bir sınırın oluşturulması ile nominal sınıfın bölümü tahmin edilmektedir. Sınırlandırılmış alanın dışına çıkan herhangi bir veri noktası bu sebep ile sıra dışı olarak işaretlenmektedir. Tek Sınıflı Destek Vektör Makineleri buna bir örnektir.

Çok Boyutlu Verilerde Aykırılık Tespiti: Birçok durum; gürültülü ve birbiriyle alakasız olacağı için çok boyutlu verilerde anomali tespiti yapmak zor olabilmektedir. Alakasız durumlar; mesafelerin doğru ve hassas bir şekilde hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Çok boyutlu verilerde boyut arttıkça verinin seyrekleşme eğilimi de artmaktadır. Nokta mesafelerinin ayırt edici özelliği ise azalmaktadır. Bu şekilde olunca da, anomali skoru, noktaları birbirlerinden ayırması güçleşmektedir. Bu tarz olaylarda alt uzay anomali tespiti yapılabilmektedir. Bu yaklaşım, anomalilerin alt uzayda da gizli ve sıradışı davranışlar ortaya çıkardığı varsayılmaktadır.

Aykırılık Tespitinde Öğrenici Toplulukların Kullanımı: Sınıflandırma ve kümeleme yöntemlerinde fazla sayıda zayıf öğrenici bir araya gelerek daha iyi sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Buna benzer bir metot, anomali tespitinde kullanılabilir. Bu yöntemler art arda ve bağımsız yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Gözetimli Aykırı Gözlem Belirleme: Bu metotta, model eğitilirken kullanılan veri etiketlidir. Öncesinde manuel ya da başka bir yöntem ile hangi gözlemin aykırı değer olduğu ifade edilmektedir. Bir de bu model eğitilirken bu etiketlerden de faydalanılmaktadır.

Gözetimsiz Aykırı Gözlem Belirleme: Bu yöntemde model eğitilirken yararlanılan veri, etiketli ya da etiketsiz olabilir. Bu tarz bir durumda yöntemi gözetimli yöntemlerden ayıran en önemli özellik, model eğitimi esnasında etiket bilgisinin kullanılmamasıdır.

Lokal Aykırı Gözlem Belirleme: Veri setinin tümüne bakıldığında anormal davranış göstermeseler de lokal yoğunlukların gözlemlendiği bölgelere odaklanıldığında anomali tespiti yapılabilir.

Genel Aykırı Gözlem Belirleme: Bu tür örnekler, veri setinin tamamen hesaba katıldığında diğerlerinden ayrılan aykırı gözlemleri ifade etmektedir.

Küçük Kümeler: Bazı kümeler, veri setindeki diğer kümelere göre az sayıda olabilmektedir. Gözlemlere göre skor çıkaran algoritmalar, net bir şekilde anormal olanlara verdikleri kadar yüksek puan belirlemeseler de normallerden biraz daha yüksek puan verebilmektedirler.

Aykırı Gözlem Anlayışına Göre: Çoğu zaman anomalilerin az olduğu düşünülse de anomaliler daha sık gözlemlenmektedir ve hatta belli bir örüntüye sahip olabilmektedir. Bu yüzden, anomaliler sanki normalmiş gibi büyük bir küme altında toplanabilmektedir.

Nokta Bazlı Anomali Belirleme: Büyük bir veri setinde anomaliler bir bir tespit edilmeye çalışılmaktadır. Neredeyse bütün anomali tespit algoritmaları bu türe ait denilebilir.

Toplu Anomali Belirleme: Anomaliler, birbirlerine benzer gruplar halinde bulunur ve bunları tespit etmeye yönelik yöntemler geliştirilebilir.

Bağlamsal Anormallik: Anomalilerin konuma ve duruma göre tespit edilmesi ele alınmaktadır. Örnek vermek gerekirse, bir asrı hesaba alırsak 26 derece anormal bir sıcaklık diyemeyiz ancak ay olarak düşünüp şubat ayında 26 derecenin gözlemlenmesine anormal bir sıcaklık diyebiliriz. Veya farklı bir bakış açısıyla düşünersek 10 derece sıcaklık, kutuplara yakın yerlerde normal iken ekvatora yakın yerlerde anormaldir.

Aykırı Değer Olan/Olmayan Kategorik Sonuç: Oluşturulan sonuç, gözlemin aykırı değer olup olmadığı şeklinde kategorik olabilmektedir.

Skor: Üretilen çıktı, gözlemin aykırı değer derecesini belirten bir puandır. Bu çıktılar sürekli domaindeki verileri

temsil eder. Örneğin, elde edilen puan ne kadar yüksekse çıktılar da o derecede aykırı bir gözlem olarak değerlendirilir. Bu şekilde üretilen puanlara eşik sınır konularak kategorik sonuçlar elde edilebilmektedir.

3.1. Veri Setleri

Bu bölümde görüntülerde anomali tespiti ile ilgili veri setleri sunulmaktadır. Literatürde onlarca kullanılabilir veri seti bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada doğrudan anomali tespiti ile ilgili olan ve fazlaca atıf alan veri setleri özellikleriyle birlikte sunulmaktadır. [46]

CIFAR-10, MNIST, CIFAR-100, ImageNet, COCO, Fashion-MNIST, STL-10 (Self-Taught Learning 10), AG News (AG's News Corpus), ShanghaiTech, MVTEC AD (MVTEC ANOMALY DETECTION DATASET), UCF-Crime, UCSD Ped2 (UCSD Anomaly Detection Dataset), NAB (Numenta Anomaly Benchmark), Lost and Found, MURA, Fishyscapes, CASIA-FASD, ShanghaiTech, ShanghaiTech, Numenta Anomaly Benchmark, ADFI (Anomaly Detection Datasets for Visual Inspection).

3.2.1 MvTec: MVTEC AD, endüstriyel denetime odaklanan anomali tespit yöntemlerinin kıyaslanması için bir veri kümesidir. On beş farklı nesne ve doku kategorisine ayrılmış 5000'den fazla yüksek çözünürlüklü görüntü içerir. Her kategori, bir dizi hatasız eğitim görüntüsünden ve çeşitli türde kusurlara sahip bir dizi görüntüden ve hatasız görüntülerden oluşur. [47]

3.2.2. CIFAR-10 veri seti, makine öğrenmesi ve bilgisayarla görme algoritmalarını eğitmek için yaygın olarak kullanılan bir görüntü koleksiyonudur. Makine öğrenmesi araştırması için en yaygın kullanılan veri kümelerinden biridir. CIFAR-10 veri seti 10 farklı sınıfta 60.000 adet 32x32 renkli görüntü içermektedir. 10 farklı sınıf uçakları, arabaları, kuşları,

kedileri, geyikleri, köpekleri, kurbağaları, atları, gemileri ve kamyonları temsil eder. Eğitim seti 50.000 görüntü içerirken, test setleri 10.000 görüntü içerir.

CIFAR-100: CIFAR-100 veri seti de 100 sınıftan oluşmakta ve her sınıfta 600 adet resim bulunmaktadır. CIFAR-100 veri setinde bulunan sınıflar 20 farklı üst sınıfta toplanmıştır.

MNIST: (Modified National Institute of Standards and Technology database) cümlesinin kısaltmasıdır. El yazısı ile yazılmış ve uygun bir şekilde sınıflandırılmış rakamlardan oluşur. 60.000 öğrenme(train) ve 10.000 doğrulama(test) görseli barındırır.

ImageNet: ImageNet projesi, görsel nesne tanıma yazılım araştırmalarında kullanılmak üzere tasarlanmış büyük bir görsel veritabanıdır. 14 milyondan fazla görüntü, hangi nesnelerin resmedildiğini göstermek için proje insanlar tarafından elle açıklanmıştır ve görüntülerin en az bir milyonunda sınırlayıcı kutular da bulunmaktadır. ImageNet, "balon" veya "çilek" gibi tipik bir kategoride, birkaç yüz resimden oluşan 20.000'den fazla kategori içerir. Gerçek görüntüler ImageNet'e ait olmasa da üçüncü taraf resim URL'lerinin ek açıklamalarının veritabanı doğrudan ImageNet'ten ücretsiz olarak edinilebilir.

COCO: MS COCO (Bağlamdaki Microsoft Ortak Nesneleri) veri kümesi, büyük ölçekli bir nesne algılama, segmentasyon, anahtar nokta algılama ve altyazı ekleme veri kümesidir. Veri seti 328K görüntüden oluşuyor. Bölmeler: MS COCO veri kümesinin ilk sürümü 2014 yılında yayımlanmıştır. Eğitim (83K), doğrulama (41K) ve test (41K) kümelerine bölünmüş 164K görüntü içeriyor. 2015 yılında, önceki tüm test görüntüleri ve 40.000 yeni görüntü dahil olmak üzere 81.000 görüntüden oluşan ek test seti yayımlanmıştır.

Fashion-MNIST: 10 tane kıyafet sınıfı için toplamda 70000 28x28x1'lik fotoğraflar içeren bir veri setidir. Aşağıda ait olunan sınıfları görebilirsiniz. Amacımız 60000 eğitim seti ile doğru sınıflandırma yapmayı öğrenecek bir yapay sinir ağı geliştirmek ve mümkün olduğunca yüksek bir başarıyı yakalayabilmek. Sonuç olarak bu kılavuz, 10 kategoride 70.000 gri tonlamalı görüntü içeren Fashion MNIST veri kümesini kullanır. Görüntüler, aşağıda görüldüğü gibi düşük çözünürlükte (28x28 piksel) ayrı giyim eşyalarını göstermektedir. Data seti kaggle içerisinde 60000 Training, 10000 Test olarak ayrılmış bulunmaktadır.

STL-10: STL-10 veri seti, denetimsiz özellik öğrenme, derin öğrenme, kendi kendine öğrenme algoritmaları geliştirmeye yönelik bir görüntü tanıma veri setidir. CIFAR-10 veri kümesinden esinlenilmiştir ancak bazı değişiklikler yapılmıştır. Özellikle, her sınıfta CIFAR-10'a göre daha az sayıda etiketli eğitim örneği bulunur, ancak denetimli eğitimden önce görüntü modellerini öğrenmek için çok geniş bir etiketsiz örnek kümesi sağlanır. Temel zorluk, yararlı bir öncelik oluşturmak için etiketlenmemiş verilerden (etiketli verilerden benzer ancak farklı bir dağılımdan gelen) faydalanmaktır. Ayrıca bu veri kümesinin daha yüksek çözünürlüğünün (96x96), onu daha ölçeklenebilir denetimsiz öğrenme yöntemleri geliştirmek için zorlu bir kıyaslama haline getirmesini beklenmektedir.

3.2.Diğer Veri Setleri

Bu alanda kullanılan diğer veri setleri şunlardır: Cityscapes, CelebA (CelebFaces Attributes Dataset), UCF-101 (UCF101 Human Actions dataset), Visual Question Answering (VOA), Kinetics (Kinetics Human Action Video Dataset). Literatüre sunulan bir makalede [49], evrişim sinir ağları gibi derin öğrenme modelleri, görüntü sınıflandırma ve nesne

algılama görevlerinde başarılı olmuştur. Bu yazıda derin öğrenme modelimizi kıyaslamak için Cifar-10 veri seti kullanılmıştır. Görüntü sınıflandırma görevinde iyi bir doğruluk elde etmek için Adam, RMS gibi çeşitli fonksiyon optimizasyon yöntemleri ve çeşitli düzenleme teknikleri kullanılmaktadır [48].

Sunulan bir diğer çalışmada [50], farklı içeriklerde görüntüleri yerel olarak sınıflandırmanın çeşitli kullanımları ve avantajları ele alınmıştır. Bu çalışmanın görüntü sınıflandırma literatürüne yaptığı katkı, bir insan uzman (human judge) tarafından doğrulanan ve etiketlenen 425.723 görüntüden oluşan bir veri setinin elde edilmesidir. Görüntü sınıflandırma için yaygın olarak kullanılan bir veritabanı olan ImageNet'ten rastgele seçilen sınıfların ve manuel ayarlanmış 193 sınıfın birlikte sunulduğu kombinasyonla oluşturulan 1.083 benzersiz sınıftan ele alınmıştır. Sınıflar önce çevrimiçi bir çeviri hizmeti kullanılarak çevrilmiş ve daha sonra tüm veri kümesinde %97,15'lik bir çeviri doğruluğu elde edebilmek için bir uzman tarafından doğrulamalar ve düzeltmeler yapılmıştır [49].

Bu alanda sunulan diğer bir makalede, bilgisayarla görü alanında bölütlemenin etkili bir çalışma alanı olduğuna değinilmiştir. Burada dijital bir görüntü, süper pikseller olarak adlandırılan birden çok piksel kümesine bölünür ve dijital görüntüdeki öğelerin bölümlere ayrılması imkanı sağlar. Bu iş, anlamsal kategori segmentasyonunda en son teknolojiyi temsil eder. Semantik bölütleme, kategori ile her bir görüntü pikselinin birleştirildiği yöntemi tanımlar. Semantik sınıflar, araç ve kişi gibi iyi tanımlanmış nesnelere ifade edebilir. Burada malzeme sınıfları çok önemlidir. Çünkü resimdeki sahnenin türü gibi bir görüntünün özelliklerini açıklar ve nesne sınıfları nesnelere temsil eder. Burada konum, fiziksel nitelikler, malzemenin türü ve sahnenin özellikleri gibi çeşitli faktörler mevcuttur. Bu makaledeki yöntem, evrişimli bir sinir ağından oluşur ve üstün

bir çerçeve piksel düzeyinde ayrıştırma sağlar. Bu araştırmada kullanılan veri seti, sıklıkla kullanılan COCO veri setidir. Eğitim veri setinde yaklaşık 118k ve doğrulama veri setinde yaklaşık 5k, test-dev'de 20k, test-challenge'de 20k görüntülerin bulunduğu toplam 164k görüntü içeren devasa bir veri seti üzerinde işlemler yapılır [50].

Ayrık Kosinüs S Dönüşümü (DCST) olarak bilinen ayrık kosinüs uzay-frekans dönüşümünü kullanan bir çalışmada [52], el yazısı rakamlarının tanınması için önerilen bir yöntemden bahsedilmektedir. Kamuya açık standart MNIST el yazısıyla yazılmış rakam veritabanı üzerinde deneyler yapılmıştır. DCST özellikleri ile birlikte Yapay Sinir Ağı (YSA) sınıflandırıcısı, elle yazılan rakamların sınıflandırma sorunlarını çözmek için kullanılmaktadır. Ayrık Kosinüs S-Dönüşüm katsayıları, MNIST el yazısıyla yazılmış izole basamaklı veritabanının standart görüntülerinden çıkarılmaktadır. Veritabanı, 60000 eğitim örneği ve 10000 test örneği olmak üzere toplam 70000'den oluşmaktadır. Hesaplama yükünü üstesinden gelmek için, MNIST veri setinin tüm görüntülerini 28×28'den 20×20 görüntü boyutuna normleştirilmiştir ve aranmayan sınır piksellerini dörde kadar ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca, geri yayımlı sinir ağı (BPNN) kullanılarak rakamların sınıflandırılması yapılmıştır. Bu çalışma, MNIST veri tabanı için tam olarak %98.8 başarı oranına ulaşmıştır [51].

Luo ve diğerleri tarafından sunulan bir çalışmada, üç boyutlu matematiksel modelin devamlı video akış verilerinin çok boyutlu bilgilerini iyi bir şekilde temsil edebildiğinden ve video sınıflandırma alanında önemli bir araç olduğundan bahsedilmektedir. Üç boyutlu evrişimli ağına dayalı video sınıflandırmanın doğruluğunu artırmak için bu çalışma, farklı zaman ölçeklerinin video özelliklerini kullanarak gelişmiş bir video akış sınıflandırma yöntemi önermektedir. İlk olarak, farklı zaman ölçeklerinin video kare dizileri, özellik çıkarımı için 3B

ağa verilir. İkinci olarak, farklı zaman ölçeklerinin özellikleri ağırlıklandırılır ve kaynaştırılır. Ardından, çoklu sıralı modellerin birleştirilmesiyle kaynaşmış üç boyutlu evrişimli sinir ağı modeli oluşturulur ve optik akış girişinin video sınıflandırma sonuçları üzerindeki etkisi zayıflatılır. Çalışmada, UCF-101 video veri setindeki 101 eylem davranışını sınıflandıran modelin bu veri setinde %90,6 doğruluk elde ettiği vurgulanmıştır. Burada sonuçların 3DConv_Ensemble model çıktısı ile karşılaştırılmasında doğruluğun yüzde 2,9 oranında artırıldığı belirtilmiştir [52].

3.3. Metotlar

Makine öğrenimi, bilgisayar sistemlerinin belirli bir düzene ve çıkarıma bağlı olarak hedefleri gerçekleştirmek için kullanacağı algoritmalar ve istatistiksel modelleri geliştirme bilimidir. Bilgisayar mimarisi büyük veriyi tanımlamak ve işlemek için makine öğrenimi algoritmaları kullanılmaktadır. Bu sayede, seçilen bir girdi veri kümesinden, sonuçlar daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Örnek vermek gerekirse, veri bilimciler bir tıbbi uygulamayı, milyonlarca tarama görüntüsünü ve bu görüntülere karşılık gelen tespitleri tutarak röntgen görüntülerinden kanseri teşhis edecek şekilde eğitebilmektedirler. Makine öğrenmesinin en önemli özelliklerinden bir tanesi, girdi ve çıktı verisi kombinasyonları arasındaki mevcut matematiksel ilişki ile bağlantılı olmasıdır. Makine öğrenimi modeli bu ilişki için net bir şey söyleyememekte ancak yeterli veri kümesi sağlanması halinde tahmin edilebilmektedir. Bu durum, her makine öğrenmesi algoritmasının değiştirilebilir matematik fonksiyonları üzerine kurulduğu anlamına gelmektedir.

3.3.1. Klasik Yaklaşımlar (Görüntü İşleme Temelli Yaklaşımlar)

image processing techniques: Image Enhancement, Image Restoration, Image Segmentation, Object Detection, Image Compression, Image Manipulation, Image Generation, Image-to-Image Translation [53].

3.3.2. Makine Öğrenmesi / Derin Öğrenme Yaklaşımları

Makine öğrenmesi algoritmaları 4 kategoriye ayrılmaktadır. Örnek vermek gerekirse, denetimli öğrenme yöntemleri, verilerin kapsamını ölçeklendirmek ve tahmin etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, denetimsiz algoritmalar ise verilere bir anlam yüklemek hedefiyle düzenleme ve filtreleme işlemlerini gerçekleştirir.

a. Denetimli makine öğrenmesi

Öğrenme durumunda, geliştiricinin bir kısım denetimini gerektiren algoritmalara, denetimli makine öğrenimi algoritmaları adı verilmektedir. Geliştirici eğitim verilerini etiketler, algoritmanın takip ettiği kuralları ve sınırları belirler. Bu sayede algoritmalar, gelecekteki durumları tahmin etmek için etiketli örnekleri kullanarak geçmişte öğrenilmiş olan durumları yeni verilere uygulayabilmektedirler. Denetimli makine öğreniminde hedef, bağımsız değişken üzerinden tanımlanan bir yöntemi kullanarak belirlenen değişkeni tahmin etmektir. Düzgün çalışan bir algoritma, giriş verisini ve beklenen sonuçları tanımlayarak, eşleşmeleri ve tahminleri doğru bulabilmektedir. Öğrenme algoritması aynı zamanda çıktısını doğru çıktı ile karşılaştırabilmektedir ve modeli buna göre güncellemek için hataları bulabilmektedir. Denetimli makine öğreniminde kullanılan en önemli yöntemlere değinecek olursak: Kümeleme, K-Means Kümeleme, KNN Kümeleme, Hiyerarşik Kümeleme, SVM (Support Vector Machine), Naive

Bayes, Boyutsal Küçültme, Temel Bileşen Analizi (PCA), Tekil Değer Ayrıştırması, Anomali Tespiti, Apriori Algoritması, İlişkilendirme Madenciliği yöntemleridir [54].

b. Denetimsiz makine öğrenmesi

Eğitmek için kullanılan bilgilerin sınıflandırılmadığı veya etiketlenmediği zamanlarda denetimsiz makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmaktadır. Denetimsiz öğrenme, sistemlerin etiketli olmayan verilerden gizli bir bilgiyi ortaya çıkarmak için bir yöntemi nasıl oluşturabileceğini araştırmaktadır. Sistem doğru bilgiyi bulamadığında verileri araştırmaya devam etmektedir ve etiketli olmayan verilerden gizli bilgiyi açıklamak için veri kümelerinden çıkarımlar yapmaktadır. Denetimsiz makine öğreniminde kullanılan en önemli yöntemlere değinecek olursak: Doğrusal Regresyon, Lojistik Regresyon, Sinir Ağları, Karar Ağaçları yöntemleridir [54].

c. Yarı denetimli öğrenme

Hem denetlenen hem de denetlenmeyen algoritmaların özelliklerini bir araya getiren algoritmalar, yarı denetimli makine öğrenmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Eğitim verilerinin hepsi etiketli olmayan ve algoritma başlatılırken tüm kurallar işleme alınmamış olabilmektedir. Yarı denetimli makine öğrenmesi algoritmaları, eğitim için hem etiketli hem de etiketli olmayan verileri kullanmaktadır. Belirgin olarak az sayıda etiketli veri ve büyük sayıda etiketli olmayan veri kullanan sistemler, öğrenme doğruluğunu büyük ölçüde artırabilmektedir [54].

d. Pekiştirmeli makine öğrenmesi

Pekiştirmeli makine öğrenmesi algoritmalarında, keşif adı verilen bir teknik kullanılmaktadır; makine aksiyonlar üretirek etrafı ile etkileşime girer, sonuçları gözlemler ve daha sonra bir sonraki aksiyonu gerçekleştirirken bu sonuçları dikkate

alır. Bu süreç, algoritma gelişip doğru yöntemi seçene kadar bu şekilde devam etmektedir. Bu yöntem, makinelerin ve yazılım araçlarının; performansı en üst seviyeye yükseltmek için belirli bir bağlamdaki ideal davranışı otomatik olarak tespit etmesini sağlar [54].

e. Derin öğrenme

Derin öğrenme yöntemi, makine öğrenmesinin bir alt kümesi olabileceğinden bahsedilmektedir. Derin öğrenme algoritmaları, makine öğrenmesi algoritmalarının gelişmiş ve karmaşık hali olarak kabul edilebilmektedir. Derin öğrenme, insan beyni ile modellenmiş bir makine öğrenme tekniğidir. Derin öğrenme algoritmaları, insan beyni ile benzer bir mantık yapısı ile verileri analiz etmektedir. Derin öğrenme yöntemi için, dışarıdan bir insan etkisi olmadan; algoritmalar ve büyük veri kümelerini kullanarak şablonlar meydana getirip ve çıktılar oluşturup cevaplar veren bir makine öğrenme tekniği denilebilmektedir. Bu metot cihazlara görüntü, metin veya ses şeklindeki girdileri filtrelemeyi, sınıflandırmayı ve tahmin yapmayı öğretmektedir. Bu yöntem; bir bilgisayarın aldığı bilgiler ile öğrenip uyum sağlayabileceğinin, bir makinenin kendi kendini düzeltebileceğinin kanıtıdır. Derin öğrenme yöntemi, makinelerin; insanlardan yardım almadan doğru kararlar vermesini sağlayan programlanabilir bir sinir ağını kullanmaktadır ve adını kullandığı bu derin sinir ağlarından almaktadır. Bir yapay zeka algoritması, doğru olmayan bir tahminde bulunduğu bir uzman devreye girmeli ve düzeltmek için işlemler yapmalıdır. Ancak derin öğrenme modelleri ile ilgili bahsi geçen algoritmalar, bir tahminin doğru olup olmadığını kendi sinir ağı ile tespit edebilme avantajlarını sağlamaktadır [55].

4. GENEL DEĞERLENDİRME

Anomali tespiti, herhangi bir veri kümesindeki anomali veya aykırı davranışların tespit edilmesine yönelik bir çalışma alanıdır. En temel anlamda ham verilerdeki hataları veya normal dışı örnekleri ortaya çıkarmak için anomali tespit yaklaşımları tercih edilebilmektedir. Görüntü işleme, bilgisayarlı görme, makina öğrenmesi ve derin öğrenme gibi teknolojilerin farklı alanlardaki anomali olayların tespitinde kullanılması oldukça popülerdir. Bu çalışmada görüntüler üzerindeki anomalilerin tespitine odaklanılmaktadır. Bu amaçla çeşitli anomali tespit yaklaşımları araştırılmıştır. Ayrıca, makine öğrenmesi/derin öğrenme yaklaşımlarına da yer verilmiştir. Bu amaçla, Supervised Learning için K-Nearest Neighbors, Decision Tree-Based Approaches, Linear Models, Linear Models, Deep Learning yaklaşımları ve Unsupervised Learning için Clustering and Ordination temelli yaklaşımları incelenmiştir. Bir de bu alanda hibrit yöntemler incelenmiştir. Bunlar CNN+GA, CNN+PSO ve CNN+ACO yöntemleridir. Bu çalışmada görüntülerde anomali tespiti ile ilgili sıklıkla kullanılan veri setlerine de yer verilmiştir. Literatürde kullanılabilecek birçok veri seti bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada doğrudan anomali tespiti ile ilgili olan ve fazlaca atıf alan veri setleri özellikleriyle birlikte sunulmaktadır. Bu veri setlerinden bazıları şunlardır: CIFAR-10, MNIST, CIFAR-100, ImageNet, COCO, Fashion-MNIST, STL-10, AG News, ShanghaiTech, MVTecAD, UCF-Crime, UCSD Ped2, Numenta Anomaly Benchmark, Lost and Found, MURA, Fishyscapes, CASIA-FASD, ADFI. Son olarak bu çalışmada, anomali tespitinin kullanıldığı siber saldırı tespiti, dolandırıcılık tespiti, tıbbi verilerdeki anomali tespiti, endüstriyel hasar tespiti, görüntü üzerinde metinsel anomali tespiti ve sensör ağları gibi bazı uygulama alanlarından örnekleriyle bahsedilmiştir. Bu çalışma görüntülerde anomali tespiti için genel bir perspektif sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Russell, S., Dewey, D., Tegmark, M.: Research priorities for robust and beneficial artificial intelligence. *Ai Magaz.* 36(4), 105–114 (2015)
2. V. M. Tellis and D. J. D'Souza, "Detecting Anomalies in Data Stream Using Efficient Techniques: A Review," 2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT), 2018, pp. 296-298, doi: 10.1109/ICCPCT.2018.8574310.
3. Nguyen, T.H., Grishman, R.: Event detection and domain adaptation with convolutional neural networks. In: Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing (Volume 2: Short Papers), pp. 365–371 (2015)
4. C. Piciarelli, P. Mishra, G.L. Foresti. Image anomaly detection with capsule networks and imbalanced datasets. 20th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP), Trento, Italy, September 9-13, 2019
5. Pang, Guansong & Ding, Choubo & Shen, Chunhua & Hengel, Anton. (2021). Explainable Deep Few-shot Anomaly Detection with Deviation Networks.
6. Dort, K., Bilk, J., Käs, S. et al. Comparison of supervised and unsupervised anomaly detection in Belle II pixel detector data. *Eur. Phys. J. C* 82, 587 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10548-x>

7. Minhas, Manpreet Singh, and John Zelek. "Anomaly detection in images." arXiv preprint arXiv:1905.13147 (2019).
8. Tuluptceva, N., Bakker, B., Fedulova, I., Konushin, A. (2020). Perceptual Image Anomaly Detection. In: Palaiahnakote, S., Sanniti di Baja, G., Wang, L., Yan, W. (eds) Pattern Recognition. ACPR 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 12046. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41404-7_12
9. Q. Wan, Y. Cao, L. Gao, W. Shen and X. Li, "Position Encoding Enhanced Feature Mapping for Image Anomaly Detection," 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2022, pp. 876-881, doi: 10.1109/CASE49997.2022.9926547.
10. N. Shvetsova, B. Bakker, I. Fedulova, H. Schulz and D. V. Dylov, "Anomaly Detection in Medical Imaging With Deep Perceptual Autoencoders," in IEEE Access, vol. 9, pp. 118571-118583, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107163.
11. Xihong Zhou, Gang Liu, Xiangbo Zhang, Bavirisetti Durga Prasad, Xinjie Gu, Yonghua Li, Re2FAD: A differential image registration and robust image fusion method framework for power thermal anomaly detection.
12. National Engineering Research Center for Agro-Ecological Big Data Analysis & Application, Anhui University, 111 Jiulong Road, Hefei 230601, China.
13. Fabiana Federica Ferro, Mirco Rampazzo, Alessandro Beghi, Elastic Shape Analysis for Anomaly Detection in Fabric Images, IFAC-PapersOnLine.

14. Walter H.L. Pinaya, Petru-Daniel Tudosiu, Robert Gray, Geraint Rees, Parashkev Nachev, Sebastien Ourselin, M. Jorge Cardoso, Unsupervised brain imaging 3D anomaly detection and segmentation with transformers.
15. Posilović L, Medak D, Milković F, Subašić M, Budimir M, Lončarić S. Deep learning-based anomaly detection from ultrasonic images. *Ultrasonics*. doi: 10.1016/j.ultras.2022.106737. PMID: 35427859.
16. Lintao Mou, Lingling Liang, Zhanheng Gao, Xin Wang, A multi-scale anomaly detection framework for retinal OCT images based on the Bayesian neural network, *Biomedical Signal Processing and Control*.
17. Minimally parametrized segmentation framework with dual metaheuristic optimization algorithms and FCM for detection of anomalies in MR brain images, *Biomedical Signal Processing and Control*,
18. Samir Jain, Ayan Seal, Aparajita Ojha, Anis Yazidi, Jan Bures, Ilja Tacheci, Ondrej Krejcar, A deep CNN model for anomaly detection and localization in wireless capsule endoscopy images, *Computers in Biology and Medicine*.
19. Costa, Kelton & Papa, João & Passos Júnior, Leandro & Colombo, Danilo & Del Ser, Javier & Muhammad, Khan & Albuquerque, Victor. (2020). A Critical Literature Survey and Prospects on Tampering and Anomaly Detection in Image Data. *Applied Soft Computing*. 10.1016/j.asoc.2020.106727.
20. Örnek, Ö., Vatan, S., SARIOĞLU, S., & YAZICI, A. (2018). Trafik Ağlarında Anomali Tespiti. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(3), 132-138.

21. Berg, A., Ahlberg, J., & Felsberg, M. (2019). Unsupervised learning of anomaly detection from contaminated image data using simultaneous encoder training. arXiv preprint arXiv:1905.11034.
22. Chalapathy, R., & Chawla, S. (2019). Deep learning for anomaly detection: A survey. arXiv preprint arXiv:1901.03407.
23. medium.com/analytics-vidhya/algorithm-selection-for-anomaly-detection-ef193fd0d6d1, Erişim: 04.11.2023.
24. Wilmet, V., Verma, S., Redl, T., Sandaker, H., & Li, Z. (2021). A Comparison of Supervised and Unsupervised Deep Learning Methods for Anomaly Detection in Images. arXiv preprint arXiv:2107.09204.
25. Bergmann, P., Fauser, M., Sattlegger, D., & Steger, C. (2019). MVTec AD--A comprehensive real-world dataset for unsupervised anomaly detection. In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (pp. 9592-9600).
26. Minhas, M. S., & Zelek, J. (2019). Anomaly detection in images. arXiv preprint arXiv:1905.13147.
27. Vareldzhan, G., Yurkov, K., & Ushenin, K. (2021, May). Anomaly detection in image datasets using convolutional neural networks, center loss, and mahalanobis distance. In 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) (pp. 0387-0390). IEEE.
28. Tuluptceva, N., Bakker, B., Fedulova, I., & Konushin, A. (2019, November). Perceptual image anomaly detection. In Asian Conference on Pattern Recognition (pp. 164-178). Cham: Springer International Publishing.

29. Wan, Q., Cao, Y., Gao, L., Shen, W., & Li, X. (2022, August). Position encoding enhanced feature mapping for image anomaly detection. In 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (pp. 876-881). IEEE.
30. Shvetsova, N., Bakker, B., Fedulova, I., Schulz, H., & Dylov, D. V. (2021). Anomaly detection in medical imaging with deep perceptual autoencoders. *IEEE Access*, 9, 118571-118583.
31. Collin, A. S., & De Vleeschouwer, C. (2021, January). Improved anomaly detection by training an autoencoder with skip connections on images corrupted with stain-shaped noise. In 2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR) (pp. 7915-7922). IEEE.
32. Piciarelli, C., Mishra, P., & Foresti, G. L. (2019). Image anomaly detection with capsule networks and imbalanced datasets. In *Image Analysis and Processing—ICIAP 2019: 20th International Conference, Trento, Italy, September 9–13, 2019, Proceedings, Part I 20* (pp. 257-267). Springer International Publishing.
33. Sarafijanovic-Djukic, N., & Davis, J. (2019). Fast distance-based anomaly detection in images using an inception-like autoencoder. In *Discovery Science: 22nd International Conference, DS 2019, Split, Croatia, October 28–30, 2019, Proceedings 22* (pp. 493-508). Springer International Publishing.
34. Yu, J., Zheng, Y., Wang, X., Li, W., Wu, Y., Zhao, R., & Wu, L. (2021). Fastflow: Unsupervised anomaly detection and localization via 2d normalizing flows. arXiv preprint arXiv:2111.07677.

35. Beggel, L., Pfeiffer, M., & Bischl, B. (2020). Robust anomaly detection in images using adversarial autoencoders. In *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: European Conference, ECML PKDD 2019, Würzburg, Germany, September 16–20, 2019, Proceedings, Part I* (pp. 206-222). Springer International Publishing.
36. Zhou, X., Liu, G., Zhang, X., Prasad, B. D., Gu, X., & Li, Y. (2022). Re2FAD: A differential image registration and robust image fusion method framework for power thermal anomaly detection. *Optik*, 259, 168817.
37. Posilović, L., Medak, D., Milković, F., Subašić, M., Budimir, M., & Lončarić, S. (2022). Deep learning-based anomaly detection from ultrasonic images. *Ultrasonics*, 124, 106737.
38. Liu, Y., Zhou, S., Wu, H., Han, W., Li, C., & Chen, H. (2022). Joint optimization of autoencoder and Self-Supervised Classifier: Anomaly detection of strawberries using hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107007.
39. Mou, L., Liang, L., Gao, Z., & Wang, X. (2022). A multi-scale anomaly detection framework for retinal OCT images based on the Bayesian neural network. *Biomedical Signal Processing and Control*, 75, 103619.
40. Natarajan, S., Govindaraj, V., Zhang, Y., Murugan, P. R., Balasubramanian, K., Kandasamy, K., & Ejaz, K. (2022). Minimally parametrized segmentation framework with dual metaheuristic optimisation algorithms and FCM for detection of anomalies in MR brain images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 78, 103866.

41. Ferro, F. F., Rampazzo, M., & Beghi, A. (2021). Elastic shape analysis for anomaly detection in fabric images. *IFAC-PapersOnLine*, 54(7), 67-72.
42. Głomb, P., & Romaszewski, M. (2020). Anomaly detection in hyperspectral remote sensing images. In *Hyperspectral Remote Sensing* (pp. 45-66). Elsevier.
43. Sarikan, S. S., & Ozbayoglu, A. M. (2018). Anomaly detection in vehicle traffic with image processing and machine learning. *Procedia Computer Science*, 140, 64-69.
44. Wilmet, V., Verma, S., Redl, T., Sandaker, H., & Li, Z. (2021). A Comparison of Supervised and Unsupervised Deep Learning Methods for Anomaly Detection in Images. *arXiv preprint arXiv:2107.09204*.
45. Sun, R., Zhang, S., Yin, C., Wang, J., & Min, S. (2019). Strategies for data stream mining method applied in anomaly detection. *Cluster Computing*, 22, 399-408.
46. <https://paperswithcode.com/datasets?task=anomaly-detection>, Erişim tarihi: 12.10.2023.
47. <https://www.mvtec.com/company/research/datasets/mvtec-ad>, Erişim tarihi: 05.10.2023.
48. R. Doon, T. Kumar Rawat and S. Gautam, "Cifar-10 Classification using Deep Convolutional Neural Network," 2018 IEEE Punecon, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PUNECON.2018.8745428.
49. R. G, S. W, A. M. Bharadwaj and C. H N, "Kannada ImageNet: A Dataset for Image Classification in Kannada," 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2021, pp. 1-4.

50. D. Puri, "COCO Dataset Stuff Segmentation Challenge," 2019 5th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA), pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCUBEA47591.2019.9129255.
51. R. K. Mohapatra, B. Majhi and S. K. Jena, "Classification performance analysis of MNIST Dataset utilizing a Multi-resolution Technique," 2015 International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS), 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCS.2015.7374136.
52. X. Luo, O. Ye and B. Zhou, "A Modified Video Stream Classification Method Which Fuses Three-Dimensional Convolutional Neural Network," 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI), 2019, pp. 105-108, doi: 10.1109/MLBDBI48998.2019.00026.
53. Image Processing: Techniques, Types, & Applications, 2023, Weblink: <https://www.v7labs.com/blog/image-processing-guide>, Erişim tarihi: 28.11.2023.
54. Jovel, J., & Greiner, R. An introduction to machine learning approaches for biomedical research. *Frontiers in Medicine*, 8, 771607, 2021.
55. www.oracle.com/tr/artificial-intelligence/machine-learning/what-is-deep-learning, Erişim tarihi: 10.10.2023.

Fe-BAZLI SÜPERİLETKEN SİSTEMLER VE TEKNOLOJİK OLARAK UYGULANABİLİRLİKLERİ¹

Kübra YAKINCI²

1. GİRİŞ

Kritik sıcaklık denilen belirli bir sıcaklık değerinin altında aniden direncin sıfıra düştüğü faz olarak tanımlanan süperiletkenlik olgusunun yüksek manyetik alanlarla ortadan kalktığı düşüncesiyle manyetizma ve süperiletkenlik fizikte iki farklı kavram olarak değerlendirilmektedir (Onar, 2016). Ancak, manyetik süperiletkenlerin de var olabileceği fikrinin ileri sürülmesi 1970' li yıllara dayanmaktadır. İlk olarak, 1970' lerin ortalarında RMo_6X_8 ($X=S, Se$) ve RRh_4B_4 üçlü nadir toprak bileşikleri keşfedilmiştir (Woolf vd., 1979). Bu bileşikler manyetik R iyonlarının düzgün bir alt örgüsünü içermelerine rağmen yine de mK mertebesinde süperiletken özellik göstermeleri dikkat çekmiştir. Büyük yoğunluklarında R iyonları ile dahi süperiletkenlik sergilemeleri bu malzemelerin kristal yapılarının gereği olduğu ve aynı zamanda süperiletkenliğin R iyonlarıyla zayıf bir şekilde etkileşen geçiş metallere $4d$ elektronları ile ilgili olduğu da öne sürülmüştür. Benzer şekilde, 1997 yılında Rehmann ve arkadaşları $AuIn_2$ bileşiğinde $25\mu K \leq T \leq 207mK$ ve $0.01mT \leq B \leq 2.00mT$ manyetik alan altında alınganlık ölçümleriyle manyetizma ve süperiletkenliğin birlikte bulunabileceğini göstermiştir (Rehmann vd., 1997). Öne çıkan çalışmalardan bir diğesinde 2001 yılında K. Shimizu ve

¹ "FeSe-TABANLI YENİ NESİL SÜPERİLETKEN ALAŞIMLARIN TEK KRİSTAL FORMDA ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI" Başlıklı Doktora Tezinden Türetilmiştir."

² Dr. Öğr. Üyesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Hatay, İskenderun/Türkiye. kubra.yakinci@iste.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1257-1532

arkadaşlarının lityum ve demirin 15-30 Gpa basınç altında ~2K civarında süperiletken duruma geçtiğini öz direnç ölçümleriyle doğrulamalarıdır (Shimizu vd.,2001). Bu konuda en büyük araştırma Ru-tabanlı sistemlerden sonra Fe-tabanlı süperiletkenler üzerinde yapılmıştır.

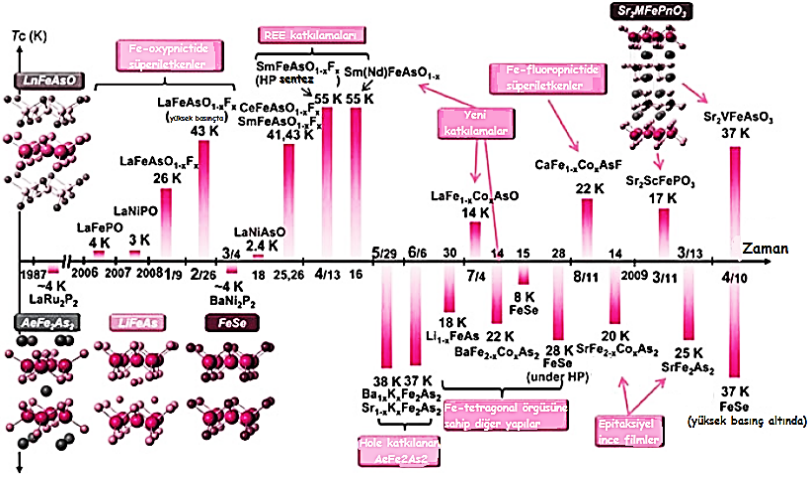
Manyetik momente sahip Fe elementini içeren bir sistemde, elektron spinlerinin statik düzeni ile elektron çiftlerinin (Cooper çiftleri) dinamik oluşumu arasındaki rekabet nedeniyle süperiletkenliğin ortaya çıkmasına imkânsız gözüyle bakılıyordu. Bu nedenle, 2008 yılında yüksek kritik sıcaklıkta (T_c) Fe-bazlı bir süperiletkenin keşfi, yoğun madde camiasında şaşkınlıkla karşılanmış ve bu konudaki kapsamlı çalışmaları alevlendirmiştir (Hosono vd., 2018). Fe-bazlı süperiletken sistemler bu tarihten itibaren geliştirilerek 1986'da keşfedilen yüksek T_c ' li cuprate sistemlerin yanında yeni bir yüksek T_c ' li süperiletken sınıfı haline gelmiştir. Özellikle son on yılda Fe-bazlı süperiletkenler üzerine teorik ve deneysel olarak araştırmalar hızla yol katetmiş ve on binlerce fazla makalenin yayınlanmasıyla Fe-bazlı sistemlerin fazları, mekanizmaları, özellikleri ve uygulamaları hakkında çok büyük miktarda bilginin birikmesine neden olmuştur.

2. Fe-BAZLI SÜPERİLETKEN SİSTEMLER

Fe-bazlı süperiletkenler konusundaki ilk çalışma 2006 yılının başlarında H. Hosono ve grubu LaFeAsO bileşiği ile aynı kristalografik yapıya sahip olan LaOFeP bileşiğinin ~4 K' de süperiletken özellik göstermesiyle başlamıştır. Daha sonra F katkılanması yapılarak LaFePO_{0.94}F_{0.06} sisteminde süperiletkenlik geçiş sıcaklığının ~7 K olduğu bulunmuştur (Kamihara vd., 2006). Ayrıca, 2007 yılında LaNiPO sisteminin ~3 K' de süperiletkenlik gösterdiği tespit edilmiştir (Watanabe vd., 2007). Ancak, bu bileşikler çok düşük geçiş sıcaklıklarına sahip oldukları için LaFeAsO_{1-x}F_x ve SmFeAsO_{1-x}F_x sistemlerinin keşfine kadar araştırmacılar tarafından büyük bir ilgiyle karşılanmamıştır. Ta ki 2008 yılında H. Hosono' nun LaFeAsO_{0.9}F_{0.1} sisteminin 26 K' de süperiletkenlik geçişini bulmasından sonra günümüze kadar bu malzemeler üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaktadır. Bu gelişmeden

hemen sonra Takashi' nin grubu, 4 GPa basınç altında $\text{LaFeAsO}_{0.9}\text{F}_{0.1}$ sisteminin süperiletkenlik geçiş sıcaklığının ~ 43 K olduğunu bulmuştur (Takahashi vd., 2008). Bu T_c değeri, o zamana kadar bulunan HTS sistemlerinin dışındaki en yüksek kritik sıcaklık değeri olmuştur. Şekil 1' de Fe-bazlı süperiletkenlerin keşfedildikleri tarih itibariyle günümüze kadar olan süreçteki tarihsel gelişimleri görülmektedir.

Şekil 1. Fe-Bazlı Süperiletkenlerin Tarihsel Gelişimi

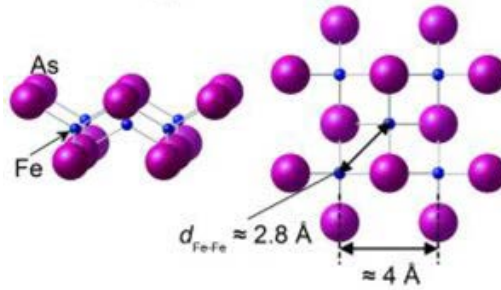


Kaynak: (Johnson Vd., 2015).

Fe-bazlı süperiletkenlerin keşifleri yüksek basınç altında $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ in 43 K' de, (Chen vd., 2008), $\text{CeFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ in 41 K' de (Chen vd., 2008), $\text{PrFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ in 52 K' de (Ren vd., 2008) ve $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ in 55 K' de (Ren vd., 2008; Ren vd., 2008; Takeshita vd., 2008) süperiletkenlik sergilemeleri ile hız kesmeden devam etmiştir. Tüm süperiletken sistemlerde olduğu gibi Fe-bazlı süperiletkenlerde de yeni keşiflerle birlikte kritik sıcaklığı artırmak araştırmacıların öncelikli hedefleri olmuştur. Bu bağlamda sisteme elektron katkılanmasının F ile O' nin yer değiştirmesi yerine O boşluklarının oluşması ile mümkün olabileceği görülmüştür. Bu bulgunun ardından, Kamihara ve arkadaşları sisteme hole katkılanması amacıyla La ile Ca' u kısmi olarak yer değiştirmiş ancak önemli bir etki olmadığını görmüştür (Kamihara vd., 2008). Daha sonra Wen ve arkadaşları $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeAsO}$ de 25 K' de süperiletkenliği bulmuştur (Wen vd.,

2008). A. S. Sefat tarafından yapılan çalışmada Fe^{2+} ($3d^6$) ile Co^{2+} ($3d^7$) yer değiştirilerek sisteme elektron katılmıştır ve bunun sonucunda T_c ' in bu yer değiştirmeye oldukça dirençli olduğu ortaya çıkarılmıştır (Sefat vd., 2008). 2009 yılında ise F.C. Hsu PbO-tipi yapıya sahip olan α -FeSe' un 8 K' de süperiletken faza geçtiğini ve aynı zamanda yüksek basınç altında bu malzemenin geçiş sıcaklığının ~ 37 K' e kadar artabileceği bulunmuştur (Hsu vd., 2008; Mizuguchi vd., 2008). Fe-bazlı süperiletken sistemlerde elektron katılmasının yüksek simetrlili tetragonal fazın antiferromanyetik spin düzenini dengeleyen düşük simetrlili faza kristal dönüşümünü baskılayarak süperiletkenliği ortaya çıkardığı bulunmuştur (Shimizu vd., 2001). Yine yapılan kapsamlı çalışmalar Fe-bazlı süperiletkenlerin farklı özellikler sergileyen fazları olduğunu kanıtlamıştır. Bu fazlar, 1111-fazı olarak bilinen ZrCuSiAs-tipi LnFeAsO (Ln; nadir toprak elementleri), 122-fazı olarak bilinen ThCr₂Si₂-tipi AeFe₂As₂ (Ae; toprak alkali elementler), 111-fazı olarak bilinen Fe₂As-tipi AFeAs (A; Li veya Na) ve 11-fazı olarak bilinen anti-PbO-tipi Fe(Se,Te) şeklinde sıralanmaktadır ve genel kristal yapıları şekil 2' de verilmiştir.

Şekil 2. Fe-Bazlı Süperiletken Sistemlerin Genel Kristal Yapısı

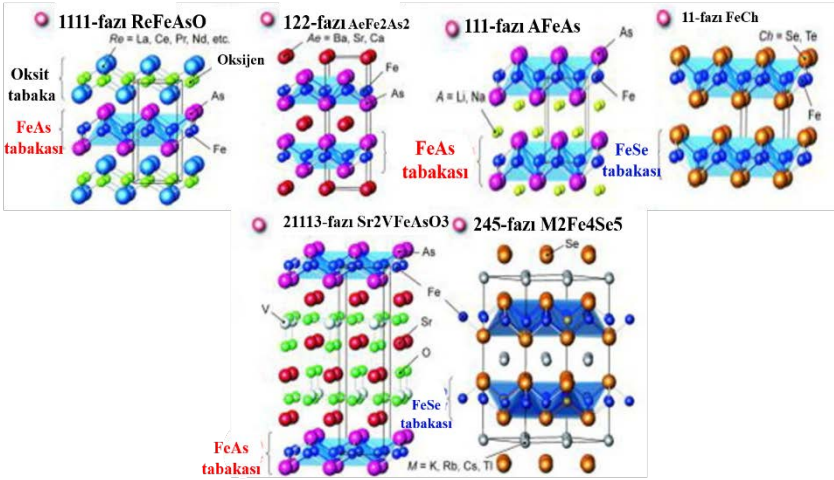


Kaynak: (Hosono Vd., 2018).

1111, 122 ve 111-fazları Fe-pniktonjen olarak adlandırılan FeAs tabakalarını içeren sistemlerdir. Fe-pniktojen süperiletkenlerde, alkali, toprak alkali veya nadir toprak elementleri ve oksijen-flor elementlerini içeren bloklanmış tabakalar ile Fe-As iletim tabakaları birbirleri ardına dizilir. 11-fazı ise Fe-kalkojen sistemi olarak adlandırılır. Bilinen en iyi kalkojen elementler Se, Te ve S elementleridir (Deguchi vd.,

2012). FeAs tabakalarını içeren Fe-pniktojen sistemlerin aksine ilk keşfedilen Fe-kalkojen olan FeSe sistemi sadece Fe₂Se₂ tabakalarından oluşur. Bloklanmış tabakaların olmayışından dolayı F-kalkojenit sistemler, Fe-tabanlı en basit kristal yapıya sahip olan sistemlerdir. 8K' de süperiletken özellik göstermekle birlikte yüksek basınç altında geçiş sıcaklığı ~37K' e kadar yükselebilmektedir. Bununla birlikte, FeSe ile benzer kristal yapıya sahip olan FeTe ~70 K' de antiferromanyetik bir dönüşüme uğramakta ve süperiletken özellik sergilememektedir. Ancak, Te' ün S veya Se ile kısmi olarak yer değiştirmesi sonucunda da antiferromanyetik düzen baskılanarak süperiletkenlik meydana gelmektedir. Fe-kalkojen sistemlerdeki bu davranış, fiziksel özelliklerin S, Se ve Te elementlerinin kovalent yer değişimleri üzerinde etkili bir biçimde değişmesinden dolayıdır.

Şekil 3. Fe-Bazlı Süperiletkenlere Ait Fazlar



Kaynak: (Hosono Vd., 2018).

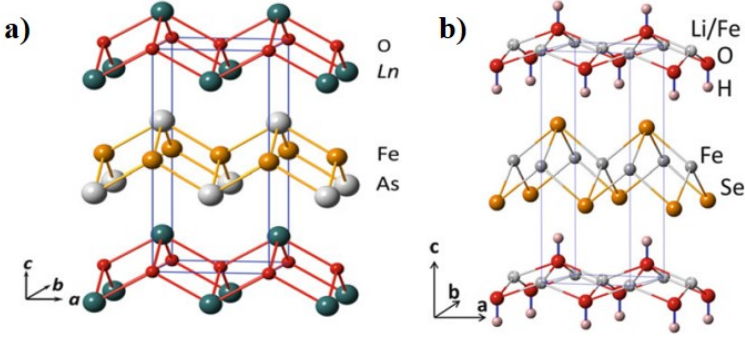
Güncel çalışmalarda FeSe tabakaları arasında alkali metal veya moleküllerin eklenmesiyle ~40 K' lere kadar süperiletkenlik geçişinin gözlemlendiği sistemler de mevcuttur. Bunlar, AFeSe genel formülünde olup 122-fazına benzer bir yapı veya 245 fazı denilen ve farklı süperiletkenlik özelliklerine sahip yeni bir faz sergilemektedirler (Johnson vd., 2015). Fe-kalkojen sistemler, toksik bir element olan As içermediklerinden, Fe-tabanlı

sistemlerin süperiletkenlik mekanizmalarının aydınlatılmasında kullanılabilecek anahtar malzemeler olarak düşünülmektedir. Şekil 3’te Fe-bazlı süperiletkenlere ait tüm fazlar sunulmaktadır.

1.1. Fe-Bazlı Süperiletken Sistemlerin 1111-Fazı

LnFeAsO (Ln;nadir toprak metal atomları;Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Th, Tb...) genel formülüne sahip sistemler ZrCuSiAs-tipi “1111-fazı” olarak adlandırılmaktadırlar. Fe-bazlı süperiletken sistemler içerisinde en yüksek T_c ’ye sahip olan fazdır. Şekil 4a’da kristal yapısı verilen LnFeAsO bileşikler $P4/nmm$ uzay grubunda olup tetragonal yapıya sahiptirler.

Şekil 4. a) LnFeAsO (Ln; nadir toprak elementleri) sistemine ait kristal yapısı (Johnson vd., 2015) ve b) $\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{OHFeSe}$ sistemine ait kristal yapısı (Lu vd., 2015).



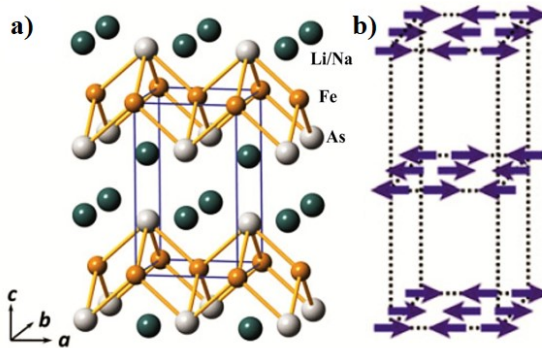
1111-fazında kristal yapısı florit tipi LnO tabakaları ile FeAs tabakalarının dizilmesiyle meydana gelmektedir. Bununla birlikte güncel çalışmalar arasında 1111-faz özelliklerine sahip $T_c \sim 43\text{K}$ ’de süperiletkenlik geçişi sergileyen ve aynı zamanda Fe-kalkojen bazlı bir sistem olan $\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{OHFeSe}$ keşfedilmiştir [143]. Şekil 4b’de kristal yapısı verilen $\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{OHFeSe}$ sisteminde anti-PbO-tipi FeSe ve $\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{OH}$ tabakalarının ardı ardına dizilmiş olup tetragonal yapıdadır. $\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{OH}$ tabakalarında ise Li ve Fe rastgele bir şekilde aynı konumu işgal ederler. $(\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{O}$ yapısı LnFeAsO sistemindeki PbO-tipi LnO yapısından farklı olan anti-PbO yapısına sahiptir.

1.2. Fe-Bazlı Süperiletken Sistemlerin 111-Fazı

Fe-bazlı süperiletken sistemlerin bir diğer sınıfı 111-fazı olup literatürde en az çalışmaların yapıldığı faz olarak karşımıza çıkmaktadır. Fe_2X_2 tabakaları arasına blok yapıların veya atomların eklenmesiyle oluşmuştur. $MFeAs$ ($M=Li$ ve Na) anti-PbFCl-tipi olarak ifade edilir. 111-fazının bir üyesi olan $LiFeAs$ sistemi 2008 yılında keşfedilmiş olup ~ 18 K' de süperiletkenlik geçişi göstermektedir (Wang vd., 2008). 2009 yılında ise aynı kristal yapıya sahip olan $NaFeAs$ ' in ~ 10 K' de filamentli süperiletkenlik sergilediği ortaya çıkarılmıştır (Parker vd., 2009). Şekil 5a' da kristal yapısı ve şekil 5b' de manyetik düzenlenişi verilmektedir. Kristal yapıları $P4/nmm$ uzay grubunda olup, Fe ve As, As kare tabanlı piramit koordinasyonundaki tabakalar arasına yerleşen çift Li/Na ile anti-PbO-tipi tabakalar ile düzenlenir.

Özellikle $NaFeAs$ sistemi soğutulduğunda sırasıyla 54 K, 39 K ve 10 K' de yapısal, SDW ve süperiletkenlik geçişleri sergilerler (Sefat, 2013). Yapısal dönüşüm süresince kristal simetrisi tetragondan ortorombiğe dönüşür. SDW durumuna girildiğinde ise b boyunca spinler ferromanyetik olarak yönelirken, a ve c boyunca spin yönelimleri antiferromanyetik olarak düzenlenir.

Şekil 5. a) $AFeAs$ ($A=Li$ ve Na) sistemine ait kristal yapı (Johnson vd., 2015), b) $NaFeAs$ için manyetik düzenleniş



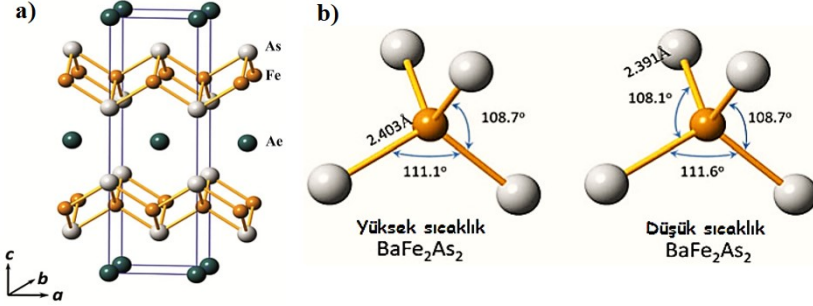
Kaynak: (Parker vd., 2009).

1.3.Fe-Bazlı Süperiletken Sistemlerin 122-Fazı

$AeFe_2As_2$ ($Ae=Ca, Sr, Ba, Eu, K$) genel formülü ile bilinen $ThCr_2Si_2$ -tipi Fe-bazlı süperiletkenler 122-fazının birer üyesi olup çeşitli formlarda kolayca üretilebilmelerinden dolayı en yaygın şekilde çalışılan sistemlerdir. Şekil 6a' da kristal yapısı verilen $AeFe_2As_2$ sisteminde ortak kenara sahip $FeAs_4$ tetrahedronları ard arda dizilerek tek bir Ae atom düzlemi ile ayrılmaktadır. $I4/mmm$ uzay grubunda olup hacim merkezli tetragonal yapıdadırlar. Fe-bazlı süperiletkenlerin bu fazı sıcaklığın azalmasıyla yüksek sıcaklık tetragonal ($I4/mmm$) fazdan düşük sıcaklık ortorombik ($Fmmm$) faza yapısal bir dönüşüm sergiler. Bu yapısal dönüşüm şekil 6b' de verildiği gibi $FeAs_4$ tetrahedronun da yapısal bir distorsiyona uğramasına neden olur ve 108.7° civarındaki As-Fe-As bağ açıları eşit olmayıp 108.1° ve 108.7° şeklinde iki değer gözlenir (Rotter vd., 2008). 122-fazı hem yapısal hem de 1111-fazında olduğu gibi uzun menzilli düzenlenmiş SDW durumundan manyetik bir geçiş sergiler. Ancak, 1111-fazından farklı olarak 122-fazında yapısal ve manyetik dönüşümler aynı sıcaklıkta meydana gelir (Rotter vd., 2008; Huang vd., 2008; Kofu vd., 2009).

122-fazının Fe-kalkojen bazlı karşılığı $A_xFe_{2-y}Se_x$ ($A=K, Rb, Cs$ ve Tl/K) sistemleri olup ~ 30 K' de süperiletkenlik geçişi gösterirler (Guo vd., 2010; Krzton-Maziopa vd., 2011; Wang vd., 2011; Fang vd., 2011). Bu süperiletken sistemlerde yük dengesinden dolayı büyük miktarda Fe boşlukları ve A elementinin sitokiyometrik olmayan dağılımları mevcuttur (Zavalji vd., 2011). Düşük sıcaklıklara inildikçe Fe-boşluklarının oluşmasından dolayı sistemde 500 K' in üzerinde yapısal bir dönüşüm meydana gelir (Zavalji vd., 2011). Fe-boşluklarının olmadığı bölgelerin 122-fazında ve süperiletken olduğu, Fe-boşluklarının bulunduğu bölgelerin ise 245 fazına ait olduğu düşünülmektedir (Wang vd., 2011).

Şekil 6. a) $AeFe_2As_2$ ($Ae=Ca, Sr, Ba, Eu, K$) sistemine ait kristal yapı (Johnson vd., 2015) ve b) Yüksek ve düşük sıcaklıklarda $BaFe_2As_2$ sisteminin As-Fe-As bağ açıları

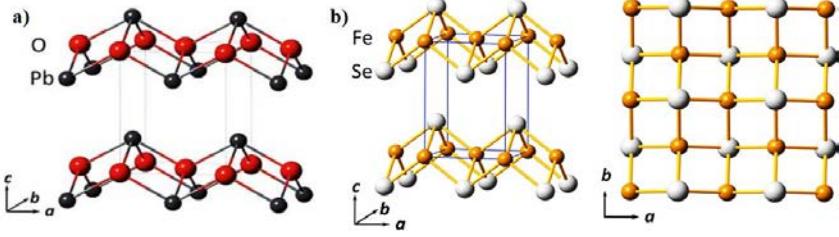


Kaynak: (Rotter vd., 2008).

1.4. Fe-Bazlı Süperiletken Sistemlerin 11-Fazı

Fe-bazlı süperiletkenler arasında en basit kristal yapıya sahip olan FeSe 11-fazının bir üyesi olup anti-PbO-tipi tabakaların birbirini ardına dizilmesiyle oluşmuştur. Fe-bazlı sistemlerin tüm fazlarında PbO-tipi Fe_2Se_2 veya Fe_2As_2 tabakaları mevcuttur ancak FeSe sisteminde anyon ve katyonlar şekil 7a' da verilen Pb ve O atomlarının yerlerini zıt olarak işgal ederler. Bu yüzden de anti-PbO-tipi olarak ifade edilirler. Şekil 7b' de ise FeSe sistemine ait kristal yapı görülmektedir. $P4/nmm$ uzay grubundaki FeSe sistemi, tek bir Fe_2Se_2 tabakası iki adet Se tabakası tarafından sıkıştırılan kare Fe_2 ' den oluşur. Dolayısıyla her bir Fe atomu dört adet Se atomu ile birleşerek $FeSe_4$ tetrahedronunu oluştururlar. Bununla birlikte, FeSe sistemi kendi içerisinde α -FeSe denilen NiAs-tipi yapı ve tetragonal β -FeSe denilen anti-PbO-tipi yapı olmak üzere iki farklı kristal yapı sergiler. α -FeSe daha kararlı bir kristal yapıya sahip olmasına rağmen süperiletken değildir. Süperiletkenlik sadece β -FeSe' da gözlenir.

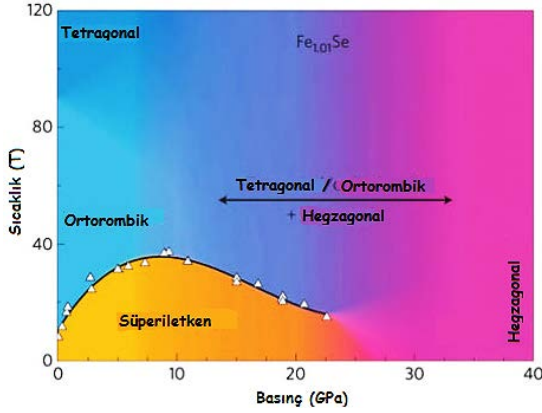
Şekil 7. a) PbO'nun kristal yapısı b) FeSe süperiletkenine ait kristal yapısı



Kaynak: (Johnson vd., 2015).

FeSe sistemine has bir başka özellik ise Fe- bazlı süperiletken sistemler arasında kritik sıcaklığı basınca bağlı olarak en fazla değişim gösteren sistem olmasıdır. FeSe' un ve basınç-sıcaklık faz diyagramı şekil 8' de verilmektedir ve 8 GPa basınç altında $T_c \sim 37$ K' e kadar ulaşmakta olup T_c ' deki bu artış Fe_2Se_2 düzlemleri arasındaki boşluğun çöküşünden dolayı örgü hacmindeki azalmanın bir sonucudur.

Şekil 8. FeSe' un basınç-sıcaklık faz diyagramı

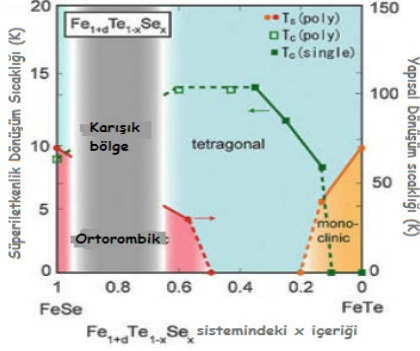


Kaynak: (Medvedev vd., 2009).

11-fazının bir başka üyesi yine kalkojen bir element içeren FeTe(Se) sistemidir. FeTe bileşiği FeSe ile benzer kristal yapıya sahip olmasına rağmen süperiletken özellik sergilememektedir. FeTe sistemi 70 K' de örgü distorsiyonu ile ilişkili bir antiferromanyetik düzen sergiler ve aynı zamanda FeTe tabakaları arasındaki bölgede %7-25 arasında bir oranda Fe fazlalığı ile bulunmaktadır. Te' ün Se ile kısmi olarak yer

değiştirmesi sonucu düşük sıcaklık yapısal ve manyetik faz geçişi baskılanarak Fe fazlalığı azalır ve böylece, süperiletkenlik ortaya çıkar. $Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_x$ sistemine ait faz diyagramı şekil 9’ da verilmektedir. $Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_x$ sisteminde en yüksek T_c , $x \sim 0.5$ oranında ve 14K’ de elde edilmektedir.

Şekil 9. $Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_x$ sistemine ait faz diyagramı

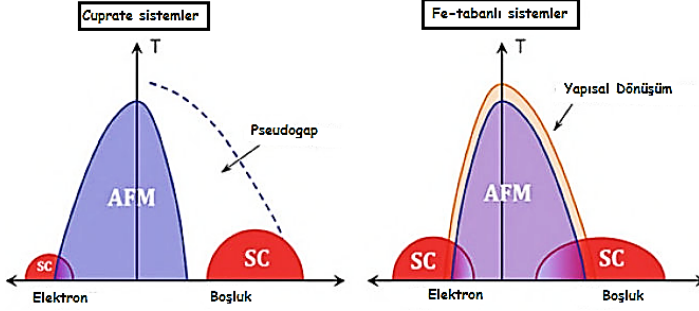


Kaynak: (Mizuguchi vd., 2010)

3. Fe-BAZLI SÜPERİLETKEN SİSTEMLERİN TEKNOLOJİK UYGULAMALAR İÇİN AVANTAJLARI

Şekil 10’ da cuprate sistemler (HTc) ile Fe-tabanlı süperiletken sistemlere ait tipik faz diyagramları karşılaştırma amaçlı verilmiştir (Johnson vd., 2015). Buna göre, Fe-tabanlı süperiletkenlerin ana bileşikleri düşük sıcaklıklarda antiferromanyetik bir düzenleniş sergilemektedirler. Zayıf birer metal gibi davrandıkları düşünülürse, bu şekildeki antiferromanyetik mekanizma hareketli elektronların spin yoğunluk dalgası (SDW) düzenlenişine bağlanır (Dong vd., 2008; De la Cruz vd., 2008). Bunun aksine, HTc malzemelerde antiferromanyetizma lokal momentlerin yer değiştirmesine bağlanmaktadır (Lee vd. 2006).

Şekil 10. Fe-bazlı ve cuprate sistemlerdeki tipik faz diyagramı



Kaynak: (Johnson vd., 2015)

Mühendislik ve Teknolojik uygulamalar açısından HTc sistemlerin ve metalik MgB₂ süperiletken ile FeSe tabanlı süperiletken malzemelerin bazı temel özellikleri Tablo 1’ de verilmektedir (Hosono vd., 2018; Ma, 2012; Tanabe ve Hosono, 2012). HTc süperiletkenler antiferromanyetik (AFM) Mott yalıtkanı durumunda güçlü elektron bağlantılarından dolayı süperiletken sistemler arasında en yüksek kritik sıcaklığa sahiptirler. Ancak FeSe tabanlı sistemler mevcut durumda HTc sistemler gibi sıvı nitrojen sıcaklığında (77 K) uygulanabilir değildir. Buna rağmen, Fe-tabanlı süperiletkenler ~10 K ile 50 K arasında teknolojik uygulamasının olması beklenmektedir. Ancak esas önemli olan kısım üst kritik manyetik alanlarının 50 T’nin üzerinde olup oldukça yüksektir ve bu değerde bile yüksek akım iletimini gerçekleştirebilmektedir.

Öyle ki, bu değer Nb-Ti (15 T) ve A15-tipi Nb₃Sn (29 T) gibi konvensiyonel metalik süperiletkenler ve MgB₂’den çok daha yüksektir. Dolayısıyla, Fe-tabanlı süperiletkenlerin uygulama hedefleri arasında yüksek manyetik alan magnetlerinin olması beklenmektedir. Magnetlerin pratik uygulamalar açısından bir diğer önemli özelliği de tersinmezlik alanıdır. Tersinmezlik alanı (H_{irr}) kritik akım yoğunluğu sıfır olduğundaki maksimum alandır. Fe-tabanlı süperiletkenler için H_{irr}>50 T (4 K’de) olup bu değer MgB₂’den daha yüksektir ve manyetik alan uygulamalarında daha fazla kullanım alanının olması beklentisini ortaya çıkarmaktadır. Fe-tabanlı süperiletkenlerin anizotropi faktörü; $\gamma = (m_c/m_{ab})^{1/2} = \xi_{ab}/\xi_c = H_{c2}^{IIab} / H_{c2}^Ic$, ifadesine

göre 2 - 5 aralığında olup bu değer MgB_2 ile kıyaslanabilirken HTc sistemlerden oldukça düşüktür. Düşük anizotropi faktörü, yüksek kristalografik simetri ve büyük kritik tane sınırı açısı (θ_c) anlamına geldiği için kritik akım yoğunluğu bağlamında önemli parametreler olup Fe-tabanlı süperiletkenlerin tel/şerit formundaki üretimler için uygun, düşük maliyetli ve HTc sistemler ile yarışabilir özellikte olduklarını gösterir (Onar, 2016).

Tablo 1. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin karşılaştırılması

	Fe-tabanlı Sİ	MgB₂	HTc
Ana Malzeme	AFM yarımetal ($T_N \sim 150K$)	Pauli Paraman. metal	AFM Mott yalıtkanı ($T_N \sim 400 K$)
Fermi Seviyesi	Fe 3d 5-orbitaleri	B 2p 2-orbitaleri	Cu 3d tek orbital
Maks. T_c	55 (1111)	39	93 (YBCO) 110 (BSCCO)
Safsızlık	Sağlam	Hassas	Hassas
Sİ aralık Simetrisi	Genişletilmiş s-dalgası	s-dalgası	d-dalgası
Üst Kritik Alan, $0K, H_{c2}(0)$ (T)	100-200 (1111) 100-50 (122) >50 (11)	40	>100
Tersinmezlik Alanı $H_{irr}(T)$	>50 (4K) >14 (20K)	>25 (4K) >10 (20K)	>0 (77K, YBCO)
Anizotropi, γ	4-5 (1111) 1-2 (122)	2	(5-7) YBCO (50-90) (Bi sistemi)
Sİ durumunda kristalografik simetri	Tetragonal	Hegzagonal	Tetragonal
Kritik tane sınırı açısı, θ_c (deg)	8-9	5-7	3-5 (YBCO)
Avantajı	Yüksek $H_{c2}(0)$, kolay üretim	Kolay üretim	Yüksek T_c ve $H_{c2}(0)$
Dezavantajı	Tek kristal olmalı	Düşük $H_{c2}(0)$	Yüksek maliyet

Kaynak: (Hosono vd., 2018; Ma, 2012; Tanabe ve Hosono, 2012).

4. SONUÇ

Bu çalışmamızda Fe-bazlı süperiletken sistemlere ait farklı fazlar ve teknolojideki uygulanabilirlikleri üzerine incelemelerde bulunduk. Aslında dört farklı faza sahip olan ancak FeAs ve FeSe tabakalarını içerme durumlarına göre Fe-pniktojen ve Fe-kalkojen olarakta sınıflandırılan Fe-bazlı süperiletken sistemler yüksek sıcaklık süperiletken (HT_c) sistemler sınıfının birer üyeleridir. Bu bağlamda Cuprate sistemler ve MgB_2 süperiletkeni ile kıyaslandığında süperiletkenlik parametrelerinin teknolojik uygulamalar açısından oldukça umut vaad ettiği söylenebilir özellikle de tel/şerit ve dolayısıyla magnet teknolojisi için önemli malzemeler oldukları görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Chen, G.F., Li, Z., Wu, D., Li, G., Hu, W.Z., Dong, J., Zheng, P., Luo, J.L., Wang, N.L. (2008). Superconductivity at 41 K and Its Competition with Spin-Density-Wave Instability in Layered $CeO_{1-x}FxFeAs$. Phys. Rev. Lett.100, 247002.
- Chen, X.H., Wu, T., Wu, G., Liu, R.H., Chen, H., Fang, D.F. (2008). Superconductivity at 43 K in $SmFeAsO_{1-x}Fx$. Nature.453, 761.
- De la Cruz, C., Huang, Q., Lynn, J.W., Li, J., Ratcliff II, W., Zarestky, J.L., Mook, H.A., Chen, G.F., Luo, J.L., Wang, N.L. and Dai, P. (2008). Magnetic order close to superconductivity in the iron-based layered $LaO_{1-x}FxFeAs$ systems, Nature, 453, 899-902.
- Deguchi, K. TakanoY. and Mizuguchi,Y. (2012). Physics and chemistry of layered chalcogenide superconductors.Sci. Technol. Adv. Mater.13,054303 (11pp).
- Dong, J., Zhang, H. J., Xu, G., Li, Z., Li, G., Hu, W. Z., Wu, D., Chen, G. F., Dai, X., Luo, J. L., Fang, Z. and Wang, N. L. (2008). Competing orders and spin-density-wave instability in $La(O_{1-x}Fx)FeAs$, Europhys. Lett., 83, 27006.

- Fang, M.H., Wang, H.D., Dong, C.H. et al. (2011). Fe-based superconductivity with $T_c=31$ K bordering an antiferromagnetic insulator in $(Tl, K)Fe_xSe_2$. *Europhys. Lett.*94, 27009.
- Guo, J., Jin, S., Wang, G. et al. (2010). Superconductivity in the iron selenide $K_xFe_2Se_2$. *Phys. Rev. B.*82, 180520(R).
- Hosono, H., Yamamoto, A., Hiramatsu, H., Ma, Y. (2018). Recent advances in iron-based superconductors toward applications. *Materials Today*, 21, 3, 278-302.
- Hsu, F.C., Luo, J.Y., Yeh, K.W., Chen, T.K., Huang, T.W., Wu, P.M., Lee, Y.C., Huang, Y.L., Chu, Y.Y., Yan, D.C., Wu, M.K. (2008). Superconductivity in the PbO-type structure α -FeSe. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*105, 14262.
- Huang, Q., Qiu, Y., Bao, W. et al.(2008). Neutron-diffraction measurements of magnetic order and a structural transition in the parent $BaFe_2As_2$ compound of FeAs-based high-temperature superconductors. *Phys. Rev. Lett.*101, 257003.
- Johnson P.D., Xu, G., Yin, W.-G. (2015). *Iron-Based Superconductors*. Springer International Publishing Switzerland, 436p.
- Kamihara, Y., Watanabe, T., Hirano, M., Hosono, H.(2008). Iron-Based Layered Superconductor $La[O_{1-x}F_x]FeAs$ ($x = 0.05-0.12$) with $T_c = 26$ K. *J. Am. Chem. Soc.* 130, 3296.
- Kamihara, Y., Hiramatsu, H., Hirano, M. et al. (2006). Iron-based layered superconductor: $LaOFeP$. *J. Am. Chem. Soc.*128, 10012.
- Kofu, M., Qiu, Y., Bao, W. et al. (2009). Neutron scattering investigation of the magnetic order in single crystalline $BaFe_2As_2$. *New J. Phys.*11,055001.
- Krzton-Maziopa, A., Shermadini, Z., Pomjakushina, E. et al.(2011). Synthesis and crystal growth of $Cs_0.8(FeSe_{0.98})_2$: A new iron-based superconductor with $T_c = 27$ K. *J. Phys. Condens. Matter.*23,052203.

- Lee, P.A., Nagaosa, N., Wen, X.-G. (2006), Doping a Mott insulator: physics of high-temperature superconductivity,, Rev. Mod. Phys., 78, 17–85.
- Lu, X.F., Wang, N.Z., Wu, H., et al. (2015). Structure determination and coexistence of superconductivity and antiferromagnetic order in $(\text{Li}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{OHFeSe}$. Nature Materials.14, 325-329.
- Ma, Y. 2012 “Progress in wire fabrication of iron-based superconductors”, Supercond. Sci. Technol. 25, 113001 (24pp).
- Medvedev, S., McQueen, T.M., Troyan, I.A. et al.(2009). Electronic and magnetic phase diagram of $\text{Fe}_{1.01}\text{Se}$ with superconductivity at 36.7 K under pressure. Nat. Mater.8, 630–633.
- Mizuguchi, Y., Takano, Y. (2010). Review of Fe chalcogenides as the simplest Fe-based superconductor. J. Phys. Soc. Jpn.79, 102001.
- Mizuguchi, Y., Tomioka, F., Tsuda, S., Yamaguchi, T., Takano, Y.(2008). Superconductivity at 27K in tetragonal FeSe under high pressure. Appl. Phys. Lett.93, 152505.
- Onar, K. (2017). FeSe -Tabanlı Yeni Nesil Süperiletken Alaşımların Tek Kristal Formda Üretimi, Karakterizasyonu ve Mühendislik Uygulamaları. Doktora Tezi. İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Parker, D.R., Pitcher,M.J., Baker, P.J. et al.(2009). Structure, antiferromagnetism and superconductivity of the layered iron arsenide NaFeAs . Chem. Commun. 2009, 2189.
- Rehmann, S., Herrmannsdörfer, T. and Pobell, F. (1997). Interplay of Nuclear magnetism and superconductivity in AuIn_2 . Phys.Rev.Lett. 78, 1122-1125.
- Ren, Z.-A., Che, G.-C., Dong, X.-L., Yang, J., Lu, W., Yi, W., Shen, X.-L., Li, Z.-C., Sun, L.-L., Zhou, F., Xhao, Z.X. (2008). Superconductivity and phase diagram in iron-based arsenic-oxides $\text{ReFeAsO}_{1-\delta}$ (Re = rare-earth metal) without fluorine doping. Europhys. Lett. 83, 17002.

- Ren, Z.A., Lu, W., Yang, J., Yi, W., Shen, X.L., Li, Z.C., Che, G.C., Dong, X.L., Sun, L.L., Zhou, F., Zhao, Z.X. (2008). Superconductivity at 55 K in Iron-Based F-Doped Layered Quaternary Compound $\text{Sm}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$. *Chin. Phys. Lett.*25, 2215.
- Ren, Z.A., Yang, J., Lu, W., Yi, W., Che, G.-C., Dong, X.-L., Sun, L.-L., Zhao, Z.-X. (2008). Superconductivity at 41.0 K in the F-doped $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$. *Mater. Res. Innov.*12, 1.
- Rotter, M., Tegel, M., Johrendt, D. et al.(2008). Spin-density-wave anomaly at 140 K in the ternary iron arsenide BaFe_2As_2 . *Phys. Rev. B.*78,020503(R).
- Sefat, A.S. (2013). Bulk synthesis of iron-based superconductors. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 17, 59.
- Sefat, A.S., Huq, A., McGuire, M.A., Jin, R., Sales, B.C., Mandrus, D., Cranswick, L.M.D., Stephens, P.W., Stone, K.H. (2008). Superconductivity in $\text{LaFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{AsO}$. *Phys. Rev. B.*78, 104505.
- Shimizu, K., Kimura, T., Furomoto, S., Takeda, K., Kontani, K., Onuki, Y., Amaya, K. (2001). Superconductivity in the non-magnetic state of iron under pressure. *Nature.*412, 316.
- Takahashi, H., Igawa, K., Arii, K., Kamihara, Y., Hirano, M., Hosono, H. (2008). *Nature.*453, 376.
- Takeshita, N., Iyo, A., Eisaki, H., Kito, H., Ito, T. J. (2008). First Investigation of Pressure Effects on Transition from Superconductive to Metallic Phase in $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$. *Phys. Soc. Jpn.*77, 075003.
- Tanabe, K. and Hosono, H. 2012 “Frontiers of Research on Iron-Based Superconductors toward Their Application”, *Japanese Journal of Applied Physics* 51, 010005.
- Wang, A.F., Ying, J.J., Yan, Y.J. et al. (2011). Superconductivity at 32 K in single-crystalline $\text{RbxFe}_2\text{-ySe}_2$. *Phys. Rev. B.*83,060512.

- Wang, X.C., Liu, Q.Q., Lv, Y.X. et al.(2008). The superconductivity at 18 K in LiFeAs system. Solid State Commun.148, 538.
- Wang, Z., Song, Y.J., Shi, H.L. et al.(2011). Microstructure and ordering of iron vacancies in the superconductor system $KyFe_xSe_2$ as seen via transmission electron microscopy. Phys. Rev. B.83, 140505.
- Watanabe, T., Yanagi, H., Kamiya, T. et al. (2007). Nickel-based oxyphosphide superconductor with a layered crystal structure $LaNiOP$. Inorg. Chem. 46,7719.
- Wen, H.-H., Mu, G., Fang, L., Yang, H., Zhu, X. (2008). Superconductivity at 25 K in hole-doped $(La_{1-x}Sr_x)OFeAs$ Europhys. Lett.82, 17009.
- Woolf, L.D., Johnston, D.C., Mackay, H.B., McCallum, R.W.and Maple, M.B.(1979). Superconducting and normal state properties of $ErRh_4B_4$ and $LuRh_4B_4$. J. Low Temp.Phys. 35, 651-669
- Zavalij, P., Bao, W., Wang, X.F. et al. (2011). Structure of vacancy-ordered single-crystalline super conducting potassium iron selenide. Phys. Rev. B.83, 132509.

SÜPER ALAŞIMLARIN BORLAMA İŞLEMİ İLE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

İlyas TÜRKMEN¹

Fatih SARGIN²

Kürşat KANBUR³

1. GİRİŞ

Süper alaşım malzemeler yüksek sıcaklık uygulamalarında yüksek dayanıma sahip olmakla birlikte yüksek oksidasyon, korozyon ve ısıl dirence de sahip olduğu bilinmektedir. Bu özellikleri sayesinde süper alaşımalar uzay, havacılık, denizcilik gibi daha birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Buna rağmen yüzey sertliği ve tribolojik özelliklerinin tatmin edici olmaması nedeniyle bu malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi gerektiği özellikle araştırmalarda ifade edilen bir durumdur. Metallere uygulanan borlama işlemleriyle metal yüzeylerin sertlik ve aşınma direnci performansları önemli bir seviye çıkarılabilmektedir. Gerek uygulama kolaylığı gerek düşük maliyetli oluşu nedeniyle borlama işlemi, süper alaşım malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla çoğunlukla tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Bu çalışmada çeşitli süper alaşım malzemelerin

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, ilyas.turkmen@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5424-5412.

² Arş. Gör., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, fatih.sargin@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2683-4543.

³ Arş. Gör., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, kursat.kanbur@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6343-2992.

borlama uygulamalarına ilişkin örnekler ve sonuçlar ele alınmıştır. Bunların yanında süper alaşım malzemeler ve borlama yöntemi hakkında da detaylı bilgiler verilmiştir.

2. SÜPER ALAŞIMLAR

2.1.Genel Tanım ve Tarihçe

Süper alaşım terimi 1950’li yılların sonlarında özellikle uçak gaz türbinlerinde kullanılan ve yüksek sıcaklıkta yüksek mukavemete sahip malzemeleri tanımlamak için kullanılmaya başlanmıştır. Sims ve Hagel (Sims, Stoloff, & Hagel, 1987) tarafından 1972 yılında yapılan tanıma göre “Bir süper alaşım genellikle VIIIB grubu elementlerden oluşan, nispeten şiddetli mekanik gerilimin yaşandığı ve yüksek yüzey stabilitesinin sıklıkla gerekli olduğu, yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş alaşımdır.” William Boesch (Boesch, 1989) 1989 yılında süper alaşım tanımını, “Nikel (Ni), kobalt (Co), titanyum (Ti), niyobyum (Nb) ve demir (Fe) elementlerinden en az biri açısından zengin olan ve yüksek sıcaklıklarda zorlu koşullarda ve yüksek gerilmeler altında yapısal, yüzeysel ve işlevsel kararlılığını koruyan alaşımlar” olarak genişletmiştir. Günümüzde ise süper alaşımlar en basit haliyle, 650°C’nin üstünde sıklıkla çalışabilen, nikel, demir-nikel ve kobalt içerikli, ısıya dayanıklı alaşımlar olarak tanımlanmaktadır.

“Süper alaşım” teriminin kökeni nispeten belirsiz olmakla beraber, konuyla ilgili yapılan ilk çalışmalarda “Isıya Dirençli Alaşımlar” veya “Yüksek Sıcaklık Alaşımları” terimlerinin kullanıldığı görülmüştür. “Süper alaşım” terminolojisi, çok popüler kurgusal karakter Superman’in bir televizyon kahramanı haline geldiği 1940’ların sonlarına kadar ortaya çıkmamış ve “Süper” kelimesinin sözlüklerde popüler tanımlayıcı haline gelmesiyle birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Birçok çalışmada süper alaşımların ortaya çıkması ve gelişmesi uçak gaz türbinleri

ile ilişkilendirilirken, yapılan araştırmalar 1920'li yıllarda Almanya'da vakum indüksiyon ertitme yöntemi kullanılarak nikel-demir-kobalt içerikli yüksek ısı ve korozyon dayanımı olan alaşımların üretildiğini ortaya koymuştur (Boesch, 1989). 2. Dünya Savaşı ile beraber metalurji önem kazanmış ve özellikle uçaklarda kullanılmak üzere süper alaşımlar geliştirilmeye başlanmıştır. 1940'lı yılların başında Almanya %30 Ni ve %15 Cr içeren Tinidur alaşımını türbin bıçaklarında kullanırken, İngiltere'de %14 Cr ve %18 Ni içeriğine sahip Rex 78 alaşımı kullanılmaktaydı. 1930-1950 yılları arasında süper alaşımlarla ilgili geliştirme çalışmaları genelde mikroyapı optimizasyonu ve buna bağlı olarak da proses optimizasyonuna dayanmaktaydı. Ancak askeri uçaklarda jet motorlarının kullanılmaya başlaması ile birlikte daha zorlayıcı koşullarda çalışan motor parçalarına ihtiyaç duyulmaya başlandı (Geddes, Leon, & Huang, 2010). Bu döneme kadar üretilen alaşımlar genelde döküm yöntemiyle üretilmekte ve dövme işlemine tabi tutulmaktaydı. Ancak 1952 yılında vakum ertitme yönteminin ticari olarak kullanılmaya başlanması, üretim esnasında ergiyik şarjın daha uzun süreler potada tutulmasını sağladı. Bu da gaz giderme işleminin daha verimli yapılmasına ve ergiyik metaldeki empüritelere sistemden uzaklaştırılmasına imkan sağladı (Kracke, 2016). Bu yöntem ile ilk üretilen alaşım olan Inco 713C %12.5 Cr içermekte olup, yüksek sıcaklıkta korozyon dayanımının kendinden önceki alaşımlara göre net bir şekilde daha iyi olduğu görülmüştür (Betteridge & Shaw, 1987). Süper alaşımların geçmişinde vakum ertitme yönteminden sonra yaşanan en önemli gelişmelerden biri de gelişen döküm teknolojisi sayesinde yönlendirilmiş katılaşma prosesinin kullanılmaya başlanmasıdır. Bu sayede tane büyümesi ekseninde tane sınırları bulunmayan kolonsal mikroyapıda alaşımlar üretilebilmiştir. Bu da tane sınırlarının olmadığı tek kristal süper alaşımların üretilmesine imkan vermiştir. Günümüzde hala tek kristal süper alaşımlar sıklıkla kullanılmakta olup mükemmel sürünme ve yorulma dayanımıyla öne

çıkılmaktadır. Süper alaşım teknolojisindeki bu gelişmeler malzemelerin ömrünü ve servis tavanlarını geliştirmiştir. İlk nesil süper alaşımlardan olan SRR99 850°C'de 500 MPa'lık yük altında 250 saatlik bir sürünme ömrüne sahip iken, üçüncü nesil bir süper alaşım olan RR3000 2500 saatlik bir ömre sahiptir (Reed, 2008).

2.2.Süper Alaşımların Özellikleri

Süper alaşımların yapısında Fe, Ni ve Co'ın yanı sıra krom (Cr), tungsten (W), molibden (Mo), tantalyum (Ta), niyobyum (Nb), titanyum (Ti) ve alüminyum (Al) gibi elementler de bulunmaktadır. Temelde süper alaşımlardan 4 ana özellik beklenmektedir. Bunlar, yüksek sıcaklıklarda akma ve çekme dayanımından ödün vermemesi, yüksek sürünme dayanımına sahip olması, değişen sıcaklık ve yüklerde yüksek yorulma dayanımı göstermesi ve farklı çeşitlerdeki korozyon hasarlarına karşı dayanıklı olmasıdır (Gialanella & Malandrucolo, 2020).

Süper alaşımlarda mukavemet artışı, katı çözelti sertleştirilmesi (yeralan atomlar deformasyona müdahale eder), deformasyon sertleştirilmesi (enerji deformasyon yoluyla depolanır) ve çökelti sertleştirilmesi (çökeltiler deformasyona engel olur) yoluyla gerçekleştirilmektedir. Süper alaşımlar nispeten sünektir, ancak kobalt bazlı süper alaşımların süneklikleri genellikle demir-nikel ve nikel bazlı süper alaşımlardan daha azdır. Süper alaşımlar tipik olarak 200 GPa civarında elastiklik modüle sahip olmakla birlikte, bazı polikristalin alaşımlarının elastik modülleri alaşım sistemine bağlı olarak oda sıcaklığında 172 ila 241 GPa arasında değişebilmektedir. Yönlü tane veya kristal yönelmesine yol açan işlemler sonrasında, tane veya kristal yöneliminin test yönü ile ilişkisine bağlı olarak elastik modül değeri yaklaşık 124 ila 310 GPa seviyelerine ulaşabilmektedir. Bunlara ek olarak demir-nikel bazlı süper alaşımların yoğunlukları yaklaşık 7,9 ile 8,3 gr/cm³,

kobalt bazlı süper alaşımlar yaklaşık 8,3 ile 9,4 gr/cm³ ve nikel bazlı süper alaşımlar yaklaşık 7,8 ile 8,9 gr/cm³ civarında değerler almaktadır (Donachie & Donachie, 2002; Kishawy & Hosseini, 2019).

Süper alaşımların üretiminde kullanılan bir diğer yöntem de toz metalurjisi (TM) tekniğidir. Bu yöntem normal koşullar altında yalnızca nikel bazlı süper alaşımlara uygulansa da esas olarak IN-100 veya Rene 95 gibi geleneksel yöntemlerle dövülmesi zor veya pratik olmayan yüksek mukavemetli gaz türbini disk alaşımı bileşimlerine yöneliktir. Geleneksel ingot üretim işlemleri genellikle homojenlik ve ince tane boyutu alanlarında TM ile rekabet edememektedir. Bazı toz prosesleri, hızlı prototiplemenin uygulamasıyla nihai bir ürün yaratma kapasitesine sahip olabilmektedir. Başlangıçtaki TM süper alaşım bileşimleri, Astroloy ve daha sonra IN-100 ve Rene 95 gibi mevcut alaşımların modifikasyonları şeklindedir. TM yöntemiyle ekstrüzyonlu ve izotermal olarak dövülmüş nikel bazlı süper alaşımlı Astroloy Pratt & Whitney F100 uçak gaz türbininde yaygın şekilde kullanılmıştır (Donachie & Donachie, 2002).

2.3.Süper Alaşımların Sınıflandırılması

Süper alaşımlar yapılarındaki baskın alaşım elementine göre üç ana gruba ayrılırlar. Bunlar demir bazlı, nikel bazlı ve kobalt bazlı süper alaşımlardır.

2.3.1. Demir Bazlı Süper Alaşımlar

Demir bazlı süper alaşımlar, kronolojik olarak başlangıçta östenitik paslanmaz çeliklerden geliştirilen süper alaşımların ilk kategorisidir. Demir bazlı süper alaşımlar genellikle kobalt veya nikel bazlı süper alaşımlardan daha ucuzdur. Demir bazlı süper alaşımların önemli özelliklerinden biri, ağırlıkça %10'dan fazla krom eklenerek elde edilebilen korozyon ve oksidasyon direncidir. Bu süper alaşım ailesi, sıkı paketlenmiş YMK matrisinin hem katı çözeltiyle sertleştirici hem de çökelti

oluşturucu elementlerin birleşimiyle oluşmaktadır. İlk demir bazlı süper alaşımlar, yaşlandırma sertleşmesini sağlamak için yüksek krom içerikli östenitik paslanmaz çeliklere titanyum eklenerek yapılmıştır (E. Akca & Gürsel, 2015). Ayrıca bu süper alaşımlara YMK östenitik matrislerini stabilize etmek için genellikle %25 oranında Ni alaşım elementi eklenmektedir. Bu oran %25 ile %60 arasında değişmekle birlikte, bu kategorideki önemli miktarda nikel içeriğine sahip alaşımlara bazen nikel-demir bazlı süper alaşımlar da denmektedir (Diltemiz & Zhang, 2016; Hawk, 2016).

Demir bazlı süper alaşımlar arasında en popüler olan ve yaygın şekilde kullanılan alaşım Alaşım 718, veya diğer isimleriyle INCO 718, IN 718 ya da Inconel 718'dir. Alaşım 718'in patenti 24 Temmuz 1962'de Herb Edelstein tarafından alınmış ve o zamandan beri hem ticari hem de askeri havacılık uygulamalarında kullanılmaya devam edilmiştir (Gialanella & Malandrucolo, 2020).

2.3.2. Nikel Bazlı Süper Alaşımlar

Nikel bazlı süper alaşımlar, yüksek mukavemet ve sıcaklık direnci açısından süper alaşımların en öne çıkan sınıfıdır. Nikel, hava ve deniz suyunda yüksek korozyon ve oksitlenme direncine sahip dayanıklı bir metaldir ve sıklıkla demir, molibden ve bakır ile alaşımlar yapmak için kullanılmaktadır (Hosford, 2010). Nikel'in ergime sıcaklığı 1455°C civarında olup, Ni bazlı süper alaşımlar 1200°C'yi bulan sıcaklıklara kadar performans verebilmektedir. Nikel bazlı süper alaşımlar genellikle ağırlıkça en az %50 Ni, ve Co ve Mo, W, Nb, Re, Cr, Al ve Ti kombinasyonları gibi farklı elementler içermektedir. Ni bazlı süper alaşımlar hem dövme hem de döküm formlarında üretilebilmektedir (Gialanella & Malandrucolo, 2020).

Nikel bazlı süper alaşımlar, düşük sıcaklıkta tokluk, yüksek sıcaklıkta dayanıklılık ve birçok farklı ortamda olağanüstü korozyon dayanımı gibi birçok benzersiz özellik sergilemektedir. Nikel bazlı süper alaşımlar, YMK kristal yapıları nedeniyle düşük sıcaklıklarda oldukça dayanıklıdır. Sıklıkla kullanılan bir Ni bazlı süper alaşım olan Inconel 600, 655 MPa çekme mukavemeti, 310 MPa akma mukavemeti, 205 GPa Young modülü ve yaklaşık 1400°C'lik ergime noktasına sahiptir (Brandt, 1992).

2.3.3. Kobalt Bazlı Süper Alaşımlar

Kobalt bazlı süper alaşımlar önemli ölçüde aşınma, ısı ve korozyon direncine sahip olmalarına rağmen Ni bazlı süper alaşımlara kıyasla daha düşük mukavemet ve sürünme direnci gösterirler. Buna ek olarak Co bazlı süper alaşımlar Ni bazlı alaşımlara göre nispeten daha yüksek sıcaklıklara kadar mukavemetlerini koruyabilmektedirler (E. Akca & Gürsel, 2015). Nikel bazlı süper alaşımlara benzer şekilde, kobalt bazlı süper alaşımlar da çoğunlukla 650–1150 °C sıcaklık aralığındaki uygulamalarda kullanılır, ancak kullanımları nikel bazlı süper alaşımlar kadar yaygın değildir. Bu alaşımlar Fe bazlı ve Ni bazlı süper alaşımlardan daha pahalıdır ve bu durum Co bazlı süper alaşımların kullanımına ekstra bir engel teşkil etmektedir (Antolovich, 2015).

Kobalt bazlı süper alaşımların birçok türü vardır. En yaygın olanları Haynes 25, UMCo-50 ve Stellite 6B'dir. Haynes 25, talaşlı imalat, soğuk işleme, kaynak ve dövme işlemleriyle üretilen ve en bilinen Co bazlı süper alaşım olarak kabul edilmektedir. 980 °C'ye kadar oksitlenme direnci ile olağanüstü sıcaklık dayanımı ve sürtünme direncine sahip olan bu alaşım, ayrıca deniz ortamlarına, asitlere ve vücut sıvılarına karşı dayanıklıdır (Kishawy & Hosseini, 2019).

2.4. Süper Alaşımların Üretim Yöntemleri

Süper alaşımlar genelde döküm (genellikle ısıtma işlemi görmüş veya başka şekilde işlenmiş) veya dövme (genellikle ısıtma işlemi görmüş veya başka şekilde işlenmiş) formlarda mevcuttur. Dökme ürünler, daha sonraki yeniden eritme veya dövme işlemleri (örn. hadde) için ingot formunda olabilmeleri birlikte, istenen parçanın nihai şeklinde de olabilmektedir. Dövülmüş ürünler genellikle istenen şekle nispeten yakın bir seviyededir veya çubuk, levha, tel, levha vb. dahil olmak üzere ara ürünlerdir. Döküm alaşımları, gaz türbinlerinin sıcak kısımlarında, yani türbin bıçakları ve kanatçıklar gibi bölgelerde özellikle tercih edilir. Dökümlerin çoğu polikristalin eş eksenli olmakla birlikte, geri kalanlar yönlendirilmiş katılaşmaya sahiptir. Dökümler, yüksek sıcaklıktaki dövmelemlerden doğası gereği daha güçlüdür. Polikristal dökümlerin kaba tane boyutu, daha ince taneli dövmelemlerle karşılaştırıldığında, yüksek sıcaklıklarda mukavemeti ve sürünme dayanımını artırmaktadır. Dövme alaşımları, genellikle katılma sürecinin neden olduğu segregasyona sahip olan döküm alaşımlarından göre daha homojen yapıdadır. Dövme alaşımları genellikle döküm alaşımlarından daha sünek olarak kabul edilmektedir (Donachie & Donachie, 2002; Mouritz, 2012).

2.5. Süper Alaşımların Kullanım Alanları ve Geleceği

Daha önce de belirtildiği gibi, gaz türbinlerinin ve jet motorlarının geliştirilmesi, süper alaşımların evrimindeki ana itici güç olmuştur. Yüksek sıcaklıklarda yanma döngüsü daha eksiksiz olduğundan daha az kirletici madde üretmektedir, bu da yeni gaz türbinlerinin ve jet motorlarının daha verimli çalışabilmesi için daha yüksek sıcaklıklara çıkmasına sebep olmaktadır. Günümüzde 80'den fazla süper alaşım çeşidi olmakla birlikte, yeni alaşımların geliştirilmesi süreci halen devam etmektedir.

Süper alaşımların kullanım alanlarından bir kısmı aşağıda belirtilmiştir;

- Havacılık ve hareketsiz (endüstriyel) gaz türbinlerinde; kanatçıklar, türbin bıçakları, yanma hücreleri, diskler, vanalarda vb.
- Uçaklarda kullanılan iniş takımları ve çeşitli bağlantı elemanlarında,
- Askeri uçaklarda kullanılan art yakıcı sistemleri, egzoz borularında,
- Buhar türbini parçalarında,
- Otomotiv sektöründe kullanılan valf ve kompresörlerde,
- Roket motorlarında,
- Biyomalzeme alanında protez ve implantlarda,
- Nükleer reaktörlerde,
- Isı eşanjörlerinde,
- Petrokimya endüstrisinde kullanılan buhar kazanları, boru, valf ve pompa sistemlerinde,
- Yüksek sıcaklığa dayanıklı döküm kalıpları ve iş takımlarında (E. Akca & Gürsel, 2015; Brandt, 1992; Gialanella & Malandrucolo, 2020; Zhang & Zhao, 2016).

3. BORLAMA

Malzeme yüzeyi malzemenin dış ortamla temasını sağlayan bölgesi olmasından dolayı birçok konuda yüzeyin özellikleri, malzemenin kullanım alanını belirlemektedir. Bundan dolayı yüzey geliştirme işlemleri önem kazanmıştır. Yüzey işlemlerinde en bilinen proseslerden birisi ise borlama işlemidir. Borlama çok çeşitli demir, demir dışı ve sermet malzemelere uygulanabilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Yüzey işlemi sırasında bor atomları yüzeyden içeri doğru difüze olmaktadır ve yüzeyde metalik malzeme ile borür tabakaları (fazları) oluşturmaktadır. Bu tabaka malzemenin yüzeyinin

sertliğini, aşınma davranışını, korozyon direncini ve yüksek sıcaklık direncini genellikle iyileştirmektedir. Bundan dolayı birçok uygulama alanında borlama yüzey işleme başvurulmaktadır (García-León, Martínez-Trinidad, & Campos-Silva, 2021).

3.1. Borlama İşlemi

Borlama işlemi difüzyonel bir işlem olduğundan metalik (altlık) malzeme ile aynı ortamda bulunarak borlama işlemini başlatacak bor kaynağı, aktivatör ve dolgu malzemesinden oluşan bir borlama karışımı kullanılmaktadır. Bor kaynağı olarak genelde B_4C , Na_2B_4O , H_3BO_3 ve H_2B_6 kullanılmaktadır (Ataibis & Taktak, 2015; Türkmen & Yalamaç, 2018; Wang, Li, Dong, & Li, 2014). Bor aktivatörü olarak ise genellikle $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 gibi kimyasallar kullanılmaktadır (Uluköy & Can, 2006). Bunların yanında dolgu/dağıtıcı malzeme olarak silisyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) olarak çoğunlukla tercih edilmektedir (Züleyha, 2022). Genel olarak borlama işlemi yaklaşık 700 ile 1100°C arasında değişen sıcaklıklarda yapılmaktadır. Borlama işlemi sırasında bor kaynağından sıcaklıkla birlikte bor atomları metal yüzeyine doğru yayınmaktadır. Ardından metal yüzeyinde hedef metalle kimyasal reaksiyon sonucunda borür tabakaları oluşmaktadır. Proses sıcaklığı ve süresinin artışı ile birlikte borun yüzeyden içeri doğru yayınma süreci de artmaktadır. Bundan dolayı bu parametreler genellikle borür tabaka kalınlığını artırmaktadır. Borlama işleminde hedef metalik malzemeye göre oluşan borür fazları farklıdır. Demir ve alaşımlarında termokimyasal işlem süreci sonunda Fe_2B ve FeB fazları meydana gelmektedir (Uslu, Comert, Ipek, Ozdemir, & Bindal, 2007). Titanyum ve alaşımlarının borlanması sonucunda ise TiB_2 ve TiB fazları elde edilmektedir (Wu, Li, Wu, Guo, & Guo, 2014). Yapılan bazı borlama işlemleri ve elde edilen fazlar Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çeşitli Malzemelere Yapılan Borlama İşlemleri.

Borlama Malzemesi	Borlama Karışımı	Elde Edilen Borür Tabakası ve Sertliği	İşlem Sıcaklıkları	Ref.
Tungsten	EKabor (90% SiC, 5% B ₄ C, and 5% KBF ₄)	Tungsten Borür (WB), 2500 HV	940°C	(M. Usta, Ozbek, Ipek, Bindal, & Ucisik, 2005)
Niyobyum	EKabor (90% SiC, 5% B ₄ C, and 5% KBF ₄)	Niyobyum diborür (NbB ₂), 2500 HV	940°C	(Metin Usta, 2005)
Nikel	EKabor (90% SiC, 5% B ₄ C, and 5% KBF ₄)	Dinikel borür (Ni ₂ B) 747-805 HV	950°C	(Özbek, Akbulut, Zeytin, Bindal, & Ucisik, 2000)
Vanadyum	EKabor (90% SiC, 5% B ₄ C, and 5% KBF ₄)	Vanadyum diborür (VB ₂), 3700 HV	1100°C	(Tarakci, Gencer, & Calik, 2010)
Kobalt	LSB-II Ticari Ürün (SiC, B ₄ C ve KBF ₄)	Dikobalt borür (Co ₂ B),	850-950°C	(Mu, Yang, Shen, & Jiang, 2009)
Molibden	EKabor (90% SiC, 5% B ₄ C, and 5% KBF ₄)	Molibden borür (MoB) ve molibden diborür (MoB ₂), 599-743 HV	1000-1100°C	(B. Akca & Çalık, 2017)

3.2. Borlama Yöntemleri

Borlama işlemi temelde katı, sıvı, gaz ve plazma koşullarında yapılabilmektedir. Prosesin gerçekleştiği koşullara göre de borlama verimliliği değişmektedir. Özellikle gaz ve plazma koşullarında borlama verimliliği artmaktadır. Bir diğer

ifadeyle benzer sürelerdeki borlama işleminde borlama tabakası kalınlığı gaz ve plazma koşullarında difüzyon artışından dolayı artmaktadır. Borlama işlemi başlıca beş farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar; kutu, sıvı, gaz, pasta ve plazma borlama yöntemleridir.

3.2.1. Kutu Borlama

Kutu borlama en yaygın borlama yöntemidir. Bu işlemde metalik parçalar (altlık) çelik kutu içerisindeki toz borlama karışımına gömülmektedir. Altlık parçalar birbirinden en az 10 mm uzaklıkta olmalıdır. Yaklaşık 50 ile 100 mm derinliğinde bir borlama karışımıyla kaplanır. Böylelikle borür tabakası oluşumu ve mikro yapısının yalnızca borlama malzemesinin aktivitesinden, işlem parametrelerinden (sıcaklık ve süre) ve altlık malzemedan etkileneceği bilinmektedir. Daha sonra kutu belirlenen proses sıcaklığına getirilmektedir ve bor, metalin içine yayılmakta ve borür katmanını oluşturmaktadır (Eraslan, 2023). Kutu, borlama işlemi sıcaklığında yeterli bir süre bekletildikten sonra fırından çıkarılır ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Borlama prosesinde komplikasyonları önlemek için borlamanın koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilmesi önerilmektedir (Suwattananont, 2004).

Toz maddeler mükemmel kalitede bir borür tabakası sağlar ve özellikle küçük aletlerin ve diğer parçaların borlanması için uygundur. İnce taneli tozlar aynı zamanda karmaşık şekilli parçaların işlenmesi için de idealdir. Borlama işlemi için kullanılan tozlar, genellikle 3 ila 5 saat süren normal borlama operasyonlarında birkaç kez yeniden kullanılabilir. Her döngüden sonra %30 ile 40 oranında taze toz geri dönüştürülmüş malzemeyle karıştırılır. Borlama malzemesinin tamamen değiştirilmesi işlem süresinin özellikle uzun olması durumunda (yaklaşık 20 saat veya daha fazla) gereklidir (Davis, 2002).

3.2.2. Pasta Borlama

Pasta borlama, büyük parçaların veya kısmi borlama gerektiren parçaların borlanması için uygun prosestir. Bu işlemde, iyi bir bağlayıcı madde içinde %45 B₄C (tane büyüklüğü 200 ila 240 µm) ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆, flux katkı maddesi) veya geleneksel borlama tozu karışımı (B₄C-SiC-KBF₄) içeren bir macun parça üzerine fırça, daldırma veya püskürtme yoluyla uygulanmaktadır. Macun yüzeyde kuruduktan sonra yaklaşık 1 ila 2 mm kalınlığında oluncaya kadar yüzeye sürülmeye devam edilmektedir (Maçkan, 2019). Ardından belirlenen sıcaklıklarda borlama işlemi gerçekleştirilir. İşlemin sonunda macun, kumlama, fırçalama veya yıkama yoluyla çıkarılmaktadır (Davis, 2002).

3.2.3. Sıvı Borlama

Bu işlemde borlama ortamı sıvı formdadır. Bu yöntemde daldırma ve elektroliz işlemi olarak iki farklı proses vardır (Kayalı, 2011). Daldırma yönteminde bor kaynağı, SiC ve boraks gibi borlama bileşiklerinden oluşan yaklaşık 800°C sıcaklık üstündeki ergimiş banyo bulunmaktadır. Numune bu banyoya daldırılır. Bor atomları hedef metal yüzeyine difüze olarak borlama işlemi gerçekleşmektedir. Bu proseste sıvı borlama ortamı koruyucu bir tabaka gibi davrandığından avantajlıdır. Elektrolizle borlamada ise yaklaşık 900°C civarında bor içeren bir tuz banyosu elektrolitik sıvı olarak oluşturulmaktadır. Ardından katot olarak bağlanan hedef metal ile anot arasında bir voltaj uygulanmaktadır. Böylelikle bor atomları hedef metal yüzeyinde birikmektedir (İlyas Türkmen, 2018; Özsoy, 1991).

3.2.4. Gaz Borlama

Gaz borlama işlemi borlama için kullanılan bileşiklerin gaz fazında olduğu bir işlemdir. Borlama işlemi kapalı bir ortamda gaz fazındaki borlama karışımının hedef malzemeye

püskürtülmesi ile gerçekleştirilmektedir. BCl_3 , B_2H_6 , BF_3 ve $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ gibi bor kaynağı olan gazlar kullanılmaktadır. Borlama işlemi sırasında yaklaşık $700\text{-}950^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığına ısıtılmış bir kapalı fırın içerisine basınçlı bor içeren bileşiklerden oluşan karışımın hedef metale püskürtülmesi ile işlem gerçekleştirilmektedir (Züleyha, 2022). Homojen ve tek fazlı borür tabakası oluşturulması açısından en ideal borlama yöntemidir. Ayrıca borlama işlemi sonrasında hedef metalin temizleme işlemlerine gerek duyulmamaktadır. Diğer borlama yöntemlerine göre daha kısa sürede benzer borür tabakası kalınlıkları da elde edilebilmektedir. En büyük dezavantajı işlem sırasında kullanılan gazların patlama tehlikesinin bulunmasıdır (İlyas Türkmen, 2018).

3.2.5. Plazma Borlama

Halen gelişim aşamasında olmasına rağmen, plazma borlama işlemi, borlama prosesinin ticari olarak kabul edilmesinin anahtarı olarak kabul edilebilir. Plazma durumu maddenin gaz halinin iyonize halidir. Bu borlama işleminde kullanılan malzemeler en yüksek enerji seviyesinde olduklarından hızlı difüzyonu mümkündür. Hidrojen (H_2) ve argon (Ar) ile birlikte bor kaynağı da bulundurulmaktadır. Bor kaynağı olarak B_2H_6 ve BCl_3 'ün her iki karışımı da plazma borlamada başarıyla kullanılabilir. Bununla birlikte, bu yöntem, 600°C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda çeşitli çelikler üzerinde bir borür tabakası oluşturmak için uygulanabilir, bu kadar düşük sıcaklıklarda kutu borlama işlemiyle borlama işleminin başarısı düşüktür. $\text{BCl}_3\text{-H}_2\text{-Ar}$ gazlarından oluşan bir karışımın kullanıldığı plazma borlama işleminde, BCl_3 konsantrasyonunun daha iyi kontrolünü, deşarj voltajının azaltılmasını ve borür filmlerinin daha yüksek mikrosertliği mümkündür. Çift fazlı katman, bazen siyah bor birikintisi ile ilişkilendirilen gözle görülür gözeneklilik ile

karakterize edilir. Ancak bu gözeneklilik BCl_3 konsantrasyonunun arttırılmasıyla en aza indirilebilir.

3.3. Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

Borlama işlemi ile malzemenin birçok özelliğinde gelişim sağlanmaktadır. Borlama işleminin en temel avantajlarından biri yüzeyin sertliğinin arttırılmasıdır. Örneğin çelik malzemelerde borür katmanları yaklaşık 1600 ile 2000 HV arasında yüksek sertliğe sahiptir. Borlanan malzemelerin yüzey sertliğinin geleneksel yüzey işlemlerine göre elde edilen yüzey sertliğinden daha yüksek değerde yüzey sertliğine sahip olduğu ifade edilmektedir (Davis, 2002). Borlanmış tabakanın yüksek yüzey sertliği ve düşük yüzey sürtünme katsayısına sahip olması malzemenin tribolojik özelliklerini de iyileştirmektedir (Başman, Arıkan, Arısoy, & Şeşen, 2023; Pashechko, Dzedzic, & Jozwik, 2020). Bu işlemin bir diğer avantajı ise malzemenin korozyon direncini geliştirerek birçok uygulamada kullanılabilirliğini arttırmasıdır (I. E. Campos-Silva & Rodríguez-Castro, 2015). Ayrıca borlanmış yüzeyler orta düzeyde oksidasyon direncine, yüksek yorulma ömrüne ve servis performansına da sahiptir (Barkat, Hammou, & Allaoui, 2017). Bu avantajları yanında borlama işleminin dezavantajları da bulunmaktadır. Borlama işlemi bazı yüzey iyileştirme proseslerine göre esnek değildir. Borlama işlemi daha yüksek maliyete ve işçiliğe ihtiyaç duymaktadır. Bunun yanında borür tabakası oluşturulduktan sonra işlenmesi güçleşmektedir (Saygın, 2006).

4. SÜPER ALAŞIMLARIN BORLAMA İŞLEMLERİNE İLİŞKİN UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Süper alaşımların yüzey özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar incelendiğinde özellikle son 10 yıl içerisinde bu alanda çok sayıda çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Birçok

çalışmada süper alaşımların yüksek sıcaklık dayanımlarının yanında zayıf olan tribolojik özelliklerinin de geliştirilmesinin hedeflendiği gözlemlenmektedir. Süper alaşımların yüzey sertliğinin ve aşınma direncinin artırılmasına yönelik gerçekleştirilen çeşitli yüzey işlemlerinden biri olan borlama işleminin çoğunlukla tercih edilmesi dikkat çekmektedir. Tablo 2’de çeşitli süper alaşım malzemelerin borlama işlemi uygulamalarına (borlama işlem parametreleri) ve işlem sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan kaplama tabakasına ilişkin veriler sunulmuştur.

Tablo 2. Çeşitli Süper Alaşım Malzemelere Ait Borlama Uygulama Verileri ve Sonuçları.

Borlama Yöntemi	Altlık Malzeme	Borlama Karışımı Bileşenleri	Borlama Süresi (Saat)	Borlama Sıcaklığı (K)	Oluşan Borür Fazları	Tabaka Kalınlıkları (µm)
Kutu	Inconel 718 (I. Campos-Silva et al., 2019)	%90 B ₄ C+%10 KBF ₄	2 ve 6	1173 ve 1223	Ni ₄ B ₃ , Ni ₂ B, Ni ₃ B, Cr ₂ B	19 ve 50
Kutu	Inconel 718 (I. Campos-Silva et al., 2018)	%90 B ₄ C+%10 KBF ₄	2, 4 ve 6	1173	Ni ₄ B ₃ , Ni ₂ B, Ni ₃ B, Cr ₂ B	23-39
Kutu	Inconel 718 (Conda-Pacheco et al., 2021)	%90 B ₄ C+%10 KBF ₄	2, 4 ve 6	1123, 1173 ve 1223	Ni ₄ B ₃ , Ni ₂ B, Cr ₂ B, Fe ₂ B	11-68
Pasta	Inconel 718 (Deng, Wang, Liu, & Niu, 2015)	B ₄ C, KBF ₄ , NaBF ₄ , nadir toprak oksitleri, SiC, Al ₂ O ₃ , Al	10	1253	Ni ₄ B ₃ , Ni ₂ B	104,88
Gaz	Inconel 600 (Dziarski, Makuch, & Kulka, 2017)	N ₂ -H ₂ -BCl ₃	2	1193	Ni ₃ B, Ni ₂ B, Ni ₄ B ₃ , NiB, CrB, Cr ₂ B	79
Kutu	Inconel 718 LC (Esfahani, Abdollahzadeh, Dabir, & Samar, 2020)	%40 H ₃ BO ₃ +%48 Al ₂ O ₃ +%6 Al+%6 Na ₃ AlF ₆	0,5 ve 1	1173	Ni ₃ B, CrB, W ₂ B ₅ , W ₂ B, TiB ₂ , AlB ₂ , CrB ₂ , MoB VB ₂	20,4
Kutu	Haynes 25 (Giriskan & Cam, 2023)	%90 B ₄ C+%10 NaBF ₄	4	1123, 1223 ve 1323	CoB, CrB W ₃ CoB ₃ , (CoFe)B ₂	13,63, 29,23 ve 79,82
Kutu	Inconel 625 (Günen, A., Kanca, 2017)	EKabor II	2, 4 ve 6	1073, 1173 ve 1473	Ni ₂ B, Cr ₂ B, Cr ₃ B ₃ , Cr ₃ B ₄ Fe ₂ B, Fe ₃ B NbB, NbB ₂ MoB, MoB ₂ Co ₃ B	6,61-92,03
Kutu	Inconel 718 (Günen, 2020)	%90 B ₄ C+%10 KBF ₄	2, 4 ve 6	1123, 1223 ve 1323	Ni ₄ B ₃ ,Cr ₂ B ₃ Cr ₂ B, Fe ₂ B FeB	20,7-130,1

Teori ve Uygulamada Mühendislik Alanında Yaşanan Gelişmeler

Kutu	Nimonic 80A (Günen, Döleker, Korkmaz, Gök, & Erdogan, 2021)	%90 B ₄ C+%10 NaBF ₄	2 ve 4	1123 ve 1223	Ni ₂ B, CrB Cr ₂ B, Cr ₃ B ₃	22-86
Kutu	Haynes 25 (Günen & Ergin, 2023)	%90 B ₄ C+%10 NaBF ₄	3	1223	CoB, Co ₂ B Cr ₃ B ₄ , Ni ₃ B WB ₄	37,58
Kutu	A286 (Günen, Keddam, Alkan, Erdoğan, & Çetin, 2022)	%90 B ₄ C+%10 KBF ₄	2, 4 ve 6	1123, 1223 ve 1323	FeB, Fe ₂ B, CrB, NiB, Ni ₄ B ₃	20-130
Kutu	Monel 400 (Günen, Keddam, Erdoğan, & Serdar, 2022)	%90 B ₄ C+%10 NaBF ₄	2, 4 ve 6	1173, 1223 ve 1273	Ni ₂ B	35-290
Kutu	Invar 36 (Kanca, 2022)	%90 B ₄ C+%10 NaBF ₄	5 ve 7	1248	NiB, FeB ve Fe ₂ NiB	176,9- 189,1
Kutu	Hastelloy C- 276 (Kanca, Uçgun, & Günen, 2023)	%90 B ₄ C+%10 NaBF ₄	5 ve 7	1248	Ni ₂ B, CrB, Fe ₂ B, MoB ₂	86,5- 132,7
Kutu	Inconel 718 (Kayalı, Kanca, & Günen, 2022)	%90 B ₄ C+%10 NaBF ₄	5	1273	Ni ₂ B, Cr ₂ B ₃ , Fe ₂ B	275
Lazer	Inconel 600 (Kulka, Dziarski, Makuch, Piasecki, & Miklaszewski, 2013)	Amorf Bor	-	-	Ni ₂ B, Ni ₃ B, CrB, Cr ₂ B, Fe ₃ B	346-467
Kutu	Monel 400 (Küçük et al., 2022)	%45 Ferrobor+%45 Al ₂ O ₃ +%10 NaBF ₄	2, 4 ve 6	1173,1223 ve 1273	Ni ₂ B, Fe ₂ B, Fe _{0,375} Ni _{0,375} B _{0,25}	32-272
Kutu	Inconel 625 (Lindner, Löbel, Hunger, Berger, & Lampke, 2020)	EKabor Ni	5	1173	Ni ₄ B ₃ , Ni ₂ B, Ni ₆ Si ₂ B	21
Pasta	Nimonic 90 (Lou, Solberg, Akselsen, & Dahl, 2009)	EKabor Paste	2 ve 5	1173, 1223, 1273,1323	Ni ₂ B, CrB	2-80
Kutu	Inconel 718 (Löbel, Lindner, Hanisch, & Lampke, 2021)	EKabor Ni	5	1173	Ni ₂ B, Ni ₃ B	20
Kutu	Incoloy A286 (Türkmen & Korkmaz, 2021)	%22,5 H ₃ BO ₃ +%72,5 SiC+%5KBF ₄	4	1123, 1173, 1223	FeB, Fe ₃ B, CrB, Fe ₂ B, Cr ₃ B ₄ , Ni ₄ B ₃ , Ni ₆ Si ₂ B	16,69- 28,71

Elektrokimyasal	Inconel 600 (Sista et al., 2013)	% 90 Na ₂ B ₄ O ₇ + % 10 Na ₂ CO ₃	0,25	1223	Ni ₄ B ₃ , Ni ₃ B, Ni ₂ B, NiB	81
Gaz	Nimonic 80A (Makuch & Kulka, 2016)	N ₂ -H ₂ -BCl ₃	2	1193	Ni ₃ B, Ni ₂ B, Ni ₄ B ₃ NiB, Cr ₂ B, CrB	75

Genel olarak Tablo 2 incelendiğinde yöntem olarak kutu borlama yönteminin en çok tercih edildiği dikkat çekmektedir. Bunun yanında pasta, gaz, lazer ve elektrokimyasal borlama yöntemlerinin de kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Uygulama kolaylığı ve düşük maliyet gibi avantajları sayesinde kutu borlama yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir. Çalışmalarda çoğunlukla Inconel 718 alaşımının kullanıldığı gözlemlenmekle beraber borlama işlemlerinde kullanılan borlama karışımlarında bor kaynağı olarak özellikle B₄C kullanımı tespit edilmiştir. İşlem parametrelerine (sıcaklık, süre vb.) bağlı olarak oluşan borür tabakası kalınlıklarının değiştiği ve Ni bazlı süper alaşımlarda çeşitli Ni borür oluşumlarının baskın olduğu gözlemlenmektedir. Genel olarak literatür çalışmalarındaki borlama sonrası yüzey sertlik verilerine bakıldığında yaklaşık 1500-3000 HV aralığında değişen yüzey sertliği değerleri elde edildiği ifade edilmektedir (Gunen, A., Kanca, 2017; Günen et al., 2021; Günen, Keddam, Erdoğan, et al., 2022; Türkmen & Korkmaz, 2021).

5. SONUÇ

Tablo 2’de ifade edilen literatürdeki çalışmalar ışığında aşağıda belirtilen şu genel sonuçlar elde edilmiştir:

- Süper alaşımların yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla borlama işlemi yaygın olarak tercih edilmekte ve çoğunlukla kutu borlama metodu kullanılmaktadır.
- Borlama işlemleri genellikle 1073-1473 K sıcaklık ve 0,5-10 saat süre aralığında gerçekleştirilmektedir.
- Borlama karışımı içeriğinde bor kaynağı olarak en çok B₄C tercih edilirken, aktivatör olarak KBF₄ ve NaBF₄ tercih

edildiği görülmektedir. Silisit oluşumlarından kaçınmak için seyreltici (SiC) kullanımının genelde tercih edilmediği de gözlemlenmektedir.

- Ni esaslı süper alaşımlarda borür tabakasında çeşitli Ni ve Cr borür oluşumları çoğunlukla görülmekle birlikte Fe borür yapıları da gözlemlenebilmektedir. Co esaslı süper alaşımlarda ise Co borür oluşumları varlığı analizler sonucunda ifade edilmektedir.
- Genel olarak, borlama işlemi ile süper alaşım malzemelerin yüzey sertliğinin ve tribolojik özelliklerinin geliştiği çalışmalarda açıkça ortaya konmaktadır.

KAYNAKÇA

- Akca, B., & Çalık, A. (2017). Characterization of borided pure molybdenum under controlled atmosphere. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 53, 511-517.
- Akca, E., & Gürsel, A. (2015). A review on superalloys and IN718 nickel-based INCONEL superalloy. *Periodicals of engineering and natural sciences*, 3(1).
- Antolovich, S. D. (2015). Microstructural aspects of fatigue in Ni-base superalloys. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2038), 20140128.
- Ataibis, V., & Taktak, S. (2015). Characteristics and growth kinetics of plasma paste borided Cp-Ti and Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 279, 65-71.
- Barkat, A., Hammou, A., & Allaoui, O. (2017). Effect of boriding on the fatigue resistance of C20 carbon steel. *Acta Physica Polonica A*, 132(3), 813-815.
- Başman, G., Arıkan, M. M., Arısoy, C., & Şeşen, K. (2023). A Kinetic Study of Thermochemically Borided AISI 316L

- Stainless Steel. *Journal of Scientific Reports-A*, (052), 279-296.
- Betteridge, W., & Shaw, S. W. K. (1987). Development of superalloys. *Materials science and technology*, 3(9), 682-694.
- Boesch, W. (1989). Introduction—Superalloys. In *Superalloys Supercomposites Superceramics* (pp. 1-7). Academic Press.
- Brandt, D. A. (1985). *Metallurgy Fundamentals*. The Goodheart-Willcox Company. Inc. Publisher.
- Campos-Silva, I., Contla-Pacheco, A. D., Figueroa-López, U., Martínez-Trinidad, J., Garduño-Alva, A., & Ortega-Avilés, M. (2019). Sliding wear resistance of nickel boride layers on an Inconel 718 superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 378, 124862.
- Campos-Silva, I., Contla-Pacheco, A. D., Ruiz-Rios, A., Martínez-Trinidad, J., Rodríguez-Castro, G., Meneses-Amador, A., & Wong-Angel, W. D. (2018). Effects of scratch tests on the adhesive and cohesive properties of borided Inconel 718 superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 349, 917-927.
- Campos-Silva, I. E., & Rodriguez-Castro, G. A. (2015). Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. In *Thermochemical surface engineering of steels* (pp. 651-702). Woodhead Publishing.
- Contla-Pacheco, A. D., Keddani, M., Lartundo-Rojas, L., Ortega-Avilés, M., Mejía-Caballero, I., & Campos-Silva, I. (2021). Application of the Heat Balance Integral Method to the growth kinetics of nickel boride layers on an Inconel 718 superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 420, 127355.

- Davis, J. R. (Ed.). (2002). Surface hardening of steels: understanding the basics. 213-216, ASM international.
- Deng, D. W., Wang, C. G., Liu, Q. Q., & Niu, T. T. (2015). Effect of standard heat treatment on microstructure and properties of borided Inconel 718. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25(2), 437-443.
- Diltemiz, S. F., & Zhang, S. (2013). Superalloys for super jobs. Aerospace Material Handbook, 1-76.
- Donachie, M. J., & Donachie, S. J. (2002). Superalloys: a technical guide. ASM international.
- Dziarski, P., Makuch, N., & Kulka, M. (2017). Influence of gas boriding on corrosion resistance of Inconel 600-alloy. Archives of Materials Science and Engineering, 84(1), 23-33.
- Eraslan, R. (2023). Bilyeli Öğütme ve Kutu Borlama Yöntemleri ile AISI 1018 Çelik Yüzeyinin Kaplanması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, Tokat, 126 s. (Doktora Tezi)
- Esfahani, H., Abdollahzadeh, A., Dabir, F., & Samar, M. R. (2020). Enhanced surface protection of in-738lc ni based alloy by metallic borides and aluminium borate coating via short time powder pack method. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 56, 567-574.
- García-Léon, R. A., Martínez-Trinidad, J., & Campos-Silva, I. (2021). Historical review on the boriding process using bibliometric analysis. Transactions of the Indian Institute of Metals, 74, 541-557.
- Geddes, B., Leon, H., & Huang, X. (2010). Superalloys: alloying and performance. ASM International.

- Gialanella, S., Malandrucolo, A., Gialanella, S., & Malandrucolo, A. (2020). Gas turbine aero-engines. *Aerospace Alloys*, 17-39.
- Giriskan, I., & Çam, G. (2023). Characterization of microstructure and high-temperature wear behavior of pack-borided Co-based Haynes 25 superalloy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 45, 82-98.
- Gunen, A., & Kanca, E. (2017). Microstructure and mechanical properties of borided inconel 625 superalloy. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22.
- Günen, A. (2020). Properties and high temperature dry sliding wear behavior of boronized Inconel 718. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51, 927-939.
- Günen, A., Döleker, K. M., Korkmaz, M. E., Gök, M. S., & Erdogan, A. (2021). Characteristics, high temperature wear and oxidation behavior of boride layer grown on nimonic 80A Ni-based superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 409, 126906.
- Günen, A., & Ergin, Ö. (2023). A comparative study on characterization and high-temperature wear behaviors of thermochemical coatings applied to cobalt-based haynes 25 superalloys. *Coatings*, 13(7), 1272.
- Günen, A., Keddám, M., Alkan, S., Erdoğan, A., & Çetin, M. (2022). Microstructural characterization, boriding kinetics and tribo-wear behavior of borided Fe-based A286 superalloy. *Materials Characterization*, 186, 111778.
- Günen, A., Keddám, M., Erdoğan, A., & Karakaş, M. S. (2021). Pack-Boriding of Monel 400: Microstructural Characterization and Boriding Kinetics. *Metals and Materials International*, 1-13.

- Hawk, C. (2016). Wide gap braze repairs of nickel superalloy gas turbine components. Colorado School of Mines.
- Hosford, W. F. (2010). Physical metallurgy. CRC press.
- Kanca, Y. (2022). Microstructural characterization and dry sliding wear behavior of boride layers grown on Invar-36 superalloy. Surface and coatings technology, 449, 128973.
- Kanca, Y., Uçgun, M. C., & Günen, A. (2023). Microstructural and tribological behavior of pack-borided Ni-based Hastelloy C-276 superalloy. Metallurgical and materials transactions A, 54(2), 671-687.
- Kayalı, Y. Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon, 2011, 219 s. (Doktora Tezi)
- Kayalı, Y., Kanca, E., & Günen, A. (2022). Effect of boronizing on microstructure, high-temperature wear and corrosion behavior of additive manufactured Inconel 718. Materials Characterization, 191, 112155.
- Kishawy, H. A., & Hosseini, A. (2019). Machining difficult-to-cut materials. Mater. Form. Mach. Tribol, 10, 978-3.
- Kracke, A., & Allvac, A. (2010, October). Superalloys, the most successful alloy system of modern times-past, present and future. In Proceedings of the 7th International Symposium on Superalloy (Vol. 718, pp. 13-50).
- Küçük, Y., Döleker, K. M., Gök, M. S., Dal, S., Altınay, Y., & Erdoğan, A. (2022). Microstructure, hardness and high temperature wear characteristics of boronized Monel 400. Surface and Coatings Technology, 436, 128277.
- Kulka, M., Dziarski, P., Makuch, N., Piasecki, A., & Miklaszewski, A. (2013). Microstructure and properties

- of laser-borided Inconel 600-alloy. *Applied Surface Science*, 284, 757-771.
- Lindner, T., Löbel, M., Hunger, R., Berger, R., & Lampke, T. (2020). Boriding of HVOF-sprayed Inconel 625 coatings. *Surface and Coatings Technology*, 404, 126456.
- Löbel, M., Lindner, T., Hanisch, N., & Lampke, T. (2021, May). High-temperature wear behaviour of borided Inconel 718 HVOF coatings. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1147, No. 1, p. 012032). IOP Publishing.
- Lou, D. C., Solberg, J. K., Akselsen, O. M., & Dahl, N. (2009). Microstructure and property investigation of paste boronized pure nickel and Nimonic 90 superalloy. *Materials Chemistry and Physics*, 115(1), 239-244.
- Maçkan, N. B. (2019). Fe-Cr- Ni Üçlü Alaşımlarının Borlanması ve Karakterizasyonu. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gebze, 96 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- Makuch, N., & Kulka, M. (2016). Fracture toughness of hard ceramic phases produced on Nimonic 80A-alloy by gas boriding. *Ceramics international*, 42(2), 3275-3289.
- Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to Aerospace Materials*. Elsevier, 1-621.
- Mu, D., Yang, C., Shen, B. L., & Jiang, H. (2009). Oxidation resistance of borided pure cobalt. *Journal of Alloys and Compounds*, 479(1-2), 629-633.
- Özbek, I., Akbulut, H., Zeytin, S., Bindal, C., & Ucisik, A. H. (2000). The characterization of borided 99.5% purity nickel. *Surface and Coatings Technology*, 126(2-3), 166-170.
- Özsoy, A. (1991). Çeliğin Borlanması ve Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi,

- Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 114 s. (Doktora Tezi)
- Pashechko, M., Dziedzic, K., & Jozwik, J. (2020). Analysis of wear resistance of borided steel C45. *Materials*, 13(23), 5529.
- Reed, R. C. (2008). *The superalloys: fundamentals and applications*. Cambridge university press.
- Saygın, M. (2006). AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 59 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- Sims, C. T., Stoloff, N. S., & Hagel, W. C. (Eds.). (1987). *superalloys II (Vol. 8)*. New York: Wiley.
- Sista, V., Kahvecioglu, O., Kartal, G., Zeng, Q. Z., Kim, J. H., Eryilmaz, O. L., & Erdemir, A. (2013). Evaluation of electrochemical boriding of Inconel 600. *Surface and Coatings Technology*, 215, 452-459.
- Suwattananont, N. (2004). *Surface Treatment of Ferrous Alloys with Boron*. New Jersey Institute of Technology. New Jersey Institute of Technology.
- Tarakci, M., Gencer, Y., & Calik, A. (2010). The pack-boronizing of pure vanadium under a controlled atmosphere. *Applied Surface Science*, 256(24), 7612-7618.
- Türkmen, İ. (2018). Farklı Bor Türevleri ile Alternatif Borlama Bileşimlerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Manisa, 193 s. (Doktora Tezi)
- Türkmen, İ., & Korkmaz, A. (2021). Microstructural and mechanical characterization of powder-pack boronized Incoloy A286 superalloy. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 9(1), 015002.

- Türkmen, İ., & Yalamaç, E. (2018). Growth of the Fe₂B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H₃BO₃ during the powder-pack boriding method. *Journal of Alloys and Compounds*, 744, 658-666.
- Uluköy, A., & Can, A. Ç. (2006). Çeliklerin Borlanması. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 189-198.
- Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., & Bindal, C. (2007). Evaluation of borides formed on AISI P20 steel. *Materials & design*, 28(1), 55-61.
- Usta, M., Ozbek, I., Ipek, M., Bindal, C., & Ucisik, A. H. (2005). The characterization of borided pure tungsten. *Surface and Coatings Technology*, 194(2-3), 330-334.
- Usta, M. (2005). The characterization of borided pure niobium. *Surface and Coatings Technology*, 194(2-3), 251-255.
- Wang, L. N., Li, F. H., Dong, M. G., & Li, Y. N. (2014). Effects of additives on the surface layers of boronized tc4 titanium alloys. *Advanced Materials Research*, 887, 384-387.
- Wu, S. J., Li, H., Wu, S. Y., Guo, Q., & Guo, B. (2014). Preparation of titanium carbide-titanium boride coatings on Ti6Al4V by PIRAC. *Surface engineering*, 30(9), 693-696.
- Zhang, S., & Zhao, D. (Eds.). (2016). *Aerospace materials handbook*. CrC Press.
- Züleyha, B. (2022). Plastik Enjeksiyon Kalıp Çelik Yüzeylerinin Borlama ile Geliştirilmesi. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gebze, 150 s. (Yüksek Lisans Tezi)

SERAMİK SEKTÖRÜNDE ATIKSULAR VE ARITIM TEKNOLOJİLERİ

Sercan GÜLMEZ¹

Bekir Fatih KAHRAMAN²

Ahmet ALTIN³

1. GİRİŞ

Seramik sektörü; seramik karoları, seramik sağlık gereçleri (vitrifiye), tuğla gibi ürünleri üreten bir endüstridir. Ülkemizin seramik endüstrisi kaplama malzeme ihracatı 18,4 milyar dolar, seramik sağlık gereçleri ihracatı ise yaklaşık 8,8 milyar dolardır. Türkiye seramik sağlık gereçleri ihracatında en büyük beşinci ülkedir. (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2015)

Seramik sağlık gereçlerinin üretimi sırasında hava, su ve toprak ortamlarında olumsuz etkiler oluşabilmekte, üretim için gerekli yüksek enerji sebebiyle de önemli ölçüde çevresel riskler içermektedir. Örneğin ağır metal içermesi nedeniyle üretim aktiviteleri sonucu ortaya çıkan atıksuların canlılar üzerinde toksik bir etkisi vardır. (Siti Hanna, ve diğerleri, 2014) Bununla birlikte proses atıksularının katı madde içeriği yüksektir ve arıtım işlemleri sonucu oluşan fazla miktardaki çamur önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

¹ Çevre Mühendisi, (Çanakçılar Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Zonguldak), sercangulmez@yahoo.com, ORCID: 0000-0001-7515-9583.

² Dr. Öğr. Üyesi, (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği), bfatihkahraman@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0298-8118.

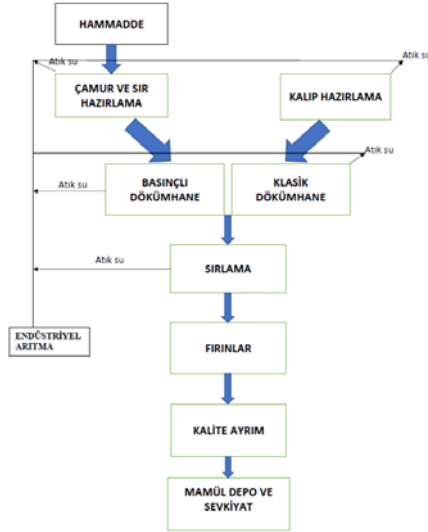
³ Prof. Dr., (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği), aaltin@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9398-3111.

Bu çalışmada ilk önce seramik sağlık gereçleri üretim prosesi genel olarak tanımlanmış, üretim aşamalarında atıksu oluşturan üniteler detaylandırılmıştır. Ardından seramik endüstrisi atıksuyunun oluşumu ve fizikokimyasal özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Çalışmanın son bölümünde seramik sağlık gereçleri proses atıksularının arıtılmasında kullanılan güncel arıtma teknolojileri tanıtılmış ve örnek çalışmalar üzerinden bu teknolojilerin olumlu ve olumsuz yönleri irdelenmiştir.

2. SERAMİK SAĞLIK GEREÇLERİ

Seramik sağlık gereçleri; kaolen, silis kumu, feldspat, kil gibi hammaddelerin belirli oranlarda değirmenlerde karıştırılarak çamur haline getirilip alçı veya reçine kalıplara dökülerek şekillendirilip yaklaşık 1250°C’de pişirilerek elde edilen ürünlerdir. Seramik sağlık gereçleri üretiminde kullanılan genel proses akım şeması Şekil 1’de gösterilmiş ve proseste yer alan önemli üniteler aşağıda detaylandırılmıştır.

Şekil 1. Seramik Sağlık Gereçleri Üretim Akım Şeması



2.1.Çamur ve Sır Hazırlama

Üretim ihtiyaçlarına göre belirlenen bir ürün reçetesinde yer alan hammaddeler değirmen içerisine aktarılarak öğütme ve karıştırılma işlemi yapılır. Değirmenlerde hazırlanan çamur ve sır açıcılara alınır. Burada çamur dökümhanelere, sır ise sırlama bölümüne gönderilmek üzere bekletilir. Çamur ve sır hazırlama bölümünde yer yıkamalarından kaynaklı atıksu oluşmaktadır.

2.2.Kalıp Hazırlama

Çamur ve sır hazırlamada hazırlanan çamurun dökümhanelerde dökülebilmesi ve şekillendirilebilmesi için kalıplara ihtiyaç duyulmaktadır. Tasarlanan ürüne göre, önce model kalıp çalışması yapılır ve deneme ürünü dökülür. Deneme sonrasında kalite biriminde ürüne onay verilmesi durumunda model kalıp teksir (alçı) kalıba çevrilerek seri üretime hazırlanır.

Alçı hazırlama tanklarında alçı kullanıldıktan sonra kurumuş şekilde tank çeperlerinde alçı kalmaktadır. Bu tankların temizlenmesi sırasında alçı içerikli atıksu oluşmaktadır.

2.3.Klasik Dökümhane

Kalıp hazırlama bölümünden gelen alçı kalıplar döküm tezgahlarına yerleştirilir. Çamur ve sır hazırlamadan gelen çamur alçı kalıplara doldurulduktan sonra, çamurun kalınlık alması beklenir. Kalıplarda kalınlık alan ve şekillendirilen (rötuşlanan) çamur, yarı mamul olarak kalıplardan çıkarılır. Burada yapılan şekillendirme işlemi sırasında sünger ve su kullanıldığından atıksu oluşmaktadır. Kalıptan çıkarılan yarı mamuller yaklaşık 90°C kurutma fırınlarında kurutularak nemini atması sağlanır. Nemini atan ürünler sırlanmak üzere sırlama bölümüne gönderilir.

2.4.Basınçlı Dökümhane

Basınçlı döküm tezgahlarında reçine kalıplar kullanılmaktadır. Çamur ve sır hazırlamadan gelen çamur reçine kalıplar içerisine verilir ve basınç uygulanarak çamurun kalınlık alması sağlanır. Daha sonra klasik dökümhaneye benzer şekilde şekillendirme işlemi (rötuş) ve nemini atma işlemleri gerçekleştirilip sırlama bölümüne gönderilir.

Basınçlı dökümhanede atıksu, her üretim süreci sonrasında reçine kalıpların temizliği ve yarı mamul şekillendirme işlemleri sırasında oluşmaktadır.

2.5.Sırlama ve Fırınlr

Dökümhanelerden gelen yarı mamuller üzerine boşluk kalmayacak şekilde yatay olarak personel veya robotlar ile sırlama işlemi uygulanır. Sırlanan yarı mamul 1250 °C sıcaklıkta pişmek üzere fırına yüklenir ve pişen ürünler fırın sonu soğutmadan geçirilerek kalite bölümüne gönderilir.

Sırlama işlemi yapılırken püskürtme işlemi ile yapıldığından atık sır oluşmakta ve kazanlarda toplanmaktadır. Sır kazanlarının yıkama işlemi sırasında ise bir miktar atıksu oluşumu söz konusudur.

2.6.Kalite

Fırınlarda pişen ürünler kalite biriminde TSE standartlarına göre değerlendirilir. Tamir gerektiren ürünlerin tamir işlemi yapılır, ıskarta olan ürünler ıskartaya ayrılır. Standartlara uygun ürünler ise sevk edilmek üzere sevkiyat bölümüne gönderilir.

2.7.Mamul Depo ve Sevkiyat

Kalite bölümünden gelen ürünler müşterilerin talebine göre paketlenerek stok hazırlanır veya direkt sevk edilir.

3. SERAMİK SEKTÖRÜ ATIKSU ÖZELLİKLERİ

Seramik endüstrisinde hammadde olarak klorit, illit, montmorillonit, kaolinit, gibi değişik kil grupları ve bu kil gruplarına ilaveten dolomit, talk, boksit, zirkonyum, silikat gibi hammaddeler kullanılmaktadır. Bu hammaddelerin üretimi ve işlenmesi sırasında içerisine karışan organik nitelikteki safsızlıklar işletme suyuna geçerek suyun biyokimyasal oksijen ihtiyacını (BOİ) ve kimyasal oksijen ihtiyacını (KOİ) artırmaktadır. Ayrıca sözü edilen hammaddeler atıksuda yüksek toplam katı madde (TKM) askıda katı madde (AKM) içeriğine neden olmaktadır. Bu kirletici parametrelerin yanı sıra, üretim esnasında atıksuya yüksek miktarda kurşun, alüminyum, demir, bakır ve kadmiyum gibi ağır metaller de geçebilmektedir.

Seramik endüstrisinde atıksu yükünü oluşturan başlıca kaynaklar kalıp hazırlama, dökümhane, sırlama prosesleri ve yıkama sularıdır. Özellikle dökümhanede oluşan atıksular yüksek katı madde ve organik içerikleri nedeniyle aşırı kirlilik yüküne sahiptir. Kalıp hazırlama bölümünden gelen atıksular içinde bol miktarda kalsiyum iyonları ve diğer katkı maddeleri bulunur (Dinçer & Kargı, 2000) tarafından yapılan bir çalışmada seramik endüstrisi ham atık su özellikleri Tablo 1’de verildiği şekilde tanımlanmıştır.

Tablo 1. Ham Atıksu Özellikleri (Dinçer & Kargı, 2000)

Parametre	Değer
KOİ (mg/L)	750-8000
AKM (mg/L)	66
TKM (mg/L)	70
Tuzluluk (%)	0,02
pH	7.9

Sektörde uyulması gereken deşarj standartları 25687 sayılı 31.12.2004 tarihli resmi gazete yayınlanan “Su Kalitesi Kontrolü Yönetmeliği” (SKKY) ile belirlenmiştir. İlgili yönetmeliğin standart değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. SKKY'e göre atıksu deşarj limitleri

Parametre	Değer
KOI (mg/L)	70
AKM (mg/L)	100
Kurşun (mg/L)	1
Kadmiyum (mg/L)	0,1
Çinko (mg/L)	3
pH	6-9

4. SERAMİK SAĞLIK GEREÇLERİ ÜRETİM SEKTÖRÜNDE KULLANILAN ATIKSU ARITMA TEKNOLOJİLERİ

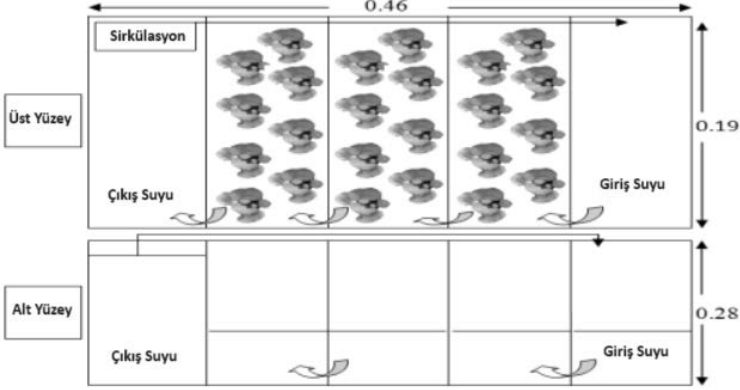
Seramik endüstrisi atık sularının arıtımında genellikle koagülasyon-flokülasyon yöntemi tercih edilmektedir. Yöntemde koagülant olarak alüminyum sülfat, demir (III) klorür gibi koagülantlar (Erkan, 2019) ve flokülant olarak da polielektrolit kullanılır. Polielektrolitler su ve atıksu arıtımında diğer flokülantlara göre daha çok verime sahiptir.

Yukarıda bahsedilen geleneksel yöntemler haricinde daha yüksek arıtma verimlerine sahip ve geleneksel yöntemlerin dezavantajlarını ortadan kaldıracak yenilikçi yöntemler üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir. Literatürde adsorpsiyon-flokülasyon, nanofiltrasyon, membran ve rizofiltrasyon gibi farklı teknolojiler seramik endüstrisi atıksularının arıtılmasında denenmiştir.

(Siti Hanna, ve diğerleri, 2014) su sümbülü kullanarak rizofiltrasyon ile seramik endüstrisi atıksularının arıtılmasını ele almıştır. Çalışmada biyo adsorpsiyon temel arıtma mekanizması olarak kullanılmıştır. Üç bölmeli ve geri devirli bir rizofiltreden oluşan sisteme ait deneysel yapı Şekil 2'de verilmiştir. Atıksuyun rizofiltrelerde kalış süresi 5 gün olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda su sümbülü kullanılan rizofiltrasyon metodu ile ağır

metal ve organik kirleticilerin arıtımının başarılı sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.

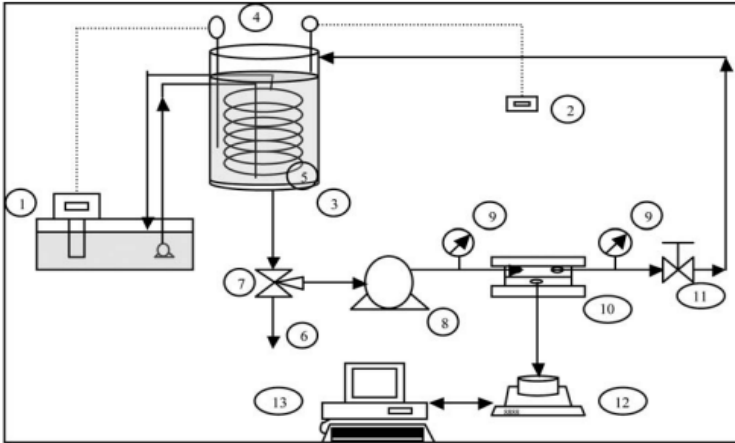
Şekil 2. Rizofiltrasyon Deney Düzenegi



Kaynak: (Siti Hanna, ve diğerleri, 2014)

(Salvador, Deratani, Palmeri, & Sanchez, 2012) Seramik endüstrisi atıksularını nanofiltrasyon membranları kullanarak arıtmasını çalışmışlardır. Deney düzenegi Şekil 3'te verilmiştir.

Şekil 3. Nanofiltrasyon Deney Düzenegi



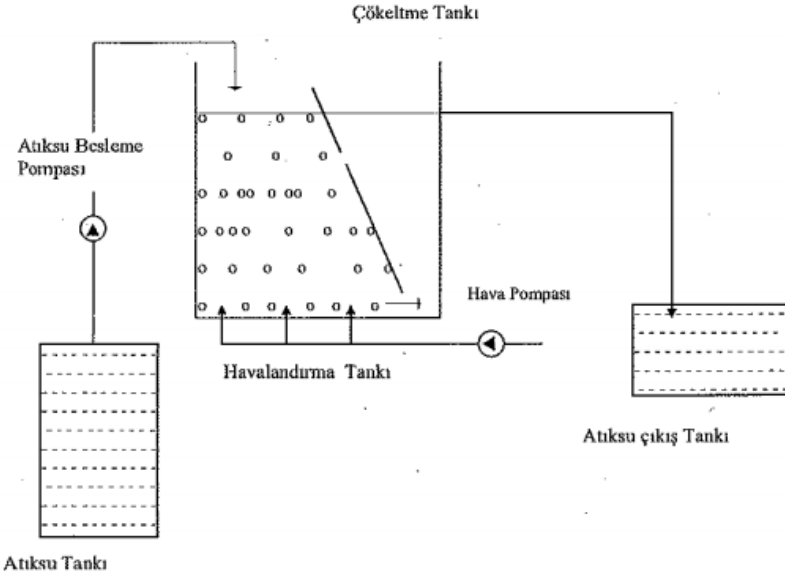
1-Dengeleme Havuzu, 2-Sıcaklık Ölçer, 3-Besleme Tankı, 4-Sıcaklık Probu, 5-Bobin, 6-Deşarj vanası, 7-Üç Yollu Valf, 8-Yüksek Basınç Pompası, 9-Manometre, 10-Membran Sistemi, 11-Basınç Kontrol Vanası, 12-Terazi, 13-Bilgisayar

Kaynak: (Salvador, Deratani, Palmeri, & Sanchez, 2012)

Elde edilen deneysel bulgular, ilgili teknolojinin %90 üzerinde KOİ verimine sahip olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda nanofiltrasyon teknolojisi seramik endüstrisi atıksularının arıtılması için iyi bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

(Dinçer & Kargı, 2000) seramik endüstrisi atıksularının özellikleri ve biyolojik arıtılabilirliğini incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan aktif çamur prosesi deney düzeneği Şekil 4’te verilmiştir. Sistem değişik hidrolik alıkonma süreleri ve çamur yaşı değerlerinde işletilerek atıksudan KOİ giderim verimleri ölçülmüştür.

Şekil 4. Aktif Çamur Prosesi

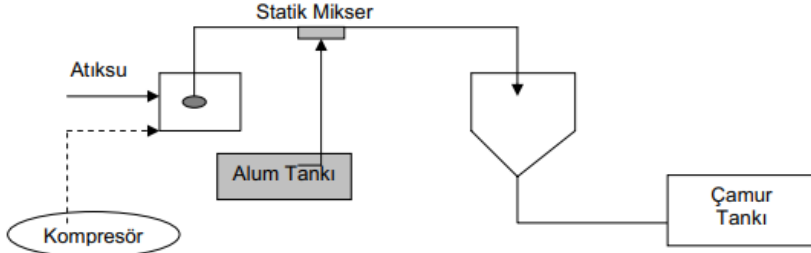


Kaynak: (Dinçer & Kargı, 2000)

Deneyler sonucunda seramik endüstrisi atıksularının biyolojik arıtılabilirliği iyi sonuçlar vermiş fakat işletme bakımı ve maliyetin çok olduğu belirtilmiştir. (Şahin, Elmaslar, Tüfekçi, & Bayat, 2005) seramik endüstrisi atıksularının kimyasal

arıtılabirliğini incelemiştir. Deneyin yapıldığı fabrikada bulunan mevcut arıtma sisteminin akış şeması Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5. Kimyasal Arıtma İçin Öngörülen Deneysel Düzenek



Kaynak: (Şahin, Elmaslar, Tüfekçi, & Bayat, 2005)

DeneySEL çalışmalar sonucunda 200 mg/L'lik bir alum dozlaması ile KOİ giderim veriminin % 90'a çıktığı belirlenmiştir. Sistemde AKM giderimi %98 mertebesinde bir verim gözlenmiştir.

Tablo 3'te yukarıda değerlendirilen arıtma teknolojilerinin verimlerine ait özeti bulunmaktadır. Halihazırda bulunan seramik sağlık gereçleri üretim tesislerinin atıksu arıtımının büyük bir bölümü kimyasal arıtma ile yapılmaktadır. Bu yöntemin seçilmesindeki en büyük etken diğer arıtma teknolojilerine göre daha ekonomik ve işletilmesinin daha kolay olmasıdır. Nanofiltrasyon sistemlerinin işletilmesi zor ve maliyeti yüksektir. Biyolojik arıtmada ise hidrolik kalış süresi fazladır ve sektörde var olan yüksek debilerin çok sayıda işletme problemi oluşturması olasıdır.

Tablo 3. Arıtma Teknolojileri Verim Karşılaştırması

Yöntem	Arıtma Verimi	Referans
Kimyasal Arıtma	%98 AKM, %90 KOİ giderimi	Şahin ve ark. 2012
Biyolojik Arıtma	%93 AKM, %96 KOİ giderimi	Diñçer ve ark. 2000
Nanofiltrasyon	%90 AKM, %90 KOİ giderimi	Salvador ve ark.2012
Rizofiltrasyon	%88 TOK, %84 KOİ giderimi	Elias ve ark. 2014

5. SONUÇLAR

Seramik endüstrisi atıkları çevresel risklerin en aza indirilmesi noktasında uygun yöntemlerle bertaraf edilmelidir. Seramik sağlık gereçleri proses atıksularının yüksek KOİ ve AKM içeriği, verimli ve uygun bir arıtma yöntemi seçilmesini gerekli kılmaktadır. Hali hazırda yaygın olarak kullanılmakta olan geleneksel koagülasyon-flokülasyon yöntemine alternatif yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi arıtma verimlerinin iyileştirilmesi, potansiyel geri kazanım ve yeniden kullanım fırsatlarının değerlendirilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi açısından önem arz etmektedir.

Yenilikçi arıtma teknolojileriyle ilgili araştırmalarda yoğunlaşılması gereken en önemli kriterlerin başında katı maddelerin çökelme hızları ve pH dengesi gelmektedir. Seramik sağlık gereçleri üretiminde kalıp yıkamalardan kaynaklı atıksu içerisindeki sodyum hipoklorit yüzünden pH değerlerinde sürekli dalgalanmalar görülmektedir. Bu nedenle arıtma süreci içerisinde pH'ı stabil tutmaya yönelik çalışmalara yoğunlaşılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Dinçer, A., & Kargı, F. (2000). Seramik Endüstrisi Atıksularının Özellikleri ve Biyolojik Arıtılabilirliği. *Çevre, Bilim & Teknoloji (Çevre Mühendisleri Odası)*, 24-28.
- Erkan, H. S. (2019). Ceramic Industry Wastewater Treatment by Chemical Coagulation Process: a statistical. S. University içinde, *Sakarya University Journal of Science* (s. 233-243). Sakarya.
- Salvador, R., Deratani, A., Palmeri, J., & Sanchez, E. (2012). Use of Nanofiltration Membrane Technology for Ceramic Industry. L. S. Vidrio içinde, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* (s. 103-110).

- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2015). *Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Faaliyet Raporu*. Ankara: Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.
- Siti Hanna, E., Maketab, M., Aznah, N.-A., Khalida, M., Mohd, H., Mohd., O., & Shreeshivadasan, C. (2014). Ceramic Industry Wastewater Treatment by Rhizofiltration System - Application of Water Hyacinth Bioremediation. *The IIOAB Journal*, 6-14.
- Şahin, Ü., Elmaslar, E., Tüfekçi, N., & Bayat, C. (2005). Seramik Endüstrisi Atıksularının Kimyasal Arıtılabilirliği. *Türk Sucul Yaşam Dergisi*, 356-359.

TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK ALANINDA YAŞANAN GELİŞMELER



YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com

ISBN: 978-625-6524-80-4



9 786256 524804