



MÜHENDİSLİKTE ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRMELER - I *Aralık 2022*

Editörler

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP

Doç. Dr. Nurettin AKÇAKALE

İmtiyaz Sahibi / Publisher • Yaşar Hız
Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel
Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı
Editörler / Editors • Prof. Dr. Coşkun ÖZALP
Doç. Dr. Nurettin AKÇAKALE
Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2022
ISBN • 978-625-430-559-7

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin
almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Gece Kitaplığı.

Citation can not be shown without the source, reproduced in any way
without permission.

Gece Kitaplığı / Gece Publishing

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

Ümit Apt. No: 22/A Çankaya / Ankara / TR

Telefon / Phone: +90 312 384 80 40

web: www.gecekitapligi.com

e-mail: gecekitapligi@gmail.com



Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

Mühendislikte Araştırma ve Değerlendirmeler - I

Aralık 2022

Editörler

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP
Doç. Dr. Nurettin AKÇAKALE

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

YENİLEBİLİR BİTKİ KAYNAKLI EKSOZOM BENZERİ NANOPARTİKÜLLER

Elif Feyza TOPDAŞ..... 1

BÖLÜM 2

VİNÇ VE KRENLERİN PERİYODİK MUAYENELERİNDE KARŞILAŞABİLECEK UYGUNSUZLUKLARIN ANALİZİ

Celal GÜNGÖR, Tamer GÜNAY..... 17

BÖLÜM 3

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMİ VE UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİNİN GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ UYGULAMALARI ÜZERİNDEKİ ROLÜ

Osman Salih YILMAZ, Fatih GÜLGEN..... 33

BÖLÜM 4

SAC METAL ŞEKİLLENDİRMEDE GERİ YAYLANMA

Vedat TAŞDEMİR..... 49

BÖLÜM 5

BİYOMALZEME OLARAK Si_3N_4 İLERİ TEKNOLOJİ SERAMİKLERİN KULLANIMLARI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Pınar UYAN..... 69

BÖLÜM 6

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALARIN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Aylin AKYILDIZ 85

BÖLÜM 7

YÜKSEK FIRIN VE ÇELİKHANE CÜRUFU GEOPOLİMER HARÇLARDA BASINÇ DAYANIMININ TAHMİN EDİLMESİ

Şinasi BİNGÖL 99

BÖLÜM 8

TİTREŞİM ANALİZİNİN RULMANLARDA KULLANILMASININ GENEL OLARAK İNCELENMESİ

Demirali SEVENER, Can COŞKUN, Zuhul OKTAY..... 109

BÖLÜM 9

DOĞAL TAŞ OCAKLARINDA KULLANILAN ZİNCİRLİ KESME MAKİNELERİ

Arif Emre DURSUN 129

BÖLÜM 10

GIDA KAYNAKLI OPIOİD PEPTİTLER

Seval ANDİÇ 151

BÖLÜM 11

ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR VE ÇİFT YÖNLÜ ŞEKİL HAFIZA ÖZELLİĞİ

Bekir YAVUZER..... 179

BÖLÜM 12

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA VE BATARYA SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Pevril Demir ARI, Zuhul OKTAY, Can COŞKUN..... 203

BÖLÜM 13

MOLEKÜLER SİMÜLASYON METOTLARININ SEYREK AKIŞ PROBLEMLERİNDEKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Mustafa KOÇ..... 215

BÖLÜM 14

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ KABLOSUZ ŞARJ İSTASYONU TASARIMI

Metin DEMİRTAS, Haris CALGAN, Erdem ILTEN..... 241

BÖLÜM 15

YANGIN BİLGİ SİSTEMİ: KONYA İLİ

Hatice Canan GÜNGÖR..... 267



BÖLÜM 1

YENİLEBİLİR BİTKİ KAYNAKLI EKSOZOM BENZERİ NANOPARTİKÜLLER

Elif Feyza TOPDAŞ¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE, e-posta: efeyza.topdas@atauni.edu.tr (ORCID: 0000-0003-3778-3654)

Giriş

Yaklaşık 40 yıl önce Trams ve arkadaşları plazma membranından türetilen veziküllerin tamamını “eksozomlar” olarak adlandırmış ve bu yapıları 5’ nükleotid enzim aktivitesine sahip membran vezikülleri olarak kabul etmişlerdir (Trams vd., 1981; Zhang vd., 2020). Takip eden yıllarda ratlarda kırmızı genç kan hücrelerinin (retikülositler) transferrin reseptörlerini hücre dışı boşluğa taşıyan 50 nm’lik küçük kesecikler saldırdığı belirlenmiş (Harding vd., 1983) ve salınan bu nano boyutlu veziküllere Johnstone vd. (1987) tarafından günümüzde bilinen anlamıyla “eksozomlar” denmiştir.

Eksozomlar başlangıçta farklı türde moleküler yapılar içerdiğinin tespiti üzerine hücrenin metabolitlerinden kurtulmanın bir yolu olarak görülmüş ve hücrelerin çöp kutuları olarak nitelendirilmiştir (Takahashi vd., 2017). 1996 yılında eksozomların izolasyonu gerçekleştirilmiş olup; antijen sunma ve T hücresi tepkilerini indüklemeye özellikleri tespit edilmiştir (Raposo vd., 1996). Zamanla yapılan çeşitli araştırmalar neticesinde eksozomların hücreler arası iletişimde önemli rolleri olan birçok farklı materyal içerdiği ve her bir eksozomun kendine özgü olduğu anlaşılmıştır (Hoshino vd., 2015). Hatta eksozomların T, mast, tümör, dentrik, nöron, epitel ve endotel hücreleri gibi farklı hücre tiplerinden de salındığı belirlenmiştir (Schmid ve Jensen, 2008).

Boyutları 30-100 nm aralığında değişen hücre dışı veziküllerin alt grubu olan eksozomlar farklı organizmaların biyolojik sıvılarında bulunan nanometre boyutunda veziküllerdir (30-100 nm). Bu nanoyapıların kan, idrar, amniyonik sıvı, tükürük, anne sütü, beyin omurilik sıvısı, lenf ve safra gibi farklı vücut sıvılarında buldukları tespit edilmiştir (Zhang ve Wang, 2015). Zhang vd. (2018) yaptığı sınıflandırmada bu nanoyapıları 90-120 nm boyutunda büyük eksozom vezikülleri ve 60-80 nm boyutunda küçük eksozom vezikülleri olmak üzere iki alt gruba ayırmıştır.

Eksozomların genomik DNA, mRNA, mikro RNA (miRNA), biyoaktif lipidler veya çeşitli proteinler gibi üretici hücrenin çeşitli moleküler bileşenlerini taşıdıkları bilinmektedir (Buzas vd., 2014; Robbins ve Morelli, 2014; Zhang ve Grizzle, 2014; İnanır ve Ekici, 2020). Çeşitli biyokimyasal ve proteomik analizler ile eksozomların içerdiği özel lipid ve proteinler tanımlanmıştır (Thery vd., 2001; Wubbolts vd., 2003). ExoCarta Exosome Protein ve RNA Veritabanı’na göre, ısı şok proteini 8 (HSPA8) ve tetraspanin CD63, eksozomlarda en sık tanımlanan proteinlerdir (<http://exocarta.org/index.html#>). Eksozomlarda sıklıkla bulunan diğer proteinler ise endozomal sisteme (farklı Rab-GTPazlar veya ESCRT I kompleksindeki Tsg101 gibi), hücre iskeletine (aktin, moesin, cofilin ve tübülünler gibi) ve membran mikro alanlarının organizasyonuna (tetraspaninler CD9, CD81 ve CD82 veya flotillinler Flot1 ve Flot2 gibi) bağlı olan proteinlerdir

(Zhang vd., 2020). Eksozomu saran lipid tabakası ise seramid, sfingomyelin, kolesterol ve gliserolfosfolipidler açısından hücre zarına kıyasla daha zengindir. Bu yapı eksozomun stabilitesi ve hücreden salınımında etkilidir (Bozkurt, 2018).

Eksozomların hedef hücrenin zarına bağlanabildiği veya onunla kaynaşabildiği ve böylece hücreye eksozomal yüzey proteinlerini ve sitozolik bileşenleri iletebildiği düşünülmektedir (Thery vd., 2002). Ayrıca endositoz gibi bir mekanizma yoluyla da eksozomların alıcı bir hücre tarafından içselleştirilebildiği ve böylece hücre dışı haberciler olarak görev yaptığı bildirilmektedir (Braicu vd., 2015). Zhang vd. (2016) eksozomların biyoaktif içeriklerini uzak hücrelere aktararak hücreler arası iletişimi sağlamanın yanı sıra alıcı hücrelerde gen ve protein ekspresyon seviyelerini düzenlediğini de bildirmiştir. Özellikle son yirmi yılda artan çalışmalar eksozomların farklı biyolojik süreçlerde hücreler arası iletişime katkı sağladığını, hücre proliferasyonu, laktasyon, inflamasyon, immünolojik yanıt ve nöronal fonksiyonda önemli görevlerinin olduğunu (Smith vd., 2015) ve kanser ile diğer dejeneratif hastalıkların patogeneğinde rol oynayabildiklerini göstermiştir (Kim vd., 2005; Vella vd., 2007). Ayrıca eksozomların kan-beyin bariyerini geçebildiği de tespit edilmiştir (Keller vd., 2007).

Bitki kaynaklı eksozom benzeri nanopartiküllerin izolasyonu ve karakterizasyonu

Bitki kaynaklı eksozom benzeri nanopartiküller memeli hücrelerinden elde edilen nanopartiküllerden yaklaşık 15 yıl önce gözlenmiş olmasına rağmen (Harding vd., 1983; Pan vd., 1983), varlıklarını ispatlamak için eski mikroskopi görüntülerinin ötesine geçilememiştir (Halperin ve Jensen, 1967; Marchant ve Robards, 1968). Ancak son yıllarda yürütülen çalışmalar ile birçok meyve ve sebzede eksozom benzeri nano boyutlu parçacıkların bulunduğu ispatlanmış, izolasyon ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir (Taylor ve Gercel-Taylor, 2008; Regente vd., 2012).

Bitki kaynaklı eksozom benzeri nanopartiküllerin bitkilerin çekirdek, yaprak, filiz ve kök gibi apoplastik vezikülleri veya sularından ekstrakte edildiklerini bildiren birçok çalışma mevcuttur (Zhuang vd., 2015; Stanly vd., 2016; Rutter ve Innes, 2017). Eksozomların dokulardan izolasyonunda en büyük zorluk, oldukça saf ve iyi karakterize edilmiş eksozom popülasyonları elde etmek için standart yöntemlerin olmamasıdır. Ne yazık ki yapılan birçok çalışmada izole edilmiş eksozom popülasyonlarının saflığı değerlendirilememiştir.

Eksozomlar genellikle karmaşık bir matris içerisinde bulduklarından analiz edilebilmeleri açısından uygulanacak ekstraksiyon ve saflaştırma yöntemleri oldukça önemlidir. Eksozomların izolasyonunda kullanılacak her yöntemin avantaj ve dezavantajları olabilir. Sidhom vd. (2020)' ye

göre immünoafinite genellikle saf izolatların eldesi ile sonuçlanan spesifik bir yöntem olsa da verimlilik ve geri kazanım açısından sıkıntı yaşanmaktadır. Aksine membran filtrasyonu gibi yüksek verimlilik ve geri kazanım ile sonuçlanan yöntemlerde de saflık istenen düzeyde olmayabilir (Sidhom vd., 2020).

Eksozomların ekstraksiyonu ve depolanması sırasında düşük sıcaklık dereceleri ile donma-çözülme döngüsünden kaçınılmalı ve nötr pH' nın korunması sağlanmalıdır (Li vd.,2017; Cheng vd., 2019). Eksozomların izolasyonunda ultrasantrifüjleme, ultrafiltrasyon, immünoafinite yakalama, çökeltme veya mikroakışkan uygulaması gibi teknikler kullanılmaktadır. Bahsedilen tekniklerde eksozomlara özgü olan yoğunluk, boyut, şekil ve protein çeşidi gibi özelliklerden faydalanılarak eksozomların izolasyonu gerçekleştirilmektedir (Li vd., 2017).

Ultrasantrifüjleme (diferansiyel ve yoğunluk gradyanı), eksozomların izolasyonunda en yaygın uygulanan tekniktir. Bu yöntem basit olması, uygulama kolaylığı, çok zaman almaması ve numune hazırlama aşamasının kolay olması nedeniyle eksozom izolasyonunda altın standart olarak görülmektedir (Li vd., 2017). İzolasyon için öncelikle bitkiler öğütülür ve ardından büyük partiküller ve bitki liflerini uzaklaştırmak için düşük hızlı santrifüjleme (örneğin, $1.000 \times g$) uygulanmaktadır. Büyük kalıntılar ve bozulmamış organellerin uzaklaştırılması için orta hızda santrifüjleme (örneğin $10.000 \times g$) yapılmaktadır. Son olarak yüksek hızlı santrifüjleme (örneğin $150.000 \times g$) uygulanarak eksozom benzeri nanoparçacıkların peletlenmesi sağlanmaktadır. Diferansiyel santrifüjleme işlemi ile eksozomların dışındaki diğer veziküller, proteinler, protein/RNA kümeleri veya membran agregatları gibi istenmeyen kalıntılar da çökmektedir. Bu durumda daha ileri bir saflaştırmanın gerçekleştirilebilmesi için gradyan santrifüjleme uygulanmaktadır.

Gradyan santrifüjleme, farklı konsantrasyonlarda sakaroz çözeltisi (%10-90) veya iyodiksanol gibi malzemeler ile katmanlar oluşturarak, numunelerin en düşük konsantrasyon katmanının üstüne yerleştirilmeleri ve $4^{\circ}C$ ' de ultrasantrifüjemeye maruz bırakılmaları ile gerçekleştirilmektedir (Chiou ve Ansel, 2016; Tauro vd., 2012). Ultrasantrifüjleme işlemi sayesinde bitki kaynaklı eksozom benzeri nanoparçacıkların saf olarak elde edilmelerinin yanı sıra bu nanomalzemelerin farklı biyoaktivite, boyut dağılımı ve hatta stabilite seviyelerine göre ayrı katmanlara göre ayrılmaları da sağlanmaktadır (Zhuang vd., 2015; Zhang vd., 2016). İşlem sonunda elde edilen nanoparçacıkların miktar ve kalitesi uygulanan g kuvveti, rotor tipi ve rotor sedimentasyon açısına bağlı olarak değişim göstermektedir (van Niel vd., 2001; Taylor ve Gercel-Taylor, 2008; Lakhal ve Wood, 2011). Ancak tüm bu olumlu özelliklerine rağmen ultrasantrifüj cihazının ve bakım maliyetinin yüksek olması ve cihazı kullanacak kişiye

verilmesi gereken kapsamlı eğitim gibi faktörler yüzünden her laboratuvarında bu yöntem uygulanamamaktadır (Liga vd., 2015).

Son yıllarda bahsedilen geleneksel izolasyon tekniklerinin yanı sıra, ExoQuick™ ve Total Exosome Isolation™ (TEI) gibi kullanımı pratik olan, pahalı ekipman veya teknik bilgi birikimine gerek kalmadan çökeltmenin sağlanabildiği ticari kitler geliştirilmiştir (Van Deun vd., 2014). Bu kitlerin etki biçimlerinin henüz net bir şekilde açıklanmamış ve doğrulanmamıştır ancak eksozomların dokulardan izolasyonunda yaygın olarak tercih edilmektelerdir.

Eksozomların çeşitli biyolojik etkileşimlerinin belirlenebilmesi için boyut, şekil, yüzey yükü, yoğunluk ve gözeneklilik gibi çeşitli özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bitki kaynaklı eksozomların karakterizasyonu ve spesifik belirteçleri ile alakalı olarak literatürde maalesef sınırlı düzeyde bilgi mevcuttur (Woith ve Melzig, 2019). Son zamanlarda yapılan araştırmalarda eksozomların karakterizasyon ve doğrulamasında TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu), taramalı elektron mikroskobu (SEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), nanoparçacık izleme analizi (NTA), dinamik ışık saçılımı (DLS) ve dirençli darbe algılama gibi çeşitli teknikler kullanılmıştır (Thery vd., 2006; Dragovic vd., 2011).

Bu tekniklerden NTA, 10 nm- 2 µm aralığında eksozomların konsantrasyon ve boyut dağılımının ölçülebildiği optik bir parçacık izleme tekniğidir. Sıvı süspansiyon içerisindeki her bir nanoparçacığın Brownian hareketi izlenir ve bu hareket daha sonra parçacık boyutu ile ilişkilendirilebilir (de Necochea-Campion vd., 2018). Böylece parçacıkların boyutu, boyut dağılımı, konsantrasyonu ve fenotipi belirlenmiş olur. Bu teknik hızlı ve pratik olması, 30 nm' ye kadar küçük çaplardaki parçacıkların ölçülebilmesine olanak sağlaması ve işlem sonrası numunenin doğal formuna tekrar dönüştürülebilmesi sebebiyle ilgi çekmektedir (Szatanek vd., 2017).

DLS yöntemi foton korelasyon spektroskopisi olarak da bilinmektedir. Yöntem, monokromatik uyumlu bir lazer ışınının bir parçacık süspansiyonundan geçirilmesi prensibine dayanmaktadır (Szatanek vd., 2017). Bu yöntemde bir numune içindeki 1 nm- 6 µm aralığında değişen çaplardaki parçacıkların Brownian hareketlerinden kaynaklanan yapıcı ve yıkıcı girişimin neden olduğu saçılma yoğunluğundaki dalgalanmaların ölçümü sağlanmaktadır. Tekniğin en büyük dezavantajı süspansiyonda düşük düzeyde bile daha büyük veziküllerin bulunmasının küçük parçacıkların tespitini zorlaştırmasıdır (Bryant vd., 1996; Hoo vd., 2008). İlave olarak DLS yöntemi ile veziküllerin çap aralığı hakkında bilgi sağlanabilir ancak hücrel köken hakkında herhangi bir biyokimyasal veri sağlanamaz (Gercel-Taylor vd., 2012).

Son zamanlarda eksozomların boyut dağılımı ile konsantrasyonunun belirlenmesi ve çapları yaklaşık 50 nm'den hücre boyutuna kadar değişen kolloidal partiküllerin karakterizasyonu amacıyla kullanılan (Anderson vd., 2015) farklı ve yeni bir teknik de ayarlanabilir dirençli darbe algılama (TRPS)'dir. Bu teknik ile parçacığın bulunduğu yerde karakterizasyonu ve eksozomların konsantrasyonunun ölçümü sağlanabilir. Yapılan çalışmalar TRPS tekniğinin manyetik boncuklar ve çeşitli biyomolekülleri içeren nanoparçacık süspansiyonlarının ölçümünde başarıyla kullanıldığını göstermiştir (Vogel vd., 2017; Patko vd., 2013). Ancak gözeneklerin parçacıklar tarafından tıkanabilmesi ve parçacıkların sistemin arka plan gürültüsüne karşı algılanamayacak kadar küçük olması gibi sorunlar TRPS ölçümlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Anderson vd. (2015) sistem hassasiyeti ve kararlılığının çeşitli sistem parametrelerinin optimizasyonu ile geliştirilebileceğini bildirmiştir.

AFM tekniği, örnek hazırlama kolaylığı ve doğal koşullarda numunelerin ölçülebilme yeteneğinden dolayı eksozomların yoğunluğu, morfolojisi ve biyomoleküler yapısını karakterize etmek için sıklıkla kullanılan nano ölçekte bir araçtır (Binnig vd.,1986; Yuana vd., 2010). Araştırmalar AFM tekniği ile çeşitli vücut sıvılarından hücre dışı veziküllerin izolasyonunun gerçekleştirilebildiğini, morfoloji ve boyutlarının tespit edilebildiğini ve membran bileşimi ile mekanik özelliklerinin belirlenebildiğini bildirmektedir (Yuana vd., 2010; Hardij vd., 2013; Sharma vd., 2010).

TEM, içerisinde eksozomların da bulunduğu çok çeşitli biyolojik bileşiklerin yapısının, morfolojisinin ve boyutunun belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Colombo vd., 2014). Bu yöntemde bir elektron demeti, ikincil bir elektronun üretildiği bir numuneden geçerken görüntüleme yapılmaktadır. Görüntüleme öncesi numunelerin glutaraldehit içinde sabitlenmesi ve kurutulması gerekmektedir. Ayrıca tüm bu bahsedilen tekniklerin dışında eksozomların karakterizasyonunda enzime bağlı immünosorbent analizi (ELISA), akış sitometrisi, Raman spektroskopisi ve RNA molekülünün karakterizasyonunun yapıldığı PCR gibi farklı teknikler de uygulanabilmektedir (Thery vd., 2006; Dragovic vd., 2011; He vd., 2014; Smith vd., 2015; Ramirez vd., 2018).

Bitki kaynaklı eksozomlar ve tedavi edici etkileri

Yenilebilir bitkilerin insan sağlığı açısından faydalı olduğu ve kronik bulaşıcı hastalıkları önleyebileceği ve/veya tedavi edebileceği kanıtlanmıştır (Alvarez Erviti vd., 2011; Zhuang vd., 2011). Ancak bu etkinin altında yatan hücresel ve moleküler mekanizma henüz tam olarak bilinmemektedir. Bitkiler tarafından sergilenen tedavi edici etkinin bitkilerde doğal olarak bulunan eksozom benzeri nanopartiküllerin taşıdığı çok sayıdaki çeşitli moleküller vasıtasıyla (Mu vd., 2014; Xiao vd., 2018) aynı

anda birden fazla virülans faktörü hedefleyebilmeleri yoluyla gerçekleştiği düşünülmektedir (Sundaram vd., 2019).

Sentetik nanopartiküller ile kıyaslandığında eksozomların içsel ve heterojen yapıda oluşları onlara hastalıkların teşhisi ve tedavisi alanında çok büyük avantajlar sağlamaktadır (Zhang vd., 2020). Bitki kaynaklı eksozomlar direkt tüketilebilir, düşük toksisiteye sahiptir ve seri üretim için kolay ölçeklendirilebilir özelliktedir. İnsan bağırsağı her gün içlerinde eksozomların da bulunduğu sindirilmiş bitki kaynaklı milyarlarca nano boyutlu malzeme ile muhatap olmaktadır.

Bitki hücrelerinde endozomal multiveziküler gövdeden türetilen eksozom benzeri nanopartiküller, bağışıklığı düzenlemenin bir yolu olarak bitki hücresi-hücre iletişiminde doğal olarak rol oynayabilir (Nielsen vd., 2012). Bu nano parçacıkların ilaçlar, siRNA (Small interfering RNA)'lar veya proteinlerin bağırsak, kolon veya karaciğer gibi spesifik hücrelere veya dokulara verimli bir şekilde iletiminde kullanıldığı rapor edilmektedir (Zhang vd., 2016). Ayrıca, bitkiler tarafından hücre dışı veziküllerin salınması, bitki bağışıklık sisteminin bitkiyi enfeksiyonlara karşı koruyan bir mekanizması olarak görülmektedir (Rutter ve Innes, 2017).

Bitki kaynaklı eksozom benzeri nanotaşıyıcılar elde edildikleri kaynaklar ve bileşimleri nedeniyle, bağışıklık sistemi tarafından tespit edilmez ve dolaşım süreleri ile biyoyararlanımları memeli kaynaklı eksozom benzeri taşıyıcılara kıyasla daha fazladır. Ayrıca, memelilerden farklı olarak bitkiler, zoonotik patojenler veya insan patojenleri barındırmazlar. Bu nedenle, bitki kaynaklı eksozom benzeri taşıyıcılar immünojenik olmayan ve zararsız özellikleriyle memeli hücre kaynaklı olanlara kıyasla üstünlük sergilemektedir (Dad vd., 2020).

Oral yolla alınan üzüm (*Vitis vinifera*) eksozom benzeri nanoparçacıkların farelerde kolon boyunca bağırsak kök hücre sayısındaki artış ile ilişkili olarak bağırsak epitel hücrelerinin çoğalmasını teşvik ettiği belirlenmiştir (Ju vd., 2013). Araştırmacılar ayrıca üzüm eksozomlarının oral yolla alındığında tükürük, asidik mide ortamı ve bağırsak younda bulunan proteolitik enzimlerden etkilenmeksizin bağırsaktaki hedefine ulaştığı tespit edilmiş ve bu sayede bu nanopartiküllerin ağızdan alınma durumunda bile bağırsak rejenerasyonunu sağlayabilecekleri düşünülmüştür. Mu vd. (2014) üzüm, greylift, havuç ve zencefilden memeli türevli eksozomlara benzer boyut ve yapı sergileyen eksozom benzeri yapılar izole etmiş ve karakterizasyonunu sağlamıştır. Araştırmacılar bu nanoparçacıkların bağırsak makrofajları ve kök hücreler tarafından alındığını ve bağırsak homeostazını sürdürmek için önemli olan genlerin ekspresyonunu indükleyerek türler arası iletişime aracılık ettiğini bildirmişlerdir. Ramondo vd. (2015) limon suyundan (*Citrus limon* L.) izole edilen eksozom

benzeri nanopartiküllerin TRAIL aracılı apoptotik hücre ölümünü aktive ederek in vitro ortamda farklı tümör hücre dizilerinde kanser hücrelerinin çoğalmasını inhibe ettiğini ve ayrıca bu veziküllerin in vivo ortamda CML tümör büyümesini baskıladığını belirlemişlerdir. Wang vd. (2014) greyfurt nanoveziküllerinin bağırsak makrofajları tarafından seçilerek alındığını ve farlerde dekstran sülfat sodyumun neden olduğu koliti iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar bu nanoyapıların anti-inflamatuar etkilerinin, heme oksijenaz-1 (HO-1) ekspresyonunun yukarı doğru düzenlenmesi ve bağırsak makrofajlarında IL-1b ve TNF-a üretimlerinin inhibisyonunun aracılık ettiğini belirlemişlerdir. Ayrıca greyfurt eksozom benzeri yapılarının biyolojik olarak uyumlu, parçalanabilir ve geniş bir pH aralığında stabil olduğu tespit edilmiş ve üzüm eksozomlarına benzer şekilde ağızdan alınabilecek ilaçlarda kullanımı da önerilmiştir (Wang vd., 2014). Timms vd. (2016) karpuzdan ultrasantrifüjleme yoluyla eksozomlar elde ederek karakterizasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmanın bulguları, besinler aracılığı ile alınan RNA' larının insan dolaşımına (alemler arası) transferine, muhtemelen bağırsak tarafından eksozom alımının aracılık ettiğini bildirmiştir. Raimondo vd. (2015), limon (*Citrus limon* L.) suyuna farklı seviyelerde ultrasantrifüjleme uygulayarak yoğunlukları 1.15-1.19 g/mL arasından değişen veziküller tanımlamış ve tespit edilen limon nanoveziküllerinin tümör nekroz faktörü ile ilişkili apoptoz indükleyici ligand aracılı apoptotik hücre işlemlerini aktive ederek in vivo olarak kronik miyeloid lösemi tümör büyümesini baskıladığını belirlemişlerdir. Ju vd. (2013) üzüm (*Vitis vinifera*) memeli türevli eksozomlara benzer vezikül yapısı ve bileşime sahip nanoboyutlu nanoparçacıklar elde etmiştir. Araştırmacılar tespit ettikleri nanoparçacıkların bağırsak içinde seyahat edebildiğini, bağırsak mukusundan geçebildiğini, fare bağırsak kök hücreleri tarafından alınabildiğini ve bu hücrelerin çoğalmasını desteklediğini tespit etmişlerdir. Üzüm nanopartiküllerinin oral yolla verildiği farelerin dekstran sülfat sodyumun neden olduğu kolitten korunmaları sağlanmış ve elde edilen sonuçlara dayanarak bitki kaynaklı nanopartiküllerin nano boyutlu terapötik ajanlar olarak veya alternatif bir ilaç verme aracı olarak kullanılması önerilmiştir. Wang vd. (2013) greyfurt türevli ekstraselüler veziküllerin intranazal yolla uygulanan farelerde glioblastoma tümör büyümesini önlemek için STAT3 inhibitörü JSI-124' ü sağladığını bildirilmiştir. Ayrıca bu eksozomların fare modelinde kolon kanseri büyümesini inhibe ettiği saptanmıştır. Sun vd. (2010) bitki kaynaklı eksozomal veziküllerin, gastrointestinal sistem tarafından sınırlı düzeyde absorpsiyona sahip olduğu belirlenen kurkumin gibi bitkisel bileşenlerin düşük biyoyararlanımını ve anti-inflamatuar aktivitesini artırabileceğini bildirmiştir.

Sonuç

Eksozomlar, boyutları 30-100 nm aralığında değişen ve hücreler arası iletişimde kilit oyuncuları olarak kabul edilen yapılardır. İlk keşfedildiklerinde hücrelerin çöp kutuları olarak görülen eksozomların zamanla bir dizi farklı fizyolojik ve patolojik durumda yer alan hücreler arası sinyal taşıyıcıları oldukları ve kanser dahil olmak üzere çeşitli hastalıklarda tanıyı iyileştirmeye yardımcı olabilecek potansiyel biyobelirteçler olarak kullanılabilirler tespit edilmiştir.

Bitkilerden elde edilen eksozom benzeri nanopartiküller yapıları ve izolasyon yöntemleri ile memeli eksozomlarına benzemektedir. Son çalışmalar, yenilebilir bitki türevli eksozom benzeri nanopartiküllerin çeşitli hastalıklara karşı doğal terapötik ajanlar olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu nano yapılar parçacık boyutu, düşük toksisite, güvenlik ve büyük ölçekli üretim için önemli bir potansiyel olma gibi birçok fayda sunmaktadır. Biyolojik olarak uyumlu, parçalanabilir ve geniş bir pH aralığında stabil oldukları anlaşılan bitki kaynaklı eksozom benzeri nanopartiküllerin vücutta belirli yerleri hedefleyebilen ilaç taşıyıcıları olarak kullanılabilir oldukları bilinmekte ancak, bu nanopartiküllerin fonksiyonel gıda ürünlerinde kullanılabilmesi çözülmesi gereken yüksek öncelikli problemler arasında yer almaktadır.

Literatürde eksozomlar üzerine yapılmış çalışmaların çoğunun onkoloji, hücre biyolojisi ve biyokimya alanlarında olduğu görülmektedir. Elde edilen veriler elbette yaşamımız boyunca çeşitli gıdalar aracılığıyla eksozomlar ile sürekli olarak muhatap olduğumuz düşünüldüğünde gıda alanı açısından umut vaat edicidir. Fakat yapılan çalışmaların eksozom/eksozom benzeri nano yapıların gıdalara çeşitli fonksiyonel özelliklerin kazandırılması veya besin değerinin artırılması amacıyla ilavesi noktasında eksik kaldığı aşikardır. Ayrıca gelecekte yapılacak işlevsel çalışmalara temel oluşturmak adına bitki bazlı eksozom benzeri nanoyapıların yüksek verim ve saflıkta üretilmesi için optimizasyon çalışmalarının da yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Referanslar

- Alvarez-Erviti, L., Seow, Y., Yin, H., Betts, C., Lakhal, S., & Wood, M.J. (2011). Delivery of siRNA to the mouse brain by systemic injection of targeted exosomes. *Nature Biotechnology*, 29, 341-345.
- Anderson, W., Lane, R., Korbie, D., & Trau, M. (2015). Observations of Tunable Resistive Pulse Sensing for Exosome Analysis: Improving System Sensitivity and Stability. *Langmuir*, 31, 6577-6587.
- Binnig, G., Quate, C.F., & Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 56, 930-933.
- Bozkurt, S. (2018). Eksozomlar ve kanserdeki rolleri. *Dicle Tıp Dergisi*, 45(2), 209-217.
- Braicu, C., Tomuleasa, C., Monroig, P., Cucuianu, A., Berindan- Neagoe, I., & Calin, G.A. (2015). Exosomes as divine messengers: are they the Hermes of modern molecular oncology? *Cell Death Differentiation*, 22, 34-45.
- Bryant, G., Abeynayake, C., & Thomas, J.C. (1996). Improved particle size distribution measurements using multiangle dynamic light scattering. 2. Refinements and applications. *Langmuir*, 12:6224-6228.
- Buzas, E.I., Gyorgy, B., Nagy, G., Falus, A., & Gay, S. (2014). Emerging role of extracellular vesicles in inflammatory diseases. *Nature Reviews Rheumatology*, 10(6), 356-364.
- Cheng, M., Yang, J., Zhao, X., Zhang, E., Zeng, Q., Yu, Y.,...Qin, G. (2019). Circulating myocardial microRNAs from infarcted hearts are carried in exosomes and mobilise bone marrow progenitor cells. *Nature Communications*, 10, 959.
- Chiou, N.T., & Ansel, K.M. (2016). Improved exosome isolation by sucrose gradient fractionation of ultracentrifuged crude exosome pellets. *Protocol Exchange*, <https://doi.org/10.1038/protex.2016.057>.
- Colombo, M., Raposo, G., & Thery, C. (2014). Biogenesis, secretion, and intercellular interactions of exosomes and other extracellular vesicles. *Annual Review of Cell and Development. Biology*, 30, 255-289.
- Dad, H.A., Gu, T.W., Zhu, A.Q., Huang, L.Q., & Peng, L.H. (2020). Plant Exosome-like Nanovesicles: Emerging Therapeutics and Drug Delivery Nanoplatfoms. *Molecular Therapy*, 29, 1.
- De Necochea-Campion, R., Gonda, A., Kabagwira, J., Mirshahidi, S., Cao, H., Reeves, M.E., & Wall, N.R. (2018). A practical approach to extracellular vesicle characterization among similar biological samples. *Biomedical Physics and Engineering Express*, 4, 065013.
- Dragovic, R.A., Gardiner, C., Brooks, A.S., Tannetta, D.S., Ferguson, D.J., Hole, P.,...Sargent, I.L. (2011). Sizing and phenotyping of cellular vesicles using Nanoparticle Tracking Analysis. *Nanomedicine*, 7, 780-788.

- Gercel-Taylor C., Atay S., Tullis R.H., Kesimer M., & Taylor, D.D. (2012). Nanoparticle analysis of circulating cell-derived vesicles in ovarian cancer patients. *Analytical Biochemistry*, 428, 44-53.
- Halperin, W., & Jensen, W.A. (1967). Ultrastructural changes during growth and embryogenesis in carrot cell cultures. *Journal of Ultrastructure Research*, 18, 428-443.
- Hardij, J., Cecchet, F., Berquand, A., Gheldof, D., Chatelain, C., Mullier, F.,... Dogne, J.M. (2013). Characterisation of tissue factor-bearing extracellular vesicles with AFM: Comparison of air-tapping-mode AFM and liquid Peak Force AFM. *Journal of Extracellular Vesicles*, 2(1).
- Harding, C., Heuser, J., & Stahl, P. (1983). Receptor-mediated endocytosis of transferrin and recycling of the transferrin receptor in rat reticulocytes. *Journal of Cell Biology*, 97(2), 329-339.
- He, M., Crow, J., Roth, M., Zeng, Y., & Godwin, A.K. (2014). Integrated immunoisolation and protein analysis of circulating exosomes using microfluidic technology. *Lab on a Chip*, 14, 3773-3780.
- Hoo, C.M., Starostin, N., West, P., & Mecartney, M.L. (2008). A comparison of atomic force microscopy (AFM) and dynamic light scattering (DLS) methods to characterize nanoparticle size distributions. *Journal of Nanoparticle Research*, 10, 89-96.
- Hoshino, A., Costa-Silva, B., Shen, T.L., Rodrigues, G., Hashimoto, A., Tesic Mark, M.,... Lyden, D. (2015). Tumour exosome integrins determine organotropic metastasis. *Nature*, 527(7578), 329-335.
- İnanır, C., & Ekici, L. (2020). Eksozomlar: Kompozisyonları, Biyolojik Fonksiyonları ve Biyoaktif Bileşiklerin Taşınmasındaki potansiyelleri. *Akademik Gıda*, 18(4), 421-432.
- Johnstone, R.M., Adam, M., Hammond, J.R., Orr, L., & Turbide, C. (1987). Vesicle Formation during Reticulocyte Maturation—Association of plasma-membrane activities with released vesicles (exosomes). *Journal of Biological Chemistry*, 262, 9412-9420.
- Ju, S., Mu, J., Dokland, T., Zhuang, X., Wang, Q., Jiang, H.,... Zhang, H.G. (2013). Grape exosome-like nanoparticles induce intestinal stem cells and protect mice from DSS-induced colitis. *Molecular Therapy*, 21 (7), 1345. <http://dx.doi.org/10.1038/mt.2013.64>.
- Keller, S., Rupp, C., Stoeck, A., Runz, S., Fogel, M., Lugert, S.,... Altevogt, P. (2007). CD24 is a marker of exosomes secreted into urine and amniotic fluid. *Kidney International*, 72(9), 1095–1102.
- Kim, J.W., Wieckowski, E., Taylor, D.D., Reichert, T.E., Watkins, S., & Whiteside, T.L. (2005). Fas ligand-positive membranous vesicles isolated from sera of patients with oral cancer induce apoptosis of activated T lymphocytes. *Clinical Cancer Research*, 11, 1010-1020.

- Lakhal, S., & Wood, M.J.A. (2011). Exosome nanotechnology: An emerging paradigm shift in drug delivery Exploitation of exosome nanovesicles for systemic in vivo delivery of RNAi heralds new horizons for drug delivery across biological barriers. *Bioessays*, 33,737-741.
- Li, P., Kaslan, M., Lee, S. H., Yao, J., & Gao, Z. (2017). Progress in exosome isolation techniques. *Theranostics*, 7, 789-804.
- Liga, A., Vliegenthart, A.D.B., Oosthuyzen, W., Dear, J.W., & Kersaudy-Kerhoulas, M. (2015). Exosome isolation: A microfluidic road-map. *Lab on a Chip*, 15(11), 2388-2394.
- Marchant, R., & Robards, A. (1968). Membrane systems associated with the plasmalemma of plant cells. *Annals of Botany*, 32, 457-471.
- Mu, J., Zhuang, X., Wang, Q., Jiang, H., Deng, Z., Wang, B.,... Zhang, H.G. (2014). Interspecies communication between plant and mouse gut host cells through edible plant derived exosome-like nanoparticles. *Molecular Nutrition and Food Research*, 58(7), 1561.
- Nielsen, M.E., Feechan, A., Böhlenius, H., Ueda, T., & Thordal-Christensen, H. (2012). Arabidopsis ARF-GTP exchange factor, GNOM, mediates transport required for innate immunity and focal accumulation of syntaxin PEN1. *Proceedings of the National Academy Sciences of USA*, 109, 11443-11448.
- Pan, B.T., & Johnstone, R.M. (1983). Fate of the transferrin receptor during maturation of sheep reticulocytes in vitro: selective externalization of the receptor. *Cell*, 33, 967-978.
- Patko, D., Gyorgy, B., Nemeth, A., Szabó-Taylor, K., Kittel, A., Buzás, E.I., & Horvath, R. (2013). Label-free optical monitoring of surface adhesion of extracellular vesicles by grating coupled interferometry. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 188, 697-701.
- Raimondo, S., Naselli, F., Fontana, S., Monteleone, F., Lo Dico, A., Saieva, L.,... Alessandro, L. (2015). Citrus limon-derived nanovesicles inhibit cancer cell proliferation and suppress CML xenograft growth by inducing TRAIL-mediated cell death. *Oncotarget*, 6(23), 19514.
- Ramirez, S.H., Andrews, A.M., Paul, D., & Pachter, J.S. (2018). Extracellular vesicles: Mediators and biomarkers of pathology along CNS barriers. *Fluids Barriers CNS*, 15, 19.
- Raposo, G., Nijman, H.W., Stoorvogel, W., Liejendekker, R., Harding, C.V., Melief, C.J., & Geuze, H.J. (1996). B lymphocytes secrete antigen-presenting vesicles. *Journal of Experimental Medicine*, 183, 1161-72.
- Regente, M., Pinedo, M., Elizalde, M., & de la Canal, L. (2012). Apoplasmic exosome-like vesicles: a new way of protein secretion in plants? *Plant Signaling and Behavior*, 7, 544-546.
- Robbins, P.D., & Morelli, A.E. (2014). Regulation of immune responses by ext-

- racellular vesicles. *Nature Reviews Immunology*, 14, 195-208.
- Rutter, B.D., & Innes, R.W. (2017). Extracellular vesicles isolated from the leaf apoplast carry stress-response proteins. *Plant physiology*, 173(1), 728-741.
- Schmid, M., & Jensen, T.H. (2008). The exosome: a multipurpose RNA-decay machine. *Trends Biochemical Sciences*, 33(10), 501-510.
- Sharma, S., Rasool, H.I., Palanisamy, V., Mathisen, C., Schmidt, M., Wong, D.T., & Gimzewski, J.K. (2010). Structural-mechanical characterization of nanoparticle exosomes in human saliva, using correlative AFM, FESEM, and force spectroscopy. *ACS Nano*, 4(4), 1921-1926.
- Sidhom, K., Obi, P.O., & Saleem, A. (2020). A review of exosomal isolation methods: Is size exclusion chromatography the best option? *International Journal of Molecular Sciences*, 21(18), 1-19.
- Smith, Z.J., Lee, C., Rojalin, T., Carney, R.P., Hazari, S., Knudson, A.,... Wachsmann-Hogiu, S. (2015). Single exosome study reveals subpopulations distributed among cell lines with variability related to membrane content. *Journal of Extracellular Vesicles*, 4, 28533.
- Stanly, C., Fiume, I., Capasso, G., & Pocsfalvi, G. (2016). Isolation of exosome-like vesicles from plants by ultracentrifugation on sucrose/deuterium oxide (D₂O) density cushions. *Methods in Molecular Biology*, 1459, 259-269.
- Sun, D., Zhuang, X., Xiang, X., Liu, Y., Zhang, S., Liu, C.,... Zhang, H.G. (2010). A novel nanoparticle drug delivery system: The anti-inflammatory activity of curcumin is enhanced when encapsulated in exosomes. *Molecular Therapy*, 18, 1606-1614.
- Sundaram, K., Miller, D.P., Kumar, A., Teng, Y., Sayed, M., Mu, J.,... Zhang, H.G. (2019). Plant-derived exosomal nanoparticles inhibit pathogenicity of *Porphyromonas gingivalis*. *iScience*, 21, 308-327.
- Szatanek, R., Baj-Krzyworzeka, M., Zimoch, J., Lekka, M., Siedlar, M., & Baran, J. (2017). The Methods of Choice for Extracellular Vesicles (EVs) Characterization. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(6).
- Takahashi, A., Okada, R., Nagao, K., Kawamata, Y., Hanyu, A., Yoshimoto, S.,... Hera, E. (2017). Exosomes maintain cellular homeostasis by excreting harmful DNA from cells. *Nature Communications*, 8, 15287.
- Tauro, B.J., Greening, D.W., Mathias, R.A., Ji, H., Mathivanan, S., Scott, A.M., & Simpson, R.J. (2012). Comparison of ultracentrifugation, density gradient separation, and immunoaffinity capture methods for isolating human colon cancer cell line LIM1863-derived exosomes. *Methods (San Diego, Calif.)*, 56(2), 293-304.
- Taylor, D.D., & Gercel-Taylor, C. (2008). MicroRNA signatures of tumor-derived exosomes as diagnostic biomarkers of ovarian cancer. *Gynecologic oncology*, 110(1), 13-21.
- Thery, C., Amigorena, S., Raposo, G., & Clayton, A. (2006). Isolation and cha-

- racterization of exosomes from cell culture supernatants and biological fluids. *Current Protocols in Cell Biology*, 30, 3-22.
- Thery, C., Boussac, M., Veron, P., Ricciardi-Castagnoli, P., Raposo, G., Garin, J., & Amigorena, S. (2001). Proteomic analysis of dendritic cell-derived exosomes: a secreted subcellular compartment distinct from apoptotic vesicles. *Journal of Immunology*, 166, 7309-7318.
- Thery, C., Zitvogel, L., & Amigorena, S. (2002). Exosomes: Composition, biogenesis and function. *Nature Reviews Immunology*, 2, 569-579.
- Timms, K., Day, A., McLaughlin, J., Westwood, M., Forbes, K., & Holder, B. (2016). Cross-kingdom uptake and transfer of exosomal watermelon microRNAs in human intestinal epithelial cells. The Fifth International Meeting of ISEV, Rotterdam, The Netherlands, page 90. *Journal of Extracellular Vesicles*, 5, 31552. <https://doi.org/10.3402/jev.v5.31552>.
- Trams, E.G., Lauter, C.J., Salem Jr, N., & Heine, U. (1981). Exfoliation of membrane ecto-enzymes in the form of micro-vesicles. *Biochimica et Biophysica Acta*, 645(1), 63-70.
- Van Deun, J., Mestdagh, P., Sormunen, R., Cocquyt, V., Vermaelen, K., Vandensompele, J.,...Hendrix, A. (2014). The impact of disparate isolation methods for extracellular vesicles on downstream RNA profiling. *Journal of Extracellular Vesicles*, 3, 24858.
- Van Niel, G., Raposo, G., Candalh, C., Boussac, M., Hershberg, R., Cerf-Bennussan, N., & Heyman, M. (2001). Intestinal epithelial cells secrete exosome-like vesicles. *Gastroenterology*, 121, 337-349.
- Vella, L.J., Sharples, R.A., Lawson, V.A., Masters, C.L., Cappai, R., & Hill, A.F. (2007). Packaging of prions into exosomes is associated with a novel pathway of PrP processing. *The Journal of Pathology*, 211, 582-590.
- Vogel, R., Pal, A.K., Jambhrunkar, S., Patel, P., Thakur, S.S., Reategui, E.,... Broom, M.F. (2017). High-Resolution Single Particle Zeta Potential Characterisation of Biological Nanoparticles using Tunable Resistive Pulse Sensing. *Scientific Reports*, 7, 17479.
- Wang, B., Zhuang, X., Deng, Z.B., Jiang, H., Mu, J., Wang, Q.,...Zhang, H.G. (2014). Targeted drug delivery to intestinal macrophages by bioactive nanovesicles released from grapefruit. *Molecular Therapy*, 22, 522-534.
- Wang, Q., Zhuang, X., Mu, J., Deng, Z.B., Jiang, H., Zhang, L.,...Zhang, H.G. (2013). Delivery of therapeutic agents by nanoparticles made of grapefruit-derived lipids, *Nature Communications*, 4, 1867.
- Woith, E., & Melzig, M.F. (2019). Extracellular vesicles from fresh and dried plants simultaneous purification and visualization using gel electrophoresis. *International journal of molecular sciences*, 20(2), 357.
- Wubbolts, R., Leckie, R.S., Veenhuizen, P.T., Schwarzmann, G., Mobius, W., Hoernschemeyer, J.,...Stoorvogel, W. (2003). Proteomic and biochemical

- analyses of human B cell-derived exosomes. Potential implications for their function and multivesicular body formation. *The Journal of Biological Chemistry*, 278, 10963-10972.
- Xiao, J., Feng, S., Wang, X., Long, K., Luo, Y., Wang, Y.,...Li, M. (2018). Identification of exosome-like nanoparticle-derived microRNAs from 11 edible fruits and vegetables. *Peer Journal*, 6, e5186.
- Yuana, Y., Oosterkamp, T.H., Bahatyrova, S., Ashcroft, B., Garcia Rodriguez, P., Bertina, R.M., & Osanto, S. (2010). Atomic force microscopy: A novel approach to the detection of nanosized blood microparticles. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, 8, 315-323.
- Zhang, H., Freitas, D., Kim, H.S., Fabijanic, K., Li, Z., Chen, H.,...Lyden, D. (2018). Identification of distinct nanoparticles and subsets of extracellular vesicles by asymmetric flow field-flow fractionation, *Nature Cell Biology*, 20, 332-343.
- Zhang, H. G., & Grizzle, W. E. (2014). Exosomes: a novel pathway of local and distant intercellular communication that facilitates the growth and metastasis of neoplastic lesions. *The American Journal of Pathology*, 184, 28-41.
- Zhang, M. Viennois, E., Xu, C., & Merlin, D. (2016). Plant derived edible nanoparticles as a new therapeutic approach against diseases. *Tissue Barriers*, 4(2):e1134415.
- Zhang, Y., Bi, J., Huang, J., Tang, Y., Du, S., & Li, P. (2020). Exosome: A Review of Its Classification, Isolation Techniques, Storage, Diagnostic and Targeted Therapy Applications. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 6917-6934.
- Zhang, Y., & Wang, X.F. (2015). A niche role for cancer exosomes in metastasis. *Nature Cell Biology*, 17(6), 709-711.
- Zhuang, X., Deng, Z.B., Mu, J., Zhang, L., Yan, J., Miller, D.,...Zhang, H.G. (2015). Ginger-derived nanoparticles protect against alcohol-induced liver damage. *Journal of extracellular vesicles*, 4(1), 28713.
- Zhuang, X., Xiang, X., Grizzle, W., Sun, D., Zhang, S., Axtell, R.C.,...Zhang, H.G. (2011). Treatment of brain inflammatory diseases by delivering exosome encapsulated anti-inflammatory drugs from the nasal region to the brain. *Molecular therapy*, 19, 1769-1779.



BÖLÜM 2

VİNÇ VE KRENLERİN PERİYODİK MUAYENELERİNDE KARŞILAŞABİLECEK UYGUNSUZLUKLARIN ANALİZİ

Celal GÜNGÖR¹, Tamer GÜNAY²

1 Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, celalgungor53@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9882-6393>

2 İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, tamer@cozumkontrol.com

1. Giriş

Ülkemizde sanayinin gelişmesi ile birlikte kaldırma ve iletme ekipmanlarına olan ihtiyaç artmaktadır. Bu kaldırma ve iletme ekipmanlarından en aktif kullanılanı vinç ve krenlerdir. İnsan gücü ile kaldırılamayan/nakledilemeyen veya kaldırılması/nakledilmesi tercih edilmeyen yüklerin gerektiğinde etrafında tam tur dönerek istenen mesafe ve yüksekliklere kaldırma, taşıma ve indirme işlerini yapan makine vinç olarak tanımlanabilir. Vinç ve krenler çeşitli elemanlardan oluşmaktadır. Vinci oluşturan temel elamanlar araba, tambur, halat, tampon, kanca, köprü, konsol, kiriş, vinç bloğu ve halat sarım kılavuzudur. Araba, vinç bloğunu üzerinde taşıyan parçadır. Tambur, halatın sarıldığı silindir parçadır. Halat, kaldırılmak istenen parçanın kaldırılmasına yardımcı olan ve yükü taşıyan parçadır. Tampon, başlıklara zarar gelmemesi için araba başına takılan elastik veya plastik parçadır. Kanca, yükün tutulmasını sağlayan parçadır. Köprü, arabanın üzerinde hareket ettiği konsol ve kirişler üzerine monte edilen parçadır. Konsol, köprüyü, arabayı ve vinç bloğunu üzerinde taşıyan dikey parçadır. Kiriş, köprünün üzerinde hareket ettiği köprüyü, arabayı ve vinç bloğunu üzerinde taşıyan yatay parçadır. Vinç bloğu, tambur, halat, halat sarım kılavuzu, kanca, elektrik motoru ve redüktörden oluşan parçalar bütünüdür. Halat sarım kılavuzu, halatın tambura düzgün bir şekilde sarılmasını sağlayan parçadır.

Vinç ve krenlerin birçok iş kazasına neden olduğu bilinmektedir. SGK 2019 yılı istatistiklerine göre hareketli tesis operatörleri meslek grubu (834 ISCO kodlu) içerisindeki 723 vinç, yük asansörü ve ilgili tesis operatörü iş kazası geçirmiş ve bunlardan 9 iş kazası ise ölüm ile sonuçlanmıştır (SGK 2019). Bu kazaları önleyebilmek için periyodik muayeneler oldukça önem arz etmektedir. Periyodik muayenelerin eksiksizce yapılması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı kullanımdaki vinç ve krenlerin periyodik muayenelerini gerçekleştirmek ve bu muayenelerde tespit edilen kusur ve uyumsuzlukları analiz etmektir.

2. Literatür Taraması

6331 sayılı *İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu* kapsamında işletmeler çalışanlarına sağlıklı ve güvenli çalışma ortamı sağlamalıdır. Poraktif iş güvenliği yaklaşımı gereği işletmelerde risk analizleri gerçekleştirilmeli ve tehlikeler tespit edilerek gerekli önlemler alınmalıdır. Aksi halde iş kazaları ve meslek hastalıkları kaçınılmaz olur. 18.02.2022 tarihli ve 31754 sayılı *İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği* uyarınca işletmeler iş ekipmanlarını muayene ettirmekle yükümlüdür. Muayenedeki temel amaç yeni kurulan veya halen çalışmakta olan iş ekipmanının yönetmeliğin işaret ettiği standartlara uyup uymadığının tespitidir.

Vinç ve krenler *İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği* kapsamında bulunmaktadır ve maalesef gerekli önlemlerin alınmaması sebebiyle iş kazalarının meydana geldiği istatistiklerde görülmektedir (SGK 2019). Vinç ve kren kazalarının sebepleri incelendiğinde uygunsuz durum ve uygunsuz davranışlardan kaynaklandığı görülmektedir. Örneğin, uygun sağlık-güvenlik işaretlerinin bulunmaması, bakımı yapılmamış veya kusurlu ekipmanların kullanılması, motor freni bozulması, sınır kesicilerin kusurlu olması gibi **uygunsuz durum** ve mesleki yetersizliklere rağmen vinç kullanımı, kapasite üzeri yüklemeler, operatör hatası, tellenmiş halat kullanımı gibi **uygunsuz davranışlar**, vinç ve kren kazalarına neden olabilir. Bu uygunsuz durum ve davranışlar risk analizlerinde tespit edilebilir. Risk analizlerini destekleyen ve yönlendiren periyodik muayeneler ayrıca önem arz etmektedir.

Literatür incelendiğinde genellikle yükü direk taşıyan yapı elemanlarının dayanımları ile ilgili çalışmaların olduğu görülmektedir. Bunlar içerisinde de özellikle kanca (Sarı, Nemutlu, and Balun 2021) ve halat (Onur 2016) ile ilgili mekaniksel dayanım çalışmaları görülmektedir. Kanca ve halat yüke en fazla maruz kalan elemanlardır ve kullanım sıklığı ve hizmet süreleri mekanik dayanımlarını etkilemektedir. Halat tellenmesi kritik noktadan sonra oldukça risklidir. Tellenmenin muayenede tespit edilmesi gerekmektedir. Onur (2016) yaptığı çalışmasında merkez telin toplam yükün %16'sını dış tellerin ise %84'ini taşıdığını tespit etmiştir. Bu yüksek yüklenme oranları bize dış yüzeyde meydana gelecek tellenme (telin kırılması), halatın taşıma kapasitesini düşürmekte ve kaza riskini oldukça artırmaktadır. Bu nedenle tellenmenin tespit edilmesi, özellikle de başlangıçta, oldukça önemlidir.

Atalay ve Kılıç (2016) vinç kazalarını proaktif olarak engelleyebilmek için bir risk değerlendirmesi çalışması yapmıştır. Bir enerji nakil hatları dağıtım firmasında balık kılıçığı yöntemini kullanarak yaptıkları çalışmada çalışanların eğitimlerinin, denetimlerin ve talimatların artırılması gerektiğini belirtmişlerdir. İş güvenliği bilinci ile yetkin ve deneyimli uzman personel çalıştırılması ile iş kazalarının önüne geçilebileceği vurgulanmıştır. Ekipmanların kullanımı yetkili ve gerekli mesleki eğitimi almış operatörler tarafından yapılmasının önemi vurgulanmıştır.

Yıldırım ve Esim (2019) kren sistemlerinin dayanım özelliklerini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Çalışmalarında kren sisteminin çalışması esnasında yük, halat, araba, köprü ve köprü taşıyıcı sistem birimleri ile temasta olduğundan dolayı bir bütüncül olarak dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Hassanhanoğlu (2022) çalışmasında işletmelerde periyodik bakımların önemini ve iş kazalarının etkilerini ekonomik boyutuyla incelemiştir.

Hassanhanoglu (2022) özellikle *İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik* ile iş ekipmanının yeterli bakımının yapılmasına ek olarak işverene iş ekipmanının periyodik kontrollerinin yaptırılması yükümlülüğü getirildiğini belirtmektedir. Böylelikle bakım-onarım ile muayene net olarak ayrılmaktadır. Bakım-onarım kayıtlarının tutulması gerektiği ilgili standartlarda bir kontrol kriteri olarak yer almaktadır. Sektörde en çok karıştırılan konu bakım-onarımlar tam ve eksiksiz yapılsa bile muayenenin yapılması gerekliliğidir.

Koç ve Akbıyık (2011) Türkiye’de iş kazalarının maliyetlerini incelemiş ve çözüm önerilerinde bulunmuştur. Türkiye’de iş kazalarına yönelik olarak, her altı dakikada bir iş kazası meydana gelmekte ve günde ortalama 3 kişi hayatını kaybetmekte olduğunu vurgulamışlar ve iş kazası ve meslek hastalığının mali boyutu ülkelerin gayrisafi milli hasılasının yüzde biri ile dördü arasında değişmekte olduğunu belirtmişlerdir. Bunlar düşünüldüğünde periyodik muayeneler sonucu çıkan sonuçlara göre gerekli kontrol önlemlerin alınması neticesinde oluşacak maliyetin aslında yaşanabilecek iş kazasından daha düşük maliyete neden olacağı öngörülebilir. Koç ve Akbıyık (2011)’a ek olarak Güney (2019) çalışmasında proaktif yaklaşımların önemini vurgulamış ve vinç kazalarını önlemek için reaktif yaklaşımlar yerine proaktif yaklaşımların benimsenmesi zorunluluğuna vurgu yapmıştır. Dolayısıyla iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin verilmesi ve vinç operatörlüğü gibi mesleki yeterliliklerin istenmesi iş kazalarının önlenmesinde önem arz etmektedir.

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, vinç ve kren periyodik muayene sonuçlarını analiz etmeyi amaçlamıştır. İzmir ili ve çevresinde 26 firmada kullanılan 66 adet farklı vinç periyodik muayeneye kapsamında değerlendirilmiş ve periyodik muayene sonuçları analiz edilmiştir. Bu firmalar maden ocağı, tekstil fabrikası, talaşlı imalat ve plastik enjeksiyon alanında üretim göstermektedir. Toplamda beş aylık bir süreçte tüm periyodik muayeneler gerçekleştirilmiştir. Muayeneler 25.04.2013 tarihli 28628 sayılı Resmî Gazetede yayınlanan *İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği* kapsamında yetkilendirilmiş ve kalıcı EKİPNET numarası olan iki makine mühendisi tarafından gerçekleştirilmiştir. Muayeneler temelde kontrol kriterleri ve testler olarak ikiye ayrılmaktadır. Kontrol kriterleri ilgili standartların karşılanması gereken kriterlerden oluşmaktadır. Testlerde ise statik ve dinamik yük testi uygulanmaktadır.

3.1. Vinç ve Krenler için Kontrol Kriterleri

Periyodik muayeneler, *İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği’ne* göre gerçekleştirilir. Muayenelerde ilgili

standarda uygun olup olmadığını tespit edebilmek için görsel kontrol ve fonksiyon testleri gerçekleştirilir. Ayrıca statik ve dinamik yük testleri uygulanmaktadır.

3.1.1. Vinç ve Krenler için Standart Kriterleri ve Yük Testleri

İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği'nde belirtilen TS EN 15011: Krenler - Köprülü ve Portal Krenler, TS EN 14985: Vinçler (Kren) - Döner Kollu Vinç, TS EN 13852-1: Vinçler - Kıyı Ötesi Vinçler, TS EN 13852-2: Vinçler - Kıyı Ötesi Vinçler, TS EN 12999: Vinçler - Yükleyici Vinçler, TS EN 14439+A2: Krenler (Vinçler) - Güvenlik - Kule Krenler, TS EN 13001: Vinçler (Krenler) - Genel Tasarım, TS ISO 9927-1: Vinçler - Muayeneler, TS EN 14492-1+A1: Vinçler (Krenler) - Güç Tahrikli Vinçler ve Ceraskallar, TS EN 13157+A1: Vinçler (Krenler) - Güvenlik Standartları ile gerçekleştirilir. Bu standartlardan yararlanılarak bir kontrol sırasında kontrol edilmesi gereken temel maddeler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Uyarı levhalarının durumu: Vinç çalışma alanı içerisinde vinci kullanacak operatör veya operatörleri ve çalışanları bilgilendirici, uyarıcı işaret, etiket/levhaların bulunduğu gözle kontrol edilir. Görünür şekilde yerleştirildiklerinden emin olunur.

2. Yürüme yolu ve rayların durumu: Yürüme yollarında hareketli ve döner parçaların uygun mahfazalarla kapatıldığına ve herhangi bir deformasyona uğrayıp uğramadığına bakılır. Korkuluk boylarının 110 cm olduğu ölçülür. Eğer bakım-onarım ve muayene faaliyetleri için erişilecek alanlar veya alanlara geçiş sağlayan geçitler varsa bu alanların üstünde en az 180 cm serbest yükseklik olduğu şerit metre ile ölçerek doğrulanır. Bu yükseklik çok sık kullanılmayan bölgelerde 130 cm'ye düşürülebilir. Bakım-onarım ve muayene faaliyetleri için erişilecek alanlar veya alanlara geçiş sağlayan geçitler gibi tüm yolların zeminlerinin kaymaz zemin olduğu kontrol edilir.

3. Yürüme rayları: Köprünün/arabanın yürümesini engelleyecek, sarsıntıya ve titreşime maruz bırakacak, kontrolsüz hareket etmesini sağlayacak deformasyonların olmaması gerekir. Varsa cıvata-somun gibi bağlantılarının çözülmediği ve çözülmeye karşı önlemlerinin olduğu kontrol edilir. Raylar üzerinde gözle görülecek seviyede çatlak olmadığı ve raylar üzerinde korozyon olmadığı kontrol edilir.

4. Çarpma durdurma tamponlarının durumu: Araba hareket sınırlayıcılar (tamponlar) ve yavaşlatıcılar konusunda arabanın hareket yolu üzerinde, arabanın hareket edebileceği her iki yönün sonunda, arabanın hareketini mekanik olarak sınırlandıran levhaların bulunduğu gözle kontrol edilir. Arabanın her iki yanında sınırlandırıcı levhalara denk gelen

plastik veya takoz tamponların bulunduğu gözle kontrol edilir. Kumandada araba hareket butonuna/levyeye basarak arabanın her iki yanında bulunan tamponları arabanın hareket edeceği yolun her iki yönün sonunda bulunan sınırlandırıcı levhalara temas ettirmesi için operatöre komut verilir. Arabanın her iki yanında bulunan tamponların levhalara aynı anda temas edip etmediği gözle kontrol edilir. Arabanın hareket mesafesi şerit metre ölçülür. Kumandada araba hareket butonuna/levyeye basarak tüm hareket mesafesinde bir sefer yapılır. Sefer süresi “dk” biriminde ölçülür. Ölçülen hareket mesafesini ölçülen sefer süresine bölerek köprünün hareket hızı belirlenir. Kablosuz kumanda kullanılması ve arabanın hareket hızı 40 m/dk'nın üzerinde olduğunda, arabayı kumanda da araba hareket butonuna/levyeye basarak sınırlandırıcı levhalara doğru yönlendirmesi için operatöre komut verilir. Arabanın sınırlandırıcılara temas etmeden önce bir güvenlik kontağıyla hızının düşürüldüğü gözle kontrol edilir.

5. Köprü hareket sınırlayıcılar (tamponlar) ve yavaşlatıcılar: Köprünün hareket yolu üzerinde, köprünün hareket edebileceği her iki hattın sonunda, köprünün hareketini mekanik olarak sınırlandıran levhaların bulunması gerekir. Köprünün her iki yanında sınırlandırıcı levhalara denk gelen plastik/elastik tamponların bulunduğu kontrol edilir. Kumandada köprü hareket butonuna/levyeye basarak köprünün her iki yanında bulunan tamponları köprünün hareket edeceği yolun her iki yönün sonunda bulunan sınırlandırıcı levhalara temas ettirmesi için operatöre komut verilir. Köprünün her iki yanında bulunan tamponların levhalara aynı anda temas edip etmediği gözle kontrol edilir. Köprünün hareket mesafesi şerit metre ile “m” biriminde ölçülür. Kumanda da araba hareket butonuna/levyeye basarak tüm hareket mesafesinde bir sefer yapılır. Sefer süresini “dk” biriminde ölçülür. Ölçülen hareket mesafesini ölçülen sefer süresine bölerek hızı belirlenir. Kablosuz kumanda kullanılması ve köprünün hareket hızı 40 m/dk'nın üzerinde olduğunda, köprüyü kumandada araba hareket butonuna/levyeye basarak sınırlandırıcı levhalara doğru yönlendirmesi için operatöre komut verilir. Köprünün sınırlandırıcılara temas etmeden önce bir güvenlik kontağıyla hızının düşürüldüğü gözle kontrol edilir.

6. Kabin hareket sınırlayıcılar (tamponlar) ve yavaşlatıcılar: Kabinin hareket yolu üzerinde, kabinin hareket edebileceği her iki yönün sonunda, kabinin hareketini mekanik olarak sınırlandıran levhaların bulunduğu gözle kontrol edilir. Kabinin her iki yanında sınırlandırıcı levhalara denk gelen elastik tamponların bulunduğundan emin olunur.

7. Vinç metal yapısı ve bağlantıları, merdivenler ve platformların durumu: Kabine, bakım-onarım ve muayene alanlarına erişim sağlanan yollar ve geçitlerde eğer hareketli parçalar varsa bu parçalar arasında en az 50 cm olduğu şerit metre ile ölçerek doğrulanır. Çalışma alanlarına ve/veya kabine çıkışı merdiveni değerlendirmek için kullanılan merdivenle-

rin Tip 1 veya Tip 2 olduğuna bakılır. Tip 1 basamaklı merdivenlerde, her iki tarafta tırabzan ve koruyucu orta tırabzan bulunduğu gözle kontrol edilir. Basamaklı merdivenler ile devamlı yüzeyleri arasındaki mesafe 20 cm'den az ise, koruyucu orta tırabzan kullanılmamasına müsaade edilebilir. Tip 2 basamaklı merdivenlerde tırabzan takılmamışsa, yüksekten düşmeye karşı kişisel koruyucu donanımın kullanımı için tertibat bulunduğu gözle kontrol edilir. Basamaklı seyyar merdivenlerin tamamında, her iki tarafta tırabzanlar veya el tutamakları bulunduğunu, basamakların düzenli aralıklarda olduğunu gözle kontrol edilir. Merdivenlerin bağlantılarının çözülmediği ve deformasyona uğramadığı gözle kontrol edilir. Parmaklı merdivenlerde el tutamaklarının bulunduğu gözle kontrol edilir (Düşey parmaklı merdivenler; yürüyüş yoluna, plâtfoma veya dinlenme plâtfomuna erişim sağlıyorsa, yürüyüş yolunun, plâtfomun veya dinlenme plâtfomunun döşemesinden itibaren en az 1 m yükseklikte iki tırabzan sağlandığında. Yürüyüş yolunun, plâtfomun veya dinlenme plâtfomunun döşemesinden itibaren en az 1 m yüksekliğe kadar dik olarak parmaklı merdiven uzatıldığında. Yürüyüş yolunun, plâtfomun veya dinlenme plâtfomunun döşemesinden itibaren en az 1 m yüksekliğe kadar bir tırabzan ve dik olarak bir parmaklı merdiven bulunduğu el tutamaklarının bulunmasına gerek kalmaz). Bulunan merdivenlerin bağlantılarının çözülüp çözülmediği ve deformasyona uğrayıp uğramadığı gözle kontrol edilir.

8. Dinlenme platformu: Tip 1 parmaklı merdivenlerin, ilk 10 m'den sonra her 6 m'de en az bir dinlenme platformlarına sahip olduğu gözle kontrol edilir. Parmaklı merdivenlerin bölmeleri, 6 m'den daha fazla bir yükseklikten kişilerin düşmesini engellemek için konumlandırıldığı, erişim merdiveni boyunca hareketleri kılavuz dâhilinde olduğu, bütün çalışma konumlarında merdivene dik olacak şekilde tasarmlandığı, en az beş esnek şerit ile donatıldığını gözle kontrol edilir. Bulunan çemberlerin bağlantılarının çözülüp çözülmediği ve deformasyona uğrayıp uğramadığı gözle kontrol edilir.

9. Çemberli koruyucu: Düşme riski oluşturan 5 m'den daha yüksek Tip 1 parmaklı merdivenlerin, çemberli bir koruyucu ile donatılıp donatılmadığı gözle kontrol edilir. Belirtilen ölçülerde olduğu şerit metre ile ölçerek kontrol edilir. Aşağıdaki yapılarla bu kural da yerine getirilmiş sayılır; i) 60 m çapındaki bir küre, düşey yapıdan yatay olarak geçemez, ii) Yapı içerisindeki serbest alan, koruyucu çember için verilene eş değerdir.

10. Acil durdurma butonu: Muhtemel veya yaklaşan tehlikeyi engellemek için kumanda veya kumanda yerine yerleştirilen acil durdurma düğmesinin olup olmadığı gözle kontrol edilir. Acil durdurma kumandası veya düğmesinin devredeyken hareketli parçalara giden tüm enerjiyi kestiği, kararlı durumda olduğu ve istem dışı çalışmaya karşı korunduğu fonksiyon testine tabi tutarak kontrol edilir.

11. Makara ve tamburun durumu: Kanca bloğu makaraları, kanca makaraları yapısında deformasyon olup olmadığı ve serbest dönebildikleri gözle kontrol edilir. Halat makaralarının yapısında bir deformasyon bulunmadığı ve serbest dönebildikleri gözle kontrol edilir. Tamburda deformasyon ve halat bağlantıları için tamburda sehim, aşınma ve korozyon gibi deformasyonların olup olmadığı kontrol edilir. Halat bağlantılarının çözülmediği ve çözülmeyecek şekilde tasarmlandığı gözle kontrol edilir.

12. Halat sarım kılavuzunun durumu: Tambur üzerinde halatın düzenli sarım yaptığı dinamik deney sırasında kontrol edilir.

13. Redüktör ve yağ sızıntısı durumu: Redüktörün yağdanlıkların boş olmadığı ve gerekli seviyede yağın bulunduğu gözle kontrol edilir. Redüktör grubundan yağ sızması gibi durumların olmadığı gözle kontrol edilir.

14. Halatın durumu: Halatta tel kırıklığı veya deformasyon olmamalıdır. Bu durum kontrol edilmelidir. Çalışanlar ellerine koruyucu eldiven giyilmelidir. Yumuşak bir malzemedan yapılmış bir bez ile çalışması durdurulmuş vincin halatını bir bezle hafif şekilde silmek ve varsa tel kırıklıklarını hissetmek gerekir. Halat yapısında aşınma, iç korozyon, yassılaşıma, dalgalanma, kafes oluşumu, çelik veya lif özün dışarı çıkması, çap büyümesi, tel gevşemesi, ezilme, aşırı bükülme gibi deformasyonların olup olmadığı gözle kontrol edilir. Çap daralmasını kumpasla mm biriminde ölçerek halat üreticisinin vermiş olduğu çap değerinden %10 daha az olmaması gerekir.

15. Sabit ve taşıma halatlarının bağlantıları durumu: Halat sonlandırmasının hangi tür (kamalı, kurt gözü gibi) olduğu belirlenir. Kamalı bağlantıda kama üzerinde bulunan halat çapıyla kullanılan halat çapının aynı olduğu tespit edilir. Kamalı bağlantıda halat kamadan çıktıktan sonra (yükte maruz kalmayan kısım) yükte maruz kalan halatla birleştirilerek en az bir U cıvata (kelepçe) ile bağlandığı kontrol edilir. U cıvataların çözülüp çözülmedikleri denir.

16. Halatta korozyona karşı önlem: Halat yapısında aşınma, iç korozyon, yassılaşıma, dalgalanma, kafes oluşumu, çelik veya lif özün dışarı çıkması, çap büyümesi, tel gevşemesi, ezilme, aşırı bükülme gibi deformasyonların olup olmadığı gözle kontrol edilir.

17. Kanca durumu: Kancanın iç çapı kumpasla “mm” biriminde ölçülür. Kancanın ağız kısmı kumpasla “mm” biriminde ölçülür. Ölçülen değerlerin kancanın tipine göre üreticisinin belirttiğı değerlerden kanca iç çapının (A değeri) %15, kanca ağız açıklığının (B değeri) %25 artma olmadığı doğrulanır. Bu değerlerden en az birinin azalması durumunda kanca kullanım dışı bırakılır.

18. Güvenlik mandalı durumu: Kanca güvenlik mandalının bulunup bulunmadığı kontrol edilir. Emniyet mandalının yükün kancadan kurtulmasını engelleyecek şekilde tasarlandığı ve varsa yay gibi yapıların görevlerini yerine getirdikleri fonksiyon testine tabi tutarak kontrol edilir. Yükün istemsiz hareketi mandal gibi yapıların dışında kancanın geometrik şekliyle sağlanabilir. Kancanın geometrik şekliyle sağlandığı durumlarda kanca teknik belgeleri kontrol edilir.

19. Vinç hareketi sırasında çalışanları uyarma durumu: Vincin çalışma alanı içerisinde bulunan çalışanları uyarmak amacıyla yükün hareketi ile ilgili verilecek tüm komutlar için çalışan sesli ve/veya ışıklı bir uyarının bulunduğu ve çalışma alanının tamamından görülebilir ve işitilebilir olduğu fonksiyon testine tabi tutarak kontrol edilir.

20. Otomatik kablolu kumanda, kablo yataklarının durumu: Kumandalar üzerinde bulunan araba, köprü hareketleri ve kaldırma ve indirme butonlarının ve/veya levyelerinin, sembollerinin olup olmadığı, TS EN 13557 standardında belirtilen sembollere uygun olup olmadığı ve fonksiyonlarıyla tutarlı olup olmadığı ve karışıklığa neden olup olmadığı kontrol edilir. Uzaktan kumanda sistemli vinçlerin, vincin çalıştığı bölgedeki kişileri ikaz etmek amacıyla bir cihaza sahip olduğu, ikaz cihazının sesli ve her yönden görülebilen yanıp sönen lambalar şeklinde olduğu, vinç çalıştığı sürece devamlı olarak ikaz verdiği kontrol edilir. El kumandasının herhangi bir gerilme durumunda kablosuna gelecek kuvveti engellemek için kumanda kablosundan daha kısa olan bir çelik tel veya halatla bağlandığı ve bağlantılarının çözülmediği ve çözülmelere karşı korunaklı olduğu gözle kontrol edilir. Birden fazla kumanda konsolunun bulunduğu vinçlerde bir kumanda çalışır durumdayken diğer kumandaların acil durum durdurması dışında kumanda fonksiyonlarının tamamını fonksiyon testine tabi tutarak çalışmadıkları kontrol edilir.

21. Elektrik motoru, elektrik elemanları, ana şalter ve panosunun durumu: Vincin acil durumlarda çalışma alanına girilmeden rahatlıkla erişilebilecek bir yerde ana şalteri olduğu ve bir çalışanın enerjiiyi kapattıktan sonra bir diğer çalışanın devreye alamayacağı şekilde tasarlanıp tasarlanmadığı gözle kontrol edilir. Şalterin vincin hareketli parçalarına giden (elektrik motoru gibi) tüm enerjiiyi kestiği fonksiyon testine tabi tutarak kontrol edilir.

22. Kaçak akıma karşı koruma: Bakım ve onarım, muayene personelinin ve operatörün elektrik çarpmasına maruz kalmaması için vinç elektrik sisteminde aydınlatma ve priz gibi (kumanda panosu ve motor dahil değil) devrelerinin kaçak akıma karşı 30 mA'lık kaçak akım rölesiyle korunduğu gözle kontrol edilir. Kaçak akım rölesi üzerinde bulunan test butonuna basarak ve priz üzerinde nötr hattını koruma topraklamasına uy-

gun bir kablo kullanarak dokundurulmasıyla kaçak akım rölesinin çalıştığı fonksiyon testine tabi tutarak kontrol edilir. Kaçak akım rölesi çalıştığı anda aydınlatma ve priz gibi devrelerinin enerjisinin kesildiği doğrulanır. Kablo arabalarının bulunup bulunmadığı gözle kontrol edilir. Operatöre arabayı kumandadan tüm yönlerdeki hareketleri mesafelerinin tamamında yapacak şekilde yapması için komut verilir. Kablo arabalarının yeterli uzunlukta olduğu ve herhangi bir takılma olmadan serbest hareket edebildiği gözle kontrol edilir. Kabloların herhangi bir gerilme durumunda kopmamaları maksadıyla takozlarla sabitlendiği ve gerekli uzunlukta bırakılarak (kıvrımlı yapı) tasarlandığı gözle kontrol edilir.

23. Sınır kesiciler durumu: Beyan (işletme) kapasite sınırlayıcısı (aşırı yük) sistemi ve ikazı konusunda ise kaldırma kapasitesi 1.000 kg'ın üzerinde olan vinçlerin beyan kapasitesinin 1,10 katını askıya alacak şekilde hazırlanarak gerçekleşir. Kumandaya kaldırma komutunu verilir. Yükün yerden ayrılır ayrılmaz kaldırma işleminin sona erdiği, yükü indirme komutunun çalışır durumda olduğu ve sesli ikazın çalıştığı kontrol edilir. Tambur üzerinde en az iki sarım kalana kadar vince, kumandada aşağı yön butonuna/levyeye basarak yükün indirilmesi için operatöre komut verilir. Tambur üzerinde en az iki sarım kaldığı anda bir güvenlik kontağıyla indirme komutunun enerjisinin kesildiği indirme komutuna basılı tutarak denir. Diğer komutların ise fonksiyon testine tabi tutarak çalıştıkları kontrol edilir. Kumandada aşağı yön butonuna basarak kanca bloğunun indirilebileceği en alt konumuna indirmesi için operatöre komut verilir. Kanca bloğu en alt konumdayken tambur üzerinde en az iki sarım bulunduğu gözle kontrol edilir. İki sarım halatın tambur çevresini iki tam tur dönmüş olmasıdır. Üst sınır güvenlik sınırlayıcısı için ise vince, kumandada yukarı yön butonuna/levyeye basarak yükün kaldırılması için operatöre komut verilir. Kanca bloğunun, kaldırma yolu üzerinde bulunan tambur veya tambura en uzak noktada bulunan herhangi bir aksama temas etmeden kaldırma komutunun enerjisinin kesildiği kaldırma komutuna basılı tutarak denir. Diğer komutların ise fonksiyon testine tabi tutarak çalıştıkları kontrol edilir.

24. Vinç çalışmasında aydınlatma durumu: Operatör görüş alanı, güneşlik ve kabin ön ve/veya tavan camı silecekleri konusunda ise belirlenen sürüş konumundaki vinç operatörünün görüş alanı, operatörün vinç ve yük hareketini izlemesine imkân verdiğini operatör koltuğuna oturup gözlem yaparak kontrol edilir. Pencerelerin dış yüzeylerinin temizlenmesi (varsa tavan camı da dahil) için araçların bulunup bulunmadığı ve çalışır durumda oldukları fonksiyon testine tabi tutarak kontrol edilir. Operatörün güneş ve ışığın yansıma etkilerinden korunduğu (örneğin güneşlik) ve yapısı kontrol edilir. Kabin aydınlatması için işletme sırasında kumandaları ve/veya kabin, acil çıkış ve erişim yollarını aydınlatan bir aydınlatma

düzeneğinin bulunup bulunmadığı gözle kontrol edilir. Aydınlatmanın çalışır durumda olduğu fonksiyon testine tabi tutarak kontrol edilir.

25. Fren sistemi durumu: Statik ve dinamik deneylerde yükün kaldırma işlemi yapıldıktan sonra (yer ile en fazla 20 cm mesafe olmalı) şerit metre ile yükün kaldırıldığı yüksekliği yer ile yükün en alt noktası arasında ölçülerek 10 dakika beklenir. Yüksekliği yer ile yükün en alt noktası arasında tekrar ölçülür. İki ölçme arasında fark olup olmadığı belirlenir. Yükün indirme işlemi yapıldıktan sonra (yer ile en az 10 cm mesafe olmalı) şerit metre ile yükün indirildiği yüksekliği yer ile yükün en alt noktası arasında ölçülür ve 10 dakika beklenir. Yer ile yükün en alt noktası arasındaki yükseklik tekrar ölçülür. İki ölçme arasında fark olup olmadığı belirlenir.

26. Makina sicil kartı, bakım onarım ve periyodik kontrol dosyalarının durumu: Vinç için üretici tarafından belirlenen bakım periyotları tespit edilir. Vincin bakım ve onarım kayıtları için bir bakım defteri veya evraklarının olup olmadığı tespit edilir. Belirlenmiş bakım periyotlarında düzenli olarak kayıtların işlendiği kontrol edilir. Vince ait işletme talimatının ulaşılabilir yerde muhafaza edildiği kontrol edilir.

27. Yüksüz hareket durumu: Vincin yüksüz durumda operatöre kumandada bulunan tüm yönlere hareket mesafelerinin tamamında hareket ettirmesi komutu verilir ve fonksiyonlarının tamamını yerine getirip getirmediği kontrol edilir.

28. Vinç işletme kapasitesinin 1,25 katı yükte kaldırma – durdurma durumu: Vincin işletme şartları içerisinde en fazla kullanılan yükü (beyan kapasitesi) belirlenir. Bu belirlenen yükün 1,25 katında bir yük hazırlanır. Yük askıya aldırılır. Vinç operatörüne yükün yerden en az 10 cm en fazla 20 cm kaldırması gerektiği söylenir. Yükün yerden yüksekliği şerit metreyle ölçülür. 10 dakika süre beklenir. Tekrar yükün yerden yüksekliği şerit metreyle ölçülür. İki ölçüm arasında bir fark olup olmadığı tespit edilir. Test sonrası yük boşaltılarak vinç yapısında gözle görülür çatlak, deformasyon, kalıcı şekil değişikliği, bağlantı yerlerinde gevşeme ve hasar oluşumu olup olmadığı kontrol edilir.

29. Vinç işletme kapasitesinin 1,10 katı yükte kaldırma – durdurma durumu: Vinç için belirlenen beyan kapasitesinin 1,10 katında yük hazırlatılır. Belirlenen beyan yükünün 1,10 katı vincin kapasitesinin altında bir değer ise statik test yüküyle de dinamik test yapılabilir. Yük askıya aldırılır. Operatöre kumandada bulunan tüm yönlere hareket mesafelerinin tamamında hareket yatırılıp ve fonksiyonlarının tamamını yerine getirip getirmediği kontrol edilir. Yük önünde engel bulunmadığı sürece yük yerden en fazla 20 cm yüksekliğe kaldırılır. Test sonrası yük boşaltılarak vinç yapısında gözle görülür çatlak, deformasyon, kalıcı şekil

değişikliği, bağlantı yerlerinde gevşeme ve hasar oluşumu olup olmadığı kontrol edilir.

4. Bulgular

Periyodik muayene sonuçları incelenen 66 vincin temelde dört tipe ayrıldığı tespit edilmiştir. 22 tanesi köprülü, 20 tanesi monoray, 18 tanesi pergel ve 6 tanesi portal tipidir. Vinçlerin imal yılları incelendiğinde sadece 8 tanesinin imal yılına ulaşılmış ancak 58 vincin imal yılı bilgisi tespit edilememiştir. İmal yılları tespit edilen vinçlerden 6'sı 0-5 yıl ve 2'si 11 yıl ve üzeri yaşındadır. Ayak açıklıklarına göre 6'sı 0-10 metre ve 60'ı 11 metreden fazla köprü ayak açıklıklarına sahiptir. Vinçlerin 21'i 0-3 metre, 26'sı 4-6 metre ve 19'u 7 metre ve üzeri kaldırma yüksekliğine sahiptir. Vinçlerin 27 tanesi 0-1 ton, 6 tanesi 2-3 ton, 15'i 4-5 ton ve 18 tanesi 6 ton ve üzeri vinç kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Vinç beyan kapasitelerine bakıldığında ise 39'unun 0-1 ton, 8 tanesi 2-3 ton, 12 tanesi 4-5 ton ve 7 tanesi ise 6 ton ve üzeri vinç beyan kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Vinç kanca tiplerine göre 1 vinç üç makara tek ağız (3MTA), 26 vinç basit tek ağız (BTA), 25 vinç çift makara tek ağız (ÇMTA), 1 vinç mapalı bağlantı (MAPA) ve 13 vinç tek makara tek ağız (TMTA) kanca tipine ayrıldığı tespit edilmiştir. 21 vincin (%31,8) kanca ağız kalıcı deformasyona sahip olduğu belirlenmiştir. Halat çapları bakımından ise 36'sının 0-10 mm, 14'ünün 11-20 mm ve 16'sının 21 mm'den fazla veya kapsam dışı olduğu tespit edilmiştir. 4 vincin muayenesinin 6 ayda bir diğer 62 vincin ise 12 ayda bir muayene sıklığının olduğu tespit edilmiştir.

Periyodik muayene sonuçları incelenen 66 vincin muayene sonuç ve kanaatleri değerlendirilmiş ve **%68'sinin güvenli kullanıma uygun olduğu ve %17'sinin eksikliklerin giderilmesi ön koşulu ile güvenli kullanıma uygun olduğu** kanaatine varılmıştır. Vinçlerin **%15'inin kullanıma uygun olmadığı ve derhal kullanım dışı bırakılması gerektiği** kanaatine varılmıştır.

5. Tartışma ve Sonuç

18.02.2022 tarihli ve 31754 sayılı *İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği* kapsamında İzmir ili ve çevresindeki 26 işletmede yapılan 66 adet vinç periyodik muayene raporları incelenmiş ve analiz edilmiştir.

Analizlere göre işletmelerde kullanılan vinçlerin %63,6'sının köprülü ve monoray vinç olduğu görülmüştür. Köprülü ve monoray vinçlerin hareket kabiliyetinin daha üstün olması daha çok tercih edilmesine neden olabilmektedir. Vinç yük kaldırma kapasitesi, maliyeti ve işletmenin fiziksel şartları gibi diğer parametreler de vinç seçimini etkileyebileceği unutulmamalıdır.

Vinçlerin imal yılları %87,9 oranında tespit edilememiştir. Bunun nedeni vinç ve kren üreticisinin ürün tanıtım etiketinin (bilgi plakasının) olmaması veya bu etiketin zamanla eskimesi, üzerinin boyanması ya da yıpranması olabilir. Hâlbuki imal yılının bilinmesi firmada takip edilebilirliği artırmaktadır. Ayrıca krenin boyanması kaldırma kapasitesi bilgi yazısının kaybolmasına yol açmaktadır. Bu nedenle firmalara imal yıllarının tespit edilmesi ve vinçte olması gereken şekilde üretici verilerinin (üretici tasarım kapasitesi) olması gerektiği, vinçlerin boyanırken buna dikkat edilmesi gerektiği hatırlatılmalıdır. Bununla beraber dış ortamda çalışan portal vinçler için korozyondan korunmanın en etkin yolunun boyamak olduğu unutulmamalıdır.

Yapılan tüm muayenelerde vinç kapasite bilgi levhaları imalatçı tarafından asılıp vinç üzerinde belirtilmemişse, işveren bunu operatöre beyan etmemektedir. Bunun için yazılı olarak bir kapasite levhası asılmalıdır. Ayrıca bu vinç kapasitesi (beyan kapasitesi) muayene sırasında test değerlerinde kullanılacağı için çok önemlidir. Bu kapasite levhası operatörün rahat görüş alanında olmalı ve okunaklı bir şekilde hazırlanmalıdır. Yazılı olarak beyan edilmeyen, operatöre sözlü olarak beyan edilmiş vinç çalışma kapasitesi yasalar yönünden anlam ifade etmemektedir. Bu beyanın yazılı olarak, belli bir mesafeden okunabilen ve *Sağlık ve Güvenlik İşaretleri Yönetmeliği* şartlarını sağlayacak şekilde operatörün görme alanında bir yere kapasite levhası olarak asılması gerekmektedir. Ayrıca bu kapasite levhasının yanına asılı yük olduğunu içerecek, yüksekten cisim düşme tehlikesi olduğunu belirten vinç uyarı levhası da asılması önemlidir.

Vinç kapasiteleri ve vinç beyan kapasiteleri incelendiğinde işletmede kullanılan vinçlerin imalat/kurulum kapasitelerinin beyan kapasitelerinden daha düşük beyan edildiği tespit edilmiştir. Bu durum aslında işletme maliyetini dolaylı yönden düşüren etkin bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntem riski azaltmak için alınan bir önlem niteliğindedir. İşletmede gerçekten ihtiyaç olan kapasite ne kadar diye düşünüldüğünde bu kapasitenin imalat kapasitesinin altında olduğu görüldüğünde beyan kapasitesi olarak bunu düşürmek alınacak en iyi önlemdir. Bu konuda görülmüştür ki firmalar vinç kurdururken/tasarlatırken genelde ilerleyen yıllarda bu kapasitenin yetmeyeceğini düşünerek kapasiteyi büyük tasarlatmakta, hatta bina yapısına göre maksimum kurulabilecek kapasitede vinci kurdurmaktadır. Bu durum fazla yatırım maliyetine neden olmakta ve vinç kapasitesi arttığı için iş kazası riski de artmaktadır. Düşürülen bu kapasite ile halatın çalışma ömrünü artırdığı ve enerji maliyetlerini kısıtladığı da unutulmamalıdır.

Yapılan muayenelerde halat ömrünün düşük olmasının en temel sebebi halat sarım kılavuzu olmayan ve iki ton altındaki vinçlerde halat uzunluğunun fazla olması olarak tespit edilmiştir. Oysa kanca en alt seviyede

iken tamburda iki sarım kalması yeterli olacakken bunun on sarımdan fazla olduğu görülmüştür. Bu durum kanca yukarı seviyeye kalktıkça halatın birbirini fazla ezmesine ve halatın daha erken tellenmesine neden olabilir. Bunun için vinçlerde kanca en altta iken tamburda iki sarım kalacak şekilde halat boyu ayarlanıp halat sonlandırılırsa hem halat tellenmeyecek hem de artan halat bir sonraki kullanımda değerlendirilebilir.

Halat sonlandırmada ise monoray vinçlerde genelde klemens bağlantısının eksik yapıldığı veya klemensin ters bağlandığı tespit edilmiştir. Klemens bağlantı hataları halatın halat sonunda ezilmesine neden olur. Halatın son uç kısımdaki bu kısım kesilip atılmakta ve halatın kısılmasına neden olmaktadır.

Muayenelerdeki yük testlerinde görülmüştür ki yük testi öncesi ve sonrasında kanca ağız ölçülerinde %68 oranında bir değişiklik olmamaktadır. Kalan %32 oranında ise oluşan deformasyon kabul edilebilir sınırlar içindedir. Burada da kanca imalatçısının krenin maksimum kapasitesine göre kanca seçmesi ve işletmenin bu kapasiteye göre düşük kapasitede çalışması yatmaktadır. Örneğin 10 tonluk vincin kapasitesi 5 ton olarak beyan edildiğinde kullanılan kanca da üretici tarafından 10 tondan fazla taşımaya göre tasarlanmış olmasına rağmen 5 ton kapasiteli olmaktadır. Dolayısıyla düşük kapasitede çalışan kanca ağız kalıcı deformasyona uğramamaktadır. Aslında bu nominal işletme şartlarında ilerleyen zamanlarda kancanın açılma ihtimalini düşürmekte ve riski azaltmaktadır.

Periyodik muayeneler sırasında işletmelerden gelen talepler değerlendirilince vinç periyodik muayeneleri yönetmeliklerde belirtildiği gibi azami sayıda (yılda bir kere) yaptırılmaktadır. İşletmelerin %94'ü yılda bir kere muayene yaptırmayı tercih etmiştir. Vinç muayene periyotları için ilgili yönetmelikte azami süreler yer verilmiş ve aksi durumda ilgili standarttaki süreler ile vincin risk derecesine göre tespiti istenmiştir. Ancak işletmelerdeki risk değerlendirmelerinde vincin kullanım sıklığı ve bu kullanım sıklığına göre daha kısa sürede muayene ettirilmesi yer almamaktadır. Oysaki haftada 2-3 kez kullanılan bir vinç ile sürekli çalışan bir vincin periyodik muayene süreleri aynı olmamalıdır. Sık kullanılan ama 12 ayda bir periyodik muayenesi yapılan vincin iş kazası riski artabilir. Burada en büyük eksikliğin firmadan gelen muayene talebinin iş güvenliği danışmanları tarafından yönlendirilmemesi ve iş güvenliği kurulunda konuşulmaması olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu muayenenin yasal zorunluluk olarak düşünüldüğünden azami süreler kullanılmaktadır. Ama unutulmamalıdır ki yapılan muayenede tespit edilen bir bulgunun giderilmesi çok büyük bir iş kazasını önleyebilmektedir. Bu nedenle yasal zorunluluklarda belirtilenden daha sık muayeneler gerçekleştirilmesi tavsiye edilmelidir.

Vinçlerin kullanıma uygun olup olmadıklarının değerlendirildiği muayene sonuç ve kanaatler kısmında ise vinçlerin %68'sinin teknik yönden yönetmeliğe uygun olduğu tespit edilmiştir. 11 adet (%17) vinç ise minör hata alarak kullanımına uygunsuzlukların giderilerek devam edilmesine karar vermiştir. Genel olarak yaklaşık %85 oranında vinç düşük riskle kullanılabilir. Ancak vinçlerin %15'i muayene sonucunda uygun bulunmuş ve bu vinçlerin derhal kullanım dışı bırakılması tavsiye edilmiştir. Kullanıma uygun olmayan vinçlerin kullanılması iş kazası riskini artırmaktadır. İş kazalarında sadece operatörler düşünülmemelidir. Vinç operatörlerinin yanı sıra vinç operatörü yardımcısı, destek elemanları ve vincin etrafında çalışan diğer kişiler oluşabilecek iş kazasından direkt etkilenebilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği Tezsiz Yüksek Lisans Bölümü Bitirme Projesi kapsamında yapılmıştır. Çalışmaya doğrudan veya dolaylı olarak katkısı olan bölüm öğretim üyelerine ve Fen Bilimleri Enstitüsü yönetici ve çalışanlarına çok teşekkür ederiz. Çalışmayı yapabilmemiz için bizlere kapılarını açan 26 işletmeye şükranlarımızı sunarız.

Referanslar

- Atalay, O., and Ö. Kılıç. 2016. “Balık Kılıçığı Yöntemi İle Mobil Vinç Kazası Olası Nedenlerinin İncelenmesi.” *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 30(1):73–78.
- Güney, M. E. 2019. “İş Kazası Kavramına Yönelik Algılar.” *Gazi Sağlık Bilimleri Dergisi* 4(2):31–47.
- Hasanhanoglu, C. 2022. “İşletmelerde Periyodik Bakımların Önemi ve İş Kazalarına Etkisinin Ekonomik Boyutuyla İncelenmesi.” *Uluslararası Ekonomi ve Siyaset Bilimleri Akademik Araştırmalar Dergisi* 6(14):68–80.
- Koç, M., and N. Akbıyık. 2011. “Türkiye’de İş Kazalarının Maliyetleri ve Çözüm Önerileri.” *Akademik Yaklaşımlar Dergisi* 2(2):129–75.
- Onur, Y. A. 2016. “Halat Demetinin Statik Davranışının İncelenmesi.” *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi* 6(1):136–43.
- Sarı, Ali, Ömer Faruk Nemutlu, and Bilal Balun. 2021. “Vinç Kancalarının Kırılma Mekanığı Yaklaşımı İle Yorulma Dayanımlarının İncelenmesi.” *Türk Doğa ve Fen Dergisi* 10(1):199–216.
- SGK. 2019. *Sosyal Sigortalar Kurumu İstatistik Yıllıkları*.
- Yıldırım, Ş., and E. Esim. 2019. “Çift Köprülü Askı Tıp Kren Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Metodu İle Modal Analizi.” *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi* 7(Özel Sayı):975–88.

BÖLÜM 3

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMİ VE UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİNİN GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ UYGULAMALARI ÜZERİNDEKİ ROLÜ

Osman Salih YILMAZ¹, Fatih GÜLGEN²

1 Dr. , Manisa Celal Bayar Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0003-4632-9349

2 Prof. Dr. , Yıldız Teknik Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0002-8754-9017

Dünyada fosil yakıtların hızla tükenmesi, gelişen teknolojiler, insan nüfusundaki artış ve sanayileşme enerjiye olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu talebi karşılamak için fosil yakıt kullanımı her geçen gün daha da fazlalaşmaktadır. Yüksek fosil yakıt kullanımı sera gazı emisyonlarının artmasına neden olur (Perera, 2020). Yaşadığımız gezegende küresel ısınmaya sebep olan sera gazlarını azaltmak, aşırı CO₂ salınımını durdurmak zorunluluk haline gelmiştir. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynağı arayışları hız kesmeden devam etmektedir. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları hidroelektrik enerji, jeotermal enerji, rüzgâr enerjisi, biyokütle ve güneş enerji olarak sıralanabilir (Kawase, Okajima ve Uchiyama, 2013; Van Hoesen ve Letendre, 2010). Bunlar arasında güneş enerjisi sonsuz ve çevre dostu olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Fotovoltaik (FV) olarak adlandırılan hücresel yapıları kullanarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güneş enerjisi sistemleri günümüzde oldukça yaygın hale gelmiştir (Duffie ve Beckman, 2013; Kalogirou, 2014; Şen, 2015).

FV hücrelerden oluşan modüller güneş pilleri olarak da bilinen ve güneşten gelen radyasyonu elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. FV modüllerin bir araya gelmesi ile oluşan güneş enerjisi santrali (GES) güneş ışınlarının erişebildiği birçok yüzeye tesis edilebilir. Son yıllarda atıl kalmış arazilere (Sánchez-Lozano, Teruel-Solano, Soto-Elvira ve García-Cascales, 2013), bina yüzeylerine (Catita, Redweik, Pereira ve Brito, 2014), çatılara (Hande Mahide Yeşilmeden ve Ahmet Özgür Doğru, 2019), su kütlelerinin yüzeylerine (Shyam ve Kanakasabapathy, 2022), kara araçlarına (Heinrich ve diğerleri, 2020), deniz araçlarına (Kolada, 2020), uzay araçlarına (Bailey ve Flood, 1998) ve aydınlatma cihazlarına (Duman ve Güler, 2019) FV modüllerin kurulduğu görülmektedir. Bu kullanım alanları içerisinde özellikle arazi kurulumları, çatı ve su yüzeyi uygulamalarında FV modüllerin uygun sistemlerle sabitlenmesi, kurulacak uygun alanların belirlenmesi özel bir çalışma alanı haline gelmiştir. FV modüllerin kurulacağı yüzeye gelen güneş radyasyonu miktarı elektrik üretim kapasitesi üzerindeki en etkili parametredir. FV modülünün üzerine düşen güneş radyasyonu o anki güneşin konumu, atmosferik koşullar, arazi topografyası gibi çeşitli kriterlere bağlıdır. Çatı üstü uygulamalarda ise çatının geometrisi, çatı üzerindeki duvarlar, bacalar gibi gölgelenme oluşturabilecek unsurlara bağlıdır. Su kütlesi yüzeyi uygulamalarında, yüzey sınırları, su üzerindeki yapay ya da doğal detaylar ile gölgelenmeye neden olabilecek diğer unsurlar etkilidir. Bu unsurlar, coğrafi bilgi sistemi (CBS) ve uzaktan algılama (UA) teknikleri ile bütüncül olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışma dört farklı bölümden oluşmaktadır. Birinci ve ikinci bölümde sırasıyla CBS ve UA teknikleri açıklanmıştır. Üçüncü bölümde GES sistemlerinin arazi ve çatı üzeri uygulamalarından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise GES sistemlerinin su yüzeyi uygulamaları CBS ve

UA kapsamındaki örnekler ile ilişkilendirilerek açıklanmıştır.

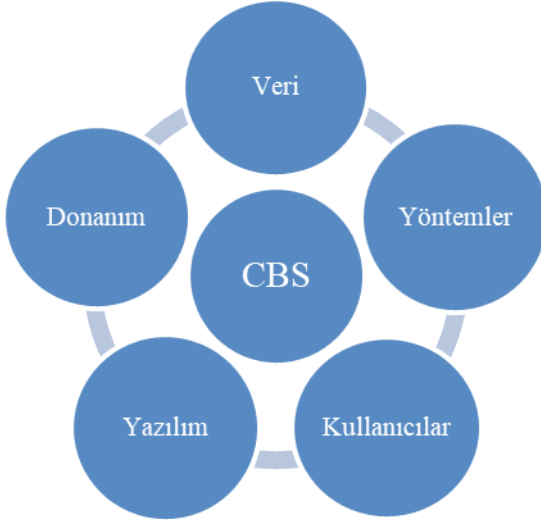
1. Coğrafi Bilgi Sistemleri

Gelişen teknolojiye bağlı olarak günümüzde üretilen veri miktarı hızla artmaktadır. Zettabyte kadar ulaşan büyük veriyi depolamak, ayrıştırmak, yönetmek ve bu veri üzerinden doğru kararları verebilmek ancak bilgi sistemleri ile mümkündür. Bilgi sistemleri, veriyi kullanan, sorgulayan, analiz eden ve karar destek sistemleri oluşturan veri işlem organizasyonları olarak adlandırılır (Singleton ve Arribas-Bel, 2021).

CBS'nin gelişimi, 1950'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri trafik haritalarının sayısallaştırılmasıyla başlayan süreçtir. 1963 yılında Roger Tomlinson önderliğinde Kanada kaynak yönetimi amaçlı arazi sınıflandırma çalışmalarıyla devam etmiştir. Günümüzde CBS mekanla doğrudan ya da dolaylı bağlantılı verilerin işlendiği her alanda aktif olarak kullanılan bir bilimdir. Dünyada gelişmiş ülkeler; kaynak yönetimi, şehir planlama, mekansal bilişim teknolojileri, UA, sosyoloji, antropoloji, ekonomi, politika, toplum yönetimi gibi alanlarda CBS'den sıklıkla yararlanmaktadır (Yomralıoğlu ve diğerleri, 2007). Geçmişten günümüze CBS ile ilgili birçok tanım yapılmıştır. Bilişim teknolojisinin ilerlemesi, verilerin artık bilgisayarlarda değil de bulut ortamlarında saklandığı, verilere anlık olarak ulaşılabildiği, büyük veri (big data) kavramının konuşulduğu bu çağda CBS; *mekânsal ve mekânsal olmayan veriler üzerinde, masa üstü ortamda, bulut ortamında ya da mobil ortamda anlık olarak analiz yapabilen, sorgulayan ve sonuç ürünleri paydaşlarla paylaşarak karar destek sistemleri oluşturan bir bilimdir.*

1.1.Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Bileşenleri

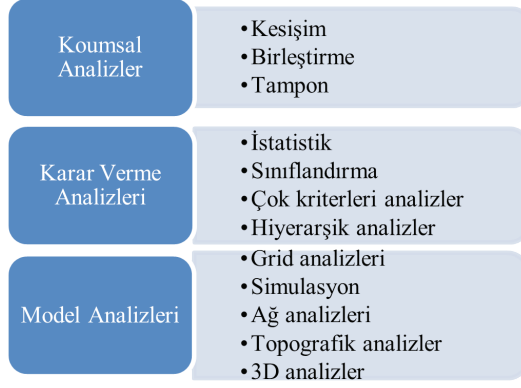
CBS'nin çalışabilmesi için farklı bileşenlerin bir arada bulunması ve birbirlerine entegre olarak çalışması gerekir. Bu bileşenler temelde yazılım, donanım, kullanıcılar, yöntemler, veriler olarak sıralamak mümkündür (Şekil.1).



Şekil 1. CBS'nin bileşenleri

1.2. Coğrafi Bilgi Sistemlerinde Analizler

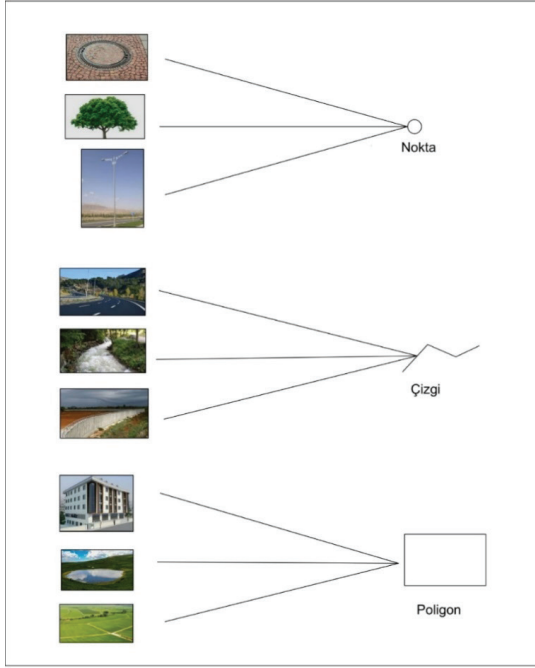
CBS'de veri analizi, mekânsal ilişkilerin etkileşimine dair sorulara cevap aramanın yoludur (Stillwell ve Clarke, 2004). Veri analizinin özünde, doğru soruların sorulması, doğru işlemlerin uygulanması ve cevapların doğru olarak yorumlanması yatar (Şekil 2). CBS'de, yakınlık, çakıştırma ve ağ analizi şeklinde sınıflandırılan üç temel analiz mevcuttur. Yakınlık analizi, nesnelere arasındaki mesafelere ilişkin olarak CBS'yi sorgular. Çakıştırma analizi, bir soruya yanıt olarak farklı CBS katmanlarını birleştirir. Ağ analizi, bir grup çizgi nesne birlikte nasıl işlev görür sorusuna yanıt verir. Bu analizlerin yanında grid analizleri ve arazi analizleri de önemli analiz işlemleridir. Grid analizi coğrafi referanslı raster görüntülerin çakıştırılması ve piksel bazında analiz yapılmasına imkân sağlar (Goodchild ve Longley, 1999). Arazi örtüsü ve kullanımına ilişkin dokulardaki değişimin tespiti için kullanılan iki temel analiz yaklaşımı vardır. Bunlar sınıflandırma öncesi ve sınıflandırma sonrası yöntemler olarak adlandırılır. Sınıflandırma öncesi yöntemler arasında temel bileşenlerin analizi, görüntü farkı alma, görüntü oranlama ve bitki indeksleri olarak sayılabilir. Sınıflandırma sonrası yöntemler ise iki farklı sınıflandırılmış görüntünün piksel bazında sınıf türündeki değişimi tespit ederek fark haritası oluşturmak için kullanılır (Sunar, 1998).



Şekil 2. CBS'de analiz yöntemleri

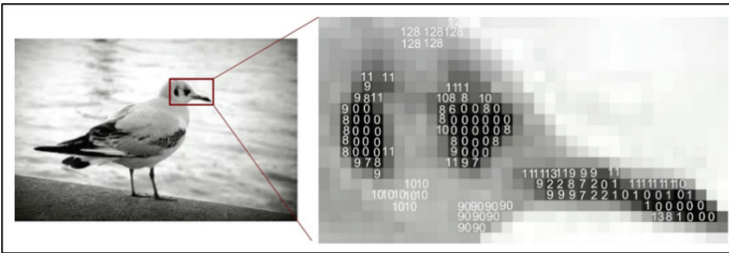
1.3. Coğrafi Bilgi Sistemlerinde Veri Kavramı

CBS'de verileri konumsal veriler (haritalar, uydu görüntüleri, fotogrametrik ürünler) ve konumsal olmayan veriler (konumsal veri ile ilişkili sözel veriler) diye iki temel grupta toplanır (Yomralıoğlu, 2002). Yeryüzü üzerindeki detaylar harita düzlemine aktarılırken üç temel grupta toplanarak aktarılır. Bunlar nokta ile temsil edilen nesnelere örneğin ağaç, poligon noktası, sokak direği, rögar kapağı vb. çizgi ile temsil edilen yol, dere, duvar vb. ve çokgen (poligon) olarak temsil edilen parsel, göl, bina vb. nesnelere oluşmaktadır. Harita düzleminde gösterilen bu veriler vektör veri olarak adlandırılır (Şekil 3). CBS'de iki temel vektör veri modeli bulunmaktadır. Bunlar spagetti veri modeli ve topolojik veri model yapılarıdır (Turoğlu, 2000).



Şekil 3. Vektör veriler

CBS’de kullanılan bir diğer veri formatı ise raster verilerdir. Raster veriler grid yapısına sahip hücrelerden oluşur. Her bir hücre piksel olarak adlandırılır ve görüntünün en küçük birimidir. Raster verileri haritaların taranması, dijital fotogrametrik ürünler ve uydu görüntüleri örnek olarak verilebilir. Raster görüntüler .tif, .jpg, .png gibi formatlarda saklanır. Görüntü üzerindeki renk tonları her pikselde sayısal değerler ile ifade edilir. Bu sayılar raster veri üzerinde yapılacak tüm analizlerin girdisidir (Şekil 4). Raster veriler matris kodlama, satır boyunca kodlama, nokta değer kodlama, dörtlü ağaç kodlama, zincir kodlama, blok kodlama şeklinde saklanırlar (Congalton ve Green, 1992).

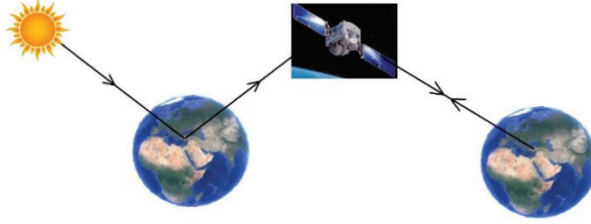


Şekil 4. Raster veri

2. Uzaktan Algılama

Güneşten yayılan elektromanyetik enerji yeryüzüne inene kadar farklı etkileşimler içinde bulunur. Bu enerjinin büyük kısmı atmosfer tarafından emilirken bir kısmı saçılır. Bir kısmı ise yeryüzüne iner. Yer yüzüne ulaşan elektromanyetik enerji, yeryüzündeki nesnelere tarafından geçirilir, saçılır ya da emilir. Elektromanyetik enerjinin nesnelere geri yansıyan kısmının algılanması ve görüntüye dönüştürülmesi UA bilimi tarafından incelenir. UA, en genel tanımı ile nesnelere temas etmeksizin nesnelere hakkında bilgi edinme sanatı olarak tanımlanır (Richards, 2013).

UA ile yeryüzüne ve onun atmosferine ait verilerin toplanması günümüzde iki şekilde gerçekleştirilir. Bunlardan ilkinde güneşten yansıyan enerjiyi algılayan pasif sistemler kullanılır. Diğer sistemler kendi enerji kaynağını kullanır ve hedef nesne ya da yüzey ile etkileşim kurarak veri toplar (Brydegaard, Merdasa, Gebru, Jayaweera ve Svanberg, 2016). Bunlar aktif sistemler olarak adlandırılır (Şekil 5).



Şekil 5. Aktif ve pasif sistemler

UA uydulardan elde edilen görüntülere ilişkin uydu teknolojisine uygun çözümler söz konusudur. Bunlar, mekânsal, spektral, radyometrik ve zamansal çözünürlük olarak sıralanır (Bukata, Jerome, Kodratyev ve Podnyakov, 1995).

Mekânsal çözünürlük: Görüntüdeki piksel büyüklüğünün mekandaki karşılığı olan büyüklüktür.

Spektral çözünürlük: Kullanılan uydu teknolojisine göre değişen, kullanılan bant sayısı ve bant genişliklerini ifade eder.

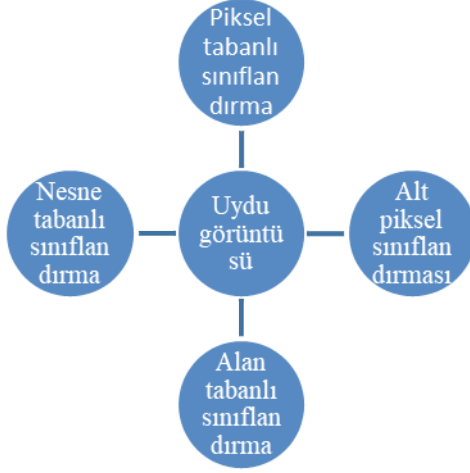
Radyometrik çözünürlük: Görüntüdeki resme ait gri renk değerleri olarak ifade edilir.

Zamansal çözünürlük: Uydu sistemlerine bağlı olarak bir lokasyona ait veri toplama zaman aralığıdır.

Uzaktan algılanmış görüntüler bazı ön işlemlerden geçirilerek kullanılır. Atmosferik düzeltme, radyometrik düzeltme, topografik düzeltme

ve geometrik düzeltme temel ön işlemlerdir (Young ve diğerleri, 2017). Günümüz teknolojisinde uydu görüntülerinin çoğuna bu düzeltmeler uygulanmış olarak indirilip kullanılma imkânı bulunur.

Düzeltilmesi yapılmış uydu görüntüleri üzerinden bilgi üretmek için görüntülere sınıflandırma işlemi uygulanır. Sınıflandırmadaki temel mantık farklı yansıma özelliği sergileyen nesnelere farklı spektral gruplara ayırmak ve pikselin yansıma değerinin karşılığını yeryüzün de bulmaktır (Mather ve Tso, 2016). Uydu görüntülerinde sınıflandırma yaklaşımları piksel tabanlı sınıflandırma, alt piksel sınıflandırma, alan tabanlı sınıflandırma ve nesne tabanlı sınıflandırma olarak sıralanabilir (Şekil 6).



Şekil 6. Sınıflandırma yöntemleri

Sınıflandırma çalışmalarında iki temel yaklaşım söz konusudur. Bu yaklaşımlar kontrolsüz (denetimsiz) ve kontrollü (denetimli) sınıflandırma teknikleridir. Kontrolsüz sınıflandırma, çalışılan saha hakkında herhangi bir bilgiye sahip olmadan sınıf sayısına bağlı olarak pikselleri spektral gruplara ayırır (Jiang, Wang ve Yang, 2011). Kontrollü sınıflandırmada, görüntü üzerinden atanacak sınıflar belirlenir. Bu sınıflara ilişkin eğitim (training) verileri seçerek belirlenir. Seçilen alanlar içine düşen piksellerin genel özelliklerine göre tüm pikseller belirlenen sınıflar içerisine atanır (Okun, 2008).

3. Güneş Enerji Santrallerinin Arazi ve Çatı Üstü Uygulamaları

FV sistemler, 1839 yılında Fransız bilim adamı Becquerel'in elektrotlar arasındaki oluşan gerilimin elektrolit üzerine düşen güneş radyasyonuna bağlı olduğunu ileri sürmesi ile ortaya çıkmıştır. FV yüzeyler genellikle kare, dikdörtgen ve daire biçiminde olup 100 mm x 100 mm, 125 mm x 125 mm, 156 mm x 156 mm gibi değişen boyuttalardır. FV modüllerin kalınlıkları 0,1 – 0,4 mm arasında değişmektedir. FV sistemler şebekeye bağımlı (on-grid) ve şebekeden bağımsız (off-grid) olarak çalışabilir. Şe-

bekeye bağımlı sistemler ürettiği elektrik enerjisinin fazlasını şebekeye aktarabilirken eksik olanı ise şebekeden çeken sistemlerdir. Şebekeden bağımsız sistemler ise ürettiği elektrik enerjisini bir batarya yardımıyla depolar. Bir FV sistem yapısında, şarj kontrol cihazı, aküler, inverter, FV modül gibi parçalar bulunur. FV hücre tipleri, kristal silikon (monokristal, polikristal), incefilm (amorf silikon, kadmiyum tellürid (CdTe), bakır indiyum diselenid (CIS), mikrokristal ve mikroform, DSSC boyalı) olmak üzere iki temel yapıda ele alınır (Yılmaz, 2021).

Araziye uygulanan GES için sabitleyici sistemler doğrudan yere, beton ya da konstrüksiyon üzerine monte edilir (Şekil 7) (Şençiçek, 2017).



Şekil 7. FV sistemlerin arazi uygulamalarına örnekler

Arazi uygulamalarında GES sistemlerinin tesis edileceği uygun yerlerin belirlenmesi oldukça karmaşık bir işlemdir (Merrouni, Elalaoui, Mezrhab, Mezrhab ve Ghennioui, 2018). Birçok kriterin bir arada değerlendirilmesi ve uygun yerlerin belirlenmesi çok kriterli karar verme (ÇKKV) araçları kullanılarak yapılır. Bunlar arasında en çok kullanılan yöntem CBS temelli analitik hiyerarşi prosesi (AHP)'dir (Uyan, 2013). Charabi ve Gastli (2011) Umman'da güneş enerjisi kaynaklarının değerlendirilmesi amacıyla GES'ler için uygun bölgeleri belirlemek için bulanık mantık metodunu uygulamış ve toplam arazi alanının %0,5'inin uygun olduğunu belirlemiştir. Yeo ve Yee (2014) Kore'de enerji CBS veri tabanı oluşturmuş ve yapay sinir ağları (YSA) yöntemini kullanarak kentsel bir bölgede enerji tedarik amacıyla GES sistemleri için uygun alanları belirlemiştir. Son yıllarda GES ile ilgili makine öğrenme algoritmalarının kullanıldığı bazı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir (Howlader ve diğerleri, 2017).

GES sistemlerinin bina çatılarına yan yüzeylerine uygulandığı çalışmalar gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu uygulamalar binaların kendi elektrik ihtiyacını karşılamalarının yanında daha az miktarda karbon emisyonu üretmelerini sağlayarak çevre kirliliğinin azalmasına yardımcı olmaktadır. Buna karşın bina uygulamalarında en çok karşılaşılan problem gölgeleme etkisidir. Çatılarda gölge yerlerin belirlenmesi hususunda CBS ve UA teknikleri sıklıkla kullanılmaktadır (Lee ve Zlatanova, 2009). LIDAR verileri ile 2.5 B kentsel modelleri oluşturularak kentsel yüzeylerde, çatılarda ve bina cephelerinde güneş radyasyonu hesaplanabilir (Jochem,

Höfle, Hollausb ve Rutzingerc, 2009; Charabi, Rhouma ve Gastli, 2010; Latif, Zaki ve Salleh 2012; Verso ve diğerleri, 2015; Ko, Jang ve Radke, 2017; Kouhestani ve diğerleri, 2019; Lukač ve diğerleri, 2014; M. Martín, Domínguez ve Amador, 2015; Palmer ve diğerleri, 2018; Salimzadeh ve Hammad, 2017). UA tekniklerinden biri olan fotogrametrinin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur (Bergamasco ve Asinari, 2011)

4. Güneş Enerji Santrallerinin su üzeri uygulamaları

GES tesislerinin bir diğer uygulama alanı su kütleleri üzerine kurulum şeklindedir. Bu uygulamalar, göl, baraj, sulama kanalı ve açık denizler üzerine kurulumlar şeklinde sıralanabilir (Şekil 8) (Martins, Pereira ve Abreu, 2007). Yüzer GES sistemleri karasal sistemler ile aynı çalışma prensibine sahiptir. Arazi üzerine yapılan uygulamalarda çevre ile ilgili olumsuzluklara sıklıkla rastlanmaktadır. Bunlar arasında; tarımsal açıdan üretken araziler ile ormanlık ve doğal yaşam alanlarında azalma ve görsel kirlilik sayılabilir (Pimentel Da Silva ve Branco, 2018). Bu kapsamda su yüzeylerine kurulan GES uygulamaları karasal sistemlere göre daha avantajlıdır (Khan, Islam, Akter, Islam ve Hossain, 2020). Yüzer GES sistemlerin yüzmeleri için yüzdürücü ekipman (duba), sürüklenme ve dönmeye karşı sabitleme sistemleri ve üretilen elektrik enerjisini karaya taşımak için özel kablo donanımına ihtiyaç vardır (Şençiçek, 2017).



Şekil 8. GES'lerin su üstü uygulamaları

Ortamdaki ısının artmasının FV modüllerin verimliliklerini düşüreceği göz önüne alındığında suyun soğutma etkisi FV modüllerin verimliliğini %8-%13 arasında değişen oranlarda artırmaktadır (Choi, Lee ve Kim, 2013; Choi ve diğerleri, 2014). Ayrıca modüller su yüzeyini kapladığında sudaki buharlaşmayı en aza indirerek su tasarrufu da sağlamaktadır (Santafé ve diğerleri, 2014). Suya gelen güneş ışığını kesen modüller sudaki yosun oluşumunu da azaltarak suyun daha temiz kalmasını sağlar (Bekhouche, Khoucha, Benrabah, Benbouzid ve Benmansour, 2022). Dünyada yüzer GES sistemleri üzerine yapılmış çok sayıda araştırma mevcuttur. Bunlardan

bir kısmı yüzer GES ile karasal sistemlerinin performanslarını araştırmaya yönelik olarak yapılmış çalışmalar (Azmi ve diğerleri, 2013; Choi ve diğerleri, 2014; Sacramento ve diğerleri, 2015). CBS ve UA teknikleri yüzer GES uygulamalarında da etkin olarak kullanılmıştır. Song ve Choi (2016), Kore’de bir maden ocağında yüzer sistemini potansiyelini balık gözü lens kamera kullanarak analiz etmiştir. Ateş, Yılmaz ve Gulgen (2020), Manisa Demirköprü Barajı’nda baraj kıyı çizgisinin değişimini UA teknikleri ile belirleyerek baraj rezervuar üzerine yüzer GES tasarlamıştır. Su üzerinde oluşabilecek gölgelik alanları SRTM verisi üzerinden CBS analizleri ile belirleyerek yüzer GES için gölgesiz alanları belirlemiştir.

5. Sonuç

İnsanların daha modern yaşama talepleri beraberinde enerji tüketimini de artırmıştır. Bu artan talebi karşılamak için fosil yakıtların kullanımının artması ve buna bağlı çevresel sorunları ortaya çıkarmıştır. Aynı zamanda tükenen fosil yakıtlar ve oluşan çevresel sorunlar yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi kullanımını hızlandırmıştır. Bu amaçla geliştirilen FV hücreler teknolojinin de gelişmesiyle her geçen gün daha yaygın hale gelmiştir. Dünyada çeşitli uygulama alanları bulan GES’ler açık arazi uygulamaları ile oldukça fazla elektrik üretimi sağlamaktadır. Bu sayede bir beldenin, ilçenin hatta bir ilin enerji ihtiyacının büyük bölümünü sağlama kapasitesine sahiptir. Bina çatı uygulamaları binalar kendi elektrik ihtiyacının çoğunu karşılayarak hem ülke ekonomisine katkı sağlamakta hem de çevre kirliliğini azaltmaktadır. Su yüzeyi uygulamalarında ise arazi kullanımı üzerindeki baskıyı azaltarak daha çevreci olmakla birlikte karasal sistemlere göre daha verimli çalışabilmektedir. Diğer çeşitli uygulamalarında da karbon emisyonlarının azalmasına sebep olarak çevreye olumlu katkılar sağlamaktadır.

GES’lerin tüm bu uygulamalarında FV modüllerin daha verimli çalışabilmesi için uygun kurulum alanlarının belirlenmesi önemli bir konu haline gelmiştir. Bu amaçla CBS ve UA tekniklerinin GES projelerinde kullanılması gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle çeşitli kriterleri bir arada değerlendirerek GES’ler için uygun yer seçimi çalışmalarında ve güneş radyasyon hesaplamalarında CBS teknikleri neredeyse eşsiz bir araç haline gelmiştir. Radyasyon haritalarını üretilmesinde, geniş alanların görüntülenmesinde ve arazi kullanımı belirleme gibi çeşitli çalışmalarda UA teknikleri GES’lere önemli altlıklar sağlamaktadır.

Bu çalışmada genel olarak FV sistemlerin kullanım alanları, CBS, UA teknikleri ve bu tekniklerin GES kurulumlarındaki rolü anlatılmıştır. Çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının dünyada daha fazla kullanılması teşvik edilmelidir. Bu kaynakların kullanılmasında multidisipliner bir yaklaşım benimsenmeli CBS ve UA tekniklerinden daha fazla faydalanılması bu kaynakların daha efektif kullanılması için önemlidir.

Kaynaklar

- Ateş, A. M., Yılmaz, O. S. ve Gulgen, F. (2020). Using remote sensing to calculate floating photovoltaic technical potential of a dam's surface. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 41(100799), 1–12. doi:10.1016/j.seta.2020.100799
- Azmi, M. S. M., Othman, M. Y. H., Ruslan, M. H. H., Sopian, K. ve Majid, Z. A. A. (2013). Study on electrical power output of floating photovoltaic and conventional photovoltaic. *AIP Conference Proceedings* içinde . doi:10.1063/1.4858636
- Bailey, S. G. ve Flood, D. J. (1998). Space photovoltaics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 6(1), 1–14.
- Bekhouche, R., Khoucha, F., Benrabah, A., Benbouzid, M. ve Benmansour, K. (2022). Electric Power Components and Systems An Improved Active Disturbance Rejection Model Predictive Power Control with Circulating Current Reduction for Grid-Connected Modular Multilevel Converter An Improved Active Disturbance Rejection Model Predictive Powe. *Electric Power Components and Systems*, 0(0), 1–15. doi:10.1080/15325008.2022.2050448
- Bergamasco, L. ve Asinari, P. (2011). Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Further improvements by ortho-image analysis and application to Turin (Italy). *Solar Energy*, 85(11), 2741–2756. doi:10.1016/j.solener.2011.08.010
- Brydegaard, M., Merdasa, A., Gebru, A., Jayaweera, H. ve Svanberg, S. (2016). Realistic Instrumentation Platform for Active and Passive Optical Remote Sensing. *Applied Spectroscopy*, 70(2), 372–385. doi:10.1177/0003702815620564
- Bukata, R. P., Jerome, J. H., Kodratyev, A. V. ve Podnyakov, D. V. (1995). *Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters*. CRC Pres.
- Catita, C., Redweik, P., Pereira, J. ve Brito, M. C. (2014). Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. *Computers & Geosciences*, 66, 1–12.
- Charabi, Y. ve Gastli, A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 36(9), 2554–2561.
- Charabi, Y., Rhouma, M. B. H. ve Gastli, A. (2010). GIS-based estimation of roof-PV capacity & energy production for the Seeb region in Oman. *2010 IEEE International Energy Conference* içinde (ss. 41–44). IEEE.
- Choi, Y.-K., Lee, N.-H. ve Kim, K.-J. (2013). Empirical Research on the efficiency of Floating PV systems compared with Overland PV Systems. *Proceedings, The 3rd International Conference on Circuits, Control, Communication, Electricity, Electronics, Energy, System, Signal and Simulation*. içinde (C. 25).

- Choi, Y.-K., Lee, N.-H., Lee, A.-K. ve Kim, K.-J. (2014). A study on major design elements of tracking-type floating photovoltaic systems. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3(1), 70–74. doi:10.12720/sgece.3.1.70-74
- Congalton, R. . ve Green, K. (1992). The ABC's of GIS - An introduction to geographic information systems. *Journal of forestry*, (11), 13–20.
- Duffie, J. A. ve Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Duman, A. C. ve Güler, Ö. (2019). Techno-economic analysis of off-grid photovoltaic LED road lighting systems: A case study for northern, central and southern regions of Turkey. *Building and environment*, 156, 89–98.
- Goodchild, M. F. ve Longley, P. A. (1999). The future of GIS and spatial analysis. *Geographical information systems*, 1, 567–580.
- Hande Mahide Yeşilmeden ve Ahmet Özgür Doğru. (2019). Finding the Best Locations for Photo-voltaic Energy Panel Installation in Urbanized Areas. *Fresenius Environmental Bulletin*, (February), 619–625.
- Heinrich, M., Kutter, C., Basler, F., Mittag, M., Alanis, L. E., Eberlein, D., ... Neuhaus, D. H. (2020). Potential and challenges of vehicle integrated photovoltaics for passenger cars. *Presented at the 37th European PV Solar Energy Conference and Exhibition* içinde (C. 7, s. 11).
- Howlader, M. M. M., Howlader, M. M. M., Rokonzaman, M., Khan, M. S. A., Nur, A. U. ve Al Amin, A. (2017). GIS-based solar irradiation forecasting using support vector regression and investigations of technical constraints for PV deployment in Bangladesh. *2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)* içinde (ss. 675–680). IEEE.
- Jiang, L., Wang, W. ve Yang, X. (2011). Classification Methods of Remote Sensing Image Based. *IFIP International Federation for Information Processing*, 1, 353–358. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-18333-1_41.pdf adresinden erişildi.
- Jochem, A., Höfle, B., Hollaus, M. ve Rutzinger, M. (2009). Object detection in airborne LIDAR data for improved solar radiation modeling in urban areas. *Laser scanning*, 38, 1–6. doi:10.1.1.409.7289
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems* (Second Edi.). San Diego: Elsevier.
- Kawase, M., Okajima, K. ve Uchiyama, Y. (2013). Evaluation of potential geographic distribution for large-scale photovoltaic system in suburbs of China. *Journal of Renewable Energy*, 2013.
- Khan, K. A., Islam, S., Akter, A., Islam, A. ve Hossain, S. (2020). A Study on Floating SPV Power for Practical Utilization across the Globe. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas*, 6(1), 235–251.
- Ko, Y., Jang, K. ve Radke, J. D. (2017). Toward a solar city: Trade-offs between

- en on-site solar energy potential and vehicle energy consumption in San Francisco, California. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(6), 460–470. doi:10.1080/15568318.2016.1274807
- Kolada, B. (2020). *Project of photovoltaic power supply for the electrical installation of a sailing sea yacht*. Instytut Techniki Cieplnej.
- Kouhestani, F. M., Byrne, J., Johnson, D., Spencer, L., Hazendonk, P. ve Brown, B. (2019). Evaluating solar energy technical and economic potential on rooftops in an urban setting: the city of Lethbridge, Canada. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10(1), 13–32. doi:10.1007/s40095-018-0289-1
- Latif, Z. A., Zaki, N. A. M. ve Salleh, S. A. (2012). GIS-based estimation of rooftop solar photovoltaic potential using LiDAR. *2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications* içinde (ss. 388–392). IEEE.
- Lee, J. ve Zlatanova, S. (2009). Solar radiation over the urban texture: LIDAR data and image processing techniques for environmental analysis at city scale. *3D Geo-information sciences* içinde (ss. 319–340). Springer.
- Lukač, N., Seme, S., Žlaus, D., Štumberger, G. ve Žalik, B. (2014). Buildings roofs photovoltaic potential assessment based on LiDAR (Light Detection And Ranging) data. *Energy*, 66, 598–609. doi:10.1016/j.energy.2013.12.066
- M. Martín, A., Domínguez, J. ve Amador, J. (2015). Applying LIDAR datasets and GIS based model to evaluate solar potential over roofs: a review. *AIMS Energy*, 3(3), 326–343. doi:10.3934/energy.2015.3.326
- Martins, F. R., Pereira, E. B. ve Abreu, S. L. (2007). Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. *Solar Energy*, 81(4), 517–528. doi:10.1016/j.solener.2006.07.009
- Mather, P. ve Tso, B. (2016). *Classification methods for remotely sensed data*. CRC press.
- Merrouni, A. A., Elalaoui, F. E., Mezrhab, A. A., Mezrhab, A. A. ve Ghennioui, A. (2018). Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. *Renewable energy*, 119, 863–873.
- Okun, O. (2008). *Supervised and Unsupervised ensemble methods and their applications* (C. 126). Springer.
- Palmer, D., Koumpli, E., Cole, I., Gottschalg, R. ve Betts, T. (2018). A GIS-based method for identification of wide area rooftop suitability for minimum size PV systems using LiDAR data and photogrammetry. *Energies*, 11(12), 3506. doi:10.3390/en11123506
- Perera, H. D. M. R. (2020). Designing of 3MW Floating Photovoltaic Power System and its Benefits over Other PV Technologies. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 06(04), 37–48.

doi:10.31695/ijasre.2020.33782

- Pimentel Da Silva, G. D. ve Branco, D. A. C. (2018). Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 36(5), 390–400. doi:10.1080/14615517.2018.1477498
- Richards, J. A. (2013). *Remote sensing digital image analysis* (5. bs., C. 3). Springer, Berlin, Heidelberg. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2
- Sacramento, E. M. do, Carvalho, P. C. M., de Araújo, J. C., Riffel, D. B., Corrêa, R. M. da C. ve Pinheiro Neto, J. S. (2015). Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. *IET Renewable Power Generation*, 9(8), 1019–1024. doi:10.1049/iet-rpg.2015.0120
- Salimzadeh, N. ve Hammad, A. (2017). High-Level Framework for GIS-Based Optimization of Building Photovoltaic Potential at Urban Scale Using BIM and LiDAR. doi:10.1061/9780784481196.012
- Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L. ve García-Cascales, M. S. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544–556.
- Santafé, M. R., Ferrer Gisbert, P. S., Sánchez Romero, F. J., Torregrosa Soler, J. B., Ferrán Gozávez, J. J. ve Ferrer Gisbert, C. M. (2014). Implementation of a photovoltaic floating cover for irrigation reservoirs. *Journal of Cleaner Production*, 66, 568–570. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.006
- Şen, Z. (2015). *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*.
- Şençiçek, H. (2017). *Yüzer ve Arazi Kurulumu Fotovoltaik Sistemlerin Teknik ve Ekonomik Açından İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü*.
- Shyam, B. ve Kanakasabapathy, P. (2022). Feasibility of floating solar PV integrated pumped storage system for a grid-connected microgrid under static time of day tariff environment : A case study from India. *Renewable Energy*, 192, 200–215. doi:10.1016/j.renene.2022.04.031
- Singleton, A. ve Arribas-Bel, D. (2021). Geographic data science. *Geographical Analysis*, 53(1), 61–75.
- Song, J. ve Choi, Y. (2016). Analysis of the potential for use of floating photovoltaic systems on mine pit lakes: Case study at the Ssangyong open-pit limestone mine in Korea. *Energies*, 9(2), 1–13. doi:10.3390/en9020102
- Stillwell, J. ve Clarke, G. (2004). *Applied GIS and spatial analysis*. Wiley Online Library.
- Sunar, F. (1998). An analysis of changes in a multi-date data set: a case study in the İkitelli area, Istanbul, Turkey. *International Journal of Remote Sensing*, 19(2), 225–235.

- Turoğlu, H. (2000). *Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Temel Esaslar*. Çantay Kitapevi, İstanbul.
- Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapınar region Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 11–17. doi:10.1016/j.rser.2013.07.042
- Van Hoesen, J. ve Letendre, S. (2010). Evaluating potential renewable energy resources in Poultney, Vermont: A GIS-based approach to supporting rural community energy planning. *Renewable Energy*, 35(9), 2114–2122. doi:10.1016/j.renene.2010.01.018
- Verso, A., Martin, A., Amador, J. ve Dominguez, J. (2015). GIS-based method to evaluate the photovoltaic potential in the urban environments: The particular case of Miraflores de la Sierra. *Solar Energy*, 117, 236–245.
- Yeo, I.-A. ve Yee, J.-J. (2014). A proposal for a site location planning model of environmentally friendly urban energy supply plants using an environment and energy geographical information system (E-GIS) database (DB) and an artificial neural network (ANN). *Applied Energy*, 119, 99–117.
- Yılmaz, O. S. (2021). *Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi sistemleri Yardımıyla Yüzen Fotovoltaik Güç Santarallerinin Değerlendirilmesi: Demirköprü Barajı Örneği*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Yomralıoğlu, T. (2002). *Coğrafi bilgi sistemleri: Temel kavramlar ve uygulamalar*. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Yomralıoğlu, T., Nisanci, R. ve Yildirim, V. (2007). An implementation of nominal asset based land readjustment. *Proceedings of the FIG Working week, Strategic Integration of Surveying Services*, 13–17.
- Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R. ve Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920–932.



BÖLÜM 4

SAC METAL ŞEKİLLENDİRMEDE GERİ YAYLANMA

Vedat TAŞDEMİR¹

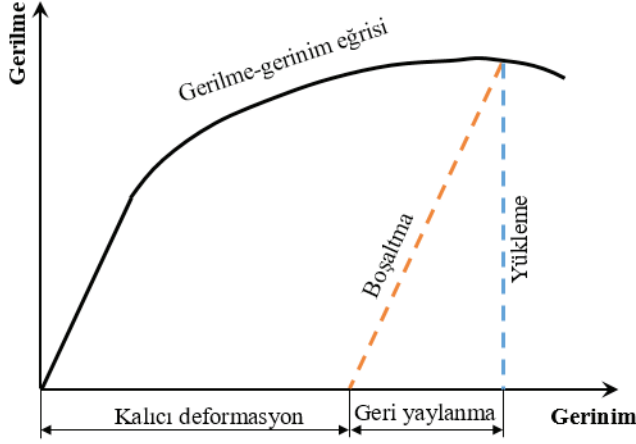
¹ Doç. Dr. , Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, vedat.tasdemir@dpu.edu.tr,
<https://orcid.org/0000-0002-2375-9525>

1. Giriş

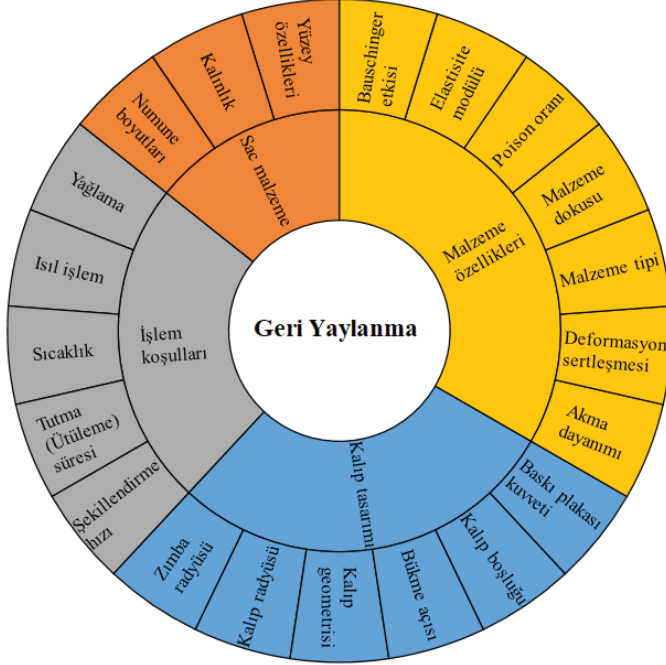
Sac metal şekillendirme birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak diğer alanlarda kullanımının yanı sıra esas olarak otomotiv ve havacılık endüstrilerinde kullanılmaktadır. Bir üretim hattında sağlanabilen yüksek hassasiyet, seri üretim ve kısa işlem süresi nedeniyle oldukça popüler bir üretim tekniğidir. Üretilen nihai ürünün boyutsal toleransları önceden tanımlanmış mühendislik toleranslarına uyması gerektiğinden, boyutsal hassasiyetin önemli bir gereklilik olduğu uygulamalarda geri yaylanma önemli bir rol oynamaktadır (Spathopoulos & Stavroulakis, 2020). Ayrıca geri yaylanma atık malzeme miktarını da arttırır. Atık malzeme miktarında meydana gelen artış verimliliği düşürürken üretim maliyetlerinde de artışa neden olur.

Sac malzemeler derin çekme, gererek şekillendirme, artımlı şekillendirme, bükme vb. şekillendirme yöntemleri kullanılarak tasarlanan şekle ve boyuta dönüştürülür. Bu işlemler için genellikle kalıplar kullanılır. Şekillendirme işleminin sonunda, parça üzerindeki şekillendirme kuvvetleri kaldırıldığında, şekillendirilen parçanın şeklinde ve boyutunda bir değişiklik olur. Yani parçanın nihai şeklinde arzu edilmeyen bozulmalar olur (Nayebi & Shahabi, 2017; Taşdemir, 2021; Taşdemir et al., 2021). Bu bozulmaya geri yaylanma denir. Geri yaylanma sonrasında parça, şekillendirme kuvveti kaldırıldığında bir dengeye ulaşır. Şekillendirilen parçalarda artık gerilmeler halen daha mevcuttur; ancak dengeli durumundadırlar (Xia & Cao, 2014).

Geri yaylanma, sac metal şekillendirmenin doğasında vardır ve uygulanan kuvvet altındaki metalin davranışını karakterize eden gerilme - gerinim eğrisine bakılarak anlaşılabilir. Şekillendirme sırasında, kalıcı deformasyon sağlamak için malzeme akma dayanımının ötesinde gerilir. Yük kaldırıldığında, gerilme, elastisite modülü olan eğrinin elastik kısmının eğimine paralel bir yol boyunca sıfıra dönecektir (Şekil 1). Bu nedenle, kalıcı deformasyon, geri yaylanma hesaba katılmadıkça, parçada tasarlandan daha az olacaktır. Sac metal şekillendirmede elastik geri dönüşler en büyük problemlerden biridir. Geri yaylanma, montaj sırasında büyük sorunlar yaratır ve esas olarak kalıp tasarımı, şekillendirme koşulları ve işlenmiş metalin malzeme özellikleri ile ilişkilidir (Badrish et al., 2020). Şekil 2'de geri yaylanmayı etkileyen parametreler verilmiştir.



Şekil 1. Geri yaylanma diyagramı

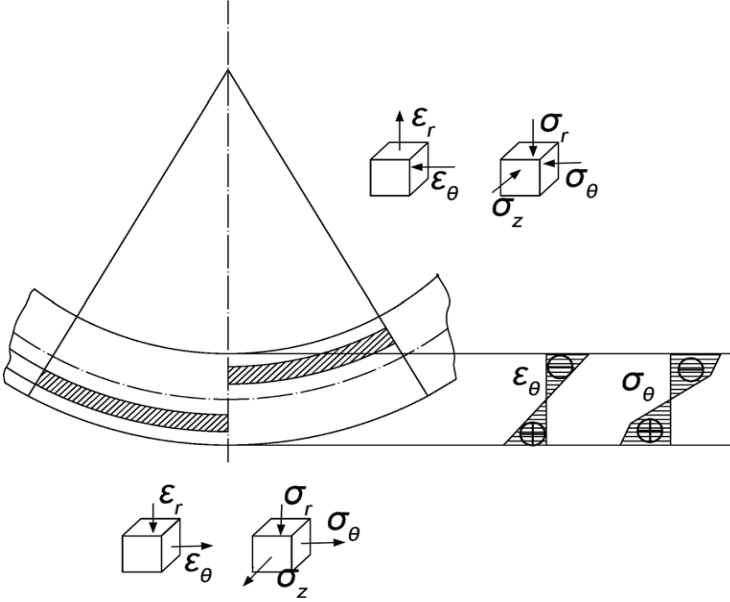


Şekil 2. Geri yaylanmayı etkileyen faktörler

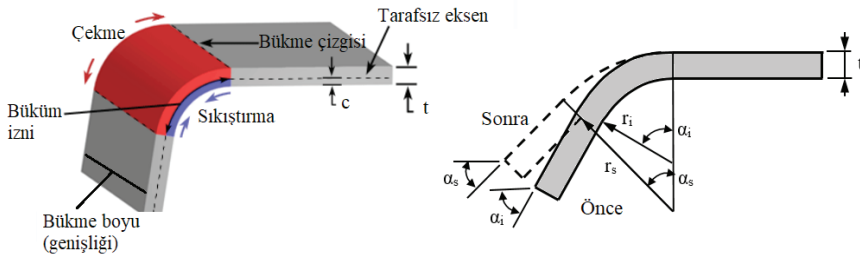
Gerilme-gerinim eğrisi (Stress-strain curve) göstermektedir. Şekil 3'de gösterildiği gibi, bükme bölgesinin iç ve dış bölgele-ri sırasıyla sıkıştırma ve çekme gerilmelerinin etkisi altındadır. Teğetsel yön boyunca malzeme aktığı için, iç ve dış katmanlardaki teğetsel gerilme

(σ_θ), radyal gerilme (σ_r) ve enine gerilmeden (σ_z) çok daha büyükken, teğetsel gerinim de (ϵ_θ), radyal gerinimden (ϵ_r) çok daha büyüktür (Şen & Taşdemir, 2021; Zong et al., 2014). Teorik olarak, iç (e_i) ve dış (e_d) katmanlardaki gerinimler büyüklük olarak eşittir ve aşağıdaki denklem ile verilir.

$$e_i = e_d = \frac{1}{(2r/t)+1}$$



Şekil 3. Bükme sırasında bükme bölümünde oluşan gerilme ve gerinim dağılımları (Zong et al., 2014)



Şekil 4. Bükme sonrasında oluşan geri yaylanma ve tanımlamalar

Geri yaylanmayı karakterize eden bir nicelik de, geri yaylanma faktörü olan K_s 'dir. Büküm izni (L), bükmeden önce ve sonra aynı olduğu için (Şekil 4), bükme için elde edilen ilişki denklem 1'de verilmiştir. Büküm izni, malzemenin tarafsız (nötr) eksenini boyunca ölçülen bükümün yay uzunluğudur.

$$L = (r_i + 0.5t)\alpha_i = (r_s + 0.5t)\alpha_s \quad (1)$$

Bu ilişkidenden, geri yaylanma faktörü, K_s aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$K_s = \frac{\alpha_i}{\alpha_s} = \frac{r_s + 0.5t}{r_i + 0.5t} \quad (2)$$

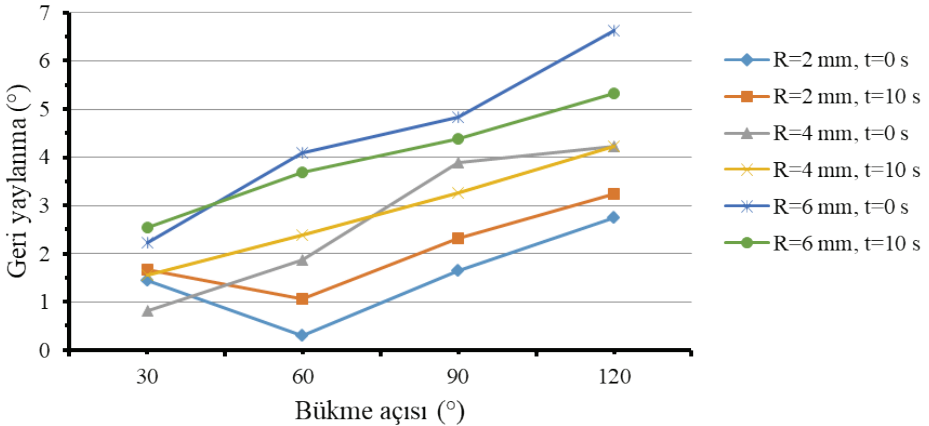
Burada; r_i ve r_s sırasıyla bükme yarıçapı ve son bükülme yarıçapları, α_i ve α_s ise sırasıyla bükme açısı ve bükme sonrası oluşan açı, t ise malzeme kalınlığını ifade etmektedir. Denklem 2'den, K_s 'nin yalnızca r/t oranına bağlı olduğu da söylenebilir. Burada r , minimum bükülme yarıçapıdır. Geri yaylanma faktörü $K_s=0$ ise tam elastik geri dönüşün olduğu, $K_s=1$ olduğunda ise geri yaylanma olmadığı anlaşılır.

2. Sac şekillendirmede geri yaylanmayı etkileyen faktörler

2.1. Kalıp tasarım parametreleri

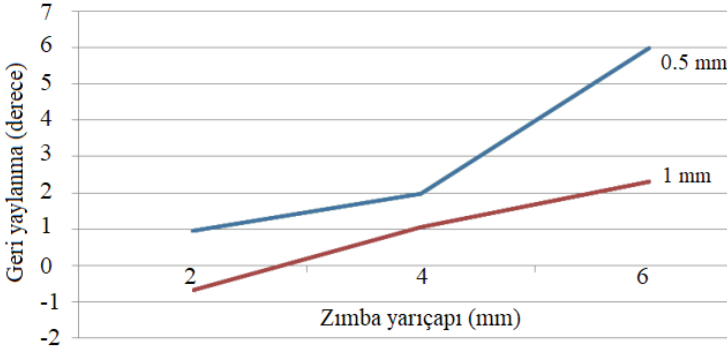
Genel olarak sac metal şekillendirmede kullanılan kalıp elemanları, kalıp, zımba ve baskı plakasından oluşmaktadır. Bu kalıp elemanlarının köşe formları, geometrileri, kalıp açıları, kalıp boşlukları ve baskı plakası kuvvetleri şekillendirme üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Burada bu parametrelerin şekillendirme sonrası geri yaylanmaya olan etkileri incelenecektir. Uygun kalıp tasarımları kullanılarak geri yaylanmanın en aza indirilebileceğini ancak ortadan kaldırılamayacağını hatırlatmak gerekir.

Bükme açısı. Bükme açısı geri yaylanmayı etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bükme açısı arttıkça geri yaylanma artmaktadır (Şekil 5). Başka bir deyişle kalıp açısı arttıkça geri yaylanma azalır (Taşdemir, 2022). Kalıp açısı ile bükme açısı birbiri ile ters orantılıdır. Bükme açısı arttıkça bükme bölgesindeki gerilme değerinin ve bükme momentinin artmasından dolayı geri yaylanmada artış meydana gelir (Şen & Taşdemir, 2021).



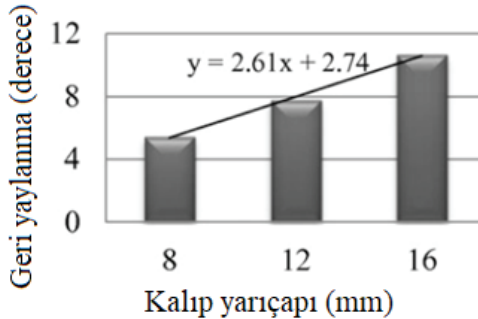
Şekil 5. Oda sıcaklığında yapılan deneyler sonucunda bükme açısının geri yaylanmaya etkisi (Şen & Taşdemir, 2021)

Zımba yarıçapı. Geri yaylanmayı etkileyen parametrelerden biri de zımba uç yarıçapıdır. Yapılan çalışmalar (Kartik & Rajesh, 2017; Şen et al., 2022) incelendiğinde zımba uç yarıçapındaki artışla orantılı olarak geri yaylanmanın da arttığı belirtilmiştir (Şekil 6). Zımba yarıçapı arttıkça baskı kuvveti daha geniş bir alana yayılmaktadır. Yani deformasyon ve gerilme dar bir alanda yoğunlaşmayarak genişlemektedir. Başka bir ifadeyle küçük zımba yarıçaplarında baskı kuvveti dar bir alanda yoğunlaştığından artan plastik deformasyona bağlı olarak oluşan dislokasyonlar malzemenin geri yaylanmasını azaltmaktadır.



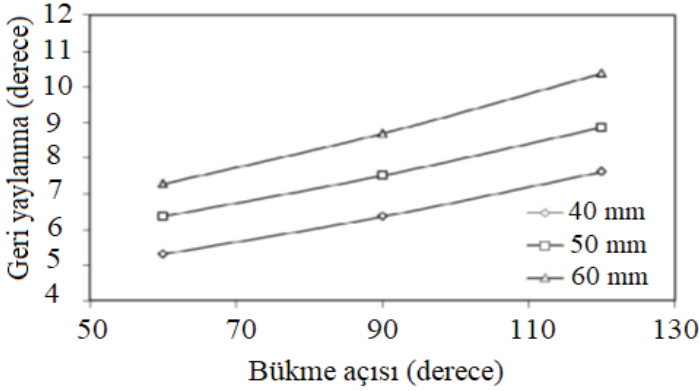
Şekil 6. Zımba yarıçapının geri yaylanmaya etkisi (Kartik & Rajesh, 2017)

Kalıp yarıçapı. Yapılan çalışmalar (Buang et al., 2015; Phanitwong & Thipprakmas, 2016) dikkate alındığında kalıp yarıçapı arttıkça geri yaylanmanın arttığı görülmektedir (Şekil 7). Kalıp yarıçapı ile sac levha arasındaki temas noktası aralığı yarıçap arttıkça artmaktadır. Bu durumda moment kolu ve dolayısıyla bükülme momenti artar ve bu da belirtildiği gibi daha büyük bir geri yaylanma açısına neden olur.



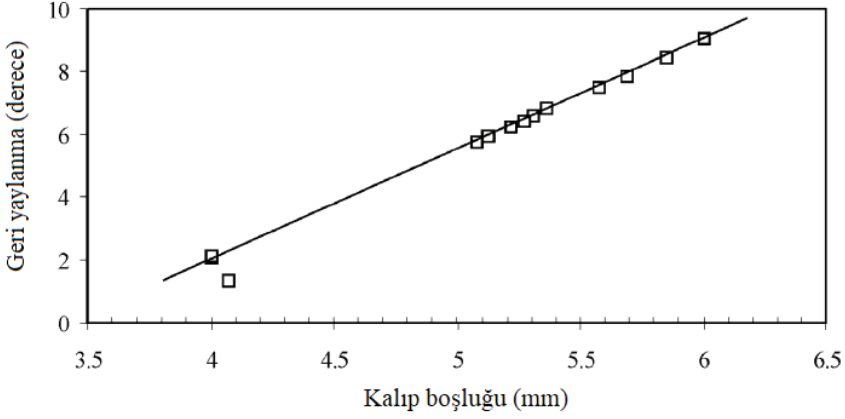
Şekil 7. Geri yaylanma ve kalıp yarıçapı ilişkisi (Phanitwong & Thipprakmas, 2016)

Kalıp geometrisi. Kalıp genişliğinin geri yaylanmayı etkileyen önemli bir parametredir. Kalıp genişliği arttıkça geri yaylanma da artmaktadır (Şekil 8) (Abu Qudeiri et al., 2013). Kalıp genişliği arttıkça bükme esnasındaki temas alanı da artmaktadır. Bu artışa paralel olarak geri yaylanma da artmaktadır. Geri yaylanmayı etkileyen bir diğer parametre de kalıp bükme açıklığıdır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde kalıp açıklığı arttıkça geri yaylanmanın azaldığı belirtilmiştir. Kalıp açıklığı arttıkça flanş alanı azalmakta buna bağlı olarak geri yaylanma azalmaktadır (Chikalt-hankar et al., 2014).



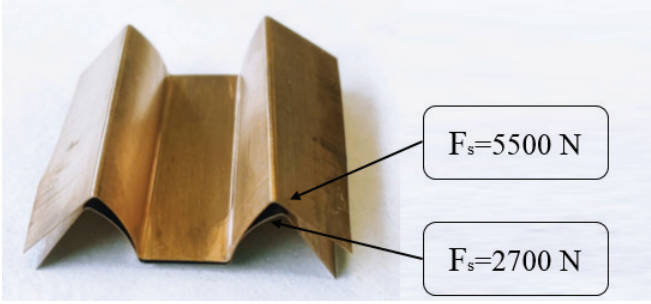
Şekil 8. Geri yaylanma-kalıp genişliğinin ilişkisi (Abu Qudeiri et al., 2013)

Kalıp boşluğu. Kalıp boşluğunun geri yaylanmaya olan etkisini daha iyi anlamak için L bükme işlemini incelemek gerekmektedir. L bükme işleminde kalıp boşluğunun artması ile geri yaylanma artmaktadır (Valinezhad et al., 2019). Şekil 9'da kalıp boşluğunun geri yaylanmaya etkisi görülmektedir. Kalıp boşluğu arttıkça malzeme daha kolay bir şekilde herhangi bir sıkışmaya ve zorlanmaya maruz kalmadan bükülmektedir. Yine yapılan başka bir çekme-bükme çalışmasında da kalıp boşluğu arttığında geri yaylanma da artmıştır. Burada düşük kalıp boşluğuna sahip deney numunesinin duvarlarındaki gerilme büyük kalıp boşluğuna sahip numunenin duvarlarındaki gerilmeden hem daha yüksek hem de daha homojen bir dağılım göstermiştir (Ishimaru et al., 2021).



Şekil 9. Kalıp boşluğunun geri yaylanmaya etkisi (Gassara et al., 2009)

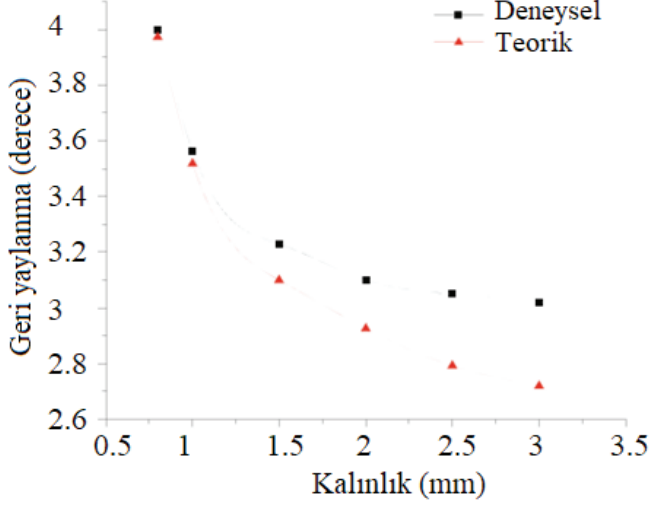
Baskı plakası kuvveti. Şekil 10'da 0.1 mm kalınlığındaki bakır berilyum alaşımının U bükme işlemi sonrasındaki deney numuneleri görülmektedir. Baskı plakası kuvvetindeki artışın, sacın kalıp ve baskı plakası arasında kaymasını azalttığı ve gerilimi artırarak geri yaylanmayı azalttığını gösterilmiştir.



Şekil 10. Baskı plakası kuvvetinin numune formuna etkisi (Ayachi et al., 2021)

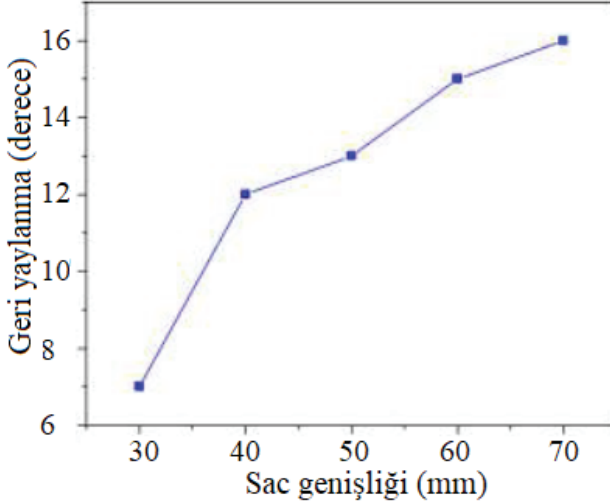
2.2. Sac malzeme parametreleri

Malzeme kalınlığı. Malzeme kalınlığı da geri yaylanmayı önemli oranda etkilemektedir. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde malzeme kalınlığının azalması ile geri yaylanma artmaktadır (Gürün et al., 2018). Başka bir ifadeyle malzeme kalınlığı arttıkça geri yaylanma azalmaktadır (Şekil 11). Bunun nedeni düşük kalınlıklarda daha geniş bir gerinim gradyanının olmasıdır (Zheng et al., 2016). Ayrıca Chen ve ark. (Chen et al., 2021) göre bu durum esas olarak eğilme momentindeki artıştan kaynaklanmaktadır.



Şekil 11. Malzeme kalınlığının geri yaylanmaya etkisi (Chen et al., 2021)

Malzeme boyutları. Bükme işlemine tabi tutulan malzemenin bükme boyutu (bükme genişliği, malzeme genişliği) arttıkça geri yaylanma de artmaktadır (Şekil 12). Bükme esnasındaki malzeme ile olan temas boyu arttıkça geri yaylanma de o oranda artmaktadır (Pritima et al., 2017).

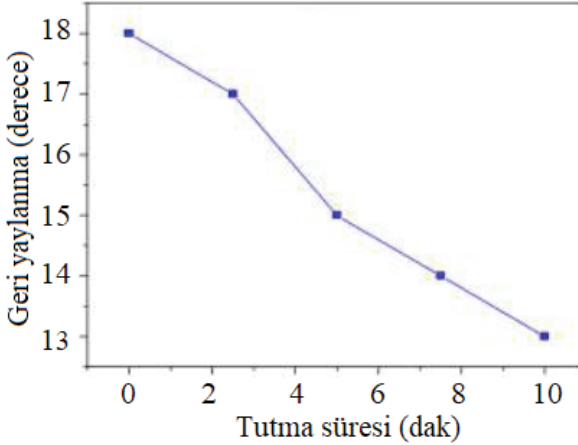


Şekil 12. Geri yaylanma-sac genişliği ilişkisi (Pritima et al., 2017)

2.3. İşlem koşulları

Yağlama. Yağlama bükme işleminde geri yaylanmayı etkileyen önemli parametrelerden bir tanesidir. Yağlamanın deformasyon yükünü azaltmak, kırılmadan önce deformasyon sınırını arttırmak, takımlarda malzeme birikmesini en aza indirmek, takım aşınmasını en aza indirmek, iş parçasının/takımın termal olarak yalıtılması ve iş parçası/takım ara yüzünün soğutulması gibi birçok işlevi vardır. Narayanasamy ve Padmanabhan yağlayıcıların bükmeye olan etkileri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada düşük sürtünme sağlayan yağlayıcının kuru sürtünmeye karşı geri yaylanmayı arttırdığı belirtmişlerdir. Başka bir deyişle yağlama etkisiyle sürtünme azaldıkça geri yaylanma artar (Narayanasamy & Padmanabhan, 2009). Zımba ve kalıbın yağlanması, zımba yükünü etkili bir şekilde azaltmanın önemli yollarından biridir.

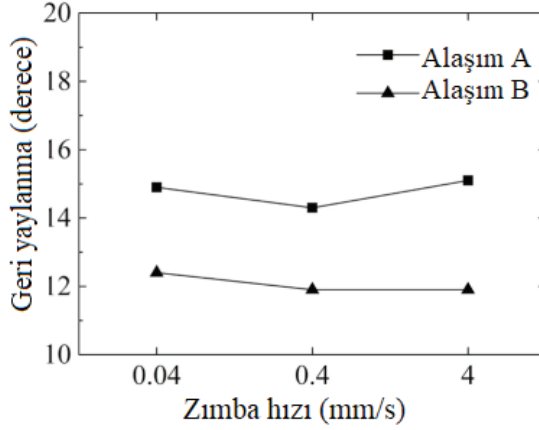
Tutma (Ütüleme) süresi ve kuvveti. Pritima ve ark. bükme sonrası zımba baskısını malzeme üzerinde tutma süresinin etkilerinin araştırıldığı çalışmalarında, tutma süresinin malzemenin geri yaylanmasına olumlu katkı yaptığı yani geri yaylanmayı azalttığından bahsetmişlerdir (Şekil 13) (Pritima et al., 2017). Yine Erdin ve Atmaca (Erdin & Atmaca, 2016), tavllanmış 1050-H14 alaşımının geri yaylanma davranışı üzerine zımba tutma kuvvetinin etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında 2.25 kN, 5 kN, 10 kN ve 15 kN baskı kuvvetleri kullanmışlardır. Çalışmalarının neticesinde zımba turma kuvveti arttıkça geri yaylanma açısının önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir.



Şekil 13. Tutma süresinin geri yaylanmaya etkisi

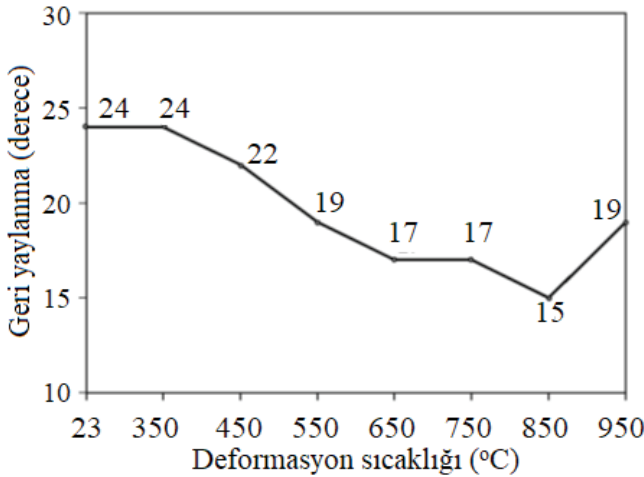
Zımba (Şekillendirme) hızı. Zımba hızının geri yaylanmaya olan etkisinin çok sınırlı olduğu belirtilmiştir (Y. Liu et al., 2018) (Şekil 14). Choi ve Huh (Choi & Huh, 2014) zımba hızının otomotiv gövde çeliklerinin (SPCC ve DP780) U bükme işlemi sonrası oluşan geri yaylanmasına et-

kisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. DP780'in geri yaylanma miktarı, SPCC'nin geri yaylanma miktarından daha fazladır. SPCC çelik saclar için, zımba hızı arttıkça geri yaylanma miktarı azalmıştır. Öte yandan DP780 için zımba hızı arttıkça geri yaylanma miktarı artmıştır. Zımba hızının geri yaylanma davranışı üzerindeki etkisi her iki çelik sac için de çok fazla değildir.



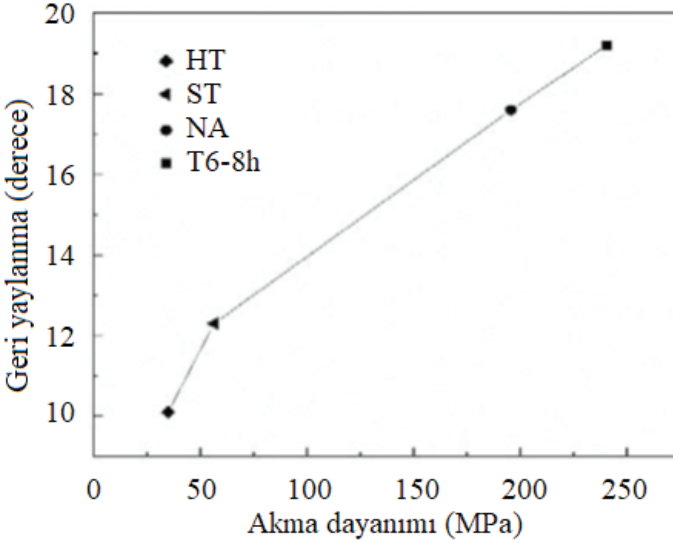
Şekil 14. Zımba hızının geri yaylanmaya olan etkisi (Y. Liu et al., 2018)

Şekillendirme sıcaklığı. Ertan ve Çetin, Ti6Al4V alaşımının geri yaylanmasına şekillendirme sıcaklığının etkisinin araştırılması üzerine yaptıkları çalışmalarında sıcaklığın önemli bir etkisinin olduğundan bahsetmişlerdir. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilen U-bükme parçalarının profilleri karşılaştırıldığında, şekillendirme sıcaklığındaki artışla geri yaylanma açısının önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur (Şekil 15) (Ertan & Çetin, 2021).



Şekil 15. Şekillendirme sıcaklığının geri yaylanma açısına etkisi

Isıl işlem. Wang ve ark. (Wang et al., 2020) AA6061 alaşımının geri yaylanması üzerine ısıl işlem koşullarının etkisinin araştırılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmayı üç nokta eğme deneyi ile yapmışlardır. Çalışmalarında malzemeyi homojenleştirme (HT), çözeltiye alma (ST), doğal yaşlandırma (NA) ve T6-8h işlemlerine tabi tutmuşlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda homojenleştirme tavına tabi tutulan numunelerde en düşük geri yaylanma, T6 işlemine tabi tutulan numunelerde ise en büyük geri yaylanma elde edilmiştir. Yapılan ısıl işleme bağlı olarak malzemenin akma dayanımındaki artışa bağlı olarak geri yaylanma de hızlı bir şekilde artmıştır. Benzer bir çalışmayı Malyer ve Kayral 'da yapmışlardır (Malyer & Kayral Akgün, 2018). Şekil 16'da geri yaylanma üzerine ısıl işlemin etkisi görülmektedir.



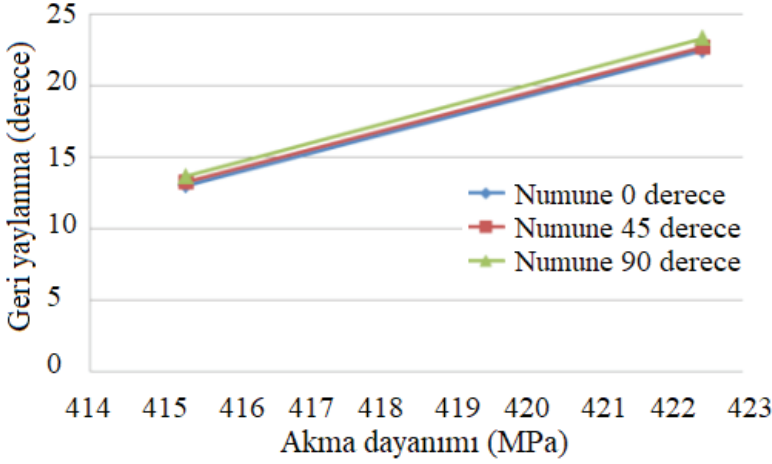
Şekil 16. Geri yaylanma üzerine ısıl işlemin etkisi

2.4. Malzeme özellikleri

Malzeme tipi. Malzemenin türü, geri yaylanma üzerinde kaçınılmaz bir etkiye sahiptir. Malzemenin akma dayanımındaki artış geri yaylanmayı arttırmaktadır. Malzemelerin akma dayanımı arttıkça elastik gerinime maruz kalan alan da artmakta bu da geri yaylanmayı etkilemektedir. Ishimaru ve ark. (Ishimaru et al., 2021) duplex paslanmaz çelik ile östenitik paslanmaz çeliğin çekme-bükme işlemi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada daha yüksek dayanıma sahip olan duplex paslanmaz çeliğin daha büyük bir geri yaylanma gösterdiğini belirtmişlerdir. Yine Choudhury ve Ghomi Al 1100 ve Al 6061 malzemelerini V bükme işlemi üzerine yaptıkları çalışmada malzeme türünün geri yaylanmaya önemli bir etki-

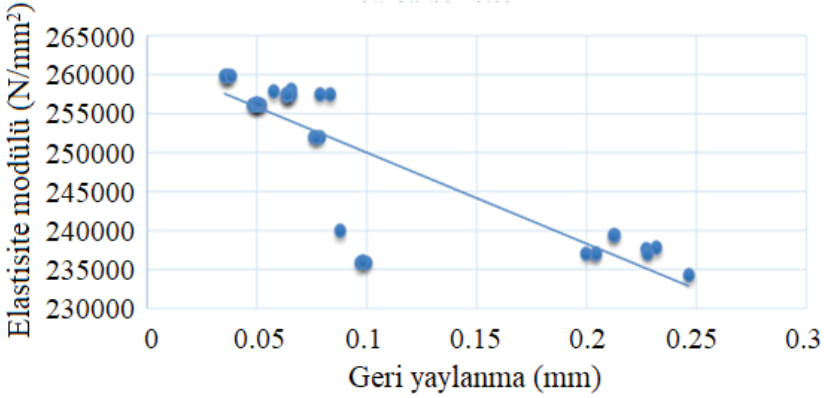
sinin olduğundan bahsetmişlerdir (Choudhury & Ghomi, 2014). Düşük akma noktası dayanımına sahip malzeme, diğer tüm işlem parametrelerinin bükme sırasında aynı kalması koşuluyla, daha yüksek akma dayanımına sahip malzemeye kıyasla daha az geri yaylanmaya sahip olacaktır.

Akma dayanımı. Akma dayanımı, bir malzemenin kalıcı şekil değişimine uğrayacağı sınırın başlangıcını ifade eder. Geri yaylanma malzeme özelliklerinin bir fonksiyonudur ve akma mukavemeti ne kadar büyük ise geri yaylanma de o kadar büyük olur (Şekil 17). Akma dayanımı arttıkça elastik olarak deforme olmuş bölgenin alanını artırır bu da daha büyük bir geri yaylanmaya neden olur (Buang et al., 2014).



Şekil 17. Akma dayanımı ve geri yaylanma ilişkisi (Abdullah et al., 2018)

Elastisite modülü. Elastisite modülü, bir nesnenin veya maddenin elastik olarak deforme olmaya karşı direncini gösteren bir sayıdır. Elastisite modülü en önemli malzeme özelliklerinden biridir. Artan geri yaylanma değerleri genellikle elastisite modülünün azalmasıyla ilişkilidir. Geri yaylanma ile elastisite modülü arasında ters bir orantı vardır. Geri yaylanmanın miktarıyla ilgili olarak şimdiye kadar yapılan çoğu teorik geri yaylanma analizi, deforme olmuş sacın mevcut elastisite modülüne bağlıdır (Garcia-Romeu et al., 2007; Karanjule et al., 2018). Şekil 18’de elastisite modülünün geri yaylanmaya olan etkisi görülmektedir.



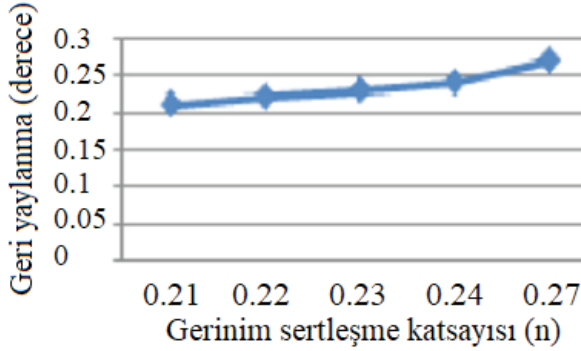
Şekil 18. Düşük karbonlu çelik için elastisite modülü-geri yaylanma ilişkisi (Karanjule et al., 2018)

Malzeme dokusu. Malzeme tane boyutu şekillendirmeyi etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Tane inceltme, süneklikte kayıp olmaksızın mekanik özellikleri iyileştiren en etkili güçlendirme mekanizmalarından biridir. Gautam ve ark. (Gautam et al., 2017) IF çeliğinin V bükülmesinde tane boyutunun geri yaylanma üzerine etkisini araştırmak için bir çalışma yapmışlardır. Malzemenin tane boyutunu değiştirmek için ısıl işlem uygulamışlardır. Temin edildiğinde 31.33 μm olan ortalama tane boyutu tavlama işlemi sonucu 35.6 μm , su verme işlemi sonucunda ise 26.2 μm olarak elde edilmiştir. Tane boyutuna bağlı olarak geri yaylanma değerinde önemli bir değişiklik olduğunu belirtmişlerdir. Daha ince tane boyutuna sahip numunelerin bükülmesi sonucunda elde edilen geri yaylanma açısının daha kaba tane boyutuna sahip numunelere göre çok daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Yani kalınlık sabit tutulduğunda, artan tane boyutu ile geri yaylanma açısının azaldığı ortaya çıkmıştır. Tane boyutundaki artış malzemenin plastik deformasyon direncini düşürür. Genişletilmiş plastik bölge ve büzülmüş elastik bölge nedeniyle, elastik toparlanmanın neden olduğu geri yaylanma açısı azalır (X. Liu et al., 2015).

Bauschinger etkisi. Gerinim sertleşmesinin uygulanan gerilimin yönüne bağlılığını ifade eden etkiye, Bauschinger etkisi denir. Geri yaylanma tahmini, sac metal şekillendirme endüstrisi için önemli bir konudur. Çoğu sac metal, şekillendirme işlemi sırasında karmaşık bir deformasyona tabi tutulur. Geri yaylanmanın doğru tahmini için, deformasyondan sonra sac metal içindeki iç gerilim dağılımını doğru bir şekilde belirlemek için Bauschinger etkisi dikkate alınmalıdır (Gau & Kinzel, 2001). İlk başlarda, analitik yöntemler kullanılarak geri yaylanma tahmini yapılıyordu. Hesaplamalı yöntemler ilerledikçe ve yeni sayısal yöntemler geliştikçe,

sonlu elemanlar yöntemi (SEY), metal şekillendirme süreçlerinin simülasyonu ve geri yaylanma tahmini için önemli bir yöntem olarak görülmeye başlandı. Bauschinger etkisi, geri yaylanma simülasyonunda etkili parametrelerden biridir. Araştırmacılar ilk başlarda bu önemli konuyu çalışmalarında dikkate almadılar; ancak daha sonraki araştırmalar bunu dikkate almaya başladılar (Shahabi & Nayebi, 2015). Lee ve ark. (Lee et al., 2005), izotropik ve kinematik sertleştirme modellerinin ayrı kullanımının, gerçek büyüklüğün fazla veya eksik tahmin edilmesine yol açtığını göstermiştir.

Gerinin sertleşme (pekleşme) katsayısı (n) ve malzeme mukavemet katsayısı (K). Gerinin sertleştirme katsayısı “n” 0 ile 1 arasındadır. “0” değeri mükemmel plastik katı malzeme için, “1” değeri ise tam elastik malzemeler içindir. Şekil 19, gerinin sertleşme indeksindeki artışın, plastik akma direncinin artması nedeniyle geri yaylanma değerini arttırdığını göstermektedir. Kazan ve ark. (Kazan et al., 2009) malzemenin sertleşme özelliklerinin geri yaylanma miktarı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonuçları, malzeme mukavemet katsayısı (K) arttıkça geri yaylanma açısının arttığını göstermiştir. Öte yandan, gerinin sertleştirme bileşeni (n) arttıkça geri yaylanma açısı azalmaktadır.



Şekil 19. Geri yaylanma üzerine deformasyon sertleşme üssü etkisi (Pritima & Padmanabhan, 2018)

3. Özet

Gerinin yaylanma (geri esneme), şekillendirme işlemi ve yük boşaltma sonrasında parça şeklinin geometrik olarak değişmesi şeklinde tanımlanır. Malzemenin elastik olarak geri kazanılması, bilhassa karmaşık geometriye sahip parçalarının şekillendirilmesi sürecinde daha büyük önem kazanır. Gerinin yaylanmanın ana nedeni, malzemenin elasto-plastik bölgesindeki deformasyonudur ve esas olarak işleme sertleşmesi, haddeleme koşulları ve malzemenin elastik davranışı başta olmak üzere birçok faktörden et-

kilenir. Malzeme özellikleri göz önünde bulundurulması gereken önemli özelliklerden birden biridir. Malzeme türü değiştikçe sonuçlarda önemli ölçüde değişebilmektedir. Geri yaylanmayı etkileyen faktörler Tablo 1'de özet olarak verilmiştir.

Tablo 1. Geri yaylanmayı etkileyen faktörler

Faktör	Geri yaylanma üzerindeki etkisi	
Sac kalınlığı	↓	Sac kalınlığındaki artış, geri yaylanmanın azalmasına neden olur.
Bükme genişliği	↑	Bükülen malzemenin genişliği arttıkça geri yaylanma artmaktadır.
Bükme açısı	↑	Bükme açısındaki artış, daha yüksek geri yaylanma etkisi sağlar.
Elastisite modülü	↓	Daha yüksek elastisite modülü daha az geri yaylanma etkisi sağlar.
Gerinim sertleşmesi (Pekleşme) katsayısı (n)	↓	Gerinim sertleşmesinin artması, minimum bükülme yarıçapında azalmaya neden olur. Bu nedenle, gerinim sertleşmesi arttıkça geri yaylanma etkisi azalır.
Malzeme mukavemet katsayısı (K)	↑	Malzeme mukavemet katsayısı arttıkça geri yaylanma da o oranda artmaktadır.
Bükme yarıçapı / Kalıp yarıçapı	↑	Bükme yarıçapını belirlemek için kalıp ve zimba yarıçapı dikkate alınır. Kalıp ve zimba yarıçapı arttıkça geri yaylanma etkisi daha yüksektir.
Sürtünme katsayısı	↑	Sürtünme katsayısındaki düşüş, geri yaylanma açısında artışa neden olur.
Kalıp açıklığı	↓	Kalıp açıklığı arttıkça geri yaylanma azalmaktadır.
Kalıp boşluğu	↑	Kalıp boşluğu arttıkça geri yaylanma da artmaktadır.
Baskı plakası kuvveti	↓	Baskı plakası kuvveti meydana gelen artış geri yaylanma açısını azalmaktadır.
Akma dayanımı	↑	Malzemenin akma dayanımında meydana gelen bir artış geri yaylanmayı da artırmaktadır.
Tane boyutu	↓	Şekillendirilen malzemenin tane boyutu arttıkça geri yaylanma azmaktadır.
Sıcaklık	↓	Şekillendirme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak geri yaylanma azalmaktadır.
Zimba hızı	↑ ↓	Zimba hızının geri yaylanma açısı üzerinde çok sınırlı bir etkisi vardır. Burada en önemli faktör malzeme türüdür. Malzeme türüne göre sınırlı da olsa artma ya da azalma gösterebilir.

Kaynakça

- Abdullah, S. A., Buang, M. S., Zulkpli, M. A., Mokhtar, F. R., & Abdullah, H. (2018). Effect of tensile and material properties on springback behavior of DP590 advanced high strength steel during bending process. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(4), 166–170.
- Abu Qudeiri, J., Abu Khadra, F., Al-Ahmari, A., & Umar, U. (2013). Effect of material and geometrical parameters on the springback of metallic sheets. *Life Science Journal*, 10(2), 1531–1536.
- Ayachi, N., Guermazi, N., & Manach, P. (2021). Effect of blank-holder force on springback of ultra-thin copper sheets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1157(1), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1157/1/012036>
- Badrish, A., Morchhale, A., Kotkunde, N., & Singh, S. K. (2020). Parameter Optimization in the Thermo-mechanical V-Bending Process to Minimize Springback of Inconel 625 Alloy. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(7), 5295–5309. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04395-9>
- Buang, M. S., Abdullah, S. A., & Saedon, J. (2014). An overview of the impacts of material parameters on springback. *Applied Mechanics and Materials*, 564(August 2014), 323–328. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.564.323>
- Buang, M. S., Abdullah, S. A., & Saedon, J. (2015). Effect of die and punch radius on springback of stainless steel sheet metal in the air V-die bending process. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 8(June), 1322–1331. <https://doi.org/10.15282/jmes.8.2015.7.0129>
- Chen, C., Gong, J., Chen, Y., & Wang, J. (2021). A prediction model for bending springback of AZM120 sheet metal and mechanical compensation of CNC automatic panel bender. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(9–10), 3325–3337. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07606-1>
- Chikalthankar, S. B., Belurkar, G. D., & Nandedkar, V. M. (2014). Factors Affecting on Springback in Sheet Metal Bending : A Review. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 3(4), 247–251.
- Choi, M. K., & Huh, H. (2014). Effect of punch speed on amount of springback in U-bending process of auto-body steel sheets. *Procedia Engineering*, 81(October), 963–968. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.125>
- Choudhury, I. A., & Ghomi, V. (2014). Springback reduction of aluminum sheet in V-bending dies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228(8), 917–926. <https://doi.org/10.1177/0954405413514225>
- Erdin, M. E., & Atmaca, A. (2016). Effects of holding force on the springback behavior of annealed aluminum plates. *Procedia Engineering*, 149(June), 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.638>

- Ertan, R., & Çetin, G. (2021). Effect of deformation temperature on mechanical properties, microstructure, and springback of Ti-6Al-4V sheets. *Magnesium Alloys Containing Rare Earth Metals*, 57(4). <https://doi.org/10.1201/9781482265163-56>
- Garcia-Romeu, M. L., Ciurana, J., & Ferrer, I. (2007). Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1–3), 174–177. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.019>
- Gassara, F., Hambli, R., Bouraoui, T., Halouani, F. El, & Soulat, D. (2009). Optimization of springback in L-bending process using a coupled Abaqus/Python algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(1–2), 61–67. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1819-4>
- Gau, J. T., & Kinzel, G. L. (2001). A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(8), 1813–1832. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00012-1)
- Gautam, V., Shukla, R., Singh, J., & Kumar, D. R. (2017). Effect of Grain Size on Spring Back in V-bending of Interstitial Free Steel. *Proceedings of The International Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering, October 2016*, 247–251.
- Gürün, H., Çavuşoğlu, O., Çaydaş, U., Özek, C., & ÇelİK, M. (2018). Investigation of Springback Behaviour of AA2024 Alloy After V-Bending. *Science and Eng. J of Firat Univ.*, 30(1), 1–8.
- Ishimaru, E., Kaga, Y., & Kakihara, T. (2021). *Work-hardening Behavior and Springback Simulation of Lean Duplex Stainless Steel (NSSC 2120™)*. 126.
- Karanjule, D. B., Bhamare, S. S., & Rao, T. H. (2018). Effect of young's modulus on springback for low, medium and high carbon steels during cold drawing of seamless tubes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 346(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/346/1/012043>
- Kartik, T., & Rajesh, R. (2017). Effect of punch radius and sheet thickness on spring-back in V-die bending. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 11(8), 178–184.
- Kazan, R., Firat, M., & Tiryaki, A. E. (2009). Prediction of springback in wipe-bending process of sheet metal using neural network. *Materials and Design*, 30(2), 418–423. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.033>
- Lee, M. G., Kim, D., Kim, C., Wenner, M. L., & Chung, K. (2005). Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions, part III: Applications. *International Journal of Plasticity*, 21(5), 915–953. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.05.014>
- Liu, X., Zhao, S., Qin, Y., & Nawang, W. A. W. (2015). Influence of size effects on

- material properties and springback behavior of metal foils in micro bending: A review. *MATEC Web of Conferences*, 21. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152109010>
- Liu, Y., Wang, L., Zhu, B., Wang, Y., & Zhang, Y. (2018). Identification of two aluminum alloys and springback behaviors in cold bending. *Procedia Manufacturing*, 15(November), 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.303>
- Malyer, E., & Kayral Akgün, S. (2018). Isıl işlemin AA6061 alüminyum alaşımı sac metal malzemenin şekillendirilmesine etkilerinin incelenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9(2), 741–751.
- Narayanasamy, R., & Padmanabhan, P. (2009). Effects of Lubrication on Air Bending Process of Interstitial Free Steel Sheet Using Different Lubricants. *International Journal on Design and Manufacturing Technologies*, 3(1), 19–24. <https://doi.org/10.18000/ijodam.70042>
- Nayebi, A., & Shahabi, M. (2017). Effect of continuum damage mechanics on springback prediction in metal forming processes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(5), 2229–2234. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0419-3>
- Phanitwong, W., & Thipprakmas, S. (2016). Development of anew spring-back factor for a wiping die bending process. *Materials and Design*, 89, 749–758. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.031>
- Pritima, D., & Padmanabhan, P. (2018). Investigation of sheet bending parameters on springback in nickel coated mild steel sheets using response surface methodology. *Mechanics and Industry*, 19(2). <https://doi.org/10.1051/meca/2018009>
- Pritima, D., Padmanabhan, P., & Ravichandran, M. (2017). Properties and bending behavior of Nickel coated Mild steel sheet during air bending. *Journal of Advances in Chemistry*, 13(11), 5991–5996. <https://doi.org/10.24297/jac.v13i11.5865>
- Şen, N., Civek, T., & Seçgin, Ö. (2022). Experimental, analytical and parametric evaluation of the springback behavior of MART1400 sheets. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(10), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03749-8>
- Şen, N., & Taşdemir, V. (2021). Experimental and numerical investigation of the springback behaviour of CP800 sheet after the V-bending process. *Iron-making and Steelmaking*, 48(7), 811–818. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1872466>
- Shahabi, M., & Nayebi, A. (2015). Springback modeling in L-bending process using continuum damage mechanics concept. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 1(3), 161–167. <https://doi.org/10.22055/jacm.2015.11020>
- Spathopoulos, S. C., & Stavroulakis, G. E. (2020). Springback Prediction in

Sheet Metal Forming, Based on Finite Element Analysis and Artificial Neural Network Approach. *Applied Mechanics*, 1(2), 97–110. <https://doi.org/10.3390/applmech1020007>

Taşdemir, V. (2021). Optimization of Incremental Forming of Low-Alloy High-Yield-Strength HC300LA Sheet Using a Rolling Blank Holder Method. *Steel Research International*, 92(2), 1–8. <https://doi.org/10.1002/srin.202000512>

Taşdemir, V. (2022). Finite element analysis of the springback behavior after V bending process of sheet materials obtained by Differential Speed Rolling (DSR) method. *Revista de Metalurgia*, 58(1), 1–9. <https://doi.org/10.3989/REVMETALM.219>

Taşdemir, V., Şen, N., & Seçgin, Ö. (2021). Investigation of the springback behavior of Erdemir 7136 sheet formed by rolling blank holder incremental sheet forming method. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(1), 90–95. <https://doi.org/10.5505/pajes.2020.40325>

Valinezhad, M., Etemadi, E., Hashemi, R., & Valinezhad, M. (2019). Experimental and FE analysis on spring-back of copper/aluminum layers sheet for a L-die bending process. *Materials Research Express*, 6(11). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab51c8>

Wang, G., Zhu, G., Li, T., & Kou, L. (2020). Effect of heat treatment conditions on mechanical properties and springback of 6061 Aluminum alloy sheets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012056>

Xia, Z. C., & Cao, J. (2014). Springback. In: The International Academy for Production Engineering. In L. Laperrière & G. Reinhart (Eds.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_6500

Zheng, Q., Shimizu, T., & Yang, M. (2016). Scale effect on springback behavior of pure titanium foils in microbending at elevated temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 230, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.025>

Zong, Y., Liu, P., Guo, B., & Shan, D. (2014). Springback evaluation in hot v-bending of Ti-6Al-4V alloy sheets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(1–4), 577–585. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6190-z>



BÖLÜM 5

BİYOMALZEME OLARAK Si_3N_4 İLERİ TEKNOLOJİ SERAMİKLERİN KULLANIMLARI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Pınar UYAN¹

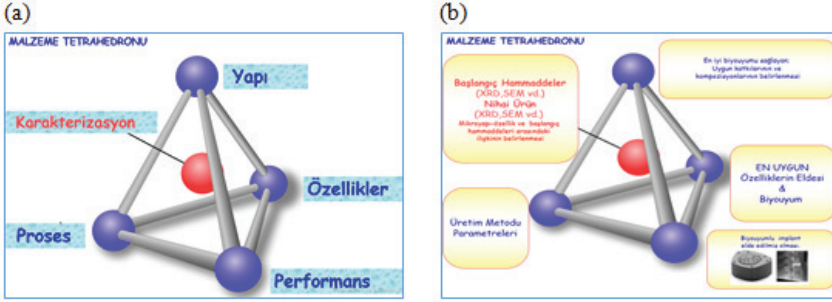
¹ Metalurji Programı, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 11210, Bilecik, Türkiye

Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 11230, Bilecik, Türkiye <https://orcid.org/0000-0003-0411-9773>

1. GİRİŞ

Genel anlamda malzeme, kullanılabilir cisim yapma amacıyla, doğal veya yapay olarak üretilmiş maddelere verilen addır (“Biyomalzemeler Hayatımız Nasıl Değiştiriyorlar? | BUPlus,” n.d.). Biyomalzemelerse, devamlı olarak veya belli aralıklarla vücuttaki kan vb. akışkanlarla temas halinde bulunan doğal ya da sentetik malzemelerdir ve bu malzemeler vücuttaki canlı dokuların fonksiyonlarını gerçekleştirmek ya da işlevlerini destek amacıyla kullanılırlar (Yılmaz Güven, 2014).

Malzeme bilimi, malzemelerin yapılarını ve özelliklerini, üretim süreçlerini ve bunlar arasındaki ilişkileri inceler. Biyomalzeme bilimi, malzemelerin biyolojik ortamla etkileşimlerini fiziksel açıdan ve/veya biyolojik açıdan inceler (“Biyomalzeme Nedir?. Hafif fütüristik bir nüansa sahip... | by Deniz Ak | Medium,” n.d.). Malzeme biliminde, sözü edilen proses, yapı ve özellik ilişkileri çok önemli olup, Şekil 1 a’da bu ilişkiler için malzeme tetrahedronu verilmiştir. Şekil 1 b’de ise silisyum nitrür (Si_3N_4) esaslı bir biyomalzeme üretimi için malzeme tetrahedronunda bu ilişkiler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1 (a) Malzeme biliminde proses yapı özellik ilişkilerinin (b) Si_3N_4 esaslı bir biyomalzeme için bu ilişkilerin şematik olarak gösterimi

2. SINIFLANDIRMA

Malzemeleri sınıflandırmada, kristal yapıları, bağ yapıları ve makroyapıları önemli olup, bunlara göre farklı sınıflara ayırmak mümkündür. Sınıflandırmada, alt gruptaki malzemelerin her biri benzer özelliklere sahip olup, kemiğin, gözenekli, doğal ve seramik-polimer kompozit olması örneğinde olduğu gibi, bir malzeme birçok kategoride yer alabilir. Diğer malzemeler gibi, biyomalzemeler de; metal, seramik, polimer ve kompozit malzemeler olarak dört temel kategoriye ayrılabilir. Metalik malzemeler yoğunlukla dişçilik ve ortopedik uygulamalarda kullanılırlar. Titanyum ve titanyum alaşımı, paslanmaz çelik ve kobalt-krom (Co-Cr) alaşımları en fazla kullanılan metallerdir. Sert dokuların onarımında, rejenerasyonda ve güçlendirmede, bilhassa yük taşıyıcı uygulamalarda ya da metalik imp-

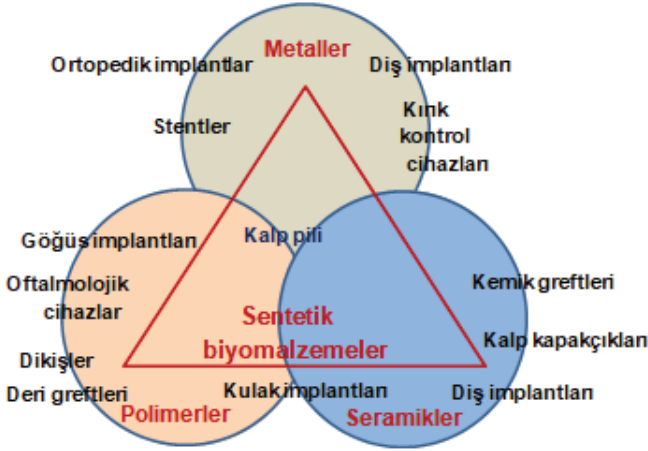
lantların kaplanması için kaplama malzemesi olarak seramikler kullanılır ve en fazla, kalsiyum fosfat (CaP), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve biyocam seramikler kullanılır. Polimerler ise, yumuşak ve sert doku uygulamalarında, ilaç dağıtım uygulamalarında kullanılmaktadır. Doğal polimerler (örneğin kollajen, sodyum alginat, selüloz) veya sentetik polimerler (örneğin, silikon kauçuk, PMMA, poli (vinil klorür) ve co-PLGA) mevcuttur (Bose & Bandyopadhyay, 2013).



Şekil 2 Farklı malzeme türleri (Bose & Bandyopadhyay, 2013)

Malzemelerin özelliklerini anlamak, bu malzemelerin üretim proseslerinin yanı sıra yapıları hakkında derin bir bilgi gerektirir. Bu bağlamda, farklı malzeme sistemlerinin avantaj ve dezavantajlarını bilerek seçmek de önemli olup, bu gibi genel özellikler sadece belirli herhangi bir uygulamaya yönelik malzeme seçimini yönlendirir. Örnek vermek gerekirse, metalik malzemeler için en büyük avantaj sünekliktir. Yüksek mukavemeti ve tokluğunun yanı sıra, metalik malzemeler işlenebilir. Bu malzemeler doğal olarak iletken olup yaygın kullanım alanları mevcuttur. En büyük endüstriyel yapılar metalik malzemelerden yapılmıştır. Biyomalzeme olarak, metaller, eklem replasmanı ve kemik kırığı fiksasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Metalik malzemeler yüksek mukavemet ve kırılmaya karşı direnç sağlar ve korozyona karşı direnç gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Metallere kıyasla, seramikler genel olarak serttir ve in vivo ortamda düşük aşınma hızı sunar. Seramikler mikrobiyal saldırıya karşı dirençlidirler. Alüminyum oksit, zirkonyum oksit, kalsiyum fosfatlar ve biyocamlar en çok kullanılan seramik biyomalzemelerdir. İlk ikisi, yük taşıyan implantlarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve son ikisi, kemik dokusu mühendisliğinde biyoaktif ve biyolojik olarak emilebilir seramikler ve biyolojik aktiviteyi arttırmak için metal implantlar üzerine kaplama olarak kullanılmaktadır. Biyomalzeme olarak çok çeşitli polimerler de kullanılmaktadır. Polimerler, düşük veya yüksek mukavemetli, esnek veya sert olabilir ve biyolojik olarak parçalanabilir veya biyolojik olarak bozunabilir. Sentetik polimerler farklı biyomoleküllerle işlevsel hale getirilebilir ve çeşitli yapılar elde etmek için farklı yöntemlerle işlenebilir.

Ayrıca polimerler, suni derzlerde, yapay deri, sütürler, yüz implantları ve ilaç verme aygıtlarında kullanılırlar. Şekil 3, Farklı biyomalzemelerin genel uygulamalarını göstermektedir (Bose & Bandyopadhyay, 2013).

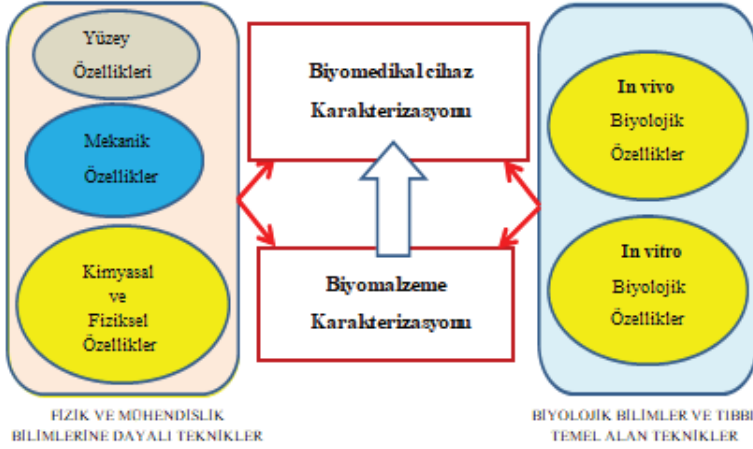


Şekil 3 Farklı biyomalzemelerin genel uygulamaları (Bose & Bandyopadhyay, 2013).

Biyomalzemeler, hayatı kolaylaştırmada ve yaşamın kalitesini artırmada, nano boyuttan, mikro boyuta ve makro düzeye kadar farklı malzemenin materyallerinin gelişimi ile beraber evrimleşmiştir.

Biyomalzemeler, fiziksel özelliklerini korumalıdır, kanserojen olmamalıdır, toksik olmamalıdır, alerjik olmamalıdır, uzun ömürlü olmalıdır, kullanım ömürleri boyunca fonksiyonelliğini korumalıdır ve steril edilebilir özellikte olmalıdırlar (Büşra YAKINCI et al., 2020). Ayrıca biyomalzemeler, biyoyumlu yani biyolojik sistemle dost olarak, hücre ve sistemsel seviyede zarara neden olmamalıdır. Biyomalzemelerde en uygun özelliklerin (fiziksel, mekanik ve biyoyumluluk) elde edilmesi amacıyla yapılan işlemler sonrasında, malzemenin bazı özellikleri değişebilmektedir. Bu değişimleri belirlemek amacıyla uygulanacak karakterizasyon tekniklerinin seçimi ve bu yöntemlerin doğruluk ve hassasiyetle uygulanması gerekir. Bu amaçla fiziksel, kimyasal, (Sampath Kumar, 2013), yapısal ve biyolojik (Will, Detsch, & Boccaccini, 2013), mekanik (Roy, Bandyopadhyay, & Bose, 2013), yüzey (H. Wang & Chu, 2013), in vitro (Thasneem & Sharma, 2013) ve in vivo (Nandi & Biswas, 2013) karakterizasyon yöntemleri kullanılır. Antimikrobiyal özellikler açısından bakteri-biyomalzeme etkileşiminin karakterizasyonu (Abu-Lail & Beyenal, 2013) ve özellikle kardiyovasküler implantlar gibi kritik parçaların karakterizasyonu da insan sağlığı açısından çok önemlidir (Wu & Cao, 2013). Şekil 4, biyomalzemelerle ilgili farklı özellikleri şematik açıklamaktadır.

Malzemelerin özellikleri, mikroyapı özellikleriyle ilişkili olup (Campos, Cuevas, & Muñoz, 2015), mikroyapısal karakterizasyon, malzemelerin kristalografisini, morfolojisini ve kimyasal bileşimlerini tespiti kapsar (Goldstein et al., 2017). Kristalografik analiz, malzemenin yapısında bulunan farklı fazların türünü ve miktarının belirlenmesi amacıyla yapılır. Morfolojik analiz, yapıdaki fazların veya tanelerin boyut, şekil ve dağılımlarının karakterize edilmesidir. Kompozisyon analizi ise, malzemenin kimyasal bileşenlerini ve bu bileşenlerin göreceli miktarını tanımlamayı amaçlar. Biyomedikal alanlarda kullanılan titanyum alaşımları, gümüş ve biyo-bozunur magnezyum alaşımları gibi metalik esaslı, hidroskiapatit ve Si_3N_4 gibi seramik esaslı malzemelerin optik mikroskop ve elektron mikroskopları ile yapılan karakterizasyon çalışmaları değerlendirilmiştir (Uyan & Cengiz, 2021).



Şekil 4. Biyomalzemelerle ilgili farklı özellikler (Bose & Bandyopadhyay, 2013).

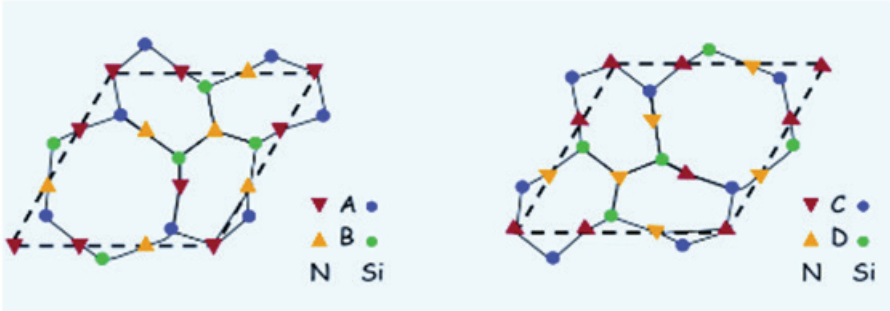
3. Si_3N_4 ESASLI SERAMİKLER

Si_3N_4 esaslı seramik malzemeler birçok alanda yaygın kullanılmakta olup, Si_3N_4 seramikler, düşük yoğunluğu, aşınmaya dayanımı, yüksek mukavemeti, inert ve biyouyumlu olmaları ve yüksek termal iletkenlik değeri nedeniyle elektronik devrelerde ısı alıcı altlık malzemesi olarak kullanılır. (Uyan & Turan, 2018), Ancak, biyomedikal alanlarda kullanım sınırlı olmasına rağmen, bu ileri teknoloji seramiklerin biyomedikal alanda da kullanıma uygun özelliklere sahip oldukları ve biyomedikal implantlarda kullanılabileceği bilinmektedir (Heimann, 2021), (Giuseppe Pezzotti et al., 2020), (Rahaman & Xiao, 2018), (Shankar, Nithyaprakash, Sugunesh, Selvamani, & Uddin, 2020), (Shankar, Nithyaprakash, Santhosh, Gur, & Pramanik, 2020), (Kale, Joshi, Rao, Mukherji, & Rao, 2009), (Giuseppe Pezzotti et al., 2017), (Giuseppe Pezzotti et al., 2016), (Mcentire et al.,

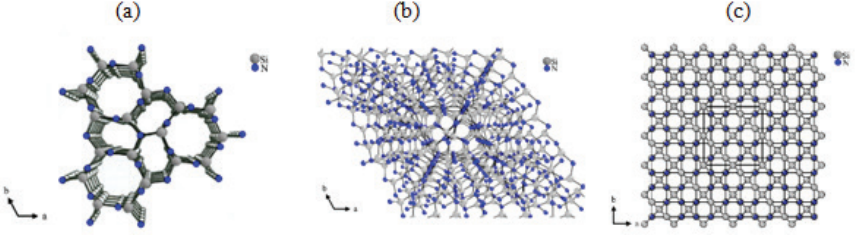
2016). Yine biyomedikal alana yönelik olarak gümüşle kaplanmış Si_3N_4 üretilmiştir (Gürbüz & Uyan, 2021). Tüm çalışmalarda elde edilen son ürünün karakterizasyon çalışmalarının büyük önemi olduğu ve malzemelerin geliştirilmesi ve üretilmesinde önemli katkısı olduğu yadsınamaz bir gerçektir (Uyan & Cengiz, 2021).

Si_3N_4 , 1857 yılında bulunmuş, pratikte kullanımı ise, 1940'lı yıllarda başlamış, seramik esaslı bir malzeme olup, üç farklı kristal yapıda bulunur (α , β , γ). α ve β , oluşumu için normal azot basınç gerekirken, γ oluşumu içinse, yüksek basınç ve sıcaklık gerekmektedir (P. L. Wang, Li, & Yan, 2000). Si_3N_4 'ün yapısı, X-ışınları difraksiyonu ile 1957 yılında tespit edilmiştir. α ve β Si_3N_4 her ikisi de hegzagonal yapıdadır. α ve β kristal yapıları, SiN_4 tetrahedral ünitelerin bağlanmasıyla oluşmuş ağ yapısına sahip olup, ünitelerin farklı dizilişindedir.

Şekil 5'de Si_3N_4 yapısının şematik gösterimi verilmiş olup, Şekil 5, Si_3N_4 'de Si-N tabakaları, AB ve CD ile gösterilmektedir. β yapıda, tabakalar ABAB....şeklinde diziliminde olup, c yönüne paralel kesintisiz kanallar mevcuttur (Şekil. 6. a.) ("Sintering behaviour of α and β solid solution sialons," n.d.). α yapısında, düzlemlerin ABCDABCD... dizilimi söz konusu olup (Şekil 6.b), bu dizilimde, üstte mevcut AB tabakası çıkarak, 180° dönerek yeniden üstte tabaka olarak yerleşmiş şekildedir. AB tabakası, CD tabakasından kayma ile yerleşmiş ve kanallar kapanmıştır. Şekil 6c'de ise γ - Si_3N_4 'ün c ekseninden görünümü verilmiştir (Peng, Shen, & Nygren, 2002) (Peng (2004)). Çizelge.1'de Si_3N_4 seramiklerinin bazı özellikleri verilmiştir.



Şekil 5. Si_3N_4 yapısının şematik gösterimi (Hampshire, Park, Thompson, & Jack, 1978)

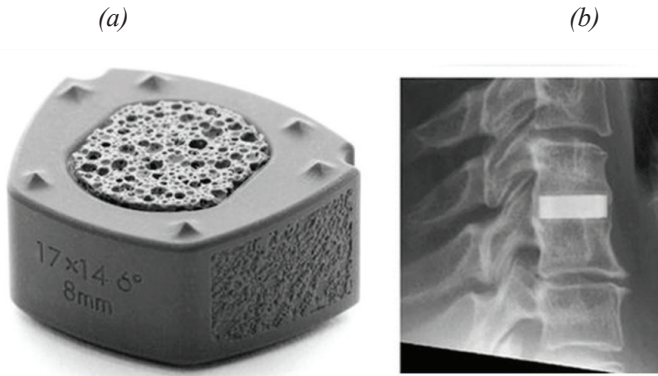


Şekil 6 (a) β - Si_3N_4 (Westberg (1991)), (b) α - Si_3N_4 ve (c) γ - Si_3N_4 'ün c eksenlerinden görünüşleri (Peng (2004)).

Çizelge.1. Si_3N_4 seramiklerinin bazı özellikleri (Rutten, 2000) ; (“Materials Properties Data Sheet,” n.d.) (“The World of High Tech Ceramics,” n.d.) (“Ceramic Materials Properties Charts,” n.d.)

Si_3N_4	
Yoğunluk (g/cm^3)	3.2
Elastik Modül (GPa)	300-330
Elektriksel Direnç (Ωcm @ R.T)	10^{13}
Kırılma Tokluğu ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	3.4-8.2
Sertlik (Vickers) GPa	16-22
Termal İletkenlik (W/mK)	4-155

Şekil 7’de Silisyum nitür (Si_3N_4) servikal interbody füzyon cihazı ve implante cihazın radyografik görüntüsü verilmiştir.

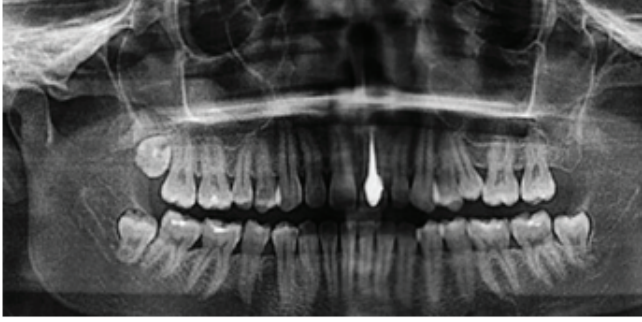


Şekil 7 Si_3N_4 servikal interbody füzyon cihazı (Valeo CCsC®), (a) ve implante cihazın radyografik görüntüsü (b) (Heimann, 2021)

Silisyum nitrür seramikler, ortopedik biyomateryal olarak (Bal & Rahaman, 2012), spinel implant olarak (“Spinal Implants | Silicon Nitride Applications | SINTX Technologies,” n.d.) (“SILICON NITRIDE: A NEW MATERIAL FOR SPINAL IMPLANTS | Orthopaedic Proceedings,” n.d.) ve dental uygulamalar için de umut verici bir malzeme olarak uygundur. Şekil 8’de, artroplasti ve spinel uygulamaları için Si_3N_4 ürün örnekleri görülmektedir. Yüksek klinik başarı gösteren mekanik ve biyolojik performansı ile dental implant üretimi için titanyum, tercih edilen malzemedir. Ancak, metal içermeyen diş restorasyonlarına yönelik artan talep, zirkonya gibi seramik bazlı diş implantlarının geliştirilmesine yol açmıştır. Ortopedide, implant uygulamaları için polietereketon veya silisyum nitrür gibi alternatif biyomalzemeler kullanılmıştır. Si_3N_4 seramiğin antibakteriyel özelliklere sahip olduğu gösterildiğinden, oral kullanım için potansiyel olarak daha ilgi çekicidir ve dental implantoloji uygulamaları için gelecek vaat eden bir aday olarak bu biyomalzeme önemlidir. Mevcut prelinik veriler ışığında, silisyum nitrür, dental implant materyali olarak aday olmak için temel özelliklere sahip görünmektedir. Bu yeni seramik, potansiyel olarak antimikrobiyal özelliklere sahip bir yüzeye sahiptir ve oral kullanım için büyük ilgi görebilir (Badran et al., n.d.). Silisyum nitrür (Si_3N_4), diş ve tıbbi implant uygulamaları için potansiyelini vurgulayan mükemmel mekanik, fiziksel, termal, yapısal ve biyolojik özellikler göstermiştir. Antibakteriyel yüzey ve yüzey modifikasyonlarının kabiliyeti klinik olarak en önemli ve dikkat çekici özelliklerdir. Ayrıca, Si_3N_4 diş implantları, kemik dokularına yakın mekanik özellikler sergileyerek, titanyum implantlara kıyasla stres kalkanını azaltmıştır. İmplant diş hekimliği alanında Si_3N_4 malzemeleri hakkında devam eden araştırmaların sonuçları özetlenmiştir (Raza, Khurshid, Zafar, Najeeb, & Ul Yaqin, 2020). Titanyum, polietereketon, zirkonyum ve silisyum nitrür malzemelerin dental implantlarda kullanımı amacıyla malzeme özellikleri karşılaştırılmıştır (Aparicio-Razo et al., n.d.) Şekil 9’da, dental uygulamalar için dental restorasyon malzemesi olarak Si_3N_4 görülmektedir. Silisyum nitrür (Si_3N_4), uygulama sırasında sağladığı önemli faydalar nedeniyle diş restorasyonu için gelecek vaat eden seramiklerden biridir. Si_3N_4 , diş uygulamaları için çekici bir seramik olup, gözenekli formda bile iyi mekanik özelliklere sahip olmakla birlikte, doğal antibakteriyel/anti-enfektif aktivite, radyolüsens ve daha düşük sertlik gibi restoratif materyal olarak kullanılan geleneksel seramiklere göre ek avantajlara sahiptir (Özdoğan, Güngörmüş, Çelik, & Topateş, 2020)



Şekil 8 Artroplasti ve spinal uygulamaları için Si_3N_4 ürün örnekleri Amedica Corp. (Bal & Rahaman, 2012)



Şekil 9. Dental restorasyon malzemesi olarak Si_3N_4 © Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Ayrıca, Silisyum nitrür (Si_3N_4), yüzey bakteri direncine sahip, oksit olmayan bir seramik bileşiktir. Si_3N_4 yüzeylerindeki stokiyometrik reaksiyonların aynı zamanda farklı tipteki tek iplikli RNA'yı inaktive edebildiğini gösterilmiştir. Si_3N_4 'ün antiviral özelliği, yüzeyindeki bir hidroliz reaksiyonundan ve müteakip oluşumundan kaynaklanır. Si_3N_4 hidroliz ürünlerinin doğrudan viral proteinler ve RNA ile reaksiyona girdiğini ortaya konmuş ve Si_3N_4 'ün, ssRNA mutant virüsleriyle ilgili insan salgınlarının kontrolünde rol oynayabileceği ifade edilmiştir (Giuseppe Pezzotti et al., 123AD)

Bir biyomateryal sistem bileşeni olarak silisyum nitrür (Si_3N_4), kemik dokusu mühendisliği uygulamaları için daha fazla geliştirilecek umut verici bir potansiyele sahip olup, Antibiyofilm ve osteojenik özelliklere sahip bir biyomimetik yapı iskelesi üretmek için SiN mikropartiküllerini makro gözenekli bir GC kriyojeline yükleyerek bir SiN-GC kriyojel sistemi geliştirilmiştir. Daha yüksek SiN konsantrasyonuna sahip SiN-

GC grubunun daha güçlü antibiyofilm aktivitesi, daha yüksek hücresel proliferasyon, daha yüksek mineralizasyon ve osteojenik gen regülasyonu ile sonuçlandığı doğrulanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak, bir biyomalzeme sisteminde bir bileşen olarak silisyum nitrürün (Si_3N_4) umut verici bir potansiyeli ortaya konmuş ve SiN-GC kriyojel sistemini kemik dokusu mühendisliği için yeni bir yaklaşım olarak önerilmiştir (Lee et al., 2021)

Ayrıca güncel Covid 19 pandemisi için, SARS-CoV-2'nin silisyum nitrür biyoseramik ile anında etkisiz hale getirilmesi mekanizmaları araştırılmış, silisyum nitrür (Si_3N_4) biyoseramik yüzeyinde meydana gelen hidrolitik süreçler, SARS-CoV-2 virüsünün anında inaktivasyonu için güçlü bir yol olarak belirtilmiştir. Si_3N_4 ile temas halinde SARS-CoV-2 virüsünde anlık hasar oluşmuştur. Bu çalışma, Si_3N_4 biyoseramiğinin güvenli ve etkili bir antiviral bileşik olduğu fikrini doğrulamış ve halihazırda insan vücudu ile temas halinde ve uzun süreli çevre temizliğinde kullanılan toksik ve alerjenik bileşiklerin yerini alacak birincil bir antiviral aday olarak göstermiştir (G. Pezzotti et al., 2021).

Ticari olarak ise Amedica, dünyanın ilk 3D baskılı Si_3N_4 tıbbi implantlarını geliştirmektedir. Amedica Corporation, robotik biriktirme veya robocasting adı verilen bir 3D baskı işlemi kullanarak tıbbi silisyum nitrür seramikleri yaratan ilk şirkettir. Robocasting, yoğun seramikler ve kompozitler için yüksek oranda kolloidal bulamaçların katmanlı birikimine dayanan serbest biçimli bir üretim tekniğidir. Robocasting tekniğini kullanarak, 24 saatten daha kısa bir sürede eksiksiz bir 3D baskılı cihaz yapılabilir. 3D baskılı ürünlerin, geleneksel olarak üretilen alternatiflere benzer özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Bir implant üretim yöntemi olarak 3D baskı, hem avantajlar hem de dezavantajlar sunabilir, ancak baskı malzemesinin seçimi, üretim sürecinin kendisi kadar önemli olabilir. Bu tür platformlar metal alaşımlardan, polimerlerden ve diğer seramiklerden de yapılabilir, ancak Amedica silisyum nitrürün üstün niteliklere sahip olduğunu ve bunun da onu çeşitli implantlar ve diğer tıbbi cihazlar için ideal seçim haline getirdiğini iddia etmektedir. Birçok gelişmiş tıbbi implant, kısmen organik, kısmen sentetik sistemin güvenli bir şekilde bir araya gelmesi için implant çevresinde organik kemik materyalinin büyümesini teşvik etmek üzere tasarlanmıştır. Ne yazık ki implantlar vücuda yabancı maddeler getirdiği için bu geçiş sürecinde istenmeyen bakteri üremeleri de meydana gelebilmektedir. Silisyum nitrür, tümü kemik büyümesini teşvik eden proteinleri, hücreleri ve besinleri çekerek bir implant ile onu çevreleyen kemik arasındaki biyofilmelerin büyümesini azaltmaya yardımcı olur. Pürüzlü bir yüzey dokusu da kemik büyümesine katkıda bulunurken, malzemenin antibakteriyel özellikleri enfeksiyon olasılığını azaltmaya yardımcı olur. (“Amedica develops world’s first 3D printed silicon nitride medical implants | Open BioMedical Initiative - We Help,” n.d.).

4. GENEL DEĞERLENDİRME

Biyomalzemelerin kullanım yerlerine göre seçimi ve nasıl test edileceği, çok disiplinli ve son derece önemli bir konudur. Biyomalzemelerin tamamen karakterize edilmesi, birçok kimyasal ve fiziksel parametrenin bilinmesi için ve ayrıca malzeme üretim yönteminin ve üretim parametrelerinin malzemelerin özelliklerine etkisi ve kullanım yerinde sergileyeceği özellikleriyle ilişkilendirilmesi için gerekmektedir. Si_3N_4 seramikler, yukarıda da söz edildiği üzere, üstün mekanik özellikleri, biyouyumlu olmaları ve antimikrobiyal özellik sergilediklerinden dolayı, biyomedikal kullanıma uygun olup, özellikle ortopedik alanda ve dışçilikte bu özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır. Dahası günümüzde Silisyum nitrür (Si_3N_4) biyoseramik yüzeyinde meydana gelen hidrolitik süreçler, SARS-CoV-2 virüsünün anında inaktivasyonu için güçlü bir yol olarak belirtilmiş, ayrıca Si_3N_4 biyoseramiğin güvenli ve etkili bir antiviral bileşik olduğu ve halihazırda insan vücudu ile temas halinde ve uzun süreli çevre temizliğinde kullanılan toksik ve alerjenik bileşiklerin yerini alacak birincil bir antiviral aday olarak gösterilmiştir. Ortopedik, dışçilik, kardiyovasküler, oftalmolojik ve rekonstrüktif ameliyatlar gibi uygulamalar, yüksek basma ve eğilme dayanımları, yüksek kırılma tokluğu, düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma ve korozyon direnci, radyolüsent bir malzeme olarak gelişmiş tıbbi görüntüleme yeteneği ve bakterilere, virüslere karşı gelişmiş biyouyumluluk, osseointegrasyon ve antimikrobiyal aktiviteye dayanmaktadır ve bu benzersiz özellikler, silisyum nitrürün gelecekteki tıbbi uygulamalarda titanyum ve diğer yerleşik, yaygın kullanılan biyomalzemelerin yerini alabileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, silisyum nitrürün mekanik, tribolojik, kimyasal ve biyolojik özellikleri ne kadar avantajlı olursa olsun, nispeten yüksek elastiklik modülü, artroplastik implantlar için zorluk teşkil etse bile, malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmalarıyla bu olumsuzluklar en aza indirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abu-Lail, N. I., & Beyenal, H. (2013). Characterization of Bacteria–Biomaterial Interactions, from a Single Cell to Biofilms. *Characterization of Biomaterials*, 207–253. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415800-9.00006-1>
- Amedica develops world’s first 3D printed silicon nitride medical implants | Open BioMedical Initiative - We Help. (n.d.). Retrieved July 11, 2022, from <http://www.openbiomedical.org/amedica-develops-worlds-first-3d-printed-silicon-nitride-medical-implants/>
- Aparicio-Razo, M., Luis Jr Mongalo-Vázquez, J., Yáñez Ramos, J. A., Navarro-Zárate, A., Hugo Santos-Enríquez, V., Vivanco-Pérez, I., ... Alberto Paredes-Juárez, G. (n.d.). *Comparison of Material Properties for Dental Implants: Titanium, Polyetheretherketone, Zirconium and Silicon Nitride*.
- Badran, Z., Struillou, X., Hughes, F. J., Soueidan, A., Hoornaert, A., & Ide, M. (n.d.). *Silicon Nitride (Si 3 N 4) Implants: The Future of Dental Implantology?* <https://doi.org/10.1563/aaid-joi-D-16-00146>
- Bal, B., & Rahaman, M. (2012). Orthopedic applications of silicon nitride ceramics. LinkOut-more resources Orthopedic applications of silicon nitride ceramics. *Acta Biomater*, 8(8), 2889–2898. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.04.031>
- Biyomalzeme Nedir?. Hafif fütüristik bir nüansa sahip... | by Deniz Ak | Medium. (n.d.). Retrieved July 10, 2022, from <https://medium.com/@denizak/biyomalzeme-nedir-a3138e2869f6>
- Biyomalzemeler Hayatımız Nasıl Değiştiriyorlar? | BUPlus. (n.d.). Retrieved July 9, 2022, from <https://buplus.boun.edu.tr/node/111>
- Bose, S., & Bandyopadhyay, A. (2013). Introduction to Biomaterials. *Characterization of Biomaterials*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415800-9.00001-2>
- Büşra YAKINCI, D., Üniversitesi, M., Hekimliği Fakültesi, D., Deniz ÇIRAK, Z., Üniversitesi, İ., & Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, S. (2020). Biocompatible Biomaterials Used in Medical Applications. *Cilt*, 8(2), 515–526. <https://doi.org/10.33715/inonusaglik.745301>
- Campos, R. P., Cuevas, A. C., & Muñoz, R. E. (2015). Materials characterization. In *Materials Characterization*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15204-2>
- Ceramic Materials Properties Charts. (n.d.). Retrieved September 15, 2021, from <https://www.ceramicindustry.com/ceramic-materials-properties-charts/>
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. In *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
- Gürbüz, M., & Uyan, P. (2021). Electrospun Chitosan/Silver Doped-Hydroxya-

- patite Nano-Fibers on Thermal Conductivity Modified Si₃N₄ Ceramics with Different Sintering Cooling Rate. *Universal Journal of Materials Science*, 9(1), 1–7. <https://doi.org/10.13189/ujms.2021.090101>
- HAMPSHIRE, S., PARK, H. K., THOMPSON, D. P., & JACK, K. H. (1978). α' -Sialon ceramics. *Nature* 1978 274:5674, 274(5674), 880–882. <https://doi.org/10.1038/274880a0>
- Heimann, R. B. (2021, March 25). *Silicon Nitride, a Close to Ideal Ceramic Material for Medical Application*. Retrieved from <https://www.preprints.org/manuscript/202103.0636/v1>
- Kale, N. S., Joshi, M., Rao, P. N., Mukherji, S., & Rao, V. R. (2009). Bio-functionalization of silicon nitride-based piezo-resistive microcantilevers. *S⁻Adhan⁻ A*, 34, 591–597.
- Lee, S. S., Laganenka, L., Du, X., Hardt, W.-D., Ferguson, S. J., Wang, X., ... Ch, S. (2021). *Silicon Nitride, a Bioceramic for Bone Tissue Engineering: A Reinforced Cryogel System With Antibiofilm and Osteogenic Effects*. 9, 1. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.794586>
- Materials Properties Data Sheet. (n.d.). Retrieved September 15, 2021, from https://www.microcertec.com/materiaux.php?ss_rub=3&lng=en
- Mcentire, B. J., Lakshminarayanan, R., Thirugnanasambandam, P., Seitz-Sampson, J., Bock, R., & O'brien, D. (2016). Bioceramics Development and Applications Processing and Characterization of Silicon Nitride Bioceramics. *Bioceram Dev Appl*, 6, 1. <https://doi.org/10.4172/2090-5025.100093>
- Nandi, S. K., & Biswas, S. (2013). In Vivo Characterization of Biomaterials. *Characterization of Biomaterials*, 255–297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415800-9.00007-3>
- Özdoğan, M. S., Güngörmüş, M., Çelik, A., & Topateş, G. (2020). Silicon nitride ceramic for all-ceramic dental restorations. *Dental Materials Journal*, 39(6), 1080–1086. <https://doi.org/10.4012/DMJ.2020-134>
- Peng, H., Shen, Z., & Nygren, M. (2002). Formation of in situ reinforced microstructures in α -sialon ceramics: Part II. In the presence of a liquid phase. *Journal of Materials Research*, 17(5), 1136–1142. <https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0168>
- Peng, H., (2004). “Spark Plasma Sintering of Si₃N₄-Based Ceramics”, Doktora Tezi, Department of inorganic Chemistry, Stockholm University, Stockholm.
- Pezzotti, G., Boschetto, F., Ohgitani, E., Fujita, Y., Shin-Ya, M., Adachi, T., ... Mazda, O. (2021). Mechanisms of instantaneous inactivation of SARS-CoV-2 by silicon nitride bioceramic. *Materials Today Bio*, 12, 100144. <https://doi.org/10.1016/J.MTBIO.2021.100144>
- Pezzotti, Giuseppe, Boschetto, F., Ohgitani, E., Fujita, Y., Zhu, W., Marin, E., ... Mazda, O. (123AD). Silicon nitride: a potent solid-state bioceramic

- inactivator of ssRNA viruses. *Scientific Reports* |, 11, 2977. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82608-3>
- Pezzotti, Giuseppe, Fujita, Y., Boschetto, F., Zhu, W., Marin, E., Vandelle, E., ... Pulverari, A. (2020). Activity and Mechanism of Action of the Bioceramic Silicon Nitride as an Environmentally Friendly Alternative for the Control of the Grapevine Downy Mildew Pathogen *Plasmopara viticola*. *Frontiers in Microbiology*, 0, 3080. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.610211>
- Pezzotti, Giuseppe, Marin, E., Adachi, T., Rondinella, A., Boschetto, F., Zhu, W., ... Bal, S. B. (2017). Bioactive silicon nitride: A new therapeutic material for osteoarthropathy. *Scientific Reports 2017 7:1*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep44848>
- Pezzotti, Giuseppe, McEntire, B. J., Bock, R., Boffelli, M., Zhu, W., Vitale, E., ... Bal, B. S. (2016). Silicon Nitride: A Synthetic Mineral for Vertebrate Biology. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/SREP31717>
- Rahaman, M., & Xiao, W. (2018). Silicon nitride bioceramics in healthcare. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 15(4), 861–872. <https://doi.org/10.1111/IJAC.12836>
- Raza, S. M., Khurshid, Z., Zafar, M. S., Najeeb, S., & Ul Yaqin, S. A. (2020). Silicon nitride (SiN): an emerging material for dental implant applications. *Dental Implants: Materials, Coatings, Surface Modifications and Interfaces with Oral Tissues*, 287–299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819586-4.00015-9>
- Roy, M., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2013). Mechanical Properties of Bioceramic Coatings on Medical Implants. *Characterization of Biomaterials*, 311–321.
- Rutten, J. (2000). Preparation, characterisation and properties of Ca-alpha-sialon and Ca-alpha/beta-SiAlON composite materials, Doktora Tezi, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- Sampath Kumar, T. S. (2013). Physical and Chemical Characterization of Biomaterials. *Characterization of Biomaterials*, 11–47.
- Shankar, S., Nithyaprakash, R., Santhosh, B. R., Gur, A. K., & Pramanik, A. (2020). Experimental and submodeling technique to investigate the wear of silicon nitride against Ti6Al4V alloy with bio-lubricants for various gait activities. *Tribology International*, 151, 106529. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2020.106529>
- Shankar, S., Nithyaprakash, R., Sugunesh, A. P., Selvamani, K. A., & Uddin, M. S. (2020). Experimental and Finite Element Wear Study of Silicon Nitride Against Alumina for Hip Implants with Bio-Lubricant for Various Gait Activities. *Silicon 2020 13:3*, 13(3), 633–644. <https://doi.org/10.1007/S12633-020-00462-W>
- Silicon Nitride: A New Material for Spinal Implants | Orthopaedic Proceedings. (n.d.). Retrieved July 11, 2022, from <https://online.boneandjoint.org.uk/>

doi/abs/10.1302/0301-620X.92BSUPP_I.0920133

- Sintering behaviour of α and β solid solution sialons. (n.d.). Retrieved September 15, 2021, from <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A989887&dsid=-4846>
- Spinal Implants | Silicon Nitride Applications | SINTX Technologies. (n.d.). Retrieved July 11, 2022, from <https://sintx.com/applications/biomedical/spinal-implants/>
- Thasneem, Y. M., & Sharma, C. P. (2013). In Vitro Characterization of Cell–Biomaterials Interactions. *Characterization of Biomaterials*, 175–205. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415800-9.00005-X>
- The World of High Tech Ceramics. (n.d.). Retrieved September 15, 2021, from <https://www.ceramtec-group.com/en/high-tech-ceramics>
- Uyan, P., & Cengiz, Ö., Eylül 2021, Yeni Nesil Bazı Nano-Biyomalzemelerin Karakterizasyonunda Optik ve Elektron Mikroskopi Yöntemleri Üzerine Bir Değerlendirme**, ISBN: 978-625-7405-57-7, 1. Baskı, Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırmalar, **213-232**.
- Uyan, P., & Turan, S. (2018). Effect of Cooling Cycle after Sintering on the Thermal Diffusivity of Y_2O_3 Doped Si_3N_4 Ceramics. *Universal Journal of Materials Science*, 6(1), 39–47. <https://doi.org/10.13189/ujms.2018.060105>
- Wang, H., & Chu, P. K. (2013). Surface Characterization of Biomaterials. *Characterization of Biomaterials*, 105–174. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415800-9.00004-8>
- Wang, P. L., Li, Y. W., & Yan, D. S. (2000). Effect of amount and atomic ratio of dual modifiers Ca and Mg on phase formation and mechanical properties of Ca,Mg- α -Sialons. *Journal of Materials Science 2000 35:7*, 35(7), 1585–1588. <https://doi.org/10.1023/A:1004775023547>
- Westberg, S.-B., Sintering Behaviour of α and β solid solution SiAlONs, Doktora Tezi, Luleå University of Technology, Luleå, 1991.
- Will, J., Detsch, R., & Boccaccini, A. R. (2013). Structural and Biological Characterization of Scaffolds. *Characterization of Biomaterials*, 299–310.
- Wu, M. H., & Cao, H. (2013). Characterization of Cardiovascular Implantable Devices. *Characterization of Biomaterials*, 355–417.
- Yılmaz Güven, Ş. (2014). Biyouyumluluk ve Biyomalzemelerin Seçimi. *Suleyman Demirel University Journal of Engineering Sciences and Design*, 2(3), 303–311.



BÖLÜM 6

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALARIN HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Aylin AKYILDIZ¹

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, aakyildiz@nku.edu.tr

1. GİRİŞ

Gelişen dünya; hızla artan nüfus, teknolojik gelişmeler ile birlikte çevreye verilen zararlar, doğal kaynakların tüketilmesi ve geri dönüşümü olmayan bir çevre sürdürülebilirlik kavramını ön plana çıkarmıştır. Sürdürülebilirlik kavramı ilk olarak Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonunun 1987 yılında yayınlamış olduğu Ortak Geleceğimiz rapor ile ortaya atılmıştır.

Ne kadar doğaya ekonomiye olan faydaları bilinse de, dünyada henüz yeterince geri dönüşüm yapılmamaktadır. Geri dönüşüm üretim veya tüketim sonucunda ortaya çıkan atıkların tekrar üretimde ve tüketimde kullanılabilir malzeme ve nesnelere dönüştürülmesini ve yararlı bazı malzemelerin boşa gitmesini önlemeyi ifade eder [1]. Doğadan çıkarma, üretim, tüketim, atık ve bertaraf süreci yerine, çıkan atıkların tekrar üretime dâhil edilmesi ile gerçekleşir. Doğadan bir hammaddenin tekrar ve tekrar çıkarılarak kullanılmasının önüne geçilir, doğal kaynakların tüketilmesini önleyerek doğayı korur aynı zamanda ülke ekonomisine katkı sağlar.

Malzemelerin ve bileşenlerin yeniden kullanılmak üzere tasarlanması, atıkların değerli bir kaynak haline gelmesi ekonomide önemlidir. Kaynak verimliliği ve sürdürülebilirlik tasarım, yapım, kullanım süresince üretilen atık miktarını önemli ölçüde azaltacaktır.

Geri dönüşüm, kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Atıkların biriktirildiği depolama alanlarının daha az kullanılmasına olanak vermektedir. Bir binanın yenilenmesi, elemanlarının ve malzemelerinin ayrıştırılması, tercihen ikincil hammaddeler kullanılarak yapılması ilginç fırsat oluşturmaktadır. Geri dönüşüm yapı malzemelerinin başka uygulamalar için işlenmemiş malzeme gibi kullanılmasıdır [2-5]. Dünyada yapısal atıkların geri dönüşümü konusunda birçok ülkede geri dönüşüm uygulamaları yapılmaktadır. Japonya, Hollanda, Belçika gibi ülkeler geri dönüşüm konusunda en başarılı ülkelerdir ve uyguladıkları politikalar ile yapısal atıklar %95'e varan oranlarda geri dönüştürülmektedir [6].

Yapısal atık yönetimi, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı, fiziksel çevrenin korunumu ve insan sağlığının korunması için büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple atık yönetiminin sistemlerinin geliştirilmesi, çevre ve kalkınma için önemlidir. Etkin atık yönetimi ile yapı endüstrisinin yarattığı olumsuz etkiler çevre, toplum ve ekonomik boyutlarda azaltılabilmektedir [7].

Yapı üretim sürecinin en önemli aşamalarından biri tasarım aşamasında atık yönetimi ile ilgili kararların alınmasıdır. Bu amaçla yapısal atıkların çevresel zararlarının azaltılması için yapılabilecekler [8]:

Kullanımda sık yenilemenin önlenmesi, yapı malzemelerinin dayanıklı seçilmesi

Yeniden kullanılabilir yapı malzemelerinin seçilmesi

Geri dönüştürülmüş yapı malzemelerinin kullanımı

Yerel malzemelerin seçilmesi

Malzeme kayıplarının önlenmesi şeklinde sıralanabilir.

Yapısal atıklar, yapıların yapımı, işletimi, bakım ve onarımı ve yıkım faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan taş, beton, seramik, plastik metal gibi malzemelerdir. Bu atıklar her türlü yapı, yol, gibi yapı yıkım işlemleri sonucunda oluşmaktadır. Bu atıkların farklı alanlarda kullanılabilmesi yani geri kazanılması önemlidir [9]. Tablo 1’de yapı malzeme bileşenlerinin geri dönüşüm işlemleri ve geri dönüştürüldükten sonra kullanım alanları gösterilmiştir.

Tablo 1. Malzemelerinin geri dönüşümü ve geri dönüştürüldükten sonra kullanım alanları [10].

Malzemeleri	Geri Dönüşüm Teknolojisi	Geri Dönüştürülmüş Ürün
Beton	Kırma, agrega haline getirme	Geri dönüştürülmüş agrega. Yeni beton yapımında kullanma Dolgu malzemesi
Taş	Kırmak Kül haline getirmek	Isı yalıtım betonu Tuğla
Ahşap	Yeniden kullanmak Agregaya karıştırmak	Tek parça ahşap Hafif geri dönüştürülmüş agrega İzolasyon levhası Geofiber Ahşap kaynaklı panel
Kiremit ve Tuğla	Kırma. Küçük parçalara ayırma. Yakılarak küle çevirme.	Dolgu malzemesi. Kiremit ve Tuğla üretim için hammadde olarak kullanma.
Asfalt	Kırma, küçük parçalara ayırma.	Asfalt agrega Geri dönüştürülmüş asfalt
Demir içeren Metaller	Eritmek Doğrudan kullanım.	Geri dönüştürülmüş çelik parçaları

Mermer	Kırma. Toz haline getirme.	Agrega. Dolgu malzemesi. Zemin iyileştirmelerinde kullanılacak dolgu malzemesi.
PVC içerikli malzemeler	Yıkayıp kurutma. Eriterek hammadde oluşturma. Küçük parçalara ayırma. Toz durumuna getirerek tekrar kullanma	Plastik Agregası. Panel yapımı.
Cam	Doğrudan yeniden kullanım. Kırıp agrega katma Eriterek hammadde oluşturmak. Öğütülerek küçük parçalara ayırarak kullanma.	Geri dönüştürülmüş agrega Cam elyafı. Dolgu malzemesi Seramik Asfalt
Seramik	Kırma. Öğütülerek Küçük parçalara Ayırma	Beton üretiminde katkı malzemesi.

Betonun agrega, çimento, su ve katkı malzemelerinden oluşmaktadır. Beton karışımının yaklaşık olarak %75'ini büyük bölümünü agregalar oluşturmaktadır. Agregası; kum, çakıl ve kırmataş gibi taneli ve farklı mineral yapıya sahip malzemelerdir. Betona önemli katkı sağlayan agregalar doğal malzemelerin yerine geri dönüştürülmüş atık malzemelerin agrega olarak kullanımı büyük avantaj sağlayacaktır. Dünya üzerindeki yıkıntı atıklarının yaklaşık olarak 1 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir [11]. Bu sebeple, yıkıntı atık geri dönüştürülmüş agregaların farklı alanlarda geri dönüşümünün sağlanması önemlidir.

Tüketimin hızla arttığı ve doğal kaynakların gün geçtikçe tükenmeye başladığı dünyada geri dönüşüm, doğal dengeyi ve çevreyi korumak, kaynaklarımızın israfını engellemek amacıyla atıklarının geri dönüştürülerek sürdürülebilirliğinin sağlanması amacı ile yapılan bu çalışmada, geri dönüştürülmüş agregaların harçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

Bu çalışmada harç karışımlarında Büyükçekmece Akçansa Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu (TS EN 197-1) [12] kullanılmıştır. Deney numunelerinde kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2’de belirtilmiştir.

Tablo 2. Çimentonun deney sonuçları

	Kimyasal Bileşim, %	CEM I 42,5 R
Kimyasal Özellikler	CaO	63,90
	SiO ₂	16,80
	Fe ₂ O ₃	3,55
	Al ₂ O ₃	4,81
	Na ₂ O	0,74
	K ₂ O	1,24
	MgO	1,94
	MnO	0,12
	SO ₃	3,02
	Cl-	0,01
	Kükürt (S)	-
	Kızdırma Kaybı	1,24
	Serbest Kireç	1,90
	Çözünmeyen Kalıntı	0,44
Fiziksel Özellikler	Özgül Yüzey, cm ² /g	3320
	Özgül Ağırlık	3,15

Harç numunelerinde standart agrega (Rilem kumu) (TS EN 196-1) [13] Tekirdağ Limak firmasından temin edilmiştir. Rilem kumunun granülometrisi Tablo 3’de gösterilmektedir.

Tablo 3. Rilem kumu granülometrisi

Elek Boyutları (mm)	0.08	0.16	0.5	1	1.6	2.00
Kümülatif Elekte Kalan	99±1	87±2	67±2	33±2	7±2	0

Karışımlarda kullanılan geri dönüşüm agregası, camlardan elde edilen parçacıklar kullanılarak elde edilmiştir. Karışımlarda kullanılan geri dönüşüm agregası Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Geri dönüşüm agregası

2.2. Harç Üretimi

Geri dönüştürülmüş agreganın harç üretimindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, yapılan harç karışımlarında geri dönüşüm agregası sırasıyla %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kum ile yer değiştirilerek üretilmiştir. Üretilen karışımlarda su : çimento : agregası oranları, TS EN 196-1'e göre standart çimento harcı elde edilmesinde kullanılan oranlar Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Harç Karışım oranları.

Numune Oranı (%)	Çimento (g)	Su (g)	Kum (g)	Geri Dönüşüm Agregası (g)
0	450	225	1350	0
5	450	225	1282.5	67.5
10	450	225	1215	135
15	450	225	1147.5	202.5
20	450	225	1080	270

Harç üretiminde karışım kabına tabloda verilen karışım oranlarına göre ilk önce su konulup ardından çimento ilave edilerek 15-20 s. karıştırılmıştır. Devamında da agregası ve geri dönüşüm agregaları ilave edilerek karıştırılmıştır. Ardından üretilen harç 40×40×160 mm prizma kalıplarına numune kodları yazılarak yerleştirilmiştir. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak sökülmüş ve deneyin yapılacağı güne kadar kür havuzuna konulmuştur. Harç üretimine ait resimler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Harçların üretim aşaması.

2.3 Metod

Hazırlanan harç numuneleri üzerinde TS EN 12504-4 [14] standardına uygun olarak ultrases geçiş hızı deneyi yapılmıştır. Deneyde üç farklı okuma yapılarak okumaların ortalaması alınmıştır. Öncelikle, ultrases deneyi uygulanacak prizma numuneler üzerinde, problemlerin tam teması için numuneler üzerine ultrason jeli sürülmüştür. Ardından numuneler üzerinde ölçüm yapılacak noktalar işaretlemiş ve karşılıklı iki yüzeyde ultrases geçiş süreleri standardına uygun bir biçimde ölçülmüştür. Ultrases geçiş hızının hesaplanması aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$V = \frac{L}{t}$$

Bu denklemde V (km/s) cinsinden ultrases hızını, t (s) cinsinden ultrasesin geçiş süresini ve L (km) cinsinden numunenin uzunluğunu göstermektedir.

Kür havuzunda 28 gün bekletilen numunelere eğilme dayanımı yapılmıştır. TS EN 12390-5 [15] standardı göre yapılan deneyde, tek eksenli yükleme yapılmış olup üç noktada eğilmede çekme deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımı, aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_{cf} = \frac{F \times L}{d_1 \times d_2^2}$$

f_{cf} = Eğilme dayanımı (MPa)

F = En büyük yük (N)

L = Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm)

d_1, d_2 = Numunenin en kesit boyutları (mm)

Eğilme deneyinden elde edilen ikiye bölünmüş harç numuneler üzerinde standardına uygun olarak basınç deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde her bir harç numunesi için ortalama değerler hesaplanmıştır. Basınç dayanımı hesabı aşağıdaki gibi yapılmıştır:

$$f_c = \frac{F}{A}$$

Burada;

f_c = Basınç Dayanımı (MPa)

F = Uygulanan Kuvvet (N)

A = Numunenin yüzey alanı (mm²)

Harçlar üzerinde su emme deneyi, üretilen numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra etüvde 105 °C'de 24 saat kurutularak kuru ağırlığı belirlenmiştir (P₀). Kurutulan bu numuneler 48 saat suyun içinde beletildikten sonra doymuş yüzey haline getirilerek ağırlıkları belirlenmiştir (P₁). Ağırlıkça su emme yüzdeleri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$W = \frac{P_1 - P_0}{P_0} \times 100$$

W = Su emme oranı, %

P₀ = Etüve kurutulmuş harç numunesinin kuru yüzey ağırlığı (g)

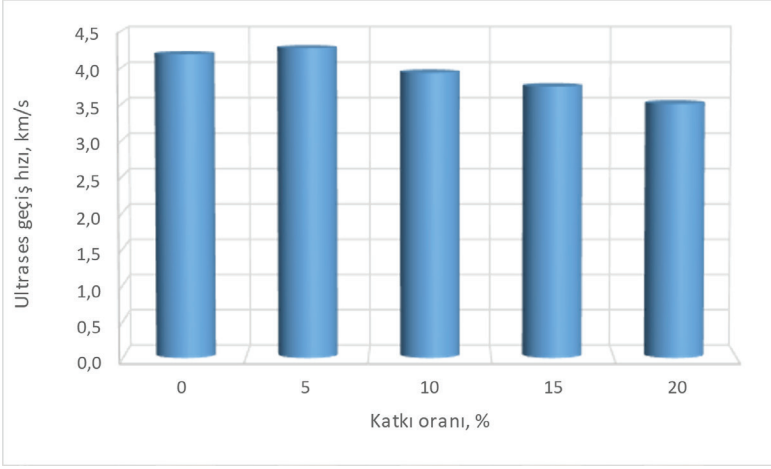
P₁ = Harç numunesinin doymuş kuru yüzey ağırlığı (g)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Su/çimento oranı sabit tutularak, agrega oranının ise %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında normal agregayla yer değiştirilerek her defasında değiştirilip geri dönüşüm cam agregası kullanarak hazırlanan harç karışımları üzerinde, yapılan çalışmaların sonuçları ve grafikleri oluşturularak değerlendirilmeler yapılmıştır. Harç numunelerinin ultrases geçiş süreleri, basınç ve eğilme dayanımı, su emme oranı araştırılmıştır.

Deneyler sonucu belirlenen ortalama ultrases geçiş süreleri Şekil 3'de

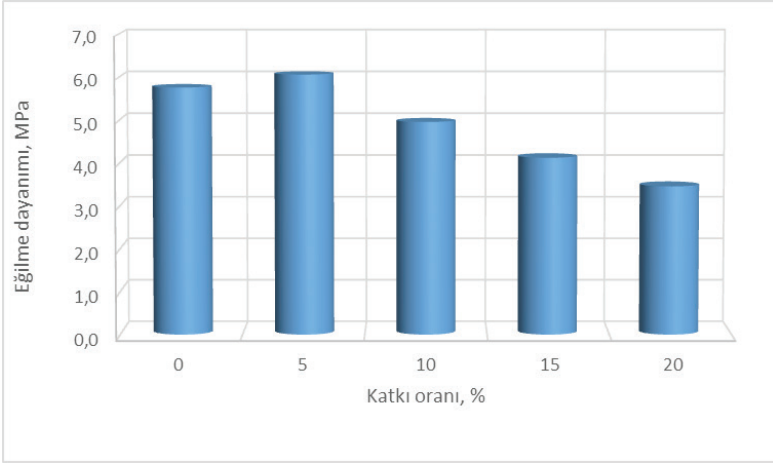
gösterilmektedir. Ultrases deneyi sonucunda ortalama en yüksek geçiş hız değerine %5 geri dönüşüm agregası katkıyla numune ulaşılmıştır.



Şekil 3. Ultrases geçiş hızı

Sonuçlar incelendiğinde %5 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerin, hiç geri dönüşüm agregası kullanılmayan numunelere göre ultrases geçiş hızında artış olduğu gözlenmiştir. Hiç geri dönüşüm agregası kullanılmayan numunelerin ortalama ultrases geçiş hızı 4,2 km/s tespit edilirken, %5 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerin ortalama ultrases geçiş hızı 4,3 km/s olarak tespit edilmiştir. Daha sonra geri dönüşüm agregası oranı artan numunelerin ortalama ultrases geçiş hızlarında düşüş olduğu gözlenmiştir. %20 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerin ortalama geçiş hızı 3,5 km/s olarak ölçülmüştür. %20 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerin ortalama ultrases geçiş hızlarında, hiç geri dönüşüm agregası kullanılmayan numunelerin ortalama ultrases geçiş hızlarına göre %16 azalma göstermiştir. Aradaki bu farkın, geri dönüşüm agregası içeriği fazla olan numunelerin daha boşluklu bir yapıya sahip olduğundan kaynaklandığını söyleyebiliriz.

Eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 4’de görülmektedir. Eğilme dayanımı deneyi sonucunda en yüksek değere 6,1 MPa ile %5 geri dönüşüm agregası katkıyla numune ulaşılmıştır.

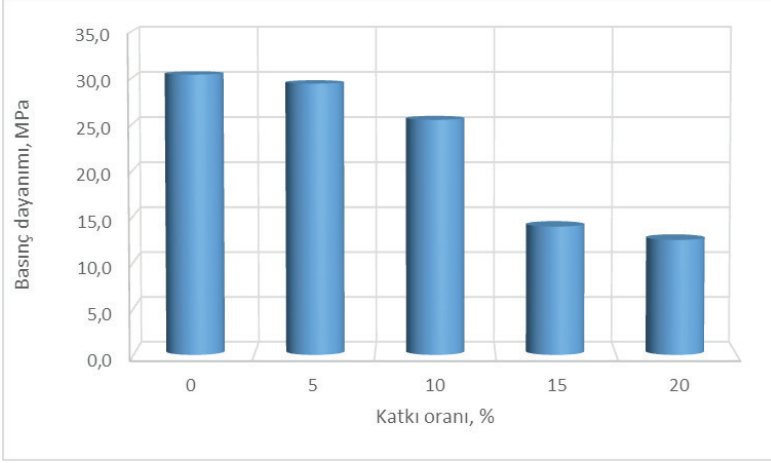


Şekil 4. Eğilme dayanımı

Sonuçlar incelendiğinde %5 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerin, geri dönüşüm agregası kullanılmayan numunelere göre ortalama eğilme dayanımında artış olduğu gözlenmiştir. Geri dönüşüm agregası kullanılmayan numunelerin ortalama eğilme dayanımı 5,8 MPa iken %5 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerin ortalama eğilme dayanımı 6,1 MPa olarak ölçülmüş ve en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaşılmıştır. Daha sonra geri dönüşüm agregası miktarı artan numunelerin eğilme çekme dayanımlarında azalma gözlenmiştir. %20 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerin ortalama değerleri 3,5 MPa olarak ölçülmüştür. %20 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerinin eğilme dayanımı %5 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelere göre %44 azalma göstermiştir. Ultrases deneyi sonucunda betonda kusur oranı en az olan %5 geri dönüşüm agregalı katkı numunenin, eğilme dayanımı sonuçlarında da bu fark görülmüştür ve en yüksek eğilme dayanımı sonucuna ulaşılmıştır.

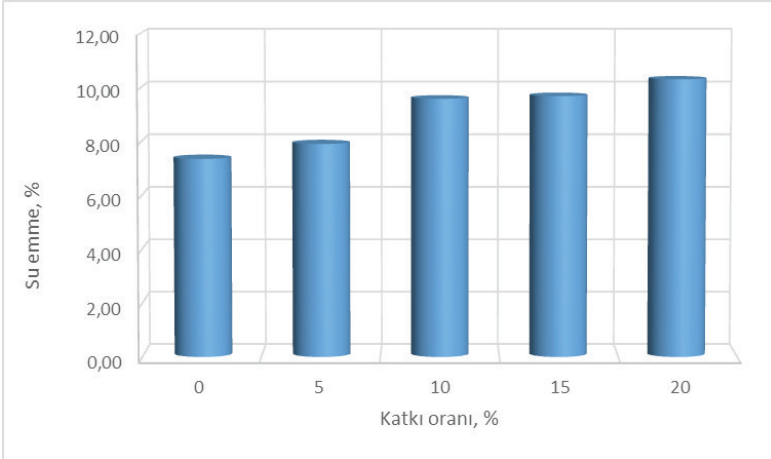
Basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 5’de verilmiştir. Basınç dayanımı deneyi sonucunda %0 katkılı numuneye yakın en yüksek değere %5 geri dönüşüm agregası katkılı numune ulaşmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde; harç numunelerinde kullanılan geri dönüşüm agregası oranı arttıkça, basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Numunelerin sonuçları incelendiğinde, %5 geri dönüşüm agregası katkılı numune 29,4 MPa değeriyle %0 katkılı numuneye yakın en yüksek değere ulaşmıştır. %15 geri dönüşüm agregası katkılı numuneden itibaren basınç dayanım değerlerinde %50’den fazla düşüş gözlenmiştir. %0 katkılı harç numunesinde basınç dayanımı 30,04 MPa iken, %20 geri dönüşüm agregası katkılı harç numunesinde basınç dayanımı yaklaşık olarak %60 oranında azalarak 12,05

MPa çıkmıştır. %5 geri dönüşüm agrega katkılı numunede ultrases deneyi sonucunda elde ettiğimiz değer, basınç dayanımı deneyi sonuçlarında da etkisini göstermiştir.



Şekil 5. Basınç dayanımı

Numunelerin su emme oranları Şekil 6'da gösterilmiştir. Su emme deneyi sonucunda %0 katkılı numuneye yakın en iyi su emme oranı değerine %5 geri dönüşüm agrega katkılı numune ulaşmıştır.



Şekil 6. Su emme oranı

Sonuçlar incelendiğinde, harç numunelerdeki geri dönüşüm agrega oranı arttıkça su emme oranının da arttığı görülmektedir. %5 geri dö-

nüşüm agrega katkılı numunenin su emme oranı %7,92 değeriyle, katkı kullanılmayan numunenin %7,37 su emme oranı değerine en yakın sonucu vermiştir. Bu sonuç ultrases, basınç ve eğilme dayanımı deneylerinden de ulaştığımız gibi diğer katkılı numunelere göre çatlak oranı az, basınç ve eğilme dayanımı yüksek olan %5 katkılı numunenin su emme oranında da gözükmiştir. Numunelerin çatlakları arttıkça, eğilme ve basınç dayanımları azaldıkça numunelerin boşluklarının büyüdüğü ve su emme oranların arttığı görülmüştür. Çıkan sonuçlara baktığımızda; katkı kullanılmayan harç numunesinde %7,37 ile en düşük, %20 geri dönüşüm agregası kullanılan harç numunesinde ise %10,31 ile en yüksek değere sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

SONUÇLAR

Tüketimin hızla arttığı ve doğal kaynakların gün geçtikçe tükenmeye başladığı dünyada geri dönüşüm, doğal dengeyi ve çevreyi korumak, kaynaklarımızın israfını engellemek amacıyla atıklarının geri dönüştürülerek sürdürülebilirliğinin sağlanması amacı ile yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş agregaların harçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Harç üretiminde geri dönüşüm agregası ise sırasıyla %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında standart agregayla yer değiştirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Ultrases deneyi sonucunda incelendiğinde %5 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerin ortalama ultrases geçiş hızı 4,3 km/s olarak tespit edilmiş ve en yüksek dalga boyu hızına ulaşılmıştır. Daha sonra geri dönüşüm agregası oranı artan numunelerin ortalama ultrases geçiş hızlarında düşüş olduğu gözlenmiştir.

- Basınç dayanımı deneyi sonucunda, %5 geri dönüşüm agrega katkılı numune 29,4 MPa değeriyle %0 katkılı numuneye yakın en yüksek değere ulaşmıştır. Daha sonra harç numunelerinde kullanılan geri dönüşüm agrega oranı arttıkça, basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir.

- Sonuçlar incelendiğinde %5 geri dönüşüm agregası kullanılan numunelerin ortalama eğilme dayanımı 6,1 MPa olarak ölçülmüş ve en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaşılmıştır. Daha sonra geri dönüşüm agregası miktarı artan numunelerin eğilme çekme dayanımlarında azalma gözlenmiştir.

- Sonuçlar incelendiğinde, harç numunelerdeki geri dönüşüm agrega oranı arttıkça su emme oranının da arttığı görülmektedir. %0 katkılı numuneye yakın en iyi su emme oranı değerine %5 geri dönüşüm agrega

katkılı numune ulaşmıştır. Bu sonuç ultrases, basınç ve eğilme dayanımı deneylerinden de ulaştığımız gibi çatlak oranı az, basınç ve eğilme dayanımı yüksek olan %5 katkılı numunenin su emme oranında da gözükmiştir.

- Yapılan deneysel çalışmaları göz önüne alındığında, %5 geri dönüşüm agregası katkı kullanılan numunelerin ultrases geçiş süreleri, basınç ve eğilme dayanımı ve su emme oranı incelendiğinde harç üretiminde kullanılabileceği görülmüştür.

- Geri dönüşüm agregası kullanılarak beton üretiminde agregası rezervlerinin azalmasını önüne geçilebilir ve çevresel kirliliği de önemli ölçüde azaltabiliriz.

KAYNAKLAR

- [1] Sofyanlı Ö. (2015). Silis Dumanı Katkılı Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Akyıldız A., Tınmaz K. E., (2017). Waste Materials in Concrete, International Scientific Conference.
- [3] Akyıldız A. (2012). Beton üretiminde bor atıklarının puzzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- [4] Gümüşsoy M. (2019). Geri Dönüştürülmüş Agregaların Harç Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- [5] Köse T. E., Akyıldız A. (2017). Kırmızı çamurun çimento bazlı solidifikasyon/stabilizasyonu:Ağır metallerin sızma özellikleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(6), 741-747.
- [6] Çakır G., Boduroğlu Ş. (2012). Sürdürülebilir Kalkınma Açısından Yapısal Atıkların Geri Dönüşümünün Önemi, 2. Proje ve Yapım Yönetimi Ulusal Kongresi-İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü- İzmir.
- [7] İpekçi C.A., Coşkun, N. ve Karadayı, T.T., (2017). İnşaat Sektöründe Geri Kazanılmış Malzeme Kullanımının Sürdürülebilirlik Açısından Önemi, Türk Bilim Araştırma Vakfı, 10, 2 43-50.
- [8] Tüfekçi M. (2011). Geri kazanılmış agregaların beton üretiminde yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [9] Kırbiyık A. (2018). İnşaat Sahalarında Ortaya Çıkan Atıkların Yönetimi ve Maliyet Analizi: Ankara(Bilkent) ve Mersin Şehir Hastaneleri Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- [10] Şahin M. (2018). Geri Dönüştürülmüş Agregaların Harç Üretiminde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [11] Demir İ. (2010). İnşaat Yıkıntı Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı ve Beton Özelliklerine Etkisi, AKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 02, 105 -114
- [12] TS EN 197-1 Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [13] TS EN 196-1 Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [14] TS EN 12504-4 Yapılarda beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [15] TS EN 12390-5 Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.



BÖLÜM 7

YÜKSEK FIRIN VE ÇELİKHANE CÜRUFU GEOPOLİMER HARÇLARDA BASINÇ DAYANIMININ TAHMİN EDİLMESİ

Şinasi BİNGÖL¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-3708-3079

1. GİRİŞ

Geopolimer harçlar, Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ve Uçucu Kül (UK) gibi endüstriyel yan ürünlerin birtakım alkalilerle aktivasyonu ile üretilen yeni nesil bağlayıcı malzemelerdir. Geopolimer harçlar ve betonlar inşaat sektöründe çimento tüketimini azaltmaktadır. Böylece hem ekonomik hem de çevresel bir fayda sağlamaktadır (Atabey 2022; Kaya et al. 2022; Mehta 2004).

Bir ton Çimento üretimi esnasında bir ton CO₂ doğaya salınmaktadır (Juenger et al. 2011; Kaya 2022). Bu miktar dünya üzerindeki CO₂ salınımının %5-7'sine denk gelmektedir (Kaya et al. 2022; Le et al. 2022). Küresel ısınmanın dünya üzerinde oluşturduğu zararlı etkiler düşünüldüğünde, çimento üretiminin de doğaya saldığı CO₂ ile bu etkiye ortak olması kaçınılmazdır.

YFC ve UK gibi endüstriyel yan ürünler çimento yerine kullanılmakta ve bu etkilerin bir nebze de olsa azaltılması amaçlanmaktadır. YFC ve UK geopolimer harç teknolojisinde en sık kullanılan malzemelerdir. Ancak bu malzemelerin hepsinin geopolimer harçlar için kullanılması zor görünmektedir. Bu amaçla yeni malzeme arayışları sürdürülmektedir. Çelikhane cürufu (ÇC) genel olarak zemin stabilizasyonunda ve harç karışımlarında agrega olarak kullanılan bir atık üründür (Açikkapi, Yildirim, and Bingöl 2022).

Bu çalışmada, YFC ile ÇC kullanılarak geopolimer harç elde edilebilirliği incelenmiştir. YFC ve ÇC farklı oranlarda kullanılarak sodyum silikat (Na₂SiO₃) ile aktive edilmiştir. YFC ve ÇC iki farklı oranda seçilerek, 4 farklı silikat oranında aktive edilmiş ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen basınç dayanımları ile lineer regresyon, sıralı minimum optimizasyon (SMO) regresyon ve çok katmanlı regresyon (MLP) modelleri oluşturularak tahminleme yapılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

2.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

Çalışmada kullanılan YFC İskenderun Demir Çelik fabrikasının atığı olan ve Adana Çimento A.Ş. tarafından öğütülen cüruftur. YFC'ye ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1' de, görsel Şekil 1'de verilmektedir.

Kimyasal İçerik	Analiz sonucu (%)
SiO ₂	38.89
CaO	28.94
Al ₂ O ₃	13.48
MgO	5.53
SO ₃	1.51
Fe ₂ O ₃	1.36
MnO	1.16
K ₂ O	0.78
TiO ₂	0.53
BaO	0.45
P ₂ O ₅	0.41
Na ₂ O	0.36
SrO	0.10
Kızdırma Kaybı	6.50
Özgül yüzölçümü	5990 cm ² /g
Yoğunluk	2.88 g/cm ³

Tablo 1. YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri



Şekil 1. Yüksek fırın cürufu

2.1.2. Çelikhane Cürufu

Çalışmada kullanılan ÇC Kardemir demir-çelik fabrikasının atığıdır. ÇC Tokat Adoçim A.Ş. çimento fabrikasında öğütülerek kullanılmıştır. Malzemeye ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2’de verilmektedir.

Kimyasal İçerik	Analiz sonucu (%)
SiO ₂	13.53
CaO	52.83
Al ₂ O ₃	3.16
MgO	5.49
SO ₃	0.99
Fe ₂ O ₃	12.74
MnO	1.73
K ₂ O	0.16
TiO ₂	0.58
BaO	-
P ₂ O ₅	0.50
Na ₂ O	0.02
SrO	0.03
V ₂ O ₅	0.77
Kızdırma Kaybı	7.24
Özgül yüzölçümü	6800 cm ² /g
Yoğunluk	3.18 g/cm ³

Tablo 2. Çelikhane cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri



Şekil 2. Çelikhane cürufu

2.1.3. Kum

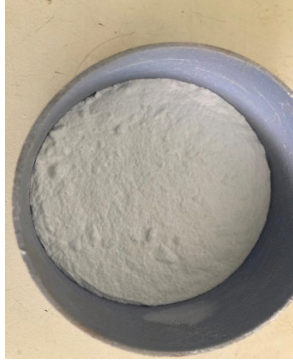
Çalışmada kullanılan kum 0-4 mm aralığında çapa sahip dere agregasıdır. Özgül ağırlığı 2.3 g/cm³'tür.

2.1.4. Su

Karışım suyu TS EN 1008'e uygun içilebilir temiz şebeke suyudur (TS EN 1008 2003).

2.1.5. Aktivatör

Çalışmada kullanılan Na_2SiO_3 Tekkim Kimya Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir.



Şekil 3. Sodyum silikat

2.2. Yöntem

Harç karışımları TS EN 196-7'ye uygun olarak üretilmiştir (TS EN 196-7 2010). Üretilen harçlar 40*40*160 mm'lik prizma kalıplara dökülerek 7 ve 28 gün süreyle 21 ± 2 °C'de kür havuzunda bekletilmiştir. Harç üretiminde YFC ve ÇÇ; %80 YFC+ %20 ÇÇ, %60 YFC+ %40 ÇÇ olmak üzere iki farklı oranda seçilmiştir. Harçların aktivasyonu için cürufların ağırlığının %7, %14, %20 ve %25'i oranında Na_2SiO_3 katılmıştır. Harç karışım oranları Tablo 3'te verilmektedir.

Cüruflar oranı	YFC	ÇÇ	Su	Aktivatör	Kum
%80+%20	360 g	90 g	225 ml	32; 63; 90; 112 g	1200 g
%60+%40	270 g	180 g	225 ml	32; 63; 90; 112 g	1200 g

Tablo 3. Harç karışım oranları

Üretilen harçlar kür sürelerini tamamladıktan sonra ağırlık, ultrases geçiş hızı (ASTM C597-16 2016), eğilme dayanımı ve basınç dayanımı (TS EN 196-1 2016) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları ile basınç dayanımı tahmini yapılabilmesi için lineer regresyon (LR), çok katmanlı regresyon (MLP) ve Sıralı minimum optimizasyon regresyonu (SMO) uygulanmıştır. Tahminleme modelleri Weka 3.8.6 ile yapılmıştır.



Şekil 3. Deneysel çalışmalar

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Üretilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre lineer regresyon (LR), çok katmanlı regresyon (MLP) ve Sıralı minimum optimizasyon (SMO) regresyonu uygulanmıştır.

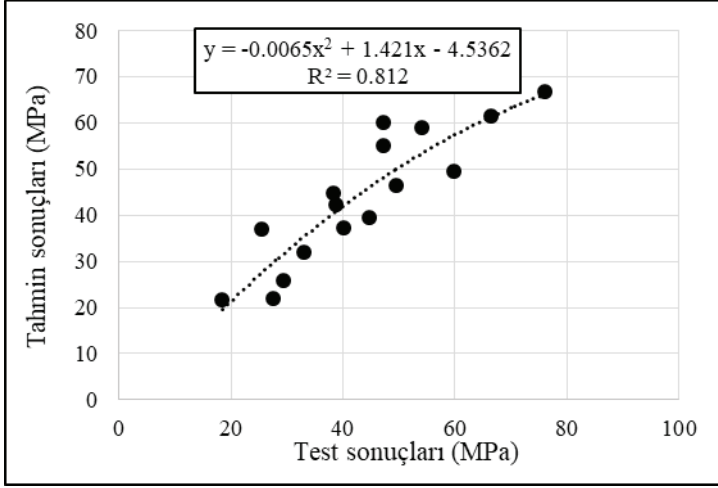
3.1. Lineer regresyon sonuçları

Weka 3.8.6 programıyla elde edilen regresyon modeli (1) numaralı formülde verilmektedir.

$$\sigma = (-30.6939)*YFC + 30.6944*\ÇC + (-1.3932)*S + (-0.104)*K + 6.5455*E + 0.0449*U + (-153.7626) \quad (1)$$

Denklemden, σ ; basınç dayanımı, YFC; kullanılan YFC oranını, ÇC ; kullanılan ÇC oranını, S; aktivatör oranını, K; numune ağırlığını (g), E; eğilme dayanımını, U; ultrases geçiş hızını (m/s) temsil etmektedir.

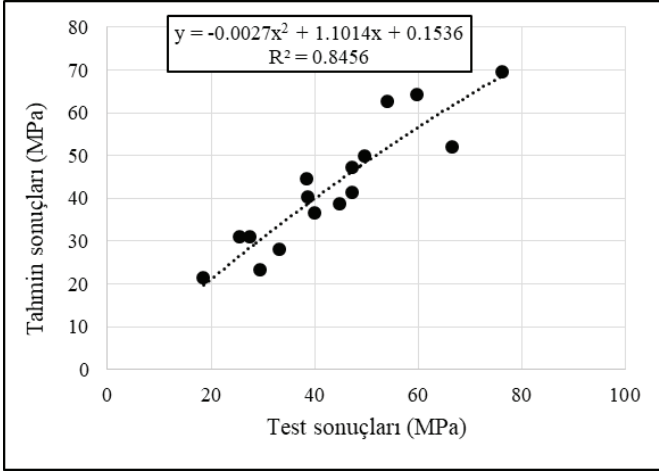
Lineer regresyon denklemiyle basınç dayanımının tahmini %89.21 doğrulukla belirlenebilmektedir. Ayrıca denkleme göre RMSE değeri (Root mean squared error) 6.8068, MAE değeri (Mean absolute error) 6.0047 olarak belirlenmiştir. Lineer regresyon sonucu elde edilen tahmin sonuçları ile test sonuçları grafiksel olarak Şekil 4'de verilmektedir.



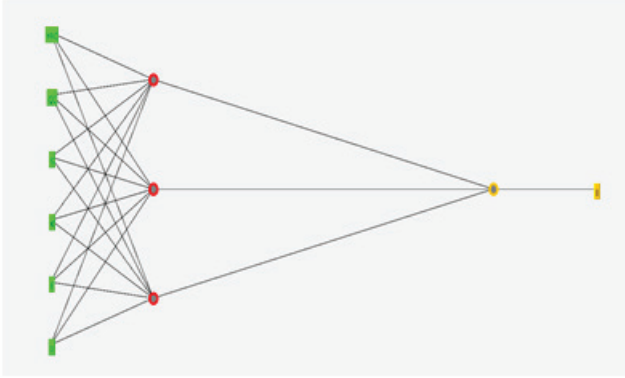
Şekil 4. Lineer regresyon (LR) sonuçları

3.2. Çok katmanlı regresyon sonuçları

Weka 3.8.6 programıyla elde edilen Çok katmanlı regresyon modeli ile basınç dayanımları %91.81 doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Test sonuçları ile tahmin sonuçları arasındaki ilişki Şekil 5'te ve ağ yapısı Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 5. Çok katmanlı regresyon (MLP) modeli sonuçları



Şekil 6. Çok katmanlı regresyon ağ yapısı

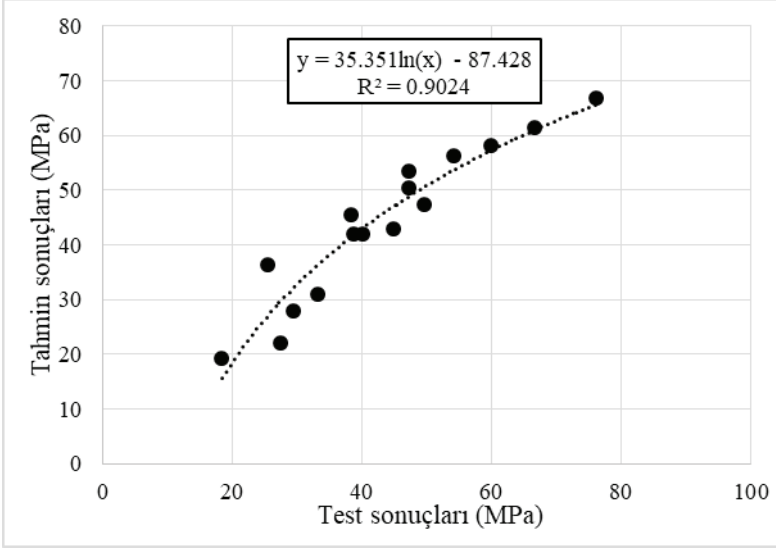
3.3. Sıralı minimum optimizasyon regresyonu sonuçları

Sıralı minimum optimizasyon (SMO) regresyon modeli Weka 3.8.6'da yapılmıştır. Regresyon modeline ait formül (2) numaralı formülle verilmektedir. Formüle göre dayanım tahmini %94.49 doğrulukla yapılabilmektedir.

$$\sigma = 0.0064 * (\text{normalized})YFC - 0.0064 * (\text{normalized})\text{ÇÇ} + 0.4245 * (\text{normalized})S + 0.2197 * (\text{normalized})K - 0.0409 * (\text{normalized})E + 0.2275 * (\text{normalized})U + 0.0082 \quad (2)$$

Denklemden, σ ; basınç dayanımı, YFC; kullanılan YFC oranını, ÇÇ; kullanılan ÇÇ oranını, S; aktivatör oranını, K; numune ağırlığını (g), E; eğilme dayanımını, U; ultrases geçiş hızını (m/s) temsil etmektedir.

Denklemdenki veriler, normalize edilerek kullanılmaktadır. Test sonuçları ile tahmin sonuçları arasındaki ilişki Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7. Sıralı minimum optimizasyon (SMO) regresyonu sonuçları

4. SONUÇ

Bu çalışmada, YFC ve ÇÇ ile geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretilen harçların 7 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, 3 farklı regresyon modeli uygulanarak harçların basınç dayanımlarının tahmini yapılmıştır. Uygulanan modellerin sonuçlarına bakıldığında; Linear Regresyon ile %89.21, Çok Katmanlı regresyon (MLP) ile %91.81 ve Sıralı Minimum Optimizasyon ile %94.49 doğruluk oranında tahmin yapılmıştır.

Yapılan regresyon modelleri basınç dayanımının tahmini için yüksek doğruluk oranlarında sonuçlar vermektedir. Harçların; ağırlık, ultrases geçiş hızı, sodyum oranı ve eğilme dayanımı değerleri ile basınç dayanımları tahmin edilebilmektedir.

Literatürde, Çelikhane Cürufunun geopolimer harç üretiminden ziyade agrega olarak ve zemin stabilizasyonu için kullanıldığı belirtilmektedir (7). Ayrıca Yüksek fırın cürufu ile geopolimer harçlar üretilmekte, ancak ÇÇ ile kullanımı yeni bir konudur. Bu anlamda çalışmanın hem ekonomik hem de çevresel etkiler yönünden fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması olmadığı beyan edilmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- Açikkapi, Yusuf Hakan, Salih Taner Yildirim, and Şinasi Bingöl. 2022. "Alkallerle Aktive Edilen Çelikhane Cürüflu Harçların Mekanik Özellikleri." 2nd International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies (March):644–54.
- ASTM C597-16. 2016. "ASTM C597-16. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete."
- Atabey, İsmail İsa. 2022. "Influence of Ca and Al Source on Elevated Temperature Behavior of Waste Ceramic Sanitaryware-Based Alkali-Activated Mortars." *Journal of the Australian Ceramic Society* 58(3):949–62.
- Juenger, M. C. G., F. Winnefeld, J. L. Provis, and J. H. Ideker. 2011. "Advances in Alternative Cementitious Binders." *Cement and Concrete Research* 41(12):1232–43.
- Kaya, Mehmet. 2022. "The Effect of Micro-SiO₂ and Micro-Al₂O₃ Additive on the Strength Properties of Ceramic Powder-Based Geopolymer Pastes." *Journal of Material Cycles and Waste Management* 24(1):333–50.
- Kaya, Mehmet, Fuat Koksall, Osman Gencil, Muhammad Junaid Munir, and Syed Minhaj Saleem Kazmi. 2022. "Influence of Micro Fe₂O₃ and MgO on the Physical and Mechanical Properties of the Zeolite and Kaolin Based Geopolymer Mortar." *Journal of Building Engineering* 52(April):104443.
- Le, Hoai Bao, Quoc Bao Bui, Dang Mao Nguyen, and Shanshan Cheng. 2022. "Assessing the Mechanical Properties of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete: Flexural Strength, Bond Strength and Thermo-Mechanical Behaviour." *Journal of the Australian Ceramic Society*.
- Mehta, P. K. 2004. "High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development." *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology* 3–14.
- TS EN 1008. 2003. *Mixing Water for Concrete - Specifications for Sampling, Testing and Assessing the Suitability of Water, Including Water Recovered from Processes in the Concrete Industry, as Mixing Water for Concrete*. Turkish Standardization Institute.
- TS EN 196-1. 2016. *Methods of Testing Cement - Part 1: Determination of Strength*. Ankara: Turkish Standardization Institute.
- TS EN 196-7. 2010. *Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 7: Çimentodan Numune Alma ve Numune Hazırlama Yöntemleri*. Ankara: TSE.



BÖLÜM 8

TİTREŞİM ANALİZİNİN RULMANLARDA KULLANILMASININ GENEL OLARAK İNCELENMESİ

Demirali SEVENER¹, Can COŞKUN², Zuhul OKTAY³

1 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, demirali.sevener@gmail.com, 2217104006@std.idu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5242-0646>

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

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

1. GENEL BİLGİLER

Günümüzde titreşim analizi endüstride yaygın olarak kullanılan bir hasar tespit yöntemidir. Bu yöntem ile birlikte önceden oluşmuş olan hasarları bulup bu hasarların nerelerde olduğunu tespit ederek bakım ve onarım yapılması için bize bilgi vermektedir. Bununla beraber bu yöntem bize ekonomik açıdan düşük maliyetli bir bakım onarım sunmaktadır. Eğer titreşim analizleri yapılmaz ya da göz ardı edilirse ilerleyen zamanlarda büyüyen hasarlar işletmecilere yüksek maliyetli bakım onarım ücretleri çıkarmaktadırlar. Rulmanlar en çok kullanılan makine elemanlarından biridir ve bunların hata tespitleri endüstrilerde çok önemlidir. Bu yapılan araştırmada rulmanlar üzerinde yapılmış titreşim analizleri incelenmiştir ve buna yönelik bazı çıkarımlar yapılmıştır.

Belli bir süre zarfından sonra kendini tekrar eden herhangi bir hareket, titreşim ya da salınım olarak isimlendirilir. Örnek olarak bir sarkaçın yapmış olduğu salınımı verebiliriz. Bütün karmaşık olan modelleri kütle-yay-damper elemanları ile modelleyebiliriz. Titreşen bir cismin denge noktasından olan maksimum uzaklığına genlik denir. Sistemin hareketininin yapmış olduğu bir tam tura periyot denir. Birim saniyedeki bir tam tur için geçen süreye frekans denir. Bir sistemde dış kuvvetler olmaksızın sistemin kendi kendine yapmış olduğu titreşim frekansına o sistemin doğal frekansı denir.

Makine elemanları içinde var olan rulman bir yataklama elemanıdır. Rulman kullanılacak olan sistemlerde sürtünmeyi en aza indirmek için kullanılan bir makine elemanıdır.

FFT (Fast Fourier Transform), Hızlı Fourier Dönüşümü diye telaffuz edilir. Fft titreşim analizlerinde hata bulma konusunda yaygın olarak kullanılan bu yöntemde sık sık ya da belli aralıklarda sistemin üstüne yerleştirilen sensörler yardımıyla bulunan titreşim verilerinin cevapları analiz edilip sistemde bir kusurun var olup olmadığını bize söyler.

Bir titreşim analizi yapabilmek için bir kütle-yay-damper sistemi kullanılarak yapılabilir. Buradaki amaç sistemde var olan kusur veya hasarları tespit edebilmektir, bu sisteme yardımcı olması için ivme ölçer sensörleri kullanılır ve çıkan sonuçlara göre fft grafikleri incelenir. Fft grafikleri sonucu hatanın veya kusurun nereden kaynaklandığı bulunur ve erken teşhis yapılarak sistemin bakımı yapılır.

Titreşim analizi genel olarak endüstride dönen makine elemanlarının olduğu sistemlerde kullanılır. Örnek olarak ; dişli kutuları ve elektrik motorlarını verebiliriz. Bu sistemler ağırlıklı olarak sürtünmeyi en aza indirmek için rulman elemanını içerirler.

Rulmanlarda titreşim analizinin kullanılmasının ana sebeplerinden

biri rulman elemanlarının sistemlerin kritik yerlerinde bulduklarından dolayı önemli bir rol oynamaktadırlar ve bu nedenle rulmanlar için düzenli periyotlarda titreşim analizleri yapılmalıdır. Bu titreşim analizi ölçümleri düzenli bir şekilde yapılmadığı zaman rulman üzerinde daha önceden oluşmuş en ufak hasarlar zamanla büyürler ve maliyeti yüksek hasarlar oluştururlar bunun yanı sıra enerji üretim sistemleri, savunma sanayi gibi önemli tesislerde üretimin aksamasına sebep olurlar bu nedenle de sistemlerde geri dönüşü olmayan hasarlar ve gecikmeler oluşturabilirler. Bu sonuçlar doğrultusunda yapılan çıkarım makine elemanı olan rulmanların titreşim analizinin önemi oldukça fazladır. Rulmanlar için oluşan temel hasarları da sıralayacak olursak ; dış bilezik hasarı, iç bilezik hasarı, kafes ve bilye hasarı olarak söyleyebiliriz.

Titreşim ölçüm cihazlarını incelemek istersek iki tür titreşim ölçer çeşidi karşımıza çıkmaktadır. Bunları sıralayacak olursak ; titreşim ölçüm cihazı ve kayıt özellikli titreşim ölçüm cihazı olarak ikiye ayırabiliriz. Titreşim ölçüm cihazında genel olarak bir titreşim ölçüldükten sonra titreşim cihazının üzerindeki ekranda bize ölçüm değerlerini vermektedir. Kayıt özellikli titreşim ölçüm cihazında ise aynı şekilde bize cihaz ekranından titreşim ölçüm değerlerini verir buradaki fark ise bu değerler kayıt altında tutulur ve daha sonra kullanabilmemiz için değerleri çeşitli belleklere yedekleyebilmemizi sağlamaktadır.

Titreşim analizine ekonomik açıdan bakacak olursak bu ölçüm yöntemi kullanılan sistemler üzerinde ciddi onarım maliyetlerinin önüne geçmektedir. Oluşan hasarlar başlangıçta alçak seviyelerde titreşim değerleri verirler. Sistemlerin bakımları geciktirilir veya yaptırılmaz ise bu hasar zamanla büyür ve yüksek titreşim değerleri oluşturmaya başlarlar. Bu doğrultuda daha önceden takip edilmeyen veya göz ardı edilen hasarlar büyüdükten sonra sistem üzerinde yıkıcı etkilere sebep olurlar ve sisteme zarar verirler. İşletmeciler, zamanında yapılması gereken bakımlardan veya bakım maliyetlerinden kaçmaları durumunda maliyeti yüksek bakım onarım ücretlerini ödemek zorunda kalırlar. Bakımlar düzenli yapılmaz ise zamanında oluşmuş ve büyümüş hasarlar sistemlerin aksamasına sebep olurlar.

Titreşim analizinin endüstri sektörlerinde kullanıldığı yerlere bakacak olursak genellikle; savunma sanayi üretimlerinde (örneğin; zırlı araçlarda), uçaklarda, şaftlarda, rulmanlarda, motorlarda, millerde, pompalarda, dişlilerde ve daha birçok dönen makine elemanlarının olduğu sistemlerde kullanılmaktadır. Sistemlerde daha önceden oluşan kusurların göz ardı edilmesi ya da kontrol edilmemesi durumunda sonradan oluşacak olan büyük hasarların geri dönüşü olmadığı için yüklü maliyetler ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle titreşim analizi oluşabilecek hasarların önceden tespit edilip bakım ve onarım yapılması konusunda oldukça önemli bir yer almaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Arslan ve arkadaşları (Arslan, H. ve arkadaşları, 2006) yapmış oldukları çalışmada bilyalı rulman hasarlarının titreşim analizi yöntemiyle incelenmesi konusunu ele almışlardır. Bu konu kapsamında radyal bilyalı rulmanlarda yerel yüzey kusurlarını deneysel olarak araştırmak için titreşim yöntemi kullanmışlardır. Bu sebeple bilyalı rulman parçalarının (iç ve dış bilezikler) hareket yüzeylerinde yapay olarak alan hataları oluşturup radyal mil titreşimini kaydetmişlerdir. Düzenegin teorik bir modeli yapıp bu modele hitaben arızalı rulmanın analizini yapabilen bir simülasyon programı oluşturmuşlardır. Test düzeneginde var olan mil ve rulman ölçüleri yazılıp analiz programı çalıştırılmış ve çeşitli mil hızlarında mil titreşim spektrumları verilerini bulmuşlardır. Analiz sonucu bulunan teorik ile deneysel cevaplar karşılaştırılıp göreceli bir uyumluluk saptanmıştır. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Dış ve iç bileziklerinde hata olan rulmanlarda çeşitli mil dönme hızlarında çizdirilmiş spektrumlarda her iki durumda da frekans pikleri, onun harmonikleri ve yan bantlarında görülmüştür. Dış bilezik ve iç bilezik hata frekansları milin dönme hızına bağlı değişkenlik göstermekte ve hata frekansı ya da harmoniklerinden biri mekanizmanın doğal frekansına fazla yakın olduğundan ya da çakıştığı hususlarda rezonans olduğundan dolayı, doğal frekans ve çevresinde genliği fazla titreşimler görülmektedir. Bu husus çoğunlukla alçak çalışma hızlarında görülür, rezonansın kurtulabilmek için mekanizmanın çalışma hızı tedbirli seçmek gerekir.

Arslan (Arslan, H., 2003) yapmış olduğu tez çalışmasında şaft rulman sistemindeki bilyalı rulman hasarlarının titreşim analizi metodu ile tespiti konusunu ele almıştır. Bu konu kapsamında sağlıklı ve hasar görmüş olan açısız temaslı bilyalı rulmanların oluşturmuş olduğu titreşimi araştırabilmek için şaft-rulman düzenegini tasarlamıştır. Düzenekte şaft-rulman sistemini kütle-yay sistemi olacak şekilde modellemiş ayrıyeten bilyaların oluşturduğu titreşimi araştırmak üzere bilyaların da kütlelerinin var olduğunu saymıştır. Düzenek cevabının uygunluğunun sağlanması için deneysel çalışma yapmıştır. Düzenegin dinamik koşullarda lineer olmayan bir tavır sergilediği bilinir. Şaft ile bilyalar için gerekli olan hareket eşitlikleri çıkartılmış ve bunları bilgisayarda bir program ile radyal ve eksenel yönde olacak şekilde hesaplamıştır. Analiz programında şaft ve bilyalar için hesaplanan cevaplar zaman ve frekans tanım bölgelerinde gözlemlenmiş bunun doğrultusunda bilya kütlelerinin var olduğunu saymanın şaftın titreşimi üzerinde çok bir etki göstermediği sonucuna rastlanmıştır. Bu şekilde şaft-rulman sistemi titreşiminin, rulman dizayn ve faaliyet koşulları değiştiğinde değişmiş olduğu sonucuna varılmıştır. Analiz programı ile rulman parçalarının faaliyet alanındaki (iç ve dış bilezik, bilya) yerel

arızaların şaft ile bilya elemanlarına yapmış olduğu titreşimin tesiri incelenmiştir. Deneysel çalışma yapmak için sabit bilyalı rulman parçalarının çalışma yerlerinde yerel hatalar oluşturup radyal ve eksenel yönde olacak şekilde şaft titreşimi işlenmiştir. Yapmış olduğu çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Dış bilezik alanında hata olan rulmanlarda bulunan titreşim genliği, iç bilezik ve yuvarlanma elemanı hatası için bulunmuş genlikler ile kıyaslandığında bir hayli fazla bulmuşlardır. Buldukları frekans pikleri tahmin etiketleri gibi dış bilezik bilya geçiş frekansı, onun harmonikleri ve yan bantlarında görmüşlerdir. Dış bilezik hata frekansı ve harmoniklerinden biri mekanizmanın doğal frekansı ile çakıştığı zaman rezonans oluşmuş ve bu sebeple yüksek titreşimler gözlemlenmiştir.

Orhan ve arkadaşları (Orhan, S. ve ark., 2003) yapmış oldukları çalışmada titreşim analiziyle rulman arızalarının belirlenmesi konusunu ele almışlardır. Bu konu kapsamında var olan titreşim analiz yöntemiyle rulman kusurlarının saptanması için çalışılmıştır. Rulman titreşimi, ölçme ve analizi özetlenmiş, silindirik cins yuvarlanma parçasıyla donatılmış olan bir rulman üzerinde olan dış bilezik kusurunu titreşim analizi ile tespit edilmesi anlatılmıştır. Kaynaklarda da belli olduğu gibi rulman dış bileziğinde oluşmuş tek nokta kusurunun sebep olduğu titreşimin dalga biçimi diyagramında frekansı dış bilezik bilye geçiş frekansına eş olan darbe sinyalleri oluşmuş, spektrum diyagramında rulman kusur frekansının üstlerinde frekans oluşmuştur. Bulunan neticelerden, titreşim analizi rulman kusurlarını saptamada etkin olarak kullanılabilir olduğu kanaatine varılmıştır. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Motor iç yatak rulmanından sürekli titreşim hesaplamalarını kayıt edip bununla beraber titreşim hareketi incelemesi yapmışlardır. Motor iç yatak rulmanı dış bilezikte oluşmuş tek nokta kusuru rastgele bir iş durmasına ve rulmanı çıkarmaya lüzum olmadan, titreşim analizi yöntemi uygulayarak bulmuşlardır. Çalışılan sistemde ise bütünüyle gerçek bir mekanizma kullanılmış ve bu durumlar altında kusurlu bir rulmanın titreşim tavrını araştırmışlardır.

Kirankumar ve arkadaşları (Kirankumar, M. V. ve ark., 2018) yapmış oldukları çalışmada titreşim analizi tekniklerini kullanarak rulmanların durum izlemesinin incelenmesi konusunu ele almışlardır. Rulmanlar, dönen makinelerde ve çeşitli endüstrilerde anahtar bileşenlerden biridir ve şaft mil montajı gibi yerlerde kullanılır, sürtünmeyi azaltma ve iki bileşen arasındaki bağıl hareketi teşvik etme gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple, rulmanların hata hallerinin erken teşhisi çok önemlidir. Rulman hatalarını teşhis edebilmek için titreşim gözlemleme, aşınma kalıntısı gözlemleme, sıcaklık gözlemleme, sabunlama teknolojisi, tahribatsız muayene vb. gibi farklı uygulamalar bulunur. Titreşim analizi,

makine bakımında kestirimci bir bakım tekniği olarak kullanılır. Uygun sinyal işleme yöntemleri kullanılarak, hataların sebep olduğu titreşim sinyallerindeki farklılıklar, rulman sağlığını korumak için teşhis edilebilmektedir. Makine hatası, makine titreşimini teşhis edip analiz ederek bulunabilir ve tahmin edilebilir. Titreşim sinyallerini çeşitli yöntemlerle analiz ederek, rulman anormallikleri erken bir aşamada tespit edilebilir. Titreşim analizi yöntemlerine dayanan bu makale, rulman arızasını teşhis etmek için uygulanan farklı teknikler arasındaki korelasyonları sunar. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Eskiden fft analizi, hata tespiti için çok uygulanan yöntemdir ve hataları tahmin eder. Fakat, kusurun ölçüsünü bulabilmek için kullanılmamaktadır. Yapay sinir ağları (ANN) kullanılıp otomatik kusur tespiti yapılır. Evrişim Sinir Ağı kullanılıp onarım ücretleri düşürülebilir. Ampirik Mod Ayrışımı (EMD) uygulaması ve Hilbert dönüşümü zarf sinyaline uygulanmaktadır. Bu uygulama, eski zarf uygulamasından daha çok üstündedir. Morlet ve Laplace dalgacıklarına dayalı zarf güç spektrumları, fft güç spektrumlarından daha güzel neticeler almaktadır. Arka plan gürültüsünden yatak kusuru sinyalini en güzel olacak şekilde gösterebilmek için, analizden evvel sinyale önden bir beyazlatma uygulamak yararlı olacaktır.

Estupiñan ve Saavedra (Estupiñan, E., Saavedra, P., 2002) yapmış oldukları çalışmada rulmanların titreşim analizi için teşhis teknikleri konusunu ele almışlardır. Bir rulmandan yayılan titreşim sinyalleri, rulman geometrisi, yuvarlanma elemanlarının sayısı, dönme hızı, kusurların konumu ve uygulanan yükün türü ile ilgili spektral bileşenleri içerebilir. Muylu yatak tipinden farkı gösterir. Modern endüstride, kritik makinelerdeki rulman hatalarını arızanın erken bir aşamasında tespit etmek çok önemlidir. Bu çalışmada, bazı ticari titreşim analiz aletlerinde şu anda mevcut olan en son titreşim analizi teknolojilerinden bazıları kullanılmıştır. Deneysel bir araştırmada, iyi şekillendirilmiş bilyalı rulmanlar ve dış bilyalı rulmandaki yerel arızalar, farklı arıza şiddeti ve farklı yük ve hız koşulları altında test edilmiştir. Düzenli spektrum analizi, demodülasyon, PeakVue ve gerçek yakınlaştırma analizi, analiz için kullanılan tekniklerdir. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Şiddetli frekans analizi odağa alan demodülasyon ve/veya PeakVue analiz yöntemleriyle bütünleşik titreşim analizi uygulayıp, rulmanlarda hataların tespitini önceden bulabilmek muhtemeldir. Demodülasyon ve PeakVue yöntemleri, alçak hızlı dönen yatakların analizi için önceden arıza teşhisinde standart spektral analizden daha yararlıdır.

Khadersab ve Shivakumar (Khadersab, A., Shivakumar, S., 2018) yapmış oldukları çalışmada döner makinalarda titreşim analiz teknikleri ve rulman arızalarına etkisi konusunu ele almışlardır. Sanayi devrimi ile günlük yaşam, üretim ve işleme, nükleer santraller, otomobiller ve petrol

ve gaz rafinerisi gibi endüstriyel döner makinelerin uygulama kapsamı önemli ölçüde genişlemiştir. Bütün bu dönen makinelerde, rulman arızasından kaynaklanan arıza, makine yorgunluğunda önemli bir rol oynar ve katastrofik arıza, çözülmesi gereken büyük bir problemdir. Farklı bakım teknolojileri arasında, dönen makinelerin sağlamlığını doğru bir şekilde değerlendirmek için titreşim hali gözlemeleme teknolojisi kullanımı yaygındır. Bütün bu hatalar için titreşim spektrum analizi ve çeşitli titreşim analiz teknikleri araştırılabilir. Bu çalışmada, zaman, frekans ve zaman-frekans alanlarında çeşitli titreşim analiz yöntemleri kullanıp dönen makinelerdeki rulman arızalarını deneysel olarak araştırmışlardır. Sağlıklı rulmanlara kıyasla kusurlu iç ve dış bileziklere sahip bilyalı rulmanlı dönen bir makineden alınan giriş sinyali, gelecekteki spektrogramını elde etmek için Hızlı Fourier Dönüşümü FFT ve Ters Hızlı Fourier Dönüşümü IFFT'ye göre analiz edilir. Bu deneysel çalışma daha sonra rulman arızasına kıyasla dönen makine arızasının doğru bir yorumlanmasına yol açmıştır. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Dönen mekanizmalarda indüklenen kompleks yüklenme cinsi ve değişken şartlar için, ters hızlı fourier dönüşümü ve spektrogram yöntemleri, daha çok netlik kazandırır. Titreşim spektrumu mekanizma hatasını engellemek için rms değeri, basıklık ve eğrilik gibi ilgili değişkenlerle rulman kusurlarının ana sebebini daha etkili tahmin etmektedir. Bu şekilde ters hızlı fourier dönüşümü ve spektrogram yöntemleri hızlı fourier dönüşümlerinden daha yararlı olmaktadır.

Ovacikli (Ovacikli, A. K., 2011) yapmış olduğu çalışmada titreşim analizi kullanarak bilyalı rulmanların durum izleme konusunu ele almıştır. Günümüz endüstrisinde, hata, engelleyici veya kestirimci olsun, bakım, üretim zamanındaki en mühim maliyetlerdendir. Bilyalı rulmanlar makinelerdeki en hayati elemanlardandır ve bu elemanların üretimin kesintiye uğraması ile değiştirmek için yapılan bakım ücretleri en fazla olanlardır. Potansiyel hataları teşhis ederek ve var olan hali gözlemleyerek bu rulmanlar için kestirimci bakım oluşturmak, endüstrinin bu mekanik aletlerin maksimum kullanım süresini kullanmasını ve bakım ücretlerini ciddi ölçüde düşmesine neden olacaktır. Rubico AB'de devam eden titreşim analizi kullanılarak hal gözlemeleme projesi kapsamında, bu tez araştırması yeni bir algoritmayı basamak basamak anlamayı ve ilk başta çevrimdışı işleme olarak, daha sonradan da sabit noktalı bir dijital sinyal işlemcisinde uygulamayı amaçlar. Endüstriden ölçülen kayıtlar analiz edilir. Algoritmanın verimini en üst seviyeye getirmek için çeşitli yaklaşımlar test edilir, kıyaslanır; ve hem çevrimdışı kayan nokta kesinliği hem de sabit nokta uygulamalarından bulunan cevaplar yorumlanır. Yöntemin endüstriden farklı veri kümeleri üstünde çalıştırmayla, patentli algoritmanın, ölçüm nesnesi ve çevre üzerine evvelden bilgi sahibi olmadan bilyalı rulmanların

iç veya dış yatağındaki hataları teşhis edebilmeyi başardığını göstermiştir. Sabit noktalı bir dijital sinyal işlemcisinde kullanımı da ispatlanmıştır. Yapmış olduğu çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Yeni bir zaman alanı yaklaşımı olan ve anlatılan algoritma, endüstriden alınan çeşitli kayıtlarla güzel performans göstermiştir. Çeşitli endüstri branşları bile şu zamanlarda fark ettiler. Uyumlu bir ivme ölçer, az bütçeli dijital sinyal işlemcisi DSP gibi teçizatların tercihi ve çeşitli durumlar için güçlü bir final mamül yapılması için mühendisler çalışmaya başlamışlardır. Algoritma konusunda, ilerideki çıkarım ve karar verme kısmında hala incelemelere gerek olduğu gözükmektedir.

Geropp ve arkadaşları (Geropp, B. ve ark., 1997) yapmış oldukları çalışmada titreşim analizi ve bulanık mantık kullanılarak sürtünmesiz rulmanların otomatik teşhisi konusunu ele almışlardır. Titreşim analizi, makine teşhisi için güçlü bir hal gözlemlene aracı sağlar. Bunun bir parçası olan zarf analizinin, sürtünmesiz rulmanların tespiti için çok güçlü bir yöntemdir. Çeşitli rulman kusurları, çeşitli zarf spektral modellerine sahiptir. Çoğu durumda, tek başına karakteristik yatak frekansı amplitüdünü görmek güvenilir bir tespit için yeterli olmamaktadır. Uzman insanlar bu sebeple spektral modelleri tipik rulman kusuru modelleriyle kıyaslar. Bu yazıda, uzman insanların bu davranışını taklit eden bulanık bir sistem sunmuşlardır. Tespit için lazım olan bilgiler bulanık kurallarda saklanır. Tipik rulman hatalarına ek olarak, sistem diğer mekanik arıza türlerini de otomatik olarak tespit edebilir. Bulanık sistemler için giriş değişkenleri, kapsamlı veri ön işleme yoluyla çıkarılır. Bu bulanık sistem, madencilik ve çelik endüstrilerinde çeşitli uygulamalarda kullanılır. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Verilen mekanizmanın sinir ağına dayalı mekanizmadan oldukça fazla güvenilir olduğu ispatlanmaktadır. Çeşitli endüstrilerdeki mekanizmalarda farklı rulman hasarları bulanık mantık sistemi ile başarılı olarak teşhis edilebilmektedir. Örnek olarak ; şeker pancarı tesisi şanzımanları, çekiş motoru şanzımanları, haddehaneler, açık ocak maden kepçeli ekskavatörler, kömür endüstrisi taşıma vagonu tekerlek takımları verilebilir.

Çimen (Çimen, M., 2015) yapmış olduğu çalışmada bilyeli rulman hasarlarının titreşim analizi ile tespiti ve gemi makinelerinde kestirimci bakım uygulaması konusunu ele almıştır. Rulmanlar, gemilerin dönen makinelerinde önemli mekanik elemanlar olarak kullanılmaktadır. Arızalı rulmanlar, rulmanların bağlı olduğu makinelerin çalışmasını etkileyerek hem limanda hem de seferlerde operasyonda kesintilere veya durmalara kadar varan sorunlara neden olabilir. Gemi makine ve teçizatındaki sorunları önlemek için çeşitli bakım yöntemleri denenmiş, düzenli yağ değişimleri ve parça değişimleri bazı sonuçlar doğurmuştur, ancak beklenmeyen arızalar önlenememektedir. Kestirimci bakım/titreşim izleme

yöntemi, bir makine arızalanmadan önce müdahale edilmesi gerektiğini anlayarak plansız veya ani duruşları önleyen bir bakım yöntemidir. Beklenmedik ani makine duruşları, öngörülü bakım titreşim izleme yöntemi kullanılarak, dönen makinelerin yataklarındaki anormalliklerin çalışma sırasında tespit edilmesi ve anormallikler ilerlemeden ve tehlikeli bir düzeye gelmeden değiştirilmesiyle önlenabilir. Titreşim analizi yoluyla bir rulmanın iç ve dış halkaları üzerindeki en yüksek arıza oranına sahip dört yorulma ile ilgili kusurun etkilerini araştırmak için bir laboratuvar kurulumu tasarlanmıştır. Yapmış olduğu çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Yapılan hesaplamalarda 2250 rpm hız genlik değeri 1750 rpm hız genlik değerinden fazladır. Bu dengesiz bir mekanizmanın çalışma hızı yükseldikçe oluşturduğu titreşimlerin sıklığının da çoğaldığı gözlenmiştir. Rulmanlar yeni olsa bile yüzeylerinde çok az miktarda pürüzlülük olmaktadır. Bu sebeple ağır hizmet cinsi rulmanların frekans spektrumunda alçak genlikli hasar frekanslarıyla karşılaşılır. Hasarlı iç bilezikli rulmanların hasar frekans genlikleri, hasarlı dış bilezikli rulmanlara kıyasla daha alçak olduğu görülmüştür. Yorulma hasarının (çatlak, ezik vb.) frekans spektrumundaki hasar frekanslarının, devre kartlarının getirdiği düşük frekans farkları dışında dijital ortamla uyumlu olduğu görülmüştür. Ayriyetten bu fayların derinlikleri çoğaldıkça kusur frekanslarının genlik değerlerinin de çoğaldığı teşhis etmiştir.

Arslan (Arslan, H., 2007) yapmış olduğu çalışmada bilyalı rulman yuvarlanma elemanı kusurunun titreşim analizi yöntemiyle incelenmesi konusunu ele almıştır. Titreşim analizi metodu uygulanarak radyal bilyalı rulman yuvarlanma elemanındaki yerel alan hasarının tesiri analitik ve deneysel olacak şekilde araştırılmıştır. Bu sebeple bilyalı rulman yuvarlanma elemanı çalışma alanında bilerek bir yerel hasar yapılmış ve radyal yöndeki mil titreşimleri kayıt edilmiştir. Analitik araştırma için, teorik bir model yapılmış ve bu modele göre sağlıklı ve hasarlı haldeki rulmanları analiz eden bir analiz programı yapılmıştır. Bu analiz programı, deney düzeneğinde kullanılan mil ve rulman ölçülerini yazarak çalıştırıp çeşitli mil hızları için milin titreşim spektrumları bulunmuştur. Analitik ve deneysel yöntemle bulunan titreşim spektrumları kıyaslandığında her iki hususta da benzeyen cevaplar bulunmuştur. Yapmış olduğu çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Deneysel metodla bulunan spektrumda, mil-rulman düzeneğinde var olan eksen kaçıklığı, gevşeklik ve rulman elemanlarındaki yüzey pürüzlülüğünden dolayı neden olan bazı rulman kusur frekansları da oluşur. Deney düzeneğinde elde edilen bulguların yuvarlanma elemanındaki yerel bir alan hasarının teşhisinde ne kadar etkili olabildiğini söyleyebilmek için analiz programından elde edilen bulgular kıyaslanmış ve göreceli olarak bir uyum içinde oldukları anlaşılmıştır.

Yıldırım ve Karahan (Yıldırım, E., Karahan, M. F., 2015) yapmış oldukları çalışmada titreşim analizi ile rulmanlarda kestirimci bakım konusunu ele almışlardır. Rulmanlar makineleri yataklamak üzere kullanılan bir makine elemanıdır. Rulmanlarda oluşan titreşimleri takip ederek makinelerde olan ya da olması mümkün kusurlar teşhis edilebilir. Bu makalede kompresör yataklanmasında kullanılan rulmanlarda uygulanan titreşim analizi ile kestirimci bakım çalışmasının elde edilen bulguları ortaya koymuşlardır. Yapılmış olan bu çalışmada rulmanda hem dış bilezik kusuru hem de iç bilezik kusuru teşhis etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Yapılan titreşim hesaplamaları incelendiğinde rulmanda hem dış bilezik hemde iç bilezikte ana kusur frekansı ve çoklu katlarında genlikler teşhis edilebilmiştir. Ayriyetten yan bant oluşumları da gözlenmiştir. Uygulanan onarım çalışmasından sonra rulmanda var olan kusurların meydana gitmediği gözlenmiştir.

Yeşilyurt ve Özdemir (Yeşilyurt, İ., Özdemir, Ö., 2015) yapmış oldukları çalışmada dengesiz yüke maruz silindirik masuralı rulman arızasının kısa zamanlı fourier dönüşümü yardımıyla belirlenmesi konusunu ele almışlardır. Bu bildiride değişken kuvvetlere maruz silindirik masuralı rulman kusurunun kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) desteğiyle teşhis edilmesi anlatılmaktadır. İlk olarak dengesizlik tesirine maruz dış bilezik kusuru olan rulmanın titreşim analizleri yapıp, dengesizlik ve kusur bulguları teşhis etmişlerdir. Nümerik biçimin gerçekliğini kanıtlamak için silindirik masuralı rulmanın dış bilezik yuvarlanma alanı üstüne yerel bir kusur oluşturularak, belirli bir çalışma kuvveti ve hızı altında rulman titreşimlerini elde etmişlerdir. Sağlam ve kusurlu rulmandan elde edilmiş olan titreşim bilgileri karşılaştırıldığında dengesizlik ve kusurun olması durumunda STFT desteğiyle güzel bir şekilde teşhis etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Kusurun var olması titreşim spektrumu üstünde de belli değişikliklere neden olmuştur ve titreşim enerjisinin fazla bir kısmının rezonans frekansı etrafında taşınmasına sebep olmuştur. Ayriyetten titreşim spektrumu üstünde kusur frekansı aralığında sıralanmış yanbant etkinlikleri gözlemlenmiştir. Kusursuz rulmanda dengeli ve dengesiz rulman titreşimlerinin STFT diyagramları karşılaştırıldığında dengesizlik işareti tekrar net olarak gözükmemiştir. Kusurlu halde bulunan titreşimlerin STFT diyagramları gözlemlendiğinde kusur işaretleri çok açık bir şekilde gözükmiştir.

Karaçay ve Aktürk (Karaçay, T., Aktürk, N., 2009) yapmış oldukları çalışmada bilyalı rulman yerel kusurlarının neden olduğu titreşimlerin modellenmesi konusunu ele almışlardır. Makinalarda yaygın olarak kullanılan rulmanlardaki kusurun, oluşan titreşimi ölçerek ve analiz ederek bulunabileceği birden fazla sayısal ve deneysel faaliyetlerle anlatılmıştır.

Titreşim analizi ile hata bulunmasındaki en çarpıcı adım, hatanın rulmanın faaliyetini durduracak seviyeye varmadan evvel ve doğru olacak şekilde bulunabilmesidir. Bu sebeple hata neticesinde meydana gelen titreşim cevabını iyi bilmek gerekir. Yapılan çalışmada açılmalı temaslı bilyalı rulmanın dış bilezik, iç bilezik ve yuvarlanma elemanında meydana gelmiş olan lokal hataları modellemişlerdir, rulmanda meydana gelmiş olan ezilmeleri ve iç kuvvetleri analiz etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Rulmanların bilezik ve bilyalarında oluşan lokal hatalar bilya ile bilezik arasındaki temas deformasyonunda darbe biçiminde ani farklılıklara sebep olmaktadır. Oluşan deformasyonlar hatanın olduğu rulman elemanı ve hatanın temas etmiş olduğu dış yükleme haline göre rulmanın oluşturduğu bileşke kuvvette farklılıklara sebep olmuştur. Oluşan farklılıklar rulmanın lineer olmadığı dinamik yanıtını oluşturur ve rulmanlar ile yataklanmış şaftta karakteristik titreşime neden olmuştur. Temas deformasyonunun güzelce kavrayabilmek ve oluşan deformasyonlar neticesinde meydana gelen titreşimlerin frekans ve büyüklük olacak şekilde doğru olarak bulunabilmesi titreşim ölçme yöntemiyle rulman hatalarının bulunmasında daha başarılı neticeler çıkarılabilecektir.

Arslan ve Aktürk (Arslan, H., Aktürk, N., 2004) yapmış oldukları çalışmada açılmalı temaslı bilyalı rulmanlarda bilya titreşimlerinin incelenmesi konusunu ele almışlardır. Yapılan çalışmada, sağlıklı ve hasarlı haldeki bilyalı rulmanlardaki bilya titreşimi araştırmak için bir şaft-rulman sistemi geliştirmişlerdir. Sistemde şaft-rulman ikilisini kütle-yay sistemi, bilyaları ise kütleli olarak kabul etmişlerdir. Sistemin dinamik koşullarda lineer olmayan bir tavrı sergilediği biliniyor. Bu sebeple şaft ve bilyalar için radyal yöndeki hareket eşitlikleri bulunmuş ve bulunan eşitlikler geliştirilmiş bilgisayar programı ile çeşitli ön yükler için eş zamanlı olacak şekilde çözümlenmiştir. Analiz programı ile elde edilen bu cevaplar zaman ve frekans tanım bölgesinde araştırılmıştır. Ön yük çoğaldıkça bilyalar daha uzun süre yüklü bölgede kalıp daha çok deformasyona uğramış ve titreşim genlikleri artmıştır. Frekans spektrumlarında frekans pikleri, kafes frekansı ve katları, şaftın radyal yöndeki doğal frekansı ve bilyanın radyal yöndeki titreşim frekansında meydana gelmiştir. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Bilyalar için elde edilmiş frekans spektrumları incelendiğinde frekans pikleri kafes frekansı ve katları, şaftın radyal yöndeki doğal frekansı ve bilyanın radyal yöndeki titreşim frekansında meydana gelmektedir. Ön yük çoğaldıkça bilyalar daha uzun süre yüklü bölgede kalıp daha çok deformasyona uğrar ve spektrumdaki titreşim genlikleri çoğalmaktadır.

Arslan ve arkadaşları (Arslan, H. ve ark., 2003) yapmış oldukları çalışmada bilyalı rulman hasarlarının neden olduğu titreşimlerin model-

lenmesi konusunu ele almışlardır. Yapılan çalışmada sağlıklı ve hasarlı haldeki açışal temaslı bilyalı rulmanların yaptığı titreşimi araştırmak için bir şaft-rulman sistemi yapılmıştır. Burada şaft-rulman kütle-yay sistemi olarak modellenmiş, bilyaların yaptığı titreşimi araştırmak için bilyalar da kütleli olarak düşünülmüştür. Sistem dinamik şartlar altında lineer olmayan bir tavır sergilediği bilinir. Analiz programı ile rulman elemanları çalışma yüzeylerindeki (iç bilezik, dış bilezik, bilya) yerel hataların şaft ve bilyaların titreşimine yapmış olduğu etki de incelenmiştir. Bulunan neticeler daha evvel yapılan araştırmalarla kıyaslandığında göreceli olarak bir uyum içinde oldukları görülmüştür. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Dış bilezik yuvarlanma yüzeyinde hata olan rulmanlar için bulunan titreşim genliği, iç bilezik ve yuvarlanma elemanı hatası için elde edilen genliklerle kıyaslandığında çok fazla bulmuşlardır. İç bilezik yuvarlanma yüzeyinde bir hata olursa şaft titreşimleri şaft dönme frekansı, kafes frekansı, iç ve dış bilezik bilya geçiş frekansları ile kombinasyonlarında ve üst harmoniklerinde oluşmuştur. Bilya yüzeyi hatası olan rulmanda şaft titreşimleri bilya dönme frekansının iki katında oluşmuştur.

Al-Ghamd ve Mba (Al-Ghamd, A. M., Mba, D., 2006) yapmış oldukları çalışmada rulman kusurunun tanımlanması ve kusur boyutunun tahmin edilmesi için akustik emisyon ve titreşim analizinin kullanımına ilişkin karşılaştırmalı bir deneysel çalışma konusunu ele almışlardır. Yuvarlanma parçalarındaki titreşimin gözlemlenmesi dönen makinelerde kullanılan en temel tespit yöntemidir. Rulman tespiti için akustik emisyon (AE) yöntemi, bütüncü bir tespit için temel oluşturuyor. Fakat AE yönteminin uygun bir biçimde gerçekleştirilmesindeki kısıtlamalar, bazı bakımlardan bulunan sonuçların kaydedilmesi, açıklanması ve çeşitlendirilmesindeki güçlüklerden dolayıdır. Bu yazıda anlatılan deneysel çalışma, radyal yüklü bir yatak üstündeki bir hatanın olup olmamasını ve büyüklüğünü bulabilmek için AE yönteminin kullanılmasına odaklanmışlardır. Deneysel bir test donanımı, bir test yatağının dış bileziğine çeşitli ölçülerdeki hataların oluşturulabileceği biçimde yapılmıştır. Farklı hız ve yük şartlarında AE ve titreşim analizi arasında olan kıyaslamalar anlatılmıştır. AE'nin titreşim analizinden evvel hata teşhisi ve gelişmiş tanımlama kabiliyetleri olduğu cevabını bulmuşlardır.

Yan ve Gao (Yan, R., Gao, R. X., 2009) yapmış oldukları çalışmada rulman arıza teşhisinde titreşim analizi için çok ölçekli zarflama spektrogramı konusunu ele almışlardır. Bu makalede rulmanlarda durum gözlemlenmesi ve sağlık tespitinde titreşim sinyali analizi için yeni bir sinyal kaydetme algoritması olan çok ölçekli zarflama spektrogramı anlatılmaktadır. Değişkenlik gösteren makine çalışma şartlarında istikrarlı cevaplar bulabilmek için düşünülen sinyal bileşenlerinin bant genişliğinin

evvelden biliniyor olması gerekmekte olan geleneksel zarflama spektral analiz yöntemi ile kıyaslandığında, yeni yöntem, zarfları ayıklamak ve ayırmak için aynı anda çok ölçekli ayrıştırmayı yapabilmektedir. Çeşitli frekans boyutlarıyla donatılmış tekrarlı uyarılmış mekanik titreşimler, bu şekilde sinyal analizinde doğruluğu arttırmaktadır. Kompleks dalgacık, bant geçiren filtreleme ile zarflamayı tek basamaklı bir işlemde birleştirme kabiliyeti tarafından incelenmiştir. Yeni yöntem, lokal yapısal hatalar barındıran makaralı yataklarda gözlenen titreşim sinyallerini kullanıp deneysel olacak şekilde yorumlanmıştır ve yeni sinyal kaydetme yönteminin geçerlilik ve yeterlilik açısından tasdikleyen güzel cevaplar bulmuşlardır.

Boudiaf ve arkadaşları (Boudiaf, A. ve ark., 2016) yapmış oldukları çalışmada rulman arıza tespiti ve teşhisi için titreşim analizi tekniklerinin bir özeti konusunu ele almışlardır. Rulman, dönen makinelerin en ciddi elemanlarından. Döner makinelerde millere destek vermek ve döndürmek amacıyla kullanılmaktadır. Yataklardaki herhangi bir hata, üretim ve ekipman düzeyinde eksikliklere sebep olabileceği gibi, insanlar için tehlikeli bir çalışma alanı meydana getirebilir. Bu sebeple, yatak hatası tespiti büyük ilgi görmeye başlamıştır. Bu çalışmadaki hedef, titreşim analiz yöntemlerini incelemek ve yuvarlanma elemanı yataklarını gözlemlenmedeki yetkinliklerini, yararlarını ve zararlarını incelemektir.

Mathew ve Alfredson (Mathew, J., Alfredson, R. J., 1984) yapmış oldukları çalışmada titreşim analizi kullanarak yuvarlanma elemanı rulmanların durum izlemesi konusunu ele almışlardır. Makine hali gözleme yöntemlerini kısaca bir incelemeyle birlikte, yeni başlayan hatayı teşhis edebilmek hedefiyle farklı makaralı eleman yataklarının titreşim işaretlerinin gözlemlenmesini barındıran bir araştırmanın açıklamasını ve neticelerini anlatmışlardır. Titreşim verilerini analiz etmişlerdir ve farklı değişkenler, yatak halinin teşhisindeki etkinlikleri yönünden yorumlamışlardır. Bütün değişkenlerin, rastlanılan rulman hatasının cinsine bağlı olan bir değeri olduğunu bulmuşlardır. Yaygın olarak, frekans alanı değişkenleri, kusurun bulunmasında zaman alanı değişkenlerinden daha istikrarlıdır. Bu şekilde, yatak kusurunu teşhis edebilmek için yalnız herhangi bir yöntem güvenmenin güvenilmez olduğunu gösterebilmek için yeterli ispat oluşturmuşlardır.

Dolenc ve arkadaşları (Dolenc, B. ve ark., 2016) yapmış oldukları çalışmada titreşim analizine dayalı dağıtılmış rulman arızası teşhisi konusunu ele almışlardır. Dağıtılmış rulman kusurları, örnek olarak elektroerozyon ya da lokal kusurların ilerlemesi gibi farklı şartlarda meydana gelmektedir. Dağıtılmış kusurlara sahip olan rulmanlar, yerel kusurlara sahip rulmanlardan daha kompleks titreşim verileri oluşturmaktadırlar. Bu tip kusurların fazla meydana gelmesine karşın, tespitleri ilgi çekmektedir. Bu makalede, titreşim analizi uygulanan dağıtılmış rulman kusurla-

rının tespiti için bir yöntem araştırılmıştır. Oluşturulan titreşim modelleri, yatak bileşenlerinin geometrik hatalarını dahil ederek oluşturulmuştur. Titreşim sinyallerinin zarf spektrumlarının kıyaslanması, yerel ve dağıtılmış kusurlar içinde seçim yapılabilir olduğunu işaret etmişlerdir. Ayriyetten, dağıtılmış kusurların teşhisi için bir tespit yöntemi ileri sürmüşlerdir. Bu, kusursuz rulmanlar ve lokal kusurları olan rulmanlarla kıyaslanan, doğal olarak dağılmış kusurları olan birkaç yatak üstünde incelemişlerdir. Kusursuz, yerel ve dağıtılmış kusur şartlarında titreşimlerden elde edilen özelliklerin açık bir şekilde ayrılabilir kümeler meydana getirdiği ve bu şekilde tespiti olanak oluşturduğunu deneysel olarak ortaya koymuşlardır.

Kharche ve Kshirsagar (Kharche, P. P., Kshirsagar, S. V., 2014) yapmış oldukları çalışmada yuvarlanma elemanı rulmanda arıza tespitinin gözden geçirilmesi konusunu ele almışlardır. Hatalı rulmanlar makinelerde titreşim sebebidir. Rulmanlar yapıları gereği titreşim üretmektedirler. Çalışma esnasında yatakların hali farklılaştıkça titreşim doğası da farklılaşır ve bu nedene dayalı olan belli bir niteliği mevcuttur. Rulmanın bu tipik nitelikleri, titreşimin gözlemlenmesi için gerekli durumları oluşturur. Bu, yuvarlanan elemanlı rulmanlarda hata teşhis yöntemi için bir gözlemlene dökümanıdır; rulman parçaları ve şeklini, rulman hata modunu, rulman hal gözlemlene yöntemlerini, zaman alanı ve frekans alanı yöntemlerini içermektedir. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Araştırmadan, ilerideki araştırmalar için bazı kısımları göz önüne almışlardır. Zaman alanında ve frekans alanında titreşim analizi, çalışabilmesi için anahtar kısımlarıdır. Bu sebeple, araştırmalarında nitelik konjektürü ve arıza tespiti için zaman ve frekans alanını kullanmışlardır.

Shah ve Patel (Shah, D. S., Patel, V. N., 2014) yapmış oldukları çalışmada yataklama elemanı rulmanlar için dinamik modelleme ve arıza tespit yöntemlerine ilişkin bir inceleme konusunu ele almışlardır. Yuvarlanma elemanları rulmanları, endüstriyel ve ev türü makinelerde sıklıkla kullanılır. Rulman elemanlarının temas eden alanlarında çok az hataların olması bile zamanla hasara sebep olabilir. Zarar görmeleri halinde maliyet ve şahsi eksiklikler oluştururlar. Titreşim gözlemlene yöntemi, endüstride sıklıkla kullanılan rulmanların sağlamlığının bilinmesi için önemlidir. Bu makalede, lokal ve dağıtılmış hatalar mevcut olduğunda ve olmadığında rulman için çeşitli dinamik modelleri incelemişlerdir. Ayriyetten hata teşhisinin olumlu yönde geliştirilmesi için uygulanan yöntemler de kısaca anlatılmıştır. Dalgacık dönüşümü, yüksek frekanslı rezonans yöntemi (HFRT), zarf analizi ve döngüsel otokorelasyon gibi sinyal kaydetme yöntemleri hata teşhisini olumlu yönde geliştirmiştir. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Sağlam ve kusurlu rulmanların dinamik modelleri araştırıldığında, kusurlu rul-

manın titreşim genliğinin sağlam rulmana kıyasla daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Dinamik modelin sağlamlığı, milin ağırlığı, yatak bileşenleri, yatak, lineer veya lineer olmayan yatak sertliği, yağlama, hız, sönümleme, hata, sürtünme ve gürültü olması gibi nedenlere bağlıdır. Arıza teşhisi, zarf analizi, Hilbert-Hung dönüşümü (HHT), dalgacık dönüşümü, döngüsel durağan analiz ve gürültü iptali gibi sinyal kaydetme yöntemleri ile olumlu yönde geliştirilebilir. Zarf analizi ve dalgacık dönüşümü sırayla merkez frekansa ve ana dalgacık belirlemelerine bağlıdır.

Kulkarni ve Bewoor (Kulkarni, S., Bewoor, A., 2016) yapmış oldukları çalışmada dağıtılmış kusurlara sahip bilyalı rulmanın titreşime dayalı durum değerlendirmesi konusunu ele almışlardır. Titreşim sinyallerinin analizi, makine parçalarındaki yatağın halinin gözlemlenmesi için temel yöntemdir. Rulman hatasının teşhisi için titreşime bağlı sinyal analizi uygulanmaktadır. Bu çalışmada, rulman hatalarını teşhis etmek için uygulanan RMS, Peak ve peak to peak, rulmandaki dağıtılmış hataları tespit edebilmek için bazı titreşim değişkenlerinin kıyaslanmasını anlatmışlardır. Bu makale aynı anda bilye yatağının halinin gözlemlenmesinde basınlığın hassaslığını anlatmaktadır. Titreşim tabanlı gözlemlenmenin, rulmandaki hataların teşhisi için güçlü bir teknik olduğu açıklanmıştır. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. Yatakların titreşim gözlemlenmesine ilişkin, FFT spektrumunun hatanın olduğu kısmı ortaya çıkardığı söylenebilir. Dış ve iç bilezik hatalı arza teşhis edilebilmesi, istatistiksel analiz uygulanarak bulunabilir. Ayriyetten, hareketli hata sebebiyle rulmanda rezonanstan dolayı meydana gelen dengesizlik sebebiyle genliğin iç bilezik hata şiddeti daha yüksek uça göstermektedir. İç yuva hatası, hız farklılığına daha olumlu cevap göstermektedir. Ayriyetten, dış yatak hatası, fazla ağırlıkta daha olumlu cevap vermektedir. Hatalı rulmanlar için peak to peak genlik tepkisi daha olumlu cevaplar göstermektedir, yanı sıra peak genliği ve RMS genliği gelmektedir. Basınlık, yatağın hata teşhisinde olumlu bir hassaslık göstermektedir. Fakat sağlıklı taşıma açısında alçak şiddet vermektedir.

Liu ve arkadaşları (Liu, Z. ve ark., 2020) yapmış oldukları çalışmada ampirik bir dalgacık eşikleme yöntemiyle büyük ölçekli rüzgar türbini kanat rulmanı arıza tespiti için titreşim analizi konusunu ele almışlardır. Bıçak rulmanlarının hasarlı olması, enerji üretiminde yüksek miktarda azalış yaşatabilir. Bu sebeple, uygun fiyatlı onarımları yaptırmak beklenilmeyen hataları engellemek için ciddi önem taşımaktadır. Ayriyetten, alçak hızlı kanat rulmanlarını tespit etmedeki temel güçlükler, zayıf hata titreşim sinyallerinin birçok gürültü bozukluğu yönünden maskelenmesidir ve etkin titreşim kayıtları çok kısıtlıdır. Bu meseleleri incelemek için, bu makale ilk başta bir rüzgar çiftliğinde 15 yılı geçkin bir zamandır çalışan, haliyle zarar gören büyük boyutlu ve alçak hızlı bir kanat rulmanını araştırmak-

tadır. Manuel dönüş ve motor sürüş şartlarında titreşim kayıtlarını elde etmek için iki vaka araştırılmıştır. Daha sonra, fazla gürültüyü önlemek ve zayıf hata sinyallerini çıkartabilmek için ampirik dalgacık eşiği olarak isimlendirilen bir teknik kullanılmıştır. Tespit cevapları, önerilen tekniğin haliyle zarar görmüş büyük boyutlu rüzgar türbini kanat rulmanlarını tespit edebilmek için etkin bir araç olabileceğini açıklamaktadır.

Kumbhar ve Chhaphkane (Kumbhar, A. J., Chhaphkane, N. K., 2014) yapmış oldukları çalışmada titreşim analizi kullanarak bilyalı rulmanın iç ve dış yatağı üzerinde dağıtılmış kusurların tespiti konusunu ele almışlardır. Rulmanlar, dönen makinelerin kritik bir elemanıdır. Rulman hatası, endüstriyel makinelerde yaygın olan hatalardandır. Etkili hal gözlemleme bu sebeple çok önemlidir. Rulmandaki ufak bir hasar, makinelerin çok ciddi bir biçimde arızalanmalarına sebep olmaktadır. Herhangi bir rulmanda hata teşhis ediliyorsa, yalnız makine değil, montaj hattı da durur ve elde etme fiyatları çok fazla olabilmektedir. Bu sebeple, rulman hasarlarını yaklaştıran arızaya sebep olmadan evvel teşhis edebilmek ve maliyetli durma zamanlarını alçaltmak oldukça önemli olmaktadır. Titreşim analizi, rulmanların gözlemlenmesi için çok yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem, büyüyen hatalar için önceden bilgilendirebilir ve gelecekteki gözlemleme hedefiyle uygulanabilir. Bu makale, rulmandaki dağıtılmış hataları teşhis edebilmek için titreşim analizi yönteminin uygunluğunu incelemektedir. Bu yazıda, rulmandaki hasarı bulabilmek için sağlam ve hasarlı rulmanların titreşim spektrumları kıyaslanmıştır. Yapmış oldukları çalışmaya dair çıkarılan sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmaktadır. FFT analizörü uygulanarak yapılmış olan titreşim analizi, bilhassa erken dönemlerde rulmandaki dağıtılmış hataların teşhis edilebilmesi için oldukça faydalı ve etkili bir yöntemdir. Dönen makinelerin üretimi veya üretim zamanı aksamadan hatalar teşhis edilebilir. Hatayı keşfetmek için sağlam rulman ve hasarlı rulmanların titreşim spektrumları kıyaslanır. Kusur frekans eşitlikleri sayesinde, kusurun dış bilezikte mi, iç bilezikte mi, bilye de mi veya kafeste mi olduğunu bulabilmek mümkündür.

3. SONUÇLAR

Yapılacak yorumlara bakacak olursak en başta makinelerde titreşimin zararlı bir şey olduğunu ve bu titreşimlerle nasıl başa çıkılabileceği, nasıl tespit edilebileceği konularında yapılan çeşitli araştırmalar sonucunda titreşimin bize verecek olduğu zararların önüne geçilebileceği söylenebilir. Araştırılan konu açısından rulmanlar üzerinde titreşimin önemli bir yer aldığı görülmektedir. Bununla birlikte rulmanlara nasıl zarar verdiği, ömrünün nasıl kısaldığı gibi konularda bizi bilgilendirmektedir.

Dönen makine sistemlerinde en temel olarak kullanılan makine ele-

manı rulmanlardır. Sistemlerin içermiş olduğu rulmanlarda temel hasarları sıralayacak olursak ; dış bilezik hasarı, iç bilezik hasarı, kafes ve bilye hasarı olarak söyleyebiliriz. Oluşan hasarların önüne geçebilmemiz için titreşim analizine başvurmamız gerekmektedir. Böylelikle oluşan titreşimlerin karakteristiğine ve oluşma sıklığına göre kusurun ne olduğunu, kusurların nerede olduğunu bulabilir ve çıkan sonuca göre erken teşhis yapılabilmektedir. Rulmanlarda bakım çok önemli bir yer almaktadır.

Yapılan titreşim analizinin ekonomik açıdan etkisi oldukça önemlidir. Rulman elemanlarının yapılması gereken planlı periyodik bakımları vardır. Periyodik bakımlar yaptırılmaz veya yaptırıldığı halde kusurlar görmezden gelinip önlem alınmaz ise işletmeler ileride çok daha büyük bakım maliyetleri ödemek zorunda kalırlar. Ayriyetten işletmelerde büyük aksaklıklar meydana getirirler. Bu da istenilmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tip sıkıntıların önüne geçmek için düzenli bakım yaptırılmalıdır.

Kullanılan çeşitli titreşim analizlerinin kusurları uygun bir şekilde bulabildiği sonucunu çıkarabiliriz. Sağlam ve kusurlu rulman arasındaki farklar da incelendiğinde oldukça bariz farkların görüldüğü söylenebilir. Bu şekilde de iki farklı durum açısından da kıyaslamalar yapmak mümkün olmaktadır.

Rulmanlardaki kusurlu yüzeylerdeki titreşim grafiklerinde genliklerde artış göstererek çeşitli pikler yapmaktadırlar. Hasar miktarı arttıkça bu titreşim grafiğindeki genlikler de daha fazla artmaktadır. Bu sonuca bağlı olarak rulmanlarda ufak bir kusur dahi olsa hemen değiştirilmelidir yoksa ileride yıkıcı hasarlar meydana gelir.

KAYNAKLAR

- Arslan, H., Aslan, E., Aktürk, N. (2006). Bilyalı Rulman Hasarlarının Titreşim Analizi Yöntemiyle İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(3). <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6669/88842>
- Arslan, H. (2003). Şaft-rulman sistemindeki bilyalı rulman hasarlarının titreşim analizi metodu ile tespiti (Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). <http://acikerisim.kku.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12587/16338>
- Arslan, H. (2007). Bilyalı Rulman Yuvarlanma Elemanı Kusurunun Titreşim Analizi Yöntemiyle İncelenmesi . Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 13 (2) , 151-161. <https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/20517/218448?publisher=pamukkale?publisher=pamukkale>
- Arslan, H., Aktürk, N. (2004). Açısal Temaslı Bilyalı Rulmanlarda Bilya Titreşimlerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19(3). <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6661/88955>
- Arslan, H., Orhan, S., Aktürk, N. (2003). Bilyalı Rulman Hasarlarının Neden Olduğu Titreşimlerin Modellenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18(4). <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6658/89017>
- Al-Ghamd, A. M., Mba, D. (2006). A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. Mechanical systems and signal processing, 20(7), 1537-1571. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.10.013>
- Boudiaf, A., Djebala, A., Bendjma, H., Balaska, A., Dahane, A. (2016). A summary of vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in bearing. In 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC) (37-42). IEEE. Doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804187
- Çimen, M. (2015). Bilyeli rulman hasarlarının titreşim analizi ile tespiti ve gemi makinelerinde kestirimci bakım uygulaması (Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). <https://polen.itu.edu.tr/item-s/17a2b787-2074-44e7-9007-bac0615e4675>
- Dolenc, B., Bošković, P., Juričić, Đ. (2016). Distributed bearing fault diagnosis based on vibration analysis. Mechanical Systems and Signal Processing, 66, 521-532. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.06.007>
- Estupiñan, E., Saavedra, P. (2002). Diagnostic techniques for the vibration analysis of bearings. Vibrations Laboratory-Mechanical Engineering Department, 85(1), 1-9. https://www.researchgate.net/publication/242270467_Diagnostic_Techniques_for_the_Vibration_Analysis_of_Bearings
- Geropp, B., Schneider, S., Seeliger, A. (1997). Automatic diagnosis of antifricition bearings using vibration analysis and fuzzy-logic. 30(18), 965-970. Doi : [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)42525-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)42525-0)

- Orhan, S., Arslan, H., Aktürk, N. (2003). Titreşim Analiziyle Rulman Arızalarının Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18(2). <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6656/88983>
- Ovacikli, A. K. (2011). Condition monitoring of ball bearings using vibration analysis (Yüksek Lisans Tezi, Lulea Teknoloji Üniversitesi). <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1018409&dsid=-9603>
- Karaçay, T., Aktürk, N. (2009). Bilyalı Rulman Yerel Kusurlarının Neden Olduğu Titreşimlerin Modellenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(2). <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6680/88255>
- Kharche, P. P., Kshirsagar, S. V. (2014). Review of fault detection in rolling element bearing. Int. J. Innov. Res. Adv. Eng, 1(5), 169-174. https://www.academia.edu/11315158/IJIRAE_Review_of_Fault_Detection_in_Rolling_Element_Bearing?sm=b
- Kulkarni, S., Bewoor, A. (2016). Vibration based condition assessment of ball bearing with distributed defects. Journal of Measurements in Engineering, 4(2), 87-94. <https://www.extrica.com/article/17164>
- Kumbhar, A. J., Chhapkhane, N. K. (2014). Detection of the distributed defects on Inner and outer race of ball bearing using vibration analysis. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), 3(11), 147-150. Doi : 10.17577/IJERTV3IS110240
- Kirankumar, M. V., Loksha, M., Kumar, S., Kumar, A. (2018). Review on Condition Monitoring of Bearings using vibration analysis techniques. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (376, 1, 012110). Doi :10.1088/1757-899X/376/1/012110
- Khadersab, A., Shivakumar, S. (2018). Vibration analysis techniques for rotating machinery and its effect on bearing faults. Procedia Manufacturing, 20, 247-252. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.036>
- Liu, Z., Zhang, L., Carrasco, J. (2020). Vibration analysis for large-scale wind turbine blade bearing fault detection with an empirical wavelet thresholding method. Renewable Energy, 146, 99-110. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.094>
- Mathew, J., Alfredson, R. J. (1984). The condition monitoring of rolling element bearings using vibration analysis. 106(3), 447-453. Doi : <https://doi.org/10.1115/1.3269216>
- Shah, D. S., Patel, V. N. (2014). A review of dynamic modeling and fault identification methods for rolling element bearing. Procedia Technology, 14, 447-456. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.057>
- Yıldırım, E., Karahan, M. F. (2015). Titreşim Analizi İle Rulmanlarda Kestirimci Bakım. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11(1), 17-23. Doi : 10.18466/cbufbe.95879

- Yeşilyurt, İ., Özdemir, Ö. (2015). Dengesiz Yüke Maruz Silindirik Masuralı Rulman Arızasının Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü Yardımıyla Belirlenmesi. Uluslararası Katılımlı, 17, 14-17. https://www.researchgate.net/publication/304158678_Fault_detection_in_roller_bearing_subjected_to_unbalance_using_short_time_Fourier_transform_in_Turkish
- Yan, R., Gao, R. X. (2009). Multi-scale enveloping spectrogram for vibration analysis in bearing defect diagnosis. Tribology International, 42(2), 293-302. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.06.013>



BÖLÜM 9

DOĞAL TAŞ OCAKLARINDA KULLANILAN ZİNCİRLİ KESME MAKİNELERİ¹

Arif Emre DURSUN²

¹ Bu bölüm, yazarın yüksek lisans tez danışmanlığını yürüttüğü derlemeden üretilmiştir.

² Doç. Dr. Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, Selçuklu, Konya, Türkiye E-mail: aedursun@ktun.edu.tr
ORCID Number: 0000-0003-2001-7814

1. GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada yapı malzemesi olarak doğal taşlara olan talebin artması nedeniyle sektörün bu artan talebe karşılık verebilmesi için hızlı bir şekilde kırıksız ve çatlaksız blok üretimi yapması gerekmektedir. Çoğu ülkede teknolojik gelişmelere bağlı olarak yeni doğal taş üretim makineleri ve üretim yöntemleri kullanılarak daha hızlı ve kaliteli blok üretimi yapılmaktadır.

Özellikle traverten gibi yumuşak ve mermer gibi orta dereceli dayanıma sahip olan doğal taş ocaklarında blok üretimi için kullanılan zincirli kesme makineleri en çok hat kesimi de denilen ana kesim olarak nitelendirilen yatay ve düşey kesim için açık ve yeraltı doğal taş işletmelerinde kullanılabilmektedirler. Bunun yanında daha az sıklıkta sayalama amacıyla da kullanılmaktadırlar.

Doğal taş endüstrisinde, zincirli kesme makineleri ile blok üretimi son yıllarda oldukça yaygındır. Doğal taşların kesilebilirlik özelliklerinin önceden tahmin edilebilmesi, maliyet analizi ve üretim planlaması açısından büyük önem taşımaktadır. Doğal taş tüketiminin yaygınlaşması ve aynı zamanda bu alanda faaliyet gösteren üretici firmalar arasındaki rekabetin artması, çeşitli operasyon parametrelerinin optimize edilerek verimlilik ve maliyetler konusunda iyileştirme çalışmalarının önemini ortaya çıkarmıştır. Kesilecek kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerine uygun çalışma parametrelerinin belirlenmesi, elde edilecek ürünlerin kalite ve maliyetleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada zincirli kesme makinelerinin kullanımının Türkiye’de daha da yaygınlaşarak, belirli miktarda doğal taş rezervlerinin daha etkin ve ekonomik üretimi sağlanarak ülke ekonomisinde önemli payı olan doğal taş üretiminin bilimsel metotlara dayalı yapılmasına katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

2. DOĞAL TAŞIN TANIMI

Doğal taş terimi, doğada (yer kabuğunda) bulunan, farklı kökendeki her türlü kayaç (kaya, kütle, taş) için kullanılan genel bir ifadedir. Endüstriyel ya da ticari anlamdaki “doğal taş” tanımı ise yasal izinle üretilerek, kullanım alanına uygun ocaktan nihai ürün haline gelene kadar işlem gören bütün kayaçlar için kullanılmaktadır. Tanımdan da anlaşılacağı gibi; “doğal taş” ifadesi, kullanım yerine ve amacına göre farklı işlevleri kapsayan bir “şemsiye kavram” niteliğindedir (Yüzer, 2003).

Genel anlamda doğal taş denince akla ilk gelen ürün mermerdir. Ancak doğal taşlar, jeolojik özelliklerine, yapı ve doku özelliklerine, mineral içeriklerine, ticari pazara ve renk çeşitliliğine, sertliğine, kullanım alanına, ekonomik şartlara ve kökenlerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflamalar içerisinde en geçerli olanı doğal taşların jeolojik olarak sınıflan-

dırmasıdır. Bu sınıflandırmaya göre doğal taşlar metamorfik, sedimanter ve magmatik olarak 3 gruba ayrılmaktadır.

1. Metamorfik taşlar (Hakiki mermerler, kireçtaşları vb.): Tam kristalleşmiş taşları içine alır. Genellikle iyi kristalleşmişlerdir. Renkleri genellikle beyaz ve açık gridir. Bileşimlerinde çok yabancı madde taşırırlar.

2. Sedimanter taşlar (Travertenler, oniks mermerler vb.): Oniks ve travertenleri içerir. Yapılarında yalnız CaCO_3 vardır. Travertenler toplu iğne başından, birkaç cm'ye varan boşluklar içerdiklerinden kolaylıkla işlenebilmekte ve iyi cila kabul edebilmektedirler.

3. Magmatik taşlar (Granit, diyabaz, siyenit vb.): Magmatik kökenli mermerleri içerirler. Andezit, dasit, granit, siyanit, bazalt, diabaz, gabro, serpantin vs. gibi.

Doğal taş üretiminde dünyada önemli bir paya sahip olan ülkemizde 650'ye yakın renk ve çeşitte doğal taşın üretildiği ve bunlarından ortalama olarak 300'e yakın çeşidi mermer, 200'e yakın çeşidi traverten ve geri kalan ise kireçtaşı ve granit olarak yer almaktadır. Ülkemiz rezerv potansiyeli, üretim ve değer bakımından doğal taş madenciliğinde dünya genelinde ilk beş büyük ülke arasındadır. Doğal taş ihracatında şu an aktif olarak ülkemiz yaklaşık 179 ülkeye doğal taş satmakta ve bu satıştan yaklaşık 2 milyar dolar gelir elde etmektedir.

Türkiye sahip olduğu zengin doğal taş rezervi nedeniyle sektörde uluslararası alanda önemli bir paya sahiptir. Ülkemizin doğal taş rezervinin bu kadar zengin olmasının önemli nedenlerinden birisi Alp sıra dağlarının bir parçası olmasıdır. Bu rezervin önemli bir bölümü Batı Anadolu ve Trakya'da yer almaktadır. Genel olarak doğal taş rezervlerinin yoğun olarak yer aldığı iller Afyon, Balıkesir, Diyarbakır, Mersin, Antalya, Isparta, Burdur, Bursa, Denizli, Tokat, Bilecik, Muğla, Konya, Karaman, Eskişehir ve Çanakkale'dir. Dünya doğal taş pazarında ülkemizde çıkarılan ve özellikle Türk ürünleri olarak tanımlanan Süpren, Elazığ Vişne, Akşehir Siyah, Manyas Beyaz, Bilecik Bej, Kaplan Postu, Denizli Traverten, Ege Bordo, Milas Leylak, Gemlik Diyabaz, Afyon Şekeri, Burdur Beji gibi doğal taşlarımızda dünya çapında tanınmaktadır.

Doğal taşlar yapı malzemesi olarak en çok ve yaygın olarak inşaat sektöründe tüketim alanı bulmaktadır. Daha sonra binaların iç ve dış cephe kaplamalarında dekorasyon amaçlı, mimari yapıların restorasyonu, heykeltçilik, döşeme ve kaplama işlemleri, cam ve porselen sanayi, tarihi yapıların sağlamlaştırılması ve yenilenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunların dışında son yıllarda özellikle evlerde iç mekân dekorasyonu için mutfak ve banyolarda, süs eşyası ve hediyelik eşya yapımında, şehirlerde yol ve kaldırım döşeme işlemlerinde, duvar ve merdiven basamağı kapla-

ma işlerinde de kullanım alanı bulmaya başlamıştır (Özdamar 2001; Karahan, 2018).

3. DOĞAL TAŞ MADENCİLİĞİ VE BLOK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Doğal taş madenciliğinde taşın derinliğine ve jeolojik özelliklere bağlı olarak hem açık ocak hem de yeraltı madenciliği üretim yöntemleri uygulanarak doğal taş ocaklarında blok şeklinde üretim yapılır. Doğal taş üretiminin diğer maden üretim yöntemlerinden en büyük farkı doğal taşın büyük bloklar şeklinde kesilerek çıkarılma zorunluluğunun olmasıdır. Bunun için yıllardır farklı teknolojiler, makineler ve üretim yöntemleri kullanılarak doğal taşlar kesilerek bloklar şeklinde üretilmiştir.

Genel anlamda gerekli ön hazırlıkları yapılmış, su, enerji, makine parkı vs. alt yapı sistemleri tamamlanmış ve üzerindeki örtü tabakası kaldırılmış olan bir doğal taş ocağında blok üretim veya kesim işleminin aşamaları şu şekildedir (Şekil 1):

1) Üretim öncesi hazırlık (Kanal açma (yarma-oluk)): Kesim bölgesinin temizlenmesi ve süreksizliklerin tayini, delme ve kesme noktalarının belirlenmesi.

2) Doğal taş bloğunun ana kütlede ayrılması: Deliklerin açılması, çalışacak delme veya kesme makinalarının kurulması ve blok yüzeylerinin kesilmesi ve bloğun serbestleştirilmesi. Değişik kesme makinaları ve/veya delme yöntemi ile kesim, kama ve yapraklar ile çatlatıp ayırma, çok zayıf patlayıcılar, hidrolik krikolar ile yapılabilir. Duruma göre yardımcı makinalar da kullanılabilir.

3) Doğal taş bloklarının devrilmesi/ötelenmesi: Bloğun ana kütlede ötelenmesi işlemi hidrolik krikolar, havalı yastıklar, ters kepçe, loder ve dozerlerle yapılır.

4) Blokların kaldırma/yükleme işlemi: Bloğun sayalama bölgesine taşınması ve kenarlarının düzeltilmesi. Değişik tipte vinçler (kule veya gezer vinçler) değişik güçte loderler veya çelik halatlı yükleyici taşıyıcı kamyonlar.

5) Nakliye işlemi: Bloğun stoklanması veya yüklenerek tesise nakledilmesi işlemi son aşamadır. Ocaktan kamyon, nakliye tren ve duruma göre konveyörler ile yapılabilir (Kulaksız, 2012).

Doğal taş madenciliğinde blok üretim yöntemini etkileyen bazı faktörler vardır. Bunlar jeolojik yapı, faylar ve çatlakların durumu, topografya, iklim koşulları, ekonomik yapı, çevre şartları ve üretim tekniği gibi faktörler olup doğal taş madenciliğinde üretim yönteminin belirlenmesinde etkili olan faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 1. Doğal taş madenciliğinde blok üretim aşamaları (Kulaksız, 2012)

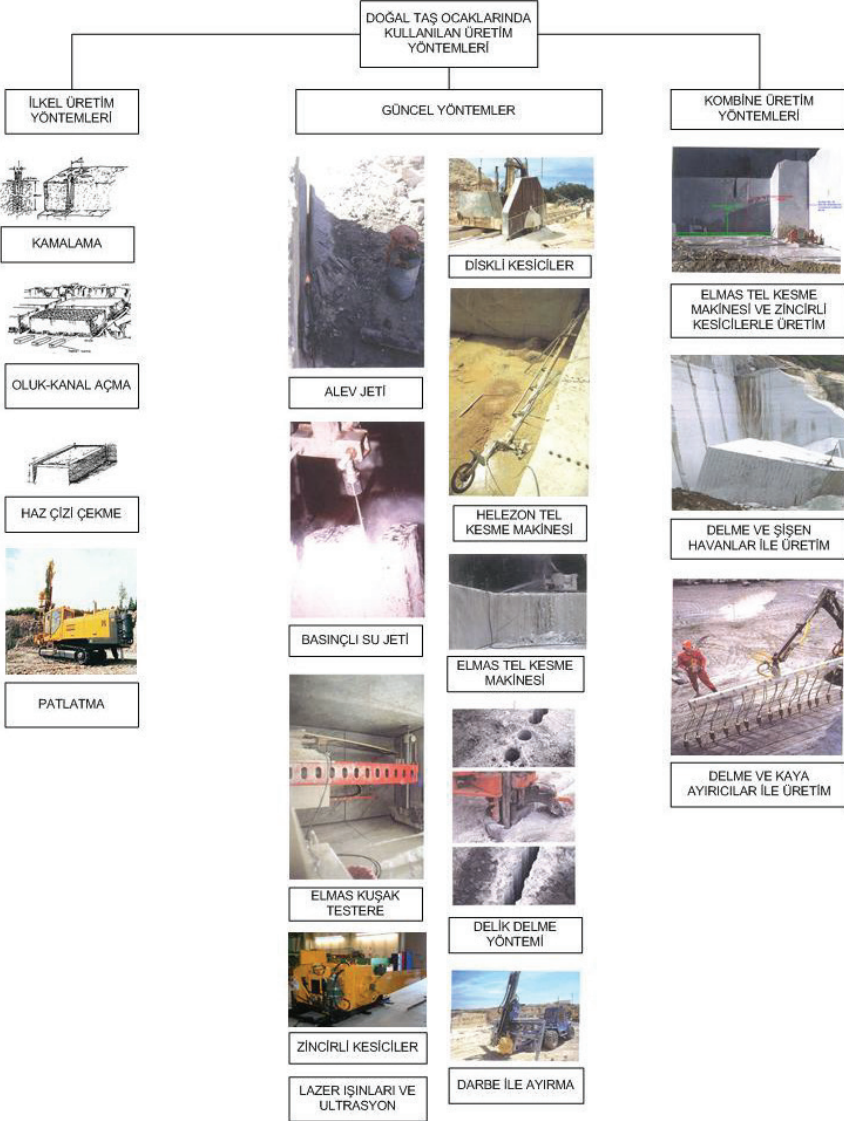
Doğal taş madenciliğinde blok üretiminde kesme işleminin sürekliliğine göre kesikli ve kesintisiz (sürekli) üretim diye iki gruba ayrılmaktadır. Kesikli üretim yönteminde ana kayaktan doğal taş blok kesiminde kesim işlemlerinde kesiklikler bulunur. Örneğin; üçlü kama yönteminde veya delme-patlatma ile blok üretiminde işlemler arasında zaman aralıkları bulunurken, sürekli kesimde kesme zaman aralıkları bulunmaz. Sürekli

kesme yöntemine örnekler ise; elmas telli kesme, zincirli/kollu kesicilerle kesme ve bantlı kesicilerle kesme yöntemleri verilebilir.

Doğal taş madenciliğinde diğer bir sınıflama yöntemi ise blok üretim veya kesim teknolojisine göre yapılmaktadır. Bu sınıflama yöntemi üretim aşamalarında üretim yönteminin türünü belirleyen en önemli faktördür ve kesim teknolojisi doğal taş madenciliğinde bloğun ana kütlede kesilerek serbestleşmesi işleminde uygulanan yöntem olarak tanımlanmakta ve ocağın verimliliğini, üretim hızını, blok kalitesini ve maliyetlerin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Önceden kullanılan ve şu an kullanımı kaldırılmış ilkel üretim yöntemleri, şuanda çoğu doğal taş ocağında aktif olarak kullanılan güncel yöntemler ve deneme aşaması devam eden yeni teknolojik üretim yöntemleri olmak üzere 3 ana grupta blok kesim/üretim yöntemlerini değerlendirebiliriz (Şekil 2).

Doğal taş blok kesim/üretim teknolojilerine göre sınıflama ise;

- Çelik halatlı kesim makinasıyla kesim/üretim yöntemi,
- Elmas telli kesim makinasıyla kesim/üretim yöntemi,
- Dairesel testereli kesim makinasıyla kesim/üretim yöntemi,
- Alev jeti ekipmanı ile blok kesim/üretim yöntemi,
- Su jeti ekipmanı ile blok kesim/üretim yöntemi,
- Zincirli/bantlı kollu kesme makinalarıyla kesim/üretim yöntemi
- Delik delme makinalarıyla (sonda) kesim/üretim yöntemi,
- Diğer yöntemler ve/veya bu yöntemlerin birlikte kullanıldığı blok kesme yöntemleri



Şekil 2. Doğal taş ocaklarında kullanılan blok kesim/üretim yöntemlerinin şematik görünümü (Hanecioğlu, 2006)

4. ZİNCİRLİ KESME MAKİNELERİNİN TANITIMI VE ÖZELLİKLERİ

Zincirli kesme makineleri, mekanize kazının ilk dönemlerinde yeraltı kömür madenciliğinde kömür kazısı için yaygın olarak kullanılan potka-baç makineleri üzerinde yapılan bazı tasarım değişiklikleri ile doğal taş madenciliğinde de son 30 yıldır sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır.

Son yıllarda doğal taş madenciliğinde yaygın olarak kullanılan zincirli kesme makineleri kullanım amacına göre 3 kategoride değerlendirilmektedir (Gündüz ve ark., 1995).

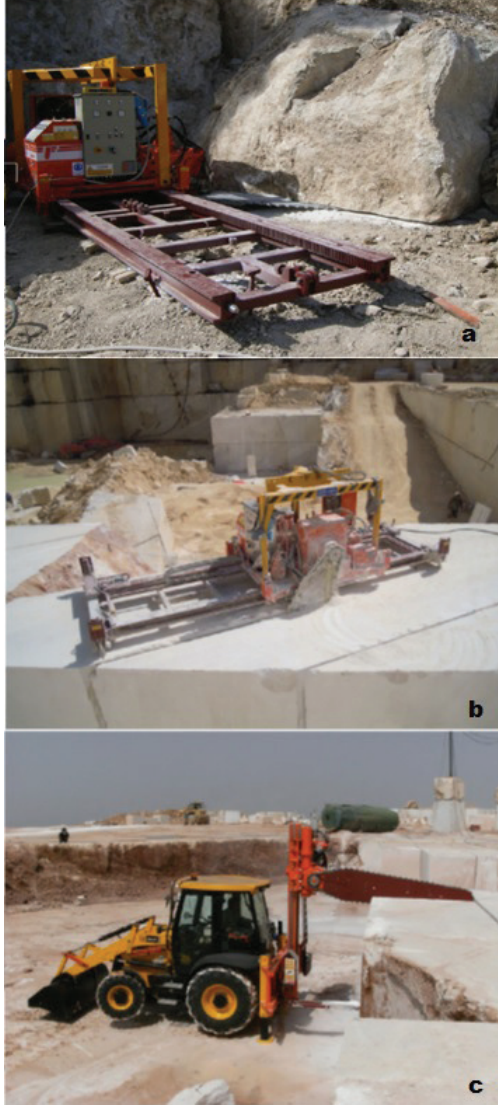
1. Açık doğal taş madenciliğinde ana kesim için kullanılanlar (en yaygın)
2. Açık doğal taş madenciliğinde sayalama amacı için kullanılanlar
3. Yeraltı doğal taş madenciliğinde ana kesim için kullanılanlar

Açık doğal taş ocaklarında en çok kullanılan yatay ve dikey kesim yapabilen hat tipi kesme makineleri olarak da adlandırılan ana kesim yapan tiplerdir (Şekil 3a ve 3b). Değişik kesme derinliğine sahip olan bu tipler mermerlerde ve yüksek sertliğe sahip kayalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Soğutma suyuna ihtiyaç duymadan yatay ve dikey kesim yapabilen ve elektrikli bir motor tarafında tahrik edilen bu makineler elektro hidrolik kumanda sistemleri ile kontrol edilmektedir ve değişen kayaç özelliklerine göre uygun güç ve hız ayarlamaları yapılabilmektedir. Açık ocaklarda kullanılan diğer tip zincirli kesme makineleri ise kare kesim makineleri olarak adlandırılan sayalama amacıyla kullanılan tiplerdir (Şekil 3c). Bu makineler bir kepçe üzerine yerleştirilmiş ve kesme kolunun aşağı ve yukarı doğru hareketi ile sayalama işlemlerini kuru kesim olarak ve daha ekonomik bir şekilde yaparlar. Yeraltı doğal taş işletmelerinde ise tünel tipi kesme makineleri olarak adlandırılan ve açık ocaklarda kullanılan hat tipinin paletli olanları kullanılmaktadır (Fantini, 2015).

Bir doğal taş ocağında blok üretimi yapılırken tel kesme makinesi ile ilk önce alt ve yan kesimler yapılmakta olup daha sonra zincirli kesme makinesi ile düşey kesimler yapılmaktadır (Şekil 4). Basamaklarda kesme yüksekliği yaklaşık 7 metre olup kesme uzunluğu 8-10 metre arasında değişmektedir. Kesilen kütle alt ve yan kesimi yapıldıktan sonra diğer yan kesimleri içinde tel kesme makinesi kullanılmaktadır (Şekil 4). Tüm yüzeyleri kesilen ve serbest kalan kütle ana kayadan su yastıkları ile ayrılmakta ve ekskavatör ataçmanı ile topraktan oluşturulan bir hafriyatın üzerine devirme işlemi yapılmaktadır.

Zincirli kesme makinelerinin doğal taş endüstrisinde kullanımı, kömür kazısında kullanılan potkabaçlarda yapılan bazı tasarım değişiklikleri ile birlikte sektördeki yerini almış ve son yıllarda kullanımı iyice yaygınlaşmıştır (Karaca, 2007). Bu elektro hidrolik makineler genellikle elmas boncuklu tel kesme makineleri ile birlikte kullanılmakta, nadiren de yalnız başlarına blok kesiminde dikey veya yatay kesimlerde kullanılabilirler. Makine, ana gövde ve kontrol panosu, kesici kol ve hareketi sağlayan ray sistemi olmak üzere üç ana üniteden oluşmaktadır (Şekil 5). Ray sistemi üzerinde ana gövde ve kontrol panosu hareket ederken, zincir sistemi üzeri-

ne yerleştirilen keski (kama tip keski) kesici kol üzerine yerleştirilmiş ve kesme işlemini gerçekleştiren ünitedir. Kol üzerindeki bu keskiğin dönüşü sağlayan ve kesimi yapıldığı ana birim olan zincirin dönüşü ayrı bir motor ile ray sisteminin hareketini ise yine ayrı bir elektrik motoru ile tahrik edilen 2 ayrı hidrolik motor vasıtasıyla sağlanmaktadır. Kesici kolun uzunluğu makineyi üreten firmalara ve uygulayıcı mühendislerin isteklerine göre farklı uzunluklarda imal edilmekte olup uzunlukları yaklaşık 7-7,5 m'ye kadar olabilmektedir. Kesici kolun kesme dilim kalınlığı 42 mm (en yaygın) veya 38 mm olup bu da üretici firmaya bağlı olarak imal edilmektedir.



Şekil 3. Açık doğal taş ocaklarında kullanılan zincirli kesme makineleri a) yatay kesim, b) düşey kesim c) sayalama işlemleri (Fantini, 2015)



Şekil 4. Fantini 70 SUPER-H zincirli kesme makinesi ile bir doğal taş ocağında kesilen bir basamak görünümü (Candemir, 2021)



Şekil 5. Fantini 70 SUPER-H zincirli kesme makinesinin temel üniteleri (Candemir, 2021)

Yapılan araştırmalara göre zincirli kesme makinelerinin bazı önemli avantajlarının olduğu belirtilmiştir (Mancini ve ark., 2001; Primavori, 2006; Çopur ve ark., 2008; Sarıışık ve ark., 2009). Bu avantajları;

- Zincirli kesme makineleri işçilik maliyetinden ve zamandan tasarruf sağlarlar. Bunu özellikle 6-7 m'den yüksek basamaklarda telli kesme sistemiyle birlikte kullanıldıklarında delik sayısını azaltarak sağlarlar. Tel kesme sisteminde en çok karşılaşılan delik çakıştırma problemini ortadan kaldırır.

- Blok kesimlerinde üretim ve zaman kayıplarını azaltırlar. Basamaklar oluşturulurken yatay veya düşey kesim yapabildikleri için yeni bir basamak kesiminde kolaylıkla giriş yapabilmeye özelliğine sahiptirler. Ve bu özellikleri sayesinde telli kesme yönteminde yapılan üçgen parça kesme işlemini ortadan kaldırırılar.
- Başka herhangi bir işleme gerek duymayan fabrikada işlemeye hazır doğrudan satılabilir ürün kesebilme özelliğine sahiptirler.
- Oldukça düzgün yüzeyler oluşturdukları için ek bir blok düzeltme işlemine ihtiyaç duyulmadığı için çalışanların sağlık ve güvenliği açısından daha az toz riski ve daha az atık çıkarırlar ve bu durumda diğer üretim yöntemlerine göre mükemmel çalışma ortamı oluşturmalarını sağlar.
- Hızlı ve kaliteli ürün ortaya çıkardıkları için diğer yöntemlere göre blok verimliliğini artırırılar.

Bu makinelerin en önemli dezavantajı ise, çatlaklı ve çok sert-çok aşındırıcı formasyonlarda kullanılamayışlarıdır. Zincirli kesme makinelerinin kazı performanslarının, ocağın fizibilite aşamasında bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Bir zincirli kesme makinesinin performansı ocağın ve doğal taşın jeolojik ve jeoteknik özelliklerine, kullanılan makinenin özelliklerine ve ocağın işletme parametrelerine bağlıdır (Çizelge 1) (Çopur ve ark., 2006; 2007a; 2007b; 2008).

Çizelge 1. Zincirli kesme makinelerinin performansını etkileyen parametreler

Jeolojik	<ul style="list-style-type: none"> • Çatlak takımı sayısı ve frekansı • Doğal taş yatağının eğimi, doğrultusu, şekli • Yataklanma ve foliasyon • Kazılabilirlik, dayanım, elastisite, aşındırıcılık, petrografik, dokusal özellikleri
Makine	<ul style="list-style-type: none"> • Tork-güç-baskı kuvveti kapasitesi • Kol/bıçak uzunluğu ve kalınlığı • Keskilerin konumları, metalürjik özellikleri ve geometrileri
İşletme	<ul style="list-style-type: none"> • Kol/bıçak kesme derinliği ve kesme açısı • Araba ilerleme hızı • Zincir dönme hızı • Zincir ön gerilmesi • Zincirde gres yağı kullanımı • Kuru veya sulu kesme • Yatay veya düşey kesme • İşçilik kalitesi ve bulunabilirliği

Bu makinelerin zincir düzenleri, kol üzerinde kullanılan keski, kesme profilleri ve kesme parametreleri ile ilgili olarak bazı araştırmalar yapılmıştır (Çopur ve ark., 2006; 2007a, 2007b; 2008; 2011a; 2011b; Çopur, 2010). Keski, genellikle pabuç denilen keski tutuculara civata ile

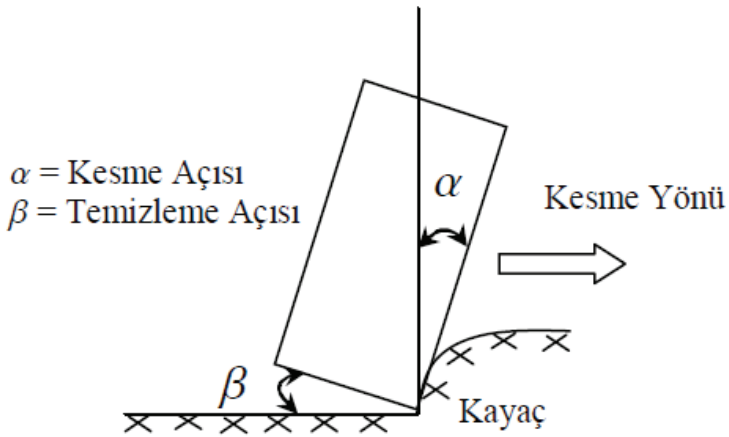
tutturulur. Pabuçlar ise bakla denilen zincir ünitesine civatalanır (Şekil 6). Birbirine bağlı olan baklalar, kol üzerinde bir ön-gerilme verilen ve kayarak hareket eden sonsuz halat şeklindeki zinciri oluşturur. Makinenin tork ihtiyacını azaltmak için zincirin kola temas ettiği yüzey gres yağı ile yağlanır. Geometri, bileşim ve metalürjik özellikler bakımından farklı keski-ler vardır. 4 kenarı veya 8 kenarı kullanılabilen prizma şeklindeki keski-ler en yaygın olarak kullanılan keski-lerdir. 4 kenarlı keski-lerde kesme açısı 0° ve temizleme açısı 10° 'dir. 8 kenarlı keski-lerde negatif kesme açıları (genellikle -5°) kullanılır ve temizleme açısı 5° 'dir. Kesme açısı, keski ön yüzeyinin dikeyle yaptığı açıdır ve temizleme açısı keski alt yüzeyinin yatayla yaptığı açıdır (Şekil 7). Bir kenar aşındıktan sonra, keski-ler döndürülerek keskin bir kenar kullanılmaya başlanır. Erken kırılan keski-ler hariç, keski-lerin hepsinin aynı anda döndürülmesi kazı performansını artırmaktadır (Çopur ve ark., 2008).

Bir zincirdeki toplam keski seti sayısı, set ve zincir uzunluklarına, dolayısı ile kol uzunluğuna bağlıdır. Bir setteki keski-lerin konumları keski düzeni veya kesme düzenini oluşturur (Şekil 5) ve üretici firmalara bağlı olarak değişik keski düzenleri vardır. Kesme dilim kalınlığı boyunca keski-lerin kesme hatları arasındaki yanal mesafe değişim göstermektedir. Ancak, kol uzunluğu veya set uzunluğu boyunca ardışık keski-ler arasındaki mesafe, diğer bir deyişle bakla uzunluğu, sabittir. Kesme profiline bakıldığında ise her bir keskinin vuruş noktasının yataya göre seviyesi farklıdır. Keski yanal açısı, kesme hatları arasındaki mesafe ve vuruş noktası seviyesi kesme profilini oluşturur.

Kesici uçlar normal olarak tungsten karbür esaslıdır ve özel bir kesme açıları vardır. Bu özel yapı onlara hızlı kesme ve uzun süre dayanım imkânı sağlar. Bunların 4 kenarı da kesici olmakla birlikte, bir yüzey körlendiğinde diğer yüzey kolaylıkla devreye alınabilmekte ve böylece uzun bir kullanım ömrü sağlanmış olmaktadır. Daha sert mermerlerde strapax veya benzeri uçlar kullanılır.



Şekil 6. Bir zincirli kesme makinesinde kullanılan keski seti ve keski seti görünüşü (Candemir, 2021)



Şekil 7. Kesme açısı ve temizleme açısı

5. ZİNCİRLİ KESME MAKİNELERİ İLE İLGİLİ PERFORMANS ÇALIŞMALARI

Kazı mekaniği prensiplerine göre bir kazı/kesme makinesinin performansını belirlemek için arazide kesim yapılırken kazıcının net ilerleme hızı değeri belirlenerek bir verimlilik değerlendirmesi yapılır. Bu değer kazı makinelerinde spesifik enerji değeri kullanılarak bulunduğu gibi makinenin kazdığı/kestiği alan ve bu alanı ne kadar sürede kestiği gibi bilgiler ile de bulunabilmektedir. Herhangi bir kazı/kesme makinesinin net kazı/kesme hızı aşağıdaki Eşitlik 1 ile hesaplanabilir (Rostami ve ark., 1994).

$$NCR = k \cdot P_{\text{cutting}} / SE \quad (1)$$

Burada;

NCR: Net (sadece kazı/kesme yapılan zaman içindeki) kazı hızı (m^3/h)

P_{cutting} : kazı makinesinin kesme gücü (kW)

SE: optimum spesifik enerji (MJ/m^3)

k: kazı makinesinin tipine bağlı olarak keski ile kayaç arasındaki güç iletim katsayısıdır.

Zincirli kesme makinelerinin net kesme hızı ise toplam kesilen alanın kesimde geçen süreye bölünmesiyle hesaplanmaktadır ($m^2/saat$). Bunun yanında Çopur (2010) ve Tumatic (2014) yaptıkları çalışmalarda arazi ölçümlerinden elde edilen veriler ile zincirli kesme makinelerinin performansını belirlemek için iki ayrı eşitlik önermişlerdir. Bunlardan ilki zincirli kesme makinesi penetrasyon indeksi (CSPI) değeridir. Bu değer Eşitlik 2 ile hesaplanmaktadır.

$$CSPI = W \cdot H / UCS \quad (2)$$

Burada;

CSPI: zincirli kesme makinesi penetrasyon indeksi (m^3)

W: Zincirli kesme makinesinin ağırlığı (ton)

H: Faydalı kesme uzunluğu (m)

UCS: Kesilen doğal taşın tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

İkinci performans değeri ise yine Çopur (2010) tarafından önerilen zincirli kesme makinesi alansal net kesme hızı (ANCR) değeridir (Eşitlik 3).

$$ANCR = NCR / T [0.3(P_{\text{cutting}} / 1.3SE)] / T \quad (3)$$

Burada;

ANCR: Zincirli kesme makinesi alansal net kazı hızı (m^2/h)

$P_{cutting}$: Kesme sırasında kayıt edilen zincirli kesme makinesinin doğal taş kesmek için harcadığı güç (kW)

SE: Spesifik enerji değeri (kWh/m^3)

T: Kesme kolunun kalınlığı veya zincir genişliği (m) olarak tanımlanır (üretici firmaya bağlı olarak 42 mm ya da 38 mm olabilmektedir)

Zincirli kesme makinelerinin kazı performanslarının, ocağın fizibilite aşamasında bilinmesi önemlidir. Kesilecek kayanın fiziksel ve mekanik özelliklerine uygun makine seçimi maliyet açısından dikkat edilmesi gereken önemli parametrelerin başında gelmektedir. Bir zincirli kesme makinesinin performansı kayanın özelliklerine, makine özelliklerine ve ocağın işletme parametrelerine bağlıdır. Önceki çalışmalarda bu parametrelerin bazılarının kazı performansı üzerine olan etkileri incelenmiş ancak zincirli kesme makinelerinin performanslarının tahminine yönelik çok fazla çalışma bulunmamaktadır.

Zincirli kesme makinesi üreten firmalar genellikle standart modeller üretirler. Makineyi kullanan madenciler bu standart makineyi her özellikteki traverten, mermer vb doğal taşların kesimi için kullanırlar. Halbuki kazı mekaniği bilim dalında bilindiği gibi, kayaç özellikleri değiştikçe optimum kesme şartları da değişir. Dolayısı ile değişik doğal taş türleri için değişik keski dizilim tasarımları gerekmektedir. Literatürde, zincirli kesme makinelerinin performansları ile ilgili yapılmış çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Dalziel (1967) çalışmasında zincirli kesme makinelerinin temelini oluşturan ve kömür madencilğinde kullanılan potkapaç makinelerinin tasarım parametrelerini incelemiştir. Mellor (1976) çalışmasında sonsuz halat olarak çalışan kazı sistemlerinin (zincirli kesici, potkapaç, trencher, dredger vs) tasarım parametrelerini kinematik açıdan incelemiştir.

Mancini ve ark. (1992, 1994) jeostatistiksel yöntem kullanarak zincirli kesme makinelerinin performansı üzerinde etkili olan kaya özellikleri, makine ve işletme parametrelerini incelemişlerdir. Bu çalışmada doğal taşta ait Knoop sertliği değerleri kullanılarak kesici kol üzerine etkileyen kuvvetleri tahmin edilmeye çalışılmış ve bir jeostatistiksel olarak değişimine bağlı olarak model geliştirmişlerdir.

Mancini ve ark. (2001), arazi çalışmaları ve ölçümleri yaparak zincirli kesme makinelerinin performansını incelemişlerdir. Performans parametreleri olan net kesme hızı ve kesici aşınmasına etkileyen doğal taş özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır.

Deketh ve ark. (1998), zincirli kesme makinelerine benzeyen kanal kazı makinelerinin kazı hızları ve keski tüketimlerine tahmin etmeye yönelik bir araştırma yapmışlardır.

Başka bir çalışmada bir doğal taş ocağına sadece bir zincirli kesme makinesinin eklenmesi ile ocağın genel verimliliğinin yaklaşık %20 oranında arttığı belirtilmiştir. Bunun temel nedenleri, zincirli kesme makinelerinin blok üretiminde daha düzgün yüzeyli daha kaliteli ürün ortaya çıkarması, yeni bir basamak oluşturulurken yatay veya düşey kesim yapabildikleri için ilk basamak kesiminde kolaylıkla giriş yapabilme özelliğine sahip olmaları olarak belirlenmiştir. Ve bu özellikleri sayesinde telli kesme yönteminde yapılan üçgen parça kesme işlemini ortadan kaldırarak üretim kayıplarını azalttığı belirtilmiştir (Çopur ve ark., 2006).

Demirel (2008) yaptığı çalışmada kendi ürettikleri zincirli kesme makinesinin, Denizli Kaklık/Kocabaş traverten ocaklarında denemelerini yapmışlar ve elde edilen sonuçları değerlendirmişlerdir. Buna göre bu çalışmada doğal taş ocaklarında en çok tercih edilen blok üretim yöntemlerinden olan telli kesme yöntemine alternatif olacak zincirli kesme yönteminin uygulamalı olarak ön çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışma ile zincirli kesme makinelerinin daha kaliteli ve daha hızlı blok üretimi yapabildiğini telli kesme yöntemi ile karşılaştırılarak açıklamışlardır. Zincirli kesme yönteminin blok üretim verimliliğini arttırdığını, blok üretim maliyetlerini birim zamanda azalttığını ve daha kaliteli ürün ortaya koyduğu belirtmişlerdir.

Yeşilkaya ve ark. (2009) Denizli-Kaklık civarındaki traverten ocaklarında yaptıkları çalışmada zincirli kesme makinelerinin avantajlarından bahsetmişlerdir. Buna göre zincirli kesme yönteminin daha emniyetli ve daha az iş gücüne ihtiyaç duyduğu, telli kesme yöntemindeki tel kısaltma ve delik delme masraflarının olmayışı ve blok üretiminde daha az kayıpların olduğunu belirtmişlerdir.

Sarıışık ve Sarıışık (2010), Denizli Kaklık/Kocabaş traverten ocağında yerli üretim olan ve yeni geliştirilen zincirli kesme makinesinin denemesinin sonuçlarını analiz etmişlerdir. Bu çalışma sonucunda zincirli kesme makinesinin elmas tel kesme yöntemine bir alternatif olduğu ve çeşitli avantajlarının olduğunu belirtmişlerdir. Buna göre zincirli kesme makinesi doğal taş ocağında blok üretim verimliliğini ve kalitesini artırmaktadır. Zincirli kesim yönteminde blokların üretiminde çatlak oluşma riski yoktur. Bu durumun doğal taş blok verimliliğinde önemli bir artışa neden olmuştur. Zincirli kesme makinesinin diğer blok kesme yöntemlerine göre hem montajı hem de çalıştırılması daha kolaydır. Bu süreç, özellikle traverten ocaklarında ve diğer tüm doğal taş ocaklarında aynı zaman diliminde daha fazla sayıda ve daha düşük maliyetle blok üreti-

mi ile sonuçlanmıştır. Zincirli kesme makinesinin üretim hızı, telli kesme yöntemiyle karşılaştırıldığında 3 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir. Zincirli kesme makinesi ile blok üretiminde tüm işlemlerin %30 daha az işçi kullanılarak yapılabildiği vurgulanmıştır. Ayrıca elmas tel kesim işleminde gerekli olan tüm hafriyat işleri ortadan kalkmıştır. Sonuç olarak ise blok verimliliğinin elmas tel kesme yönteminde % 7-14 olduğu ve bu oran zincirli kesme makinesi ile % 65-80 oranına yükseldiği belirtilmiştir.

Çopur (2010), zincirli kesme makinelerinin performans ile ilgili yaptığı araştırmada laboratuvarında değişik yanal açılara sahip kama tip keski kullanarak doğal taşlara üzerinde küçük boyutlu doğrusal kesme deneyleri yaparak spesifik enerji değerini belirlemiş ve arazide makine kesim yaparken kullanılan kesme şartları ve bazı makineye ve kesilen doğal taşta ait özellikleri kullanarak zincirli kesme makinelerinin alansal net kazı hızlarının tahmini ve optimizasyonu için deterministik bir model geliştirmiştir.

Çopur ve ark. (2011a), zincirli kesme makinesinin performans tahmini ve kullanım şartları ile ilgili yaptıkları diğer bir araştırmada doğal taş ocaklarında zincirli kesme makinesi ile kesimler yapılırken arazide doğal taşta, zincirli kesme makinesine ve kullanılan kesme şartlarına ait bazı veriler elde ederek bir tahmin modeli oluşturmuşlardır. Ayrıca laboratuvarında doğal taş ocaklarından temin edilen kaya örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini ve kama tip keski kullanarak küçük boyutlu kesme setinde doğrusal kesme deneyleri yaparak spesifik enerji değerini elde etmişlerdir. Bu yaptıkları laboratuvar ve arazi çalışmaları sonucunda iki değişik görgül model önermişlerdir. Bu modellerden birincisinde doğal taşın tek eksenli basınç dayanımı, makine ağırlığı ve kesici kolun faydalı kesme uzunluğu gibi parametreleri kullanarak zincirli kesme penetrasyon indeksi modelini ortaya koymuşlardır. Diğer modelde ise, yardımsız kesme deneyleri ile bulunan spesifik enerji değeri, kesme kolunun kalınlığı veya zincir genişliği ile kesme için harcanan güç değeri parametrelerinden alansal net kazı hızı modelini ortaya koymuşlardır.

Çopur ve ark. (2011b) yaptıkları diğer bir çalışmada zincirli kesme makinelerinin performansını tahmin için görgül bir model önermişlerdir. Bu çalışmada deneysel ve arazide yapılan çalışmalar sonucunda zincirli kesme makinelerinin alansal net kazı hızını tahmin için spesifik enerjiyi kullanmışlardır. Sonuçta geliştirilen bu görgül model yardımı ile alansal net kazı hızlarının güvenilir bir şekilde önceden tahmin edilebileceğini öne sürmüşlerdir.

Tumaç (2014), yaptığı çalışmada zincirli kesme makinelerinin performansının tahmini için geliştirilen alansal net kazı hızı ile zincirli kesme penetrasyon indeksi modellerini kayaçların Shore sertliği değerlerini kullanarak tahmin etmeye çalışmıştır.

Çelik ve ark. (2017), telli kesme yöntemi ile zincirli kesme yöntemini makinelerin kullanım şekli, delme/kesme hızları, sarf malzemesi tüketimleri, harcanan iş gücü ve iş güvenliği gibi verileri değerlendirerek karşılaştırmasını yapmışlardır. Isparta-Senirkent civarındaki bir kireçtaşı (bej mermer) ocağında yapılan bu araştırma sonucunda, doğal taş ocaklarında zincirli kesme makinelerinin kullanımının delme faaliyetleri azaltması, yüksek kesme hızı, iş güvenliği, daha az sarf malzeme tüketiminden dolayı ekonomikliği, gerekli iş gücünü azaltması ve daha az atık çıkması nedeniyle gibi birçok avantajından dolayı blok çıkartma faaliyetlerinin verimini arttırdığını belirtmişlerdir.

Dursun (2018), zincirli kesme makinelerinin performansının tahmini için geliştirilen zincirli kesme penetrasyon indeksi modelini tahmin için kayaçların Schmidt çekici sertliği değerini kullanarak bir performans tahmini yapmaya çalışmıştır. Buna göre; zincirli kesme penetrasyon indeksi değerinin tahmini için Schmidt çekici sertliği değerine dayanan modelin geçerli ve güvenilir olduğu istatistiksel olarak belirlenmiştir.

Çalışkan ve Yavuz (2019) yaptıkları çalışmada zincirli kesme makinelerinin kullanıldığı 4 farklı doğal taş ocağında makinelerin performanslarını araştırmışlardır. Ocaklarda makineler kesim yaparken kesilen alan ve kesme süreleri kayıt altına alınmış ve birim zamanda kesilen yüzey alanları hesaplanmıştır. Makineler ile ilgili çeşitli parametreler değiştirilerek en uygun çalışma parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Candemir (2021) yaptığı çalışmada zincirli kesme makinelerinin kullanıldığı 3 farklı doğal taş ocağında ocakta performans ölçümleri yapmıştır. Yapılan arazi ölçümleri sonucunda kullanılan bir güç analizörü yardımıyla makineler kesim yaparken bazı elektriksel parametreler kayıt altına alınmış ve zincirli kesme makinelerinin kayacı keserken harcadığı elektriksel güç ve enerji değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra makinelere ait çeşitli kesme şartlarında net kesme hızı ve güç tüketimi değerleri belirlenmiştir. Elde edilen bu performans ölçümleri neticesinde kayıt edilen elektriksel parametreler kullanılarak uygulanan kesim şartları bağlı olarak kesme veriminin ve kesme performansının en önemli göstergelerinden olan spesifik kesme enerjisi hesaplanmıştır. Ayrıca ocaklarda yapılan ölçümler sonucunda zincirli kesme makinelerinin kesme verimliliğinin belirlenmesinde kullanılan net kesme hızı, zincirli kesme makinesi penetrasyon indeksi ve zincirli kesme makinesi alansal net kesme hızı değerlerinde makinelerin performans değerleri olarak hesaplanmıştır.

6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER

Ülkelerin gelişmesi ve kalkınmasında yer altı maden kaynaklarının bilimsel metotlarla üretilmesi hayati önem taşımaktadır. Gelişmiş ülkelerin kalkınmasında, bu kaynakların verimli olarak işletilmesi yatmaktadır.

Çünkü hayatı aktif hale getiren unsurların çoğunu madenler oluşturmaktadır. Ülkemizde son yıllarda doğal taş madenciliğine doğru artan talepler nedeniyle dünya da diğer madencilik şirketleri ile rekabet edebilmek ve doğal taş madenciliğinde daha verimli, ucuz ve hızlı blok üretimi yapabilmek için yeni üretim yöntemleri ve makineleri kullanmak kaçınılmaz olmuştur.

Ülkemiz jeolojik özellikleri nedeniyle doğal taş bakımından zengin bir rezerve sahiptir. Ancak bu doğal taşların amacına uygun ve bilimsel yöntemlere dayalı bir şekilde üretimi yapılamamaktadır. Ülkemizde ve dünyada yapı malzemesi olarak doğal taşlara olan talebin artması nedeniyle sektörün bu artan talebe karşılık verebilmesi için hızlı bir şekilde kırıksız ve çatlaksız blok üretimi yapması gerekmektedir. Çoğu ülkede teknolojik gelişmelere bağlı olarak yeni doğal taş üretim makineleri ve üretim yöntemleri kullanılarak daha hızlı ve kaliteli blok üretimi yapılmaktadır. Doğal taş madenciliğinde yaşanan bu gelişmeler ile birlikte son yıllarda ülkemizde de yeni yöntemler yavaş yavaş yerini almaya başlamıştır. Bunun için doğal taş ocaklarında hızlı, kaliteli ve sürekli blok üretimi yapabilmek ve ocağın verimliliğini arttırmak için eski yöntemlere ve şuan aktif olarak en çok tercih edilen tel ile kesme yönteminin yerine, zincirli kesme makineleri yeni bir yöntem olarak kullanılması önem arz etmektedir.

Yapılan araştırmalarda zincirli kesme makinesi ile elmas telli kesme makinesinin hızlı ve kaliteli blok üretimi, kesme performansı, ocak çalışma şartları ve iş güvenliği, üretim verimliliği, su kullanımı ve işletme giderleri gibi bazı yaygın faktörler bakımından karşılaştırması yapıldığında zincirli kesme makinesinin avantajlı olduğu belirtilmiştir.

Zincirli kesme makineleri ile hem yatay hem de dikey kesim yapılarak direk satılabilir ürün elde edilmesi ile üretim ve zaman kaybının azaltılması, daha düzenli bir çalışma ortamı sunmaları ve insan sağlığı açısından daha az toz ve atık çıkarmaları gibi avantajlarından dolayı diğer doğal taş üretim yöntemlerine göre kullanılmaları hem maliyet hem de iş sağlığı ve güvenliği açısından daha uygun olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Candemir, İ., 2021. Doğal Taş Ocaklarında Kullanılan Zincirli Kesme Makinelerinin Kaya Özelliklerine Bağlı Performans Tahmini. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. Konya, 119 s. (Tez danışmanı: Doç. Dr. Arif Emre DURSUN).
- Çalışkan, M.A Yavuz, H., 2019. Mermer ocaklarında kullanılan zincirli kesme makinelerinin performansının araştırılması, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt 23, Özel Sayı, 108-118.
- Çelik, M. Ersoy, M. Yeşilkaya, L. Kayı, Z., 2017. Mermer ocaklarında elmas tel kesme ve zincirli kollu kesme makinelerinin birlikte kullanımının incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 20(2), 459-473.
- Copur, H. Balci, C. Bilgin, N. Tumac, D. Feridunoglu, C. Dincer, T. Serter, A., 2006. Cutting performance of chain saws in quarries and laboratory. *Proc. 15th Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection*, Torino-Italy, Sep.20-22. pp. 1324-1329.
- Çopur, H. Balcı, C. Bilgin, N. Tumaç, D. Düzyol, İ., 2007a. Full-scale linear cutting tests towards performance prediction of chain saw machines, *Proc. 20th Int. Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET2007*, TMMOB The Chamber of Mining Engineers of Turkey, Ankara, 6-8 June. Editors: C. Karpuz, M.A. Hindistan, E. Tercan. ISBN 978-9944-89-288-9, pp. 161-169.
- Çopur, H. Balcı, C. Bilgin, N. Tumaç, D. Düzyol, İ. Kekeç, N., 2007b. Doğal taş madenciliğinde kullanılan zincirli kesme makinelerinin performansı”. *1. Maden Makinaları Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Dumlupınar Üniv., Kütahya, Editör: C. Şensöğüt. ISBN 978-9944-89-277-3, 10-12 Mayıs. ss. 37-46.
- Çopur, H. Bilgin, N. Balcı, C. Tumaç, D., 2008. Doğal taş madenciliğinde kullanılan zincirli kesme makinelerinin kazı performanslarının optimizasyonu, TÜBİTAK Rapor No 105M017, 224s.
- Copur, H., 2010. Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines, *Int J Rock Mech Min Sci*, 47(1):104-120.
- Çopur, H. Balcı, C. Tumaç, D. Bilgin, N., 2011a. Field and laboratory studies on natural stones leading to empirical performance prediction of chain saw machines, *Int J Rock Mech Min Sci*, 48(2), 269-282.
- Çopur, H. Balcı, C. Bilgin, N. Tumaç, D. Avunduk, E., 2011b. Zincirli kesme makinelerinin performans tahmini için görgül bir model, *3. Maden Makinaları Sempozyumu*, 05-06 Mayıs, İzmir, Türkiye, 55-65.
- Dalziel, J.A., 1967. Coal cutting research-Friction and blunting: their effects on the performance of a model cutter jib, *Colliery Engineering*, pp. 476-486.

- Deketh, H.J.R. Grima, M.A., 1998. Towards the prediction of rock excavation machine performance, *Bull Eng Geol Env*, No. 57, pp. 3-15.
- Demirel, Ş., 2008. Mermer ocaklarında kollu zincirli kesme makinesinin uygulanabilirliği, *1. Ulusal Mermer ve Doğaltaşlar Kongresi*, 1-2 Şubat, İzmir, 187-196.
- Dursun, A.E., 2018. Performance prediction of chain saw machines using Schmidt hammer hardness, *Scientific Mining Journal*, 57(1), 25-33.
- Fantini, 2015. Fantini testere kesme makineleri ürün katalogu. <https://www.fantinispa.it/wp-content/uploads/2015/05/brochure-serie70.pdf> [Ziyaret tarihi: 3 Nisan 2021]
- Gündüz L., Sentürk, A., Tosun, Y.I., Sarıışık, A., 1995. Mermer Teknolojisi, Tugra Offset, 245s, Isparta.
- Hanecioğlu, B., 2006. Pilot model elmas telli kesme makinesinde bazı makine parametrelerinin incelenmesi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. Ankara, 83 s.
- Karaca, Z., 2007. Mermer ocaklarında kullanılan kollu kesme makinaları, *Türkiye 1. Maden Makinaları Sempozyumu*, Editör: C. Şensöğüt, 10-11 Mayıs, ss.3-11.
- Karahan, D.S., 2018. Dünyada ve Türkiye’de Doğal Taşlar Raporu. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etüt Dairesi Başkanlığı, Ankara, 40 s.
- Kulaksız, S., 2012. Madencilikte Çevre Yönetimi Semineri. Afyon, 69 s.
- Mancini, R. Cardu, M, Fornaro, M., Linares, M. Peila, D., 1992. Analysis and simulation of stone cutting with microtools, *Proc. III. Geoengineering Congress, Rock Excavation: The Future and Beyond*, 1-2 Dec., Torino, Italy, pp. 227-236.
- Mancini, R. Linares, M. Cardu, M. Fornaro, M. Bobbio, M., 1994. Simulation of the operation of a rock chain cutter on statistical models of inhomogenous rocks, *Proc. Mine Planning and Equipment Selection*, Eds. Pasamehme-toglu et al., Istanbul, Turkey, October, pp. 461-468.
- Mancini, R. Cardu, M. Fornaro, M. Toma, C.M., 2001. The current status of marble chain cutting, *Proc. Mine Planning and Equipment Selection*, New Delhi, India, pp. 151-158.
- Mellor, M., 1976. Mechanics of cutting and boring, *Part 3: Kinematics of continuous belt machines*, CRREL (US Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire), Special Report, 76-17.
- Özdamar, A., 2001. Mermercilik Sektörünün Türkiye Ekonomisindeki Yeri ve Bucak Uygulaması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 53 s.
- Primavori, P., 2006. Uses of the chain saw, *Marmo Mach Int*; 53:80-102.

- Rostami, J. Ozdemir, L. Neil, D.M., 1994. Performance prediction: A key issue in mechanical hard rock mining, *Min Eng*, Nov., Vol. 11, pp. 1263-1267.
- Sarıışık, A. Demirel, Ş. Şimşek, A. Sarıışık, G., 2009. Kollu zincirli kesicilerin traverten ocaklarında blok üretimi verimlilik analizi, *Türkiye 2. Maden Makinaları Sempozyumu*, Editör: Bilir, M.E ve Ekmekçi, B., 04-06 Kasım, ss.131-144.
- Sarıışık, A., Sarıışık, G., 2010. Efficiency analysis of armed-chained cutting machines in block production in travertine quarries, *J of South African Inst of Min Met*, 110(8), 473-480.
- Tumac, D., 2014. Predicting the performance of chain saw machines based on shore scleroscope hardness, *Rock Mech Rock Eng*, 47:703-715
- Yeşilkaya, L. Ersoy, M. Çelik, M. Çatalpınar, A. 2009. Kaklık-Denizli traverten ocağında zincirli kollu kesicinin kullanımının araştırılması, *Madencilik Dergisi*, 48(3), 33-43.
- Yüzer, E., 2003. Doğal Taş, Stone 2003-Doğal Taş ve Endüstrisi Katalogu, İstanbul, 301 s.



BÖLÜM 10

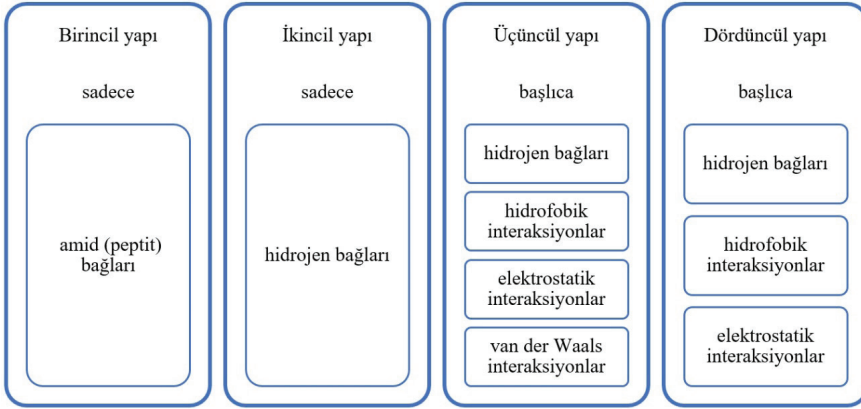
GIDA KAYNAKLI OPIOİD PEPTİTLER

Seval ANDIÇ¹

¹ Prof. Dr., Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Van-Türkiye, e-posta: sevalandic@yyu.edu.tr (ORCID ID: 0000-0002-8306-0222)

GİRİŞ

Proteinler biyolojik sistemlerin vazgeçilmez bileşenleridir. Tek hücrelilerden yüksek memelilere kadar tüm canlıların yapısında bulunur (Whitford, 2005). Bu vazgeçilmez önemi vurgulamak için, Protein kelimesi yunanca birincil, ilk sırada gelen anlamlarına sahip “proteois” kelimesinden türetilmiştir. Proteinler temelde 20 farklı amino asit içerirler. Ancak bu aminoasitler çeşitli kimyasal bağ ve etkileşimlerle bir araya gelerek ve yapı içerisinde birden çok sayıda tekrarlanarak biyopolimer yapılar olan proteinleri meydana getirirler. Böylece 20 amino asidin dizilişine bağlı olarak milyarlarca eşsiz protein yapı oluşur. Aminoasitler kovalent amid (peptit) bağlarıyla peptitleri, peptitler ise çeşitli kimyasal bağ ve etkileşimlerle (hidrojen bağları, disülfid bağları, hidrofobik interaksiyonlar, elektrostatik interaksiyonlar, van der Waals interaksiyonlar, sterik gerilmeler) üç boyutlu yapı kazanarak proteinleri oluştururlar (Şekil 1) (Damadaron, 1996; Whitford, 2005).



Şekil 1. Proteinlerde yapının oluşmasında rol alan bağ ve interaksiyonlar

Proteinler canlı hücrelerinin yapıtaşlarıdır. Ayrıca tüm canlılar için enerji kaynakları arasında yer alırlar. Biyolojik sistemlerde proteinler, enerji kaynağı olmanın yanında ve ötesinde, katalizleme, taşıma, depolama, koruma (toksin ve alerjenler), vücuda mekanik destek sağlama, sinir impulslarının ortaya çıkması ve iletimi ve başkalaşım ve büyümenin meydana gelmesi gibi canlılar için hayati işlevleri de yerine getirirler (Şekil 2) (Damadaron, 1996; Whitford, 2005).

Katalizör proteinler	• enzimler
Yapısal proteinler	• kollojen, elastin, keratin
Kontraktıl	• miyosin, aktin, tubulin
Düzenleyici proteinler	• hormonlar
Taşıyıcı proteinler	• serum albumin, transferrin, hemoglobin
Antikorlar	• immunoglobulinler
Depo proteinleri	• yumurta albümini, tohum proteinleri
Koruyucu proteinler	• toksin ve alerjenler

Şekil 2. Proteinlerin biyolojik fonksiyonları

Bitkiler kendi proteinlerini inorganik kaynaklardan sentezleyebilme yeteneğindedirler. Ancak insanlar inorganik kaynaklardan proteinlerini sentezleyemezler. Bunun için gerekli olan azotu bitkisel ve hayvansal kaynaklardan karşılarlar. İnsanlar diyetleri ile protein/peptit/amino asit almak zorundadırlar. Pratikte biyolojik olarak üretilen tüm proteinler insanlar için gıda proteini olarak değerlendirilebilmektedir. Ancak bir proteinin gıda proteini olarak değerlendirilebilmesi için kolayca sindirilebilmesi, toksik olmaması, besinsel olarak yeterli olması ve bol miktarda bulunması gerekmektedir. Proteinlerin enerji kaynağı olma dışında, yerine getirdikleri diğer fonksiyonları için miktarlarından ziyade kaliteleri önemlidir. Hayvansal ve bitkisel kaynaklardan elde edilen proteinlerin kalitesini belirlemede kullanılan ölçütler ise amino asit kalitesi ve sindirilebilirliktir. (Damadon, 1996). Yüksek kaliteli proteinler, FAO/WHO/UNU referans seviyelerinden daha yüksek seviyelerde tüm temel amino asitleri içeren ve yumurta akı veya süt proteinlerinden daha iyi sindirilebilir proteinlerdir. (FAO, 2011; WHO, 1985).

BİYOAKTİF PEPTİTLER

Proteinler çok önemli biyolojik fonksiyonları yanında birçok gıdanın besin kalitesi, duyuşsal ve yapısal özellikleri gibi kalite kriterleri üzerinde de önemli düzeyde etkilidir. Gıda proteinleri tüm bu önemli işlevlerine ilave olarak sağlık üzerinde etkili olabilecek bir takım peptitleri de yapılarında bulundurlar. Bu protein parçaları biyoaktif peptitler olarak isimlendirilir. Biyoaktif peptitler vücut işlevleri ve kondüsyon üzerinde etkileri olan ve sağlığı etkileyebilecek protein parçaları olarak tanımlanabilir. Aktiviteleri

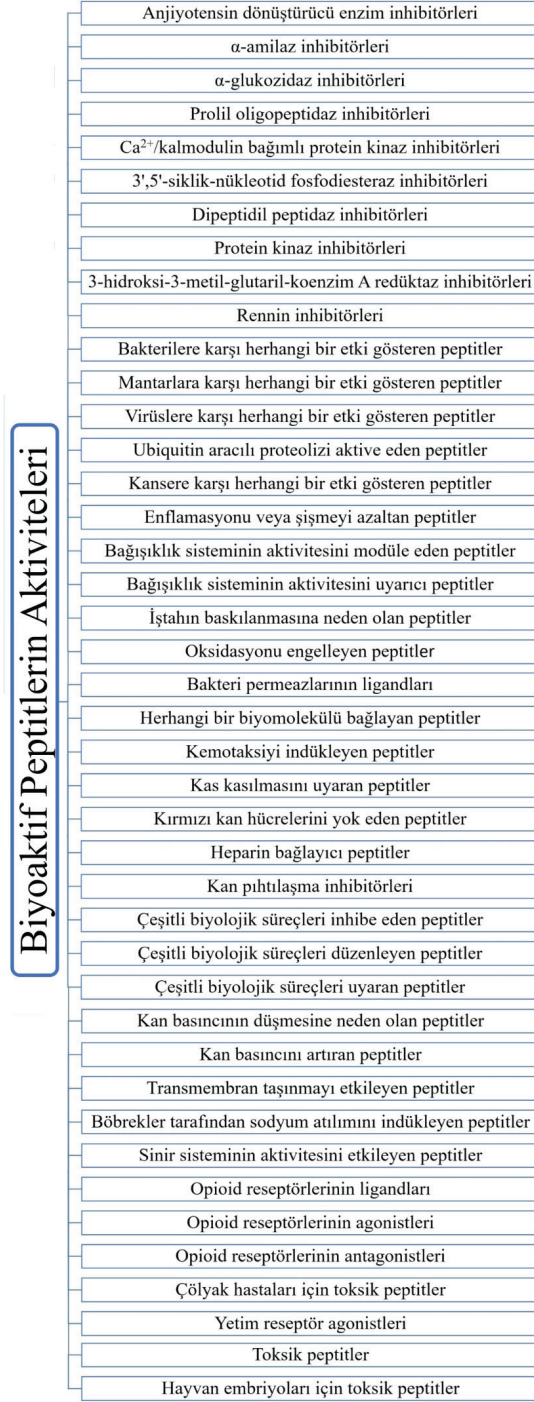
yapılarındaki aminoasitlerin diziliş ve kompozisyonuna bağlıdır (Shahidi ve Zhong, 2008; Sánchez ve Vázquez, 2017; Daliri ve ark., 2017)

Biyoaktif peptitler amid (peptit) bağları ile bağlanmış aminoasitleri içeren kısa zincirli yapılardır ve yapılarındaki amino asit sayıları 2-50 arasında değişkenlik gösterebilir (Moller ve ark., 2008; Pihlanto-Leppälä, 2000). Protein yapılarına kodlanmış olan bu peptitler, protein yapılarından serbestleşemedikleri sürece aktivite gösteremezler. Aktif olabilmeleri, bir yolla protein yapıdan ayrılmalarına bağlıdır. Bu peptitler gıdaların sindirimi sırasında öncü proteinlerinden sindirim enzimleri vasıtasıyla serbestleşirler. Ayrıca serbestleşme proteolitik enzimler ve/veya bitki veya mikroorganizma kaynaklı enzimler aracılığı ile de olabilir (Korhonen ve Pihlanto, 2006).

Son yıllarda tüketici bilinci eğitim, kitle iletişim araçlarının çeşitliliği ve yaygınlığı, uzun ve sağlıklı yaşama isteği gibi birçok faktöre bağlı olarak artmakta ve insanlar sağlıklı gıdalara yönelmektedir. Bilinçli tüketiciler gıda tercihlerini lezzet, doyuruculuk, besin değeri, görünüş gibi faktörlerden ziyade, sağlık üzerindeki etkilerini temel alarak yapmaktadırlar. Artan bu bilinç ve yönelim fonksiyonel gıda ve nutrasötik pazarının her geçen yıl daha da hızlı büyümesine neden olmaktadır. Biyoaktif peptitler hem gıdaların fonksiyonel değerinin belirlenmesinde hem de artırılmasında önemli gıda bileşenleridir. Protein içeren gıdaların çoğu biyoaktif peptitler için iyi kaynaklardır ancak en iyi biyoaktif peptit kaynakları süt ve süt ürünleridir. Hayvansal ürünlerden sığır kanı, jelatin, et, yumurta ile ton, sardalya, ringa ve somon balıkları da biyoaktif peptit kaynakları arasında sayılabilir (Choi ve ark., 2012; Korhonen, 2009; Lassoued ve ark., 2015; Léonil, 2014; Meisel ve Bockelmann, 1999; Mohanty ve ark., 2016; Mohanty ve ark., 2015; Pritchard ve ark., 2010; Przybylski ve ark., 2016; Torres-Llanez ve ark., 2005). Bitkisel biyoaktif peptit kaynakları arasında ise buğday, mısır, soya pirinç, mantarlar, balkabağı, sorgum, amarant, kırmızı deniz yosunu, kolza tohumu, mercimek, patates ve susam sayılabilir (Admassu ve ark., 2018; García-Mora ve ark., 2016; He ve ark., 2019; Kumagai, 2010; Lu ve ark., 2018; Moller ve ark., 2008; Selamassakul ve ark., 2016; Singh ve ark., 2014; Xu ve ark., 2018). Biyoaktif peptitler ayrıca kimyasal sentez yoluyla da elde edilebilirler (Shwaiki ve ark., 2019).

Biyoaktif peptitler hem gıdalarda hem de vücut işlevleri üzerindeki etkileri nedeniyle yeni nesil biyolojik aktif düzenleyiciler olarak kabul edilirler. Antimikrobiyel ve antioksidan özellikleri nedeniyle gıdalarda mikrobiyel ve oksidasyona bağlı bozulmaları önleyebilmektedirler. Biyoaktif peptitler çeşitli aktiviteleri ile sindirim, endokrin, kardiyovasküler, bağışıklık ve sinir sistemi üzerinde etki ederek vücut işlevlerini ve sağlığı etkilerler. Bu özelliklerine bağlı olarak bu bileşenler üzerinde çok sayıda çalışma yapılmış ve BIOPEP-UWM veri tabanında 4500 den fazla biyoaktif peptit raporlanmıştır. Buradan elde edilen bilgilere dayanılarak, biyoaktif peptitle-

rin aktiviteleri şekilde 3'de verilmiştir (Minkiewicz ve ark., 2019).



Şekil 3. Bioaktif peptitlerin çeşitli aktiviteleri

Biyoaktif Peptitlerin Üretimi

Biyoaktif peptitler gıda proteinlerinin yapısında kodlanmış ve protein yapısından hidrolize olmadıkları sürece inaktif olan protein parçalarıdır ve gıdaların sindirimi sırasında, proteolitik sindirim enzimlerinin faaliyeti sonucunda açığa çıkarlar. Biyoaktif peptitler endojen ve ekzojen olmak üzere 2 gruba ayrılırlar. Endojen peptitler vücutta bazı hücre veya bezlerde üretilirler. Ekzojen peptitler ise vücuda dışarıdan gıda, gıda takviyeleri ve/veya ilaçlar yoluyla alınır. Biyoaktif peptitler oldukça güvenli ve hipoalerjenik olmalarının yanında biyoyararışlılıkları da proteinlerden daha fazladır ve gıda hormonları olarak adlandırılırlar (Bhandari ve ark., 2019; Michalek ve ark., 2019; Teschemacher, 2003; Zhang ve ark., 2020). Vücut işlevleri üzerinde çok sayıda etkisi olduğu kanıtlanan biyoaktif peptitler vücutta sindirim sırasında üretilmenin dışında, başka bir takım yöntemlerle de üretilmekte (Şekil 4) ve fonksiyonel gıda, bebek gıdaları, ilaç ve kozmetik ürünlerin üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Akbarian ve ark., 2022; Arulrajah ve ark., 2020; Fideler ve ark., 2019; Jakubczyk ve ark., 2019; Losurdo ve ark., 2013; Mirzaei, 2019; Okasha ve Samir, 2020; Sánchez ve Vázquez, 2017; Wu ve ark., 2017; Zhao ve ark., 2021; Zlotek ve ark., 2020).



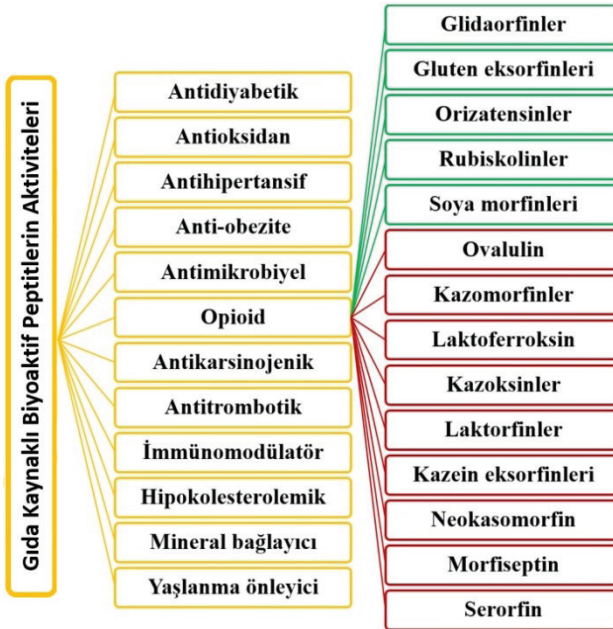
Şekil 4. Ekzojen biyoaktif peptitlerin üretimi

Opioid Karakterli Biyoaktif Peptitler

Opioid terimi, fizyolojik etkiler üretmek için opioid reseptörleri ile birleşen ve nalokson tarafından stereospesifik olarak antagonize edilen, yarı sentetik ve sentetik ilaçlar için genel bir terimdir. Klinik amaçlar için, opioidler reseptör etkileşimlerine göre agonist, kısmi agonist, agonist-an-

tagonist ve antagonist olarak sınıflandırılabilir (Cherny, 1996). Opioidler içinde agonist etkili olanlar çoğunluğu teşkil eder ve bunlar etkilerini opioid reseptörlerini uyararak yaratırlar. Antagonistler ise opioid reseptörlere bağlanarak agonist veya kısmi agonistlerin reseptörle etkileşimlerini engellerler (Denizbaşı ve ark., 2019; Trescot ve ark., 2008). Endojen opioid reseptör ligandlarının çoğu peptit yapısındadır ve bunların çoğu da agonist olarak davranış gösterirler. Endojen opioid reseptör ligandlarının çoğunun peptit yapısında olması, gıda kaynaklı proteinlerden elde edilen peptitlerin de muhtemel opioid adayları olarak düşünülmesine ve araştırılmasına yol açmıştır.

Hayvansal ve bitkisel proteinlerden kaynaklı yüzlerce biyoaktif peptit bulunmaktadır. Bu peptitlerin antidiyabetik, antioksidan, antihipertansif, anti-obezite, antimikrobiyel, antikarsinojenik, antitrombotik, immünomodülatör, hipokolesterolemik, mineral bağlayıcı ve yaşlanma önleyici aktivitelerinin olduğu birçok çalışmayla kanıtlanmıştır. Gıda proteinleri kaynaklı biyoaktif peptitler içerisinde opioid özellik gösterdiği tespit edilen çok sayıda peptit de mevcuttur. Gıda kaynaklı opioid peptitler hayvansal ya da bitkisel kaynaklı olabilirler. Bunlar arasında kazein kaynaklı kazomorfinler, gluten kaynaklı gliadorfinler, soya proteini kaynaklı soya morfinleri ve yumurta proteini kaynaklı ovalulin sayılabilir (Şekil 5). (Miniewicz ve ark., 2019).



Şekil 5. Gıda kaynaklı biyoaktif peptitlerin aktiviteleri ve başlıca bitkisel ve hayvansal kaynaklı opioidler

İnsan organizmasının endojen opioid sistemi, opioid reseptörleri ve bunların alkaloid veya peptit yapılı endojen ligandlarından oluşur (Teschemacher, 2003). Opioid reseptörleri memelilerin merkezi ve periferik sinir sistemleri, endokrin ve bağışıklık sistemleri ve ayrıca memelilerin gastrointestinal sisteminde bulunur ve μ (OP3 veya MOR), δ (OP1 veya DOR), κ (OP2 veya KOR) olmak üzere üç tip reseptör vardır. Reseptörler endojen ligandları, ekzojen opioidler ve opioid antagonistleri ile etkileşime girebilirler (Şekil 6) (Billet ve ark., 2001; Korhonen ve Pihlanto, 2006; Trescot ve ark., 2008).

Opioid reseptörler	Bulunduğu bölgeler	Etkileri
μ (OP3, MOR)	beyin sapı ve medial talamus	supraspinal analjezi, solunum depresyonu, öfori, sedasyon, azalmış gastrointestinal motilite ve fiziksel bağımlılık, prolaktin salınımı, anoreksi, kaşıntı, dinginglik, kusma, iştahsızlık, idrar retansiyonu
κ (OP2, KOR)	limbik ve diğer diensefalik alanlar, beyin sapı ve omurilik	spinal analjezi, sedasyon, dispne, bağımlılık, disfori, solunum depresyonu
δ (OP1, DOR)	büyük ölçüde beyin	psikomimetik ve disforik etkiler

Şekil 6. Opioid reseptörler, buldukları bölgeler ve etkileri

Reseptörlerin agonist ve antagonistlere bağlanma yönünden farklılık gösteren alt tipleri mevcuttur. Bu alt tipler μ reseptörü için μ_1 ve μ_2 , δ reseptörü için δ_1 ve δ_2 ve κ reseptörü için ise κ_1 ve κ_2 'dir (Dietis ve ark., 2011; Fowler ve Fraser, 1994; Satoh ve Minami, 1995; Trescot ve ark., 2008).

Opioid morfin benzeri etki gösteren kimyasallar için kullanılan bir terimdir ve opioidler duygusal davranışlarla ilişkilidirler. Bazı peptitler de benzer etkiler gösterdikleri için opioid peptitler olarak tanımlanmaktadır (Ohinata ve ark., 2007a). Opioid peptitler 5-80 amino asit içerirler ve kaynaklarına göre, vücut tarafından üretilen endojen opioid peptitler ve gıda proteinlerinin hidrolizi sonucunda açığa çıkan ekzojen opioid peptitler olmak üzere ikiye ayrılır (Tyagi ve ark., 2020). Endojen opioid peptitler, memli siteminde doğal olarak üretilirler ve çok sayıda opioid reseptör tipi için ligand olan, çok sayıda opioid peptit mevcuttur. İlk keşfedilen opioid peptit Enkefalindir. Bunu Endorfinler, Endomorfinler ve Dinomorfinlerin keşfi izledi (Koneru ve ark., 2009). Endojen opioid ligandların peptit karakterleri, gıda kaynaklı peptitlerin de benzer özellikler açısından aday olarak görülmelerine ve araştırılmalarına yol açmıştır (Paroli, 1988). Ekzojen opioid peptitler insan organizmasının endojen opioid sistemleri ile etkileşebilen, gıda proteinleri kaynaklı opioid reseptör ligandlarıdır (Tes-

chemacher, 2003). Bu peptitler gıda proteinlerinin yapısına şifrenemiş durumdadır ve çeşitli hidroliz (sindirim, fermentasyon, teknolojik işlemler gibi) yöntemleri ile serbestleştikten sonra aktivite gösterebilirler (Daliri ve ark., 2018).

Ekzojen Kaynaklı Bazı Opioid Peptitler ve Özellikleri

Başlıca ekzojen opioid peptitler ve bazı özellikleri Şekil 6'da verilmiştir (Brantl ve ark., 1981; Brantl ve ark., 1979; Caballero ve ark., 2007; Cassell ve ark., 2019; Chiba ve ark., 1989; Fukudome ve Yoshikawa, 1992; Fukudome ve ark., 1997; Garg ve ark., 2016, Hatzoglou ve ark., 1996; Karasawa ve ark., 2021; Koch ve ark., 1985; Liu ve Udenigwe, 2018; Lottspeich ve ark., 1980; Loukas ve ark., 1983; Ohinata ve ark., 2007b; Tyagi ve ark., 2020; Ul Haq, 2020; Yoshikawa ve ark., 2003).

Eksorfinler	Kaynak	Reseptör etkileşimi	Opioid reseptör seçicilik
β-kazomorfin (4-8)	β-Kazein / süt	agonist	μ
Neokazomorfin	β-Kazein / süt	agonist	μ
Morfiseptin	β-Kazein / süt	agonist	μ
α-Kazein eksorfinleri (1-7)	α-Kazein / süt	agonist	κ
α-Laktorfin	α-Laktalbumin / süt	agonist	μ
β-Laktorfin	β-Laktoglobulin / süt	agonist	μ
Serorfin	Sığır serum albümini / süt	agonist	δ
Kazoksin A	κ-Kazein / süt	antagonist	μ
Kazoksin C	κ-Kazein / süt	antagonist	μ
Kazoksin 5	κ-Kazein / süt	antagonist	μ
Kazoksin 6	κ-Kazein / süt	antagonist	μ
Ovokinin	Ovalbümin / yumurta	-	κ
Ovalulin	Ovalbümin / yumurta	-	δ
Ovotensin	Ovalbümin / yumurta	-	κ
Gluten eksorfin A5	Glutenin / buğday	agonist	δ-μ
Gluten eksorfin A4	Glutenin / buğday	agonist	δ-μ
Gluten eksorfin B5	Buğday proteinleri	agonist	δ
Gluten eksorfin B4	Buğday proteinleri	agonist	δ
Gluten eksorfin C	Buğday proteinleri	agonist	δ
Gluten eksorfin D	Gliadin / buğday	agonist	μ
Gliadorpin -7	α-Gliadin / buğday	agonist	μ-δ
Soya morfinleri (5-7)	β-Konglisinin / soya	agonist	μ
Oryzatensin (1-9)	Abümin / pirinç	agonist	κ
Rubiskolin (1-6)	RuBisCo / ispanak	agonist	δ

Şekil 6. Opioid karakterli peptitler, kaynakları, reseptör etkileşim ve seçicilikleri

Biyoaktif peptitler sağlık üzerindeki etkileri ile dikkat çeken protein parçalarıdır. Günümüzde özellikle kazein ve gluten kaynaklı bazı biyoaktif peptitlerin sağlık üzerinde olumsuz etkileri tartışma konusu olsa da, biyoaktif peptitler genellikle kronik hastalık riskini azaltabilen diyet bileşenleridir.

Biyoaktif peptitlerin bir kısmı opioid aktivite gösterebilmektedir ve bu özellik ilk olarak 1979'da bulunmuştur. Gluten ve α -kazein hidrolizatlarından bazılarının morfin benzeri aktiviteye sahip oldukları ve opioid reseptör agonistleri gibi hareket edebildikleri gösterilmiştir (Zioudrou ve ark., 1979). Bu peptitler ekzojen kaynaklı olmaları ve morfin benzeri aktivitelerinden dolayı eksorfinler olarak adlandırılmışlardır. Ekzojen opioidlerin en önemli kaynakları arasında süt proteinleri ve gluten sayılabilir. Bunun dışında soya, pirinç, ıspanak gibi gıda proteinleri de eksorfin karakterli peptitler içermektedirler.

Süt proteinleri kaynaklı ekzorfinlerden muhtemelen en önemli ve üzerinde en çok çalışılan grup β -kazein kaynaklı β -kazomorfin (4-8) serisidir. Bu serinin üyeleri μ reseptörleri ile agonistik etkileşim gösterirler ve enzimatik parçalanmaya karşı oldukça dirençlidirler. β -Kazomorfinler dışında, β -kazeinden türetilen neokazomorfin ve morfiseptin vardır ve her ikisinde μ reseptör seçiciliği gösterirler. (Jinsmaa ve Yoshikawa, 1999; Stefanucci ve ark., 2018; Woodford, 2021).

Bunların dışında süt proteinlerinden türetilen α -kazein kaynaklı α -kazein ekzorfin (1-7), α -Laktalbumin kaynaklı α -laktorfin, β -Laktoglobulin kaynaklı β -laktorfin, sığır serum albumini kaynaklı serorfin ve κ -kazein kaynaklı kazoksin (A-C) ve (5-6) mevcuttur. Bu güne kadar tespit edilen süt kaynaklı opioidlerden kazoksinler hariç hepsi agonist reseptör etkileşimi gösterirler. Kazoksinler ise antagonist opioidler olup, morfinin analjezik aktivitesini baskırlar (Stefanucci ve ark., 2018; Yoshikawa, 2015).

Süt proteinleri kaynaklı opioid peptitlerin önemli özelliklerinden birisi analjezik etkiye sahip olmalarıdır ve söz konusu bu etki birçok çalışmayla kanıtlanmıştır. β -kazomorfin-7 (Sun ve Cade, 1999), β -kazomorfin-5 (Grecksch ve ark., 1981), β -kazomorfin analogları (Blass ve Blom, 1996; Matthies ve ark., 1984), β -kazomorfin-5 analogları (Rüthrich ve ark., 1992; Rüthrich ve ark., 1994), morfiseptin ve β -kasomorfin-4 (Widy-Tyszkiewicz ve Członkowski, 1989) bu güne kadar analjezik etkiye sahip olduğu bildirilen opioidler arasındadır.

Kazomorfinler öğrenme ve hafıza bozuklukları üzerinde etkilidirler. Farelere uygulanan yüksek doz β -kazomorfin-5'in amneziye neden olduğu, 0.5 μ g düzeyinde düşük dozun ise amnezinin düzelmesini sağladığı (Sakaguchi ve ark., 2003), ayrıca β -kazomorfin-5'in öğrenme ve hafıza bozukluğunu düzelttiği (Sakaguchi ve ark., 2006) bildirilmiştir.

β -kazomorfin ve analogları gastrointestinal ve pankreatik endokrin fonksiyonların düzenlenmesine katkıda bulunmaktadırlar. Köpeklere ağızdan ve intervenöz olarak uygulanan β -kazomorfinler yemek sonrası insülin seviyesinin düzenlenmesinde rol almaktadır (Schusdziarra ve ark., 1983a; Schusdziarra ve ark., 1983b; Schusdziarra ve ark., 1983c).

Ancak bunun yanında süt kaynaklı ekzorfinler özellikle kazomorfin serisinin bazı üyeleri birçok hastalık ve bozukluklarla ilişkilendirilmektedirler. Bunlar arasında tipl diyabet, iskemik kalp hastalığı otizm ve şizofreni sayılabilir.

Erken çocukluk döneminde yüksek seviyede kazomorfinlere maruz kalmanın gelişimi bozarak, otizm gelişimi için anahtar rol üstelenebildiği ve otizm için zemin hazırlayabileceği iddia edilmektedir. İlave olarak özellikle β -kazomorfin-7'nin otizm ve şizofreni gibi bozukluklarda rol oynayabileceği vurgulanmaktadır. Yapılan çalışmalarda otizmlı bireylerin idrarlarındaki kazomorfin seviyelerinin normal bireylerinkinden daha yüksek olduğu ve otistik semptomların şiddeti ile idrar kazomorfin seviyeleri arasında pozitif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir (Dohan, 1969; Lister ve ark., 2015; Reichelt ve Knivsberg, 2003; Sokolov ve ark., 2014; Sun ve Cade, 1999; Whiteley ve Shattock, 2002). Çok sayıda ebeveyn gözlemi ve profesyonel çalışmalar, otizmlı bireylerde gluten ve süt proteinlerinin diyetten çıkarılmasıyla olumlu yönde davranış değişiklikleri olduğunu ortaya koymuştur. Konuyla ilgili olarak, genetik yatkınlık ya da çevresel stres faktörlerine bağlı olarak bağırsak florasında meydana gelen olumsuz değişiklikler, bağırsak geçirgenliğindeki artış ve peptidaz aktivitedeki azalma ile ekzorfinlerin bağırsaktan emiliminde artış olduğu (Whiteley ve Shattock, 2002) ve bağırsaktan aşırı derecede emilen ekzorfinlerin ise otizm ve şizofreni ile ilişkili olan hiperpeptidemiye yol açtığı iddia edilmektedir. Hiperpeptidemi sonucunda beyinde yükselen ekzorfinler ise merkezi sinir sisteminde nörotransmisyon sistemini etkilemektedir (Cade ve ark., 1990; Dohan ve ark., 1969).

Kazomorfinler kalp hastalıkları ile de ilişkilendirilmektedir. β -kazomorfin-7'nin hem kalp hastalıklarının gelişmesine neden olabilecek LDL oksidasyonu üzerinde fizyolojik etki göstererek, hem de aterosklerotik lezyonlardan izole edilen tirozil radikali için potansiyel kaynak olarak kalp hastalıklarının gelişmesinde rol oynayabileceği bildirilmektedir (Heinecke, 1999.; Kamiński ve ark, 2007). Epidemiyolojik kanıtlar, kazomorfinlerin hiperkolesterolemi ve ateroskleroz gelişimi ile ilişkili olduğunu (McLachlan, 2001, Kaminski ve ark., 2007) göstermekte ve kazomorfinlerin ateroskleroz başlangıcı ile doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir (Thiruvengadam ve ark., 2021).

Kazomorfinler ve tip 1 diyabet gelişimi arasında var olduğu iddia

edilen ilişki epidemiyolojik çalışmalar (Laugesen and Elliott, 2003) ve hayvan deneyleri (Elliott ve ark., 1997; Elliott ve Martin, 1984) ile desteklenmektedir. Ayrıca bu konuda iki teori mevcuttur. İlk teoride, β -kazomorfinin-7'nin bağışıklık sistemini baskıladığı ve bu durumun enterovirüs ve/veya endojen retrovirüs gibi antijen ajanların pankreatik β -hücrelerine zarar vermesine yol açtığı iddia edilmektedir (Elliot ve ark., 1999). İkinci teoride ise β -kazein parçalanma ürünü bazı peptitlerin, glukoz taşınmasından sorumlu olan GLUT-2 proteinin yapısını taklit ettiği iddia edilmektedir. İddiaya göre, bu peptitleri antijen olarak algılayan T hücreleri, β -hücrelerini antikor üretmesi için aktive eder ve antikorlar yalnızca β -kazein varyantlarını değil aynı zamanda insülin üreten β -hücrelerini de yıkımlar ve buda tip 1 diyabet oluşumuna yol açar (Monetini ve ark., 2002).

Glutenin ve gliadinlerden oluşan glüten buğday, arpa, çavdar gibi tahıllarda bulunan protein yapıdır. Diğer gıda kaynaklı proteinlerde olduğu gibi gluten yapısında da şifrelenmiş opioid peptitler bulunmaktadır. Bugüne kadar gluten yapısında tespit edilen opioid peptitler gluten eksorfinleri A4, A5 ve D'dir. Gluten eksorfin B ve C dizileri ise bilinen herhangi bir gliadin veya glütenin dizisinde bulunmamıştır ve bu peptitlerin muhtemelen bilinmeyen diğer buğday proteinlerinden türetildiği düşünülmektedir (Fukudome ve Yoshikawa, 1993; Fukudome ve Yoshikawa 1992). Gluten eksorfin A, B ve C serileri ağırlıklı olarak δ reseptör seçiciliği göstermektedirler. Bu peptitler içerisinde en δ reseptör seçici olan gluten eksorfin A5, en güçlü gıda kaynaklı opioid peptit ise gluten eksorfin B5'dir. Ancak bu peptidin fizyolojik fonksiyonları sınırlıdır çünkü endojen peptidazlar tarafından hızla parçalanırlar (Yoshikawa ve ark., 2003). Gliadin kaynaklı gluten eksorfin D ise μ reseptör seçiciliği gösterir (Fukudome ve ark., 1995; Fukudome ve Yoshikawa, 1992; Ul Haq, 2020). α -Gliadin'den türetilen gliadorfin-7'de opioid aktivite gösterir ve $\mu > \delta$ reseptör seçiciliği gösterir (Pruimboom ve de Punder, 2015).

Bu peptitlerin hormonal ve gastrointestinal fonksiyonlarda rolü olduğu bildirilmektedir. Bulgular gluten eksorfinlerinin in vivo olarak salılabileceğini ve bağırsak bariyerini bozulmadan geçerek etki edebileceklerini göstermektedir (Husby ve ark., 1985; Husby ve ark., 1986). Gluten eksorfinleri yemek alımından sonra insülin üretiminin uyarılmasında endojen opioid aktiviteyi taklit eder. Peptik sindirime uğratan buğday glutenin oral yolla uygulaması sonucunda köpeklerde yemek sonrası insülin ve glukagon seviyelerinin arttığı (Schusdzarra ve ark., 1981) yine peptik sindirime uğratan glutenin bağırsak geçiş üresini uzattığı ve bu etkilerin özel bir opiat reseptör antagonisti olan nalakson tarafından tersine çevrildiği (Morley ve ark., 1983), bu etkilerin muhtemelen gluten eksorfin C tarafından meydana getirildiği ve bu peptidin kesinlikle buğday gluteni sindirimi sırasında açığa çıktığı bildirilmektedir (Fukudome ve

Yoshikawa, 1992). Enzimatik sindirime uğratılmış ve oral uygulanan gluten ekzorfin A5 (30 mg/kg) ve B5'de (300 mg/kg) sıçanların insülin seviyeleri üzerinde benzer etkiler göstermiş ve bu etkiler nalakson tarafından tersine çevrilmiştir (Fukudome ve ark., 1995). Gluten ekzorfin B5, kan beyin bariyerinin dışında bulunan opioid reseptörler aracılığıyla prolaktin salgılanmasını uyarmaktadır. Gluten ekzorfin B5 farelerde prolaktin sekresyonunu uyarmış ve bu etki opioid reseptör antagonisti naloksonun önceden uygulanmasıyla ortadan kalkmıştır. Gluten ekzorfin B5 büyüme hormonu üzerinde ise herhangi bir etki göstermemiştir (Fanciulli ve ark., 2005; Fanciulli ve ark., 2002).

Gluten ekzorfinlerinin ayrıca ağrı duyularını, gözlemlenebilir davranışları, öğrenmeyi ve hafıza süreçlerini modüle ettiği de bildirilmektedir (Ul Haq, 2020; Yoshikawa ve ark., 2003). Farelere oral olarak uygulanan gluten ekzorfin A5, antinosiseptif etki üretmezken, intraserebroventriküler olarak uygulanan gluten ekzorfin A5, doza bağımlı bir şekilde hafif fakat anlamlı antinosisepsiyon geliştirmiştir. Oral uygulamada ise farelerde çeşitli stres faktörleri varlığında öğrenmeyi teşvik etmiş ve kaygı durumunu azaltmıştır. Bu sonuçlara bağlı olarak gluten ekzorfin A5'in hem periferik hem de merkezi sinir sistemini etkilediği düşünülmektedir (Takahashi ve ark., 2000).

Ayrıca, gluten exorphin C'nin, denatüre proteinlerin yığılmasını önlemek ve yeniden katlanma reaksiyonunu teşvik etmek için şaperon proteinine benzer aktiviteye sahip olduğu bildirilmiştir. Bu etkileri ile biyoaktif peptitlerin stres koşulları altında insan organizmasının endojen savunma mekanizmalarına ekzojen takviyeler olarak kabul edilebileceği düşünülmektedir (Artemova ve ark., 2010).

Gluten ve gluten kaynaklı bazı opioid peptitler çölyak, tip 1 diyabet, şizofreni ve depresyon gibi hastalık ve bozukluklarla ilişkilendirilmektedir (Woodford, 2021). Belirli besinlerin diyabetojenik olduğuna dair kanıtlar mevcuttur ve bunlar içerisinde tahıl kaynaklı gıdalar önemli yer tutar. Kazein, kolza tohumu unu, yer fıstığı unu, barbunya fasulyesi, buğday gluteni veya sıçan büyüme gereksinimlerini karşılamak için esansiyel amino asitlerle takviye edilmiş balık unu protein kaynaklarıyla beslenen farelerin diyabet insidansı, %10-15 olan kontrol fareleri ile karşılaştırıldığında buğday gluteni ile beslenen farelerin diyabet insidansı %40 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar buğday gluteninin diyabetojenik olabileceğini göstermektedir (Scott ve ark., 1988). AIN-76A diyetindeki %5'lik mısır yağ oranının, %20 mısır yağı, %20 domuz yağı, %15-17 balık yağı veya %17 soya yağı ile ayrıca, bu diyetin karbonhidrat kaynağının %65 nişastadan %65 sakkroz, fruktoz, laktoz veya nişasta/sakkaroz karışımlarına değiştirilmesi diyabet insidansını arttırmamıştır (Hoorfar ve ark., 1992; Issa-Cherugi ve ark., 1988). Bu sonuçlar yüksek sakkaroz diyeti gibi insülinojenik diyetle-

rin diyabet insidansını artırmadığı oysa protein kaynağındaki değişikliklerin diyabet insidansının artışında önemli olduğunu göstermektedir.

Bazı çalışmalara göre gluten sindirimi sırasında açığa çıkan ve bağırsaklardan emilen Gliadorfin-7 otizm ve şizofreni hastalarının kan ve idrarında yüksek oranda bulunmakta ve diyetten çıkarıldığında bu bozuklukların belirtilerinde azalmalar meydana gelmektedir (Cade ve ark., 2000; Knivsberg ve ark., 2002; Shattock ve ark., 1990). Ancak, diğer bir çalışma opioid peptitlerin otistik çocukların idrarında bulunmadığını ve bu nedenle otizmde uyumsuz davranışlarla ilişkili olmayacağını göstermiştir (Pusponogoro ve ark., 2015). Bu iddiaların doğrulanması için daha çok çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır.

Soya morfinleri ilk tanımlanan bitki kaynaklı μ -reseptör seçici opioid peptitlerdir. Soya morfini-5, soya morfini-6 ve soya morfini-7, soya proteini β -konglisininden izole edilen opioid peptitlerdir. Opioid peptitlerde Tyr-Pro-aromatik amino asit dizilimine sahip olanlar μ -reseptör seçiciliği gösterirler. Soya morfinleri de bu dizilime sahip olduklarından μ -reseptör agonistleridir ve içlerinde opioid aktivitesi en yüksek olan soya morfini-5'dir. Bir diğer soya kaynaklı opioid peptit de "soymetit"dir. (Ohinata ve ark., 2007a).

Hayvan deneylerinde, farelere oral yolla verilen 10 mg/kg soya morfini-5'in kan şekeri ve trigliserit seviyesini düşürdüğü (Chatterjee ve ark., 2018; Yamada ve ark., 2012), yine farelere oral yolla verilen 10 mg/kg soya morfini-5 ve -6 ile 30 mg/kg soya morfini-7 ve 100 mg/kg soyamorfini-5 ve -6'nın anksiyolitik benzeri aktivite gösterdiği ve soya morfinlerinin stres durumunu azaltmada aktif bileşenler olabileceği belirtilmiştir (Chesnokova ve ark., 2014; Hatakeyama ve ark., 2003; Kaneko ve ark., 2010; Ohinata ve ark., 2007a; Yoshikawa, 2015). Ayrıca soya morfini-5 farelerde mide boşalmasını yavaşlatarak gıda alımını azaltmıştır (Kaneko ve ark., 2010; Yoshikawa, 2015).

Oryzatenin pirinç albümininden elde edilen bir opioid peptitdir ve ileum-daraltıcı ve immün sistemi uyarıcı etkileri mevcuttur (Takahashi ve ark., 1996; Takahashi ve ark., 1994). Oryzateninlerin (1-9) (5-9) μ reseptörleri aracılığı ile antagonistik aktivite gösterdiği belirtilmektedir (Denizbaşı ve ark., 2019; Ul Haq 2020). Ancak Yoshikawa (2015) oryzaateninlerin [hem oryzaatenin hem de oryzaatenin (5-9)] ileum preparasyonunda μ opioid reseptörü için antagonist yerine zayıf agonistler gibi davrandığını bildirmiştir. Ohinata ve ark. (2007b) ise oryzaateninleri agonist peptitler olarak tanımlamışlardır.

Oryzaateninlerin opioid aktivitelerinin tam olarak anlaşılması için çalışmalar devam etmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda oryzaateninlerin anksiyolitik benzeri etki gösterdikleri ve gıda alımını azalt-

tıkları yönde bulgular mevcuttur. Farelere oral yolla verilen 30 mg/kg oryzatensin (5-9)'un anksiyolitik benzeri etki gösterdiği (Suzuki ve ark., 2010), aç farelere oral yoldan verilen oryzatensin (5-7)'nin, 300 mg/kg bir dozda mide boşalmasını geciktirerek gıda alımını azalttığı ve oryzatensin (5-7)'nin oral olarak aktif olduğu bildirilmiştir (Ohinata ve ark., 2007b).

Rubiskolin yeşil bitkilerdeki proteinlerin yapısında bulunan bir peptittir. Yeryüzünde en bol bulunan bu peptidin ilk ortaya çıkan opioid ligandı olduğu düşünülmektedir. Rubiskolin Tyr-Pro-non-aromatik amino asit dizilimi ile δ reseptörü seçiciliği ve agonist reseptör etkileşimi gösterir (Gritsai ve ark., 2009; Kaneko ve ark., 2012; Ohinata ve ark., 2007; Yang ve ark., 2001).

Rubiskolinlerin anksiyolitik benzeri etkiye sahip olduğu (Yoshikawa, 2015) ve ıspanaktan elde edilen ve farelere oral yolla verilen rubiskolin-6'nın 100 mg/kg dozda anksiyolitik etki gösterdiği bildirilmiştir (Hirata ve ark., 2007). Ayrıca rubiskolin-6'nın hafızayı güçlendirmede (Yang ve ark., 2003; Yoshikawa, 2015), gıda alımını düzenlemede (Kaneko ve ark., 2014; Kaneko ve ark., 2012; Miyazaki ve ark., 2014; Perlikowska ve Jaeka, 2017; Yoshikawa, 2015) etkili olduğu ve Rubiskolin-5 ve -6'nın farelerde oral yolla uygulamada antinosiseptif etki gösterdiği çeşitli çalışmalarda tespit edilmiştir (Yang ve ark., 2001; Perlikowska ve Janecka, 2018).

SONUÇ

Biyoaktif peptitler, protein yapılarında şifrelenmiş ve ancak serbestleştiklerinde fizyolojik etki gösterebilen bileşenlerdir. Biyoaktif peptitlerin öncül proteinlerinden serbestleşmesi sindirim sırasında olabilir ya da enzimatik ve kimyasal uygulamalarla gerçekleşebilmektedir. Ayrıca bu peptitler gıdalara uygulanan bir takım teknolojik işlemler sonucu açığa çıkabildiği gibi rekombinant tekniklerle de üretilebilmektedir. Gıda kaynaklı bu biyoaktif peptitler, "gıda hormonları" ya da "gıda peptitleri" gibi isimlerle anılmaktadırlar.

Gıda kaynaklı biyoaktif peptitlerin antihipertansiyon, antimikrobiyal, antioksidatif, antitrombotik, immunomodulator, mineral bağlayıcılık ve opioid etki gibi farklı fizyolojik biyoaktiviteleri bulunmaktadır. Opioid karakterli biyoaktif peptitler, insan organizmasının endojen opioidlerjik sistemleri ile etkileşebilen ekzojen opioid reseptör ligandlarıdır. Gıda kaynaklı opioid karakterli peptitlerin çoğu opioid agonist aktivite gösterirler. κ -Kazein kaynaklı kazoksin serisinde olduğu gibi çok azı antagonist aktivite gösterir. Memeli organizmalarda bulunan endojen opioidlerin peptit karakterleri, gıda proteinleri kaynaklı, ekzojen peptitlerinin de bu özellik açısından incelenmesine yol açmıştır. Bu peptitlerin sağlık üzerinde etkilerini araştıran çok sayıda çalışma mevcuttur. Gıda kaynaklı opioidlerin

birçoğunun farklı düzeylerde anksiyolitik ve antinosiseptif etki gösterdiği ispatlanmıştır. Bu peptitlerin ayrıca, yemek sonrası insülin seviyesini düzenleme, gıda alımını baskılama, stres azaltma, öğrenme ve hafıza süreçlerini modüle etme gibi özellikleri de mevcuttur.

Ancak özellikle kazein ve gluten kaynaklı opioid peptitlerin bir kısmı tip 1 diyabet, kalp-damar hastalıkları, otizm ve şizofreni gibi hastalık ve bozukluklarla da ilişkilendirilmektedir. Bu iddiaların bir kısmı epidemiyolojik, klinik ve hayvan deneylerinden elde edilen güçlü kanıtlarla desteklenmektedir. Bir kısım iddiaları ise destekleyecek yeterli bilimsel kanıt mevcut değildir.

Gıdaların sindirimi sırasında açığa çıktığı ve ciddi sağlık riskleri ile ilişkilendirildiği göz önüne alındığında bu peptitler üzerinde: sindirim sırasında ne düzeyde serbestleştikleri, serbestleşen peptitlerin etki mekanizmaları ve etki seviyeleri konularında daha çok çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır. Örneğin multifaktoriyel bir gelişimsel bozukluk olan ve görülme sıklığı gittikçe artan otizm gelişmesi ile opioidler arasında var olduğu iddia edilen ilişki açıklığa kavuşturulmalıdır.

Fonksiyonel gıdalara olan yönelim, diğer nutrasötikler gibi biyoaktif peptitlerin de mercek altına alınmasına ve araştırılmasına yol açmıştır. Bugüne kadar yaklaşık 4500 gıda kaynaklı biyoaktif peptit saptanmış ve yapıları açıklanmıştır. Ancak bu peptitlerden sadece bir kısmının fizyolojik etkileri belirlenebilmiştir. Bu nedenle biyoaktif peptitlerin olumlu ve olumsuz fizyolojik etkilerinin belirlenmesi için daha çok bilimsel çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- Admassu, H., Gasmalla, M.A.A., Yang, R., Zhao, Z. (2018). Identification of Bioactive Peptides with α -Amylase Inhibitory Potential from Enzymatic Protein Hydrolysates of Red Seaweed (*Porphyra* spp). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(19), 4872-4882. doi: 10.1021/acs.jafc.8b00960
- Akbarian, M., Khani, A., Eghbalpour, S., Uversky, V.N. (2022). Bioactive Peptides: Synthesis, Sources, Applications, and Proposed Mechanisms of Action. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1445. <https://doi.org/10.3390/ijms23031445>
- Artemova, N.V., Bumagina, Z.M. Kasakov, A.S. Shubin, V.V. Gurvits, B.Y. (2010). Opioid peptides derived from food proteins suppress aggregation and promote reactivation of partly unfolded stressed proteins, *Peptides*, 31(2), 332-338, <http://dx.doi.org/10.1016/j.peptides.2009.11.025>.
- Arulrajah, B., Muhialdin, B.J., Zarei, M., Hasan, H., Saari, N. (2020). Lacto-fermented Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed protein as a source of bioactive peptides and their applications as natural preservatives. *Food Control*, 110, 106969. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106969>
- Agyei, D., Danquah, M.K. (2011). Industrial-scale manufacturing of pharmaceutical-grade bioactive peptides. *Biotechnology Advances*, 29(3), 272-277. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.01.001>
- Billet, O., Billaud, J.N., Phillips, T.R. (2001). Partial characterization and tissue distribution of the feline mu opiate receptor. *Drug and Alcohol Dependence*, 62(2), 125-129. doi: 10.1016/s0376-8716(00)00182-4
- Blass, E.M., Blom, J. (1996). β -Casomorphin Causes Hypoalgesia in 10-Day-Old Rats: Evidence for Central Mediation. *Pediatric Research*, 39, 199-203. doi: 10.1203/00006450-199602000-00002.
- Brantl, V., Teschemacher, H., Bläsigg, J., Henschen, A., Lottspeich, F. (1981). Opioid activities of β -casomorphins. *Life Sciences*, 28(17), 1903-1909. [https://doi.org/10.1016/0024-3205\(81\)90297-6](https://doi.org/10.1016/0024-3205(81)90297-6)
- Brantl, V., Teschemacher, H., Henschen, A., Lottspeich, F. (1979). Novel Opioid Peptides Derived from Casein (β -Casomorphins). I. Isolation from Bovine Casein Peptone. *Hoppe-Seyler's Zeitschrift für Physiologische Chemie*, 360(2), 1211-1216. <https://doi.org/10.1515/bchm2.1979.360.2.1211>
- Caballero J., Saavedra, M., Fernández, M., González-Nilo, F.D. (2007) Quantitative Structure-Activity Relationship of Rubiscolin Analogues as δ Opioid Peptides Using Comparative Molecular Field Analysis (CoMFA) and Comparative Molecular Similarity Indices Analysis (CoMSIA). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 8101-8104. <https://doi.org/10.1021/jf071031h>
- Cade, R., Privette, M., Fregly, M.J., Rowland, N.E., Sun, Z., Zele, V., Hagemaker, H., Edelstein, C. (2000). Autism and schizophrenia: intestinal disorders. *Nutritional Neuroscience*, 3(1), 57-72. doi:

10.1080/1028415X.2000.11747303

- Cassell, R.J., Mores, K.L., Zervas, B.L., Mahmoud, A.H., Lill, M.A., Trader, D.J., van Rijn, R.M. (2019). Rubiscolins are naturally occurring G protein-biased delta opioid receptor peptides. *European Neuropsychopharmacology*, 29(3), 450-456. [https://doi: 10.1016/j.euroneuro.2018.12.013](https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2018.12.013)
- Chatterjee, C., Gleddie, S., Xiao, C.W. (2018). Soybean Bioactive Peptides and Their Functional Properties. *Nutrients*, 10, 1211; doi:10.3390/nu10091211
- Cherny, N. (1996). Opioid Analgesics, Comparative Features and Prescribing Guidelines. *Drugs*, 51 (5); 713-737. doi: 10.2165/00003495-199651050-00002.
- Chesnokova, E., Saricheva, N., Dubynin, V., Kamenskij, A., Kalikhevich, V., Adermasova, Z. (2014). Behavioral effect of soymorphin-5-amide in rats. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 69, 103-107. <http://doi:10.3103/S0096392514030055>
- Chiba, H., Tani, F., Yoshikawa, M. (1989). Opioid antagonist peptides derived from κ -casein. *Journal of Dairy Research*, 56(3), 363-366. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022029900028818>
- Choi, J., Sabikhi, L., Hassan, A., Anand, S. (2012). Bioactive peptides in dairy products. *International Journal of Dairy Technology*, 65(1), 1-12. doi: 10.1111/j.1471-0307.2011.00725.x
- Damodaran, S. (1996). Amino Acids, Peptides, and Proteins, In O. R. Fennema (Ed.), *Food Chemistry*. (3rd ed., pp. 321-431), New York: Marcel Dekker Inc.
- Denizbaşı, A., Özpolat, Ç., Ecmel Onur, Ö. (2019). Opioid Antagonistlerinin Klinik Önemi ve Uygulama Yolları. *Anatolian Journal of Emergency Medicine*, 2(1), 34-38.
- Dietis, N., Rowbotham, D.J., Lambert, D.G. (2011). Opioid receptor subtypes: fact or artifact? *British Journal of Anaesthesia*, 107(1), 8-18. doi: 10.1093/bja/aer115
- Dohan, F.C., Grasberger, J.C., Lowel, F.M., Johnston, H.T., Arbegast, A.W. (1969). Relapsed schizophrenics: more rapid improvement on a milk- and cereal-free diet. *British Journal of Psychiatry*, 115(522), 595-596
- Elliot, R.B., Harris, D.P., Hill, J.P., Bibby, N.J., Wasmuth, H.E. (1999). Type I (insulin-dependent) diabetes mellitus and cow milk: casein variant consumption. *Diabetologia*, 42(3), 292-296. doi: 10.1007/s001250051153.
- Elliott, R.B., Martin, J.M. (1984). Dietary protein: a trigger of insulin-dependent diabetes in the BB rat? *Diabetologia*, 26(4), 297-299. <https://doi.org/10.1007/BF00283653>
- Elliott, R.B., Wasmuth, W.H., Bibby, N.J., Hill, J.P. (1997). The role of β -casein variants in the induction of insulin-dependent diabetes in the non-obese diabetic mouse and humans. *Food and Agriculture Organization, Brussels, Belgium, IDF Special Issue, No. 9702*, 445-453. <https://doi.org/10.1007/>

s001250051

- Fanciulli, F., Dettori, A., Demontis, M.P., Tomasi, P.A., Anania, V., Delitala, G. (2005). Gluten exorphin B5 stimulates prolactin secretion through opioid receptors located outside the blood-brain barrier. *Life Sciences*, 76(15), 1713-1719. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2004.09.023>
- Fanciulli, G., Dettori, A., Tomasi, P.A., Demontis, M.P., Gianorso, S., Anania, V., Delitala, G. (2002). Prolactin and growth hormone response to intracerebroventricular administration of the food opioid peptide gluten exorphin B5 in rats. *Life Sciences*, 71(20), 2383-2390. doi: 10.1016/S0024-3205(02)02036-2
- FAO (2011). Dietary protein quality evaluation in human nutrition, Report of an FAO Expert Consultation. FAO Food Nutr. Paper 92, FAO, Auckland, New Zealand pp. 234.
- Fideler, J., Johanningsmeier, S.D., Ekelöf, M., Muddiman, D.C. (2019). Discovery and quantification of bioactive peptides in fermented cucumber by direct analysis IR-MALDESI mass spectrometry and LC-QQ-MS. *Food Chemistry*, 271, 715-723. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.07.187
- Fowler, C.J., Fraser, G.L. (1994). Mu-, delta-, kappa-opioid receptors and their subtypes. A critical review with emphasis on radioligand binding experiments. *Neurochemistry International*, 24(5), 401-426. [https://doi: 10.1016/0197-0186\(94\)90089-2](https://doi.org/10.1016/0197-0186(94)90089-2)
- Fukudome, S., Shimatsu, A., Suganuma, H., Yoshikawa, M. (1995). Effect of gluten exorphins A5 and B5 on the postprandial plasma insulin level in conscious rats. *Life Science*, 57(7), 729-734. doi: 10.1016/0024-3205(95)00324-y.
- Fukudome, S., Yoshikawa, M. (1993). Gluten exorphin C. A novel opioid peptide derived from wheat gluten. *FEBS*, 316(1), 17-19. doi: 10.1016/0014-5793(93)81727-h.
- Fukudome, S., Yoshikawa, M. (1992). Opioid peptides derived from wheat gluten: their isolation and characterization. *FEBS Letters*, 296(1), 107-111. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(92\)80414-C](https://doi.org/10.1016/0014-5793(92)80414-C)
- Fukudome, S., Jinsmaa, Y., Matsukawa, T., Sasaki, R., Yoshikawa, M. (1997). Release of opioid peptides, gluten exorphins by the action of pancreatic elastase. *FEBS Letters*, 412(3), 475-479. [https://doi: 10.1016/s0014-5793\(97\)00829-6](https://doi.org/10.1016/s0014-5793(97)00829-6)
- García-Mora, P., Martín-Martínez, M., Bonache, M.A., González-Múniz, R., Peñas, E., Frias, J., Martínez, C. (2016). Identification, functional gastrointestinal stability and molecular docking studies of lentil peptides with dual antioxidant and angiotensin I converting enzyme inhibitory activities. *Food Chemistry*, 221, 464-472. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.10.087
- Garg, S., Nurgali, K., Mishra, V. (2016). Food proteins as source of opioid peptides-A review. *Current Medicinal Chemistry*, 23(9), 893-910. <https://doi.org/10.1016/j.cmc.2016.07.011>

g/10.2174/0929867323666160219115226.

- Grecksch, G., Schweigert, C., Matthies, H. (1981). Evidence for analgesic activity of β -casomorphin in rats. *Neuroscience Letters*, 27(3), 325-328. [https://doi.org/10.1016/0304-3940\(81\)90451-1](https://doi.org/10.1016/0304-3940(81)90451-1)
- Gritsai, O.B., Dubynin, V.A., Bespalova, Zh.D., Pilipenko, V.E. (2009). Effects of several exorphins and endorphins on the escape reaction of the cockroach *Periplaneta americana* under elevated temperature conditions. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 45(4), 391-397. Doi: 10.1134/S0022093009040057
- Hatakeyama, E., Yamaguchi, M., Muramoto, K., Ito, G., Motohashi, Y., Higuchi, S. (2003). Modulating effect of soy protein isolate and soy protein hydrolysate on human brain function. *Soy Protein Research, Japan*, 6, 147-152.
- Hatzoglou, A., Bakogeorgou, E., Hatzoglou, C., Martin, P.M., Castanas, E. (1996). Antiproliferative and receptor binding properties of alpha- and beta-casomorphins in the T47D human breast cancer cell line. *European Journal of Pharmacology*, 310(2-3), 217-223. [https://doi.org/10.1016/0014-2999\(96\)00339-1](https://doi.org/10.1016/0014-2999(96)00339-1)
- He, R., Wang, Y., Yang, Y., Wang, Z., Ju, X., Yuan, J. (2019). Rapeseed protein-derived ACE inhibitory peptides LY, RALP and GHS show antioxidant and anti-inflammatory effects on spontaneously hypertensive rats. *Journal of Functional Foods*, 55, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.02.031>
- Heinecke, J.W. (1999). Mass spectrometric quantification of amino acid oxidation products in proteins: insights into pathways that promote LDL oxidation in the human artery wall. *FASEB Journal*, 13: 1113-1120. doi.org/10.1096/fasebj.13.10.1113
- Hirata, H., Sonoda, S., Agui, S., Yoshida, M., Ohinata, K., Yoshikawa, M. (2007). Rubiscolin-6, a delta opioid peptide derived from spinach Rubisco, has anxiolytic effect via activating sigma1 and dopamine D1 receptors, *Peptides*, 28(10), 1998-2003. doi: 10.1016/j.peptides.2007.07.024.
- Hoorfar, J., Buschard, K., Brogen, C.H. (1992). Impact of dietary protein and fat source on the development of insulin-dependent diabetes in the BB rat. *Diabetes Research*, 20(1), 33-41, 1992.
- Husby, S., Jensenius, J.C., Svehag, S.E. (1986). Passage of undegraded dietary antigen into the blood of healthy adults. Further characterization of the kinetics of uptake and the size distribution of the antigen. *Scandinavian Journal of Immunology*, 24(4), 447-455.
- Husby, S., Jensenius, J.C., Svehag, S.E. (1985). Passage of undegraded dietary antigen into the blood of healthy adults. Quantification, estimation of size distribution, and relation of uptake to levels of specific antibodies. *Scandinavian Journal of Immunology*, 22(1), 83-92.
- Issa-Chergui, D., Guttmann, R.D., Seemayer, T.A., Kelley, V.E., Colle, E. (1988). The effect of diet on spontaneous insulin dependent diabetic syndrome in

the rat. *Diabetes Research*, 9(2), 81-86.

- Jakubczyk, A., Kara's, M., Złotek, U., Szymanowska, U., Baraniak, B. (2019). Peptides obtained from fermented faba bean seeds (*Vicia faba*) as potential inhibitors of an enzyme involved in the pathogenesis of metabolic syndrome. *LWT-Food Science and Technology*, 105, 306-313. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.009>
- Jinsmaa, Y., Yoshikawa, M. (1999) Enzymatic release of neocasomorphin and β -casomorphin from bovine β -casein. *Peptides* 20(8), 957-962. doi: 10.1016/s0196-9781(99)00088-1.
- Kamiński, S., Kamiński, A., Kostyra, E. (2007). Polymorphism of bovine beta-casein and its potential effect on human health. *Journal of Applied Genetics*, 48(3), 189-198. <https://doi.org/10.1007/BF03195213>
- Kaneko, K., Mizushige, T., Miyazaki, Y., Lazarus, M., Urade, Y., Yoshikawa, M., Kanamoto, R., Ohinata, K.(2014). δ -Opioid receptor activation stimulates normal diet intake but conversely suppresses high-fat diet intake in mice. *American journal of Physiology Regulatory Integrative Comparative Physiology*, 306 (4), R265–R272. doi:10.1152/ajpregu.00405.2013.
- Kaneko, K., Lazarus, M., Miyamoto, C., Oishi, Y., Nagata, N., Yang, S., Yoshikawa, M., Aritake, K., Furuyashiki, T., Narumiya, S., Urade, Y., Ohinata, K. (2012). Orally administered rubiscolin-6, a δ -opioid peptide derived from Rubisco, stimulates food intake via leptomeningeal lipocallin-type prostaglandin D synthase in mice. *Molecular Nutrition & Food Research*, 56(8), 1315-1323. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201200155>
- Kaneko, K., Iwasaki, M., Yoshikawa, M., Ohinata, K. (2010). Orally administered soymorphins, soy-derived opioid peptides, suppress feeding and intestinal transit via gut μ_1 -receptor coupled to 5-HT(1A), D(2), and GABA(B) systems. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, 299, G799-G805. <https://doi:10.1152/ajpgi.00081.2010>
- Karasawa, Y., Miyano, K, Fujii, H., Mizuguchi, T., Kuroda, Y., Nonaka, M., Komatsu, A., Ohshima, K., Yamaguchi, M., Yamaguchi, K., Iseki, M., Uezono, Y., Hayashida, M. (2021). In Vitro Analyses of Spinach-Derived Opioid Peptides, Rubiscolins: Receptor Selectivity and Intracellular Activities through G Protein- and β -Arrestin-Mediated Pathways. *Molecules*, 26(19), 6079. <https://doi: 10.3390/molecules26196079>
- Kastin, A.J., Akerstrom, A. Pan, W. (2001). Validity of multiple-tim regression analysis of tritiated and iodinated leptin crossing the blood-brain barrier: meaningful controls. *Peptides*, 22(12), 2127-2136. doi: 10.1016/s0196-9781(01)00569-1.
- Knivsberg, A.M., Reichelt, K.L., Høien, T., Nodland, M. (2002). A randomized, controlled study of dietary intervention in Autistic Syndromes. *Nutritional Neuroscience*, 5(4), 251-61. doi: 10.1080/10284150290028945.
- Koch, G., Wiedemann, K., Teschemacher, H. (1985). Opioid activities of human

- β -casomorphins. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, 331, 351-354. doi: 10.1007/BF00500818
- Koneru, A., Satyanarayana, S., Rizwan, S. (2009). Endogenous opioids: Their physiological role and receptors. *Global Journal of Pharmacology*, 3(3), 149-153.
- Korhonen, H. (2009). Milk-derived bioactive peptides: from science to applications. *Journal of Functional Foods*, 1, 177-187.
- Korhonen, H., Pihlanto, A. (2006). Bioactive peptides: Production and functionality. *International Dairy Journal*, 16, 945-960. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.10.012>
- Kumagai, H. (2010). Wheat proteins and peptides. In: Y. Mine, E. Li-Chan, B. Jiang, (Eds), *Bioactive Proteins and Peptides as Functional Foods and Nutraceuticals*. (pp. 289-303), Oxford: Wiley-Blackwell.
- Lassoued, I., Mora, L., Barkia, A., Aristoy, M.-C., Nasri, M., Toldra, F. (2015). Bioactive peptides identified in thornback ray skin's gelatin hydrolysates by proteases from *Bacillus subtilis* and *Bacillus amyloliquefaciens*. *Journal of Proteomics*, 128, 8-17.
- Léonil, J. (2014). Milk bioactive peptides: their interest for cardiovascular diseases and metabolic syndrome prevention. *Medecine Des Maladies Metaboliques*, 8, 495-499.
- Lister, L., P.J. Fletcher, P.J., Nobrega, J.N., Remington, G. (2015). Behavioral effects of food-derived opioid-like peptides in rodents: implications for schizophrenia? *Pharmacology Biochemistry and Behavior*. 134, 70-78, <https://doi.org/10.1016/j.pbb.2015.01.020>.
- Losurdo, L., Quintieri, L., Caputo, L., Gallerani, R., Mayo, B., De Leo, F. (2013). Cloning and expression of synthetic genes encoding angiotensin-I converting enzyme (ACE)-inhibitory bioactive peptides in *Bifidobacterium pseudocatenulatum*. *FEMS Microbiology Letters*, 340(1), 24-32. doi: 10.1111/1574-6968.12068
- Lottspeich, F., Henschen, A., Brantl, V., Teschemacher, H. (1980). Novel opioid peptides derived from casein (beta-casomorphins). III. Synthetic peptides corresponding to components from bovine casein peptone. *Hoppe-Seyler's Zeitschrift für Physiologische Chemie*, 361(12), 1835-1839. <https://doi.org/10.1515/bchm2.1980.361.2.1835>
- Loukas, S., Varoucha, D., Zioudrou, C., Streaty, R.A., Klee, W.A. (1983). Opioid activities and structures of alpha-casein-derived exorphins. *Biochemistry*, 22(19), 4567-4573. <https://doi.org/10.1021/bi00288a034>
- Liu, Z., Udenigwe, C.C. (2018). Role of food-derived opioid peptides in the central nervous and gastrointestinal systems. *Journal of Food Biochemistry*, 43, e12629. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12629>
- Lu, X., Zhang, L., Sun, Q., Song, G., Huang, J. (2018). Extraction, identification

- and structure-activity relationship of antioxidant peptides from sesame (*Sesamum indicum* L.) protein hydrolysate. *Food Research International*, 116, 707-7016. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.001>
- Matthies, H., Stark, H., Hartrodt, B., Ruethrich, H.L., Spieler, H.T., Barth, A., Neubert, K. (1984). Derivatives of β -casomorphins with high analgesic potency. *Peptides*, 5(3), 463-470. [https://doi.org/10.1016/0196-9781\(84\)90070-6](https://doi.org/10.1016/0196-9781(84)90070-6)
- McLachlan, C.N.S. (2001). β -casein A1, ischaemic heart disease mortality, and other illnesses. *Medical Hypotheses*, 56(2), 262-272. <https://doi.org/10.1054/mehy.2000.1265>
- Meisel, H., Bockelmann, W. (1999). Bioactive peptides encrypted in milk proteins: proteolytic activation and thropho-functional properties. *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology*, 76, 207-215.
- Minkiewicz P., Iwaniak A., Darewicz M., (2019). BIOPEP-UWM Database of Bioactive Peptides: Current Opportunities. *International Journal of Molecular Sciences*, 20, 5978, doi:10.3390/ijms20235978.
- Mirzaei, M. (2019). In vitro and in silico studies of novel synthetic ACE-inhibitory peptides derived from *Saccharomyces cerevisiae* protein hydrolysate. *Bioorganic Chemistry*, 87, 647-654. doi: 10.1016/j.bioorg.2019.03.057
- Miyazaki, Y., Kaneko, K., Iguchi, S., Mizushige, T., Kanamoto, R., Yoshikawa, M., Shimizu, T., Ohinata, K. (2014). Orally administered δ opioid agonist peptide rubiscolin-6 stimulates food intake in aged mice with ghrelin resistance. *Molecular Nutrition & Food Research*, 58(10), 2046-2052. doi: 10.1002/mnfr.201400100.
- Mohanty, D., Jena, R., Choudhury, P.K., Pattnaik, R., Mohapatra, S., Saini, M.R. (2016). Milk derived antimicrobial bioactive peptides: a review. *International Journal of Food Properties*, 19, 837-846. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1048356>
- Mohanty, D.P., Mohapatra, S., Misra, S., Sahu, P.S. (2015). Milk derived bioactive peptides and their impact on human health: a review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23, 577-583. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.06.005>
- Monetini, L., Cavallo, M.G., Manfrini, S., Stefanini, L., Picarelli, A., Di Tola, M., Petrone, A., Bianchi, M., La Presa, M., Di Giulio, C., Baroni, M.G., Thorpe, R., Walker, B.K., Pozzilli, P. (2002). Antibodies to bovine beta-casein in diabetes and other autoimmune diseases. *Hormone and Metabolic Research*, 34(8), 455-599. doi: 10.1055/s-2002-33595.
- Morley, J.E., Levine, A.S., Yamada, T., Gebhard, R.L., Prigge, W.F., Shafer, R.B., Goetz, F.C., Silvis, S.E. (1983) Effect of exorphins on gastrointestinal function, hormonal release, and appetite. *Gastroenterology*, 84(6), 1517-1523.
- Möller, N. P., Scholz-Ahrens, K. E., Roos, N., Schrezenmeir, J. (2008). Bioactive peptides and proteins from foods: indication for health effects. *European Journal of Nutrition*, 47(4), 171-182. doi: 10.1007/s00394-008-0710-2

- Muruganandam A, Jamshid T, Nsaran S, Danica S. (2002). Selection of phage-display llama single domain antibodies that transmigrate across human blood-brain barrier endothelium. *FASEB Journal*, 16(2), 240-242. doi: 10.1096/fj.01-0343fje.
- Ohinata, K., Agui, S., Yoshikawa, M. (2007a). Soymorphins, Novel μ Opioid Peptides Derived from Soy β -Conglycinin β -Subunit, Have Anxiolytic Activities. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 71(10), 2618-2621. <https://doi.org/10.1271/bbb.70516>
- Ohinata, K., Suetsugu, K., Fujiwara, Y., Yoshikawa, M. (2007b). Suppression of food intake by a complement C3a agonist [Trp5]-oryzatenin(5-9). *Peptides*, 28(3), 602-606. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2006.11.020>
- Okasha, H., Samir, S. (2020). Synthesis and molecular cloning of antimicrobial peptide chromogranin A N-46 gene using conventional PCR. *Gene Reports*, 18, 100571. <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2019.100571>
- Paroli, E. (1988). Opioid peptides from food (the exorphins). *World Review of Nutrition and Dietetics*, 55, 58-97. <https://doi.org/10.1159/000415559>
- Perlikowska, R., Janecka, A. (2018). Rubiscolins-highly potent peptides derived from plant proteins. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 18(2), 104-112. doi: 10.2174/1389557517666170426160703.
- Pihlanto-Leppälä, A. (2000). Bioactive peptides derived from bovine whey proteins. *Trends Food Science and Technology*, 11(9-10), 347-356. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00003-6)
- Pritchard, S. R., Phillips, M., Kailasapathy, K. (2010). Identification of bioactive peptides in commercial Cheddar cheese. *Food Research International*, 43(5), 1545-1548. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.03.007>
- Pruimboom, L., de Punder, K. (2015). The opioid effects of gluten exorphins: asymptomatic celiac disease. *Journal of Health Population and Nutrition*, 33, 24. doi: 10.1186/s41043-015-0032-y.
- Przybylski, R., Firdaous, L., Châtaigné, G., Dhulster, P., Nedjar, N. (2016). Production of an antimicrobial peptide derived from slaughterhouse byproduct and its potential application on meat as preservative. *Food Chemistry*, 211, 306-313. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.074>
- Pusponegoro, H.D., Ismael, S., Sastroasmoro, S., Firmansyah, A., Vandenplas, Y. (2015). Maladaptive behavior and gastrointestinal disorders in children with autism spectrum disorder, *Pediatric Gastroenterology, Hepatology & Nutrition*, 18 (4), 230-237, <https://doi.org/10.5223/pghn.2015.18.4.230>.
- Reichelt, K.L., Knivsberg, A.M. (2003). Can the pathophysiology of autism be explained by the nature of the discovered urine peptides? *Nutritional Neuroscience*, 6(1), 19-28, <https://doi.org/10.1080/1028415021000042839>.
- Rüthrich, H.L., Grecksch, G., Schmidt, R. (1994). Phe¹-substituted β -casomorphin-5 analogues with analgesic activity. *Peptides*, 15(3), 457-460. [https://doi.org/10.1016/0197-0186\(94\)00033-9](https://doi.org/10.1016/0197-0186(94)00033-9)

[doi.org/10.1016/0196-9781\(94\)90205-4](https://doi.org/10.1016/0196-9781(94)90205-4)

- Rüthrich, H.L., Grecksch, G., Schmidt, R., Neubert, K. (1992). Linear and cyclic β -casomorphin analogues with high analgesic activity. *Peptides*, 13(3), 483-485. [https://doi.org/10.1016/0196-9781\(92\)90078-H](https://doi.org/10.1016/0196-9781(92)90078-H)
- Sakaguchi, M., Koseki, M., Wakamatsu, M., Matsumura, E. (2006). Effects of systemic administration of β -casomorphin-5 on learning and memory in mice. *European Journal of Pharmacology*, 530(1-2), 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2005.11.014>
- Sakaguchi, M., Koseki, M., Wakamatsu, M., Matsumura, E. (2003). Effects of β -casomorphin-5 on passive avoidance response in mice. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 67(11), 2501-2504. <https://doi.org/10.1271/bbb.67.2501>
- Sánchez, A., Vázquez, A. (2017). Bioactive peptides: A review. *Food Quality and Safety*, 1, 29-46. <https://doi:10.1093/fqs/fyx006>
- Satoh, M., Minami, M. (1995) Molecular pharmacology of the opioid receptors. *Pharmacology and Therapeutics*, 68, 343-364. [http://dx.doi.org/10.1016/0163-7258\(95\)02011-X](http://dx.doi.org/10.1016/0163-7258(95)02011-X)
- Schusdziarra, V., Schick, R., De La Fuente, A., Holland, A., Brantl, V., Pfeiffer, E.F. (1983a). Effect of β -Casomorphins on Somatostatin Release in Dogs. *Endocrinology*, 112(6), 1948-1951. <https://doi.org/10.1210/endo-112-6-1948>
- Schusdziarra, V., Holland, A., Schick, R., de la Fuente, A., Klier, M., Maier, V., Brantl, V., Pfeiffer, E.F. (1983b). Modulation of post-prandial insulin release by ingested opiate-like substances in dogs. *Diabetologia*, 24, 113-116.
- Schusdziarra, V., Schick, A., De La Fuente, A., Specht, J., Klier, M., Brantl, V., Pfeiffer, E.F. (1983c). Effect of β -Casomorphins and Analogs on Insulin Release in Dogs. *Endocrinology*, 112(3), 885-889. <https://doi.org/10.1210/endo-112-3-885>
- Schusdziarra, V., Henrichs, I., Holland, A., Klier, M. and Pfeiffer, E.F. (1981). Evidence for an effect of exorphins on plasma insulin and glucagon levels in dogs. *Diabetes*, 30(4), 362-364. doi: 10.2337/diab.30.4.362.
- Scott, F.W., Sarwar, G., Cloutier, H.E. (1988). Diabetogenicity of various protein sources in the diet of the diabetes-prone BB rat. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 246, 277-285. doi: 10.1007/978-1-4684-5616-5_34.
- Selamassakul, O., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., Ratanakhanokchai, K. (2016). A novel multi-biofunctional protein from brown rice hydrolysed by endo/endo-exoproteases. *Food & Function*, 7, 2635-2644.
- Shahidi, F., Zhong, Y. (2008). Bioactive peptides. *Journal of AOAC International*, 91(4), 914-931. <https://doi.org/10.1093/jaoac/91.4.914>
- Shattock, P., Kennedy, A., Pasell, F., Berney, T., (1990). Role of neuropeptides in autism and their relationships with classical neurotransmitters. *Brain Dysfunction*, 3(5-6), 328-345.

- Shwaiki, L.N., Arendt, E.K., Lynch, K.M., Thery, T.L.C. (2019). Inhibitory effect of four novel synthetic peptides on food spoilage yeasts. *International Journal of Food Microbiology*, 300, 43-52. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2019.04.005
- Singh, B. P., Vjj, S., Hati, S. (2014). Functional significance of bioactive peptides derived from soybean. *Peptides*, 54, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2014.01.022>
- Sokolov, O., Kost, N., Andreeva, O., Korneeva, E., Meshavkin, V., Tarakanova, Y., Dadayan, A., Zolotarev, Y., Grachev, S., Mikheeva, I., Varlamov, O., Zozulya, A. (2014). Autistic children display elevated urine levels of bovine casomorphin-7 immunoreactivity. *Peptides*, 56, 68-71. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2014.03.007>.
- Stefanucci, A., Mollica, A., Macedonio, G., Zengin, G., Ahmed, A.A., Novellino, E. (2018). Exogenous opioid peptides derived from food proteins and their possible uses as dietary supplements: A critical review. *Food Reviews International*, 34(1), 70-86. <http://dx.doi.org/10.1080/87559129.2016.1225220>
- Sun, Z., Cade, J.R. (2003). Findings in normal rats following administration of gliadorphin-7 (GD-7). *Peptides*, 24(2), 321-323. [https://doi.org/10.1016/S0196-9781\(03\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0196-9781(03)00043-3)
- Sun, Z., Cade, J.R. (1999). A Peptide Found in Schizophrenia and Autism Causes Behavioral Changes in Rats. *Autism*, 3(1), 85-95. <https://doi.org/10.1177/1362361399003001007>
- Suzuki, C., Yoshikawa, M., Ohinata, K. (2010). [Trp5]-oryzatensin(6-9), an agonist peptide for complement C3a receptor, exhibits anxiolytic-like effect mediated by prostaglandin E2. In: K. Okamoto (Ed.), *Peptide Science 2009*. (pp. 269-272), Osaka: The Japanese Peptide Society.
- Takahashi, M., Fukunaga, H., Kaneto, H., Fukudome, S., Yoshikawa, M. (2000). Behavioral and pharmacological studies on gluten exorphin A5, a newly isolated bioactive food protein fragment, in mice. *Japanese Journal of Pharmacology*, 84(3), 259-265, doi: 10.1254/jjp.84.259
- Takahashi, M., Moriguchi, S., Ikeno, M., Kono, S., Ohata, K., Usui, H., Kurahashi, K., Sasaki, R., Yoshikawa, M. (1996). Studies on the ileum-contracting mechanisms and identification as a complement C3a receptor agonist of oryzatensin, a bioactive peptide derived from rice albumin. *Peptides*, 17(1), 5-12. [https://doi.org/10.1016/0196-9781\(95\)02059-4](https://doi.org/10.1016/0196-9781(95)02059-4)
- Takahashi, M., Moriguchi, S., Yoshikawa, M., Sasaki, R. (1994). Isolation and characterization of oryzatensin: A novel bioactive peptide with ileum-contracting and immunomodulating activities derived from rice albumin. *Biochemistry and Molecular Biology International*, 33(6), 1151-1158.
- Teschemacher, H. (2003). Opioid Receptor Ligands Derived from Food Proteins. *Current Pharmaceutical Design*, 9, 1331-1344. doi: 10.2174/1381612033454856

- Thiruvengadam, M., Venkidasamy, B., Thirupathi, P., Chung, I.M., Subramanian, U. (2021). β -Casomorphin: A complete health perspective. *Food Chemistry*, 337, 127765. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127765>
- Torres-Llanez, M. de J., Vallejo-Cordoba, B., Gonzalez-Cordova, A. F. (2005). Bioactive peptides derived from milk proteins. *Archivos Latinoamericanos De Nutricion*, 55(2), 111-117.
- Trescot, A.M., Datta, S., Lee, M., Hansen, H. (2008). Opioid pharmacology. *Pain Physician*, 11(Special Issue), 133-153.
- Tyagi, A., Daliri, E.B.M., Ofosu, F.K., Su-Jung Yeon, S.J., Oh, D.H. (2020). Food-Derived Opioid Peptides in Human Health: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 8825. <https://doi.org/10.3390/ijms21228825>
- Ul Haq, M.R. (2020). Gluten Exorphins. In M.R. Ul Haq (Ed.), *Opioid Food Peptides*. Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6102-3_6
- Whiteley, P., Shattock, P. (2002). Biochemical aspects in autism spectrum disorders: updating the opioid-excess theory and presenting new opportunities for biomedical intervention, *Expert Opinion on Therapeutic Targets*, 6(2), 175-183. <https://doi.org/10.1517/14728222.6.2.175>.
- Whitford, D. (2005). *Proteins: Structure and Function*. pp. 544. London: Wiley.
- WHO (1985). *Energy and Protein Requirements, Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation*. World Health Organization Technical Rep. Ser. 724, WHO, Geneva.
- Widy-Tyszkiewicz, E., Członkowski, A. (1989). Analgesic activity of morphine, β -casomorphin-4, and deltorphin in normotensive Wistar-Glaxo and spontaneously hypertensive rats. *Peptides*, 10(3), 539-544. [https://doi.org/10.1016/0196-9781\(89\)90139-3](https://doi.org/10.1016/0196-9781(89)90139-3)
- Woodford, K.B. (2021). Casomorphins and Gliadorphins Have Diverse Systemic Effects Spanning Gut, Brain and Internal Organs. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 7911. <https://doi.org/10.3390/ijerph18157911>
- Wu, Y., Qiao, R., Chen, T., Wu, J., Du, S. (2017). Identification and molecular cloning of novel antimicrobial peptides from skin secretions of the Chinese bamboo leaf odorous frog (*Odorrana versabilis*) and the North American pickerel frog (*Rana palustris*). *Journal of Traditional Chinese Medical Sciences*, 4(3), 297-305. <https://doi.org/10.1016/j.jtcms.2017.07.007>
- Xu, F., Zhang, J., Wang, Z., Yao, Y., Atungulu, G.G., Ju, X., Wang, L. (2018). Absorption and Metabolism of Peptide WDHHPQLR Derived from Rapeseed Protein and Inhibition of HUVECs Apoptosis under Oxidative Stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66, 5178-5189. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01620>
- Yamada, Y., Muraki, A., Oie, M., Kanegawa, N., Oda, A., Sawashi, Y., Kaneko, K., Yoshikawa, M., Goto, T., Takahashi, N., Kawada, T., Ohinata, K.

- (2012). Soymorphin-5, a soy-derived μ -opioid peptide, decreases glucose and triglyceride levels through activating adiponectin and PPAR α systems in diabetic KKAY mice. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 302(4), E433-E440. <http://dx.doi.org/10.1152/ajpendo.00161.2011>.
- Yang, S., Kawamura, Y., Yoshikawa, M. (2003). Effect of rubiscolin, a δ opioid peptide derived from Rubisco, on memory consolidation. *Peptides*, 24(2), 325-328. doi: 10.1016/s0196-9781(03)00044-5.
- Yang, S., Yunden, J., Sonoda, S., Doyama, N., Lipkowski, A.W., Kawamura, Y., Yoshikawa, M. (2001). Rubiscolin, a delta selective opioid peptide derived from plant Rubisco. *FEBS Letters*, 509(2): 213-217. doi: 10.1016/s0014-5793(01)03042-3.
- Yoshikawa., M. (2015). Bioactive peptides derived from natural proteins with respect to diversity of their receptors and physiological effects. *Peptides*, 72, 208-225. <https://doi:10.1016/j.peptides.2015.07.013>
- Yoshikawa, M., Takahashi, M., Yang, S. (2003). Delta opioid peptides derived from plant proteins. *Current Pharmaceutical Design*, 9(16), 1325-1330. <https://doi: 10.2174/1381612033454838>
- Zhao, X., Zhang, X., Liu, L. (2021). Collagen peptides and the related synthetic peptides: A review on improving skin health. *Journal of Functional Foods*, 86, 104680. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104680>
- Zioudrou, C., Streaty, R. A., Klee, W. A. (1979). Opioid peptides derived from food proteins. The exorphins. *The Journal of Biological Chemistry*, 254(7), 2446-2449.
- Złotek, U., Jakubczyk, A., Rybczynska-Tkaczyk, K., Cwiek, P., Baraniak, B., Lewicki, S. (2020). Characteristics' of new peptides GQLGEHGGAG-MG, GEHGGAGMGGGQFQPV, EQGFLPGPEESGR, RLARAGLAQ, YGNPVGGVGH, and GNPVGGVGHGTTGT as inhibitors of enzymes involved in metabolic syndrome and antimicrobial potential. *Molecules*, 25(11), 2492. doi: 10.3390/molecules25112492.



BÖLÜM 11

ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR VE ÇİFT YÖNLÜ ŞEKİL HAFIZA ÖZELLİĞİ

Bekir YAVUZER¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Beykent Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü ORCID: 0000-0001-8984-774x

Giriş

İnsanlık tarihinde, kullanılan malzemeler gündelik yaşamı doğrudan etkilemiştir. Taş devrinden günümüze teknolojik ilerlemelerle birlikte kullanılan malzemeler değişmiş ve hayatı idame ettirebilmek daha kolay hale gelmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda ise klasik malzeme sınıflandırılması olarak tarif edilen, “metaller, seramikler, polimerler ve kompozitlerin yanına, “akıllı malzemeler” adında yeni bir sınıf eklenmiştir. Akıllı malzemelerin yeni cihaz ve makinelerde kullanımı, yeni teknolojik gelişmelerin önünü açmıştır. Geleneksel malzemelerin özelliklerinin, mümkün olduğunca çevresel faktörlerden etkilenmemesi istenmektedir. Akıllı malzemelerde ise malzemenin bu değişikliklere belirli tepkilere vermesi sayesinde, geleneksel malzemelerle yapılamayan uygulamalar mümkün olmaktadır. Akıllı malzemeler elektrik, manyetik, gerilim, sıcaklık ve nem gibi etkenlere maruz kaldıklarında özellikleri değişebilmektedir. Şekil hafızalı alaşımlar da akıllı malzemeler grubunun bir üyesidir. Deforme olduktan sonra eski şekillerini geri kazanabilme yetenekleri sayesinde şekil hafızalı alaşımlar, etkileyici bir malzeme grubudur.

Şekil hafızalı alaşımların bir başka özelliği de titreşimleri sönmüleme yetenekleridir. Sönmüleme kapasitesi, bir malzemenin titreşim enerjisini emme veya bastırma özelliğidir. Mekanik sönmüleme, mekanik enerjinin termik enerjiye dönüştürülerek harcanmasıdır. Şekil hafızalı alaşımlar çoğu mühendislik malzemesinden daha yüksek bir sönmüleme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, şekil hafızalı alaşımların martenzitik dönüşüm sırasında harcanan iç sürtünme kuvvetine bağlanmaktadır. Şekil hafızalı alaşımların sönmüleme kapasiteleri martenzit fazında artar ve gerilim kaynaklı martenzit oluştuğunda en yüksek seviyeye çıkar (Alaneme & Okotete, 2016).

İlk şekil hafızalı alaşım (kadmium-altın alaşımı) 1932 yılında keşfedildi (Ölander, 1932) ve “şekil hafıza etkisi” tanımı ilk olarak 1941 yılında yapıldı (Amerika Birleşik Devletleri Patent No. 2234993, 1941). Bu malzemelerin önemi ise 1962 yılında Ni-Ti alaşımının şekil hafıza etkisinin keşfinden sonra anlaşılabilir (Buehler, Gilfrich, & Willey, 1963). Günümüzde tıp ve mühendisliğin çeşitli alanlarında cihazların tasarımı için şekil hafızalı alaşımlardan faydalanılmaktadır. Bu alaşımların biyouyumlu olanları da keşfedilmiştir ve bu malzemeler kullanılarak kendiliğinden genişleyen stentler ve kemiklerin sabitlenmesinde kullanılan zımbalar gibi yeni nesil ürünler üretilmektedir (Liebig, Henkes, Reinartz, & Kühne, 2006). Havacılık endüstrisinde de uçak parçaları ve insansız hava araçlarının farklı bölümlerinde, motor gürültüsünü ve titreşimleri azaltmak için üretilen parçalarda şekil hafızalı alaşımlar veya bu alaşımlardan türetilmiş kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Kim, ve diğerleri, 2020). Günümüzde şekil hafızalı alaşımlar kullanılarak sensörler, aktuatörler, cerrahi aletler ve yaylar üretilmektedir.

1. Şekil Hafızalı Alaşım Sistemleri

Şekil hafızası özelliği ilk olarak altın-kadmiyum alaşımında gözlemlendi ve o günden beri birçok şekil hafıza özelliği gösteren metalik sistemler keşfedildi. Bu sistemler genel olarak Ni-Ti, Bakır esaslı, demir esaslı ve diğer alaşım sistemleri olarak özetlenebilir. Bu alaşımlar arasında en yaygın kullanılan alaşım sistemi Ni-Ti'dir. Tablo 1'de üç temel şekil hafızalı alaşımların karşılaştırması, Tablo 2'de ise şekil hafızası gösteren alaşım sistemlerinin dönüşüm sıcaklıkları verilmektedir.

Tablo 1. Temel şekil hafızalı alaşım sistemlerinin karşılaştırmalı özellikleri (Alaneme & Okotete, 2016).

Özellik	NiTi	Cu esaslı	Fe esaslı
Şekil geri kazanma oranı	%8	%5	%5'den daha az
Maliyet	Yüksek	Düşük	Düşük
Şekil hafıza etkisi	İyi	Orta	Kötü
İşlenebilirlik	Orta	Kötü	İyi
Üretilebilirlik	Kötü	İyi	Orta

Tablo 2. Şekil hafızalı alaşımlar ve dönüşüm sıcaklıkları (Wilkes & Liaw, 2000).

ŞHA	Element	Şekil hafıza etkisi için elementel kompozisyon		Dönüşüm sıcaklık aralığı [°C]		Histerezis [°C]
		Min	Max	Min	Max	
Au-Cd	Cd	46,5 %at.	50 %at.	30	100	≈15
Ag-Cd	Cd	44 %at.	49 %at.	-190	-50	≈15
Ni-Ti	Ni	49 %at.	51 %at.	-50	110	≈30
Ni-Al	Al	36 %at.	38 %at.	-180	100	≈10
In-Ti	Ti	18 %at.	23 %at.	60	100	≈4
Cu-Al-Ni	Ni	3 %wt.	4,5 %wt.	-140	100	≈35
	Al	14 %wt.	14,5 %wt.			
Cu-Sn	Sn	15 %at.		-120	30	-
Cu-Zn	Zn	38,5 %wt.	41,5 %wt.	-180	-10	≈10
Cu-Zn-X(Al, Si, Sn)	X	Eser miktarda %wt.		-180	200	≈10
Mn-Cu	Cu	5 %at.	35 %at.	-250	180	≈25
Fe-Mn-Si	Mn	32 %wt.		-200	150	≈100
	Si	6 %wt.				
Fe-Pt	Pt	25 %at.		-130		≈4

1.1. Ni-Ti Şekil Hafızalı Alaşımalar

İlk olarak Au-Cd alaşımlarında keşfedilen şekil hafıza etkisinin, daha sonra Ni-Ti alaşımlarında da olduğu belirlenmiş ve “Nitinol” adıyla ticari kullanıma başlanmıştır. Bu alaşım aktuatörlerde, protezlerde, stentlerde, sismik izolatörlerde ve titreşim kontrol cihazlarında kullanılmıştır (Duerig, Pelton, & Stöckel, 1999). Ni-Ti şekil hafızalı alaşımlar süper elastiklikleri, şekil hafıza etkileri, biyo uyumlu olmaları ve iyi aşınma dirençleri nedeniyle ön plana çıkmaktadırlar (Wang, ve diğerleri, 2018). Ni-Ti alaşımında östenit fazı B2 (kübik), ara faz olan R fazı (rombohedral) ve düşük sıcaklık fazı olan B19’(monoklinik) oluşmaktadır. Dönüşümler B2→B19 veya B2→R→B19’ şeklinde gerçekleşebilmektedir.

İkili Ni-Ti alaşımları düşük martenzitik dönüşüm sıcaklıkları nedeniyle ancak 100 °C’nin altında kullanılabilir. Üçüncü alaşım elementleri (Pd, Pt, Au, Hf ve Zr) ilavesi ile bu dönüşüm sıcaklığı artırılabilir. Buna ek olarak geleneksel yöntemlerle üretilen Ni-Ti şekil hafızalı alaşımların işlenebilirliği çok iyi değildir. Bu nedenle bu alaşımdan üretilen parçalar genellikle plakalar, çubuklar ve tüpler gibi basit geometrilere sahiptir. Karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde düşük işlenebilirlik sorununu aşabilmek için görece yeni sayılan bir imalat yöntemi olan eklemeli imalatı öneren çalışmalar yapılmıştır. Ancak eklemeli imalat ile üretilen parçalarda gözeneklerin, çatlakların ve sütünsal tane büyümesinin neden olduğu düşük çekme dayanımı görülmektedir. Eklemeli imalat üretim parametrelerinin değiştirilmesiyle bu sorunların çözülebileceğini gösteren umut verici çalışmalar bulunmaktadır (Zhang, ve diğerleri, 2020; Xiong, ve diğerleri, 2019).

1.2. Bakır Esaslı Şekil Hafızalı Alaşımalar

Ni-Ti alaşımları ile karşılaştırıldığında bakır esaslı şekil hafızalı alaşımların maliyetleri düşük, üretim ve işlenmeleri de daha kolaydır. (Mallik & Sampath, 2008). Bu alaşımlardan başka Cu-Al-Ni ve Cu-Zn-Al alaşımları da kapsamlı olarak çalışılmış ve ticari olarak kullanımı mümkün olmuştur (Mallik & Sampath, 2008). Bu üstün yönleri sayesinde bakır esaslı alaşımlar, Ni-Ti alaşımlarına alternatif olarak gösterilmektedir. Şekil hafıza özellikleri Ni-Ti alaşımlarından kötü, demir esaslı alaşımlardan ise daha iyidir. Geleneksel döküm yöntemleriyle üretiltikleri gibi toz metalürjisi gibi görece daha modern imalat teknikleri ile de üretilmektedirler. Cu esaslı alaşımlar, geniş bir dönüşüm sıcaklık aralığına, büyük bir sözde elastik özelliğe, küçük histerezise ve yüksek sönüm katsayısına sahiptir.

Cu esaslı ikili alaşımlar arasında Cu-Al ve Cu-Zn ikili sistemleri ön plana çıkmaktadır. Bu alaşımların dönüşüm sıcaklıklarını ve mikro yapılarını değiştirmek için üçüncü bir alaşım elementi eklenmektedir. Ayrıca bu alaşımlar kaba tane boyutları nedeniyle martenzitik fazda kırılındır-

lar ve dönüşüm sıcaklıklarını etkileyen yaşlanmaya maruz kalmaktadırlar (Alaneme & Okotete, 2016).

1.3. Demir Esaslı Şekil Hafızalı Alaşımlar

Demir esaslı şekil hafızalı alaşımların az bir miktarda şekil hafıza özelliği olduğu gözlemlenmiştir. Şekil hafıza özellikleri Ni esaslı alaşımlara göre çok daha kısıtlı olmakla birlikte daha düşük maliyetli bir malzeme grubudur. Ayrıca iyi işlenebilirliği ve geleneksel çelik üretim teknikleriyle üretilebilir olması Ni-Ti alaşımlarına göre avantaj olarak görülmektedir. Ancak Fe esaslı şekil hafızalı alaşımlarına gösterilen ilgi Ni-Ti ve Cu esaslı alaşımların gerisinde kalmaktadır. Bu alaşımlar aynı zamanda şekil hafızalı çelik olarak da bilinmektedir. Bu grup içinde Fe-Pt, Fe-Pd, Fe-Mn-Si, Fe-Mn-Al, Fe-Ni-C ve Fe-Ni-Co-Ti alaşımları bulunmaktadır. Büyük dönüşüm histerezisleri ve kısıtlı şekil hafıza yetenekleri Fe esaslı şekil hafızalı alaşımların kullanım alanlarını kısıtlamaktadır (Wen, Peng, Sun, Liu, & Li, 2010; Alaneme & Okotete, 2016).

Demir esaslı şekil hafızalı alaşımlar, kimyasal bileşimine bağlı olarak östenitten martenzite hem termoelastik hem de termoelastik olmayan bir şekilde dönüşmektedir. Bu alaşım grubunda üç farklı dönüşüm meydana gelmektedir. Bunlar;

- Yüzey merkezli kübik (YMK) – yüzey merkezli tetragonal (YMT)
- Yüzey merkezli kübik (YMK) – hacim merkezli tetragonal (HMT)
- Yüzey merkezli kübik (YMK) – hegzagonal sıkı paket (HSP)

Şekil hafızalı Fe alaşımlarının mühendislik uygulamalarında YMK-HMT ve YMK-HSP dönüşümleri daha önemlidir. Diğer dönüşümün gerçekleştirilmesi yüksek maliyetli olduğundan, kullanım alanları akademik araştırmalarla sınırlı kalmaktadır. Martenzit fazının deformasyonundan sonra şekil geri kazanma özelliği, östenit fazının kimyasal bileşimine ve tane boyutuna bağlıdır (Borges, 2013).

Fe esaslı alaşımlarda sözde elastiklik özelliği, HSP kafes yapısındaki ϵ -martenzitin YMK kafes yapılı γ -östenite dönüşümü ile mümkün olmaktadır. Sözde elastiklik özelliği deformasyon sıcaklığı ve miktarına, istifleme hata enerjisine, tane boyutuna ve çökeltilerin hacim, boyut ve dağılım gibi özelliklerine bağlıdır. Gerilim kaynaklı martenzitik dönüşüm, istifleme hata enerjisinin belirli bir eşik değerinden düşük olduğunda gerçekleşmektedir. İstifleme hata enerjisi 40 mJ/m^2 'den büyük olduğunda östenit fazının elastik deformasyonundan sonra dislokasyon kayması meydana gelerek plastik deformasyona neden olmaktadır. İstifleme hata enerjisi $20\text{-}40 \text{ mJ/m}^2$ aralığında bir değerde ise ikizlenme, 20 mJ/m^2 'den daha az ise gerilim kaynaklı martenzitik dönüşüm meydana gelmektedir. Ayrıca östenit tane boyutunun küçültülmesi de sözde elastisite özelliğini arttırmaktadır. Östenit tane bo-

yutunun küçültülmesi ikizlenme ve kaymayı en aza indirerek $\gamma \leftrightarrow \varepsilon$ dönüşümünü artırarak sözde elastikliği teşvik edecektir. Ayrıca mikro yapıdaki niyobyum karbür (NbC), vanadyum karbür (VC) ve vanadyum nitrür (VN) çökeltileri de istif hatalarına neden olarak yük uygulama esnasında ε -martenzit oluşumunu, yük kaldırıldığında ise $\varepsilon \rightarrow \gamma$ dönüşümünü arttıracaktır (Khodaverdi, Mohri, Ghafoori, Ghorabaei, & Nili-Ahmadabadi, 2022).

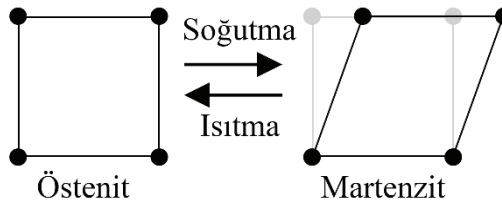
1.4. Diğer Şekil Hafızalı Alaşım Sistemleri

Şekil hafızası özelliği gösteren titanyum esaslı malzemeler üstün mekanik özellikleri sayesinde tercih edilmektedir. Ni elementinin insan vücuduna zararlı etkileri olabileceği endişesi nedeniyle, Ni içermeyen biyoyumlu olan titanyum esaslı alaşım sistemleri de biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İkili Ti-Nb, Ti-Zr ve Ti-Au alaşımları biyoyumlu olmaları, korozyon dirençleri, şekil hafıza özellikleri ve sözde elastikiyetlerinin yanında üstün mekanik özellikleri sayesinde tercih edilmektedirler (Chiu, ve diğerleri, 2022; Li, ve diğerleri, 2022).

Co-Ni-Ga üçlü alaşım sistemi de şekil hafızası göstermektedir ve ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlar olarak adlandırılan grupta yer almaktadır. Sözde elastikliği geniş bir sıcaklık aralığında (30-300 °C) görülmekle birlikte tamamen geri kazanılabilir ve bu alaşımda %8'e kadar sözde elastiklik gerilimi elde edildiği rapor edilmiştir (Monroe, Karaman, Karaca, Chumlyakov, & Maier, 2010).

2. Şekil Hafızalı Alaşımların Özellikleri

Şekil hafızalı alaşımlar deformasyon öncesi şekillerine dönüş yetenekleri, mikro yapılarında difüzyonsuz meydana gelen çift yönlü östenit \leftrightarrow martenzit dönüşüm (Şekil 1) sayesinde.

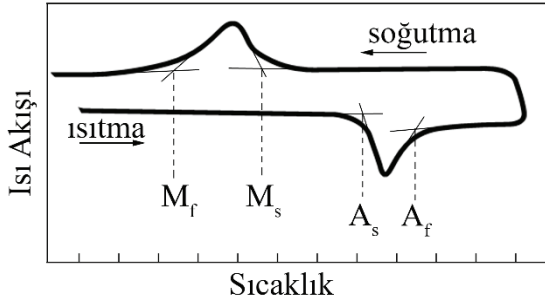


Şekil 1. Şekil hafızalı alaşımlarda ısıtma ve soğutma ile kafes yapısı değişimi (Alaneme & Okotete, 2016).

Martenzitik dönüşüm metal, polimer ve seramik sistemlerde gözlenen en yaygın faz dönüşümlerinden biridir. Bu dönüşüm sonucunda yüksek sıcaklıktaki katı bir fazdan, başka bir katı faz yani martenzit meydana gelmektedir. Bu dönüşüm difüzyonsuz olarak meydana gelmektedir. Malzeme daha büyük bir kristalografik simetriye sahip fazdan (östenit), daha küçük simetriye sahip martenzit fazına dönüşmektedir. Martenzitik dönüşümler, termoelastik (çekirdeklenmeden bağımsız) veya termoelastik

olmayan (demir alaşımlarında çekirdeklenmeye bağlı dönüşümler) olabilmektedir (Alaneme & Okotete, 2016). Çeliklerde martenzit dönüşümü yüksek sıcaklıklarda hızlı soğutma ile olurken, şekil hafızalı alaşımlarda martenzitik dönüşüm, sınırlı bir sıcaklık aralığında ısıtma ve soğutma ile tersinirdir. Çeliklerdeki gibi yüksek sıcaklık fazı östenit olarak adlandırılmaktadır ve soğutulduktan sonra bu faz ikiz martenzite dönüşmektedir (Wilkes & Liaw, 2000). Şekil hafızalı alaşımlarda görülen ve şekil hafızası özelliğinin oluşmasını sağlayan martenzitik dönüşüm gerilim ve sıcaklık ile meydana gelebilir ve tersinirdir.

Şekil hafızalı alaşımlarda belirli dönüşüm sıcaklıkları bulunmaktadır. Bunlar A_s , A_f , M_s ve M_f 'dir. "A" ve "M" sembolleri sırasıyla östenit ve martenzit fazını, "s" ve "f" alt indisleri ise sırasıyla başlangıç ve bitiş sıcaklıklarını belirtmektedir. Yüksek sıcaklıklarda östenit, düşük sıcaklıklarda ise martenzit fazı yapıda kararlıdır. Ayrıca şekil hafıza özellikleri belirli bir M_d sıcaklığı altında ($M_d > A_f$) gözlenebilmektedir. M_d sıcaklığının üzerine çıktığında şekil hafızalı alaşımlar da sıradan metalik alaşım gibi kalıcı olarak deformasyona uğramaktadır. Buna ek olarak M_d sıcaklığının üzerinde bir ısıtma ile şekil hafızası silinebilmektedir (Lojen, ve diğerleri, 2005). Dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi DSC ölçümleri ile ASTM F2004 standardında yapılmaktadır. Şekil 2'de şekil hafızalı alaşımlarda elde edilen tipik DSC eğrisi görülmektedir.



Şekil 2. Şekil hafızalı alaşımlarda elde edilen tipik DSC eğrisi (Lojen, ve diğerleri, 2005).

Bu alaşımların dönüşüm sıcaklıkları, alaşımlara ilave edilen elementler ile değiştirilebilmektedir (McCue, ve diğerleri, 2021). Dönüşüm sürecini incelemek için geleneksel olmayan şişkinlik testi, eğrilik yöntemi, girinti testi ve foto elektron emisyon testi gibi teknikler kullanılmaktadır (Sun, ve diğerleri, 2012).

Alaşımların termal geçmişine bağlı olarak şekil hafızalı alaşımların mikro yapısı, östenit, ikizlenmiş (twinned) martenzit veya deforme-ikizlenmiş (detwinned) martenzit fazından oluşabilir. Östenit ve ikizlenmiş martenzit termal döngü sırasında bir arada da bulunabilir. Bu üç faz arasında

olası altı dönüşüm (Şekil 3) vardır (Sun, ve diğerleri, 2012). Bunlar;

1-Yük uygulanması ile birlikte östenit, deforme-ikizlenmiş martenzite dönüşür.

2-Deforme-ikizlenmiş martenzit, yüksek sıcaklıklarda uygulanan yük kaldırıldığında veya gerilim uygulanmadan ısıtma yapıldığında östenite dönüşebilmektedir.

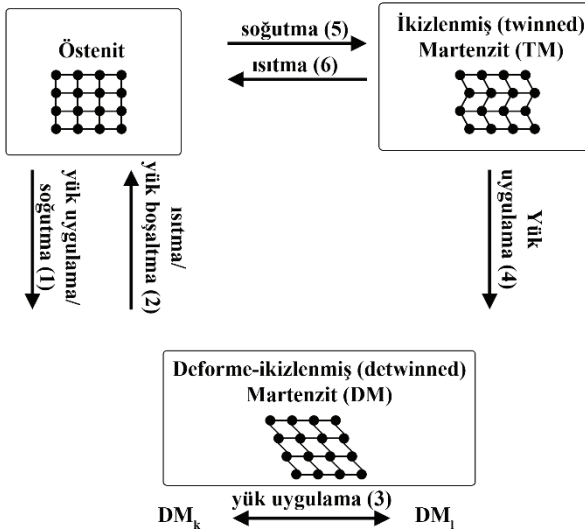
3-Deforme-ikizlenmiş martenzit (k tip), yük uygulandığında bir diğer martenzit fazına (l tip) dönüşebilmektedir.

4-İkizlenmiş martenzit, yük uygulandığında deforme-ikizlenmiş martenzite dönüşebilmektedir.

5-Östenit, soğuma ile ikizlenmiş martenzite dönüşebilmektedir.

6-İkizlenmiş martenzit, ısıtma ile östenite dönüşebilmektedir.

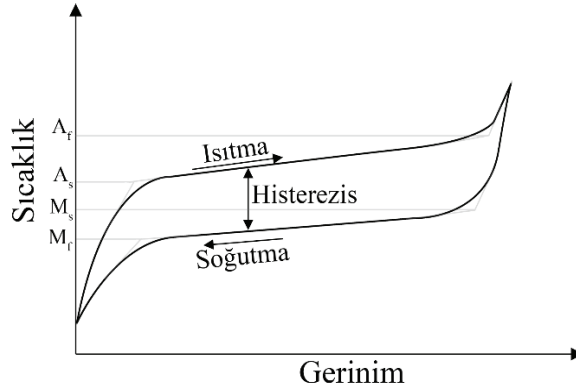
Yukarıda sıralanan dönüşümlerde sıcaklık artış ve düşüşleriyle meydana gelen östenit martenzit dönüşümleri (5 ve 6) sonucu parçanın makro görünümünde değişiklik meydana gelmemektedir. Ancak yüzeylerde kabarma görülmektedir. Yüzeyle oluşan bu kabarma gözlemlenmesi, alaşımın dönüşüm sıcaklıklarını belirlemede yardımcı olmaktadır.



Şekil 3. Şekil hafızalı alaşımlarda görülmesi olası faz dönüşümleri (Sun, ve diğerleri, 2012).

Şekil hafızalı alaşımlarda meydana gelen östenit martenzit dönüşümleri sadece uygulanan gerilim, gerinim ve sıcaklığa bağlı değildir. Bir diğer belirleyici durum, hangi fazdan dönüşümün gerçekleşeceği. Ör-

neğin soğutma sırasında östenitten martenzite dönüşüm için gerekli olan gerilim ile ısıtma sırasında martenzitten östenite dönüşme için gerekli olan gerilim birbirine eşit değildir. Östenitin martenzite dönüşmesi için martenzit fazının kimyasal serbest enerjisinin östenit fazından daha düşük olması gereklidir. Dönüşüm gerçekleşmesi için ise kimyasal olmayan, gerilim ve sürtünme enerjisi gibi serbest enerjiler de gereklidir. İki fazın kimyasal serbest enerjileri arasındaki fark, kimyasal olmayan serbest enerjiden daha büyük olduğunda dönüşüm gerçekleşebilmektedir. Benzer şekilde martenzitten östenite dönüşüm de enerjiler arasındaki fark yeterince büyük olduğunda meydana gelecektir. Şekil hafızalı alaşımların bir başka ayırt edici özelliği de bu dönüşüm-tersine dönüşümler arasındaki farklılıklardır (histerezis) (Sun, ve diğerleri, 2012). Şekil 4'de şekil hafızalı alaşımlarda meydana gelen histerezis gösterilmektedir.



Şekil 4. Şekil hafızalı alaşımlarda sıcaklık-gerilim diyagramı (Sun, ve diğerleri, 2012).

Isıtma ve soğutma arasındaki geçiş sıcaklıkları arasındaki fark histerezis olarak adlandırılmaktadır ($\Delta T = A_f - M_s$). Bu değer ısıtma sırasında yapıda %50 östenit dönüşümünün olduğu sıcak ile soğutma sırasında yapıda %50 martenzitin dönüştüğü sıcaklığın farklı olarak hesaplanmaktadır. Bu özellik, üretilecek olan malzemenin teknik özelliklerini ve çalışma aralığını belirlemek için önemlidir. Hızlı şekil dönüşümü istenen parçalarda küçük histerezis istenirken, geniş sıcaklık aralığında şeklin muhafaza edilmesi istenen uygulamalarda daha büyük bir histerezis tercih edilmektedir. Hem dönüşüm sıcaklıkları hem de histerezis, şekil hafızalı alaşımın kimyasal bileşiminden, uygulanan termomekanik işleminden ve servis şartlarından etkilenmektedir. Literatürde şekil hafızalı alaşımlarda soğutma hızının faz dönüşümüne olan etkisini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır (Zhang, ve diğerleri, 2022; Motemani, Nili-Ahmadabadi, Tan, Bornapour, & Rayagan, 2009). Yapılan çalışmalar soğutma hızının azaltılması, A_f sıcaklığının artmasına, M_f sıcaklığının ise düşmesine neden olmaktadır. Böylece soğutma hızının kontrolü ile histerezis aralığı değiştirilebilmektedir.

Östenit↔Martenzit dönüşümü sıcaklık ve/veya gerilim etkisiyle meydana gelebilmektedir. Östenit fazından oluşan numuneye bir yük uygulandığında, mikro yapıda bölgesel martenzitik bantlar oluşmaktadır. Farklı martenzit varyantları iç gerilimi en aza indirmek için ikiz gruplar halinde düzenlendikleri kabul edilmektedir. Meydana gelen martenzit bant, tane sınırı boyunca yayılacaktır. Ayrıca faz dönüşümlerinde görülen histerezis, faz sınırlarının hareketi sırasındaki enerji kaybından kaynaklanmaktadır. Bu enerji kaybı mikro yapıdan (martenzit morfolojisi, tane boyutu ve dislokasyonlar) ve uyarıcının (sıcaklık ve/veya gerilim) dağılımından etkilenmektedir. Sıcaklık veya gerilimin homojen dağılıp dağılmadığı da bu dönüşümü etkilemektedir. Bu nedenle meydana gelen faz dönüşümleri parçanın her bölgesinde değil, uyarıcıların yeterince etki ettiği bölgelerde meydana gelmektedir. Çoğu teknolojik uygulamada termal ve mekanik yükler var olduğu için şekil hafızalı alaşımdan üretilen parça çok farklı tepkiler verebilmektedir (Ananchaperumal, Vedantam, & Uchimali, 2022). Bu durum tasarımda karmaşıklığa neden olduğu gibi farklı yeteneklere sahip parçaların üretimine de olanak sağlamaktadır.

Literatürde bulunan çalışmalarda tüm şekil hafızalı alaşımlarda östenit ve martenzit fazlarının aynı sembollerle gösterildiğini bildiren veya bu şekilde anlaşılabilir ifadeler bulunmaktadır. Ancak farklı alaşımlarda östenit ve martenzit fazları için farklı semboller kullanılmaktadır. Tablo 3’de farklı alaşım sistemlerinde kullanılan östenit ve martenzit fazlarının sembolleri verilmektedir.

Tablo 3. Şekil hafızalı alaşımlarda östenit ve martenzit fazlarının sembolleri.

Faz	Alaşım	Sembol	Kaynak
Östenit	Cu-Al-based	$\beta 1$	(Kalinga, Narasimha, Murigendrappa, & Kattimani, 2022)
Östenit	Cu-Al-Ni Cu-Zn-Al	β	(Mallik & Sampath, 2008)
Östenit	Cu-Al-Mn	$\beta(A2)$	(Mallik & Sampath, 2008)
Östenit	Ni-50Ti	B2	(Mahmud, Yang, Tee, Rio, & Liu, 2008)
Martenzit	Ni-50Ti	R	(Mahmud, Yang, Tee, Rio, & Liu, 2008)
Martenzit	Ni-50Ti	B19’	(Mahmud, Yang, Tee, Rio, & Liu, 2008)
Martenzit	Cu-Al-Mn	$\beta_2(B2)$	(Mallik & Sampath, 2008)
Martenzit	Cu-Al-Mn	$\beta_1(L2_1)$	(Mallik & Sampath, 2008)
Martenzit (ortorombik)	Cu-Al-based	$\beta'1$	(Kalinga, Narasimha, Murigendrappa, & Kattimani, 2022)
Martenzit (monoklinik)	Cu-Al-based	$\gamma'1$	(Kalinga, Narasimha, Murigendrappa, & Kattimani, 2022)
Östenit (HMK)	Ti-Zr	β	(Xue, Li, Zhang, & Zhou, 2015)
Martenzit (HSP)	Ti-Zr	α'	(Xue, Li, Zhang, & Zhou, 2015)

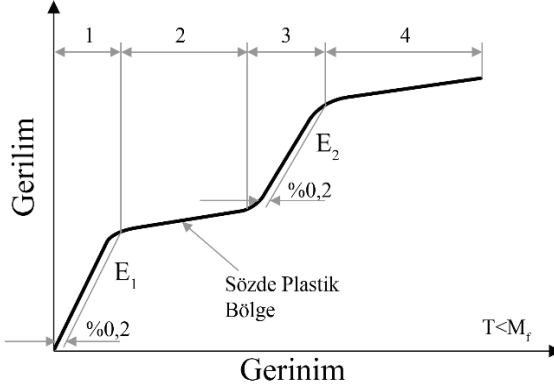
2.1. Şekil Hafıza Mekanizması

Şekil hafızalı alaşımların “şekil hafızası” davranışları bir dizi mekanizma ile açıklanmaktadır. Bunlar;

- Sözde plastik davranış (Pseudoplasticity)
- Sözde elastisite, süper elastisite, lastik davranış (Pseudoelasticity)
- Tek yönlü şekil hafıza etkisi (one-way shape memory effect)
- Çift yönlü şekil hafıza etkisi (two-way shape memory effect)

2.1.1. Sözde plastik davranış (Pseudoplasticity)

Şekil hafızalı alaşımların belirleyici özelliklerinden biri de sözde plastik davranıştır ve bu özellik tek yönlü şekil hafızasının temel mekanizmasıdır. Şekil 5’de M_f sıcaklığı altında gerilim uygulanan şekil hafızalı alaşımın gerilim-gerinim diyagramı görülmektedir.

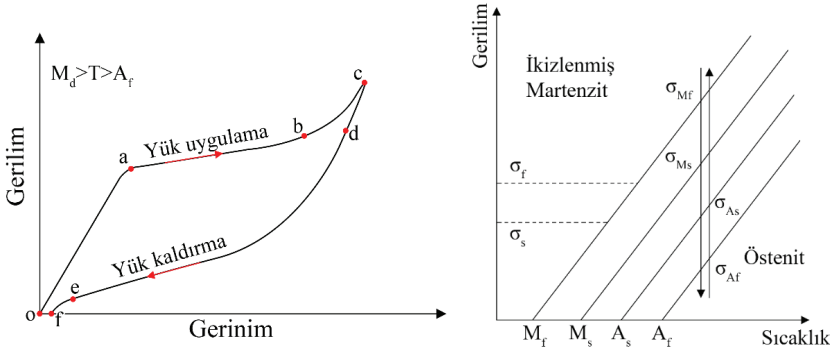


Şekil 5. Sözde plastiklik davranışı (Lojen, ve diğerleri, 2005).

Akma geriliminin altında şekil hafızalı alaşımlar diğer malzemeler gibi davranmaktadır (Bölge 1). Akma gerilmesine ulaşıldığında geleneksel malzemeler dislokasyon kaymasıyla plastik olarak deforme olmaya başlarken, şekil hafızalı alaşımlar dislokasyon hareketleri olmadan martenzitik varyantların birleşmesi ile deforme olmaya başlar (Bölge 2). Bu deformasyon, dislokasyonların kayması ile oluşan plastik deformasyonun aksine tersinirdir. Gerilim kaldırıldığında deformasyon kendiliğinden geri dönmez ancak östenit sıcaklığına çıktığında deformasyon ortadan kalkmaktadır. Bu duruma sözde plastiklik adı verilmektedir. Sözde plastik deformasyon sırasında gerilim çok fazla artmaz, ancak daha fazla martenzitik varyantlarının birleşmesi mümkün olmadığı noktaya gelindiğinde gerilimde dikkate değer bir artış meydana gelmektedir (Bölge 3). Gerilim daha fazla arttığında artık geri dönüşü olmayan plastik deformasyon meydana gelmektedir (Bölge 4) (Lojen, ve diğerleri, 2005).

2.1.2. Süper elastiklik veya sözde elastiklik (Pseudoelasticity)

Yüksek sıcaklıklarda (A_f ve M_d sıcaklık aralığında) malzemeyi deforme edebilecek belirli bir gerilim altında şekil hafızalı alaşımlar östenit-martenzit dönüşümüne uğramaktadır. Bu dönüşüm gerilim kaynaklı martenzit dönüşüm (strain induced martensite) olarak adlandırılmaktadır. Burada M_d sıcaklığı martenzit fazının gerilim ile oluşturulabileceği en yüksek sıcaklığı tanımlamaktadır (Alaneme & Okotete, 2016). Uygulanan gerilim kaldırıldığında martenzit, östenite dönüşmekte ve malzeme eski şeklini alabilmektedir. Bu davranışa sözde elastiklik (pseudoelasticity) veya süper elastiklik (superelasticity) adı verilmektedir. Bununla birlikte M_s ve A_f arasındaki sıcaklıklarda gerilim uygulanıp kaldırıldığında benzer martenzit-östenit dönüşümü elde edilebilir. Ancak yük tamamen kaldırıldığında dahi yapı tamamen östenite geri dönmeyecek ve bir miktar gerilim tutacaktır (Wilkes & Liaw, 2000). Ni-Ti alaşımlarının süper elastiklik özellikleri, 400-550 °C sıcaklıkta termomekanik işlemler kullanılarak değiştirilebilmektedir (Lojen, ve diğerleri, 2005). Şekil 5'de şekil hafızalı alaşımlarda görülen sözde elastiklik davranışı (Şekil 6.a) ve gerilim sıcaklık faz diyagramı verilmektedir (Şekil 6.b).



Şekil 6. Şekil hafızalı alaşımların: a) sözde elastiklik davranışı (Owusu-Danquah, Saleeb, & Soudah, 2021) b) gerilim-sıcaklık faz diyagramı (Barati, Kadkhodaei, & Chirani, 2018).

Şekil hafızalı alaşımlarda sözde elastiklik M_d ve A_f arasında olan sabit bir sıcaklıkta görülmektedir. Şekil 6 incelendiğinde, gerilim uygulanmaya başladığında sistemde enerji depolanmaya başlanır ve ani bir gerilim artışı meydana gelir (a noktası). Bu östenit fazının ikizlenmiş martenzit fazına dönüşümün başlangıcına karşılık gelmektedir. “a” noktası ile “b” noktası arasında malzemede kademeli sertleşme görülmektedir. “b-c-d” bölgelerinde ise bir başka enerji depolama mekanizması aktif durumdadır ve tüm faz dönüşümleri tamamlanır ve artan bir sertleşme görülmektedir. Uygulanan yükün kaldırılmasıyla depolanan enerji geri verilir ve tersine dönüşüm gerçekleşir (e ve f). Şekil 6.b’de ise faz dönüşümlerinin gerilim ve sıcaklığa bağlı olarak gerçekleştiği gösterilmektedir. Sıcaklık arttıkça

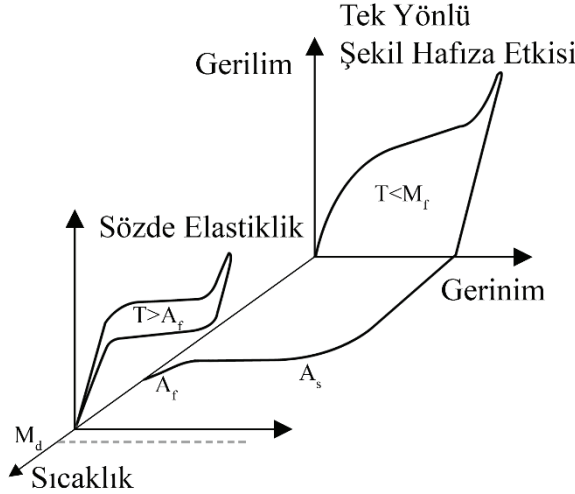
ikizlenmiş martenzit fazının oluşması için gereken gerilim miktarının arttığı anlaşılmaktadır. Sıcaklık ile gerilim ilişkisi Clausius-Clapeyron eşitliği (Eşitlik 1) ile hesaplanabilmektedir (Wollants, Bonte, & Roos, 1979).

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta T} = - \frac{\Delta H}{T_0 \varepsilon_t} \quad (1)$$

Burada $\Delta\sigma$ kritik stres değerleri arasındaki fark, ε_t dönüşüm gerinimi, ΔH dönüşüm entalpisi, ΔT dönüşüm sıcaklık farkı (histerezis) ve T_0 ise denge sıcaklığıdır.

2.1.3. Tek yönlü şekil hafıza etkisi

Şekil hafızalı alaşımlarda martenzit sözde plastik olarak deforme edildikten sonra östenit sıcaklığına kadar ısıtılırsa, martenzit fazı deforme olmadan önceki östenit kristalleriyle aynı düzenlemeye ve şekle dönüşür. Yani martenzit fazı östenite dönüşür ve böylece parçanın şekli sözde plastik deformasyon öncesi şekline döner. Bu dönüşümden sonra sıcaklık düşürüldüğünde ise şekilde herhangi bir değişiklik meydana gelmez ve parça deforme edilmemiş şekliyle kalır (Şekil 7). Bu özellik tek yönlü şekil hafıza etkisi olarak adlandırılmaktadır ve şekil hafızalı alaşımların doğal bir özelliğidir. Eğer deformasyon önce şekle dönüş dış kuvvetler ile kısıtlanırsa, martenzitten östenite dönüş sırasında gerilim güçlü bir şekilde artacaktır. Bu gerilimden faydalanılarak mekanik işler yaptırılabilir (Lojen, ve diğerleri, 2005).



Şekil 6. Tek yönlü şekil hafıza etkisi ve sözde elastik davranış (Barati, Kadkhodaei, & Chirani, 2018).

2.1.4. Çift Yönlü Şekil Hafıza Etkisi

İki yönlü şekil hafıza etkisi, harici bir gerilim uygulanmadan, sadece iç gerilimleri harekete geçirerek malzemenin tekrarlı olarak, bir şekilden diğerine dönüşebilmesidir. Şekil hafızalı alaşımlara iki yönlü şekil hafızası kazandırabilmek için dâhili stres depolaması oluşturmak gerekmektedir. Bu gerilim depoları oluşturulan dislokasyonlar ve/veya artık martenzit fazlardır.

Şekil hafızalı alaşımların doğal özelliği, sözde plastik deformasyon öncesi martenzit şeklini hatırlayabilme (tek yönlü şekil hafızası) özelliğidir. Sözde plastik deformasyon ile aldıkları şekli hatırlayamazlar. Ancak bunu şekil hafızası eğitim teknikleriyle (training) öğrenebilirler. Eğitim, sözde plastik deformasyon tarafından martenzit varyantlarını aynı şekle dönüşmeye zorlayan bir mikro yapı ve stres alanları yaratan, tekrarlı bir termomekanik işlemdir. Eğitimden sonra çift yönlü hafıza etkisi kazanan bir şekil hafızalı malzeme, östenit fazında (yüksek sıcaklıkta) bir şekle, martenzit fazında (düşük sıcaklıkta) ise herhangi bir yük uygulamadan başka bir şekle dönüşebilmektedir. Uygulanacak olan eğitimler şekil hafızalı alaşıma göre değişmektedir (Hayrettin, ve diğerleri, 2019). Çift yönlü şekil hafıza etkisinde şekil değiştirebilme yeteneği, tek yönlü şekil hafızaya göre daha kısıtlıdır. Ni-Ti alaşımlarında %4'e kadar ulaşabilirken, Cu esaslı şekil hafızaları alaşımlarda bu oran daha düşüktür (Lojen, ve diğerleri, 2005). Çift yönlü şekil hafızası kazandırmak için malzemeyi iki sıcaklıkta (soğutma ve ısıtma sırasında) da eğitmek gerekmektedir.

3. Şekil Hafızalı Alaşımlarda Çift Yönlü Şekil Hafıza Özelliği

Çift yönlü şekil hafızası sonradan kazandırılan bir özelliktir ve eğitim ile malzemeye kazandırılabilir. Çift yönlü hafıza eğitimi ile malzemede yönlendirilmiş yapı kusurları (dislokasyonlar veya çökeltiler) oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu kusurlar eğitim ile seçilen martenzit varyantlarının büyümesini teşvik eder. Çift yönlü şekil hafıza etkisi martenzit dönüşüm davranışlarına, eğitim yöntemlerine (süper elastik veya şekil hafıza eğitimleri, termomekanik eğitim, gerilim altında yaşlandırma) ve eğitim parametrelerine bağlıdır (Yao, Huang, Su, & Xie, 2018).

3.1. Şekil Hafızası Kazandırma Teknikleri

Şekil hafızası kazandırma teknikleri (eğitim), martenzit varyantlarını seçmek için uygulanan bir gerilim müdahalesi ile martenzitik dönüşüm döngülerinin tekrarına dayanmaktadır. Bu döngüler tamamen mekanik (Pons, Sade, Lovey, & Cesari, 1993; Picornell, Sade, & Cesari, 1994; Mallarria, Lovey, & Sade, 2009) olabildiği gibi, sıcaklıkla birlikte termomekanik şekillerde de yapılabilirler (Masdeu, Pons, Chumlyakov, & Cesari, 2021; Atli, Karaman, Noebe, & Gaydosh, The effect of training on two-

way shape memory effect of binary NiTi and NiTi based ternary high temperature shape memory alloys, 2013; Hayrettin, ve diğerleri, 2019; Stalmans, Humbeeck, & Delaey, 1992; Pons, Masse, & Portier, 1999). Tablo 4'de Ni-Ti alaşımlarını eğitmede kullanılan yöntemler özetlenmiştir.

Tablo 4. NiTi alaşımları için eğitim yöntemleri (Luo & Abel, 2007).

Yöntem	Eğitim adımları
Martenzit ön deformasyon	<ol style="list-style-type: none"> 1. Numune Mf'nin altına soğutulur 2. Martenzit yapı deforme edilir 3. Gerilim tamamen kaldırılır
Termomekanik döngü işlemi	
a) Şekil hafıza döngüsü	<ol style="list-style-type: none"> 1. Numune Mf'nin altına soğutulur 2. Martenzit yapıda numune istenen şekli aldırılır 3. Yük tamamen boşaltılır 4. Af'den daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılır 5. İlk dört adım birkaç kez tekrarlanır
b) Deforme edilmiş martenzitin kısıtlı deformasyonu	<ol style="list-style-type: none"> 1. Numune Mf'nin altına soğutulur 2. Martenzit yapıda numune istenen şekil kazandırılır 3. Kazandırılan şekil sabitlenecek şekilde Mf ve Af sıcaklıklarına kadar ısıtılıp soğutulur 4. İlk üç adım birkaç kez tekrarlanır
c) Sözde elastik döngü	<ol style="list-style-type: none"> 1. Numune Af sıcaklığı üzerine, Md'den düşük olacak şekilde ısıtılır 2. Östenit yapıda numuneye istenen şekil kazandırılır 3. Yük tamamen kaldırılır 4. 2. ve 3. Adımlar birkaç kez tekrarlanır
d) Şekil hafıza döngüsü ile sözde elastik döngü birleşimi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Numune Af sıcaklığı üzerine, Md'den düşük olacak şekilde ısıtılır 2. Östenit yapıda numuneye istenen şekil kazandırılır 3. Yük altında Mf'nin altına soğutulur 4. Yük tamamen kaldırılır 5. Önceki adımlar birkaç kez tekrarlanır
Tekrar ısıtma işlemi	Yaklaşık 30 dakika boyunca başka bir şekle sabitlenmiş numuneye ısıtma işlemi prosedürü tekrarlanır

Tamamen mekanik döngüler, gerilim kaynaklı dönüşümleri (süper elastiklik) tetiklerler. Termomekanik işlemler, sabit bir gerilim altında soğutma-ısıtma ile yapılabildiği gibi deformasyonsuz olarak martenzitin soğutma ve ısıtma işlemleri ile de gerçekleştirilebilir. Çift yönlü şekil hafıza etkisi, döngüler sırasında dislokasyonlar gibi yönlendirilmiş kafes kusur-

larının oluşmasına atfedilmektedir. Oluşturulan yönlendirilmiş kusurlar, seçilen martenzit varyantlarının büyümesini teşvik etmektedir. Östenit matrisinde gerilim uygulanmasıyla oluşturulan çökeltiler yönlendirilmiş kusurların diğer kaynaklarıdır (Nishida, Wayman, & Honma, 1984; Isalgué, Lovey, & Sade, 1993; Chang, Vokoun, & Hu, 2001; Fukuda, Takahata, Kakeshita, & Saburi, 2001). Bir başka eğitim yöntemi, seçilen martenzit varyantlarının bir kısmını gerilim ile uyarmak ve bu martenzit plakalarını belirli bir süre tutarak stabilize etmektir. Gerilim kaldırıldıktan sonra bu stabilize edilmiş plakalar malzemede kalır ve sonraki soğutmada aynı tip martenzit varyantlarının oluşumunu tetikler ve böylece iki yönlü şekil hafızası oluşturulmuş olur (Rapacioli, Torra, Cesari, Guilemany, & Miguel, 1988; Guilemany & Fernández, 1994; Cingolani, Ahlers, & Sade, 1995; Larochette & Ahlers, 2003; Tagiltsev, Panchenko, Chumlyakov, Fatkulin, & Karaman, 2020; Masdeu, Pons, Chumlyakov, & Cesari, 2021). Çift yönlü şekil hafızası kazandırma yöntemleri şekil hafızalı alaşıma göre değişiklik göstermektedir.

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan şekil hafızalı alaşımlar, dislokasyon kontrollü deformasyon ve toparlanma, yeniden kristalleşme, sürünme, dönüşüm kaynaklı plastisite gibi termal etkilerle ortaya çıkan durumlara maruz kalmaktadırlar. Bu mekanizmalar şekil hafızası özelliğinin kaybolmasına sebep olmaktadır (Atli, Karaman, Noebe, & Maier, Comparative analysis of the effects of severe plastic deformation and thermomechanical training on the functional stability of Ti50.5Ni24.5Pd25 high-temperature shape memory alloy, 2011).

3.1.1. Termomekanik eğitim (Thermomechanical Training)

Çift yönlü şekil hafızası kazandırma eğitimleri arasında en kolaylarından biri termomekanik eğitimidir. Literatürde bazı kaynaklar bu eğitimi “şekil hafıza eğitimi (shape memory training)” olarak da adlandırmaktadır (Liu, Liu, & Humbeeck, 1998). Bu eğitimde genellikle martenzit dönüşüm bitiş sıcaklığının (M_f) altında bir yük uygulayıp kaldırılarak mekanik döngü gerçekleştirilir. Ardından herhangi bir gerilim uygulanmadan sıcaklık östenit dönüşüm bitiş sıcaklığının (A_f) üzerine yükseltilerek parça orijinal şekline geri döner. Düşük sıcaklıklarda uygulanan gerilim ön gerilim (ϵ_1) olarak adlandırılmaktadır. Uygulanacak ön gerilim tek eksenli olarak seçildiğinde şekil hafıza etkisi soğuduğunda martenzit dönüşüm miktarı (gerinimi) (ϵ_M) veya ısıtıldığında östenit dönüşüm miktarı (ϵ_A) kadar şekil değişimi ile kazandırılmaktadır. Tam olarak dönüştürülmüş bir şekil değişimi için termal çevrim dönüşüm gerilimi (ϵ_{TW}) Eşitlik 2’de verilen denklem kullanılabilir. (Yao, Huang, Su, & Xie, 2018).

$$\epsilon_{TW} = \epsilon_M = \epsilon_A \quad (2)$$

Yapılan çalışmalar, şekil hafızalı alaşımların termomekanik eğitimler sırasında numuneye uygulanan ϵ_1 'nin, işlem sonunda kazanılan ϵ_{TW} 'den yaklaşık 2,5 kat yüksek olduğunu göstermektedir. Örnek olarak Ni-Ti alaşımında %13,3 ön deformasyon uygulandığında %4,1 şekil geri kazanımı elde edilebilmektedir (Liu, Liu, & Humbeeck, 1998).

3.1.2. Martenzit ön deformasyonu (Marforming)

Bu eğitim yönteminde, numune termal döngü işlemine tabi tutulmadan önce ön deformasyona maruz bırakılmaktadır. Böylece yapıda dislokasyon yoğunluğu artırılarak iç gerilim kaynakları oluşturulmaktadır. Bu iç gerilim kaynaklarının, martenzit varyantlarının oluşturulmasında harici uygulanan strese yardımcı olduğu düşünülmektedir. Daha sonra numuneye sabit bir gerilim altın ısıtma/soğutma işlemleri uygulanmaktadır. Ön deformasyon sonra tavlama işlemi de uygulanabilir. Yapılan çalışmalar ön deformasyon sonrası düşük sıcaklıkta tavlamanın çift yönlü şekil hafıza etkisini iyileştirmede etkili olduğunu göstermektedir (Kockar, Karaman, Kim, & Chumlyakov, 2006; Zhou, ve diğerleri, 2022).

3.1.3. Yeniden Isıtma Yöntemi

Yeniden ısıtma yönteminde, daha önce ısıl işlem görmüş bir numuneye uygulanan ikinci bir ısıl işlem sürecidir. Yaklaşık 30 dakikalık ilave ikinci bir ısıl işlem, çift yönlü şekil hafıza özelliğini geliştirmektedir. Daha düşük (10 dakika) ve daha uzun (60 dakika) ikinci ısıl işlem sürelerinin ise çift yönlü şekil hafıza etkisini olumsuz yönde etkilediği yapılan çalışmalarda bildirilmektedir. Termomekanik döngü eğitimi ile karşılaştırıldığında, ikinci ısıl işlem uygulaması çok daha kolaydır (Kockar, Karaman, Kim, & Chumlyakov, 2006).

3.1.4. Çökelti Oluşturma

Çift yönlü şekil hafıza özelliğini kazandırmanın temeli, yapıda kusurlar oluşturmak ve numune soğutulması esnasında bu kusurların istenen martenzit varyasyonlarının seçilmesini sağlamasıdır. Yapıda oluşturulabilecek kusurlardan biri de çökeltilerdir. Oluşturulan çökelti soğuma esnasında iç gerilme kaynağı olarak görev alarak, martenzit büyümesini kontrol etmektedir. Bu eğitim yöntemi Ti-Ni alaşımlarında kullanılmıştır. Ti-Ni alaşımı tek fazlı bölgeye kadar ısıtıldıktan sonra suda soğutulmaktadır. Daha sonra numuneler sabit bir şekilde tutularak, 600 °C sıcaklığın altında yapılan yaşlandırma işlemi ile birlikte yapıda Ni'ce zengin çökelti oluşturulması sağlanmaktadır (Nishida, Wayman, & Honma, 1984). Ni-Ti alaşımı üzerinde yapılan bir başka çalışmada ise çift yönlü şekil hafıza etkisini en fazla geliştiren ısıl işlem parametrelerinin 2 saat süre ile 400 °C sıcaklık olduğu rapor edilmiştir (Han, ve diğerleri, 2022).

4. Sonuçlar

Akıllı malzemeler grubunda yer alan Şekil hafızalı alaşımlar, deformasyon ncesi Şekillerini kazanabilmeleri sayesinde ilgi odağı olmaya devam etmektedirler. Son yıllarda, bu malzemeler üzerinde yapılan çalışmaların sayısı artarak devam etmektedir. Biyomedikal, inşaat ve havacılık gibi birçok sektörde bu malzemelerden faydalanılmaktadır. Ticari olarak kullanılan alaşımlar ise Ni-Ti ve bakır esaslı Şekil hafızalı alaŐımlardır. Östenit sıcaklığında gerilim uygulandığında Şekil deđiŐtirip, gerilim kaldırıldığında ise eski Şekline geri dnebiyen (sözde elastiklik) zellikleri vardır. Martenzit sıcaklığında deforme edildikten sonra östenit sıcaklığına ısıtma ile tekrar ilk Şekillerini alabilmektedirler (tek yönlü Şekil hafıza etkisi). Bu alaşımların doğal olarak sahip olmadıkları ve ancak eğitim ile ğretilebiyen bir başka özelliği ise çift yönlü Şekil hafıza etkisidir. Eğitim ile yüksek sıcaklıklarda bir Şekle, düşük sıcaklıklarda ise bir başka Şekle gerilim uygulanmadan sadece sıcaklık etkisiyle dönüŐebilmektedirler. Farklı alaşımlar için farklı eğitim yöntemleri bulunmaktadır. Şekil hafızalı alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar, dönüşüm sıcaklıklarını ve histeresis aralığını deđiŐtirme, çift yönlü Şekil hafıza ve sönümleme özelliğini geliştirme, eğitim ve üretim yöntemlerinin etkilerini araştırma ve mekanik özelliklerini iyileştirme konularında olduğu görülmektedir.

Kaynakça

- Alaneme, K. K., & Okotete, E. A. (2016). Reconciling viability and cost-effective shape memory alloy options – A review of copper and iron based shape memory metallic systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(3), 1582-1592. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jestech.2016.05.010>
- Ananchaperumal, V., Vedantam, S., & Uchimali, M. (2022). A discrete particle model study of the effect of temperature and geometry on the pseudoelastic response of shape memory alloys. *International Journal of Mechanical Sciences*, 230, 107527. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107527>
- Atli, K. C., Karaman, I., Noebe, R. D., & Gaydos, D. (2013). The effect of training on two-way shape memory effect of binary NiTi and NiTi based ternary high temperature shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*, 560, 653-666. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.10.009>
- Atli, K. C., Karaman, I., Noebe, R. D., & Maier, H. J. (2011). Comparative analysis of the effects of severe plastic deformation and thermomechanical training on the functional stability of Ti50.5Ni24.5Pd25 high-temperature shape memory alloy. *Scripta Materialia*, 64(4), 315-318. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.10.022>
- Barati, M., Kadkhodaei, M., & Chirani, S. A. (2018). Investigation on pseudoelastic training method and the generated two-way shape memory effect in NiTi shape memory alloy. *Modares Mechanical Engineering*, 18(3), 86-94. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-7938-en.html> adresinden alındı
- Borges, F. C. (2013). Iron based shape memory alloys: mechanical and structural properties. F. M. Fernandes içinde, *Shape Memory Alloys – Processing, Characterization and Applications* (s. 115-128). London: IntechOpen. doi:<http://dx.doi.org/10.5772/51877>
- Buehler, W., Gilfrich, J., & Willey, R. (1963). Effect of Low-Temperature Phase Changes on the Mechanical Properties of Alloys near Composition TiNi. *Journal of Applied Physics*, 34(5), 1475-1477. doi:10.1063/1.1729603
- Chang, C.-Y., Vokoun, D., & Hu, C.-T. (2001). Two-way shape memory effect of NiTi alloy induced by constraint aging treatment at room temperature. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32, 1629-1634. doi:<https://doi.org/10.1007/s11661-001-0141-7>
- Chiu, W.-T., Fuchiwaki, K., Umise, A., Tahara, M., Inamura, T., & Hosoda, H. (2022). Enhancement of the superelastic behavior of the Ti–Au–Cr–based shape memory alloys via the manipulations of annealing–treatments and Ta additions. *Materials Science and Engineering: A*, 847, 143312. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143312>
- Cingolani, E., Ahlers, M., & Sade, M. (1995). The two way shape memory effect in Cu□Zn□Al single crystals: role of dislocations and stabilization. *Acta Metallurgica et Materialia*, 43(6), 2451-2461. doi:[https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00141-7](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00141-7)

org/10.1016/0956-7151(94)00415-3

- Duerig, T., Pelton, A., & Stöckel, D. (1999). An overview of nitinol medical applications. *Materials Science and Engineering: A*, 273-275, 149-160. doi:https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00294-4
- Fukuda, T., Takahata, M., Kakeshita, T., & Saburi, T. (2001). Two-Way Shape Memory Properties of a Ti-51Ni Single Crystal Including Ti₃Ni₄ Precipitates of a Single Variant. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 42, 323-328. doi:https://doi.org/10.2320/matertrans.42.323
- Guilemany, J., & Fernández, J. (1994). On the mechanism of two way shape memory effect obtained by stabilised stress induced martensite. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 30(3), 319-323. doi:https://doi.org/10.1016/0956-716X(94)90382-4
- Han, Y., Liu, M., Hu, L., Kang, X., Lin, D., Zhang, Y., & Xu, L. (2022). Deformation twins induced by excessive deformation enhanced two-way shape memory effect in aged NiTi alloy. *Materials Letters*, 324, 132632. doi:https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132632
- Hayrettin, C., Karakoc, O., Karaman, I., Mabe, J., Santamarta, R., & Pons, J. (2019). Two way shape memory effect in NiTiHf high temperature shape memory alloy tubes. *Acta Materialia*, 163, 1-13. doi:https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.09.058
- Huang, W. (1999). Two-way behavior of a Nitinol torsion bar. M. R. Wuttig içinde, *Smart Structures and Materials 1999: Smart Materials Technologies* (s. 284-294). Newport Beach, Amerika Birleşik Devletleri: SPIE.
- Isalgué, A., Lovey, F., & Sade, M. (1993). Oriented growth of gamma precipitates and TWSME in Cu-Zn-Al. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 28(10), 1183-1188. doi:https://doi.org/10.1016/0956-716X(93)90451-W
- Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 1078-1113. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084
- Kalinga, T., Narasimha, G. B., Murigendrappa, S., & Kattimani, S. (2022). Role of alloying additions on phase transformations, mechanical and pseudoelastic behavior of Cu-Al-Be shape memory alloys. *Materials Today: Proceedings*, 59, 612-616. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.092
- Khodaverdi, H., Mohri, M., Ghafoori, E., Ghorabaei, A. S., & Nili-Ahmadabadi, M. (2022). Enhanced pseudoelasticity of an Fe-Mn-Si-based shape memory alloy by applying microstructural engineering through recrystallization and precipitation. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2999-3013. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.092
- Kim, N.-G., Han, M.-W., Iakovleva, A., Park, H.-B., Chu, W.-S., & Ahn, S.-H. (2020). Hybrid composite actuator with shape retention capability for morphing flap of unmanned aerial vehicle (UAV). *Composite Structures*,

243, 112227. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112227>

- Kockar, B., Karaman, I., Kim, J., & Chumlyakov, Y. (2006). A method to enhance cyclic reversibility of NiTiHf high temperature shape memory alloys. *Scripta Materialia*, 54(12), 2203-2208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scrip-tamat.2006.02.029>
- Larochette, P. A., & Ahlers, M. (2003). Grain-size dependence of the two-way shape memory effect obtained by stabilisation in Cu–Zn–Al crystals. *Materials Science and Engineering: A*, 361(1), 249-257. doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00515-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00515-X)
- Li, S., Lim, J.-H., Rehman, I. U., Lee, W.-T., Kim, J. G., Oh, J. S., . . . Nam, T.-H. (2022). Tuning the texture characteristics and superelastic behaviors of Ti–Zr–Nb–Sn shape memory alloys by varying Nb content. *Materials Science and Engineering: A*, 845, 143243. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143243>
- Liebig, T., Henkes, H., Reinartz, J., & Kühne, D. (2006). A novel self-expanding fully retrievable intracranial stent (SOLO): experience in nine procedures of stent-assisted aneurysm coil occlusion. 48, 471-478. doi:10.1007/s00234-006-0062-7
- Liu, Y., Liu, Y., & Humbeeck, J. V. (1998). Two-way shape memory effect developed by martensite deformation in NiTi. *Acta Materialia*, 47(1), 199-209. doi:[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00325-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00325-5)
- Lojen, G., Anžel, I., Kneissl, A., Križman, A., Unterweger, E., Kosec, B., & Bizjak, M. (2005). Microstructure of rapidly solidified Cu–Al–Ni shape memory alloy ribbons. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, 220-229. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.196>
- Luo, H. Y., & Abel, E. W. (2007). A comparison of methods for the training of NiTi two-way shape memory alloy. *Smart Materials and Structures*, 16(6), 2543. doi:10.1088/0964-1726/16/6/058
- Mahmud, A. S., Yang, H., Tee, S., Rio, G., & Liu, Y. (2008). Effect of annealing on deformation-induced martensite stabilisation of NiTi. *Intermetallics*, 16(2), 209-214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2007.09.003>
- Malarria, J., Lovey, F., & Sade, M. (2009). Two way shape memory effect in CuZnAl single crystals after pseudoelastic cycling at low temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 517(1), 118-124. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.044>
- Mallik, U., & Sampath, V. (2008). Influence of aluminum and manganese concentration on the shape memory characteristics of Cu–Al–Mn shape memory alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 459(1), 142-147. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.04.254>
- Masdeu, F., Pons, J., Chumlyakov, Y., & Cesari, E. (2021). Two-way shape memory effect in Ni₄₉Fe₁₈Ga₂₇Co₆ ferromagnetic shape memory single crystals. *Materials Science and Engineering: A*, 805, 140543. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140543>

doi.org/10.1016/j.msea.2020.140543

- McCue, I. D., Valentino, G. M., Trigg, D. B., Lennon, A. M., Hebert, C. E., Secker, D. P., . . . Storck, S. M. (2021). Controlled shape-morphing metallic components for deployable structures. *Materials & Design*, 208, 109935. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109935
- Monroe, J., Karaman, I., Karaca, H., Chumlyakov, Y., & Maier, H. (2010). High-temperature superelasticity and competing microstructural mechanisms in Co₄₉Ni₂₁Ga₃₀ shape memory alloy single crystals under tension. *Scripta Materialia*, 62(6), 368-371. doi:https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.11.006
- Motemani, Y., Nili-Ahmadabadi, M., Tan, M., Bornapour, M., & Rayagan, S. (2009). Effect of cooling rate on the phase transformation behavior and mechanical properties of Ni-rich NiTi shape memory alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 469(1), 164-168. doi:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.01.153
- Nishida, M., Wayman, C., & Honma, T. (1984). Electron microscopy studies of the all-around shape memory effect in a Ti-51.0 at.%Ni alloy. *Scripta Metallurgica*, 18(12), 1389-1394. doi:https://doi.org/10.1016/0036-9748(84)90371-5
- Otsuka, K., & Wayman, C. (1998). *Shape Memory Materials*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Owusu-Danquah, J., Saleeb, A., & Soudah, M. (2021). Cyclic pseudoelastic training and two-way shape memory behavior of a NiTi alloy with small irrecoverable plastic strains: numerical modeling. *International Journal of Solids and Structures*, 217-218, 178-192. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.02.005
- Ölander, A. (1932). An Electrochemical Investigation Of Solid Cadmium-Gold Alloys. *Journal of the American Chemical Society*, 54(10), 3819-3833. doi:https://doi.org/10.1021/ja01349a004
- Patel, S. K., Swain, B., Roshan, R., Sahu, N. K., & Behera, A. (2020). A brief review of shape memory effects and fabrication processes of NiTi shape memory alloys. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5552-5556. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.539
- Perkins, J., Hodgson, D., Duerig, T., Melton, K., Stockel, D., & Wayman, C. (1990). *Engineering aspects of shape memory alloys*. London: Butterworth-Heinemann Ltd.
- Picornell, C., Sade, M., & Cesari, E. (1994). Characteristics of martensitic transformation and the induced Two-Way Shape Memory Effect after training by compressive pseudoelastic cycling in Cu-Zn-Al single crystals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 25, 687-695. doi:https://doi.org/10.1007/BF02665445
- Pons, J., Masse, M., & Portier, R. (1999). Thermomechanical cycling and two-way

- memory effect induced in Cu–Zn–Al. *Materials Science and Engineering: A*, 273-275, 610-615. doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00439-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00439-6)
- Pons, J., Sade, M., Lovey, F. C., & Cesari, E. (1993). Pseudoelastic Cycling and Two-Way Shape Memory Effect in β Cu–Zn–Al Alloys with γ -Precipitates. *Materials Transactions*, 34(10), 888-894. doi:<https://doi.org/10.2320/matertrans1989.34.888>
- Rao, Z., Wang, X., Leng, J., Yan, Z., & Yan, X. (2022). Design methodology of the Ni50Ti50 shape memory alloy beam actuator: Heat treatment, training and numerical simulation. *Materials & Design*, 217, 110615. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110615>
- Rapacioli, R., Torra, V., Cesari, E., Guilemany, J., & Miguel, J. (1988). Two way memory effect due to stabilized martensite. *Scripta Metallurgica*, 22(2), 261-264. doi:[https://doi.org/10.1016/S0036-9748\(88\)80345-4](https://doi.org/10.1016/S0036-9748(88)80345-4)
- Schroeder, T., & Wayman, C. (1977). The two-way shape memory effect and other “training” phenomena in Cu–Zn single crystals. *Scripta Metallurgica*, 11(3), 255-230. doi:[https://doi.org/10.1016/0036-9748\(77\)90058-8](https://doi.org/10.1016/0036-9748(77)90058-8)
- Schwartz, M. (2009). *Smart Materials*. London: Taylor & Francis Group, LLC.
- Stalmans, R., Humbeeck, J. V., & Delaey, L. (1991). Training and the two way memory effect in copper based shape memory alloys. *Journal de Physique IV*, 1(C4), 403-408. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0041827628&partnerID=40&md5=306e3ad657efb3fa222ab3111bdadc0f> adresinden alındı
- Stalmans, R., Humbeeck, J. V., & Delaey, L. (1992). Thermomechanical cycling, two way memory and concomitant effects in Cu-Zn-Al alloys. *Acta Metallurgica et Materialia*, 40(3), 501-511. doi:[https://doi.org/10.1016/0956-7151\(92\)90399-Y](https://doi.org/10.1016/0956-7151(92)90399-Y)
- Sun, L., Huang, W., Ding, Z., Zhao, Y., Wang, C., Purnawali, H., & Tang, C. (2012). Stimulus-responsive shape memory materials- A review. *Materials & Design*, 33, 577-640. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.065>
- Tagiltsev, A., Panchenko, E., Chumlyakov, Y., Fatkullin, I., & Karaman, I. (2020). Two-way shape memory effect in stress-induced martensite aged Ni50.3Ti32.2Hf17.5 alloy. *Materials Letters*, 268, 127589. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127589>
- Vernon, L., & Vernon, H. (1941). *Amerika Birleşik Devletleri Patent No. 2234993*.
- Wang, B., Kang, G., Kan, Q., Wu, W., Zhou, K., & Yu, C. (2018). Atomistic study on the super-elasticity of single crystal bulk NiTi shape memory alloy under adiabatic condition. *Computational Materials Science*, 142, 38-46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.10.011>
- Wen, Y., Peng, H., Sun, P., Liu, G., & Li, N. (2010). A novel training-free cast Fe–18Mn–5.5Si–9.5Cr–4Ni shape memory alloy with lathy delta ferrite. *Scripta Materialia*, 62(2), 55-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scripta>

mat.2009.10.004

- Wilkes, K., & Liaw, P. (2000). The fatigue behavior of shape-memory alloys. *JOM*, 52, 45-51. doi:10.1007/s11837-000-0083-3
- Wollants, P., Bonte, M. D., & Roos, J. R. (1979). A Thermodynamic Analysis of the Stress-Induced Martensitic Transformation in a Single Crystal. *International Journal of Materials Research*, 70(2), 113-117. doi:10.1515/ijmr-1979-700211
- Xiong, Z., Li, Z., Sun, Z., Hao, S., Yang, Y., Li, M., . . . Cui, L. (2019). Selective laser melting of NiTi alloy with superior tensile property and shape memory effect. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(10), 2238-2242. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.05.015
- Xue, P., Li, Y., Zhang, F., & Zhou, C. (2015). Shape memory effect and phase transformations of Ti-19.5Zr-10Nb-0.5Fe alloy. *Scripta Materialia*, 101, 99-102. doi:https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.02.003
- Yao, P.-S., Huang, H.-Y., Su, Y.-J., & Xie, J.-X. (2018). Two-Way Shape Memory Effect Induced by Tensile Deformation in Columnar-Grained Cu71.7Al18.1Mn10.2 Alloy. *Materials*, 11(11), 1-12. doi:10.3390/ma11112109
- Zhang, J., Yang, Q., Fan, Q., Peng, H., Zhang, Y., Teng, Y., . . . Chen, J. (2022). Effects of cooling rate on martensitic transformation behavior and shape memory property for Ni-rich NiTiHf-Nb high-temperature shape memory alloy. *Materials Characterization*, 184, 111647. doi:https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111647
- Zhang, Q., Hao, S., Liu, Y., Xiong, Z., Guo, W., Yang, Y., . . . Zhang, Z. (2020). The microstructure of a selective laser melting (SLM)-fabricated NiTi shape memory alloy with superior tensile property and shape memory recoverability. *Applied Materials Today*, 19, 100547. doi:https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100547
- Zhou, X., Huang, Z., Chen, F., Tian, B., Li, L., & Tong, Y. (2022). Two-way shape memory effect with excellent cycling stability in TiNiCuNb alloy. *Materials Letters*, 308, 131256. doi:https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131256

BÖLÜM 12

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA VE BATARYA SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Pevril Demir ARI¹, Zuhâl OKTAY², Can COŞKUN³

1 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, 2217104004@std.idu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-1032-6528>

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

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

1. GİRİŞ

Elektrik bataryaları, elektrik gereksinimi duyan cihazlara bir güç kaynağı olmak için harici bağıntıları (Crompton, T. R., 2000) bulunan bir ya da birden fazla elektrokimyasal hücreden oluşan bir elektriksel güç kaynağı olarak tanımlanır. Bataryalarda, negatif biçimde işaretlenmiş olan terminal, dışarıdan bir elektrik devresinden pozitif terminale akacak elektronların kaynağı olarak tanımlanır. Batarya, dışarıdan elektrik yüküyle birleştirildiğinde, bir redoks etkileşimi yüksek enerjili reaktanları daha düşük enerjili çıkış elemanları oluşturulur ve serbest enerji farkı dış devreye elektrik enerjisi şeklinde verilir. Tarihi olarak bakarsak ‘batarya’ kelimesi özellikle birden çok hücreden meydana gelen bir cihazdır ancak kullanımı tek bir hücreden meydana gelen cihazları bünyesine alacak şekilde gelişimini sağlamıştır (Pistoia, G., 2005).

Günümüzde geliştirilmeye ve yaygınlaştırılmaya başlanılan elektrikli araçlarda daha çok tercih edilen lityum-iyon pillerdir. Lityum-iyon pil enerji depolamak için lityum iyonlarının tersine çevrilebilir düşüşünü kullanan tekrar şarj edilebilme kabiliyeti olan bir pil türüdür. Ayriyetten şebekelerdeki enerji depolama ölçeklerinde, havacılık ve askeri sanayi de kullanılır. Farklı tür bataryalarla ve teknolojilerle karşılaştırıldığında, bu piller diğerlerine göre daha fazla enerji yoğunluğuna, daha az deşarj süresine sahiptir ve bellek etkisine sahip değildir (URL1).

Elektrikli araçlarda kullanılan bir diğer batarya türleri de nikel-kadmiyum hidrit, nikel-metal, kurşun asit ve kullanımı daha az olan çinko-hava ve sodyum nikeldir. Bataryalarda depolanmış olan enerji miktarı, coulomb veya amper türünden ölçülür, toplam enerji çoğunlukla kWh olarak ölçülür (URL2).

90’ların sonlarından itibaren, lityum-iyon bataryadaki teknolojik gelişmeler, dizüstü bilgisayarlardan, taşınabilir elektronik aletlere, cep telefonlarından ve elektrikli ev aletlerinden gelen isteklere göre ihtiyaçlara göre karşılanmıştır. HEV ve BEV pazarı, hem enerji yoğunluğu olarak hem de verilen performans açısından bu gelişmeleri kullanmıştır. Daha öncelerdeki batarya bileşenlerinden değişik, bilhassa nikel-kadmiyum, lityum-iyon bataryalar deşarj edilme özelliği ve günlük kullanım özelliği vardır. Batarya takımı, HEV ya da BEV’nin önemli bir maliyetini düşürür. 2019 Aralık ayı itibariyle, elektrikli araç maliyeti 2010’dan yana %87 düşmüştür (URL3). 2018 yılından beridir de, Tesla Model S gibi tümüyle elektrik menzilli 400 km’den daha çok olan araçlar piyasaya çıkarıldı ve artık sayıca çok sayıda araç segmentinde mevcuttur (URL4).

En çok tercih edilen lityum-iyon pillerin, 2010’da enerji depolaması 20 gigawatt-saati (Tsiropoulos, I. ve arkadaşları, 2018). 2016’dan itibaren ise Çin’de 16,4 GWh ile 28 GWh arasında değişiyordu (URL5). 2020 iti-

barıyla ise küresel üretim 767 GWh'idi ve Çin bu üretimin %75'ine sahipti (URL6). 2021'deki enerji üretimi ise farklı kaynaklarca 200-600 GWh aralığında olduğu tahmin edilmekte ve 2023 yılı için olan tahminlerin ise 400 ve 1000 GWh arasında değişken bir değere sahip olması bekleniyor.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Lityum-İyon prensipli enerji seviyesi fazla olan ve uzun süreli kullanımlarıyla bilhassa elektrikli araçlarda öteki kullanılmış olan bataryalara göre daha fazla tercih edilen batarya cinsidir. Bu araçların kullanılmasında bel kemiği olan bataryaların; kapladıkları yerler, nitelikleri ve şarj vakitleri gibi özelliklerin tayin edilebilmesi için iyi bir modelin tasarlanması şarttır. Bu makalede hibrit bir batarya modeli tasarlanmış ve laboratuvar koşullarında ölçümler yapılarak modelin uygunluğu belirlenmiştir (Ceylan, M. ve ark., 2013). Günümüzde kullanılan fosil yakıtlı araçların oluşturmuş olduğu çevresel sorunlar elektrikli araçların geliştirilmesini ve yaygınlaştırılmasını hızlandırmıştır. Fakat elektrikli araçlar tümüyle diğer araçların yerine geçememiştir. Çünkü bataryalarında meydana gelen şarjın yetmemesi ve mesafe problemleri vardır. Oluşturulan bu çalışmada elektrikli araçlar ve batarya dizaynları ele alınmış olup, MATLAB/Simulink programında elektrikli bir araç için lityum-iyon batarya paket dizaynı oluşturulmuştur (Çetin, M.S. ve ark., 2021). Akımın ne yönden verildiğine göre bir yanı fazla soğuyan ve bir yanı fazla ısınan elektronik cihazlara peltier denilir. Makalede, peltier bir malzemenin elektrikli araçların batarya soğutulmasında yararlanması incelenmiş ve batarya takımının ısı verimini ölçümlendirmek için birçok ölçme aleti kullanılmıştır. Yapılmış olunan uygulamalar sonucunda bataryanın sıcaklık ve suyun giriş ve çıkış değerlerinin ölçümü yapılmış ve karşılaştırılarak grafiklerle modelize edilmiştir (Maral, Y. ve ark., 2018). Çevreci sistem anlayışının yaygınlaşması üzerine fosil yakıtlı araçlar yerine çevreci elektrikli araçların kullanılması ve yaygınlaştırılması üzerine çalışmalar derinleştirilmiştir. Bu makalede elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan batarya sistemlerinin karşılaştığı sorunlara değinilmiştir (Maral, Y. ve ark., 2018). Günümüzde birçok faydası bilinen lityum-iyon piller elektrikli araçlar için bir ilgi ve inceleme odağı noktası olmuştur. Bu makalede elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryalar üzerine güncel araştırma ve gelişmeleri incelemektir. Çalışmada bataryanın güç verme süresi ve şarj durumunu kestirmenin zorlukları ve nitelikleri, bu sorunları çözmek stratejilerinin tartışılmasıyla eleştirel bir şekilde incelenmiştir. Kullanımdan kaldırılan pilin sınıflandırılması ve kullanımdan kaldırılan pilin SOC ve RUL tahmini üzerine çalışmalar yapılmıştır (Chen, W. ve ark., 2018). Her geçen gün artan Dünya nüfusuyla beraber hayatımızdaki araç sayısı da artmıştır. Bu fosil yakıtlı araçların artışı, çevresel birçok sorunu da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle daha farklı kaynaklar aramak ve azalan

fosil yakıtlara çözüm olarak elektrikli araçların geliştirilmesi ve üretilmesi hız kazanmıştır. Fakat araçların menzil problemi, şarj süreleri gibi temel teknik meseleler halen bir sorun teşkil etmektedir. Yapılan bu çalışma, günümüzde yapılan son çalışmaları, teknolojik gelişmeleri, bataryaları, motorlarını ve gelecek için düşünülen çalışmaları içermektedir. Sonuç olarak elektrikli araçların yakın gelecekte yüksek fiyatlarını koruyacağı, sınırlı bir araç modellerinin bulunacağı, bataryalarının ise 160 km gibi düşük bir menzile sahip olacağı öngörülmektedir (Kerem, A., 2014). Son günlerde fosil kaynaklı araçların beraberinde getirdiği çevresel sorunlar, araştırmaları farklı kaynaklar aramak ve teknolojiler geliştirmeye itmiştir. Elektrikli araçların geliştirilmesi ve üretimlerinin artırılma çalışmaları bunlardan biridir. Bu sektörün gelişmesiyle batarya ve şarj sistemleri tarzı konular üzerinde çok durulmuştur. Bataryanın dayanma süresi ve şarj zamanı direkt şarj cihazını ilgilendiren konulardır. Yapılan bu çalışmada DA-DA yükselten tarz dönüştürücüyle elektrikli araçlara göre bir batarya şarj cihazı modellemesi ve simülasyon uygulaması işlenmektedir. Tasarlama, modelleme ve oluşturulan cihazın özellik değerlendirilmesi Matlab/Simulink programında uygulanmıştır (Kılıç, E., 2019). Fosil yakıt kaynaklı araçlara göre daha çevreci olduğu sonucuna varılan elektrikli araçlar, günümüzde önemli bir yer edinmiştir. Çalışma sıcaklığı, elektrikli araçlardaki bataryanın kullanım süresine ve performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu yüzden bataryanın belirli bir sıcaklıkta tutulması için çeşitli batarya soğutma teknikleri mevcuttur. Yapılan çalışmada, silindirik lityum-iyon bataryalardan meydana gelen 10'a 10'luk bir batarya takımı incelenmiş ve bunların elektriksel yalıtkan bir sıvı (Novac7200) ve hava yardımıyla soğutma işlemi periyodik şekilde inceleme işlemi yapılmıştır. Sonuç olarak hava sıcaklığının 15°C'nin üstüne yükseldiğinde soğutmanın doğrudan olarak yeteri kadar olmadığı ve sıvı yardımıyla soğutma işleminin lazım olduğu kabul edilmiştir (Celen, A. ve ark., 2021). Son zamanlarda odak noktası haline gelen elektrikli araçların üretimi daha çok artmıştır. Temiz enerji kaynakları trendi ve otomotiv sektörünün kaynak bulmasının zorlaşması bunun üzerinde etkili olmuştur. Batarya konusunda hala çözülemeyen sorunlar nedeniyle bu teknoloji üzerindeki araştırmalar devam etmektedir. Bu çalışmada, Renault Fluence ZE'nin lityum-iyon bataryasının bilgisayar ortamında modellenmesi ve bilhassa hücre dengeleme iyileştirme uygulamaları yapılmıştır (Sayın, A.A. ve ark., 2011). Fosil yakıt kullanan araçlar, iyi performans ve uzun menzilli olarak kullanılsa da, çevreye verdikleri zararlar sebebiyle otomotiv sektörü daha çevreci kaynaklara yönelmişlerdir. Bu yüzden çevre dostu elektrikli araçlar ve bataryaları üretimi hız kazanmıştır. Şarj süresi, menzil, dayanım gibi sıkıntılar halen bu bataryalarda sıkıntı teşkil etmektedir. Yapılan çalışmada, elektrikli araç batarya tipi seçimi, AHP ve MOORA teknikleri yardımıyla kullanıcı perspektifi yoluyla incelenmiştir. Elektrikli

araçlarda kullanılan farklı tür bataryalar incelenmiş, uygulama tekniklerinin çıktıları karşılaştırılmış olup, en iyi seçenek olarak Lityum-İyon batarya belirlenmiştir (Hamurcu, M. ve ark., 2021). Geleneksel tip fosil yakıtla çalışan araçların artmasıyla beraber gelen sorunlarla, otomotiv sektöründe farklı bir kaynak arayışının çalışmaları hız kazanmıştır. Elektrikli araçların, çevre dostu olmakla beraber fosil yakıtlara bağlılığı azaltacağı öngörüsüyle üretimi ve geliştirilmesi artmıştır. Yapılan uygulamada, etkinlik süresini bitirmiş elektrikli araç bataryalarının yeniden kullanımı, atık seviyesini düşürme, tekrar kazanımı kapsamında çevresel bir şekilde yönetimi incelenmiştir. Sonuç olarak diğer farklı yöntemler değerlendirildiğinde, bataryaların yeniden kullanımı, olumlu kullanım sürelerini daha fazla olmasını sağlayarak hem çevresel hem ekonomik anlamda fayda verecektir (Can Güven, E. ve ark., 2019). Elektrikli araç teknolojisinin ana bileşenleri, batarya takımı, yönetim elektroniği, güç devresidir. Günümüzde elektrikli araçlarda bulunan batarya ve bataryaları kontrol eden sistemler, otomotiv sektöründe önemli bir noktaya gelmiştir. Bu çalışmada, bu bataryalar arasında en sık kullanılan lityum-iyon bataryalar ve batarya kontrol devrelerinin nitelikleri ve önemi üzerinde durulmuştur. Diğer yandan bataryanın kullanım süresini etkileyen takım içi hücre gerilimlerinin değişik olmasının sebepleri ve sonuçları incelenmiş, dengesizliğin giderilmesi için aktif ve pasif dengeleme devrelerin detaylı şekilde analizi yapılmıştır (Kaymaz, H. ve ark., 2021). Yenilenemez fosil kaynakların bitmeye başlamasıyla beraber devletler temiz enerji kaynaklarına yönelmiş ve bu durum otomotiv sektöründe de elektrikli araçların üretimini ve geliştirilmesini hızlandırmıştır. Fakat bataryaların düşük menzil ve batarya ömrü gibi sorunlar meydana gelmektedir. Bu araçlarında menzili batarya ömrü ile orantılı olup, gücüne, yoğunluğuna, yeniden şarj süresi gibi parametrelere bağlıdır. Araştırmalar da bu yönde ilerlemektedir. Bu çalışmada, batarya kimyaları üzerine geçmişten günümüze incelemeler içermektedir. Geçmiş ve günümüz bataryalarının karşılaştırılmaları yapılmıştır. Sonuç olarak en çok tercih edilen bataryanın lityum-iyon kökenli olduğu ortaya çıkmıştır (Özcan, Ö.F. ve ark., 2021). Batarya ve bataryanın termal olarak kontrolü, elektrikli araçlar için önemli noktalardır. Yapılan incelemede, termal kontrol sistemi ve batarya tiplerine değinilmiştir. Batarya tiplerinin karşılaştırılması sonucunda en uygununun lityum-iyon bataryası olmuştur. Diğer bataryalara göre yüksek çevrim süresi, istenen faaliyet sıcaklığında olması, enerji yoğunluğu ve özgül enerjili olması onun en iyisi olduğunu göstermiştir. En iyi verimin de elde edilebilmesi için bataryaların termal kontrol sistemlerinin de olumlu/olumsuz yönleri araştırılmıştır. Sonucunda az ısı yüklü araçların hava soğutmayla, fazla ısı yüklü araçların ise hibrit veya sıvı akışkan yoluyla soğutulmasının faydalı olacağı çıkarılmıştır (Kaba, M.Y. ve ark., 2021). Günümüzde bir hayli hız kazanan elektrikli araç teknolojilerinde, batarya ve bunların

kontrol sistemlerinin önemli bir yeri vardır. Yapılan çalışmada 18650 lityum-iyon bataryaları ile bir özgün batarya paketi tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan batarya, fazla ısınma ve yanmalara karşı korunumlu dış tabaka, hızlı bir şekilde şarj veya deşarj olması için özgün bir kontrol sistemi özelliğine sahiptir. Bu kontrol sistemi, bataryada meydana gelen değişikliklerin kontrolü ve dengelenmesi için bir beyin görevi görmektedir. Değişik tip yöntemler sonucu, soğutmada çift fanlı alüminyum soğutma sistemi kullanılmıştır (Toren, M. ve ark., 2022). Elektrikli araçların gelişmesi için gerekli araştırmaların en önemli kısımlarından biri batarya takımının düzgün analizinin yapılması, araç menziline kadar kullanan kişiyi direkt ilgilendiren önemli performans kriterlerine etmektedir. Bu çalışmada, batarya takımında uygulanacak lityum-iyon batarya hücrelerinin birinci seviyeden termal ile elektriksel modellemeleri Matlab-Simulink ortamında yapılmıştır. Sonuç olarak batarya pil hücresi modeli doğrulanmış olup, elektrikli araç modellerinde uyarlanarak temel şartlar altında çalışacak algoritmalarca uyarlanma olanağı oluşmuştur (Şefkat, G. ve ark., 2020). Günümüzde artan elektrikli araçların ihtiyaç duyduğu motor enerjisi, genel olarak bataryalar yardımıyla sağlanır. Bu araçların dengeli, düzgün bir şekilde çalışması yine bataryayla direkt alakalıdır. Bu çalışmada, yirmi hücreye sahip batarya paketine göre pasif dengeleme tekniği kullanılarak batarya yönetim sistemi tasarlanmış ve üç hücreye sahip BYS çalışması, elektrikli bir araçta kullanılmak üzere gerçekleştirilmiştir. Batarya olarak lityum-iyon batarya tipi kullanılmıştır. Sonuç olarak yapılmış BYS'nin istenen niteliklerinin kontrolü yapılmış ve sistemin olumlu olarak eylem gösterdiği deneysel olarak ispatlanmıştır. Ayriyetten BYS'nin tasarımında pasif dengeleme sistemi yardımıyla maliyetinde azalma, kurulum ve tasarım hızı gibi iyileştirmeler kazanılmıştır (Aktaş, M. ve ark., 2020). Bu çalışmada değişik bir yöntem izlenerek modellenmiş elektrikli araçlar için süper kapasitör/batarya yöntemi incelenmiştir. Test aracında kurşun-asit batarya kullanılmıştır ve verimlilik, menzil iyileştirmesi ve batarya ömrünü uzatmak için batarya tepe akımlarını azaltmak amaçlanmıştır. Batarya paketi ve süper kapasitörler karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Sonuç olarak süper kapasitörlerin tepe aküde meydana gelen akımları düşürmede öneminin olduğu fakat menzil arttırmada yeterli olmadığı sonucu çıkarıldı (Cruden, C. ve ark., 2012). Elektrikli araçlarda güvenlik endişesi, bataryalar için büyük problem teşkil eder. Termal yollu kaçak, bataryalar için bilimsel bir sorundur. Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryanın termal kaçak sistemi hakkında inceleme yapılmıştır. Bu probleme yol açabilecek sorunlar özetlenmiştir. Dahili kısa devre, kötü kullanım yolları arasında en sık rastlanan olmuştur. Kaçak sırasında oluşan reaksiyonu takip etmek için malzeme reaksiyonunu ölçen bir enerji salınım diyagramı düşünülmüştür. Kısa devre ve kaçak arasındaki ilişki diyagramla ölçülmüştür. So-

nuçta bu tehlikeyi azaltmak için üç adımlı koruma konsepti düşünülmüştür. Bu sistem, sistemi pasif savunmaya alarak erken uyarı sağlamak ve malzeme stabilitesini artırarak kaçığın tehlikesini azaltmak hedeflenmiştir (Feng, X. ve ark., 2018). Elektrikli araçların yaygınlaşmasını zorlaştıran faktörler güvenlik, maliyet performans ve güvenilirliktir. Bunlar enerji depolama sistemiyle ilişkilidir. EV teknolojisinde tercih edilen birincil pil lityum-iyon bataryalardır. Lityum-iyon batarya, bir EV pil ekipmanına entegre edildiğinde en iyi çalışmayı veremeyebilir. Bu çalışmada, ilgili bataryanın bir EV pil sistemine farklı pil kimyası, pil paketine entegrasyonu, termal kurulumu, montaj vb. konular değişik bakış açılarından incelenmiştir. Sonucunda pil takımı için hücre seçimi ve hücre entegrasyonu için temel bir kılavuz olmuştur (Saw, L.P. ve ark., 2016). Son zamanlarda elektrikli araçlar özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının sınırlı olduğu ülkelerde, güç kaynaklarına çok ihtiyaç duymaları sebebiyle sera gazı emisyonlarındaki artışa neden olmaktadır. Artan elektrikli araçlarla beraber elektrik atık malzemelerin çevreye dağılmasının önüne geçmek için büyük yatırımlarla geri dönüşüm projeleri yapılması gerekmektedir. Bu çalışma, EV için mikro elektronik taşınan bataryalar için yeni yeşil kaynaklı bir teknolojik bataryanın analizi incelenmiştir. Biyopiller bakımından, enerji üretimi için biyolojik çevrenin zamanla gelişimini görmekte ve incelenmektedir. (Manzetti, S. ve ark., 2015). Bu çalışmada lityum-iyon bataryanın polimor hücrenin zamana bağlı, termal davranışı, etkili bir batarya termal kurulum devresi geliştirmek üzere elektrikli araç sürüş çevrimi için tasarlanmıştır. Tümüyle birleşik, üç boyutlu geçici elektro-termal model, sınırlı hacim tekniğine bağlı olarak çalıştırılmıştır. Sayısal çalışmayı desteklemek üzere, lityum-iyon polimer pil hücresi, farklı odalarda test edildi ve model üzerindeki tahminlerle veriler birbiriyle uyumlu çıkmıştır. Bataryada fazla yüklenmede sıcaklık artışının meydana geleceği çıkarılmıştır (Chacko, S. ve ark., 2012). Hibrit enerji depolama sistemlerinde, çok girişli dönüştürücülerin uygulanması, az sayıda bileşen, kontrol kolaylığı ve kaynak enerjilerinin tümüyle kontrolü için farklı faydalar verir. Bu çalışma, elektrikli araçlar (EV) için çift yönlü birçok girişli dönüştürücü içeren bir batarya/ultrakapasitör enerji depolama sistemi için bir enerji yönetim stratejisi sunmaktadır. Yapılan incelemelerde daha uzun ömürlü batarya, sürdürülebilir bir enerji depolama sistemi ile sonuç verir. Yapılan simülasyon çalışmalarıyla ve daha sonra deneysel sonuçlara dayanarak, batarya/ultrakapasitör hibridizasyonuna dayalı olarak batarya çevrim süresi iyileştirilmesi araştırılmıştır (Akar, F. ve ark., 2016). Günümüzde elektrikli araçlarda kullanılan pek çok batarya tipi bulunmaktadır ve yapısal nitelikler, maliyet, kullanım süresi, enerji depolaması gibi farklı faktörlerden hangisinin vereceği özelliğin en iyi sonucu vereceğini kestirmek zor bir işlemdir. Bu çalışmada, dört farklı tip batarya kullanılan elektrikli bir aracın özelliklerini sunmaktadır. Lityum-iyon, erimiş

tuz, nikel metal hidrit ve lityum sülfür; bunlar aynı elektrik enerjisi depolama kapasitesine sahip bataryalardır. Bu çalışmanın yeniliği, aracın özelliklerini ve bataryaların sürüş çevrimindeki vermiş oldukları verimliliklere göre değerlendirmek ve bu pilleri aynı model üzerinde uygulamaktır (Iclodean, C. ve ark., 2017). Bu çalışma, elektrikli bir araç için bataryanın olabilecek en hızlı şekilde şarj olması, sistem topolojilerini ve kontrol yöntemlerini incelemektir. Değişik şarj yönetimi ve hızlı şarj niteliklerinin analizi ve değerlendirilmesi vardır. EV kullanımını iyileştirmek üzere, hızlı şarj vasfına ve şarj yönetimi niteliğine sahip bir şarj cihazı tasarlamak, bununla beraber batarya süresini çoğaltmak gerekir. Deney, seri bağlı dört tane kurşun-asit bataryadan oluşan batarya takımıyla yapılmıştır. Bataryalarla şarj yöntemleri, şarj nitelikleri analiz ve test edilip sunulmuştur (Hua, C.C. ve ark., 2000). Bu makalede, elektrikli araç batarya devreleri için büyük veri ve istatistiksel tekniklere göre yeni bir arıza tespit tekniği verilmiştir. Makine algoritması ve 3σ çok seviyeli tarama yöntemiyle, bir batarya takımındaki hücre terminal voltajlarındaki aksilikler tespit edilebilir ve olasılıklı bir şekilde hesaplanabildiği bulunmuştur. Arıza ve kusur tespit çıktıları, veri istatistiksel düzenlemesiyle birleştirilmiştir. Hesaplama sonuçlarının doğruluğu LOF algoritması ve kümeleme aykırı değer tespit algoritmasıyla test edilmiştir. Test süreci, tüm yıl için araç çalışma verilerine göre yapılmıştır (Zhao, Y. ve ark., 2017). Elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryalar, değişik şartlarda termal özellikler için ve termal bir yönetim sağlamak adına yapılan tasarımlarda önemli bir husustur. Yapılan çalışmada, değişik büyüklüklerdeki LiFePO_4 silindirik hücrelerin elektriksel ve termal uygulamaları farklı çalışma şartları altında incelenmiştir. Yapılan simülasyon çıktıları, yapılan uygulamaların sonuçlarıyla uyum göstermiştir. Sonuç olarak batarya paketi entegrasyon sorunları, elektrikli araçlardaki batarya performansını, maliyetini, kullanım süresini ve araç mesafesine etkimektedir (Testere, L.H. ve ark., 2014). Bu çalışmada, bataryanın elektriksel etkinliğini özelleştiren ampirik bir denklem, 18650 lityum demir fosfat hücresinin elektriksel ve termal etkinliğinin analizini yapmak için termal bir modelde bütünleştirilmiştir. Sabit akım boşaltmada, şarj ve deşarj zamanları sıcaklık artar. Bunun üzerine bataryada yapılan simülasyon çıktıları deneylerle doğrulanmıştır. Doğrulan hücre tipi, dinamik etkileşimi ölçmek için detaylandırılmıştır. Elektrikli araç batarya paketi için, agresif sürücüler için özellikle tutuş gücünü çalışma limitlerinde tutulması ve hücreler arasındaki sıcaklık ayarının yapılması için termal bir kurucu sisteme ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir (Saw, L.H. ve ark., 2014). Bu makale, mevcut literatürü batarya modülü adımları ve hücre leveli olmak üzere çift adımda incelemektir. Bir batarya için, ısı transferi, ısı üretimi ve ısı dağılımıyla üç büyük süreç gözden geçirilmiştir. Geniş formatlı bir hücre için, çok ölçekli ve boyutlu bütünleştirilmiş model tasarlanmıştır. Bu yerel tersinmez ısı

oluşumu, termal direnç gibi niceliklerin araştırılmasında fayda verecektir. Hava soğutma ve sıvı soğutma teknikleri ayrı ayrı bataryalarda test edilmiş ve değerlendirilmiştir. Sıvı soğutma, özellikle batarya yönetim sistemini yeni bir nesle nakledebilir (Xia, G. ve ark., 2017). Düzgün bir batarya şarj sistemi tahmini, elektrikli araçlarda önemi büyüktür. Bu çalışma, elektrikli araçlarda lityum-iyon bataryanın şarj durumunu önceden kestirebilmek için uyarlanabilir, kokusuz bir kalman filtreleme metodunu içermektedir. Kalman filtresine dayalı olarak bir kovaryans eşleştirme düşüncesi ile uygulanır. Deneysel çıktılar, uyarlamalı kokusuz kalman filtresi tabanlı algoritmanın bataryanın şarj durumunu önceden belirlemede iyi bir performansı olduğunu sunmuştur. Bu algoritma önerilmiş olan şarj durumunu tahmin tekniğinin daha iyi doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir (Sun, F. ve ark., 2011).

3. SONUÇ

Günümüzde fosil yakıt kaynaklı yakıtların elde edilmesi zorlaştığı ve özellikle çevreye verdikleri zararlardan ötürü enerji şirketleri ve ülkeler, bu konuda alternatif seçenek olarak temiz kaynaklar üzerinde çalışmalara başlamışlardır ve elektrikle çalışan arabalarda bunların sonuçlarındandır. Elektrikli araçlar an itibariyle çeşitli bataryalarla çalıştırılmakta ve güncel olarak en çok lityum-iyon bataryalar kullanılmaktadır. Bu bataryalar üzerinde hala kullanım ömrünü daha da uzatma, ısıya daha da duyarlı olması, çeşitli istenmeyen durumlara karşı dayanıklı olması gibi konularda çalışmalar hız kazanmaktadır. Son on yılda elektrikli araç teknolojisinin büyük bir hızla gelişerek ve yenilenerek ilerlediğini görüyoruz. Yakın gelecekte fosil yakıtlı araçların yerini tamamen alacağı öngörülmektedir ve gelişmiş ülkeler, gelecekte belirledikleri yıllardan itibaren tamamen fosil yakıtlı araçlardan elektrikli çevre dostu modele geçmek için projelere girmektedir. Elektrikli araç teknolojisiyle doğru orantılı gelişen aracın beyni diyebileceğimiz batarya teknolojisi de, elektrikli araçlarda istenen özelliklerde (istenilen menzile ulaşabilmeyi sağlayacak enerji kapasitesi, kullanım ömrü artışı gibi) olması düşünülmektedir.

Referanslar

- Akar, F., Tavlasoğlu, Y., Vural, B. (2016) An Energy Management Strategy for a Concept Battery/Ultracapacitor Electric Vehicle With Improved Battery Life. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(1), 191 – 200
- Aktaş, M., Baygüneş, B., Kıvrak, S., Çavuş, B., Sözen, F. (2020) Elektrikli Araç İçin Düşük Maliyetli Bir Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı*, 227-238, 2020
- Can Güven, E., Gedik, K. (2019) Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 726-737
- Celen, A., Kaba, M.Y. (2021) Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 49-61
- Ceylan, M., Sarıkurt, T., Balıkcı, A. (2013) Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum-İyon Bataryalar İçin Model Geliştirilmesi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye*
- Chen, W., Liang, J., Yang, Z., Li, G. (2019) A Review of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle Applications and Beyond. *Energy Procedia*, 158, 4363-4368
- Crompton, T. R. (2000) *Battery Reference Book* (third ed.). Newnes. p. Glossary 3. ISBN 978-0-08-049995-6. Retrieved 18 March 2016.
- Cruden, C., Carter, R., Hall, P.J. (2012) Optimizing for Efficiency or Battery Life in a Battery/Supercapacitor Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(4), 1526-1533
- Chacko, S., Chung, Y.M. (2012) Thermal Modelling of Li-ion Polymer Battery for Electric Vehicle Drive Cycles. *Journal of Power Sources*, 213, 296-303
- Çetin, M.S., Karakaya, B., Gençoğlu, M.T. (2021) Elektrikli Araçlar İçin Lityum İyon Bataryaların Modellenmesi. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 33(2), 755 – 763
- Hamurcu, M., Çakır, E., Eren, T. (2021) Kullanıcı Perspektifli Çok Kriterli Karar Verme ile Elektrikli Araçlarda Batarya Seçimi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(2), 733-749
- Hua, C.C., Lin, M.Y. (2000) A Study of Charging Control of Lead-Acid Battery for Electric Vehicles. *ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cat. No.00TH8543
- Iclodean, C., Varga, B. Burnete, D., Cimerdean, D., Jurchiş, B. (2017) Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 252, CAR2017 International Congress of Automotive and Transport Engineering - Mobility Engineering and Environment, Pitesti, Romania

- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., He, X. (2018) Thermal Runaway Mechanism of Lithium Ion Battery For Electric Vehicles. *Energy Storage Materials*, 10, 246-267
- Kaymaz, H., Hançar, Y. (2021) Elektrikli Araç Batarya Yönetim Sistemleri için Hücre Eşitleme Yöntemleri. *Journal of Intelligent Transportation Systems and Applications*, 4(1), 59-73
- Kaba, M.Y., Kalkan, O., Celen, A. (2021) Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar Ve Termal Yönetim Sistemlerinin İncelenmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(4), 1119-1136.
- Kerem, A. (2014) Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5, 1-13.
- Kılıç, E. (2019) DA-DA Yükselten Dönüştürücü İle Elektrikli Araç Batarya Şarj Cihazı Tasarımı. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 281-287
- Manzetti, S., Mariasiu, F. (2015) Electric Vehicle Battery Technologies: From Present State To Future Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1004-1012
- Maral, Y., Polat, F., Aktaş, M. (2018) Elektrikli Araçlarda Kullanılacak Batarya Yönetim Sistemi Geliştirilmesi. *İleri Teknoloji Bilim Dergisi*, 7(3), 36-47
- Özcan, Ö.F., Karadağ, T., Altuğ, M., Özgüven, Ö.F. (2021) Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 276-298
- Pistoia, G. (2005). *Batteries for Portable Devices*. Elsevier, 1. ISBN 978-0-08-045556-3. Retrieved 18 March 2016.
- Sayın, A.A., Yüksel, İ. (2011) Elektrikli Renault Fluence Aracı, Lityum-İyon Bataryasının Modellenmesi ve Batarya Yönetimi. *Engineer & the Machinery Magazine*, 615, 75-82.
- Saw, L.P., Ye, Y., Tay, A. (2016). Integration Issues of Lithium-Ion Battery Into Electric Vehicles Battery Pack. *Journal of Cleaner Production*, 113, 1032-1045
- Saw, L.H., Ye, Y., Tay, A.A.O. (2014) Electro-Thermal Analysis and Integration Issues of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles. *Applied Energy*, 131, 97-107
- Saw, L.H., Somasundaram, K. Ye, Y., Tay, A.O. (2014) Electro-Thermal Analysis of Lithium Iron Phosphate Battery for Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, 249, 231-238
- Sun, F., Hu, X., Zou, Y., Li, S. (2011) Adaptive Unscented Kalman Filtering for State of Charge Estimation of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles. *Energy*, 36, 5, 3531-3540
- Şefkat, G. ve Özel, M.A. (2020) Elektrik Araçlarda Kullanılan Pil Hücresinin

Elektriksel Ve Termal Modeli. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(1), 51-64

Tsiropoulos I., Tarvydas. D., Lebedeva N. (2018) Li-ion Batteries for Mobility and Stationary Storage Applications. JRC Science for Policy Report, European Commission, ISBN 978-92-79-97254-6, doi:10.2760/87175, JRC113360.

Toren, M., Mollahasanoğlu, H., Kaya, S.M. (2022) Elektrikli Araçların Batarya Yönetim Sisteminin Soğutma Sistem Tasarımı Ve Kontrolü. Journal of Scientific Reports-B, 5, 11-21

Xia, G., Cao, L. ve Bi, G. (2017) A Review on Battery Thermal Management in Electric Vehicle Application. Journal of Power Sources, 367, 90-105

Yenigün, M. ve Utlu, Z. (2018) Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Soğutma Sistemlerinin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi. Mühendis ve Makine, 59(692), 35-47

Zhao, Y., Liu, P., Wang, Z., Zhang, L., Hong, J. (2017) Fault and Defect Diagnosis of Battery for Electric Vehicles Based on Big Data Analysis Methods. Applied Energy, 207, 354-362

URL1. <https://evreporter.com/understanding-memory-effect-in-lithium-ion-batteries/>

URL2. https://www.greencarcongress.com/2006/11/axeon_receives_.html

URL3. <https://www.marketplace.org/2019/12/03/battery-prices-falling-good-for-evs/>

URL4. <https://tr.motor1.com/news/178646/400000-km-yol-yapan-tesla/>

URL5. <https://www.greentechmedia.com/articles/read/switching-from-lithium-ion-could-be-harder-than-you-think>

URL6. <https://www.energy-storage.news/europe-and-us-will-shave-c-10-off-chinas-li-ion-production-capacity-market-share-by-2030/>



BÖLÜM 13

MOLEKÜLER SİMÜLASYON METOTLARININ SEYREK AKIŞ PROBLEMLERİNDEKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Mustafa KOÇ¹

¹ Dr.Öğr.Üyesi Mustafa KOÇ, Beykent Üniversitesi MYO Makine Programı

ORCID:0000-0002-5417-2604

GİRİŞ

Knudsen sayısı, gazın ortalama serbest yolu ile karakteristik uzunluk ölçeği arasındaki orandır. Knudsen sayısına bağlı olarak akışlar, genel olarak süreklilik, kayma, geçiş ve serbest moleküler rejim olmak üzere dört rejimde sınıflandırılabilir. $Kn < 0,001$ olan sürekli rejimde, akış özelliklerinin tahmini için doğrusal kurucu ilişkilere sahip Navier-Stokes (NS) denklemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kayma rejimi için ($0.001 < Kn < 0.01$), NS denklemleri, özellikle yüzey katsayısının benzetimi için yetersiz olacaktır. Bu nedenle, geleneksel NS denklemleri için mükemmel bir uzantı olduğu kanıtlanan kayma sınır koşulları her zaman bu koşul altında uygulanır. Geçiş rejimi ($0.01 < Kn < 1$) için NS denklemlerinin yetersiz olduğu kanıtlanmıştır. Bu, mikro ölçekli iç akış ve hipersonik uzay araçları için dış akış gibi mühendislik uygulamalarında temel bir rejimdir. Seyrek gaz akışlarını analiz etmek için moleküler yorumlamaya dayalı bir yöntemin kullanılması gereklidir (Futagami & Ninokata, 2009).

Boltzmann denkleminin tüm akış rejimleri için yeterli olduğu göz önüne alındığında, buna dayalı olarak parçacık temelli çözümleme yapan yöntemler mevcuttur. Son iki rejim için, yani $Kn > 0.1$, Kafes Boltzmann yöntemi (LBM), Doğrudan Simülasyon Monte Carlo (DSMC) ve Moleküler Dinamik (MD) gibi parçacık tabanlı yaklaşımlar kullanılabilir (Shariati, Ahmadian, & Roohi, 2019).

Sunulan çalışmaların benzer problemlerin üstesinden gelmek için bir dizi farklı yaklaşım gösterdiği ve her yöntemin belirli bir problem için en uygun yaklaşımı belirleyebilecek avantaj ve dezavantajları olduğu umulmaktadır (Teschner, Könözsy, & Jenkins, 2016).

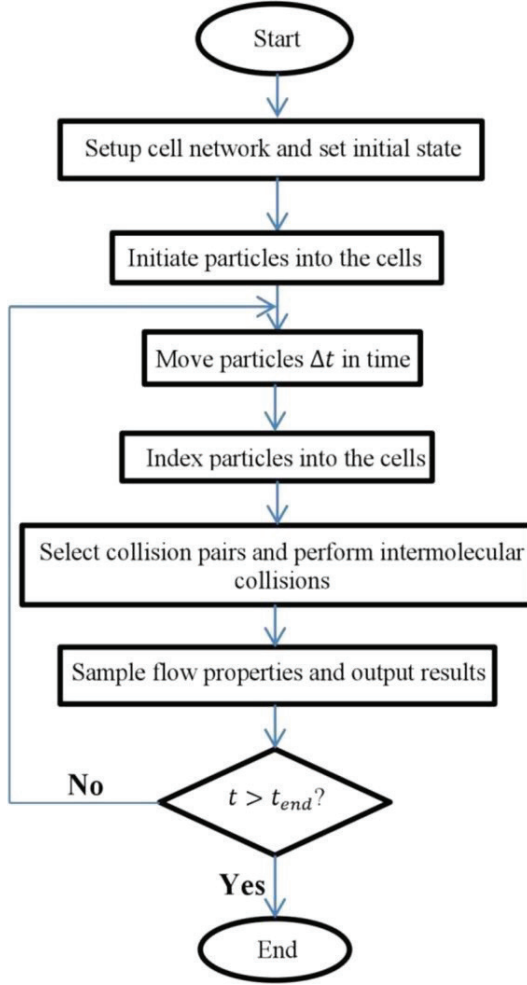
1. MOLEKÜLER SİMÜLASYON YÖNTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

1.1. Doğrudan Simülasyon Monte Carlo Metodu

Boltzmann denklemini çözmek için olasılıksal bir yöntem olan Doğrudan Simülasyon Monte Carlo (DSMC) yöntemi, ilk olarak 1960'larda Bird (Bird, 1994b) tarafından önerilen ve şu anda seyrek gaz akışlarının bilgisayar modellemesi için başlıca sayısal araçtır. Tipik DSMC

yöntemi, gerçek moleküllerin hareketini taklit eden ancak tam olarak takip etmeyen yüz binlerce hatta milyonlarca "simüle edilmiş" molekül kullanır. DSMC'de, gerçek atomlar birlikte gruplandırılır ve daha sonra simülasyon için kullanılan tek bir parçacık tarafından temsil edilir. Yöntemin doğruluğu, araştırmacılar arasında uzay aracının yere girişinden mikro/nano ölçekli seyrek akışlara kadar geniş bir yelpazedeki mühendislik problemlerine uygulanmak üzere pek çok alanda ilgi uyandırmıştır. DSMC yönteminin birincil konsepti, her zaman adımında moleküler hareket ve çarpışmayı ayırmaktır. Bu amacı gerçekleştirmek için, hesaplama alanının moleküler ortalama serbest yoldan daha küçük hücrelere bölünmesi ve simülasyonun ortalama çarpışma zamanından daha küçük bir zaman adımıyla gerçekleştirilmesi gerekir.

Şekil 1'de sunulan DSMC'nin akış şemasına göre, algoritma her hücrede belirli sayıda parçacığı düzenleyerek başlar. Parçacıkların hızı da Maxwell hız dağılım fonksiyonuna göre atanır. Daha sonra algoritma, parçacık hareketi, her hücredeki parçacıkları indeksleme, parçacıkların bir hücre içindeki çarpışması ve akış özelliklerini örnekleme dâhil olmak üzere dört ana adımı gerçekleştirerek ilerler.



Şekil.1. DSMC yönteminin akış şeması. (Shariati et al., 2019)'dan alınmıştır.

Her zaman adımında, her parçacık moleküler hızına göre uzayda hareket eder. Daha sonra, her parçacık yeni hücresinde yeni konumuna göre indekslenir. Daha sonra, seyrek gazlarda moleküller çoğunlukla ikili çarpışmada birbirleriyle etkileşime girdiği için, her hücrede çarpışma çifti adı verilen parçacık çiftleri seçilir. Ardından, çarpışma çiftleri için ikili çarpışma olasılığı hesaplanır. İkili bir çarpışma kabul edilirse, çarpışma sonrası hızlar hesaplanacaktır. Daha sonra her bir hücreden numune alınarak hücrelerin verileri toplanır. Numune alma işlemi, her hücredeki

parçacıkların özelliklerinin toplamının hesaplanmasını ve bunların o hücrede önceki zaman adımlarındaki toplam miktarlara eklenmesini içerir. Son olarak, hücrelerin hızı, yoğunluğu ve sıcaklığı gibi tüm termodinamik parametreler, belirli bir süre boyunca zaman ortalamalı örnekleme verilerinden elde edilir. Bu dört adım, çözüm süresi algoritma için tanımlanan bitiş süresine ulaşana kadar tekrarlanır(Shariati et al., 2019).

DSMC yöntemi, Boltzmann denklemiyle tutarlıdır ancak doğrudan ondan türetilmemiştir(RC, 2014). Bu, ortalama moleküler çapın ortalama moleküler yoldan çok daha küçük olduğu seyreltilmiş gaz koşulları için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bir DSMC simülasyonunun prosedürü aşağıdaki gibidir:

1. Ağları parçacıklarla doldur, simülasyonu başlat
2. Parçacıkları hareketlendir
3. Parçacıkları indeksle
4. Parçacık çarpışmalarını gerçekleştir
5. Akış özelliklerini örnekle
6. Eğer $t = t_{max}$ ise ilerle, değilse 2.adıma git
7. Çözümü çıktı al

Adım 1'de parçacıklar, hesaplama kısıtlamalarına uyarak ağda rastgele yerleştirilir. Düşük istatistiksel gürültü için her hücre yaklaşık 20-30 parçacık içermelidir(Bird, 1994a),(RC, 2014) ve Δt zaman adımının yerel ortalama çarpışma süresine kıyasla küçük olması gerekir(Shen, 2005). 2. adımda, parçacıklar kullanılan zamansal şemaya göre yönlendirilir ve $\mathbf{r}_p^{n+1} = \mathbf{r}_p^n + \mathbf{v}_p \Delta t$ kadar basitlikte olabilir; \mathbf{r}_p , n veya $n + 1$ zamanında parçacık koordinatları ve \mathbf{v}_p buna karşılık gelen hızdır. Adım 3, her bir parçacığın o anda içinde bulunduğu hücreyi belirler. Parçacıklar arasındaki çarpışmalar 4. adımda yapılır ve 5. adımda makroskopik akış özellikleri elde edilir. Bu işlem, maksimum zaman adımına ulaşılana kadar veya kararlı bir çözüm aranıyorsa, bir süre sonra asimptotik çözüm elde edilene kadar tekrarlanır.

Parçacıklar deterministik olarak tahmin edilirken, çarpışmalar istatistiksel olarak gerçekleşir. Günümüzde kullanılan en yaygın çarpışma tekniği, (Bird, 1989) tarafından tanımlanan gerçekçi olmayan çarpışma oranlarını ortadan kaldıran zaman sayacı olmayan (NTC) yöntemidir.

İlk olarak, hücre başına toplam çarpışma sayısı şu şekilde hesaplanır:

$$N_{coll} = \frac{1}{2} \frac{N \bar{N} F_N (\sigma_T c_r)_{max} \Delta t}{V_c} \quad (1)$$

N , hücre içindeki simüle edilmiş parçacıkların sayısıdır, \bar{N} , örnekleme süresi boyunca parçacıkların ortalama sayısıdır, F_N , her bir simüle edilmiş parçacık tarafından temsil edilen gerçek atomların sayısıdır, σ_T , toplam çarpışma kesitidir ve uygun bir moleküler modelden elde edilmiştir, c_r bağıl hızdır ve V_c hücre hacmidir.

σ_T 'yi elde etmek için en basit moleküler modeller, $\sigma_T = \pi d_{12}^2$ ve $d_{12} = (d_1 + d_2)/2$, d_1 ve d_2 'nin çarpışan parçacıkların çapları olduğu Sert Küre (HS) modelidir.

Her hücre için N_{coll} hesaplıyoruz ve üzerinde döngü yapıyoruz. Her durumda, bir parçacık çifti seçeriz ve çarpışmanın şu yollarla gerçekleşip gerçekleşmediğini test ederiz:

$$P_{coll} = \frac{\sigma_T c_r}{(\sigma_T c_r)_{max}} \quad (2)$$

Çarpışma elastik olarak gerçekleşir ve enerji korunur. Parçacıkların çarpışmadan önceki hızları:

$$\mathbf{c}_1 = \mathbf{c}_m + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \mathbf{c}_r \quad (3)$$

$$\mathbf{c}_2 = \mathbf{c}_m - \frac{m_2}{m_1 + m_2} \mathbf{c}_r \quad (4)$$

burada kütle merkezi hızımız şu şekildedir:

$$\mathbf{c}_m = \frac{\mathbf{c}_1 m_1 + \mathbf{c}_2 m_2}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

ve bağıl hız:

$$\mathbf{c}_r = \mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_2 \quad (6)$$

Her parçacık için çarpışmadan sonraki hızlar şu şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{c}_1^* = \mathbf{c}_m^* + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \mathbf{c}_r^* \quad (7)$$

$$\mathbf{c}_2^* = \mathbf{c}_m^* - \frac{m_2}{m_1 + m_2} \mathbf{c}_r^* \quad (8)$$

Makroskopik akış özellikleri daha sonra aşağıdaki ilişkilerle elde edilir:

$$\mathbf{u} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \mathbf{c} \quad (9)$$

$$\rho = nm \quad (10)$$

$$p = \rho \overline{(\mathbf{c} - \bar{\mathbf{c}})^2} \quad (11)$$

burada n , sayı yoğunluğunu temsil eder. Sınır koşulları, DSMC yönteminde kolayca uygulanır. En basit biçim, parçacıkların hesaplama alanına periyodik bir arayüz yoluyla yeniden girdiği periyodik sınırlardır. Bir parçacık, adveksiyon adımı sırasında katı bir sınırı geçerse, sınıra giden normal hız bileşeni basitçe tersine çevrilir ve konum buna göre güncellenir. Açık sınırlarda, parçacıklar etki alanından çıktıklarında kaldırılır. İçeri akış sınırlarında, parçacıkların hızının ve sayı akışının belirlenmesi gerekir. Parçacıkların hızını elde etmek için popüler bir seçim, uygun bir dağılım fonksiyonu $f(v)$ 'den rastgele bir hızın çekildiği kabul-ret yöntemidir (Bird, 1989; Lilley & Macrossan, 2003; (Teschner et al., 2016).

1.2. Moleküler Dinamik Metodu

Moleküler dinamik (MD) yöntemi, doğrusal boyutları 100 nm veya daha az olan ve birkaç on nanosaniyelik zaman aralıkları için çok küçük hacimli sıvı akışını simüle etmek için uygundur. Nano alanlarla etkili bir şekilde başa çıkabilir ve sürekliliğin veya Newton hipotezinin geçerli olmayabileceği çok yüksek kesmeyi içeren akışları simüle etmede belki de tek doğru yaklaşımdır. Yaklaşık on molekülden küçük boyutlar için, süreklilik hipotezi sıvılar için bile bozulur ve böyle bir sistemin atomistik davranışını simüle etmek için MD kullanılmalıdır. Bununla birlikte MD, nispeten büyük alanlar gerektiren büyük moleküller arası mesafeler nedeniyle gaz mikro akışlarını simüle etmek için verimsizdir.

Moleküler dinamik, atomların hareketini atom ölçeğinde modeller. Her i atomu için Newton'un ikinci yasaını doğrudan şu şekilde kullanır:

$$m_i \frac{\partial^2 r_i}{\partial t^2} = F_i = - \sum_{i \neq j} \frac{\partial V(r_{ij})}{\partial r} \quad (12)$$

Atomlar arası kuvvetler, atomlar arası potansiyelin türevi ile değiştirilir. En çok kullanılanı 12–6 Lennard–Jones (LJ) potansiyelidir:

$$V(r_{ij}) = 4 \epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^6 \right] \quad (13)$$

burada ϵ potansiyel kuyusunun derinliği, σ iki atom arasındaki potansiyelin sıfır olduğu mesafe ve r_{ij} iki atom arasındaki mesafedir. Teorik olarak, hesaplama açısından pahalı ve $O(N^2)$ ile orantılı olan V_{ij} 'yi elde etmek için her atom için tüm atomların toplanması gerekir. Bir kesme mesafesi r_{cut} tanımlanır, bundan sonra atomlar arası etkileşimleri ihmal edilir. Bu mümkündür çünkü potansiyel (Eşitlik ((5))) büyük r_{ij} değerleri için asimptotik olarak sıfıra yaklaşır ve bu nedenle hesaplama süresi $O(N \log N)$ 'ye düşer. Kinetik gaz teorisinden, tek atomlar için eşitlik teoremi şu şekilde elde edilir:

$$\frac{1}{2} m_i \mathbf{v}_i^2 = \frac{3}{2} k_b T \quad (14)$$

\mathbf{v}_i atomun hızı, k_b Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır. Eşitlik (6)'yı kullanarak bir sistemin genel momentumu korunurken, sıcaklığı kontrol edilemez. Bu nedenle, hızı Eşitlik (6)'e göre yeniden ölçeklendirmek veya bir termostat kullanmak yaygın bir uygulamadır. Yaygın olarak kullanılan termostatlardan biri olan, (Berendsen, 1999)'te hareket denklemi, Eşitlik (1), bir ısı banyosuna şu şekilde bağlanır:

$$m_i \frac{\partial^2 r_i}{\partial t^2} = - \sum_{i \neq j} \frac{\partial V(r)}{\partial \mathbf{r}} + m_i \gamma \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \mathbf{v}_i \quad (15)$$

burada T_0 hedef sıcaklıktır, T mevcut (hesaplanan) sıcaklıktır ve γ denklemin T_0 'a doğru gevşemesi gereken güçtür. Atomlar, aşağıdaki gibi Maxwell-Boltzmann dağılımına uyan bir T sıcaklığında rastgele bir hızla başlatılır:

$$p(\mathbf{v}_i) = \left(\frac{m_i}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} \exp \left[- \frac{1}{2} \frac{m_i \mathbf{v}_i^2}{k_B T} \right] \quad (16)$$

Sınır koşulları, MD simülasyonlarında basit değildir ve özel dikkat gerektirir. Mümkün olduğunda, periyodik sınır koşulları uygulanır. Parçacıklar etki alanını sorunsuz bir şekilde terk edebilir ve girebilir. Sorun, açık sınır koşulları ile uğraşırken ortaya çıkar. Parçacıklar kolayca yerleştirilebilir veya çıkarılabilir; bununla birlikte, sınıra yakın kuvvet uygulaması, domaine yayılabilen sınırların ötesindeki eksik parçacıklar nedeniyle yanlış bir etkileşim potansiyeline neden olur. Çözümlerden biri, periyodik sınırların uygulandığı ikinci bir simülasyon yoluyla sınırın yakınındaki kuvveti örneklemek olabilir.

Ancak bu, doğru sınır koşullarını tanımlamak için ikinci bir simülasyon verisi seti gerektirir. Kesin sınırları dayatmak daha az problemlidir. Atomlar, bir duvarı modellemek için bir kafes yapısına katı bir şekilde yerleştirilebilir (Teschner et al., 2016).

1.3. Kafes Boltzmann Metodu

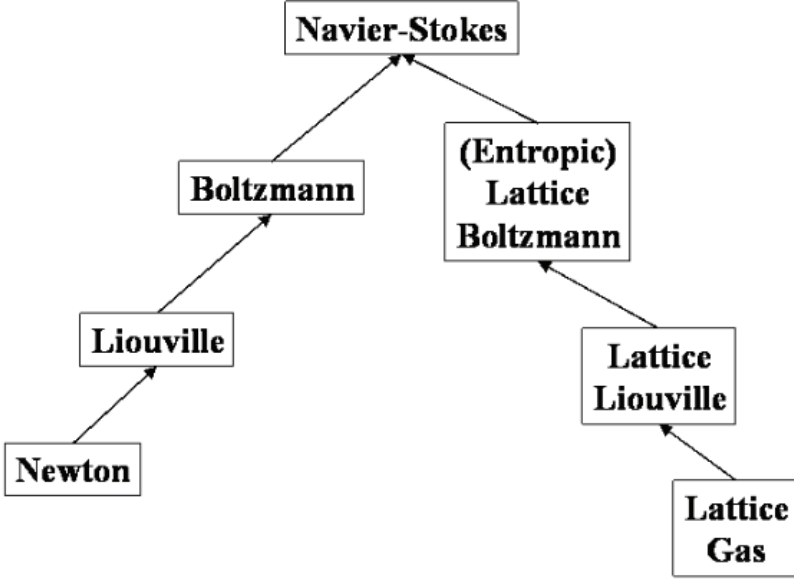
Kafes Boltzmann yöntemi (LBM) kesinlikle doğrudan bir parçacık yöntemi değildir. Sırasıyla fiziksel parçacıklara dayanan kafes gaz hücresel otomatasından (LGCA) türetilmiştir. LGCA yönteminde, parçacıklar bağlantılarla bağlanan sözde sitelerde bulunur. Temel olarak, sitelerin

düğümlere ve bağlantıların kenarlara atfedildiği hesaplamalı bir ağdır. Yönetim denklemi basitçe, bir bölgeye giden ve orada bulunan parçacıkların sayısının, aynı bölgede meydana gelen çarpışmaya eşdeğer olduğunu belirtir;

$$N(\mathbf{r} + \mathbf{c}dt, t + dt) - N(\mathbf{r}, t) = \Omega \quad (17)$$

Yönteme olan ilgi, sorunlar ortaya çıktıktan sonra azalmıştır. LBM'de, tek parçacıklar, LGCA'da karşılaşılan bazı sorunları ortadan kaldıran bir yoğunluk dağıtım fonksiyonu ile değiştirilir. Ancak bu aynı zamanda çarpışma operatörünün açıkça ele alınamayacağı ve sayısal olarak yaklaşık olarak tahmin edilmesi gerektiği anlamına gelir. En kolay ve halen en çok kullanılan modellerden biri Bhatnagar, Gross ve Krook(Bhatnagarp, Gross, & Krook, 1954) modelidir(Teschner et al., 2016).

Boltzmann denkleminin "minimum" bir biçimini temsil eder ve partikül mikro akışlarının yanı sıra gaz veya sıvı için kullanılabilir. Rastgele karmaşık geometrileri, hatta rastgele geometrileri oldukça basit bir şekilde işleyebilir ve özellikle mikro cihazların çalıştığı rejimde etkili olduğu görünmektedir. Bu yöntem, ayrık bir kafes üzerinde basitleştirilmiş bir Boltzmann denklemini çözmektedir. İçsel kinetik doğası nedeniyle, yüksek Knudsen sayısı rejimini de kaldırabilir ve hem mezoskopik dinamiklerin hem de mikroskobik istatistiklerin önemli olduğu problemler için çok etkilidir. Bununla birlikte, başlangıçta yöntemin yüksek Reynolds sayılı akışları simüle etmede amaçlanan kullanımıyla ilgili olarak mikro akışlarda yalnızca sınırlı kullanımı vardı. Yöntem üç ana teorik gelişme yaşamıştır: İlki 1980'lerin ortalarında kafes gaz yöntemlerine yol açmıştır. İkincisi ise 1990'ların başında başladı ve kafes Boltzmann denklemine ulaşmıştır. Son olarak, entropik kafes Boltzmann yöntemine yol açan üçüncü ana gelişme 2000'lerin başında gerçekleşmiştir.



Şekil.2. BBGKY hiyerarşisi ve kafes muadili arasındaki benzerlik. (Succi, 2001)'den uyarlanmış ve (Teschner et al., 2016) 'dan alıntılanmıştır.

Şekil.2'de soldaki sütun, atomistikten sürekli akış denklemlerine giden klasik BBGKY (Bogoliubov–Born–Green–Kirwood–Yvon) hiyerarşisini göstermektedir. Sağdaki sütun, kafes yöntemleri çerçevesinde karşılık gelen yaklaşımları göstermektedir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ:

1995 yılında, (O'Connell ST, 1995a), MD ve süreklilik mekaniğinin ilk birleştirilmiş hesaplamasını gerçekleştirmişlerdir. Artan yayın sayısının da gösterdiği gibi, o zamandan beri bu alana geniş bir ilgi olmuştur. Bir kanaldaki akışı incelemişler ve onu, kanal boyunca katı sınırlara paralel uzanan bir hibrit çözüm arayüzü (HSI) ile ayrılmış bir süreklilik (Navier-Stokes) ve atomistik (MD) bölgeye ayırmışlardır. HSI, her iki tanımın da geçerli olduğu ve birbirleri için sınır koşulları sağlayan bir tampon katmandır. Bu şekilde, bir tanımlamadan diğerine bilgi aktarılır ve bir bilgi alışverişi gerçekleşebilir. Arayüz boyunca temel değişkenler için düzgün

profiller elde etmek için HSI tarafından tanıtılan tampon bölgeye ihtiyaç vardır. MD ve süreklilik bölgesi, kısıtlı dinamikler kullanılarak birleştirilmiş ve değişkenlerin değişimi, duruma göre yapılmıştır, yani hız ve yoğunluk doğrudan HSI'da empoze edilmiştir. Test senaryoları, MD ve süreklilik arasında iyi bir uyumun gözlemlenebildiği başlangıç Couette akışı ile yapılmıştır.

(Hadjiconstantinou NG, 1997), bir kanal içindeki kare bir silindir etrafındaki akışı ve silindirin ardından bir spektral eleman çözücü ile denge dışı moleküler dinamikleri (NEMD) birleştirmiştir. Arayüzdeki çözüm, Schwarz alternatif yöntemi ile yinelemeli olarak elde edilmiştir. Bağlantı bölgesi duvardan uzakta seçildiğinden, hem NEMD hem de Navier-Stokes çözümleri geçerli olmuş ve tam bir Navier-Stokes simülasyonu ile karşılaştırılabilir. İstatistiksel dalgalanmalar, NEMD'nin sınır koşulu dayatması ve iki modeldeki taşıma katsayısının uyumsuzluğu nedeniyle doğruluk sınırlı olmasına rağmen, tam süreklilik ve hibrit hesaplama arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. (Hadjiconstantinou NG, 1999), düşük Reynolds sayıları için bir mikrokanalda hareket eden temas yüzeyi problemini (iki karışmayan fakat bunun dışında aynı sıvı) araştırmıştır. Sürekli alan, kanal merkezine yerleştirilmiş ve duvarlar MD tarafından çözülmüştür. İlk hız dağılımı, tam bir sürekli çözüm yoluyla elde edilmiş ve bu nedenle, çok ölçekli yaklaşımı nihai çözümüne yakınsamak için yalnızca birkaç Schwartz yinelemesi gerekli olmuştur. Tam bir MD çözümü arasındaki karşılaştırma, genel eğilimin belirgin şekilde mevcut olan dalgalanmalarla eşleştirdiği önceki çalışmaları (Hadjiconstantinou NG, 1997) ile benzer bir davranış göstermiştir. (Flekkøy EG, Wagner G, 2000), HSI'da akıları empoze ederek atomistik ve sürekli bölgeyi birleştirmek için farklı bir yaklaşım ortaya koymuştur. (Delgado-Buscalioni R, Flekkøy EG, n.d.), birleştirme planının genel çözümünü etkileyebileceklerinden akıların dalgalanan bileşenini dahil etme ihtiyacını göstermişlerdir. Akış korunumunu etkilemeyen ancak değişim sırasında dalgalanmalara izin veren süreklilik için sınır koşullarını değiştirmişlerdir. Salınımlı kesme akışına uygulandığında, dalgalanmaların etkisi açıkça görülmüş ve niteliksel olarak iyi sonuçlar elde edilmiştir.

(Markesteyn A, Karabasov S, Scukins A, Nerukh D, Glotov V, 2014), Landau-Lifhitz dalgalanan hidrodinamik (LL-FH) denklemlerini, suya batırılmış bir peptitin deformasyonu (dihedral açı) ve yoğunluk dalgalanması arasında güçlü bir korelasyon göstermesi gerçeğinden

hareketle MD ile birleştirmişlerdir. İki simülasyonda (ayrı LL-FH ve MD alanına sahip dikdörtgen alan), biri sıfır ortalama ve diğeri süreklilik tarafında bir sürüklenme hızı ile test edilirken, her iki durumda da MD alanı net momentum olmadan başlatılmış, MD çözümünde dalgalanmalar korunurken sürekli çözüme yaklaştığı görülmüştür.

(O'Connell ST, 1995b), HSI'da veri alışverişi yapmak için kısıtlı dinamikleri kullanmıştır. Çalışmalarında $\xi = 0.01$ olarak ayarlanan bir bağlantı gücü parametresi ξ tanıtmışlardır. ξ değerinin artması daha düşük hesaplama sürelerine neden olsa da, daha yüksek değerlerin sonuçları olumsuz etkilediğini gözlemlemişlerdir. (Nie XB, Chen SY, 2004), kaçmaları önlemek için HSI'deki parçacıklara uygulanan bir dış kuvvetle bağlantılı olarak birleştirme kuvveti için bir "unity" değeri kullanmışlardır. (Wang YC, 2007), ξ değerini dinamik olarak güncellemelerine izin veren ξ için bir denklem türetmişlerdir, (Kamali R, 2013) başka bir yaklaşım kullanmışlar ve ξ üzerinde moleküler zaman adımı tarafından yönlendirilen bir aritmetik ilişki empoze etmişlerdir. Simülasyon $\xi(t_{MD} = 0) = 0.1$ ile başlatılmış ve kullanıcı tanımlı bir zaman adımında $\xi = 1$ 'e ulaşılan kadar üçüncü dereceden bir polinom yoluyla ξ artırılmıştır. Değişimin başlangıcındaki dalgalanmaların ayrışmadan sorumlu olduğunu savunmuşlardır. Başlangıçta düşük bir bağlantı gücü parametresi kullanmaları, olası sapmayı bastırılmış ve sonuçların bağlantı parametresi arttıkça yakınsadığı rapor edilmiştir.

Alternatif bir tanımlama, tüm etki alanının bir sürekli çözücü tarafından kapsandığı ve mikroskobik parçanın, sürekli tanımlamanın geçersiz olduğu düğümlerde yerel olarak hesaplamaya girdiği Heterojen Çok Ölçekli Yöntemi(HMM)'dir (Weinan E, Engquist B, 2003). (Asproulis N, Kalweit M, 2012), HMM'ye dayalı olarak noktasal bağlantı (PWC) geliştirmişlerdir ve bu yaklaşımın, start-up Couette akışındaki hız profilleri için iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Araştırmalarında, yerel atomistik bölgeleri duvar düğümlerine yerleştirmişler ve Lennard-Jones potansiyelindeki bir dizi parametrenin yanı sıra farklı kanal yüksekliklerini ve duvar geometrilerini analiz etmişlerdir. İdeal ve gerçek hızlandırmanın karşılaştırılmasının, iyi ve güçlü ölçeklendirme yeteneklerini daha da ortaya çıkardığını rapor etmişlerdir.

Örnekleme ve gevşeme bölgesinden oluşan mikro element boyutunun sonuçları olumsuz etkilememesi için uygun şekilde tanımlanması gerekir.

Bu nedenle, yazarlar tarafından önceden yapılmış ve mikro elementlerin boyutu tam bir DSMC simülasyonuna uyacak şekilde ayarlanmış bir parametrik çalışmaya ihtiyaç vardır. Yaklaşımları, test edilen durum için iyi çalıştı ancak şu anda 1 boyutlu akışlarla sınırlıdır. Bu nedenle, bildirilen hızlanma, geniş ölçekli bir ayırım elde edilemediği için yalnızca marjinaldir. Diğer bir olasılık ise, enine hatlar boyunca tüm mikro elementleri tek, enine kesitli bir mikro element oluşturmak için birleştirmektir (Teschner et al., 2016).

Bu, (Patronis A, Lockerby DA, Borg MK, 2013) tarafından yapılmıştır. Bu yöntemi dahili çok ölçekli yöntem (IMM) olarak adlandırmışlardır. Yeni tekniklerini, harici bir hızlanma tarafından yönlendirilen yakınsak-uzaklaşan bir kanala, bir basınç farkı tarafından yönlendirilen kavisli, yüksek en-boy oranlı bir kanala ve farklı dönme hızlarında iki eksantrik silindir tarafından sınırlanan gelişen akışa uygulamışlardır. Yaklaşımları, tam DSMC simülasyonlarına karşı oldukça uyumlu olmuştur. Hesaplama hızının sırasıyla 6, 50 ve 300 kat daha hızlı olduğu bildirilmiştir. Çok yüksek hızlanma, çok ölçekli yöntem için kararlı durum sürekli çözücüsünden kaynaklanırken, tam DSMC çözücüsü tamamen kararsız olmuştur. (Patronis A, 2014), bu yöntemi (Homolle TMM, 2007) tarafından tanıtılan düşük varyanslı sapma simülasyonu Monte Carlo'ya (LVDSMC) genişletmiştir. Boltzmann denkleminin dayandır, ancak DSMC algoritmasının yapısını korumuştur. Temel fikir, hız dağılımının analitik olarak çözülebilen bir denge parçasına ve simüle edilmiş parçacıklar tarafından çözülen bir sapma kısmına ayrıştırılabileceğidir. Denge bu şekilde elde edildiğinden, dengeden küçük sapmalar daha yüksek sinyal-gürültü oranıyla simüle edilebilir ve genel gürültü azalır. Yakınsak-uzaksak kanal durumu için, DSMC sonuçlarına kıyasla iyi bir uyum elde edilmiştir.

LBM, temel olarak uygulama kolaylığı, karmaşık geometrilerin işlenmesi ve düşük hesaplama maliyetinin yanı sıra onu paralelleştirme için birincil aday yapan yerel davranışı nedeniyle çeşitli araştırma disiplinleri arasında geniş kabul ve uygulanabilirlik bulmuştur. Bununla birlikte, LBM'nin ısı transferi, sıkıştırılabilirlik ve yüksek Reynolds sayıları içeren akışlar için daha az iyi çalıştığı da bulunmuştur. Klasik LBGK modeliyle elde edilebilen düşük-orta arası Reynolds sayılarının ana nedeni, düşük örgü viskoziteleri ile ortaya çıkan kararsızlıktan kaynaklanmaktadır. Muhtemel bir çözüm, artan hesaplama maliyeti

pahasına kafes aralığını azaltmaktır. Çarpışma için BGK operatörü yerine çoklu gevşeme zamanı (MRT) şeması (D'Humières D, Ginzburg I, Krafczyk M, Lallemand P, 2002) de kullanılabilir.

(Joshi H, Agarwal A, Puranik B, Shu C, 2010), hücre merkezlerindeki ilkel değişkenlerin Euler denklemlerinden elde edildiği sonlu hacim tabanlı bir Euler çözücüsü ile bağlantılı olarak hibrit bir LBM inşa ederken, hücreler arası akılar LBM tarafından değiştirilmiş termal etkileri hesaba katan bir denge dağılım fonksiyonu aracılığıyla yaklaşık olarak hesaplamışlardır. (Cui X, Li J, Chan A, 2012), başlangıçta toprak parçacıkları tarafından kaplanan bir boru sızıntısına benzeyen, parçacık kaplı bir alanda boşluk oluşumunu simüle etmişlerdir. Parçacık kohezyonu için yüzey enerjisi olan ve olmayan parçacık hareketi için ayrık eleman yöntemini (DEM) ve parçacıkları çevreleyen sıvı için LBM'yi kullanmışlardır. Parçacık hızı ve kuvveti, parçacık hareketinden etkilenen akışkan hareketinden elde edilmiştir. Sıvının enjekte edildiği ortada bulunan alt duvarda bir deliği olan dikdörtgen bir hesaplama alanı kullanmışlardır. Yukarıdaki alan parçacıklarla kaplıdır. Nispeten düşük çıkış hızları için gözenek basıncının zaman içinde yükseldiği ve sabitlendiği bulunmuştur. Çıkış hızının artırılması, boşluk basıncında ani bir düşüşün eşlik ettiği bir boşluk oluşumunu göstermiştir. Daha da yüksek hızlar için, sıvının parçacık yüzeyine düz bir yolda aktığı ve yukarıdaki parçacık katmanlarını parçaladığı bir patlama arızası gözlemlenmiştir. Orta hızlarda, boşluk sabit bir boyuta ulaşmış ve büyümeyi durdurmuştur. Parçacıklar arası kohezyonun orifis basıncı oluşum hızı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı bulunmuştur. Bununla birlikte, parçacıklar arası çekim kuvvetlerinin üstesinden gelinmesi gerektiğinden boşluk oluşumunu başlatmak için daha büyük bir basınç gerekli olmuştur. (Mackay F, Pastor K, Karttunen M, 2014), kayma akışının bir mikro kanaldaki koloidal parçacıklar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Parçacıklar başlangıçta sıralı katmanlar halinde kanala yerleştirilmiş ve her katman aynı hacim fraksiyonuna sahip olmuştur. Zıt hareket eden duvarların uyguladığı doğrusal kesme, duvara yakın parçacıkların ortalama olarak daha hızlı hareket etmesine izin vererek, bitişik katmanlardaki parçacıkların parçacıklar arası kuvvetler nedeniyle katmana sıçramasına izin vermiştir. Bu davranış, her katmanda hacim fraksiyonunun değişmesine neden olmuş ve tanımlanan bir derece parametresindeki düşüşün ana nedeni olarak tanımlanmıştır. Daha fazla miktarda parçacık değişimi için, derece parametresi sonunda kritik değer olan 0,6'nın altına düşmüş ve düzensizlik

oluşmaya başlamıştır. Kanal merkezinde düzensizlik mümkün olsa da duvara yakın parçacıklar genellikle düzenli bir oluşumda kalmışlardır. Bulguları, farklı kesme hızları ve hacim fraksiyonları için düzensiz, düzenli ve bir arada var olan katmanı gösteren bir faz diyagramında özetlenmiştir.

3. GENEL DEĞERLENDİRME:

Kayma akış yaklaşımının geçerli olmadığı 0,1'den büyük bir Knudsen sayısı durumunda, moleküler dinamiğe (MD) dayalı parçacık yöntemleri ve doğrudan Monte Carlo simülasyonu (DSMC) genellikle düşük basınçlı seyrek gaz akış özelliklerinin çözümünde etkilidirler. Ancak MD veya DSMC yöntemini gaz mikro akışlarına uygulamanın bazı dezavantajları vardır; örneğin, büyük istatistiksel gürültü ve MEMS'de sıklıkla karşılaşılan düşük hızlı gaz akışları için sabit durumlara ulaşmanın uzun sürmesi. MD veya DSMC yöntemindeki çok sayıda molekül, simülasyonun çoğu bilgisayarın kapasitesinin ötesine kolayca geçmesini sağlayan başka bir dezavantajdır. Doğrusal Boltzmann denklemine dayalı sayısal simülasyonlar, tüm akış rejiminde düşük hızlı seyreltilmiş gaz akışlarını çözmek için uygundur. Ancak elde edilen çoğu çözüm, tam Boltzmann denkleminin sayısal çözümünü gerçekleştirmenin karmaşıklığından dolayı basit geometrilerle sınırlıdır. Kafes Boltzmann yöntemi (LBM), özellikle gözenekli ortam akışı gibi karmaşık sınırlarda çeşitli sorunları incelemek için paralel bilgisayarları rahatlıkla kullanabilen ayrı bir yaklaşımdır.

Geleneksel hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde, verilen makroskopik denklem bazı özel sayısal ayrıklaştırmalarla çözülür. Tam moleküler dinamik açıklamalarda, her bir parçacık yakından ve doğru bir şekilde takip edilir. Bu geleneksel sayısal şemalardan farklı olarak kafes Boltzmann yöntemi, düzenli bir kafes üzerinde dağıtılmış fonksiyon için basitleştirilmiş bir Boltzmann denklemini çözer. Makroskopik parametreler daha sonra dağılım fonksiyonunun bir topluluk ortalaması yoluyla elde edilir. Kafes yöntemi, tam moleküler dinamikler ile diferansiyel denklemler aracılığıyla makroskopik açıklamalar arasında bir konum işgal eden mezoskopik bir model olarak tanımlanabilir. Bu nedenle, hesaplama açısından MD veya DSMC yönteminden çok daha verimlidir. LBM'nin oldukça karmaşık geometrilerde akış simülasyonu için çok

verimli bir araç olduğu gösterilmiştir ve gözenekli ortamlarda akışları ve ilgili taşıma olaylarını simüle etmede önemli bir başarı elde etmiştir.

Aslında, LBM'nin atası olan kafes-gaz otomata yöntemi, 1980'lerin başında gözenekli ortamdaki akışları incelemek için zaten uygulanmıştır; LBM'nin 2D ve 3D geometrilerdeki akışları simüle etmedeki güvenilirliği ve etkinliği, 1988'de ortaya çıkmasından kısa bir süre sonra doğrulandı. Bununla birlikte, sonlu fark veya DSMC gibi geleneksel sayısal yöntemler, oldukça karmaşık sınır koşulları nedeniyle verimsizdir.

DSMC başlangıçta yüksek hızlı geçiş akışlarını simüle etmek için önerilmiş ve uygulanmıştır. Bu bağlamda, Mach sayısının düşük olduğu mikro ölçekli ve nano ölçekli ortamlarda DSMC'nin hesaplama açısından verimli olmadığı ve alternatif bir yaklaşım olarak LBM'nin daha uygulanabilir olduğu söylenmiştir.

DSMC'nin olasılıksal doğası nedeniyle ve düşük Reynolds sayısı simülasyonunda meydana gelen olası istatistiksel gürültüleri filtrelemek için daha yüksek sayıda parçacığın gerçek gaz moleküllerinin temsilcileri olarak simüle edilmesi gerektiği tartışılmaktadır. Ancak LBM'de dağıtılan parçacıkların sayısı yalnızca ağ noktalarına ve örgü yöntemine bağlıdır. Bu nedenle, LBM daha az hesaplama çabası gerektirir. Bununla ilgili olarak ve DSMC'nin hala nispeten yüksek hesaplama maliyetiyle mücadele ettiği gerçeğine rağmen, birçok araştırmacı bu bakış açısına meydan okumuş ve bu yaklaşımı geniş bir mikro ölçekli sistemler kümesine uygulayarak DSMC uygulamasını genişletmişlerdir. Bu, bu konuyu ele alan yeni çarpışma şemaları gibi belirli ölçümlerin yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Diğer bir neden ise, DSMC'nin yüksek doğruluğunun onu araştırmacılar için daha çekici hale getirmesidir, yani LBM bile DSMC ile doğrulanmıştır. Ayrıca, LBM'nin mikro ölçekli gözenekli ortam için kullanılması için hala bazı modifikasyonlara ihtiyaç duyulurken, DSMC, kayma akışından serbest moleküler rejime meydana gelen olayları yakalama yeteneğine sahiptir(Shariati et al., 2019).

Moleküler dinamik (MD) gibi mikroskobik simülasyon yaklaşımı, moleküller arası potansiyeller yoluyla birbirleriyle etkileşime giren bireysel moleküllerin evrimi yoluyla sıvı davranışlarını inceler. Burada mikroskobik moleküler yapılar ve etkileşimler iyi bir şekilde temsil edilmektedir; bununla birlikte, büyük hesaplama işi talebi, en gelişmiş

süper bilgisayarlarda bile, uygulamalarını çok küçük alan ve zaman ölçekleriyle sınırlandırmaktadır(Kadau, Germann, & Lomdahl, 2006).

Tablo.1. Parçacık metodlarının avantaj, dezavantaj ve uygulama alanları. (Teschner et al., 2016)'dan alınmıştır.

Metot	Avantajları	Dezavantajları	Uygulaması
MD	Açık(Explicit) moleküler yapı	*Hesaplama açısından maliyetli ($O(N^2)$) *Açık sınırların modellenmesi zordur	*Medikal ve biyolojik sistemler *Kaplama *Yüzey-bağlı akışlar *Temel atomistik araştırmalar
DSMC	*Mikro ve makro ölçeklere uygulanabilir *Kompleks geometriler kolayca modellenebilir	*Yüksek istatistiki saçılma *Yüksek Kn sayılarında sınırlı	*Seyrek gazlar *Uzay ilişkili sistemler
LBM	*Hızlı hesaplama gücü *Mezo ve makro ölçeğe uygulanabilir *Kompleks geometriler kolayca modellenebilir	*Klasik LBM düşük Mach sayılarına sınırlıdır *Termal davranışların modellenmesi zordur	*Çoklu faz *Gözenekli ortam *Multi fizik

3. SONUÇLAR

Kafes Boltzmann yöntemi (LBM) muazzam gelişmeler yaşadı ve çeşitli sıvı davranışlarını simüle etmek için yararlı bir yöntem olarak kabul edildi. Hesaplamalı mikro akışkanlar için LBM, mikroskobik etkileşimlerin fiziksel temsili, çok fazlı akışlar için tekdüze algoritma ve karmaşık sınırlarla başa çıkma kolaylığı dahil olmak üzere bazı avantajlar sunabilir hale geldi. Ek olarak, ısı transferi, elektrik/manyetik alan ve difüzyon gibi mikro akışkanlarla ilgili süreçleri ve olayları çözmek için LBM benzeri algoritmalar geliştirilmiştir(Zhang, 2011).

(Teschner et al., 2016)'in çalışmasında termal LBM'nin hala olgunlaşmamış olduğunu ve sıcaklık alanını mezoskopik ölçekte çözmek için süreklilik mekaniğini kullanmak üzere çok sayıda hibrit çözücünün geliştirildiği özetlenmiştir. Ancak bu geçerli bir yaklaşımdır ve hesaplama verimliliğini artırmaktan çok LBM'nin doğal eksikliklerinin üstesinden gelmekle ilgili olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, burada tartışılan çoğu çalışma hibrit çözücülerle ilgiliyken, alan ayrıştırma tarzında ısmarlama akış alanlarıyla gerçek çok ölçekli yaklaşımlar daha az yaygın olduğu söylenmiştir. Benzer şekilde, yüksek Reynolds sayısı akışları, LBM'nin doğal sayısal istikrarsızlıkları nedeniyle zorlayıcı olduğu ve Reynolds sayısı aralığını genişleten ancak kararsızlıkları ortadan kaldırmayan MRT çarpışma operatöründen ve entropik LBM'den bahsedilmiştir. Bununla birlikte, çözücü verimliliğinin önemli olduğu ve sıcaklığın hesaplanmasının gerekmediği uygulamalar için LBM, karmaşık geometriler için uygulanmasının kolay olması ve çoklu fizik etkilerini ele almasıyla ünlüdür ve hesaplama süresi açısından aynı çözünürlükte olan benzer yöntemlerden daha iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır.

(Schwartzentruber & Boyd, 2015), mevcut DSMC kodlarının doğrulanması için deneysel çalışmaların hayati ve gerekli olduğuna dikkat çekmiştir. Şu anda, çok ölçekli ve hibrit DSMC kodlarının çoğu, saf DSMC çözücülere karşı doğrulanmıştır (bir dizi 1D, 2D ve 3D test durumu için) (Scanlon, Roohi, White, Darbandi, & Reese, 2010). MD'nin bir doğrulama aracı olarak kullanılabileceğini, ancak seyreltilmiş gazlar için hesaplama açısından oldukça pahalı olduğunu belirtmişlerdir. DSMC'yi ikinci bir çözücü ile birleştirirken ortaya çıkan başka bir sorun, çarpışmanın stokastik olarak ele alınması nedeniyle ortaya çıkan gürültü olduğu belirtilmiştir. Burada bir dizi yaklaşım sunulduğunu (LD-DSMC, LVDSMC, IP, alt-gevşeme) ve hepsinin gürültü seviyesini azaltabildiği vurgulanmıştır (Teschner et al., 2016). Uzamsal veya zamansal regresyon kullanmanın, yöntemden bağımsızken çok az ekstra hesaplama çabasıyla gürültüyü azalttığı ve bu nedenle uygulanabilir bir alternatif olduğunu kanıtlayabildiği söylenmiştir (Ko, Kim, Jha, Nikitopoulos, & Moldovan, 2014). Bildirilen hesaplama kazançları, en yüksek Knudsen sayısı ayrımlarına sahip vakalar için en yüksek olduğundan uygulamaların bu tür akış rejimleriyle sınırlı olabileceği tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, uzay uygulamalarının serbest moleküler ile süreklilik rejimi sergilediğini ve bu nedenle kendilerini çok ölçekli DSMC şemaları için ana adaylar haline getirdiği söylenmiştir (Teschner et al., 2016).

Çok ölçekli MD hesaplamalarında, hesaplama alanını deneysel ölçümlerin mümkün(Tretheway & Meinhart, 2002) ve geçerli verilerin elde edilebildiği orta(mezo) ölçeğe genişletirken bile mikro ölçekteki akışın fiziğini doğru şekilde yakalamaya izin verdiği söylenmiştir(Xu & Li, 2007).

Düşük hızlı akışlar için mikro ölçekte deneyler yapılabilir ve bu nedenle, istatistiksel saçılma ile başa çıkmak için sıkıştırılmaz çok ölçekli yöntemlerin daha da geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir(Teschner et al., 2016). Bağlantı şemalarının sunulduğu çoğu çalışmada ya Couette akışı (kararlı ve kararsız), salınımlı kayma akışı ya da Poiseuille akışı için test edilmiştir. Daha karmaşık geometrilere yönelik çabalar sunulmuştur, ancak karmaşık HSI'ları ve yapılandırılmamış ağları kullanan simülasyonlar bizim tarafımızdan bilinmemektedir. Altta yatan ağ yapılandırılmış veya yapılandırılmamış olabileceğinden, bu durum PWC veya FWC(Borg, Lockerby, & Reese, 2013) kullanılarak önlenebilir; bununla birlikte, etki alanı ayrıştırma yaklaşımı, örneğin duvarla sınırlı bir akış durumunda olduğu gibi, etki alanının farklı alanlara bölünebildiği akışlar için daha genel bir tanımlamadan fayda sağlayacağı belirtilmiştir. Atomistik ve süreklilik alanları arasındaki sınır verilerinin dayatılması zorlu olmaya devam ettiği söylenmiştir(Teschner et al., 2016).

Mikro, mezo ve makro ölçeğin tek bir yaklaşımda bir araya getirilmesi, fiziksel fenomenler tüm ölçeklerde yeterince modellenirken, daha doğru ve kararlı bağlantı yöntemleri sağlayabilir(Teschner et al., 2016).

REFERANSLAR

- Asproulis N, Kalweit M, D. D. (2012). A hybrid molecular continuum method using point wise coupling. *Advances in Engineering Software*, 46(1), 85–92.
- Berendsen, H. J. C. (1999). Molecular Dynamics Simulations: The Limits and Beyond (pp. 3–36). doi:10.1007/978-3-642-58360-5_1
- Bhatnagarp, P. L., Gross, E. P., & Krook, A. M. (1954). *Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems*~.
- Bird, G. A. (1989). Perception of numerical methods in rarefied gas dynamics. In: Muntz EP, Weaver DP, Campbell DH (eds) Rarefied gas dynamics: theoretical and computational techniques. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 211–226.
- Bird, G. A. (1994a). *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*. Oxford: Clarendon Press. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=Bya5QgAACAAJ&pgis=1>
- Bird, G. A. (1994b). *Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows* - 2nd edition.
- Borg, M. K., Lockerby, D. A., & Reese, J. M. (2013). Fluid simulations with atomistic resolution: A hybrid multiscale method with field-wise coupling. *Journal of Computational Physics*, 255, 149–165. doi:10.1016/j.jcp.2013.08.022
- Cui X, Li J, Chan A, C. D. (2012). A 2D DEM–LBM study on soil behaviour due to locally injected fluid. *Particuology*, 10(2), 242–252.
- D’Humières D, Ginzburg I, Krafczyk M, Lallemand P, L. L. (2002). Multiple–relaxation–time lattice Boltzmann models in three dimensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 360(1792), 437–451.
- Delgado-Buscalioni R, Flekkøy EG, C. P. (n.d.). Fluctuations and continuity in particle–continuum hybrid simulations of unsteady flows based on flux-exchange. *European Physical Letter*, 69(6), 959–965.
- Flekkøy EG, Wagner G, F. J. (2000). Hybrid model for combined particle and continuum dynamics. *European Physical Journal Plus*, 52(3), 271–276.
- Futagami, H., & Ninokata, H. (2009). *FEDSM2009-78356 ANALYSIS FOR RAREFIED GAS FLOW IN A ROTATING CYLINDER*. In *Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Vail,

- Colorado USA. Retrieved from <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- Hadjiconstantinou NG. (1999). Hybrid atomistic–continuum formulations and the moving contact-line problem. *Journal of Computational Physics*, 265, 245–265.
- Hadjiconstantinou NG, P. A. (1997). Heterogeneous atomistic–continuum representations for dense fluid systems. *International Journal of Modern Physics C*, 08, 967–976.
- Homolle TMM, H. N. (2007). A low-variance deviational simulation Monte Carlo for the Boltzmann equation. *Journal of Computational Physics*, 226(2), 2341–2358.
- Joshi H, Agarwal A, Puranik B, Shu C, A. A. (2010). A hybrid FVM–LBM method for single and multi-fluid compressible flow problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 62(4), 403–427.
- Kadau, K., Germann, T. C., & Lomdahl, P. S. (2006). Molecular dynamics comes of age: 320 billion atom simulation on BlueGene/L. *International Journal of Modern Physics C*, 17(12), 1755–1761. doi:10.1142/S0129183106010182
- Kamali R, K. A. (2013). Investigation of multiscale fluid flow characteristics based on a hybrid atomistic–continuum method. *Computational Physics Community*, 184(10), 2316–2320.
- Ko, S. H., Kim, N., Jha, S., Nikitopoulos, D. E., & Moldovan, D. (2014). Numerical methodologies for investigation of moderate-velocity flow using a hybrid computational fluid dynamics - molecular dynamics simulation approach. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(1), 245–253. doi:10.1007/s12206-013-0962-5
- Lilley, C. R., & Macrossan, M. N. (2003). Methods for implementing the stream boundary condition in DSMC computations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 42(12), 1363–1371. doi:10.1002/flid.603
- Mackay F, Pastor K, Karttunen M, D. C. (2014). Modeling the behavior of confined colloidal particles under shear flow. *Soft Matter*, 10(43), 8724–8730.
- Markesteyn A, Karabasov S, Scukins A, Nerukh D, Glotov V, G. V. (2014). Concurrent multiscale modelling of atomistic and hydrodynamic processes in liquids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 372(20130379).

- Nie XB, Chen SY, R. M. (2004). A continuum and molecular dynamics hybrid method for micro- and nano-fluid flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 500, 55–64.
- O’Connell ST, T. P. (1995a). Molecular dynamics–continuum hybrid computations: a tool for studying complex fluid flows. *Physical Review*, 52(6), 5792–5795.
- O’Connell ST, T. P. (1995b). Molecular dynamics–continuum hybrid computations: a tool for studying complex fluid flows. *Physical Review*, 52(6), 5792–5795.
- Patronis A, Lockerby DA, Borg MK, R. J. (2013). Hybrid continuum–molecular modelling of multiscale internal gas flows. *Journal of Computational Physics*, 255, 558–571.
- Patronis A, L. DA. (2014). Multiscale simulation of non-isothermal microchannel gas flows. *Journal of Computational Physics*, 270, 532–543.
- RC, P. (2014). *Atmospheric reentry modelling using an open- source DSMC code*. University of Strathclyde.
- Scanlon, T. J., Roohi, E., White, C., Darbandi, M., & Reese, J. M. (2010). An open source, parallel DSMC code for rarefied gas flows in arbitrary geometries. *Computers and Fluids*, 39(10), 2078–2089. doi:10.1016/j.compfluid.2010.07.014
- Schwartzentruber, T. E., & Boyd, I. D. (2015). Progress and future prospects for particle-based simulation of hypersonic flow. *Progress in Aerospace Sciences*, 72, 66–79. doi:10.1016/j.paerosci.2014.09.003
- Shariati, V., Ahmadian, M. H., & Roohi, E. (2019). Direct Simulation Monte Carlo investigation of fluid characteristics and gas transport in porous microchannels. *Scientific Reports*, 9(1). doi:10.1038/s41598-019-52707-3
- Shen, C. (2005). *Rarefied gas dynamics: fundamentals, simulations and microflows*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Succi, S. (2001). The Lattice Boltzmann Equation: For Fluid Dynamics and Beyond. On *Numerical Mathematics and Scientific Computation*. Clarendon Press. Retrieved from https://books.google.com.tr/books?id=OC0Sj%5C_xgnhAC
- Teschner, T. R., Könözy, L., & Jenkins, K. W. (2016). Progress in particle-based multiscale and hybrid methods for flow applications. *Microfluidics and Nanofluidics*, 20(4). doi:10.1007/s10404-016-1729-y

- Tretheway, D. C., & Meinhart, C. D. (2002). Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls. *Physics of Fluids*, 14(3). doi:10.1063/1.1432696
- Wang YC, H. G. (2007). A dynamic coupling model for hybrid atomistic continuum computations. *Chemical Engineering Science*, 62, 3574–3579.
- Weinan E, Engquist B, H. Z. (2003). Heterogeneous multiscale method: a general methodology for multiscale modeling. *Physical Review*, 67(9), 2–5.
- Xu, J., & Li, Y. (2007). Boundary conditions at the solid-liquid surface over the multiscale channel size from nanometer to micron. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(13–14), 2571–2581. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.11.031
- Zhang, J. (2011, January 1). Lattice Boltzmann method for microfluidics: Models and applications. *Microfluidics and Nanofluidics*. Springer Verlag. doi:10.1007/s10404-010-0624-1



BÖLÜM 14

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ KABLOSUZ ŞARJ İSTASYONU TASARIMI

Metin DEMIRTAS¹, Haris CALGAN², Erdem ILTEN³

1 Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, mdtas@balikesir.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2622-5286>)

2 Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, haris.calgan@balikesir.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9106-8144>)

3 Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, erdemilten@balikesir.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9608-2148>)

1. Giriş

Son yıllarda küresel ısınma, hava kirliliği, su kirliliği gibi çevresel zararlara sebebiyet veren karbon kaynaklı enerji üretim sistemleri yerini rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir ve çevreye zararı olmayan kaynaklar üzerinden elektrik enerjisi üreten sistemlere bırakmaya başlamıştır. Bunun yanında, karbon bazlı yakıt kullanan araçlar da çevre kirliliğinin önemli sebeplerinden biridir. Bu problemin çözülebilmesi için tamamen elektrik enerjisi ile çalışan araçların yaygınlaşması büyük önem arz etmektedir. Elektrikli araç (electric vehicle (EV)) kullanımının yaygınlaşması durumunda verimli şarj istasyonu tasarımı ve istasyonlara kolay erişim konusu gündeme gelmektedir. Elektrikli araç şarj istasyonları (electric vehicle charging station (EVCS)) için hazırlanan IEC61851 standardına göre mesken kullanımlarda 32 A'ye kadar, farklı şarj modlarında ise alternatif akımda 250 A'ye kadar akımların çekilebilmesine izin verilmiştir. Ancak EV'lerin sayılarının hızla artması, şarj sürecinin yönetiminde zorlukları beraberinde getirecek ve alçak gerilim seviyelerinde ciddi şebeke problemleri ortaya çıkaracaktır (Yapıcı et al., 2016). Giderek artan yük talebi ilave tesis yatırım ihtiyacını doğuracaktır. Çeşitli sezgisel algoritmalar kullanılarak EV sayılarının dağıtım şebekesi üzerindeki etkileri azaltılabilmekte ve yük profili bir miktar düzleştirilebilmektedir (Alonso et al., 2014). Ancak yine de tesis yatırımı yapılmadan istenen elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanabilmesi güçtür.

Günümüzde enerji üretiminin %60'dan fazlası karbon bazlı kaynaklardan (kömür veya petrol), %20 civarı ise yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Bir yandan ulaşımda EV'lere yönelim artarken diğer taraftan enerji üretiminde bu oranların aynı kalması, EV'lerin genel faydalarına aykırı bir durum oluşturmaktadır. Hatta karbon kaynaklı elektrik üretiminin EV'lerde kullanılmasıyla artan enerji talebi daha fazla karbon bazlı kaynak kullanımına sebep olacak ve karbon gazının salınımını arttıracaktır. Bu yüzden, EV'lerin avantajlarını tam olarak değerlendirebilmek için, güneş pilleri (photovoltaic (PV)) veya rüzgâr türbinleri (wind turbine (WT)) gibi tamamen yeşil enerjiye dayanan yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulması gerekmektedir.

Ekonomik değerlendirmeler, çevresel faktörler ve EV'lerin şebekeye olan etkileri göz önüne alındığında birçok araştırmacı şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız EVCS'lerin kurulumu ve kullanımı konusuna yönelmiştir. Şebekeye bağlı ve çeşitli yenilenebilir kaynakları içeren EVCS yapılarından bazıları çift yönlü çalışabilen dönüştürücü birimleri içermektedir ve araçtan-şebekeye (vehicle to grid (V2G)) olarak

isimlendirilen çift yönlü enerji aktarma teknolojisine sahiptir. Bu teknolojiyle frekans kontrolü, reaktif güç kompanzasyonu, güç kalitesinin düzeltilmesi ve gerilim regülasyonu yapılabilen ve ayrıca EV'ler bağımsız depolama üniteleri olarak kullanılabilir (Yılmaz & Krein, 2012). Diğer taraftan, PV içeren EVCS yapıları incelendiğinde, EV'lerin şebekeye olan ihtiyacının bir miktar azaldığı ve birim şarj enerji maliyetinin düştüğü belirlenmiştir (Tao et al., 2018). Ancak güneş enerjisinin kullanılmayacağı gece saatlerinde PV işlevsiz kalacaktır. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için batarya içeren PV destekli EVCS birimleri kullanılmıştır (Badawy & Sozer, 2015). Yine de bu durumda batarya grubunun limitli olmasından dolayı bazı durumlarda EVCS doğrudan şebekeden beslenecektir. Bazı çalışmalarda ise PV'nin yanında WT kullanılan EVCS yapısının şebekeden çok az güç çekmesi amaçlanmış ve birim şarj maliyetinin minimum seviyelere indirilmesi amaçlanmıştır (Verma & Singh, 2018). Şebeke destekli olarak çalıştırılan bu sistemler dağıtım şebekelerinin olduğu merkezi yerlere kurulmak zorundadırlar. Ancak, elektrik şebekesine erişimin olmadığı, EVCS için gerekli altyapıyı bulundurmayan veya şebekeden alacağı desteğin çok az olacağı birçok bölge bulunmaktadır. Bu yüzden şebekeden bağımsız EVCS sistemleri, şebekeye ihtiyaç duymaması ve V2G yeteneği olmamasından dolayı, kırsal bölgelerde kurulum açısından daha uygun görülmektedir (Y. Wang et al., 2020).

Yenilenebilir enerji ile beslenen şebekeden bağımsız EVCS'lerin tasarımında ve kurulumunda dikkat edilmesi gereken birçok faktör mevcuttur. Enerji kaynaklarının güçleri, araçların yük talebini karşılayabilecek şekilde seçilmelidir. Şarj istasyonunun lokasyonu optimizasyon çalışmaları sonucu belirlenmelidir. Ayrıca, maliyetlerin azaltılması için kurulum öncesinde, sistemin kurulum yeri ve gücü çalışma koşulları açısından doğru bir şekilde planlanmalıdır (Shaaban et al., 2019). Şebekeden bağımsız EVCS'ler dağıtım şebekelerine erişimin olmadığı bölgelerde en uygun seçenek olarak görülmektedir. Ayrıca şebekedeki arızalar esnasında yedek güç kaynağı olarak kullanılabilirler (Fathabadi, 2020). Bu tip şarj istasyonlarının çalışması esnasında, yük talebi tamamen karşılanmalıdır, bu da kurulumu ve kontrolü için kapsamlı araştırmalar gerektirmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalara bakıldığında, şebeke destekli EVCS'lerin yanında araştırmacıların şebekeden bağımsız EVCS'lerin kurulumu, optimizasyonu ve kontrolü için çeşitli yöntemleri kullandığı görülmektedir. Fathabadi ve He (2020), PV ünitesi ve yakıt hücresi içeren şebekeden bağımsız bir EVCS kurmuşlardır. Kurulan sistemin maksimum güç üretebilmesi için özgün bir Maksimum Güç Noktası Takip (MPPT) yöntemi geliştirmişlerdir (He & Fathabadi, 2020). Al Wahedi ve Bicer, (2019) şebekeden bağımsız PV ve WT içeren bir EVCS önermişlerdir. Batarya grubunun maliyetinden dolayı

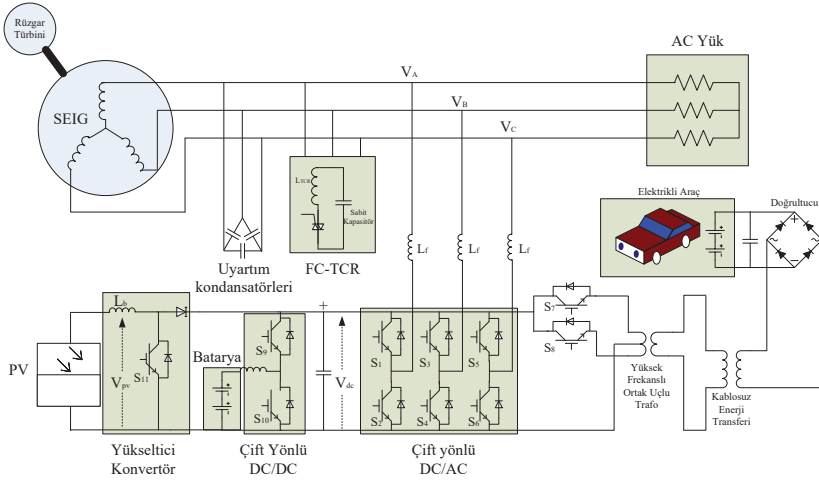
yerine hidrojen ve amonyak bazlı yakıt hücrelerini kullanmışlardır. Singh vd., (2020), PV, dizel jeneratör ve batarya grubu içeren bir EVCS kurulumu gerçekleştirmişlerdir. Bahsi geçen çalışmalarda yakıt hücreleri veya dizel jeneratör bulunduğundan dolayı kullanılan sistemlerin tam olarak yenilebilir kaynaklardan beslendiği söylenemez. Bunun yanında, Ekren vd., (2021) İzmir-Bornova bölgesinde WT ve PV içeren hibrit bir şarj istasyonu kurulumu için HOMER programını kullanarak tasarım ve optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Sun (2021), WT, PV ve batarya grubu içeren EV hızlı şarj istasyonu için optimal tasarım çalışmaları yapmıştır. Yaptığı bu çalışmada, çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu algoritması kullanarak elektrik maliyetini ve karbon emisyonunu aynı anda azaltmayı amaçlamıştır. Kullanılan WT, PV ve bataryaların kapasitelerinin optimizasyonu simülasyon ortamında başarıyla gerçekleştirilmiştir (B. Sun, 2021). Literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, şebekeden bağımsız ve tamamen yenilebilir enerji kaynaklarından beslenen kısıtlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Ayrıca bu sistemlerde detaylı kontrolör tasarımları yapılmamıştır. Kurulan sistemdeki jeneratörün çeşidi, güneş panelinin çıkış gerilimi, bara gerilimi ve dönüştürücü birimlerin çeşitlerine göre farklı kontrolör tasarımları gerekmektedir. Ayrıca, şebeke bağlantısı olmadığı durumda, sistemdeki bozucular ve gürültüler çıkış gerilimlerini veya yük akımlarını etkileyebilmektedir. Bu yüzden, şebekeden bağımsız EVCS sistemlerinde tasarlanan kontrolörlerin gürbüzlüğü önemli bir etkidir.

Diğer taraftan kablosuz şarj yöntemleri, EV endüstrisine büyük bir yenilik olarak gelmiştir. Klasik şarj ünitelerine göre, herhangi bir güç bağlantısına gerek duyulmamaktadır. Kablosuz güç aktarımı (wireless power transfer (WPT)), statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılır. Park halindeki aracın altına tek bir bobin koyularak gerçekleştirilen statik kablosuz güç transferi sistemleri General Motors tarafından 1998 yılında önerilmiştir (Spaur et al., 1998). WPT, su, toz vb. çevresel etkenlere karşı dayanıklı ve kablo içermeyen yapısından dolayı elektrik şarjı için daha güvenli ve uygun bir yöntemdir. Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde, EV'lerin şarj edilmesinde WPT kullanımı konusunun oldukça yaygın olduğu görülmektedir. Li ve Mi, (2014) EV'ler için kablosuz güç aktarımında manyetik kuplaj tasarımı, sabit ve hareketli halde manyetik kuplaj üzerinden güç aktarımının nasıl yapıldığı ve aralarındaki farklar, devrenin kompanzasyonu, dönüştürücü devreler aracılığı ile yapılan güç kontrolü üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, çevre ve enerji ile ilgili sorunlar nedeniyle EV'lere geçişin kaçınılmaz olduğu vurgulanmıştır. Otoyolların kablosuz şarj özelliği ile inşa edilmesi halinde yeni batarya teknolojilerinin gelişmesi beklenmeden EV'lerin mevcut bataryalarla sağlıklı şekilde çalışmasının sağlanabileceği öngörülmektedir. Son zamanlarda topoloji, kontrol, inverter tasarımı ve

insan güvenliği konularında daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Musavi ve Eberle, (2014) EV'ler için mevcut kablosuz şarj teknolojileri olan endüktif güç aktarımı, kapasitif güç aktarımı, sürekli mıknatıs kuplajlı güç aktarım, rezonans endüktif güç aktarımı, çevrimiçi endüktif güç aktarımı, rezonans anten güç aktarımı modellerini verim, maliyet, hacim, sistem karmaşıklığı gibi değerler üzerinden karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada, binek araçlar ve büyük toplu taşıma araçları için ayrı ayrı olmak üzere araca entegre olarak iki farklı kablosuz/yerleşik hızlı şarj devre modeli önerilmiştir. Sun vd., (2018) EV'ler için mevcut kablosuz şarj teknolojilerini ve bunların uygulamalarını incelemişlerdir. Bu çalışmada EV'ler için sabit ve dinamik kablosuz şarj uygulamaları incelenmiş ve bunların ekonomik fizibilitesi analiz edilmiştir. Ayrıca WPT'ler için elektromanyetik alan koruması yöntemleri de araştırılmıştır. Suh ve Kim, (2013) EV'ler için yol üzerinde dinamik WPT modeli önermişlerdir. Bu çalışmada önerilen WPT modeli, şekillendirilmiş manyetik alanın rezonans hali için incelenmiştir. Ayrıca sistemin deneysel doğrulanması, araç ve altyapı teknolojisindeki gelişmeler aktarım verimliliği açısından incelenmiştir. Lu vd., (2017) EV'ler için iki plakalı kapasitif WPT sistemi önermişlerdir. Geleneksel dört plakalı kapasitif WPT yerine araç şasesi ve topraklama birer plaka olmak üzere iki plakalı bir kapasitif WPT sistemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda aracın şase voltajı, insanlar için güvenli seviye olan 8.35 V ile sınırlandırılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen prototipin 110 mm hava boşluğu mesafesinde %74.1 DC/DC verim ile 350 W güç aktarımı sağladığını göstermektedir. Kim vd., (2014) EV'lerde kullanılan WPT'ler için rezonans reaktif kalkan sistemi tasarımı ve analizi konulu bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, WPT sistemlerindeki manyetik alan sızıntısının azaltılması hedeflenmiştir. Bir LC rezonans devresi kullanılarak oluşturulan reaktif kalkan, WPT bobinlerinden sızan kaçak manyetik alanı azaltmak için bu alana ters yönde bir alan oluşturmakta ve ek güç tüketmeden toplam manyetik alanı etkili bir şekilde azaltmaktadır. Rezonans reaktif kalkanın etkinliği ve WPT verimliliği üzerindeki etkisi simülasyon ve deneysel çalışmalar ile analiz edilmiştir. Önerilen sistemin başarısı, kablosuz olarak şarj edilen bir elektrik barasında yapılan deneylerle doğrulanmıştır. Yapılan çalışmalara bakıldığında PV, WT ve WPT içeren EVCS sisteminin entegre halde çalıştırıldığı çok az çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, bahsedilen EVCS tasarlanmış ve sistemin farklı senaryolarda güç akışı için uygun kontrol teknikleri geliştirilmiştir. Bu çalışmanın literatüre temel katkısı PV, WT, batarya ve WPT kısımlarından oluşan mikro-şebekenin, entegre halde çalışan tek bir model olarak tasarlanması ve bu model için uygun kontrol yöntemleri geliştirilmesidir.

2. Önerilen Mikro-Şebekenin Tasarımı

Önerilen mikro şebeke, Şekil 1’de görüleceği üzere rüzgar türbini ve güneş paneli olmak üzere iki farklı yenilebilir kaynak, enerji depolama birimi (batarya), maksimum güç takip noktası (MPPT) algoritması için bir adet yükseltici (boost) konvertör, bataryanın kontrolü için çift taraflı DC konvertör (BDDC), AC baranın kontrolü için TCLC yapısı ve kablosuz şarj ünitesini içermektedir. Rüzgar türbininde şebekeden bağımsız olarak çalışabilen, düşük kurulum maliyetlerine sahip, geniş bir hız aralığında çalışabilen, fırçasız ve gürbüz bir yapısı olan SEIG kullanılmıştır. Ancak, birçok avantajına rağmen SEIG’in çıkış gerilimi ve frekansı bağlanan yük miktarı, generatör hızı, uyarım kapasitesinin değeri gibi birkaç faktöre bağlıdır (Çalgan et al., 2020). Bu yüzden farklı koşullar altında ihtiyaç duyduğu değişken reaktif gücü sağlamak için statik VAR kompanzator grubuna dahil olan TCLC yapısı kullanılmıştır. Böylelikle, TCLC yapısı uygun tetikleme açılarıyla kontrol edilecek, AC bara gerilimi istenen seviyelerde tutulabilecektir. Önerilen yapıda kullanılan çift yönlü DC/AC konvertör sayesinde rüzgar türbininin ürettiği güç DC baraya aktarılabilir ve kablosuz şarj ünitesinde kullanılabilir. Rüzgar türbini devrede olmadığında ise DC baradaki gerilim DC/AC dönüştürücü sayesinde evrilerek AC yükler beslenebilecektir. Önerilen mikro şebekenin simülasyonu MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Kontrol sistemine girdi olarak AC bara gerilimleri ve akımları, PV gerilimi ve akımı, batarya gerilimi ve akımı, DC bara gerilimi alınmıştır.



Şekil 1. Önerilen PV-SEIG tabanlı kablosuz şarj sistemi

2.1. PV Yükseltici Konvertör Tasarımı

PV sistemleri modüllerin seri veya paralel bir şekilde bağlanmasıyla oluşturulur. Önerilen sistemde, PV gücü 2.48 kW olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla, simülasyon çalışmalarında 1Soltech firmasının monokristal 1STH-FRL-4H-250-M60-BLK model numaralı 250 W 30.7 V'luk panelinden 10 adet panel seri bağlanarak kullanılmıştır. PV modülünün maksimum gücü iki aşamada elde edilmektedir. İlk aşamada yükseltici konvertör kullanılarak PV panelden maksimum güç noktası takip edilmekte ve ikinci aşamada bu güç bataryaya iletilmektedir. Yükseltici konvertörün giriş gerilimi belirlenen PV paneli maksimum güç nokta gerilimi olan 307 V'dir. Tasarlanan yükseltici konvertörün bu noktadaki doluluk oranı (duty cycle) denklem (1)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$D = (V_{DC} - V_{pv}) / V_{DC} = (520 - 307) / 520 = 0.409. \quad (1)$$

Tasarlanan yükseltici konvertörün bobin değeri ise denklem (2)'deki gibi belirlenmiştir.

$$L_b = \frac{V_{mp} \times D}{\Delta i_{rp} \times f_s} = \frac{307 \times 0.41}{0.05 \times 8 \times 10 \times 10^3} = 31.46 \text{ mH}. \quad (2)$$

Maksimum güç noktasındaki akım dalgalanmaları (Δi_{rp}) %5 ve anahtarlama frekansı (f_s) da 10 kHz olarak seçilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta PV'nin çıkış geriliminin güneş radyasyonu ve panel sıcaklığına bağlı olarak sürekli değişkenlik gösterebileceğidir. Bu yüzden yükseltici konvertörde sabit doluluk oranına göre bobin değeri belirlenmesine rağmen, bu yapı giriş gerilimindeki değişimlere göre uygun doluluk oranına sahip anahtarlama yapacak bir kontrol sistemine ihtiyaç duymaktadır.

2.2. Generatör Çıkışı için Çift Yönlü Üç Fazlı (AC/DC-DC/AC) Konvertör Tasarımı

Önerilen sistemde 5.5 kW, 400 V, üç fazlı SEIG kullanılmıştır. Ancak SEIG, farklı yükler altında değişken reaktif güç ihtiyacına sahip olmasından dolayı zayıf gerilim regülasyonu dezavantajına sahiptir. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için TCLC yapısı kullanılmıştır. Böylelikle AC bara gerilimi istenen seviye olan 220 V'da sabit olarak tutulmaktadır. Dönüştürücü maliyetleri ve kayıplarından kaçınmak için çift yönlü konvertör tasarlanırken AC Bara gerilimi dikkate alınmıştır. Dolayısıyla, rüzgar türbini devrede iken AC bara tarafından üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu sayesinde DC bara tarafına güç akışı olacaktır. Bu doğrultucunun çıkış gerilimi denklem (3)'teki gibi hesaplanabilir.

$$V_{DC} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} V_{AC} \cong 2.34 V_{AC} \quad (3)$$

Denklemden belirtilen V_{AC} , AC bara gerilimini aynı zamanda SEIG'in çıkış gerilimini belirtmektedir. 220 V olan AC bara gerilimi göz önüne alındığında, V_{DC} gerilimi yaklaşık olarak 515 V olarak hesaplanmaktadır. Bu değer dikkate alınarak DC bara gerilimi 520 V olarak seçilmiştir. Böylelikle ekstra dönüştürücü maliyetleri ve kontrol yükünden kaçınılmıştır.

Çeşitli nedenlerden dolayı rüzgar türbini ve türbine bağlı üniteler (Uyarım kondansatörü, TCLC vb.) devreden çıkarıldığında AC yükleri beslemek için DC baradan AC baraya güç akışı olmaktadır. Bu noktada çift yönlü dönüştürücü invertör olarak çalışmaktadır ve 520 V DC gerilimi 220 V AC gerilime dönüştürmektedir. Kullanılan dönüştürücünün toplam darbe doluluk oranına bağlı ve genel olarak, faz ve gerilimlerin efektif değeri denklem (4)'te verilmiştir. Buradaki m_a doluluk oranını göstermektedir.

$$V_{DC} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot m_a \cdot \sqrt{3} V_{AC} \quad (4)$$

2.3. DC Bara Kapasitörü ve Filtre Bobininin Belirlenmesi

Yapılan çalışmalara bakıldığında güç transferinin gerçekleşebilmesi için DC bara geriliminin AC bara geriliminden en az 1.1 kat daha büyük seçilmesi gerektiği belirlenmiştir (Sharma et al., 2018). Bir önceki başlıkta belirtildiği gibi bu çalışmada bara gerilimi 520 V olarak seçilmiştir ve bu kriteri sağlamaktadır. DC baraya bağlanan kapasitör değeri 520 V DC bara gerilimi dikkate alındığında;

$$C_{DC} = \frac{P_{DC} / V_{DC}}{2 \times \omega \times \Delta V_{DC}} = \frac{5000 / 520}{2 \times 314 \times 0.01 \times 520} = 2.95 \text{ mF} \cong 3 \text{ mF} \quad (5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. SEIG ve PV'den DC baraya aktarılacak güç değeri yaklaşık olarak 5 kW olarak hesaplanmaktadır. Baradaki gerilim dalgalanmaları (ΔV_{DC}) ise %1 olarak hedeflenmiştir. Belirlenen kriterlere göre DC baraya bağlanması gereken kondansatör değeri yaklaşık olarak 3 mF olarak belirlenmiştir.

Rüzgar türbini devrede değilken DC baradan AC baraya güç akışı olmaktadır. Bu noktada DC/AC invertör çalıştırılacak ve bu birimde yüksek frekansta anahtarlama harmoniklerine sebep olacaktır. Bu yüzden invertör ile AC bara arasına bağlanacak bir filtre bobini tasarlanmıştır. Bu bobin değerinin belirlenmesi için denklem (6) kullanılmıştır (Chilipi et al., 2014).

$$L_f = \frac{m \times V_{DC}}{6 \times f_s \times h \times \Delta i_c} = \frac{520}{6 \times 10 \times 10^3 \times 1.2 \times 2 \times 0.05} = 72 \text{ mH} \quad (6)$$

Bu denklemdeki anahtarlama frekansı (f_s) 10 kHz, akım dalgalanmaları Δi_c %5 olarak seçilmiştir. m ve h değerleri sırasıyla 1 ve 1.2 olmak üzere sabit değerlerdir (Chilipi et al., 2014).

2.4. DC Bara için Çift Yönlü DC/DC Konvertör Tasarımı

Çift yönlü DC/DC konvertör bataryayı DC baraya bir bobin üzerinden bağlayan birimdir. Batarya şarj olurken düşürücü (buck) modunda çalışırken, deşarj olurken yükseltici modunda çalışmaktadır. Bu yüzden BDDC bobininin doğru şekilde seçilmesi gerekmektedir. Düşürücü modunda çalışan konvertörün PWM doluluk oranı $D=V_B/V_{DC}=240/520=0.46$ olarak belirlenmiştir. Buradaki V_B , batarya nominal gerilimini ifade etmektedir. Dolayısıyla BDDC'nin bobini olan L_{DC} denklem (7)'deki gibi hesaplanır.

$$L_{DC} = \frac{D \times (V_{DC} - V_B)}{f_s \times \Delta I_B} = \frac{0.46 \times (520 - 240)}{10 \times 10^3 \times 5 \times 0.05} \cong 52 \text{ mH} \quad (7)$$

Denklemdeki anahtarlama frekansı (f_s) 10 kHz olarak ve batarya akımındaki dalgalanma oranı da (ΔI_B)%5 olarak seçilmiştir. V_B batarya gerilimini göstermektedir ve bu çalışmada nominal değeri 240 V olan batarya grubu kullanılmıştır. Yükseltici dönüştürücü modunda da çalışacak olan BDDC'nin PWM doluluk oranı da yine $D=(V_{DC}-V_B)/V_B=(520-240)/520=0.54$ olarak hesaplanmaktadır. Buradan yine BDDC bobini denklem (8)'deki gibi hesaplanabilir.

$$L_{DC} = \frac{V_B \times D}{f_s \times \Delta I_B} = \frac{240 \times 0.54}{10 \times 10^3 \times 5 \times 0.05} \cong 52 \text{ mH} \quad (8)$$

Yükseltici modu için de aynı anahtarlama frekansı ve akım dalgalanma oranı seçilmiştir. Sonuç olarak, önerilen sistemde BDDC'nin bobini olarak 52 mH kullanılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta seçilen V_{DC} ve V_B değerlerinin sabit olması durumunda sabit doluluk oranına sahip anahtarlama yapılması gerekmektedir. Ancak batarya geriliminin şarj miktarı ile değişebilecek bir yapıya sahip olması durumunda BDDC'nin bir kontrol yapısına ihtiyaç duyacağı görülmektedir.

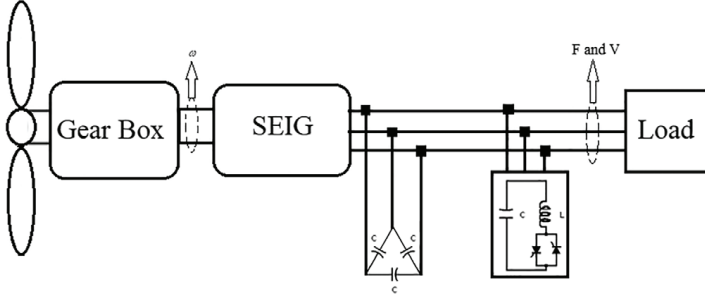
2.5. Batarya Grubunun Seçimi

PV panelin ve rüzgar türbin sisteminin toplam kapasitesine göre enerji depolama birimi kapasitesinin seçilmesi gerekmektedir. Sistemde herhangi bir yük olmaması durumunda batarya üretilen bütün gücü çekmelidir. Ayrıca, hem PV panel hem de rüzgar türbini devrede olmadığı en kötü senaryoda batarya grubu hem AC baraya hem de DC baraya bağlanan

yüklerin ihtiyaç duyduğu gücü karşılayabilmelidir. Bu kısıtlar göz önüne alınarak enerji depolama birimi olan batarya 240 V, 14 Ah olarak seçilmiştir.

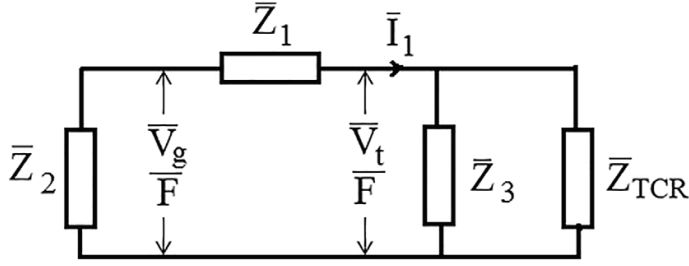
2.6. TCLC içeren SEIG Sisteminin Tasarımı

Önerilen sistem şebekeden bağımsız bir rüzgar türbini içermektedir ve bu rüzgar türbini AC bara kısmına doğrudan bağlanmaktadır. SEIG içeren bu rüzgar türbini devredeyken aynı anda hem AC yükleri beslenirken hem de DC bara tarafına güç aktarılması hedeflenmektedir. Çift yönlü DC/AC konvertörün yapısı sayesinde AC bara gerilimi istenen 220 V seviyesinde tutulabilirse ekstra bir dönüştürücü kullanılmasına gerek kalmayacaktır. Ancak SEIG'in çıkış geriliminin birçok etkene bağlı olarak sürekli değişken olması bu sistemin bir adet gerilim ve bir adet frekans kontrol döngüsüne sahip olması zorunluluğunu doğurmaktadır.



Şekil 2: TCLC tarafından kontrol edilen SEIG sisteminin genel yapısı

Kullanılan SEIG sisteminin genel yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Simülasyon çalışmalarında birincil hareket sağlayıcı olarak rüzgar türbini yerine üç fazlı asenkron motor kullanılmıştır. Sistem şebekeden bağımsız olarak çalışmakta ve AC baraya bağlanacak yükleri beslemektedir. Ancak SEIG'in gerilim indükleyebilmesi için sabit kapasitör grubuna ihtiyaç duyduğu bilenen bir gerçektir (Calgan et al., 2020). Bu yüzden AC baraya üçgen bir şekilde bağlanan kapasitör grubu sayesinde SEIG'in ihtiyaç duyduğu mıknatıslanma akımı sağlanmış olacaktır. Diğer taraftan çıkış geriliminin istenen seviyede tutulması için statik VAR kompanzator çeşitlerinden biri olan TCLC yapısı kullanılmıştır. AC baraya bağlanan TCLC'nin uygun bir şekilde tetiklenmesiyle SEIG sistemine değişken bir reaktif yük bağlanmış olacak ve böylelikle SEIG'in çıkış gerilim yani AC bara gerilimi kontrol edilmiş olacaktır. SEIG'in generatör hızının kontrol edilmesiyle de frekans kontrolü gerçekleştirilebilecektir. Şekil 3'de SEIG'in basitleştirilmiş eşdeğer devresi görülebilir (Çalgan et al., 2020).



Şekil 3: SEIG'in basitleştirilmiş eşdeğer devresi

Buradaki \bar{Z}_1 , \bar{Z}_2 ve \bar{Z}_3 eşdeğer devredeki kol empedanslarını vermektedir. Z_{TCR} TCR yapısının değişken empedansını göstermektedir. \bar{Z}_t ise paralel bağlanan \bar{Z}_3 ve Z_{TCR} 'nin eşdeğer empedansına denk gelmektedir. Bu empedansların değerleri denklem (9)'daki gibi hesaplanabilir (Çalgan et al., 2020). Ayrıca denklemdeki F ve ω sırasıyla birim frekans ve açısal hız değerlerini göstermektedir.

$$\bar{Z}_1 = (R_1 / F + jX_1),$$

$$\bar{Z}_2 = \left(\frac{1}{R_c / F} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{R_2 / (F - \omega) + jX_2} \right)^{-1},$$

$$\bar{Z}_3 = \left(\frac{1}{-jX_c / F^2} + \frac{1}{R_L / F} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$\bar{Z}_t = \left(\frac{1}{-jX_c / F^2} + \frac{1}{R_L / F} + \frac{1}{X_{TCR}} \right)^{-1}$$

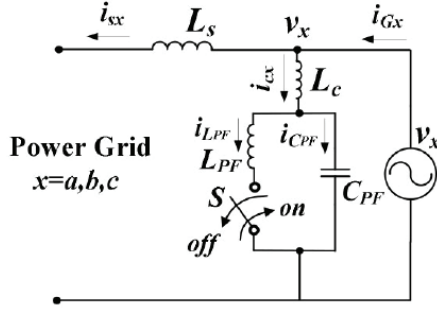
Denklemdeki R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , R_c , X_c , SEIG'in stator ve rotor eşdeğer devre parametrelerini, R_L de yük direncini göstermektedir. Şekil 3'te gösterilen devreye bağlanan TCR'nin üzerinden geçen anlık akım değeri denklem (10)'da verilmiştir (Caliskan, 2005).

$$i = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sqrt{2}V_t}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega_t t), \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0, \alpha + \sigma < \omega_t t < \alpha + \pi \end{array} \right\} \quad (10)$$

Buradaki ω_t , X_L ($2\pi fL$), α ve σ sırasıyla çıkış geriliminin açısal frekansını, TCR'nin reaktansı, tetikleme açısını ve iletim açısını göstermektedir. TCR üzerinden akan akımın Fourier analizine göre ana bileşeni denklem (11)'deki gibi hesaplanmaktadır (Chermiti & Khedher, 2014).

$$I_{TCR} = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} V_t \quad (11)$$

Şekil 3'e ve denklem (11)'e bakıldığında, TCLC yapısının tetikleme açısının ayarlanmasıyla çıkış geriliminin kontrol edilebileceği ön görülmektedir. Literatürde SEIG için FC-TCR yapısı kullanılmıştır (Calgan et al., 2018; Çalgan et al., 2020; Calgan & Demirtas, 2021; Demirtas et al., 2021). Bu çalışmada FC-TCR yapısı yerine 2016 yılında Wang ve ark. tarafından patenti alınan TCLC yapısı kullanılmıştır. Şekil 4'te tek faz eşdeğer modeli verilen bu yapının harmonik açısından FC-TCR'den daha iyi olduğu belirtilmiştir (L. Wang et al., 2016).

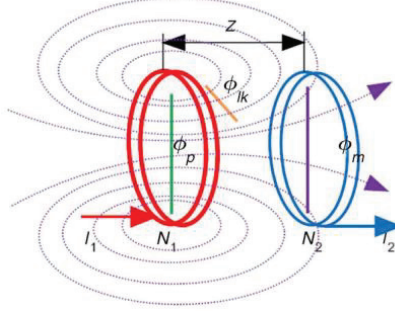


Şekil 4: TCLC'nin tek faz eşdeğer modeli

2.7. Kablosuz Şarj Ünitesinin Tasarımı

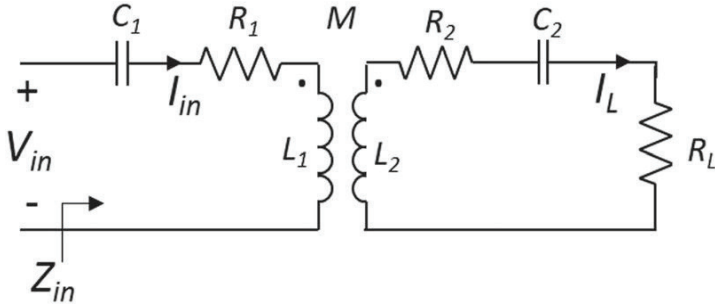
Bu çalışmada kullanılan WPT sisteminde Şekil 5'te verilen kuplajlı rezonans indüktör yapısı kullanılmıştır. Manyetik alan çizgilerine bakıldığında indüktörlerin ortak bir manyetik eksenini paylaştığı ancak büyük bir manyetik boşluğa sahip oldukları görülmektedir. Bu şekil, WPT sisteminin çalışması, performansı ve verimliliği hakkında birkaç önemli noktayı göz önüne çıkarmaktadır. İlk olarak bu sistemde bir çift bobin bulunmaktadır. Bu bobinlerden ilki verici ikincisi ise alıcı görevi görmektedir. Bobinlerin sarımları uygun genişliğe ve sarım sayısına sahip Litz kablolarından oluşmaktadır. Aralarında boşluk olmasına rağmen her iki bobin manyetik olarak kuplajlıdır. Bobinler, geniş bir yüzey alanına sahip olan, büyük çemberler olarak tasvir edilen tek katmanlı bir yapının çok turlu, düzlemsel spiralleridir. Bobinler dairesel, karesel veya dikdörtgen şeklinde olabilir. Her iki bobin aynı boyutta olduğunda arada daha iyi bir bağlantı olacağı dolayısıyla daha yüksek güçte ve daha iyi bir performansta güç aktarılacağı bilinmektedir (Miller & Daga, 2015). Üçüncü olarak uyartım kaynağı yüksek frekansta AC akımı birinci bobine gönderir ve manyetik dipol momenti oluşumunu sağlar. Bu moment

sayesinde birinci sargıdan çıkan manyetik akının (ϕ_p) bir kısmı, ϕ_{lk} kadar kayıptan sonra ikincil bobine ulaşır. Buraya ulaşan toplam manyetik akı ϕ_m seviyesine ulaşır. Bu akı sayesinde ikinci bobinde oluşan akım yüke aktarılır. İki bobin arasındaki etkileşimin artırılması ve kayıpların azaltılması için pratikte bobinlerin taban kısımlarına nüve konulabilmektedir.



Şekil 5: WPT sisteminin yapısı ve manyetik alan çizgileri

Manyetik olarak kuplajlı bu sistem basit devre elemanlarıyla modellenenir. Bu model kullanılarak sistemin verimliliği ve performansı değerlendirilebilir. Bu çalışmada kullanılan WPT sisteminin yapısı Şekil 6'da verilmiştir (Sis et al., 2019). Bu yapıda seri-seri kompanzasyonu mevcuttur. Verici ve alıcı bobinleri $L_1=L_2=L$, M , kompanzasyon kapasitörleri $C_1=C_2=C$ ve yük rezistansı R_L olarak gösterilmiştir.



Şekil 6: Manyetik olarak kuplajlı rezonans indüktör eşdeğer devresi

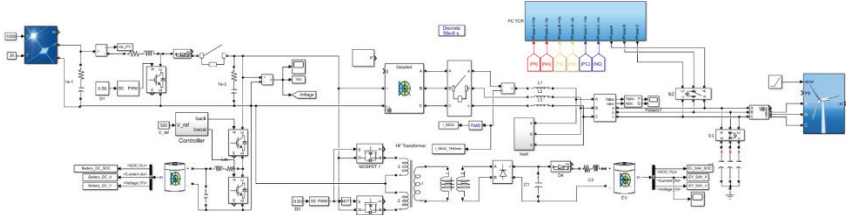
WPT sistemlerde verimlilik, kaynaktan mevcut yüke (P_L) aktarılan güç miktarına göre verilen güç olarak tanımlanır ve RF güç kaynağının empedansı verimlilik ifadesinin bir parçasıdır. Diğer taraftan, 100 kHz'lik kaynak frekansına sahip WPT sistemleri köprü tipi gerilim ara devreli invertörler ile sürülmektedir. WPT sisteminin verimliliği denklem (12)'deki gibi hesaplanır (Sis et al., 2019).

$$\eta = \frac{|I_L|^2 R_L}{|I_{in}|^2 Z_{in}} \quad (12)$$

Şekil 1’de genel yapısı verilen sistemde WPT birimi DC baradan beslenmektedir. Dolayısıyla kaynak geriliminin AC gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu sistemde 10 kHz ve %50 doluluk ile tetiklenen iki adet IGBT, yüksek frekansta çalışan ortak uçlu bir trafo sayesinde 520 V DC bara gerilimini, 45 V AC kare dalgaya dönüştürmektedir. Böylelikle kuplajlı indüktör primer tarafı 10 kHz ve 45 V AC gerilim ile beslenmektedir. Önerilen sistemde primer ve sekonder tarafında L_1 ve L_2 değerleri $1.1e^{-03}$ mH, R_1 ve R_2 değerleri de 1.1Ω olarak seçilmiştir. Sekonder tarafa kablosuz şekilde aktarılan gerilim köprü doğrultucu vasıtasıyla 12 V DC gerilime dönüştürülmekte ve 12 V ile araç bataryasını şarj etmektedir.

3. Önerilen Sistemin Kontrolü

Bu bölümde DC bara gerilimi, AC bara geriliminin regülasyonu ve kablosuz enerji transferi için detaylı kontrol algoritmaları verilmiştir. MPPT algoritmasıyla PV panelinden maksimum güç alınması, bataryanın BDDC ile kontrolü, SEIG’in TCLC yapısı ile kontrolünden bahsedilmiştir. Önerilen sistemin Matlab/Simulink modeli Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7: Önerilen sistemin Matlab/Simulink blok diyagramı

3. 1. MPPT Algoritması

MPPT algoritması yükseltici konvertörün doluluk oranını ayarlayarak DC baraya maksimum gücün aktarımını sağlamaktadır. PV panelden üretilecek maksimum güç değeri denklem (13)’te verilmiştir.

$$P_{mpp} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (13)$$

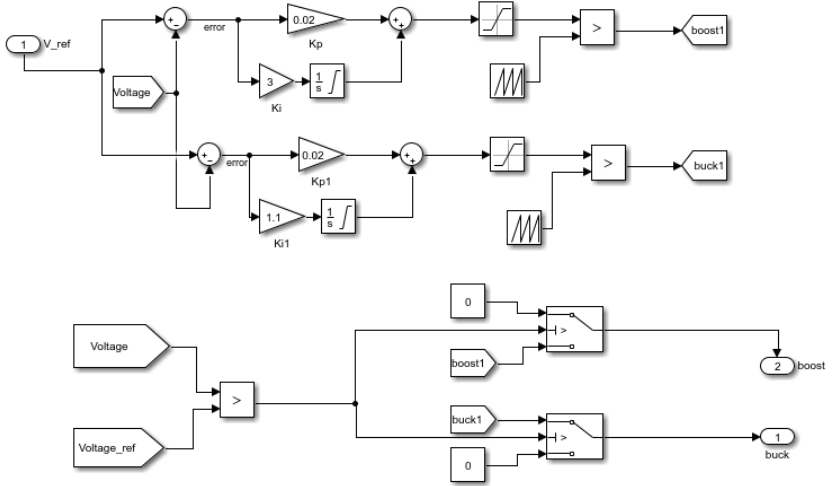
PV panelin ürettiği gücün panel gerilimine göre türevinin sıfır olduğu nokta maksimum gücün olduğu noktayı vermektedir. Dolayısıyla önerilen sistemde yükseltici konvertörün kontrolünde denklem (14)’deki gibi bir algoritma kullanılacaktır.

$$\begin{aligned}
 \text{Eğer } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, w(m) &= w(m-1) + \Delta w, \\
 \text{Eğer } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, w(m) &= w(m-1), \\
 \text{Eğer } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, w(m) &= w(m-1) + \Delta w.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Denklemdaki I_{pv} ve V_{pv} değerleri PV panelin akım ve gerilim anlık değerlerini, $w(m)$, $w(m-1)$ ve Δw hesaplanan doluluk oranını, bir önceki oranı ve doluluk oranındaki değişimi göstermektedir.

3. 2. BDDC'nin Kontrolü

DC baraya çift yönlü DC-DC dönüştürücü birimi vasıtasıyla bağlanan bataryanın şarj/deşarj akımı bu dönüştürücü birimin kontrolüyle ayarlanmaktadır. BDDC dönüştürücünün kontrolü Şekil 8'de verilmiştir. BDDC bir yandan yükseltici veya düşürücü modunda çalışırken aynı zamanda DC bara gerilimini de ayarlamaktadır ve sisteme bağlanan yük durumuna göre PV ve generatörün talep edilen gücü karşılayamaması durumunda DC bara güç aktararak yüklerin beslenmesini sağlamaktadır.



Şekil 8: BDDC'nin kontrol yapısı

Şekil 8'de verilen kontrol algoritmasında iki ayrı PI yapısı kullanılmaktadır. Bara gerilimi referansı ile anlık bara gerilimi karşılaştırılarak hata sinyali oluşturulur. PI kontrolör çıkışta bir testere

sinyaliyle karşılaştırılarak PWM sinyalleri elde edilir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta, bara geriliminin değerine göre BDDC'nin modunun değişmesi gerektiğidir. Dolayısıyla bir karşılaştırma operatörüyle düşürücü veya yükseltici modunun hangisinin çalışacağı seçilir. Kullanılacak PI kontrolörün formülasyonu denklem (15)'te verilmiştir.

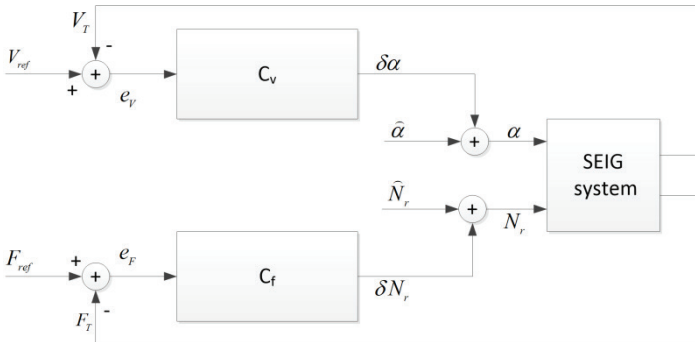
$$e = V_{DC_ref} - V_{DC},$$

$$u = K_p \times e + K_i \int e \cdot dt. \quad (15)$$

Denklem (15)'te verilen DC yükseltici ve düşürücü konvertörlerin PWM doluluk oranlarını üretmektedir. PI kontrolör katsayıları bu çalışmada deneme yanılma yöntemiyle seçilmiştir. Detaylı optimizasyon çalışmalarıyla BDDC'nin verimi arttırılabilir.

3. 3. SEIG'in Kontrolü

Önerilen sistemin yapısı gereği AC bara tarafında tek bir güç kaynağı bulunmaktadır. SEIG içeren bu rüzgar türbin sisteminde kullanılan çift yönlü DC/AC dönüştürücünün ve bağlanan AC yükün nominal çalışma gerilim değerleri sebebiyle istenen seviyede tutulması gerekmektedir. Ancak SEIG yapısı sebebiyle hem gerilim hem de frekansın aynı anda ayrı ayrı kontrol edilmesi gerekmektedir. Frekans kontrolünün temel amacı AC tarafa bağlı sensör, yük ve diğer komponentlerin çalışma frekansının 50 Hz olmasıdır. Hatta sistemdeki reaktansların frekansı 50 Hz de tutularak birçok kararsızlığın önüne geçilmiş olacaktır (Demirtas et al., 2021). Dolayısıyla bu sistemde Şekil 9'da yapısı verilen çok çevrimli bir kontrolör kullanılması gerekmektedir.



Şekil 9: SEIG için önerilen çok çevrimli kontrolör yapısı

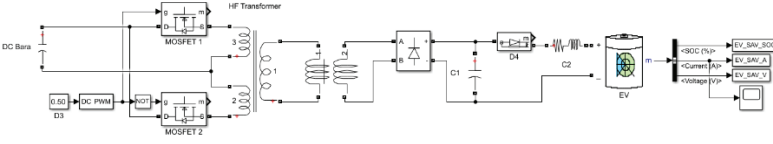
Şekil 9'da verilen bu yapıda C_v ve C_f sırasıyla gerilim ve frekans kontrolörlerini göstermektedir. α ile ifade edilen birim TCR yapısının

tetikleme açısını, N_r ise generatör hızını temsil etmektedir. Tetikleme açısıyla çıkış gerilimi, generatör hızıyla da frekans kontrolü yapılacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta frekans kontrol döngüsünün gerilim kontrol döngüsünden daha hızlı olması gerektiğidir. Böylelikle sistemdeki reaktansların kararsızlıkları ortadan kalkacak ve sabit yük gibi davranışları olacaktır. Şekildeki α ve N_r değerleri, başlangıç tetikleme ve hız değerlerini göstermektedir. SEIG gerilim indükleme aşamasını geçtikten sonra kontrolör devreye alınmakta ve başlangıç değerlerinin üzerine eklenmektedir.

Yapılan çalışmalara bakıldığında FC-TCR içeren SEIG sistemlerinde yüksek seviyelerde harmoniklerin olduğu görülmektedir (Çalgan et al., 2020). Bu da sistemdeki birimlerin fazladan güç harcamalarına ve ısınmalarına sebep olmaktadır. Kullanılacak bir aktif veya pasif filtre yapısı da kondansatör grubu içereceğinden dolayı çıkış geriliminde yükselmelere sebebiyet verecektir. TCLC yapısının FC-TCR'nin yerini almasıyla gerilim kontrol yönteminde kararsızlığa yer vermeden harmonikler giderilebilecektir. TCLC yapısı yeni bir yapı olduğundan dolayı SEIG sistemlerinde daha önce kullanılmamıştır. Dolayısıyla SEIG ile beraber kullanılacak bu yapı için gürbüz kontrolör tasarımlarının yapılabilmesi elzemdir.

3. 4. WPT'nin Tasarımı ve Kontrolü

Önerilen WPT sisteminin Matlab/Simulink ortamında kurulan modeli Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu sistemde DC bara geriliminin 2 adet MOSFET ve 1 adet yüksek frekanslı transformatör vasıtasıyla kuplajlı indüktörlerin primer sargılarına 45 V genliğine sahip AC bir kare dalga uygulaması amaçlanmıştır. Dolayısıyla ortak uçlu yüksek frekanslı transformatörün şekilde görülen 2 ve 3. sargıları ile 1. sargıları arasında 230/230/45 V'luk bir dönüşüm oranı olması gerekmektedir. MOSFET'lerin ise %50 doluluk oranlarına sahip bir PWM sinyaliyle anahtarlanması gerekmektedir. 1/1 dönüştürme oranına sahip kuplajlı indüktörler sayesinde sekonder kısma 45 V'luk AC bir kare dalga uygulanmış olacaktır. Kullanılan doğrultucu vasıtasıyla bu kısma bağlanan batarya grubu kablosuz bir şekilde şarj edilebilecektir. Burada kullanılacak elektrikli araç bataryasının değeri 12 V, 30 Ah seçilmiştir.



Şekil 10: WPT'nin blok diyagramı

Kullanılan bu yapıda elektrikli araç bataryasının doğru ve güvenli bir şekilde şarj edilebilmesi için öncelikle bara geriliminin istenen seviyede tutulması, ikinci olarak ise MOSFET'lerin doğru bir şekilde anahtarlanması gerekmektedir. Ayrıca araç şarjında yüksek akımları ve dalgalanmaları engellemek için bataryanın çıkışın önüne 0.05Ω ve 1 mH 'lik bir R-L devresi konulmuştur. Şekil 6'de de belirtildiği gibi bu sistemde seri-seri kompanzasyonu yapısı kullanılacağından dolayı kuplajlı indüktörün başında ve sonunda kullanılacak seri R-C değerlerine göre anahtarlama frekansı seçilerek maksimum güç transferi sağlanmış olacaktır. Simülasyon çalışmalarında 10 kHz anahtarlama frekansı seçilmiş ve seri R-C'ler ihmal edilmiştir.

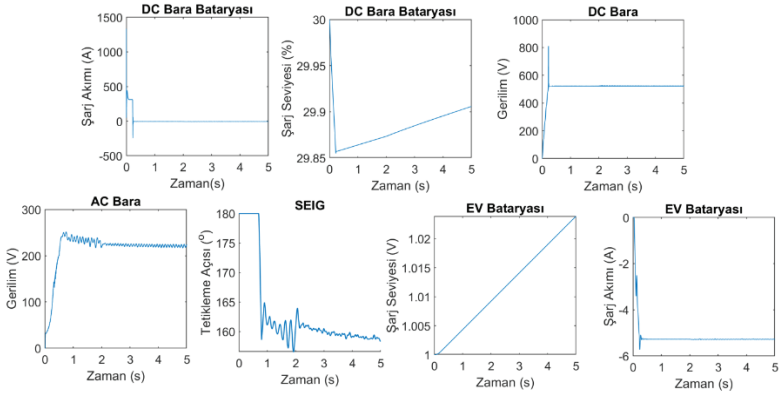
3.5. Sistemin Matlab/Simulink Ortamında Çalıştırılması

Bu çalışmada önerilen mikro şebeke, rüzgar türbini ve PV panelinden oluşmaktadır. Elde edilen fazla enerji ise DC baraya bağlı olan batarya grubunda depolanmaktadır. Sistemdeki tüketiciler AC baraya bağlanan yükler ve WPT ile gerçekleştirilecek araç şarj sistemidir. Şebekeden bağımsız olarak çalışacak bu sistemde, aydınlatma sistemi, ısıtma, sensörlerin ihtiyacı olan güçleri vb. diğer ekipmanlar AC yükleri oluşturmaktadır. WPT kısmına bağlanan herhangi bir araç olmadığı durumda ise üretilen güç DC bara üzerinden batarya grubuna aktarılacaktır. Dolayısıyla sistemin çalıştırılması durumunda birkaç senaryo ortaya çıkmaktadır. Simulasyon çalışmalarında bu senaryolar tek tek incelenmiş ve önerilen sistemin her koşulda gürbüz bir şekilde çalışabilmesi için çözümler üretilmiştir.

3.5.1. Senaryo 1: PV ve WT'nin Devrede Olması Durumu

Bu senaryo özellikle güneş ışıklarının dik açılarda geldiği öğle vakti dönemine denk gelmektedir. Aynı anda hem PV panel hem de rüzgar türbini devrededir ve kurulu sistem rüzgarın olması durumunda maksimum güçte çalışmaktadır. Bu senaryoda PV paneli kontrolsüz bir şekilde çalıştırılmış ve yükseltici konvertör sabit doluluk oranıyla anahtarlanmaktadır. BDDC basit bir PI yapısıyla anahtarlanmakta ve bara gerilimi istenen 520 V seviyesinde tutulmaktadır. DC baraya BDDC

vasıtasıyla bağlanan 14 AH'lik bir kapasiteye sahip bataryanın şarj edilmeye başladığı andaki durumu %30 olarak seçilmiştir. WPT bölümüne, şarj durumu %1 olan ve 30 Ah'lik kapasiteye sahip bir araç bağlanmıştır. AC baraya faz başına 206 Ω olan ve nominal gerilimde 235 W çekecek omik yükler bağlanmıştır. Simülasyon çalışmalarında 4 kW değerinde SEIG seçilmiş ve gerilim üretebilmesi için başlangıç akımları girilmiştir. Kullanılan uyarım kapasitör değeri faz başına 0.13 mF'tır. TCR'ler ise 150 mH değere sahip olup, nominal gerilimde faz başına maksimum 1 kVAR'lık reaktif güç tüketimine sebep olmaktadır. Böylelikle tetikleme açısına göre sistemdeki kapasitif akım etkisi azaltılarak AC bara gerilimi ayarlanabilmektedir. Yeterli miktarda rüzgar gücü mevcut olduğunda, çift yönlü DC/AC dönüştürücünün tetikleme kısmına sıfır değeri girilerek AC Bara'dan DC baraya güç akışı sağlanmaktadır. Böylelikle 220 V AC değer, üç fazlı kontrolsüz doğrultucu gibi çalışan bu sistemle, 520 V DC bara gerilimine dönüştürülmektedir. Bu koşullar altında Matlab/Simulink ortamında çalıştırılan sistemin çıkış grafikleri Şekil 11'de verilmiştir.

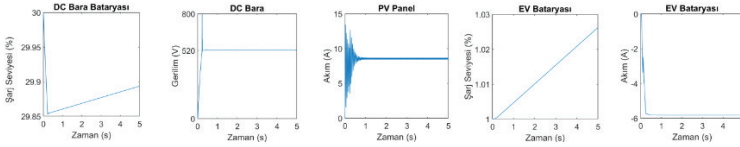


Şekil 11: Senaryo 1 durumunda simülasyon sonuçları

Matlab/Simulink ortamında yapılan çalışmada sadece PV panel ile başlatılan sisteme 2. saniyenin başında SEIG de bağlanmaktadır. Bu durumda DC Bara bataryasının şarj seviyesindeki eğim bu noktada artış göstermektedir. Aynı zamanda EV bataryası sabit bir şekilde şarj olmaya devam etmektedir. DC Bara gerilimi istenen 520 V seviyesinde tutulmaktadır. Bu çalışmada DC/DC konvertör basit bir PI yapısıyla çalıştırıldığı için izleme dinamikleri dikkate alınmamıştır. Şekil 11'de verilen AC bara gerilimi de SEIG tarafından ayarlanmaktadır. 2. saniyede yine basit bir PI kontrolör devreye girmekte tetikleme açılarını ayarlayarak AC bara gerilimini 220 V değerinde sabit tutmaktadır.

3.5.2. Senaryo 2: PV'nin Devrede, WT'nin Devre Dışı Olması Durumu

Senaryo 2'de rüzgar türbininin güç üretebilmesi için yeterli miktarda rüzgar enerjisinin olmadığı durum incelenmektedir. Genellikle gündüz vakitlerinde oluşabilecek bu süreçte rüzgar türbini devre dışı kalacaktır. Dolayısıyla rüzgar türbiniyle beraber FC-TCR (TCLC) yapısı ve uyarım kapasitörleri bir anahtar sayesinde devreden çıkarılmaktadır. Bu durumda AC baraya bağlı olan yüklerin ihtiyaç duyduğu enerji çift yönlü çalışan DC/AC dönüştürücü sayesinde DC baradan sağlanmaktadır. 520 V olan DC bara gerilimi denklem (4)'de verilen eşitlik ile üç fazlı gerilime evrilecek ve AC baradaki yükleri besleyebilecektir. Sistemdeki diğer yapılar Senaryo 1'de anlatıldığı şekilde çalışmalarına devam edecektir. Bu koşullar altında Matlab/Simulink ortamında çalıştırılan sistemin çıkış grafikleri Şekil 13'te verilmiştir.



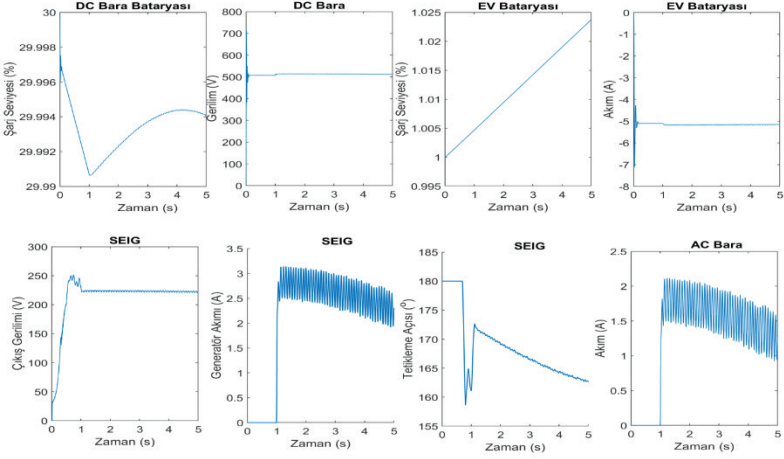
Şekil 12: Senaryo 2 durumunda simülasyon sonuçları

Senaryo 2 şartlarında sistem çalıştırıldığında PV panel tarafından sağlanan yaklaşık 9 A değerindeki akımın hem DC bara bataryasını beslediği hem de EV bataryasını beslediği Şekil 13'te görülmektedir. DC bara gerilimi kullanılan basit PI yapısı sayesinde 520 V seviyesinde tutulmaktadır. Bu çalıştırmada PV panel çıkışındaki yükseltici konvertörün kontrolü sabit tetikleme ile gerçekleştirilmiştir. WT devrede değilken PV panel ve DC bara bataryası sayesinde kablosuz enerjinin transferinin gerçekleştirildiği açıkça görülmektedir.

3.5.3 Senaryo 3: WT'nin Devrede, PV'nin Devre Dışı Olması Durumu

Bu senaryoda PV panelin devre dışı olduğu ancak rüzgar türbininin güç ürettiği durum incelenmiştir. Genellikle güneşin olmadığı gece saatlerinde bu durumlar oluşabilmektedir. Rüzgar türbininin gereksiz yere güç tüketimine sebep olmaması için bir diyot ile DC baraya bağlandığı önceki şekillerde verilmişti. Ancak yine de diyot üzerine düşen ters gerilimi engellemek amacıyla bu senaryoda PV paneli ve MPPT

algoritması devreden çıkarılmaktadır. Rüzgar türbininden elde edilen güç bir yandan AC yükleri beslerken, bir yandan da çift yönlü DC/AC dönüştürücü sayesinde WPT sistemini beslemektedir. Üretilen gücün tüketilen güçten az veya fazla olması durumunda DC baradaki batarya grubundan akım akışı sağlanmaktadır. Bu senaryo için 14 Ah'lik batarya grubunun şarj edilmeye başladığı andaki doluluk durumu %30 olarak seçilmiştir. Bu koşullar altında Matlab/Simulink ortamında çalıştırılan sistemin çıkış grafikleri Şekil 13'te verilmiştir.

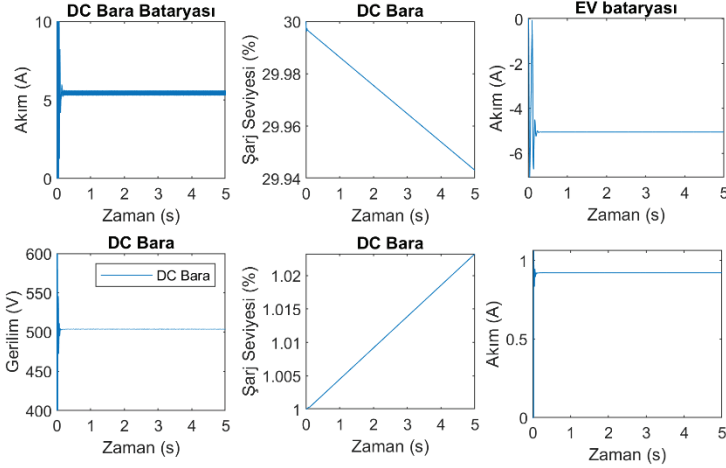


Şekil 13: Senaryo 3 durumunda simülasyon sonuçları

Bu çalıştırma koşulları bir önceki senaryodan biraz farklılık göstermektedir. PV panel devre dışı olması durumunda, ilk 1 saniye boyunca sistemdeki hem AC hem de DC yükler DC bara bataryasından beslenmektedir. Dolayısıyla ilk 1 s boyunca batarya şarj seviyesi düşmüştür. DC Bara gerilimi de basit bir PI kontrolör sayesinde sadece bataryanın kontrolüyle 520 V civarında tutulmaya çalışılmıştır. SEIG bu süreç boyunca sisteme bağlanmamıştır. Birinci saniyede sisteme bağlanan SEIG sisteme yaklaşık olarak 3 A'lik akım vermektedir. SEIG'e bağlı TCR yapısı bu süreçte basit bir PI kontrolör ile tetiklenerek AC bara gerilimi 220 V seviyesinde tutulmaya çalışılmıştır. Ancak Şekil 13'te görüleceği üzere SEIG'in ürettiği güç hem AC barayı hem de DC barayı beslediği için 4. saniyeden sonra üretilen güç yeterli olmayıp, tekrar bara bataryasından destek alınmıştır. Yine de her koşulda EV bataryası şarj olmaya devam etmiştir. Burada hem DC bara gerilimi için hem de SEIG gerilimi için tasarlanan kontrolör tasarımının önemli olduğu görülmektedir.

3.5.4 Senaryo 4: WT ve PV'nin Devre Dışı Olması Durumu

Bu senaryoda hem PV panellerin hem de rüzgar türbin sisteminin devrede olmadığı durum incelenmektedir. Genellikle güneşin olmadığı gece saatlerinde oluşabilecek bu sistemde hem AC yükler hem de WPT sistemi DC baraya bağlı olan batarya grubundan beslenmektedir. Bu senaryo için 14 Ah batarya grubunun şarj durumu %30 olarak seçilmiştir. Bu koşullar altında Matlab/Simulink ortamında çalıştırılan sistemin çıkış grafikleri Şekil 14’te verilmiştir.



Şekil 14: Senaryo 4 durumunda simülasyon sonuçları

Bu çalıştırılma koşullarında hem SEIG hem de PV panelin devrede olmadığı durum göz önüne alınmıştır. Dolayısıyla sistemdeki yükler DC baraya bağlı %30 şarj seviyesine sahip bataryadan beslenmektedir. DC bara gerilimi basit bir PI kontrolör tarafından 520 V seviyesinde tutulmaya çalışılmıştır. Her iki yenilenebilir enerji kaynağının devrede olmaması durumunda bile EV bataryası şarj olmaya devam etmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada şebekenin olmadığı ya da şebekeden bağımsız çalışan ve tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen kablosuz enerji transferine olanak sağlayan EVCS tasarlanmıştır. Sistemde bulunan PV, WT, akü grubu, WPT ve güç elektroniği birimleri ayrı ayrı belirlenerek MATLAB/Simulink ortamında simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Dört farklı senaryonun ele alındığı bu çalışmada, elde edilen sonuçlara göre kullanılan PI kontrolör yapılarıyla beraber, kablosuz enerji transferine olanak sağlayan ve şebekeden bağımsız çalışan mikro şebekenin başarılı bir şekilde tasarlandığı ve kontrol edildiği görülmektedir. Hem AC bara

hem de DC baraya bağlanan yüklere gerekli akımın sağlanabilmesi için DC bara geriliminin kontrolü için farklı kontrolör yapıları kullanılabilir. Bu çalışmada PI kontrolör kullanılarak DC bara gerilimi 520 V'ta, faz-nötr gerilimi ise 220 V'ta sabit tutulmuştur. Farklı kontrolör yapıları ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak sistem çıkışındaki gerilim dalgalanmaları ve aşımalar azaltılarak daha kararlı sistemler tasarlanabilir.

5. Referanslar

- Al Wahedi, A., & Bicer, Y. (2019). Assessment of a stand-alone hybrid solar and wind energy-based electric vehicle charging station with battery, hydrogen, and ammonia energy storages. *Energy Storage*, 1(5), e84.
- Alonso, M., Amaris, H., Germain, J. G., & Galan, J. M. (2014). Optimal charging scheduling of electric vehicles in smart grids by heuristic algorithms. *Energies*, 7(4), 2449–2475.
- Badawy, M. O., & Sozer, Y. (2015). Power flow management of a grid tied PV-battery powered fast electric vehicle charging station. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 4959–4966.
- Calgan, H., Andrade, J. M., & Demirtas, M. (2018). Optimization of Capacitance and Speed Values for Self-Excited Induction Generators using the Response Surface Method. *Int. Conf. on Applied Mathematics in Engineering*, 218.
- Calgan, H., Andrade, J. M., & Demirtas, M. (2020). RSM-Based Optimization of Excitation Capacitance and Speed for a Self-Excited Induction Generator. In *Mathematical Modelling and Optimization of Engineering Problems* (pp. 139–155). Springer.
- Calgan, H., & Demirtas, M. (2021). Design and implementation of fault tolerant fractional order controllers for the output power of self-excited induction generator. *Electrical Engineering*, 103(5), 2373–2389.
- Çalgan, H., Ilten, E., & Demirtas, M. (2020). Thyristor controlled reactor-based voltage and frequency regulation of a three-phase self-excited induction generator feeding unbalanced load. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, e12387.
- Caliskan, A. (2005). *Constant voltage, constant frequency operation of a self-excited induction Generator*. Master thesis, Middle East Technical University.
- Chermiti, D., & Khedher, A. (2014). Self excited induction generator using a thyristor controlled reactor: Frequency regulation and reactive power compensation. *Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2014 15th International Conference On*, 661–667.
- Chilipi, R. R., Singh, B., Murthy, S. S., Madishetti, S., & Bhuvaneswari, G. (2014). Design and implementation of dynamic electronic load controller for three-phase self-excited induction generator in remote small-hydro power generation. *IET Renewable Power Generation*, 8(3), 269–280.
- Demirtas, M., Calgan, H., Toufik, A., & Sedraoui, M. (2021). Small-signal modeling and robust multi-loop PID and H_∞ controllers synthesis for a self-

- excited induction generator. *ISA Transactions*.
- Ekren, O., Canbaz, C. H., & Güvel, Ç. B. (2021). Sizing of a solar-wind hybrid electric vehicle charging station by using HOMER software. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123615.
- Fathabadi, H. (2020). Novel stand-alone, completely autonomous and renewable energy based charging station for charging plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs). *Applied Energy*, 260, 114194.
- He, F., & Fathabadi, H. (2020). Novel standalone plug-in hybrid electric vehicle charging station fed by solar energy in presence of a fuel cell system used as supporting power source. *Renewable Energy*, 156, 964–974.
- Kim, S., Park, H.-H., Kim, J., Kim, J., & Ahn, S. (2014). Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 62(4), 1057–1066.
- Li, S., & Mi, C. C. (2014). Wireless power transfer for electric vehicle applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(1), 4–17.
- Lu, F., Zhang, H., & Mi, C. (2017). A two-plate capacitive wireless power transfer system for electric vehicle charging applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(2), 964–969.
- Miller, J. M., & Daga, A. (2015). Elements of wireless power transfer essential to high power charging of heavy duty vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(1), 26–39.
- Musavi, F., & Eberle, W. (2014). Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging. *IET Power Electronics*, 7(1), 60–66.
- Shaaban, M. F., Mohamed, S., Ismail, M., Qaraqe, K. A., & Serpedin, E. (2019). Joint planning of smart EV charging stations and DGs in eco-friendly remote hybrid microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(5), 5819–5830.
- Sharma, R., Kewat, S., & Singh, B. (2018). Robust 3IMPL control algorithm for power management of SyRG/PV/BES-based distributed islanded microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(10), 7765–7777.
- Singh, B., Verma, A., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2020). Implementation of solar PV-battery and diesel generator based electric vehicle charging station. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(4), 4007–4016.
- Sis, S. A., Kilic, F., & Sezen, S. (2019). Multi sub-coil flux pipe couplers and their use in a misalignment-adaptive wireless power transfer system. *Journal of*

Electromagnetic Waves and Applications, 33(14), 1890–1904.

- Spaur, C. W., Braitberg, M. F., Kennedy, P. J., & Hatcher, L. B. (1998). *Mobile portable wireless communication system*. Google Patents.
- Suh, I.-S., & Kim, J. (2013). Electric vehicle on-road dynamic charging system with wireless power transfer technology. *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, 234–240.
- Sun, B. (2021). A multi-objective optimization model for fast electric vehicle charging stations with wind, PV power and energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125564.
- Sun, L., Ma, D., & Tang, H. (2018). A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 490–503.
- Tao, J., Huang, D., Li, D., Yang, X., & Ling, C. (2018). Pricing strategy and charging management for PV-assisted electric vehicle charging station. *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 577–581.
- Verma, A., & Singh, B. (2018). A solar PV, BES, grid and DG set based hybrid charging station for uninterruptible charging at minimized charging cost. *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 1–8.
- Wang, L., Lam, C.-S., & Wong, M.-C. (2016). Design of a thyristor controlled LC compensator for dynamic reactive power compensation in smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1), 409–417.
- Wang, Y., Kazemi, M., Nojavan, S., & Jermisittiparsert, K. (2020). Robust design of off-grid solar-powered charging station for hydrogen and electric vehicles via robust optimization approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 18995–19006.
- Yapıcı, R., Güneş, D., & Yörükeren, N. (2016). Elektrikli Şarj İstasyonlarının Dağıtım Şebekesine Olası Etkileri. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO)*.
- Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2012). Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5673–5689.



BÖLÜM 15

YANGIN BİLGİ SİSTEMİ: KONYA İLİ

Hatice Canan GÜNGÖR¹

¹ Dr. Öğ.Üy. Necmettin Erbakan Üniversitesi Meram MYO Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, ORCID:0000-0002-5563-9552

GİRİŞ

Dünyada artan nüfusla birlikte, dünyanın çehresi ve gereksinimleri değişmiştir. Tıpkı dünyamız gibi, insanoğlunda da görülen bu değişikliklerin ve farklı gereksinimlerin sonucunda büyük bir bilgi yığını oluşmuştur. Gelişen teknolojilerin varlığı bilgiye olan gereksinimi bilgi kullanımını ve bilgi yönetimini ön plana çıkarmıştır. Dünyadaki bilgi toplumuna geçiş sürecinde her spesifik alanda yeni teknolojiler kullanılmaktadır. Bu teknolojilerden biri Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojileridir. CBS, veriyi mekanla ilişkilendirerek harita çıktılarıyla karar vericilere zamandan ve maliyetten kar sağlamaktadır. (Güngör ve Büker,2018)

1960'ların sonunda geliştirilen CBS, ilk günlerde donanımın fahiş maliyeti ve yazılımın sınırlı yetenekleri nedeniyle çok az sayıda planlama departmanı tarafından kuruldu. İlk yazılım sistemlerinin çoğu, birkaç analitik işlevle bilgisayar haritalamasına odaklandı. (Sinton ve Bednarz, 2007)

Planlamacılar için giderek daha erişilebilir hale gelen CBS hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde kentsel planlama için önemli bir araç olarak kabul edilmeye başlandı. Kentsel planlamada etkili karar vermek ve gerekli bilgileri sağlamak için çeşitli kaynaklardan gelen verileri entegre edebilen resmileştirilmiş bilgisayar tabanlı bilgi sistemi olarak Kent Bilgi Sistemi (KBS) kavramı ortaya çıkmaya başladı. (Han ve Kim 1989).

Yerel yönetimler açısından hizmetlere büyük katkı sağlayan güncel teknolojilerin başında gelen CBS, yerel yönetimlerde yapılan her türlü planlama ve mühendislik uygulamaları ve belediyeçilik hizmetlerinin gerçekleştirilmesinde güçlü bir yönetim aracı olarak karşımıza çıkmaktadır.(Ülkenli, 1997) CBS'nin kent bazlı uygulaması olarak KBS, her türlü hizmet alanında etkin sonuç kazandırmaktadır.. (Yomralıoğlu)

Çalışmaların hedefe ulaşmasını ve kısa zamanda doğru kararlar alınmasını sağlayan KBS harita çıktılarıyla kalkınma politikasında yerel yönetimlerin güçlü araçlarıdır. (Ergün S. G.,Saraç İ.).

CBS'nin şehir planlamasında kullanımındaki eğilimler CBS'nin veri tabanı yönetimi, haritalama ve mekansal analiz işlevleri şehir planlamasının birçok alanında çok faydalı olmuştur (French ve Wiggins 1990; Levine ve Landis 1989; Worrall ve Bond 1997). CBS'nin kentsel planlamadaki temel zayıflığı, kentsel planlama modelleriyle olan veri tabanı eksikliğidir. (Douven ve diğerleri 1993) Bu bağlamda, veri tabanı kayıtlarının oluşturulması her başarılı yönetimin gereksinimi olmuştur.

KONYA KENT BİLGİ SİSTEMİ

Konya ili ülkemizin en geniş yüzölçümüne sahip ilidir. (Tapur,2013) Genişliği dolayısıyla da sürekli göç alan Konya ili nüfusu her geçen yıl artmaktadır. (Koyuncu,2011) Artan nüfusa kaliteli hizmetin verilmesi, refah yaşam koşullarının sağlanması yerel yönetimlerde zaruridir.

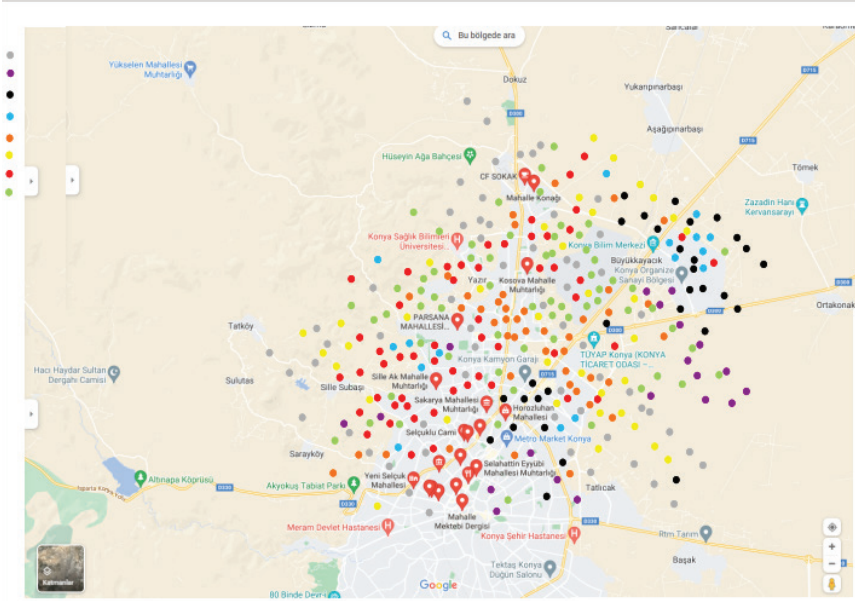
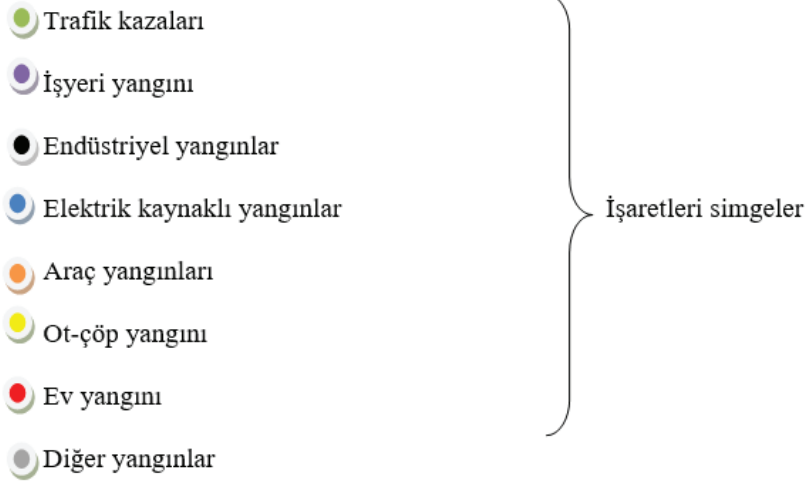
CBS teknolojisinden faydalanılarak, belediye çalışmalarında hizmet kalitesinin yükseltilmesi ve daha etkin kararlar verilmesini sağlamak üzere Konya'ya ait KBS kullanımını yerel yönetimlerce bilgi sistemlerinin oluşturulması ve halkın kullanımına ve erişimine sunulması 2004 yılından bu yana gelişerek devam etmektedir.(Ural) Konya KBS olarak, pek çok hizmet alanında yeni bilgi sistemleri temelleri atılmalıdır. Bu sistemlerden biri de Yangın Bilgi Sistemi olmalıdır. Ancak kayıtların doğru ve sıkı tutulmasıyla bu bilgi sistemi hayata geçirilebilir.

YANGIN BİLGİ SİSTEMİ

Bu çalışmada Konya ilinde 2017-2021 yılları arasında itfaiyenin müdahale ettiği olaylar ve olay yerleri incelenerek basit temel bir bilgi sistemi oluşturulmuştur. Bu bilgi sistemi Yangın Bilgi Sistemi (YBS) olarak adlandırılmıştır.

YBS kullanılarak daha etkin hizmet ve de itfai olayların azaltılması hedeflenmektedir. Bir itfai olayın zamansal değişimi izlenerek olayların sıklığı tespit edilebilir. Bunun sonucunda itfaiyenin müdahale stratejileri oluşturulabilir. Örneğin; nerelere hidrant ya da personel aktarılacağına karar verilebilir. Ya da olayların sık görüldüğü mahalle sakinlerine ayrıca eğitimler verilip, gönüllü itfaiyeciliğe özendirilebilir. Konya ili için oluşturulan YBS'nin daha da geliştirilmesi gereklidir. Bunun için ilk adım veri kaydının açık adresle tutulması ve itfai olayın net olarak ülke genelinde bir standartla kodlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada trafik kazaları, işyeri yangını, ev yangını, endüstriyel yangınlar, Elektrik kaynaklı yangınlar, Ot-çöp yangını, Araç yangınları ve Diğer yangınlar şeklinde sekiz başlıkta kategorize edilen itfai olaylar yıllara göre ve Meram, Karatay, Selçuklu ilçesindeki dağılımlarına göre incelenmiştir.



Şekil1. 2021 Yılına Ait Veriler

Şekil 1 incelendiğinde 2021 yılında tutulan kayıtlara göre itfaiyenin müdahale ettiği ev yangınları Meram ilçesi civarında daha sıklıkta. Bu durum Meram ilçesinde bina yapılarının müstakil-bahçeli ve sobalı yapılar şeklinde olması, yangın riskinin daha yüksek olduğunu kanıtlar niteliktedir.



Şekil2. 2020 Yılına Ait Veriler



Şekil3. 2019 Yılına Ait Veriler

Şekil 2 ve Şekil 3 görsellerinde 2020 ve 2019 yıllarında müdahale edilen ot-çöp yangınlarının Karatay ilçesinde sıklıkla olduğu görülmektedir. Bu durum Karatay ilçesinde tarla niteliğindeki arsaların anız gibi yangın riskinin varlığını göstermektedir.



Şekil4. 2018 Yılına Ait Veriler

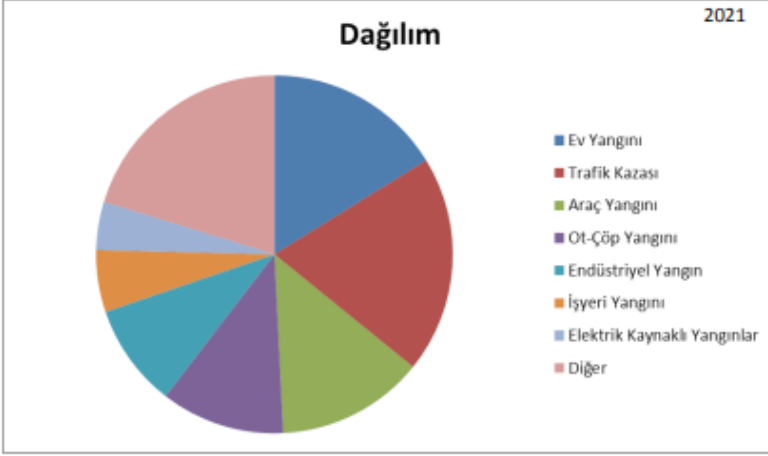


Şekil5. 2017 Yılına Ait Veriler

Şekil4 ve Şekil5 görselleri incelendiğinde, tam olarak itfai olayın sebebinin açıklanamadığı durumları niteleyen “Diğer” niteliği yoğunluk göstermiştir. Bu durum veri tabanı ve bilgi sistemi oluşturmanın önemini altını çizerek ilerleyen yıllar için daha açık ve ifade edilebilir nitelikteki nedenlerin araştırılması sağlanmıştır.

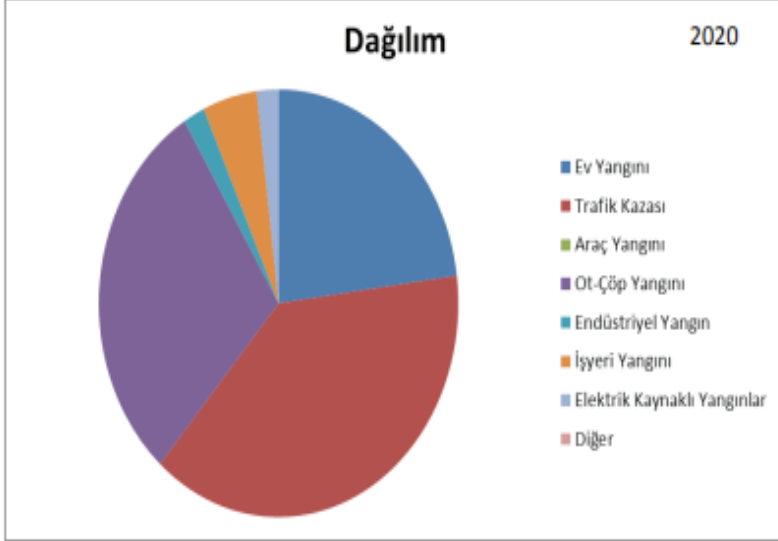
İstatistikleri Gösteren Tablolar

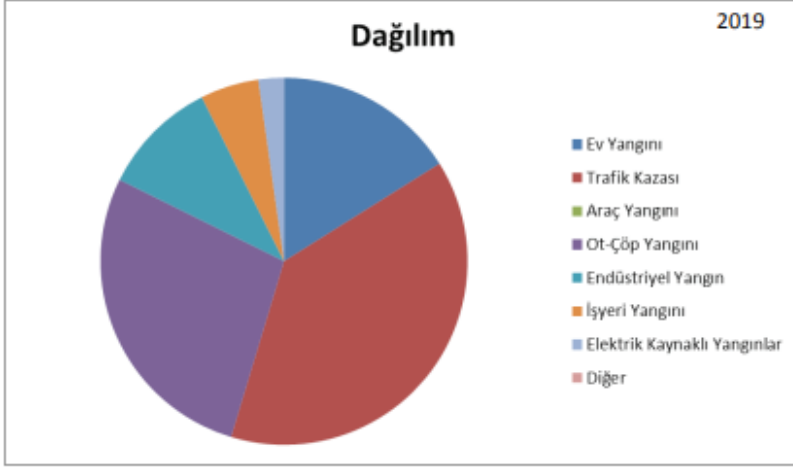
Tablo1: 2021 İtfaiye müdahale olay sıralaması



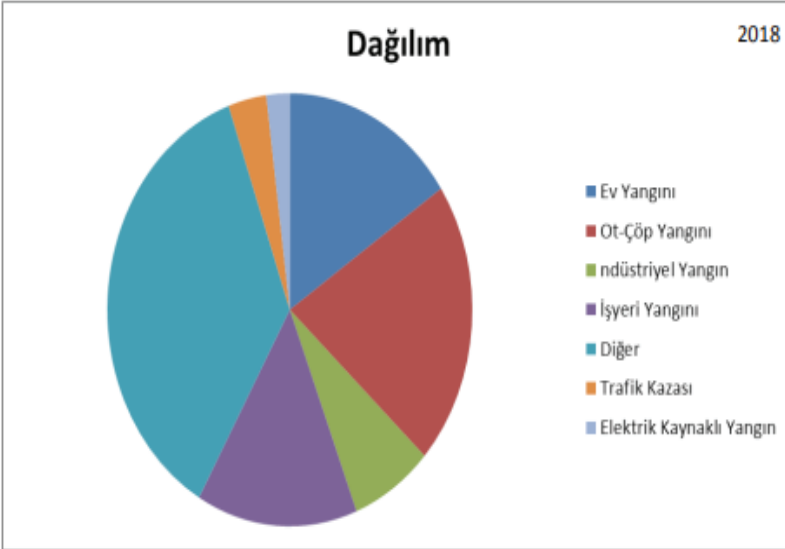
Tablo 1 de 2021 itfaiye müdahale olayları pasta grafik şeklinde verilmiştir. Kayıtlara göre trafik kazalarına müdahale ilk sırada yer alırken ev yangınları müdahalesi ikinci sırada yer almıştır.

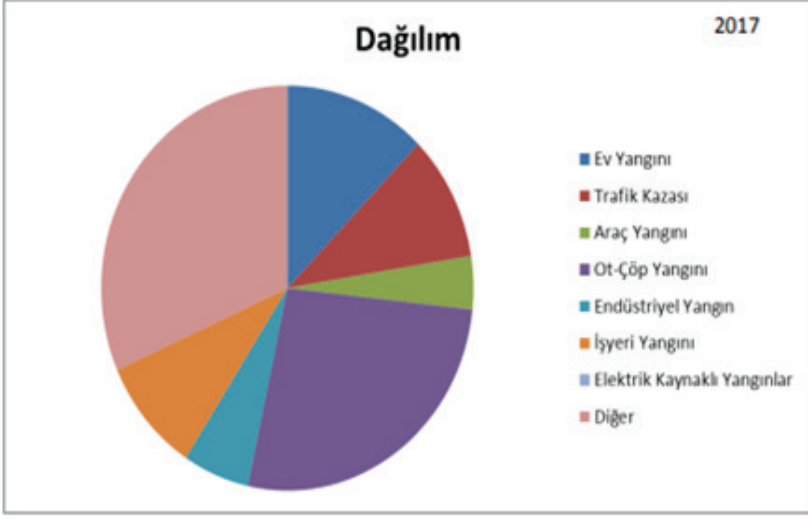
Tablo2: 2020 İtfaiye müdahale olay sıralaması



Tablo3: 2019 İtfaiye müdahale olay sıralaması

Tablo 2 ve Tablo 3 incelendiğinde 2020 ve 2019 yıllarında yine ilk sırada trafik kazaları ikinci sırada ot-çöp yangınları ve üçüncü sırada ev yangınları olaylarına müdahale edildiği görülmüştür.

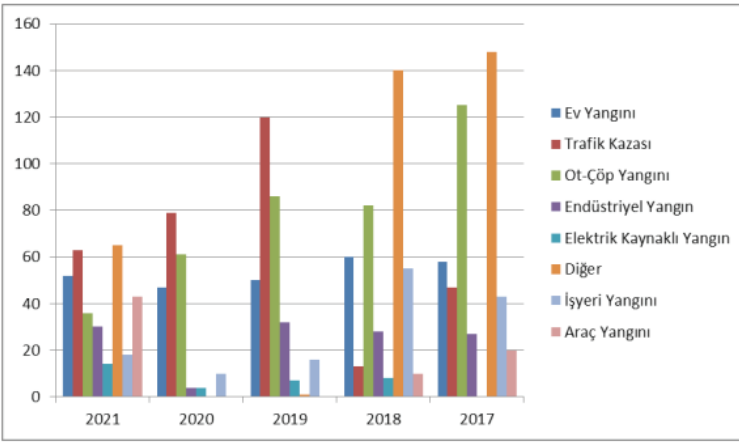
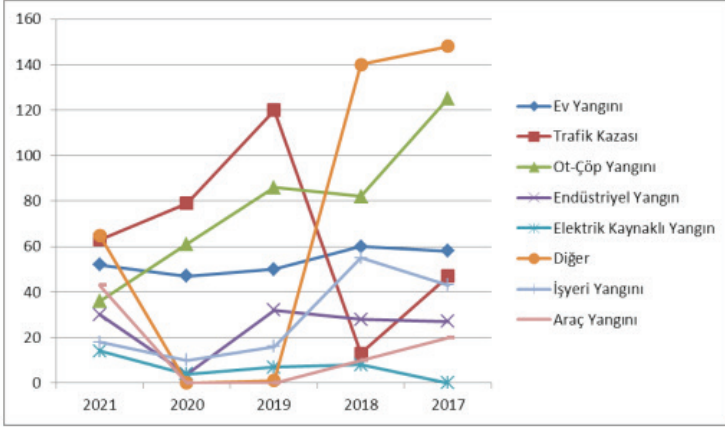
Tablo4: 2018 İtfaiye müdahale olay sıralaması

Tablo5: 2017 İtfaiye müdahale olay sıralaması

Tablo 4 ve Tablo 5 grafiklerine göre 2018 ve 2017 yıllarında Diğer olarak nitelendirilen kayıtlara müdahale oranı yüksek seyretmiştir.

Tablo6: Yıllara Göre Toplam Vaka

Tablo 6 incelendiğinde yıllar içinde itfaiyenin müdahale sıklığı 2017 yılında 450 vaka üzerindeyken bu sayı 2018 yılında 400 vakanın altına inmiştir. 2019 yılında yine 450 vaka üzerinde seyrederken 2020 ve 2021 yıllarında 350 vakanın altında kalmıştır.

Tablo7a-7b : Yıllara Göre İtfaiye Müdahale çeşitlilikleri Grafik gösterimleri

Tablo 7a ve 7b grafiklerinin gösterimi itfai olayların yıllara göre dağılımlarının toplu halidir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Konya ili büyükşehir belediyesi içinde bulunan Meram, Selçuklu ve Karatay ilçelerinin içerisinde gerçekleşen itfai olayların 2017-2021 yılları arasındaki kayıtları incelendiğinde yıllara göre vakaların azalmış olması halkımızın daha bilinçlenmiş olduğunun göstergesidir. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de oluşturulan “Gönüllü İtfaiyecilik” kavramı, ev yangınları gibi olayların önüne geçilmesinde farkındalık oluşturmuştur.

Veri tabanı sistemindeki eksikliklerin varlığı tespit edilerek her geçen gün bu alanda yetiştirilmiş personel ihtiyacının altını çizmekte fayda vardır. Bu alanda kayıtların doğru tutulması, istatistiğin oluşturulması

gelecek senaryoları daha gerçekçi kurgulamayı sağlayacaktır. Bilginin büyük bir güç olduğunu bildiğimiz bu çağda, bilgi teknolojilerinden bir olan CBS'yi etkin şekilde kullanmanın gerekliliği kaçınılmazdır.

Yangın Bilgi Sistemi (YBS) kullanılarak daha etkin hizmet ve de itfai olayların azaltılması hedeflemek, itfai olayın zamansal değişimi izlenerek olayların sıklığı tespit edildiğinde itfaiyenin müdahale stratejileri oluşturulmuş demektir. Örneğin; nerelere hidrant ya da personel aktarılacağına karar verilebilir. Konya ili için oluşturulan YBS'nin daha da geliştirilmesi gereklidir. Bunun için ilk adım veri kaydının açık adresle tutulması ve itfai olayın net olarak ülke genelinde bir standartla kodlanması gerekliliği unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

- Douven, W., Grothe, M. I. C. H. E. L., Nijkamp, P. E. T. E. R., & Scholten, H. E. N. K. (1993). Urban and regional planning models and GIS. *NATO ASI Series D Behavioural and Social Sciences*, 70, 317-317.
- ERGÜN S.G ve SARAC İ. , Sağlık Coğrafyasında Cbs'nin Kullanımı: Samsun Sağlık Ocakları Örneği, 4. Coğrafi Bilgi Sistemleri Bilişim Günleri, 13 – 16 Eylül 2006 ,Fatih Üniversitesi , İstanbul
- Hatice Canan Gungor, Mahmut Sami Buker”GIS based method to integrate Solar Energy in the Energy Planning of the urban environments: Application of Rooftop PV Systems in Selçuklu, Konya province” IGCC International Green Capitals Congress.,2018. Konya, TURKEY.
- Han, S. Y., & Kim, T. J. (1989). Can expert systems help with planning?. *Journal of the American Planning Association*, 55(3), 296-308.
- Levine, J., Landis, J. D., & Klosterman, R. (1989). Geographic information systems for local planning. *Journal of the American Planning Association*, 55(2), 209-220.
- Koyuncu, A. (2011). Anadolu kentlerine göç: Konya örneği. *Nevşehir Hacı*
- Sinton, D. S., & Bednarz, S. W. (2007). About that G in GIS. *Understanding place: GIS mapping across the curriculum*, 19-34.
- TAPUR, T. (2013). KONYA İLİ'NİN 2007 ADRESE DAYALI NÜFUS SAYIMI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ VE KONYA'DA NÜFUS GE-LİŞİMİ. *Marmara Coğrafya Dergisi; Sayı 21 (2010): MARMARA COĞ-RAFYA DERGİSİ*.
- Url1 <https://kentrehberi.konya.bel.tr/#/rehber/> Erişim:20.11.2022
- Ülkenli Z. , 1997 Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Ülkemizde Kullanımı Üzerine, Sa-nal Gazete, Yıl 2, Sayı 4, İstanbul.
- Yomralıoğlu, T. Coğrafi Bilgi Sistemleri (Temel Kavramlar ve Uygulamalar). İs-tanbul. Seçil Ofset.2000
- Worrall, L., & Bond, D. (1997). Geographical information systems, spatial analy-sis and public policy: the British experience. *International statistical re-view*, 65(3), 365-379.
- Wiggins, L. L., & French, S. P. (1990). Desktop mapping and GIS. *American Planning Association. Journal of the American Planning Association*, 56(3), 370.