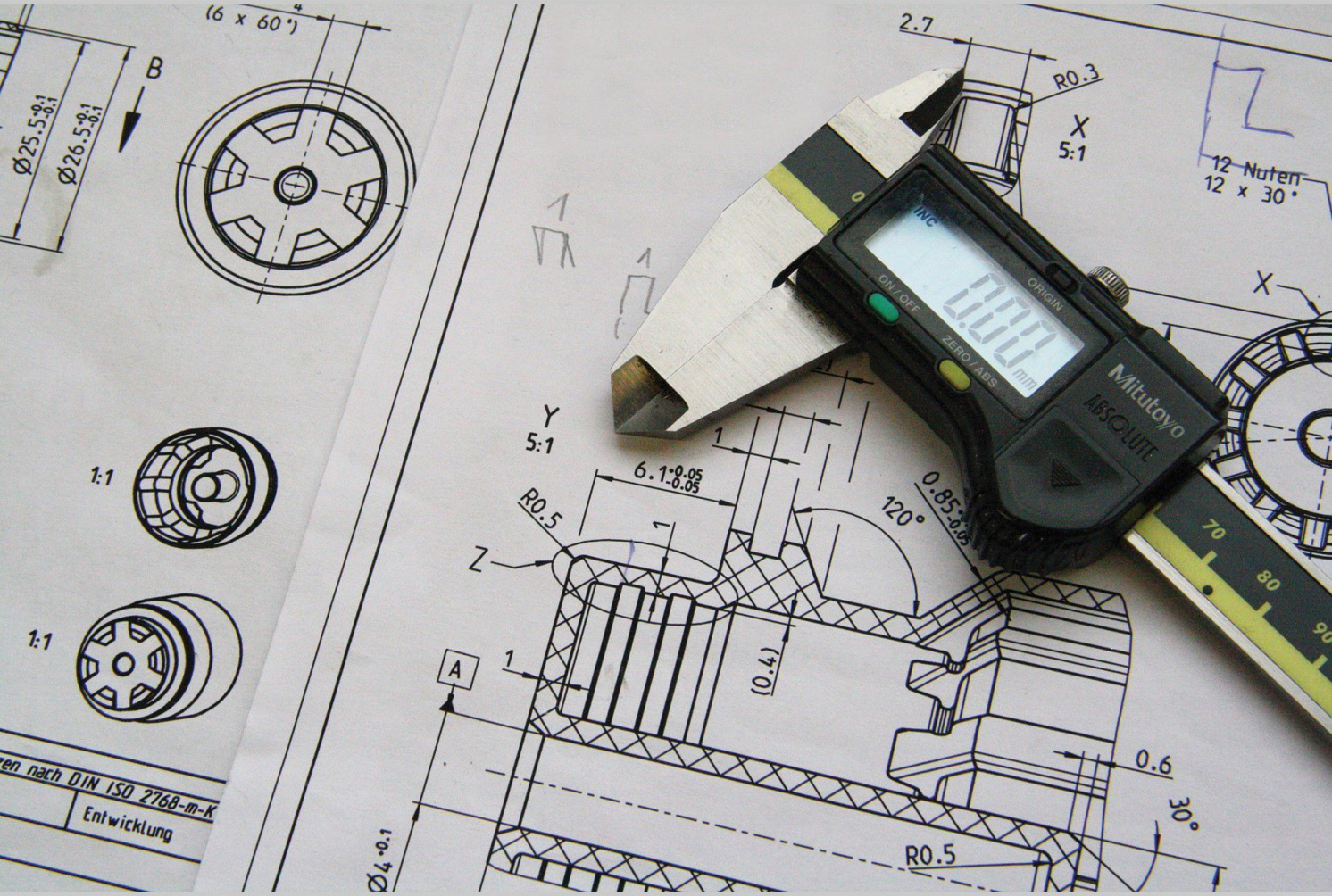


MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ

Araştırma ve Uygulama



Editörler

Prof. Dr. Murat Oduncuoğlu

Dr. Engün Ergül

**Mühendislik
Bilimleri**



LIVRE DE LYON

2022

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ

Araştırma ve Uygulama

Editörler

Prof. Dr. Murat Oduncuoğlu & Dr. Engün Ergül



LIVRE DE LYON

Lyon 2022

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ

Araştırma ve Uygulama

Editörler

Prof. Dr. Murat Oduncuoğlu & Dr. Engün Ergül



LIVRE DE LYON

Lyon 2022

Editors • Prof. Dr. Murat Oduncuoğlu • Orcid: 0000-0002-3130-5646
• Dr. Engün Ergül • Orcid: 0000-0003-3347-5400

Cover Design • Point Design

Book Layout • Mirajul Kayal

First Published • March 2022, Lyon

ISBN: 978-2-38236-262-4

copyright © 2022 by Livre de Lyon

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without prior written permission from the Publisher.

Publisher • Livre de Lyon

Address • 37 rue marietton, 69009, Lyon France

website • <http://www.livredelyon.com>

e-mail • livredelyon@gmail.com



LIVRE DE LYON

Ön Söz

Bu yeni kitap serisi teorik ve uygulamalı farklı konuları bir araya getirerek mühendislik ve temel bilimlerdeki gelişmeleri yakalamayı amaçlamaktadır. Bu kitap ise, temel bilimler ve mühendislik konularında uzman araştırmacıların deneyimleri ve teknolojik gelişmeler üzerine yaptıkları çalışmalarını içerisinde bulunduran teorik ve pratik konulardan oluşmaktadır. Bu kitabı hazırlamaktaki amacımız, araştırmacıların ilgilendikleri alanlarda işin özü olan uygulama ve teorik altyapıları genç bilim insanlarına ve araştırmacılara sunarak, ilgilenen araştırmacılara kendi dilinde yazılan bir kaynak ile yol göstermek ve çalışmalarını verimli kılmaktır. Farklı ilgi alanlarını kapsayan geniş bir yelpazede araştırma konularından oluşan kitabımız ilgilenenlerin konuları anlayıp uygulaması ve yeni teknolojiler geliştirebilmeleri için önemli bir kaynaktır. Altı bölümden oluşan kitabımız, optimizasyon problemleri çözümü için önerilen bir algoritma, gıdalarda pestisit giderimi için ozon uygulamaları, farklı elektrik devreleri analizleri ve problemlere çözüm önerileri, inşaat mühendisliğinde bilgisayar destekli tasarım, sürdürülebilir hibrit çimento harçlarının por yapısı ve baskı teknolojileri konularından oluşmaktadır.

Editörler, bütün yazarlara kitaba katkılarından dolayı teşekkür eder. Yazarların bilgi birikimleri ve katkıları olmadan bu eser ortaya çıkamazdı. Ayrıca bu çalışma için bizleri destekleyen Livre de Lyon Yayınevi ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

Prof. Dr. Murat Oduncuoğlu & Dr. Engün Ergül

İçindekiler

ÖN SÖZ.....	I
BÖLÜM I: DOĞRU AKIM DEVRELERİ VE PROBLEM ÇÖZÜMLERİ.....	1
<i>Teoman Karadağ</i>	
BÖLÜM II: ELEKTRİK DEVRELERİNİN ANALİZİ VE PROBLEM ÇÖZÜMLERİ.....	33
<i>Teoman Karadağ</i>	
BÖLÜM III: OZON UYGULAMALARIYLA GIDALARDAN PESTİSİT GİDERİMİ.....	61
<i>Ayşe Kurt</i>	
BÖLÜM IV: GENİŞ ÖLÇEKLİ OPTİMİZASYON PROBLEMLERİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ FARE SÜRÜSÜ ALGORİTMASI.....	89
<i>Emine Baş</i>	
BÖLÜM V: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMIN TARİHSEL GELİŞİMİ.....	109
<i>Duygu Çelik & Furkan Azak & Tarkan Karaçay & Yunus Eren Kaya & Batuhan Şanlı & Büşranur Azak & Hakan Özbaşaran</i>	
BÖLÜM VI: ENDÜSTRİYEL ATIK TÜRÜ BAĞLAYICI İÇEREN SÜRDÜRÜLEBİLİR HİBRİT ÇİMENTO HARÇLARININ POR YAPISI ÖZELLİKLERİ.....	133
<i>Levent Bostancı</i>	
BÖLÜM VII: SÜRDÜRÜLEBİLİR HİBRİT UÇUCU KÜL HARÇLARINDA ATIK LASTİK PARTİKÜLLERİNİN HARÇ NUMUNELERİNİN POR YAPISI ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİSİ.....	153
<i>Levent Bostancı</i>	
BÖLÜM VIII: 3, 4 VE 5 BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİSİNİN İNCELENMESİ VE UYGULAMA ALANLARININ ARAŞTIRILMASI.....	173
<i>Meltem Eryıldız</i>	

BÖLÜM I

DOĞRU AKIM DEVRELERİ VE PROBLEM ÇÖZÜMLERİ

Teoman Karadağ

*(Dr. Öğr. Üyesi), İnönü Üniversitesi,
e-mail: teoman.karadag@inonu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-7682-7771*

1. Giriş

Manyetik ve elektrik olayları çağımızdan önceki VI - VII. yüzyılda biliniyordu. Bu bilgilerin basit olmasına bakılmaksızın, mıknatıslar o zamanlarda Çin ve Hindistan da pratikte kullanılmaktaydı. İlk yazılı kaynak 1600 yılında basılmıştır. İngiliz bilim insanı William Gilbert'in "Mıknatıs, Manyetik Gövdeler ve Dünya'nın Büyük Mıknatısı Üzerine" adlı kitabıdır. Bu kitapta "elektrik" terimini kullanmış ve elektriklenebilen cisimlere "elektrikli cisimler" adını vermiştir. Birçok elektrik ölçüm cihazları ve makineleri hazırlamıştır. Elektrostatik makine (1650), Leyden Kavanozu (kondansatör) (1745), Rix Numan elektrik göstericisi (1745), Coulomb dönemi elektrik tartısı (1785) yapılan bu cihazlar elektrostatik konusunun ortaya çıkışına sebep olmuştur.

18. yüzyılda ve 19. yüzyılın başlangıcı da elektrik olaylarının tıp alanında kullanılması için çok sayıda deney yapılmıştır ve konu ile ilgili birçok cihaz oluşturulmuştur. Bu denemeler sonucunda İtalyan hekim ve fizik bilim insanı Luigi Galvani, iki farklı cins metal tabaka arasına yerleştirilmiş kurbağa kaslarının kasıldığını tespit etmiştir. Bu denemelerden yararlanarak İtalyan bilim insanı Alessandro Volta 1799 yılında ilk kez elektrokimyasal elektrik kaynağını oluşturmuştur. Bu kaynak galvanik eleman adını taşımaktadır. Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta'nın galvanik elemanı, arasına asitte veya hidroksilde ıslatılmış pamuk yerleştirilmiş çinko ve bakır tabakalardan oluşmaktadır. Bu elemanın uçları arasındaki potansiyel fark 1.1 V civarlarında olduğundan istenilen gerilimi elde etmek için Volta bu

elemanları seri birleştirerek batarya elde etmiştir. 1808 yılında ise İngiliz bilim insanı Humphry Davy 2000 elemanı seri birleştirerek batarya oluşturmuştur. Volta bataryası ile yapılan denemeler elektrik enerjisinin birçok özelliğinin (kimyasal, ısı, ışık, manyetik ve elektroliz) öğrenilmesinde etkili olmuştur. 1802 yılında akım ile geçirgenin dik kesiti arasındaki bağlantı, 1821 yılında ise geçirgenin malzemenin türünden ve ısıdan etkilendiği ortaya konulmuştur.

1827 yılında Alman fizikçi Georg Ohm akım, gerilim ve geçirgenlik arasındaki bağlantıyı "ohm yasası" ile açıklamıştır. 1831 yılında İngiliz bilim insanı Michael Faraday yaptığı deneyler sonucunda elektrik akımı ve manyetik alanlar arasındaki ilişkiyi açıklamış ve Elektromanyetik İndüksiyon Yasası'nı ortaya koymuştur. 1832 yılında Baron Pavel L'vovitch Schilling (Paul Schilling) ilk elektromanyetik telgraf sistemini ortaya koymuştur. 1845 yılında Alman bilim insanı Gustav Kirchhoff, elektrik devrelerinin hesaplanmasında kullanılan "Kirchhoff Yasaları" adı altında elektrik devrelerinin analizinde kullanılan denklemleri ortaya koymuştur. 1876-1880 yılları arasında Thomas Edison tarafından elektrik lambaları yapılarak geliştirilmiştir. Böylelikle elektroteknik tarihinde 1800-1880 yılları süresince DC gerilimlerin oluşturulması, iletilmesi, dönüştürülmesi ve temel kanunlarının belirlenerek ortaya konulması gerçekleştirilmiştir. Elektrik enerjisinin üretilmesi ve iletilmesi için DC gerilimlerin kullanılması ekonomik açıdan maliyetli olduğundan elektrik enerjisi bu dönemlerde yaygın olarak kullanılmamıştır.

1870'li yıllardan başlayarak değişken gerilimler (alternatif) elektroteknik gelişmeye başlamıştır. Önce 1 fazlı sonra 2 fazlı jeneratörler oluşturulmuş fakat bu gerilimlerin endüstride kullanılması ekonomik olmadığından geliştirilememiştir. 1889 yılında Almanya'da çalışan Rus fizikçi Mikhail Dolivo-Dobrovolsky ilk kez 3 fazlı sincap kafesli (kısa devre rotorlu) asenkron motoru icat etmiştir. 1891 yılında Almanya Frankfurt fuarında ilk kez 3 fazlı elektrik iletimi sistemi sunulmuştur. Burada Dolivo-Dobrovolsky tarafından tasarımı yapılmış 3 fazlı jeneratör ile Neckar Nehri'ndeki şelalenin mekanik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürülmüş ve 3 fazlı trafo yardımı ile gerilimi yükseltilmiştir, üretilen elektrik enerjisi 170 km uzunluğundaki iletim hattı boyunca iletilmiştir. 3 fazlı trafo ile gerilim düşürülmüş ve 3 fazlı asenkron motor çalıştırılmıştır. Böylelikle elektroteknik alanında yeni bir devir, alternatif akımlar devri başlamıştır.

Böylelikle devre teorisi anabilim dalı 1900 yıllarında gelişmeye başlamıştır. Günümüzde elektrik devreleri, kullanılan akım türüne göre DC ve AC gerilim devrelerine, kullanılan elemanın türüne göre lineer ve lineer olmayan devreler, araştırma yöntemine göre ise devre analizi ve devre sentezi olarak ayrılmaktadır.

Elektrik devrelerinin analizi kısmında elektrik devresi verilir. Mevcut devre kurallarını kullanarak matematiksel denklemler yazılır. Devre parametreleri denklemlerde yerine yazılır, denklemler çözülerek gereken parametreler hesaplanır. Hesaplamalar yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus; yazılan denklemlerin sayısının, bulunması gereken

parametrelerin sayısına eşit olmasıdır. Devre sentezinde ise verilen matematiksel denklemlere veya devre karakteristiklerine göre elektrik devrelerinin oluşturulması istenilir. Bunun için çeşitli matematiksel yöntemler kullanılır.

1.1. Elektroteknikte Kullanılan Ölçüm Birimleri

Günümüzde tüm bilim dallarında uluslararası birim sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde kabul olunmuş esas birimler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1’de verilmiş bazı birimler kullanılarak tüm anabilim dallarında ki parametreler için birimler belirlenmiştir.

Tablo 1: SI kullanılan esas birimler.

Adı	Birimi	Sembolü
Uzunluk	Metre	m
Kütle	Kilogram	Kg
Zaman	Saniye	s
Elektrik akımı	Amper	A
Termodinamik(ısı)	Derece(kelvin)	K
Işık şiddeti	kandela	cd
Madde miktarı	mol	mol

Elektroteknikte kullanılan birimler tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Elektroteknikte kullanılan birimler.

Adı	Birim adı(sembolü)	Formülü
Frekans	Hertz (Hz)	
Kuvvet	Newton (N)	m/s
Enerji	Joule (J)	
Güç	Watt (W)	J/s
Elektrik yükü	Coulomb (C)	
Elektrik gerilimi	Volt (V)	W/A
Elektrik direnci	Ohm (Ω)	V/A
Elektrik geçirgenliği	Siemens (S)	A/V
Elektrik kapasitörü	Farad (F)	C/V
Manyetik akı	Weber (Wb)	
İndüktans	Henry (H)	Wb/A

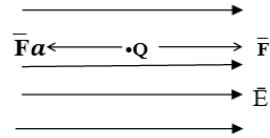
Elektrik devre parametrelerinin birimleri bazen çok büyük veya çok küçük olduğundan pratikte parametrelerin katları kullanılır. Tablo 3'te bu cinsten büyüklükler verilmiştir.

Tablo 3: Pratikte kullanılan parametrelerin katları.

Adı	Sembolü	
atto	a	
femto	f	
piko	p	
nano	n	
mikro	μ	
mili	m	
santi	c	
desi	d	
deka	da	
hekto	h	
kilo	k	
mega	M	
giga	G	
tera	T	

2. İş, Enerji, Potansiyel ve Gerilim

- \vec{E} , elektrik alanında Q yüküne bir F kuvveti etki etmektedir.



$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$$

- Yönü dengede tutmak için ona ters yönde kuvvet uygulanmalıdır.

$$\vec{F} \quad \vec{E}$$

- Eğer \vec{F}_a kuvveti, yükün $d\ell$ kadar hareket etmesine neden oluyorsa yapılan iş,

$$- \vec{F}_a \cdot d\vec{\ell} \quad - \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

- \bar{E} ile $d\bar{\ell}$ aynı yönde ise yapılan iş,

$$dW = -QE d\ell \text{ (J) olur.}$$

- Birim değerli Q pozitif yükünü; B noktasından, A noktasına taşımak için gerekli işe A noktasının, B noktasına göre potansiyeli denir.

$$v_{AB} = \frac{W}{Q} = - \int_B^A \bar{E} \cdot d\bar{\ell} \text{ (J/C veya V)}$$

- Burada φ_{AB} A ve B noktaları arasındaki potansiyel farkı verilmiştir. A ve B noktaları arasındaki gerilim olarak düşünülebilir.

$$U_{AB} = U_A - U_B = U \text{ (Volt, V)}$$

- Eğer Q pozitif noktasal yükünden kaynaklanan alan yarıçap yönünde olduğunu düşünürsek,

$$v_{AB} = - \int_B^A \bar{E} \cdot d\bar{\ell} = - \int_{r_B}^{r_A} E_r dr = - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_B}^{r_A} \frac{dr}{r^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

- Eğer B noktası ∞ 'da ise;

$$v_{A\infty} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{\infty} \right) \text{ veya } v_A = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Yani noktasal bir yükün sonsuzdan herhangi bir noktaya taşınması için gereken iş noktanın potansiyeline eşittir.

Örnek: Bir elektrostatik alan $\bar{E} = \left(\frac{x}{2} + 2y\right) \bar{a}_x + 8x \bar{a}_y + 4y \bar{a}_z$ (V/m) ile tanımlanmaktadır. $Q = -200 \text{ mC}$ noktasal yükünü orijinden, M (4,4,8) m'ye hareket ettirmek için yapılan işi hesaplayalım.

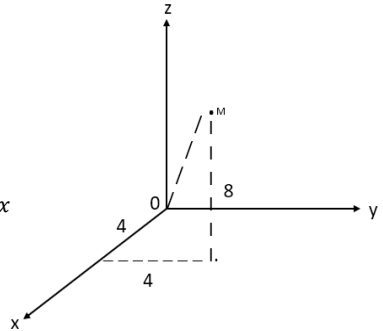
İki yöntemle çözülebilir;

I. Yöntem

$$d\ell = d \times \bar{a}_x$$

$$dW_1 = -Q \cdot E \cdot d\ell = (200 \times 10^{-3}) \left(\frac{x}{2} + 2y \right) dx$$

$$W_1 = (200 \times 10^{-3}) \int_0^4 \left(\frac{x}{2} + 2y \right) dx$$



$$= 0,2 \left| \frac{x^2}{y} \right|_0^4 = 0,8J$$

$$\overline{d\ell} = d_y \overline{a_y} | W_2 = (200 \cdot 10^{-3}) \int_0^4 8x dy = 0,2(32y \Big|_0^4) = 25,6J$$

$$d\ell = d_z \overline{a_z} \rightarrow W_3 = (200 \cdot 10^{-3}) \int_0^8 4y dz = 0,2 \left| 4 \cdot 4 \cdot 2 \right|_0^8 = 25,6J$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = 0,8 + 25,6 + 25,6 = 52J$$

II. Yöntem

$$\overline{d\ell} = d_x \overline{a_x} + d_y \overline{a_y} + d_z \overline{a_z}$$

$$dW = -Q \cdot \vec{E} \cdot \overline{d\ell}$$

$$= (200 \cdot 10^{-3}) \cdot \left[\left(\frac{x}{2} + 2y \right) \overline{a_x} + 8x \overline{a_y} + 4y \overline{a_z} \right] [d_x \overline{a_x} + d_y \overline{a_y} + d_z \overline{a_z}]$$

$$= 52J$$

Örnek: $Q = 400 \text{ pC}$ noktasal yükü orijine yerleştirilmiştir. Sıfır referansının ∞ 'da seçilmesini göz önüne alarak, $r_A = 20m$ ve $r_B = 50m$ 'de yerleştirilmiştir. Noktaların potansiyellerini ve noktalar arasında ki potansiyel farkı hesaplayınız.

$$V_{AB} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = \frac{400 \cdot 10^{-12}}{4\pi \left(\frac{10^{-9}}{36\pi} \right)} \left(\frac{1}{20} - \frac{1}{50} \right) = (0,18 - 0,072) = 0,108V$$

$$V_{20} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{20} \right) = 0,18V; \quad V_{50} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{50} \right) = 0,072V$$

3. Akım

Elektrik yüklerinin düzenli akımına "elektrik akımı" denir. Fakat düzenli akım bir iletken geçiyorsa başka bir tanım da kullanılabilir. Geçirgenin dik kesitinden birim zamanda geçen yüklerin sayısına elektrik akımı denir.

$$I = \frac{Q}{t} [C/S]$$

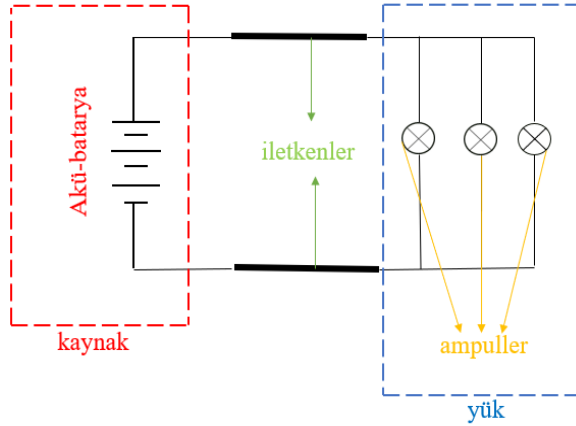
Formülü ile belirlenir. Eğer yük sayısı zamana göre değişmez sabit kalırsa "**DC akım**" olarak adlandırılır. Eğer dik kesitten geçen yük sayısı değişirse "**AC akım**" olarak adlandırılır.

$$i = \frac{dq}{dt}$$

Formülü ile belirlenir.

3.1 .Elektrik Devreleri

Elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve başka enerji türlerine dönüştürülmesi için kullanılan malzemelerin bir sistemde birbirlerine bağlanmasına elektrik devresi adı verilir.

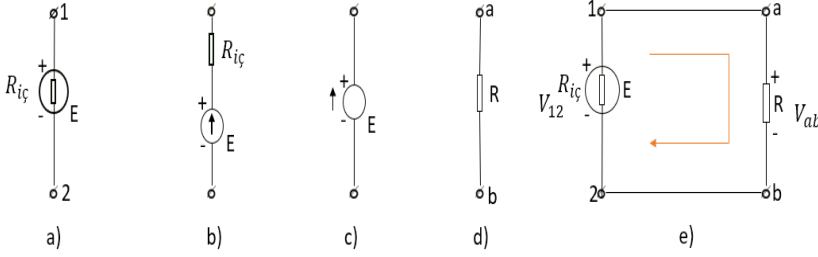


Şekil 1

Şekil 1’de görüldüğü gibi DC akım devrelerinin temel elemanları kaynak, yük ve akım taşıyan iletkenlerdir.

Elektrik enerji kaynaklarında kimyasal, mekanik, ısı enerjisi ve başka tür enerjiler elektrik enerjisine dönüştürülür. DC enerji kaynakları gibi galvanik elemanlar, akü bataryaları DC makine jeneratörleri vb. elemanlar kullanılabilir.

Elektrik enerjisi kullanıcılarında (ısıtıcı, lamba, rezistörler, elektrik motorları) ise elektrik enerjisi başka tür enerjilere dönüşür. Eğer elektrik devrelerinde akım ve gerilim zamandan bağımsızsa bu tür devrelere DC akım devreleri denir. Elektrik devrelerindeki olayları incelemek için Şekil 1’de verilen devre Şekil 2’deki elektrik hesaplama devresine dönüştürülmüştür.



Şekil 2

Elektrik devrelerinin analizini ve sentezini yapmak için devredeki her bir elemanı fiziksel prosesleri dikkate alınarak ideal bir elemanla değiştirilir.

3.2. Elektrik Kaynağı

Elektrik kaynağının şeması şekil 2(a, b) de verilmiştir. Kaynak elektromotor kuvveti (EMK) E ve kaynağın iç direnci $R_{iç}$ ile karakterize edilir. EMK, kaynağın uçları açık olduğunda (kaynaktan akım akmadığında, açık devre rejiminde) uçlar arasındaki potansiyel farka eşittir.

- $I = 0$ ise $E = \mathcal{V}_1 - \mathcal{V}_2 = \mathcal{V}_{12} \dots (1)$

İdeal EMK sembolü şekil 2(c) de verilmiştir. EMK vektörel büyüklük olup, düşük potansiyelli uçtan yüksek potansiyelli uca yönlendirilir.

Eğer kaynağın uçlarına yük bağlanırsa devreden I akımı akar [şekil 2(e)] ve kaynağın uçları arası potansiyel fark;

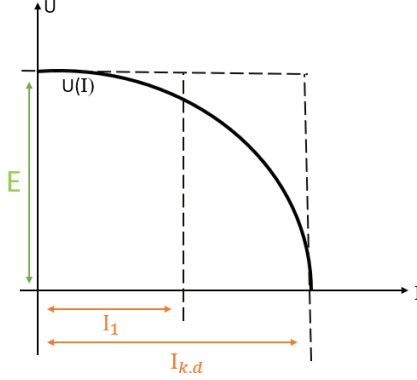
- $\mathcal{V}_{12} = \mathcal{V} = E - \mathcal{V}_{iç} = E - R_{iç}I \dots (2)$

eşit oluyor buna göre EMK'dan iç dirençte ki gerilim düşümü kadar azdır bu durumda kaynak gerilim kaynağı olarak adlandırılır.

Şekil 3'te EMK'nın dış $U(I)$ karakteristiği görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere akım $I = I_1$ değerlerinde EMK lineer değişir, $I > I_1$ olduğundan EMK nonlineer olarak azalır. $I = I_{k.a}$ akımında EMK kaynağının uçları kapanmış olur ve kaynak kısa devre rejiminde çalışarak maksimum enerji harcar.

3.2. Elektrik Direnci

Elektrik enerjisini bir yönlü ısı enerjisine dönüştüren devre elemanına direnç denir. Direnç "R" ile gösterilir. Şemalarda şekil 2(d) de gösterildiği gibi düz dörtgen şeklinde gösterilir. DC elektrik devrelerinde tüm yükler R direnci ile karakterize edilir.



Şekil 3

Tüm metalik geçirgenler dirence sahip olup, dirençleri;

- $R = \rho \frac{\ell}{S}$ (Ohm)

ℓ = iletkenin uzunluğu (m)

S = iletkenin dik kesit alanı (mm^2)

ρ = malzemenin özgül direnci ($\Omega \cdot mm^2/m$)

Özgül direncin tersine özel iletkenlik denir.

- $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ($m/\Omega \cdot mm^2$)

Dirençlerin ters değerine iletkenlik denir.

- $G = \frac{1}{R}$ ($1/Ohm = siemensin = s/m$)

Dirençler sıcaklık arttıkça artar. Direncin sıcaklıkla değişimi;

- $R_{\theta_2} = R_{\theta_1} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)]$

R_{θ_1} ve R_{θ_2} = malzemenin θ_1 ve θ_2 sıcaklığındaki dirençler

α = sıcaklık katsayısı

Direnç uçlarındaki gerilim (Şekil 2d) V_{ab} ucundan iletilen akım I ise $U_{ab}(I)$ veya $U(I)$ bağlantısına direncin Volt-Amper karakteristiği denir.



Şekil 4

Eğer elemanın karakteristiği nonlineer (Şekil 4a) ise eleman nonlineerdir. Eğer lineer ise eleman lineerdir. Fakat devrede bir nonlineer eleman varsa devre nonlineerdir, yoksa devre lineerdir.

3.3. Güç ve Enerji

Her kaynak enerjiye sahiptir. Elektrik kaynakları sahip olduğu enerjiyi harcayarak devrede iş yapar. Enerjinin devreye verilme hızını karakterize edebilmek için güç olarak adlandırılan parametre kullanılır.

- $P = \frac{d_w}{d_t}$ şeklinde ifade edilir.

P = güç(watt/W)

W = enerji(joule/J)

t = zaman(sn)

- $P = \frac{d_w}{d_t} = \left(\frac{d_w}{d_q}\right) \left(\frac{d_q}{d_t}\right) = U \cdot i$

P = güç (W)

U = gerilim(V)

i = akım (A)

Elektrik kaynağının harcadığı güç;

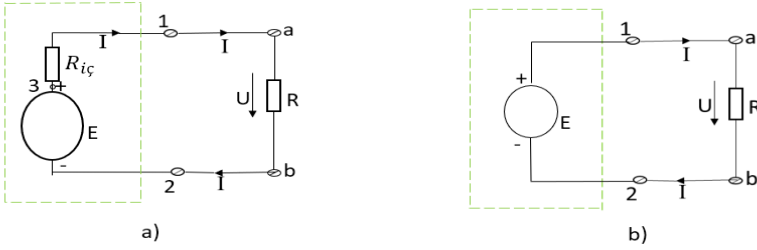
- $P = E \cdot I$

Yükün harcadığı güç ise;

- $P = U \cdot I$ formüllerinden belirlenir.

3.4. Enerji Kaynaklarının Eşdeğer Devreleri

Pratikte enerji kaynakları için genellikle (şekil 2-e) 2 tür eşdeğer devre kullanılır.



Şekil 4

Kaynağın uçlarında ki gerilim;

- $U = U_1 - U_2 = E - U_{iç} = E - R_{iç}I$ ___ (1)

Direncin uçlarındaki gerilim ise;

- $U = U_a - U_b = RI$ ___ (2)

Olduğundan ve $U_1 = U_a$, $U_2 = U_b$ göz önüne alınırsa;

- $E - R_{iç} \cdot I = RI$ ___ (3)

- $E = IR + IR_{iç}$ ___ (4)

- $I = \frac{E}{R_{iç} + R}$ ___ (5)

Açık devre rejiminde $R=\infty$;

- $E = U$

Kısa devre rejiminde ise $R=0$;

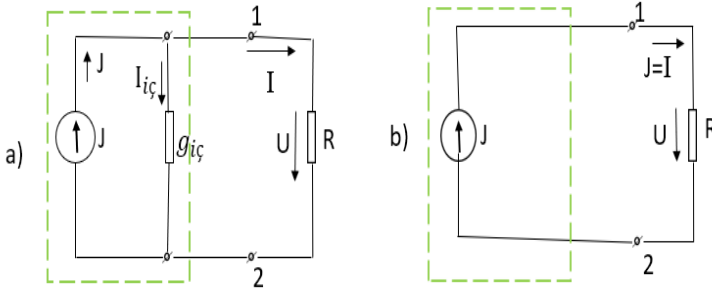
- $I_{k.d} = \frac{E}{R_{iç}} = \frac{U_{a.d}}{R_{iç}} \quad \text{veya} \quad U_{a.d} = I_{k.d} \cdot R_{iç} \quad \text{--- (6)}$

(6) ifadesinde görüldüğü gibi akım $R_{iç}$ direncinden etkilenir. Bu durumdan eşdeğer elektrik devresi şekil 5-a'da verildiği gibi alınır. Eğer $R_{iç} \ll R$ ve $U_{iç} \ll U$ olursa $U_{iç}$ ihmal edilerek şekil5-b'de ki gibi alınır.

(4) verilen denklemin her iki tarafı $R_{iç}$ bölünürse;

- $\frac{E}{R_{iç}} = \frac{U}{R_{iç}} + I \quad \text{veya} \quad J = g_{iç}U + I \quad \text{--- (7)}$

(7) denklemini kullanarak devreyi şekil6-a'da verildiği gibi göstermek mümkündür. Burada $J = \frac{E}{R_{iç}}$ akım kaynağının akımını karakterize etmektedir. E ve $R_{iç}$ sabit olduğundan J dış dirençten bağımsız olarak sabit kalır. Böylelikle akım uçlardaki gerilimden bağımsız, her zaman sabit kalan kaynağa "akım kaynağı" denir.



Şekil 5

- $I_{iç} = g_{iç} \cdot U$ iç dirençteki akım
- $I = g_y \cdot U$ yükteki akım
- $g_y = \frac{1}{R_y}$ yükün geçirgenliği

Eğer $r_{iç} \gg R$ veya $g_{iç} \ll g$ ise $I_{iç} \ll I_y$ olur ve akım kaynağı şekil 6-b'de verildiği gibi ideal kaynak şeklini alır.

EMK ve akım kaynakları devrenin aktif elemanları, rezistif elemanlar ise pasif elemanlardır.

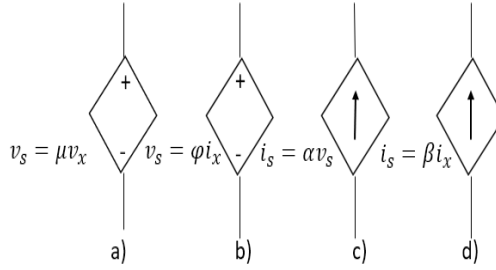
Günümüzde kontrollü gerilim ve akım kaynakları kullanılmaktadır.

Şekil7(a) gerilim kontrollü gerilim kaynağı

Şekil7(b) akım kontrollü gerilim kaynağı

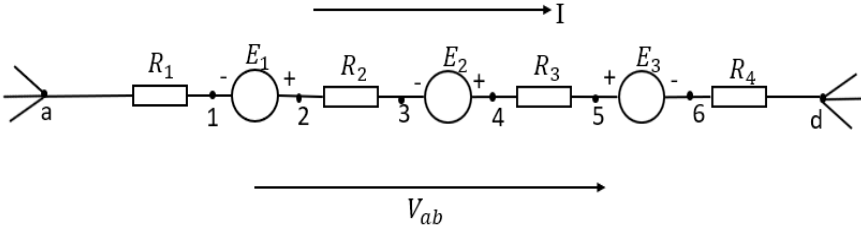
Şekil7(c) gerilim kontrollü akım kaynağı

Şekil7(d) akım kontrollü akım kaynağı



Şekil 6

3.5. EMK Dahil Devre Kısım İçin Ohm Yasası



Şekil 7

Şekil 8 de verilmiş elektrik devresini inceleyelim. EMK lar ve akımın pozitif yönleri şekilde gösterildiği gibidir. "a" noktasının potansiyeli $U_a = C$ 'dir. 1 noktasındaki potansiyel R_1 direncindeki gerilim düşümünden a noktasındaki potansiyelden küçük olur.

- $U_1 = U_a - IR_{1} \dots (1)$

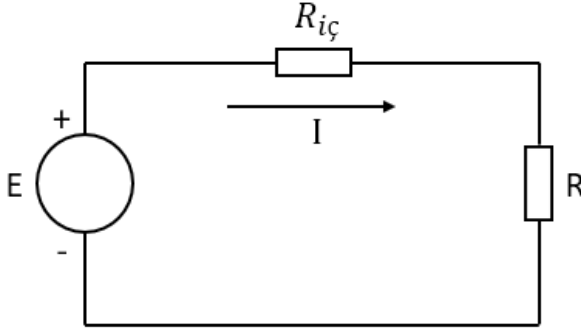
- $U_2 = U_1 + E_1 \dots (2)$ E_1 EMK sının yönü akım yönü ile aynı olduğundan E_1 kadar büyük alınır.

- $U_3 = U_2 - IR_2 \dots (3)$

- $U_4 = U_3 + E_2$ (4)
- $U_5 = U_4 - IR_3$ (5)
- $U_6 = U_5 - E_3$ (6) E_3 yönü akım yönüne ters olduğundan
- $U_b = U_6 - IR_4$ (7)
- $U_b = U_a - IR_1 + E_1 - R_2I + E_2 - R_3I - E_3 - R_4I$
- $I = I_{ab} = \frac{U_a - U_b + E_1 + E_2 - E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{U_{ab} + \sum_a^b E}{\sum_a^b R} = (U_{ab} \sum_a^b E) g_{ab}$ Ohm kanununun genel şeklidir.
- Eğer $U_{ab} = U_{23} = U$, $\sum_a^b E = 0$ ve $\sum_a^b R = \sum_2^3 R = R_3$ olursa $I = \frac{U}{R}$ ifadesi kullanılır.

Şekil 9 da verilmiş devre için

$I = \frac{E}{R_{iç} + R}$ ifadesi kullanılır.



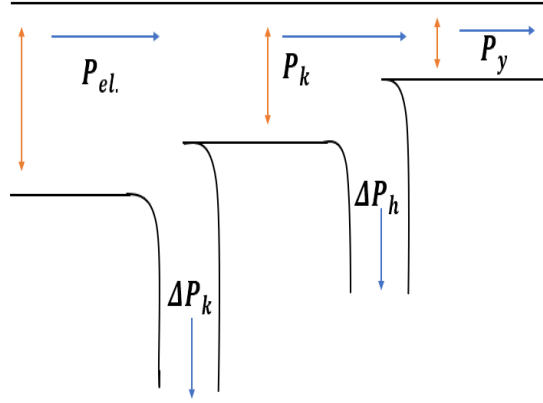
Şekil 9

3.6. Basit Elektrik Devrelerinde Güçler Balansı

Elektrik devrelerinde kaynakların ürettiği güçlerin cebirsel toplamı dirençlerin harcadığı güçlerin toplamına eşittir.

$$\sum EI = \sum I^2R$$

Kaynak ve akımın yönü aynı ise EI pozitif, farklı ise EI negatif alınır. I^2R her zaman pozitifdir.



Şekil 8

$\sum I^2R$ toplamı hem iç dirençleri hem de dış devredeki enerji kayıplarını içerir. Genellikle güçler balansı şekil 10 da verilmiş diyagram ile açıklanır. $P_{el.} = \sum EI$ devrede kaynakların oluşturduğu toplam güç, $\Delta P_k = I^2R_k$ kaynaklarda ısıya dönüşen güç kayıpları, $P_k = P_{el.} - \Delta P_k$ kaynakların dış devreye ilettiği güç, $\Delta P_h = I^2R_h$ iletim hattında ısıya dönüşen güç kayıpları $P_y = I^2R_y$ yükün harcadığı güç miktarıdır.

3.7 .Elektrik Enerjisinin Isı Enerjisine Dönüşümü

Joule yasasına göre t zamanı içinde R direncinden geçen I akımı ısı enerjisi oluşturur.

$$W = I^2Rt \quad (Q_{kal.} = 0,239I^2Rt \text{ joule})$$

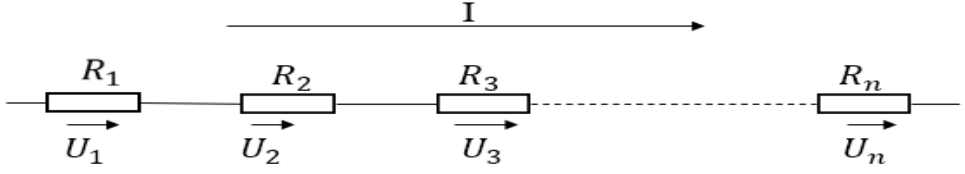
Güç ise birim zamanda dönüşen enerjiyi ifade eder.

$$P = \frac{W}{t} = I^2R$$

$$IR = U \text{ olduğundan } P = \frac{U^2}{R} = UI$$

3.8. Dirençlerin Seri ve Paralel Bağlanması

Dirençler seri bağlandığında dirençler üzerinden aynı akım geçer, gerilim ise dirençlere eşit şekilde dağılır.



Şekil 11

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$$

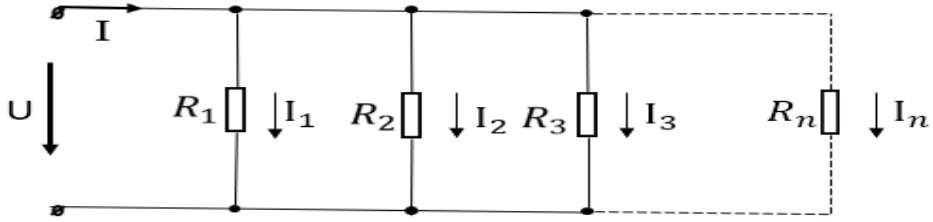
$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots + IR_n = IR$$

$$U = I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) = IR$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Yani seri bağlı devrenin eşdeğer direnci dirençlerin toplamına eşittir.

Dirençler paralel bağlanmışsa uçlarındaki gerilim sabit kalır.



Şekil 12

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

$$I = \frac{U}{R_{eş}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots + \frac{U}{R_n}$$

$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R_{eş}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$$G_{eş} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n$$

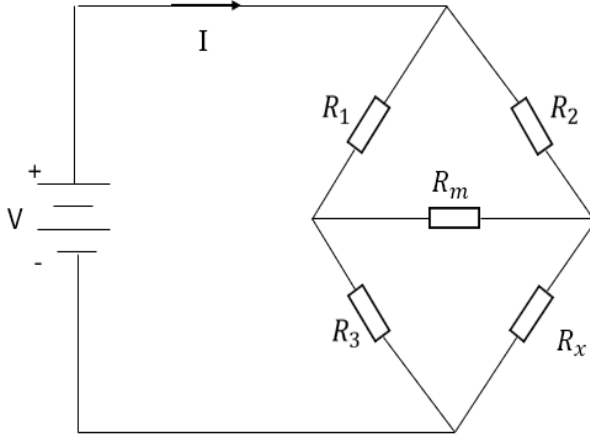
Dirençlerin paralel bağlandığı devrelerde eşdeğer geçirgenlik dirençlerin geçirgenliklerinin toplamına eşittir. Paralel bağlı iki direnç için

$$\frac{1}{R_{eş}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}$$

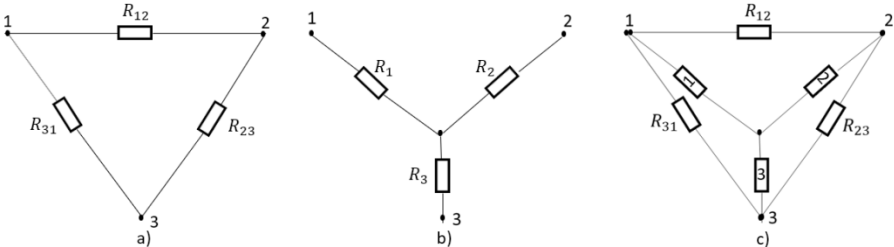
$$R_{eş} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

3.9 .Üçgen-Yıldız / Yıldız-Üçgen Dönüşümleri

Şekil 13 de gösterilen köprü ölçüm şeması pratikte dirençlerin ölçümü için yaygın kullanılmaktadır. R_x direnci devrede bilinmeyen direnç, R_m ise ölçüm cihazının iç direncidir. Verilen köprü şemasında akımın hesaplanması için devrenin eşdeğer direncinin bulunması gerekir. Dirençler üçgen (Δ) bağlı olduklarından eşdeğer direnci hesaplamak mümkün değildir. Eşdeğer direncin hesaplanabilmesi için üçgen bağlı dirençlerden birinin eşdeğer yıldız (Y) bağlantıya dönüştürülmesi gereklidir.



Şekil 9



Şekil 14

Üçgen-yıldız dönüşümü şekil14(a-b) de verilmiştir. Dönüşümde kullanılan formüller;

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

Yıldız-üçgen dönüşümünde geçirenlikler kullanılarak devre geçirenlikleri bulunur.

$$G_{12} = \frac{G_1G_2}{G_1 + G_2 + G_3}$$

$$G_{23} = \frac{G_2G_3}{G_1 + G_2 + G_3}$$

$$G_{31} = \frac{G_3G_1}{G_1 + G_2 + G_3}$$

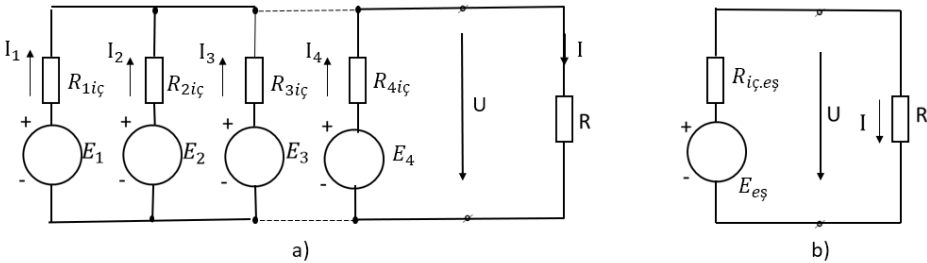
$G = \frac{1}{R}$ olduğundan;

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1R_2}{R_3}$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_1}$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3R_1}{R_2}$$

3.10. Paralel Bağlanan Kaynakların Eşdeğer Kaynağa Dönüştürülmesi



Şekil 15

Şekil 15-a da verilen devrede farklı iç dirençler ve kaynaklar bulunmaktadır. Kaynakların eşdeğeri (şekil15-b);

$$E_{eş} = \frac{\sum_{k=1}^4 E_k G_k}{\sum_{k=1}^4 G_k} \quad ve \quad R_{iç,eş} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n G_k}$$

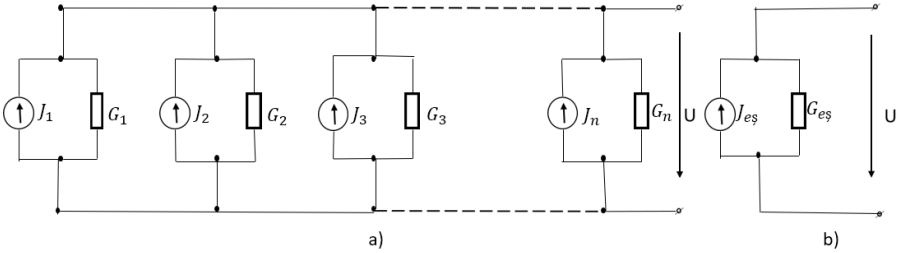
$G_k = \frac{1}{R_k}$ iç dirençlerin geçirenlikleridir.

R direncinden geçen akım;

$$I = \frac{E_{eş}}{R + R_{iç,eş}}$$

Her bir daldan geçen akım;

$$I_k = \frac{E_k - U}{R_k} \quad ve \quad U = IR$$



Şekil 16

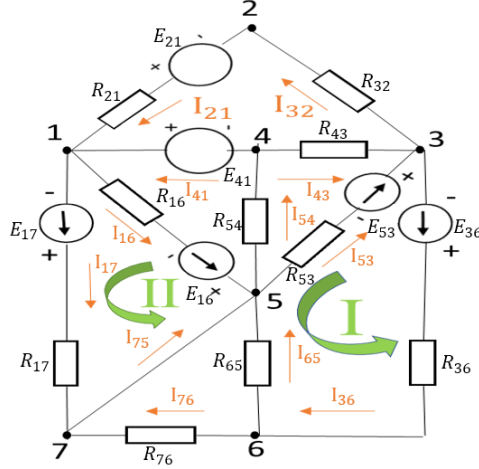
Şekil16'da akım kaynaklarının eşdeğer akım kaynağına dönüştürülmesi verilmiştir. Eşdeğer devrede (şekil16-b) eşdeğer kaynak akımı, kaynakların akımlarının cebirsel toplamına, iç geçirenlik ise kaynakların geçirenlikleri toplamına eşittir.

$$J_{eş} = \sum_{k=1}^n J_k$$

$$G_{eş} = \sum_{k=1}^n G_k$$

3.11. Elektrik Devre Elemanları

Karmaşık elektrik devrelerinde dalların ve düğümlerin belirlenmesi önemli bir özelliktir.



Şekil 10

Seri bağlı ve aynı akımı geçiren elemanlardan oluşan elektrik devre kısımlarına elektrik devre dalı denir. Örneğin Şekil17’de $E_{21} + R_{21}, E_{41}, R_{43}$ birer devre dalı oluşturur. Üç veya daha fazla devre dallarının birleştiği noktaya düğüm noktası denir. Şekil17’de 6-5 düğüm noktalarıdır. 2 noktasında iki devre dalı birleştiğinden ve $I_{21} = I_{32}$ olduğundan bu nokta düğüm noktası olamaz. Devrenin 1-2-3 kısmı bir devre dalı oluşturur.

Özel durumlarda dalın direnci; $R=0$ (4-1)

EMK; $E=0$ (4-3, 6-5, 7-6)

$E=0, R=0$ (7-5) olabilir.

Elektrik devrelerinde dallar kapalı devreler oluşturur. Bu kapalı devrelere göz adı verilir. Her bir düğüm noktası devrenin gözünde bir kez kullanılır. Örneğin 1-2-3-4-1, 1-2-3-5-1, 6-5-4-3-6, 6-5-3-6 (şekil17) göz devreleri.

Elektrik devrelerinin rejimlerinin hesaplanması için Kirchhoff yasalarının kullanılması yeterlidir. Denklemler oluşturulmadan önce akım yönleri belirlenmelidir. Her bir göz için göz denklemi yazılır. Denklemler çözülerek akımlar bulunur. Eğer akım değeri negatif (-) ise başta seçilen akım yönünün tersine aktığını, pozitif (+) ise aynı yönde aktığını göstermektedir.

4. Kirchhoff Yasaları

4.1. Kirchhoff'un Akım Yasası

Tanım: Düğüm noktasındaki akımların cebirsel toplamı sıfıra eşittir.

$$\sum \mathbf{I} = 0$$

Herhangi bir düğüm noktasına gelen (-) akımların toplamı, çıkan (+) akımların toplamına eşittir.

$$\sum \mathbf{I}_g = \sum \mathbf{I}_ç$$

Örneğin Şekil17'de verilen devrenin;

1. düğüm noktası için

$$I_{21} + I_{41} - I_{16} - I_{17} = 0 \quad \text{veya} \quad I_{21} + I_{41} = I_{16} + I_{17}$$

3. düğüm noktası için

$$I_{32} - I_{43} - I_{53} + I_{36} = 0 \quad \text{veya} \quad I_{32} + I_{36} = I_{43} + I_{53}$$

4. düğüm noktası için

$$-I_{54} + I_{41} + I_{43} = 0 \quad \text{veya} \quad I_{54} = I_{41} + I_{43}$$

4.2. Kirchhoff'un Gerilim Yasası

Tanım: Karmaşık elektrik devrelerinde kapalı bir göz içerisindeki tüm elemanların gerilimlerinin cebirsel toplamı sıfıra eşittir.

$$\sum \mathbf{U} = 0$$

Gerilimlerin işaretlerini belirlemek için göz (+) hareket yönü seçilir. (Şekil17'de 3-5-6-3, 5-1-7-5 gözleri) Eğer gerilimin işareti hareket kaynağı ile aynı ise (+) farklı ise (-) alınır.

Örneğin şekil17 de verilen devrenin;

1-5-7-1 gözü için

$$-U_{17} - U_{16K} + U_{17K} + U_{16} = 0$$

6-5-3-6 gözü için

$$-U_{36} + U_{36K} + U_{53K} - U_{53} - U_{65} = 0$$

Genellikle kaynakların gerilim değerleri değil EMK ları verilmiş oluyor. Bu yüzden Kirchhoff'un gerilim yasası;

$$\sum \mathbf{IR} = \sum \mathbf{E}$$

gibi yazılarak, aşağıdaki gibi tanımlanır.

Kapalı elektrik devrelerinin tüm kısımlarındaki gerilim düşümlerinin cebirsel toplamı her gözdeki EMK'ların cebirsel toplamına eşittir.

Eğer devre dallarında ki akım yönü hareket yönü ile aynı ise IR pozitif (+) değilse negatif (-) alınır. Aynı şekilde EMK'nın yönü hareket yönü ile aynı ise işareti pozitif (+) değilse negatif (-) alınır.

Örneğin yukarıda ki göz denklemleri;

1-5-7-1 gözü için

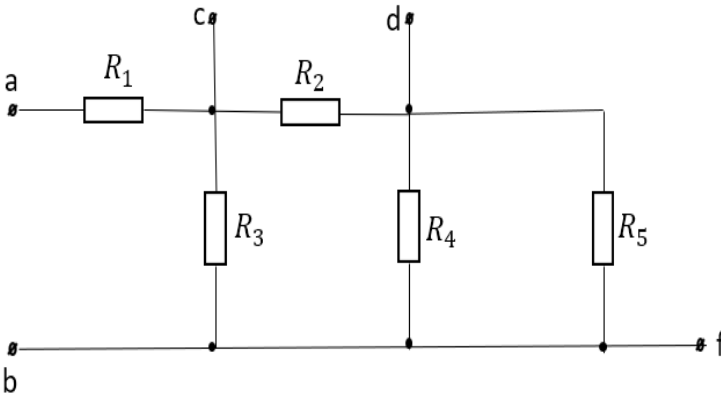
$$E_{16} - E_{17} = I_{16}R_{16} - I_{17}R_{17}$$

6-5-3-6 gözü için

$$-E_{36} - E_{53} = -I_{36}R_{36} - I_{65}R_{65} - I_{53}R_{53}$$

5. Örnekler

Örnek1: $R_1 = 6\Omega$, $R_2 = 5\Omega$, $R_3 = 15\Omega$, $R_4 = 30\Omega$ ve $R_5 = 6\Omega$ verilmiştir. Buna göre a-b, c-d ve d-f uçları arasındaki eşdeğer dirençleri bulunuz.



Çözüm:

R_4 ve R_5 Dirençleri paralel bağlandığından eşdeğer direnci;

$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} = \frac{30 \cdot 6}{30 + 6} = 5\Omega$$

R_2 direnci R_{45} Direncine seri bağlandığından eşdeğer direnci;

$$R_{245} = R_2 + R_{45} = 5 + 5 = 10\Omega$$

Devrenin eşdeğer direnci ise R_1 direncine seri bağlı, paralel bağlı R_3 ve R_{245} dirençlerinden oluştuğundan

$$R_{ab} = R_1 + \frac{R_3 R_{245}}{R_3 + R_{245}} = 6 + \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} = 12\Omega$$

R_{cd} eşdeğer direnci; R_4 ve R_5 paralel bağlı R_3 ise onlara seri bağlandığından

$$R_{345} = R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} = 15 + 5 = 20\Omega$$

R_{cd} ise paralel bağlı ; R_2 ve R_{345} dirençlerinden oluştuğundan

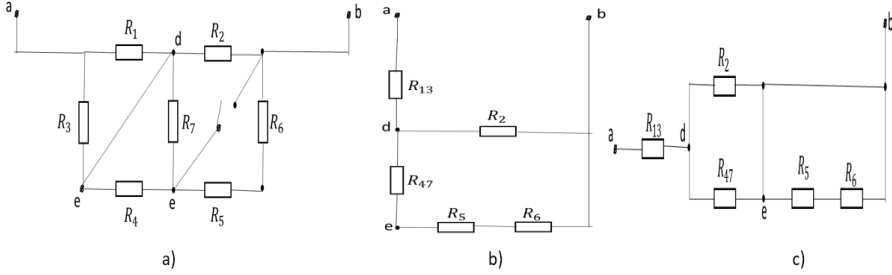
$$R_{cd} = \frac{R_2 R_{345}}{R_2 + R_{345}} = \frac{5 \cdot 20}{5 + 20} = 4\Omega$$

c ve d uçları arasındaki devre $R_2 + R_3$ ve R_4 ve R_5 paralel bağlanmış dirençlerinden oluştuğundan

$$\frac{1}{R_{df}} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2 + R_3} = \frac{1}{6} + \frac{1}{30} + \frac{1}{20} = \frac{1}{4} \text{ Si}$$

$$R_{df} = 4\Omega$$

olur.

Örnek2:

Şekil a da verilen devrenin direnç değerleri $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 10\Omega$ olduğu verilmiştir.

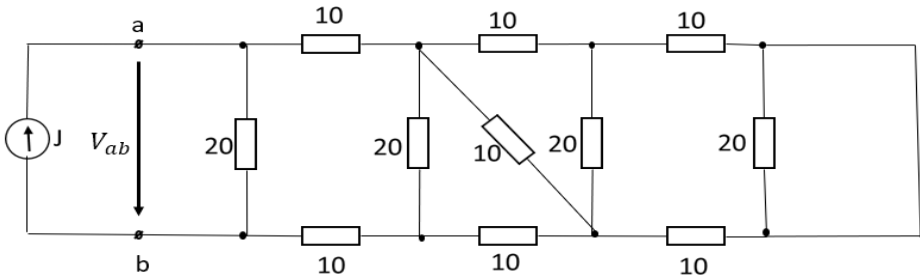
- I. K anahtarı açık
- II. K anahtarı kapalı durumlarında a ve b uçları arasındaki eşdeğer direnci bulunuz.

Çözüm: Her iki durumda c ve d noktaları üst-üste geldiğinden R_1 ve R_3 , R_4 ve R_7 paralel bağlandıklarından bunlar göz önüne alınırsa I. durumda b şeklindeki II. durumda ise c şeklindeki eşdeğer devreleri elde etmiş oluruz. c şeklinde ki devre seri bağlanmış R_5 ve R_6 dirençlerinin uçları kısa devre olduğundan

$$I. R_{ab} = R_{13} + \frac{R_2(R_{47} + R_5 + R_6)}{R_2 + R_{47} + R_5 + R_6} = 5 + \frac{10 \cdot (5 + 10 + 10)}{10 + 5 + 10 + 10} \cong 12,14\Omega$$

$$II. R_{ab} = R_{13} + \frac{R_{47}R_2}{R_{47} + R_2} = 5 + \frac{10 \cdot 5}{10 + 5} \cong 8,33\Omega$$

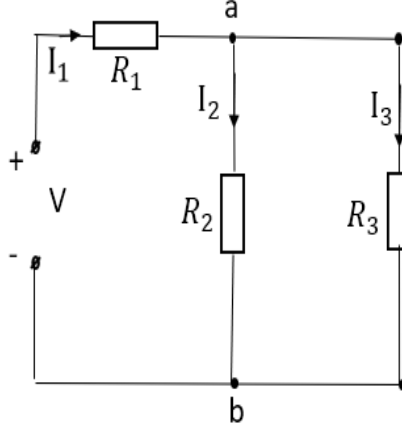
Örnek3: Şekilde verilen devrede akım kaynağı $J=10A$ olduğuna göre a ve b uçları arasındaki V_{ab} gerilimini hesaplayınız.



Çözüm:

$$R_{ab} = 11,85\Omega \text{ ise } V_{ab} = I \cdot R_{ab} = 118,5 V$$

Örnek5: Şekilde verilmiş devrede $V = 100V$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 20\Omega$ ve $R_3 = 30\Omega$ olduğuna göre dallardaki akımı bulunuz.

**Çözüm:**

I_1 akımını bulmak için devrenin eş değer direnci hesaplanır.

$$R_{eş} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 10 + \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = 22\Omega$$

$$I_1 = \frac{U}{R_{eş}} = \frac{100}{22} \cong 4,55 A$$

I_2 ve I_3 akımlarının bulunması için akımların uçlarındaki gerilimlerin bulunması gerekir. Ohm yasasına göre

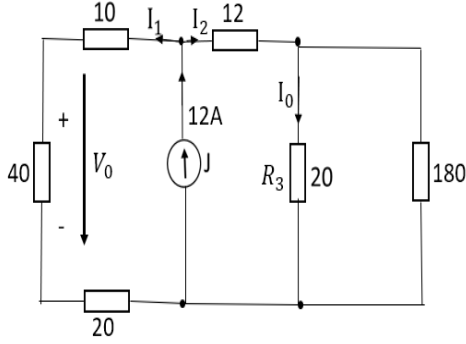
$$V_{ab} = I_1 \cdot \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 4,55 \cdot \frac{20 \cdot 30}{50} = 54,6V$$

$$I_2 = \frac{V_{ab}}{R_2} = \frac{54,6}{20} = 2,73A$$

$$I_3 = \frac{V_{ab}}{R_3} = \frac{54,6}{30} = 1,82A$$

Sonuçlara bakarak devrenin herhangi bir dalından akan akımı bulmak için ana daldaki akım komşu dalın direnci ile çarpılarak, dalların dirençleri toplamına bölünmesi gerekir. Buna komşu dal yöntemi denir.

Örnek4: Şekilde verilen devrede V_0 gerilimini ve I_0 akımını bulunuz.



Çözüm:

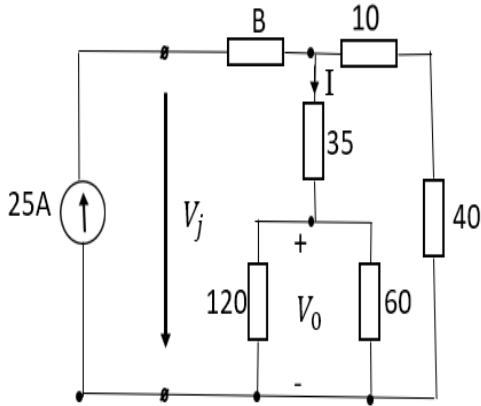
Önce komşu dal yöntemi kullanılarak I_1 ve I_2 akımları bulunur.

$$I_1 = J \frac{12 + \frac{20 \cdot 180}{20 + 180}}{12 + \frac{20 \cdot 180}{20 + 180} + 10 + 40 + 20} = 12 \frac{30}{100} = 3,6A$$

$$I_2 = J - I_1 = 12 - 3,6 = 8,4A$$

$$I_0 = I_2 \frac{180}{180 + 20} = \frac{8,4 \cdot 180}{200} = 7,56A$$

$$V_0 = I_1 40 = 3,6 \cdot 40 = 144V$$



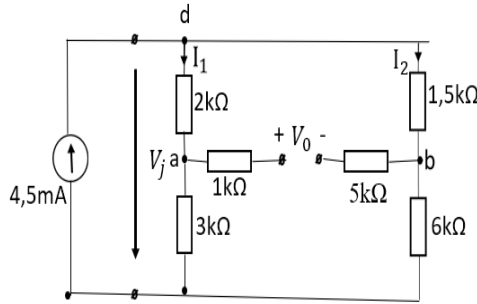
Örnek5: Şekilde verilmiş devrede V_j ve V_0 gerilimlerini hesaplayınız.

Çözüm:

$$V_j = J \left[B + \frac{(10+40) \cdot \left(35 \frac{120 \cdot 60}{120+60} \right)}{10+40+35 + \frac{120 \cdot 60}{120+60}} \right] = 25.38 = 950V$$

$$I = 25 \cdot \frac{10+40}{35 + \frac{120 \cdot 60}{120+60} + 10+40} = 10A$$

$$V_0 = 10 \frac{120 \cdot 60}{120+60} = 400V$$



Örnek6: Şekilde verilmiş devrede V_0 gerilimini bulunuz.

Çözüm:

$1k\Omega$ ve $5k\Omega$ dirençlerinden akım akmadığından gerilim düşümü alınmaz ve

$$V_0 = V_a - V_b \text{ olur.}$$

$$V_d - V_b = I_2 \cdot 1,5 \cdot 10^3$$

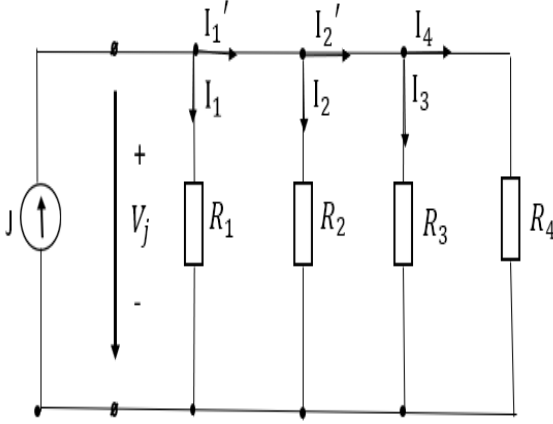
$$-(V_d - V_a = I_1 \cdot 2 \cdot 10^3)$$

$$V_0 = V_a - V_b = I_2 \cdot 1,5 \cdot 10^3 - I_1 \cdot 2 \cdot 10^3$$

$$V_j = 4,5 \cdot 10^{-3} \frac{(1,5+6)(2+3)}{1,5+6+2+3} 10^3 = 4,5 \cdot 3 = 13,5 V$$

$$I_1 = 4,5 \cdot 10^{-3} \frac{1,5 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^3} = 2,7mA$$

$$I_2 = 4,5 - 2,7 = 1,8mA; V_0 = 1,8 \cdot 1,5 - 2,7 \cdot 2 = -2,7V$$



Örnek7: $J = 10mA$, $V_j = 10V$, $I_1 = 4I_2$, $I_2 = 8I_3$, $I_3 = 9I_4$ olduğuna göre şekilde verilen devrenin bilinmeyen direnç değerlerini (R_1, R_2, R_3 ve R_4) hesaplayınız.

Çözüm:

$$I_2' = I_3 + I_4 = 9I_4 + I_4 = 10I_4$$

$$I_1' = I_2 + I_2' = 8I_3 + 10I_4 = 8 \cdot 9I_4 + 10I_4 = 82I_4$$

$$J = I_1 + I_1' = 4 \cdot 82I_4 + 82I_4 = 370I_4$$

$$I_4 = \frac{J}{370} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{370} = 0,027 \cdot 10^{-3}$$

$$R_4 = \frac{V_j}{I_4} = \frac{10}{0,027 \cdot 10^{-3}} = 370,37 \cdot 10^3 \Omega$$

$$R_3 = \frac{V_j}{I_3} = \frac{10}{9 \cdot 0,027 \cdot 10^{-3}} = 41,15 \cdot 10^3 \Omega$$

$$R_2 = \frac{V_j}{I_2} = \frac{10}{8 \cdot 9 \cdot 0,027 \cdot 10^{-3}} = 5,14 \cdot 10^3 \Omega$$

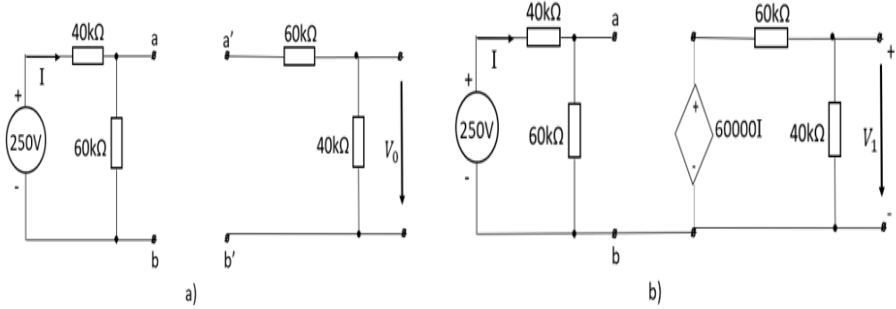
$$R_1 = \frac{V_j}{I_1} = \frac{10}{4.8.9.0,027.10^{-3}} = 1,286.10^3 \Omega$$

$$R_{eş} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{1,286.10^3} + \frac{1}{5,14.10^3} + \frac{1}{41,15.10^3} + \frac{1}{370,37.10^3}}$$

$$= \frac{1}{0,778.10^{-3} + 0,195.10^{-3} + 0,024.10^{-3} + 0,003.10^{-3}} = \frac{10^3}{1} = 10^3 \Omega$$

$$\text{kontrol; } R_{eş} = \frac{V_j}{J} = \frac{10}{10.10^{-3}} = 10^3 \Omega$$

Örnek9: Şekilde verilen devrelere göre



- a) Şekil-a a ve b noktalarının potansiyellerinin a' ve b' potansiyellerinin eşit olduğu bilinmektedir. Buna göre V_0 gerilimini bulunuz.
- b) Şekil-b de verilmiş akım kontrollü gerilim kaynağının oluşturduğu V_0 gerilimini bulunuz.

Çözüm:

a)

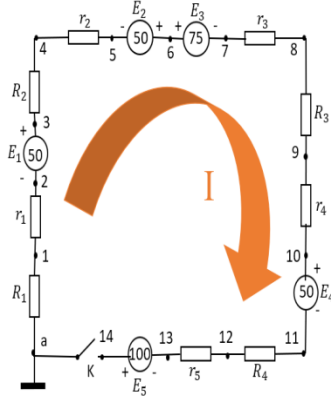
$$V_{ab} = \frac{250}{(40+60)10^3} \cdot 60 \cdot 10^3 = 150V$$

$$V_0 = \frac{150}{(60+40)10^3} \cdot 40 \cdot 10^3 = 60V$$

b)

$$I = \frac{250}{(40+60)10^3} = 2,5 \cdot 10^{-3} A$$

$$V_0 = \frac{60000 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{(60+40)10^3} \cdot 40 \cdot 10^3 = 60V$$



Örnek10: Şekilde verilen devrenin potansiyel diyagramını çiziniz.
Kaynakların EMK ları

$$E_1 = E_2 = E_4 = 50V, E_3 = 75V, E_5 = 100V$$

Kaynakların iç dirençleri

$$r_1 = r_2 = r_4 = 4\Omega, r_3 = 6\Omega, r_5 = 8\Omega$$

Dış devre dirençleri

$$R_1 = 20\Omega, R_2 = 32\Omega, R_3 = 27\Omega, R_4 = 45\Omega$$

Çözüm:

I akımının pozitif yönü şekilde verildiği gibi alınırsa, Ohm yasasına göre;

$$\begin{aligned} I &= \frac{\sum E}{\sum R} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5}{R_1 + r_1 + R_2 + r_2 + R_3 + r_3 + R_4 + r_4 + r_5} \\ &= \frac{50+50-75-50+100}{20+4+32+4+27+6+45+4+8} = \frac{75}{150} = 0,5A \end{aligned}$$

Potansiyel diyagramın oluşturulabilmesi için noktanın potansiyelinin bilinmesi gerekir. Bu yüzden a noktası yere bağlayarak potansiyel '0' alır. Diğer noktaların potansiyeli a noktasının potansiyeline göre belirlenir.

1 noktasının potansiyeli, a noktasının potansiyelinden R_1 deki gerilim düşümü kadar küçük olur.

$$V_1 = V_a - IR_1 = 0 - 0,5 \cdot 20 = -10V$$

$$V_2 = V_1 - Ir_1 = -10 - 0,5 \cdot 4 = -12V$$

3 noktasının potansiyeli 2 noktasının potansiyelinden E_1 kadar büyük alınır.

$$V_3 = V_2 + E_1 = -12 + 50 = 38V$$

$$V_4 = V_3 - IR_2 = 38 - 0,5.32 = 22V$$

$$V_5 = V_4 - Ir_2 = 22 - 0,5.4 = 20V$$

$$V_6 = V_5 + E_2 = 20 + 50 = 70V$$

$$V_7 = V_6 - E_3 = 70 - 75 = -5V$$

$$V_8 = V_7 - Ir_3 = -5 - 0,5.6 = -8V$$

$$V_9 = V_8 - IR_3 = -8 - 0,5.27 = -21,5V$$

$$V_{10} = V_9 - Ir_4 = -21,5 - 0,5.4 = -23,5V$$

$$V_{11} = V_{10} - E_4 = -23,5 - 50 = -73,5V$$

$$V_{12} = V_{11} - IR_4 = -73,5 - 0,5.45 = -96V$$

$$V_{13} = V_{12} - Ir_5 = -96 - 0,5.8 = -100V$$

$$V_{14} = V_{13} + E_5 = -100 + 100 = 0V$$

K anahtarının açık olduğu durumda devreden akan akım $I=0$ A olduğundan dirençlerdeki gerilim düşümleri de sıfır olur. Potansiyel ancak kaynaklara göre değişir.

$$V_{a'} = 0 \text{ durumunda}$$

$$V_{1'} = V_{2'} = 0$$

$$V_{3'} = E_1 = 50V$$

$$V_{4'} = V_{5'} = V_{3'} = 50V$$

$$V_{6'} = V_{5'} + E_2 = 100V$$

$$V_{7'} = V_{6'} - E_3 = 25V$$

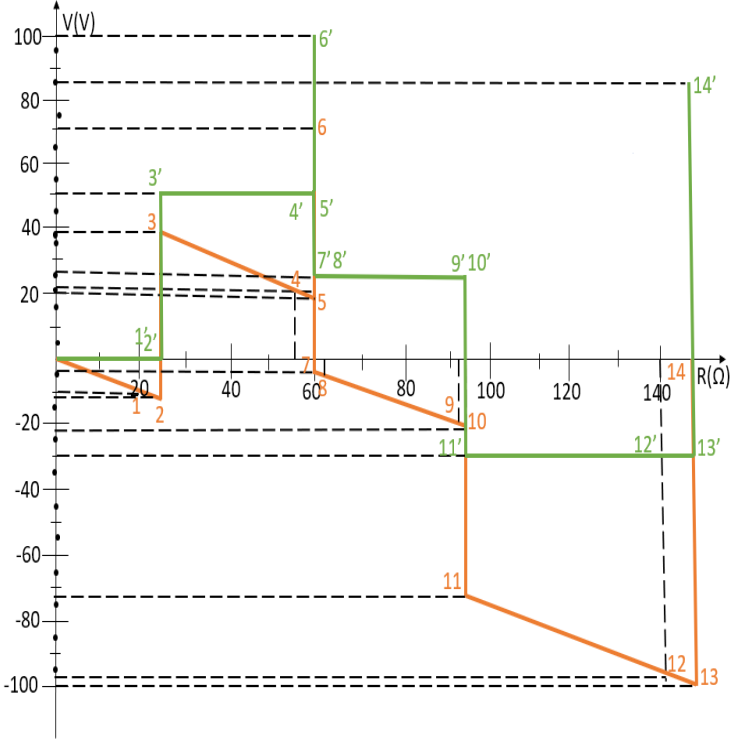
$$V_{10'} = V_{9'} = V_{8'} = V_{7'} = 25V$$

$$V_{11'} = V_{10'} - E_4 = -25V$$

$$V_{13'} = V_{12'} = V_{11'} = -25V$$

$$V_{14'} = V_{13'} + E_5 = -25 + 100 = 75V$$

Bulunan potansiyellere göre aşağıdaki potansiyel diyagramı çizilir.



6. Kaynaklar

Mohindru, P., & Mohindru, P. (2021). *Electronic Circuit Analysis using LTspice XVII Simulator*. *Electronic Circuit Analysis using LTspice XVII Simulator*. doi:10.1201/9781003199489

Rahmani-Andebili, M. (2021). *AC Electrical Circuit Analysis*. *AC Electrical Circuit Analysis*. doi:10.1007/978-3-030-60986-3

BÖLÜM II

ELEKTRİK DEVRELERİNİN ANALİZİ VE PROBLEM ÇÖZÜMLERİ

Teoman Karadağ

(Dr. Öğr. Üyesi), İnönü Üniversitesi,
e-mail: teoman.karadag@inonu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-7682-7771

1. Elektrik Ölçüm Cihazları

Elektrik sistemlerinde ve şebekelerinde çalışan elektrik ünitelerinin çalışma rejimlerinin kontrol edilebilmesi için birçok ölçüm cihazı kullanılmaktadır. Bu cihazlar akım, gerilim, güç, $\cos \varphi$ değeri, frekans ve enerji değerlerinin ölçümü için kullanılır.

Günümüzde yukarıda bahsedilen parametrelerin ölçümü için analog ya da dijital cihazlar kullanılır. Dijital cihazların birçok üstünlüğü olmasına rağmen yüksek duyarlılık ve hassasiyet istenilen durumlarda analog cihazlar kullanılmaktadır. Analog ölçüm cihazları genellikle ibrelili cihazlardır.

1.1. Elektrik Ölçüm Cihazlarının Hataları

Ölçüm cihazlarından okunan değer esas değerinden farklı olabiliyor çünkü birçok parametre (hareketli kısımlarda sürtünme, dış manyetik ve elektrik alanları, ısıнын değişimi v.b) ölçüm sistemine etki etmektedir.

Cihazdan okunan değer ile parametrenin esas değeri arasındaki farka ‘mutlak hata’ denir.

— ise ‘bağlı hata’ olarak adlandırılır.

Standartlara göre cihazlar ölçüm duyarlılığı açısından sekiz sınıfa ayrılır;

0,05- 0,1- 0,2- 0,5 – 1- 1,5- 2,5– 4

Duyarlılık sınıfı cihazın skalasında rakamla gösterilir. Örneğin 1,5 duyarlılık sınıfı yüzde olarak kullanılan cihazın dönüştürülmüş hatasıdır yani mutlak hatanın maksimum değerinin, cihazın skalasında verilmiş nominal değere oranıdır.

Eğer duyarlılık sınıfı 2,5 olan voltmetrenin skalası 50V gerilimle hesaplanmışsa mutlak hata;

Ölçülen parametrenin gerçek değeri 40 aralığında olacaktır.

— Hata oluşturur.

Eğer bu cihaz ile ölçülen gerilim 10V ise bağlı hata;

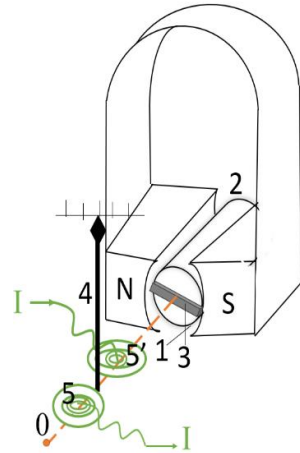
— olur. Kısacası ölçüm değeri küçüldükçe hata büyür.

1.2. Ölçüm Cihazları

Çalışma prensiplerine göre ölçüm cihazları aşağıdaki türlere ayrılır.

- Manyetoelektrik
- Elektromanyetik
- Elektrodinamik
- Elektrostatik
- Endüksiyon

Manyetoelektrik ölçüm cihazının iç yapısı şekil1 de verilmiştir. Manyetik devreyi nal şeklinde mıknatıs ve iki çelik sarsılmaz göbekten oluşmaktadır. 1 hava aralığından 0 miline sabitlenmiş, 3 çerçevesi



Şekil 1

serbest dönebiliyor. 5-5' yaylarının yardımı ile çerçeveye verilmiş I akımının yarattığı elektromanyetik kuvvet F_{em} bir dönme momenti oluşturur.

$$M_d = F_{em} \cdot d = WBI\ell d = C_1 I \quad (1)$$

$d - \ell$ çerçeve uzunluğu ve eni

$C_1 - \omega$ sarım sayısı

B manyetik alana bağlı bir katsayı

Çerçevenin dönmesini 5 ve 5' yaylarını oluşturduğu ters yöndeki M_t momenti engeller.

$$M_t = C_2 \cdot \lambda \quad (2)$$

C_2 yayların sertliğini karakterize eden katsayı

λ çerçevenin dönme açısı

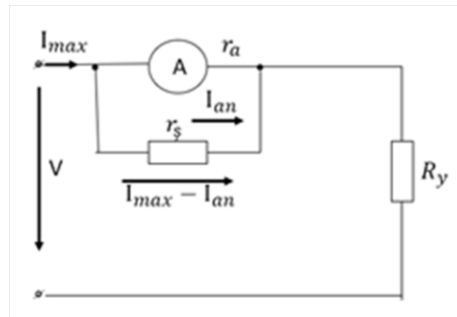
$M_d = M_t$ ve $C_1 I = C_2 \lambda$ ise

$$\lambda = \frac{C_1}{C_2} I = C I \quad (3)$$

λ akım ile orantılı olduğundan ($\lambda \propto I$) Manyetoelektrik cihazlarında skala eşit aralıklara bölünür.

1.3. DC Gerilim Devrelerinde Akım ve Gerilim Ölçümü

Herhangi bir devreden geçen akımı ölçmek için devreye seri olarak manyetoelektrik sistemli cihaz bağlanmalıdır. Ampermetrenin kaynaktan aldığı gücü düşürmek amacıyla iç direnci çok küçük ($0,1/0,2\Omega$) seçilmelidir. Bu nedenle çerçeve yoğun telden az sayıda sarımla hazırlanmaktadır. Ampermetrenin ölçüm değerini büyütme için DC akımlarda ampermetreye paralel (şönt) r_s direnci bağlanır (Şekil2). Şönt direnci;



Şekil 2

$$\frac{r_s}{r_a} = \frac{I_{an}}{I_{max} - I_{an}} \quad \text{--- (4)}$$

I_{max} şönt bağlandıktan sonra ölçümü mümkün olan akımın en büyük değeri

I_{an} şönt bağlanmadan ampermetrenin ölçme bildiği nominal akım değeri

$$r_s = r_a \frac{I_{an}}{I_{max} - I_{an}} \quad \text{--- (5)}$$

R_y direncinin değerinde devreden akan I akımı;

$$\frac{I}{I_a} = \frac{I_{max}}{I_{an}} = \frac{r_a + r_s}{r_s} = K \quad \text{ve} \quad I = KI_a \quad \text{--- (6)}$$

I_a ampermetrenin göstergesi

eğer ampermetrenin skalası şönt bağlantıya bakılarak derecelenmişse, ibre R_y den geçen akımı ölçer.

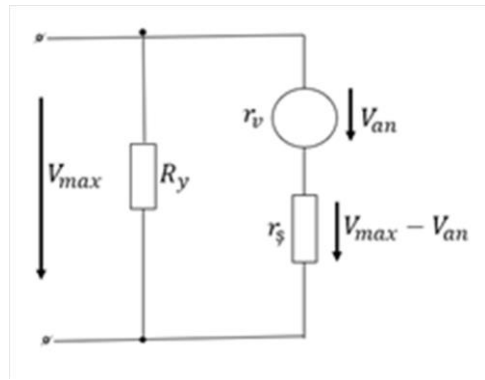
Örnek: $I_{an} = 5A$ ampermetrenin skalası 100 eşit parçaya bölünmüştür. Ampermetrenin iç direnci $r_a = 0,15\Omega$ olduğuna göre $I_{max} = 100A$ akımının ölçülebilmesi için gereken şönt direncini hesaplayınız.

$$r_s = r_a \frac{I_{an}}{I_{max} - I_{an}} = 0,15 \frac{5}{100 - 5} = 0,00789\Omega$$

Şönt bağlandıktan sonra ampermetrenin her bir bölmesi;

$$\frac{100}{100} = 1A$$

Elektrik devresindeki herhangi bir elemanın gerilim ölçümü için elemanın uçlarına voltmetre bağlanır. Voltmetrenin enerji kayıplarını düşürmek ve devreye etkisini minimuma indirmek nedeniyle iç direnci çok çok yüksek olmalıdır. Sargı sayım sayısı çok ve ince telden oluşmaktadır. Voltmetrenin sargısı genellikle 100 V ayarlanır. Ölçüm sınırını büyütmek için seri olarak direnç bağlamak gerekir (Şekil3).



Şekil 3

r_s direnç değeri;

$$\frac{r_s + r_v}{r_v} = \frac{V_{max}}{V_{vn}} \quad \text{--- (7)}$$

V_{max} r_s bağlandığında V ölçüm sınırı

V_{vn} r_s olmadığı durumda V ölçüm sınırı

$$r_s = r_v \frac{V_{max} - V_{vn}}{V_{vn}} \quad \text{--- (8)}$$

Voltmetrenin pratikte ölçtüğü V gerilimi;

$$\frac{V}{V_v} = \frac{V_{max}}{V_{vn}} = \frac{r_s + r_v}{r_v} = K \quad \text{veya} \quad V = KV_v \quad \text{--- (9)}$$

V_v voltmetrenin gösterimi

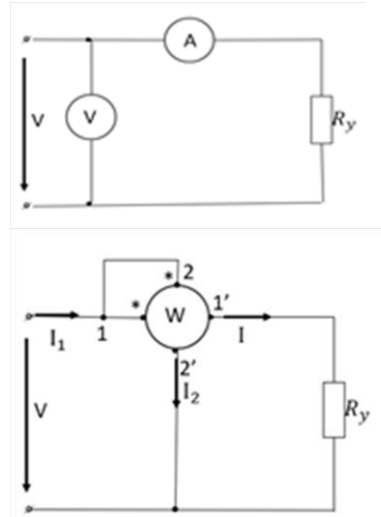
Voltmetrenin skalası r_s direncine göre derecelenir.

1.4. DC Gerilim Devrelerinde Güç Ölçümü

DC gerilim devrelerinde güç ölçümü için AV yöntemi kullanılır (Şekil4). Ampermetre-voltmetre de ölçümler alındıktan sonra;

$$P = V \cdot I \quad \text{--- (10)}$$

İfadesinden bulunur. DC ve AC devrelerdeki güç ölçümü için elektrodinamik sistemli voltmetreler kullanılmaktadır. Cihazın 1-1 sarsılmaz sargısı akım sargısı olarak devreye seri bağlanır. 2-2 gerilim sargısı ise dönen sargı olup devreye paralel bağlanır. Her iki sargının oluşturdukları manyetik alanların toplamı ibreyi döndüren bir moment oluşturur buda R_y direncinin kaynaktan aldığı güçtür.



Şekil 4

Örnek: W akım sargısının direnci $r_a = 0,1\Omega$ gerilim sargısının direnci ise $r_v = 10000\Omega$ olduğuna göre harcadığı gücü bulunuz. DC kaynak gerilimi $V=220\text{ V}$, W gösterimi ise $W=615\text{ wt}$

Çözüm: Akım sargısındaki akım;

$$I_a = \frac{W}{V} = \frac{615}{220} = 2,8A$$

Güç kayıpları;

$$\Delta P = I_a^2 r_a = 2,8^2 \cdot 0,1 = 0,8\text{ wt}$$

Gerilim sargısındaki güç kayıpları;

$$\Delta P_v = \frac{V^2}{r_v} = \frac{220^2}{10000} = 4,8\text{ wt}$$

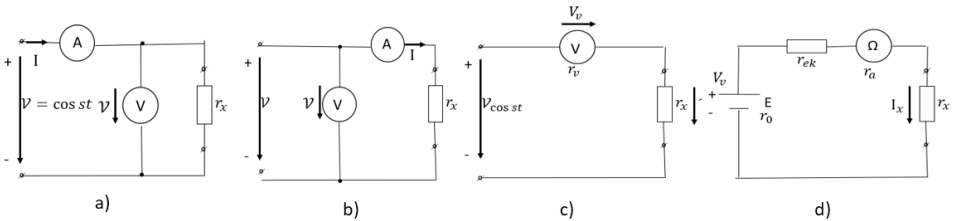
W tüm kayıplar;

$$\Delta P_w = \Delta P_a + \Delta P_v = 0,8 + 4,8 = 5,6\text{ wt}$$

$$\Delta P = \frac{\Delta P_w}{W} \cdot 100 = \frac{5,6}{615} \cdot 100 = 0,9\%$$

Bakılarak düşük güçlerin ölçümünde, örneğin 50 wt de güç kayıpları gerilim sargısındaki güç kayıplarına eşit alınır. $\frac{4,8}{50} \cdot 100 \cong 96\%$ güç kayıpları büyük alınmalıdır.

1.5. Direnç Ölçümü



Şekil 5

Küçük değerli dirençlerin ölçümü için şekil5-a orta ve büyük değerli dirençlerin ölçümü için şekil5-b de verilen devreler kullanılır. Ohm yasasına göre direnç değeri bulunur.

$$r_x = \frac{V}{I} (\Omega) \quad \text{--- (11)}$$

Küçük değerli dirençler

$$r_x \leq 1\Omega$$

Orta değerli dirençler

$$r_x = 1/10000\Omega$$

Büyük değerli dirençler

$$r_x = 10000/100000\Omega$$

Çok büyük değerli dirençler

$$r_x > 100000\Omega$$

Büyük değerli dirençler şekil5-c de verilen devre ile ölçmek mümkündür.

$$E = \frac{V_v}{r_v} = \frac{V-V_v}{r_x} \quad \text{ise} \quad \frac{r_x}{r_v} = \frac{V-V_v}{V_v} \quad \text{ve} \quad r_x = r_v \left(\frac{V}{V_v} - 1 \right) \quad \text{--- (12)}$$

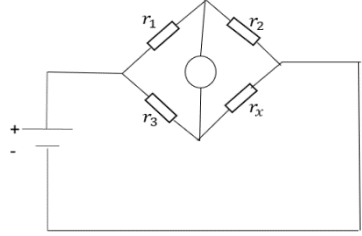
r_v V'nin iç direnci

Pratikte dirençlerin ölçümü için şekil5-d de verilen devrede olduğu gibi Ω değerine göre derecelenmiş ohmmetre kullanılır.

$$I_x = \frac{E}{(r_a + r_{ek} + r_0) + r_x} \quad \text{--- (13)}$$

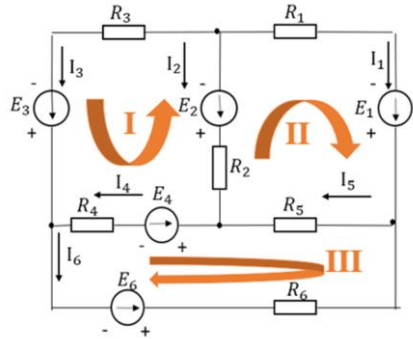
Ölçümün E değerinden bağımsız olması için pratikte çerçeveli cihazlar ve köprüler kullanılır.

$$r_x = \frac{r_2 r_3}{r_1}$$



2. Elektrik Devrelerinin Analizi

Devre analiz örneklerini Kirchhoff yasalarını kullanarak çözmek mümkündür. Eğer devrenin tüm parametreleri belli ise önce akımların pozitif yönleri seçilmelidir (Çözümde sonra akım değerleri pozitif olan akımlar seçilen yönde, negatif değerde olanlar ise tersi yöndedir.). Karmaşık elektrik devrelerinin düğüm noktaları sayısı D, dallarının sayısı B ise Kirchhoff I. yasasına göre; $K_1 = D - 1$ sayıda II. yasasına göre; $K_2 = B - D + 1$ sayıda bağımsız denklem yazılabilir.



Şekil 1

Örnek olarak şekil1 de verilmiş devreyi göz önüne alalım. Görüldüğü gibi devrede 4 düğüm noktası vardır. Bu devre için I. yasaya göre;

$K_1 = D - 1 = 4 - 1 = 3$ bağımsız denklem yazılabilir.

1. düğüm noktası için $I_1 + I_2 + I_3 = 0$
2. düğüm noktası için $I_6 - I_3 - I_4 = 0$ _ _ _ (1)
3. düğüm noktası için $I_5 - I_6 - I_1 = 0$

Bu durumda 4 düğüm noktası için denklem yazılırsa;

$$I_4 - I_2 - I_5 = 0 \quad \text{_ _ _ (2)}$$

(1) ve (2) denklemleri toplandığında $0=0$ eşitliği elde edilir. Bu da denklemlerin bağımlı olduğunu gösterir. Şekil1 de verilen devre için ancak 3 bağımsız denklem yazılabilir.

Kirchhoff II. yasasına göre ise;

$K_2 = B - D + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ bağımsız denklem yazılabilir. Şekil1 deki devre için üç çevre denklemi yazılmalıdır. Denklemlerin yazılabilmesi için çevreler için akım yönleri seçilmelidir. I., II. ve III. çevreleri için pozitif hareket yönü şekil1 de olduğu gibi seçelim. Bu çevreler için Kirchhoff II. yasasına göre;

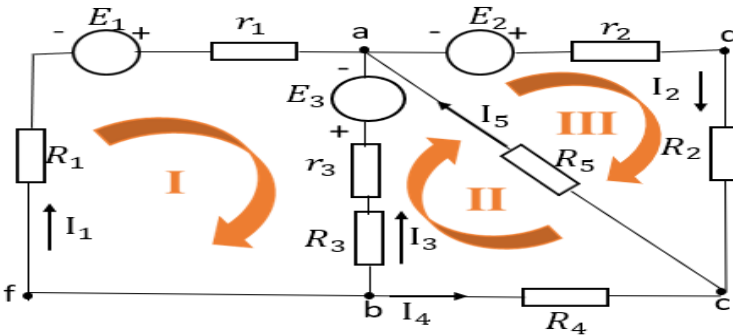
$$\text{I. çevre için} \quad -E_4 + E_2 - E_3 = I_2 R_2 + I_4 R_4 - I_3 R_3$$

$$\text{II. çevre için} \quad E_1 - E_2 = I_1 R_1 + I_5 R_5 - I_2 R_2 \quad \text{_ _ _ (3)}$$

$$\text{III. çevre için} \quad E_4 - E_6 = -I_4 R_4 - I_5 R_5 - I_6 R_6$$

Böylelikle karmaşık elektrik devrelerinin çözümü için 6 bağımsız denklem (1-3) yazılmış oldu. Denklemlerin çözümü sonucu bilinmeyen parametreler bulunur.

Örnek: Şekil2 de verilen devre için Kirchhoff yasalarını kullanarak dal akımlarını bulunuz ve güçler balansı yazınız.



Şekil 2

$$E_1 = 15V, E_2 = 70V, E_3 = 5V$$

$$r_1 = r_2 = 1\Omega, r_3 = 2\Omega,$$

$$R_1 = 5\Omega, R_2 = 4\Omega, R_3 = 8\Omega, R_4 = 2,5\Omega, R_5 = 15\Omega$$

Çözüm:

$K_1 = D - 1 = 3 - 1 = 2$ Bağımsız denklem yazılmalı.

$K_2 = B - D + 1 = 5 - 3 + 1 = 3$ Bağımsız denklem yazılmalı.

a düğüm noktası için $-I_1 + I_2 - I_3 - I_5 = 0$ 1

b düğüm noktası için $I_1 + I_3 + I_4 = 0$ 2

I. çevre için $E_1 + E_3 = I_1(R_1 + r_1) - I_3(r_3 + R_3)$ 3

II. çevre için $-E_3 = I_3(r_3 + R_3) - I_4R_4 - I_5R_5$ 4

III. çevre için $E_2 = I_2(R_2 + r_2) + I_5R_5$ 5

Değerleri yerine yazarsak

$$20 = 6I_1 - 10I_3, -5 = 10I_3 - 2,4I_4 - 15I_5, 70 = 5I_2 + 15I_5$$

$$I_1 = 5A, I_2 = 8A, I_3 = 1A, I_4 = -6A, I_5 = 2A$$

Güçler balansı;

$$\sum EI = \sum I^2(R + r)$$

$$E_1I_1 + E_2I_2 - E_3I_3 = I_1^2(R_1 + r_1) + I_2^2(R_2 + r_2) + I_3^2(R_3 + r_3)$$

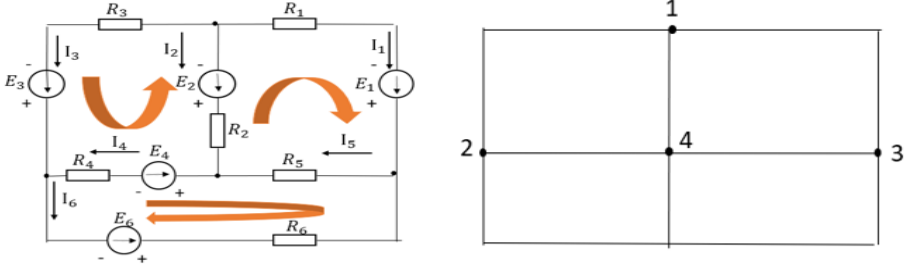
$$+I_4^2R_4 + I_5^2R_5 \quad 15.5 + 70.8 - 5.1$$

$$= 5^2.6 + 8^2.5 + 1^2.10 + 6^2.2,5 + 2^2.15 = 630$$

2.1. Topoloji Grafikleri

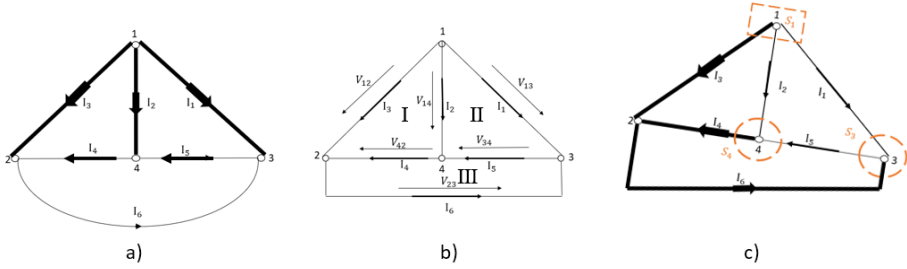
Elektrik devre analiz problemlerinin incelenmesinde özel durumlarda topolojik işlemlerin yapılması gerekiyor. Böyle durumlarda yönlenmiş ve yönlenmemiş topolojik grafikler kullanılmaktadır. Yukarıda bahsedilmiş Kirchhoff ve ohm yasalarından elde edilen denklemlerin türü hem devre parametrelerine hem de geometrik şekillerine (düğüm yerlerine, onları birleştiren dallara) bağlıdır.

Devrelerin geometrik şekillerini karakterize etmek için grafiklerin kullanılması mümkündür. Devrelerin dallarını gösteren grafik kısımlarına grafik dalları, bu dalların birleştiği noktalara grafik düğümleri denir.



Şekil 1

Şekil1 de verilmiş devrenin yönlendirilmemiş grafiği verilmiştir. Grafiğin her bir dalı devrenin bir dalını göstermektedir.



Şekil 2

Şekil2-a da ise akımların yönünü gösteren yönlendirilmiş grafik verilmiştir. Devrenin grafikleri devrenin dal ve düğüm sayılarını değiştirilmeden istenilen şekilde (Şekil2-b, c) gösterilebilir. Yönlü grafikler için (Şekil2-b) Kirchhoff yasalarına göre denklemler yazılabilir.

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$I_6 - I_3 - I_4 = 0$$

$$I_5 + I_1 - I_6 = 0$$

$$V_{14} + V_{42} - V_{12} = 0$$

$$V_{13} - V_{23} - V_{12} = 0$$

$$V_{23} + V_{34} + V_{42} = 0$$

Denklemler yukarıda bahsedilen Kirchhoff denklemleri ile karşılaştırılırsa aynı oldukları görülmektedir.

Bağımsız çevrelerin seçimlerinde; tüm düğüm noktalarını birleştiren ancak kapalı gözler oluşturmayan dalların toplamına 'ağaç' denir.

Şekil2-a, c ağaçlar koyu gösterilmiştir. Ağacın düğüm noktaları aralığına seri bağlanmış dalları yol oluşturur. Yollar her bir düğüm noktasını bir kes içerir. Örneğin şekil2-a da ki ağaç 2-3 düğüm noktaları arası yolu 3-1 dalları oluşturur.2-3 düğüm noktaları arasındaki 2 yol 6 dal bulunur. Bu iki yol bir kapalı çevre oluşturur.

Ağacın dalları sayısı "**D-1**" (Kirchhoff 1. yasasına göre yazılmış denklem sayısı) eşittir. Bir dal daha eklenirse yeni kapalı bir çevre oluşturur.

Ağacın içermediği dallara 'kiriş' (iletim dalı) denilir. Şekil2-a da verilen grafikte 4-5-6 dalları iletim dallarıdır. Grafiğin dal sayısı B olduğuna göre "**B-(D-1)**" iletim dal sayısına eşittir. Bu ise Kirchhoff 2. yasasına göre yazılmış denklemlerin sayısına eşittir. Örneğin şekil2-a ve şekil2-c grafiklerindeki dal sayısı B=6, düğüm noktası sayısı D=4 tür. Buna göre;

$$\text{Ağacın dal sayısı} \quad D - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$\text{İletim dalları sayısı} \quad B - D + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$$

Eğer her bir çevre grafik ağacının dallarını ve başka bir çevrenin içermediği bir iletim dalını içerirse, temel çevreler için $B - D + 1$ sayıda bağımsız denklem yazılabilir. Şekil2-a da verilen grafik için Kirchhoff 2. yasasına göre 3-2 ağaç dallarını, 4 iletim dalını; 3-1 ağaç dallarını, 6 iletim dalını; 2-1 ağaç dallarını ve 5 iletim dalını içeren çevreler için yazılabilir.

Düğüm noktalarını temel denklemleri yerine Kirchhoff 1. yasasını düğüm kesimleri için yazmak oluyor. Düğüm noktasının temel kesimi öyle bir kesimdir ki ağaç dalını bir kez içerir. Temel kesişimlerinin sayısı ağaç dallarının sayısına (D - 1) eşittir. Şekil2-c de verilen S_1, S_3, S_4 kesimleri verilmiştir. Kesim yüzeyine dik (normal) veya pozitif yönü ağaç dalı yönünde olabilir.

3. Kirchhoff Yasalarının Matris Şeklinde Yazılımı

Kirchhoff yasalarının matris şeklinde yazılabilmesi için şemanın topolojik matrisleri kullanılmalıdır.

3.1 Birleşim veya A-düğüm matrisi

Bu matris Kirchhoff 1. yasasına göre yazılmış bağımsız denklemlerin katsayılarından oluşturulan tablodur. i satırları grafik düğüm sayısından 1 eksik (D - 1), j sütunları ise dalların sayısına (B) eşittir. j dalı i düğümünü içerirse ve yönü düğüm yönüyle aynı ise matrisin elemanı $\mathcal{G}_{ij} = -1$ fakat ters yönde ise $\mathcal{G}_{ij} = +1$ olur. Eğer j dalı i düğümünü içermiyorsa matris elemanı $\mathcal{G}_{ij} = 0$ olur.

D=4 düğüm noktası ve B=6 dalı olan şekil2 de verilen grafik için yazılabilir.

$$A = \begin{vmatrix} +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 \end{vmatrix}$$

Bu matris Kirchhoff 1. yasasına göre yazılmış denklemlere denk geliyor. A matrisinde hangi dalın hangi düğüm noktasına birleştiği ve bu dallardaki akımların yönünü belirlediğinden matrisin akımların I sütun matrisine çarpımı Kirchhoff 1. yasasına eşdeğer oluyor. Kirchhoff 1. yasasının matris şeklinde yazılımı;

$$A.I = 0$$

Şekil2 için

$$I = \begin{vmatrix} I_1 & I_2 & I_3 & I_4 & I_5 & I_6 \end{vmatrix}$$

Matrislerinin çarpımından Kirchhoff düğüm denklemleri elde edilir. A matrisi tüm düğüm noktaları için yazılmışsa bağlatıcı matris (düğüm noktalarının) denilir.

3.2. *Q – kesim matrisi*

Kirchhoff 1. yasasına göre kesimler için yazılmış denklemlerin katsayılarının tablosudur. *i* satırları kesimlerin sayısından 1 eksik (D -1), *j* sütunları ise dalların sayısına (B) eşittir. *i* kesiti *j* dalını içerirse ve *j* dalının yönü *i* kesitinin yönü ile aynı ise matrisin elemanı $q_{ij} = +1$ fakat ters yönde ise $q_{ij} = -1$ olur. Eğer *i* kesiti *j* dalını içermiyorsa matris elemanı $q_{ij} = 0$ olur.

Örneğin şekil2-c grafiği için

$$Q = \begin{vmatrix} +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 \\ 0 & 1 & 0 & +1 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

Kesim matrisi ile Kirchhoff 1.yasası;

$$Q.I = 0$$

Eğer 3 kesitinin denklemleri (-1) ile çarpılırsa yukarıda verilen düğüm denklemleri elde edilir.

3.3. B – çevreler matrisi

Kirchhoff 2. yasasına göre $K=B - (D -1)$ sayıda bağımsız çevre denklemlerinin katsayılarından oluşturulmuş tablodur. K satırları çevrelere (K sayıda), j sütunları ise dallara (B sayıda) eşittir. K çevresi j dalını içerirse ve yönü çevrenin pozitif hareket yönü ile aynı ise matris elemanı $b_{Kj} = +1$ hareket yönüne ters ise $b_{Kj} = -1$ olur. K çevresi j dalını içermiyorsa $b_{Kj} = 0$ olur.

Örneğin şekil2-c de verilen grafiğin 2-4-3 dallarından oluşan (a), 5-6-4 dallarından oluşan (b) ve 1-6-3 dallarından oluşan (c) çevrelerinde pozitif hareket yönü saat ibresinin yönünde seçilirse;

$$B = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}$$

B matrisi V gerilimler sütunu ile çarpılırsa Kirchhoff 2. yasasının matris şeklinde denklemleri elde edilir.

$$B\mathcal{V} = 0$$

B matrisinin katsayıları dal gerilimlerinin işaretlerini belirler.

Örneğin şekil1 de verilmiş devrenin ve şekil2-b devre grafiği için B matrisinin gerilimler sütunu;

$$\mathcal{V} = \|\mathcal{V}_{13} \quad \mathcal{V}_{14} \quad \mathcal{V}_{12} \quad \mathcal{V}_{42} \quad \mathcal{V}_{34} \quad \mathcal{V}_{23}\|$$

3 bağımsız denklem elde edilir.

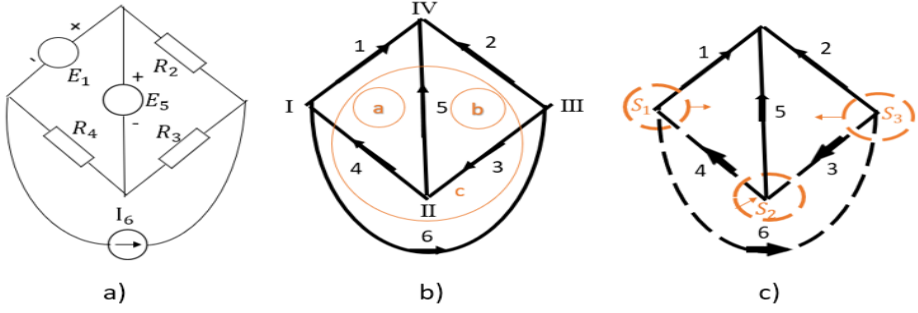
$$V_{14} - V_{12} + V_{42} = 0$$

$$-V_{42} - V_{34} - V_{23} = 0$$

$$V_{13} - V_{12} - V_{23} = 0$$

$\mathcal{V}_{Kj} = \mathcal{V}_K - \mathcal{V}_j$ olduğu ve dallar için ohm yasası göz önüne alınırsa Kirchhoff 2. yasasına göre yazılmış denklemler elde edilir.

Örnek1: Şekil 3 de $\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_5, I_6, R_2, R_3, R_4, R_5$ değerleri bellidir. $\mathcal{V}_1 = E_1$ ve $\mathcal{V}_5 = E_5$ olduğu bilindiğine göre I_1, I_5 ve \mathcal{V}_6 değerlerinin bulunması için denklemleri yazınız.



Şekil 3

Çözüm:

Saat ibresi yönünde hareket ederek a, b ve çevreleri için B çevre matrislerini oluşturalım.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{V}_1 \\ \mathcal{V}_2 \\ \mathcal{V}_3 \\ \mathcal{V}_4 \\ \mathcal{V}_5 \\ \mathcal{V}_6 \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \vdots & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \vdots & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \vdots & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{V}_1 \\ \mathcal{V}_2 \\ \mathcal{V}_3 \\ \cdots \\ \mathcal{V}_4 \\ \mathcal{V}_5 \\ \mathcal{V}_6 \end{bmatrix} = 0$$

$$D(-1) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{V}_1 \\ \mathcal{V}_5 \\ \mathcal{V}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{V}_2 \\ \mathcal{V}_3 \\ \mathcal{V}_4 \end{bmatrix} = 0$$

Matrisin sütun ve satırları öyle yazılır ki bu matris iki matrisin toplamı şeklinde gösterilebilsin.

Matrisini kullanarak I, II ve III kesimler için Kirchhoff 1. yasasını yazalım.

$$\begin{matrix} S_1 \\ S_3 \\ S_2 \end{matrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = 0$$

İfadesinde sütun ve satırların yerleri öyle değiştirilmeli ki I_2, I_3, I_4 akımları I_5, I_6, I_1 akımlarına bağımlı olsun.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & \vdots & -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & \vdots & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ \dots \\ I_1 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

(a) şemasının direnç olan dalları için yazalım.

$$R_2 I_2 = \mathcal{V}_2; R_3 I_3 = \mathcal{V}_3; R_4 I_4 = \mathcal{V}_4$$

veya matris şeklinde ;

$$\begin{bmatrix} R_2 & 0 & 0 \\ 0 & R_3 & 0 \\ 0 & 0 & R_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{V}_2 \\ \mathcal{V}_3 \\ \mathcal{V}_4 \end{bmatrix}$$

Denklemlerinin birlikte çözümü sonucunda;

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{V}_1 \\ \mathcal{V}_5 \\ \mathcal{V}_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_2 & 0 & 0 \\ 0 & R_3 & 0 \\ 0 & 0 & R_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Olduğunu matrisleri seri çarparak elde ederiz.

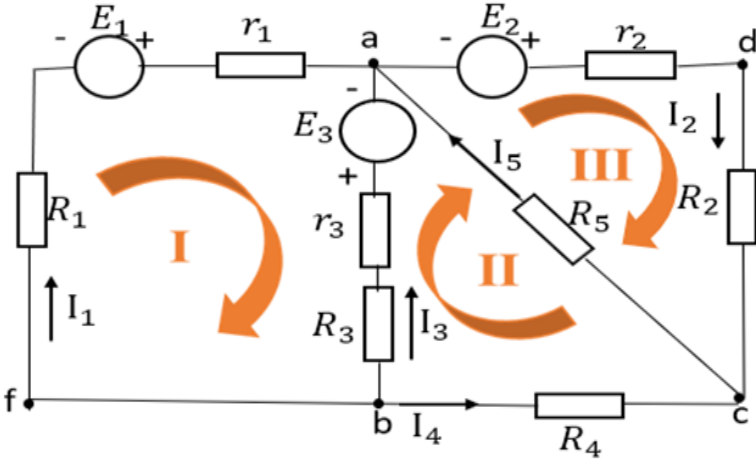
$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{V}_1 \\ \mathcal{V}_5 \\ \mathcal{V}_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -(R_2 + R_3) & -(R_2 + R_3) & -R_3 \\ -R_4 & 0 & -R_4 \\ R_2 & R_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = 0$$

Örnek2: Şekilde verilen devre için Kirchhoff yasalarını matris şeklinde yazınız.

$$E_1 = 15V, E_2 = 70V, E_3 = 5V$$

$$r_1 = r_2 = 1\Omega, r_3 = 2\Omega,$$

$$R_1 = 5\Omega, R_2 = 4\Omega, R_3 = 8\Omega, R_4 = 2,5\Omega, R_5 = 15\Omega$$



Çözüm:

Denklemler;

$$\text{a düğüm noktası için} \quad -I_1 + I_2 - I_3 - I_5 = 0 \quad \dots\dots\dots 1$$

$$\text{b düğüm noktası için} \quad I_1 + I_3 + I_4 = 0 \quad \dots\dots\dots 2$$

$$\text{I. çevre için} \quad E_1 + E_3 = I_1(R_1 + r_1) - I_3(r_3 + R_3) \quad \dots\dots\dots 3$$

$$\text{II. çevre için} \quad -E_3 = I_3(r_3 + R_3) - I_4R_4 - I_5R_5 \quad \dots\dots\dots 4$$

$$\text{III. çevre için} \quad E_2 = I_2(R_2 + r_2) + I_5R_5 \quad \dots\dots\dots 5$$

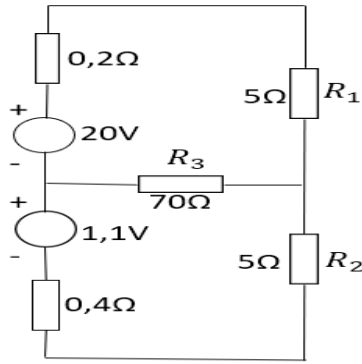
Genel şekilde Kirchhoff yasası

Matris şeklinde;

$$[A] \cdot [I] = [V]$$

$$\begin{array}{l} a \\ b \\ I \\ II \\ III \end{array} \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 6 & 0 & -10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & -2,5 & -15 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 15 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 20 \\ -5 \\ 70 \end{bmatrix}$$

Örnek3: Şekilde verilmiş devrenin yönlendirilmiş grafiğini çiziniz. Güçler balansı kontrolünü yapıp matris şeklinde Kirchhoff denklemlerini yazınız.



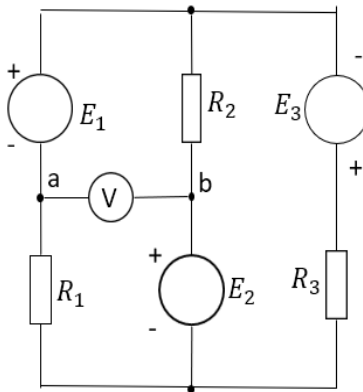
Çözüm:

$$I_1 = 2,5A$$

$$I_2 = 1,5A$$

$$I_3 = 1A$$

Örnek4: Şekilde verilen devrede akımları hesaplayınız, voltmetreden okunan değeri hesaplayınız, güçler balansı kontrolünü yapınız, matris şeklinde Kirchhoff denklemlerini yazınız. (Voltmetrenin iç direnci: ∞)



$$E_1 = 40V, E_2 = 5V, E_3 = 25V$$

$$R_1 = 5\Omega, R_2 = R_3 = 10\Omega$$

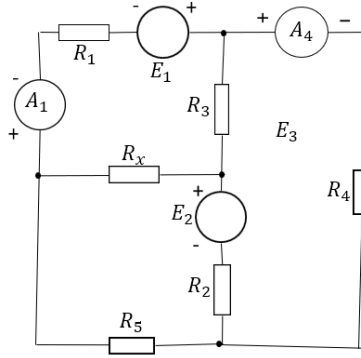
Çözüm:

$$I_1 = 5A, I_2 = 1A, I_3 = 4A, V_{ab} = 30V$$

Örnek5: $A_1 = 4mA, A_4 = 3mA, R_1 = R_2 = 1k\Omega$

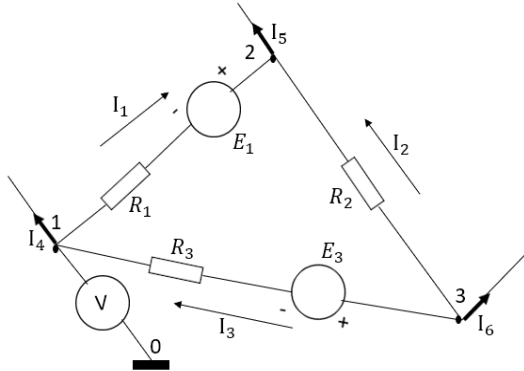
$$R_3 = 4k\Omega, R_4 = 2k\Omega, R_5 = 1k\Omega, R_{A_1} = R_{A_4} = 0$$

olduğuna göre E_1 ve R_x bulunuz.



Çözüm: $E_1 = 12V, R_x = 2k\Omega$

Örnek6: Şekilde verilen devrede düğüm noktalarının gerilimleri toprağa göre elektrostatik voltmetre ile ölçülmüş ve $V_{10} = -15V, V_{20} = 52V, V_{30} = 64V$ olduğu belirlenmiştir.



$$E_1 = 80V, E_3 = 70V, R_1 = 5\Omega, R_2 = 10\Omega,$$

$R_3 = 12\Omega$ olarak verildiğine göre akımları hesaplayınız.

Çözüm:

Önce düğüm noktaları arasında ki gerilimler hesaplanır.

$$V_{12} = V_{10} - V_{20} = -15 - 52 = -67V$$

$$V_{32} = V_{30} - V_{20} = 64 - 52 = 12V$$

$$V_{31} = V_{30} - V_{10} = 64 + 15 = 79V$$

Ohm yasasına göre dallardan akan akımlar

$$I_1 = \frac{V_{12} + E_1}{R_1} = \frac{-67 + 80}{5} = 2,6A$$

$$I_2 = \frac{V_{32}}{R_2} = \frac{12}{10} = 1,2A$$

$$I_3 = \frac{V_{31} - E_3}{R_3} = \frac{79 - 70}{12} = 0,75A$$

Kirchhoff 1. yasasına göre

$$0 = I_3 - I_4 - I_1 \rightarrow I_4 = I_3 - I_1 = 0,75 - 2,6 = -1,85A$$

$$0 = I_1 + I_2 - I_5 \rightarrow I_5 = I_1 + I_2 = 2,6 + 1,2 = 3,8A$$

$$0 = -I_2 - I_3 - I_6 \rightarrow I_6 = -I_2 - I_3 = -1,2 - 0,75 = -1,95A$$

Örnek7: Şekilde verilmiş devrede V ve W değerlerini hesaplayınız. $W_1 + W_2 = \sum I^2 R$ olup olmadığını belirleyiniz. Cihazların sargılarındaki kayıpları göz ardı ediniz.

Çözüm: Akımlar için şekil verilen akım yönleri kullanılarak Kirchhoff yasalarını yazalım.

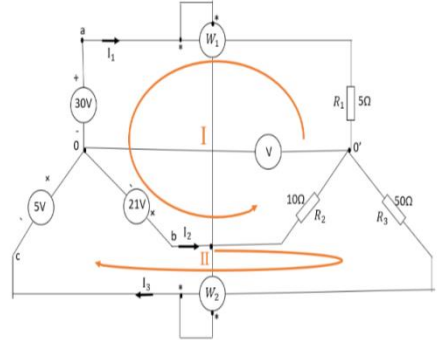
$$0' \text{ düğüm noktası için } I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\text{I. çevre için } -21 + 30 = 5I_1 - 10I_2$$

$$\text{II. çevre için } 5 + 21 = 10I_2 + 50I_3$$

$$9 = 5(I_3 - I_2) - 10I_2$$

$$3/26 = 10I_2 + 50I_3$$



$$2/9 = -15I_2 + 5I_3$$

$$78 = 30I_2 + 150I_3$$

$$18 = -30I_2 + 10I_3 +$$

$$96 = 160I_3$$

$$I_3 = \frac{96}{160} = 0,6A \quad I_2 = \frac{26-50I_3}{10} = -0,4A \quad I_1 = I_3 - I_2 = 1A$$

$$V_{0'} = V_0 + 30 - I_1 5$$

$$V = |V_0 - V_{0'}| = |-30 + I_1 5| = 25V$$

$$V_a = V_b - 21 + 30 \quad V_a - V_b = V_{ab} = 9V$$

$$V_c = V_b - 21 - 5 \quad V_c - V_b = V_{cb} = -26V$$

$$W_1 = I_1 V_{ab} = 1 \cdot 9 = 9wt$$

$$W_2 = (-I_3) V_{cb} = (-0,6)(-26) = 15,6wt$$

$$W_1 + W_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 = 9 + 15,6$$

$$= 1^2 \cdot 5 + 0,4^2 \cdot 10 + 0,6^2 \cdot 50 = 24,6$$

Örnek8: Şekilde verilen devrede Kirchhoff yasalarını kullanarak E ve J_1 bulunuz.

Çözüm:

I. çevre için Kirchhoff 2. yasası ;

$$10 \cdot 10^{-3} = i_x \cdot 1000 \rightarrow i_x = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{10^3}$$

$$= 10 \cdot 10^{-6} A$$

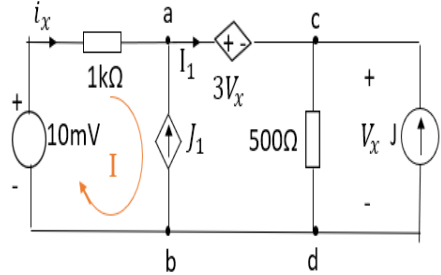
$$J_1 = 2 \cdot i_x = 20 \cdot 10^{-6} A$$

$$I_1 = i_x + J_1 = 3i_x = 30 \cdot 10^{-6} A$$

$$I = I_1 + J_1 = 0,3 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-3} = 0,3 \cdot 10^{-4} + 20 \cdot 10^{-4} = 20,3 \cdot 10^{-4} A$$

$$V_x = I \cdot 500 = 20,3 \cdot 10^{-4} \cdot 500 = 101,5 \cdot 10^{-2} = 1,015V$$

$$E = 3V_x = 3,045V$$



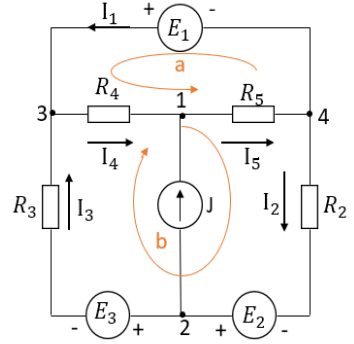
Örnek9: Şekilde verilen devrede;

$$E_1 = 100V, E_2 = 150V, E_3 = 28V$$

$$J = 2mA$$

$$R_2 = 2k\Omega, R_3 = 4k\Omega, R_4 = 6k\Omega, R_5 = 8k\Omega$$

akımları bulunuz ve güçler balansını kontrol ediniz.



Çözüm:

Kirchhoff 1. yasasına göre

D -1=3 bağımsız denklem yazılabilir.

$$1) I_4 + J - I_5 = 0$$

$$2) I_2 - J - I_3 = 0$$

$$3) I_1 + I_3 - I_4 = 0$$

Kirchhoff 2. yasasına göre ise

B-D+1- N_{kaynak} = 6 - 4 + 1 - 1 = 2 bağımsız denklem yazılmaktadır.

$$a) E_1 = I_4 R_4 + I_5 R_5$$

$$b) E_2 - E_3 = I_4 R_4 + I_5 R_5 + I_2 R_2 + I_3 R_3$$

2-a denklemleri göz önüne alınırsa;

$$E_2 - E_3 - E_1 = (J + I_3)R_2 + I_3 R_3 \rightarrow E_2 - E_3 - E_1 = J R_2 + I_3 (R_2 + R_3)$$

$$I_3 = \frac{E_2 - E_3 - E_1 - J R_2}{R_2 + R_3} = \frac{150 - 28 - 100 - 2.2}{(2+4)10^3} = 3 \cdot 10^{-3} A = 3mA$$

$$I_2 = I_3 + J = 3 + 2 = 5mA$$

1. denklemden; $I_5 = J + I_4$ a) denkleminde $E_1 = I_4 R_4 + (J + I_4) R_5$ olduğuna göre

$$I_4 = \frac{E_1 - JR_5}{R_4 + R_5} = \frac{100 - 2.8}{(6+8)10^3} = 6mA$$

$$I_5 = I_4 + J = 6 + 2 = 8mA$$

$$I_1 = I_4 - I_3 = 6 - 3 = 3mA$$

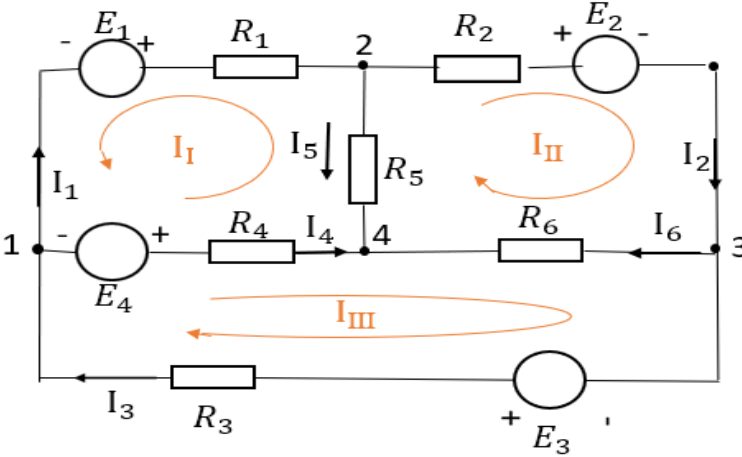
$$\sum P_k = \sum P_{i\text{şl.}} \quad \rightarrow \quad \sum P_k = E_1 I_1 + E_2 I_2 - E_3 I_3 + J V_{12}$$

$$\sum P_k = 100.3.10^{-3} + 150.5.10^{-3} - 28.3.10^{-3} - 76.2.10^{-3} = 0,814wt$$

$$\sum P_{i\text{şl.}} = I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 = 0,814$$

4. Kontür (Çevre) Akımlar Yöntemi

Kontür akımlar yöntemini kullanarak karmaşık elektrik devrelerini B -D+1 sayıda Kirchhoff 2. yasasına göre yazılmış bağımsız denklemler yardımıyla çözebiliriz. Çevre akımlar yönteminde Kirchhoff 1. yasası her zaman verilir.



Şekil 1

Şekil1 de verilmiş devre için Kirchhoff 2. yasasına göre $6-4+1=3$ bağımsız denklem yazılabilir.

$$\text{I. çevre için} \quad E_1 - E_4 = I_1 R_1 + I_5 R_5 + I_4 R_4$$

$$\text{II. çevre için} \quad -E_2 = I_2 R_2 + I_6 R_6 - I_5 R_5$$

$$\text{III. çevre için} \quad E_4 + E_3 = -I_4 R_4 - I_6 R_6 + I_3 R_3$$

Şemadan görüldüğü gibi

$$I_1 = I_I ; I_2 = I_{II} ; I_3 = I_{III}$$

$$I_4 = I_I - I_{III} ; I_5 = I_I - I_{II} ; I_6 = I_{II} - I_{III}$$

İfadelerini denklemlerde yerine yazarsak;

$$E_1 - E_4 = I_I R_1 + (I_I - I_{II}) R_5 + (I_I - I_{III}) R_4$$

$$-E_2 = I_{II} R_2 + (I_{II} - I_{III}) R_6 - (I_I - I_{II}) R_5$$

$$E_4 + E_3 = -(I_I - I_{III}) R_4 - (I_{II} - I_{III}) R_6 + I_{III} R_3$$

$$E_1 - E_4 = I_I (R_1 + R_5 + R_4) - I_{II} R_5 - I_{III} R_4$$

$$-E_2 = -I_I R_5 + I_{II} (R_2 + R_6 + R_5) - I_{III} R_6$$

$$E_4 + E_3 = -I_I R_4 - I_{II} R_6 + I_{III} (R_4 + R_6 + R_3)$$

$$E_1 - E_4 = E_{11} ; -E_2 = E_{22} ; E_4 + E_3 = E_{33}$$

Burada E_{11}, E_{22}, E_{33} çevrelerdeki EMK ların cebirsel toplamıdır.

$$R_1 + R_5 + R_4 = R_{11} ; R_2 + R_5 + R_6 = R_{22} ; R_3 + R_4 + R_6 = R_{33}$$

Çevrelerin özel dirençlerinin toplamı

$$-R_5 = R_{12} = R_{21} ; -R_4 = R_{13} = R_{31} ; -R_6 = R_{23} = R_{32}$$

Çevrelerin ortak dirençleri

$$E_{11} = I_I R_{11} + I_{II} R_{12} + I_{III} R_{13}$$

$$E_{22} = I_I R_{21} + I_{II} R_{22} + I_{III} R_{23}$$

$$E_{33} = I_I R_{31} + I_{II} R_{32} + I_{III} R_{33}$$

İfadeleri çevre akımlarına göre yazılmış Kirchoff 2. yasası denklemleridir. Denklemler determinant yardımıyla çözülebilir. Sistemin determinantu akımların katsayılarından oluşturulur.

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}$$

Bilinmeyen akımlara denk gelen determinantlar;

$$\Delta I_1 = \begin{vmatrix} E_{11} & R_{12} & R_{13} \\ E_{22} & R_{22} & R_{23} \\ E_{33} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}$$

$$\Delta I_2 = \begin{vmatrix} R_{11} & E_{11} & R_{13} \\ R_{21} & E_{22} & R_{23} \\ R_{31} & E_{33} & R_{33} \end{vmatrix}$$

$$\Delta I_3 = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & E_{11} \\ R_{21} & R_{22} & E_{22} \\ R_{31} & R_{32} & E_{33} \end{vmatrix}$$

Çevre akımları;

$$I_I = \frac{\Delta I_I}{\Delta} ; \quad I_{II} = \frac{\Delta I_{II}}{\Delta} ; \quad I_{III} = \frac{\Delta I_{III}}{\Delta}$$

Dal akımları ise yukarıda verilen dal akım bağlantılarından bulunmaktadır.

Eğer karmaşık devrede n sayıda bağımsız çevre var ise

$$E_{11} = I_I R_{11} + I_{II} R_{12} + I_{III} R_{13} + \dots + I_n R_{1n}$$

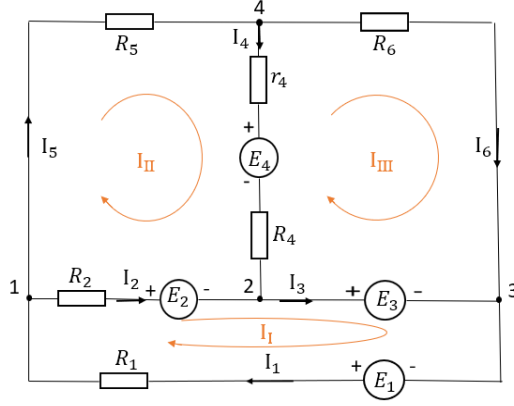
$$E_{22} = I_I R_{21} + I_{II} R_{22} + I_{III} R_{23} + \dots + I_n R_{2n}$$

$$E_{33} = I_I R_{31} + I_{II} R_{32} + I_{III} R_{33} + \dots + I_n R_{3n}$$

$$E_{nn} = I_I R_{nn} + I_{II} R_{nn} + I_{III} R_{nn} + \dots + I_n R_{nn}$$

$$\begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ \vdots \\ \vdots \\ E_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \cdots & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \cdots & \cdots & R_{2n} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & \cdots & \cdots & R_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & R_{n3} & \cdots & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

Örnek1: Şekilde verilmiş devrenin dal akımlarını çevre akımlar yöntemini kullanarak bulunuz. Devre elemanları parametreleri;



$$E_1 = 100V ; E_2 = 30V ; E_3 = 10V ; E_4 = 6V$$

$$R_1 = 10\Omega ; R_2 = 10\Omega ; R_5 = 5\Omega ; R_6 = 15\Omega$$

$$R_4 = 6\Omega ; r_4 = 1\Omega$$

Çözüm:

$$I_1 = 5A ; I_2 = 1A ; I_3 = 3A ; I_4 = 2A ; I_5 = 4A ; I_6 = 2A$$

Devrenin çevre denklemleri matris şeklinde gösterildiği gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{bmatrix}$$

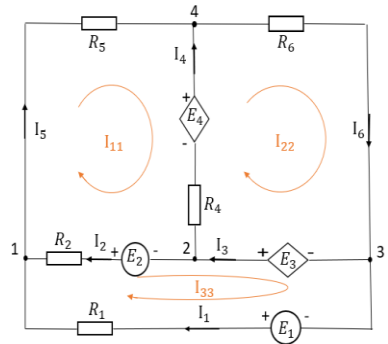
Örnek2: Şekilde verilen devrede akımları çevre akımlar yöntemi ile bulunuz.

$$E_3 = KU_{14} ; E_4 = r_2 I_2 ; E_1 = 10V$$

$$E_2 = 15V ; K = 1,5$$

$$R_1 = 1k\Omega ; R_4 = 4k\Omega ; R_2 = 2k\Omega$$

$$R_5 = 5k\Omega ; R_6 = 6k\Omega ; r_4 = 4 \cdot 10^3 V/A$$



Çözüm:

$$I_1 = I_{33} \quad ; \quad I_2 = I_{11} - I_{33} \quad ; \quad I_3 = I_{22} - I_{33}$$

$$I_4 = I_{22} - I_{11} \quad ; \quad I_5 = I_{11} \quad ; \quad I_6 = I_{22} \quad ;$$

$$E_3 = KU_{14} = K \cdot I_5 R_5 = KI_{11} R_5$$

$$E_4 = r_2 I_2 = r_2 (I_{11} - I_{33})$$

Çevre akım denklemleri:

$$I_4(R_2 + R_4 + R_5) - I_{22}R_4 - I_{33}R_2 = -E_4 + E_2 = -r_2(I_{11} - I_{33}) + E_2$$

$$-I_{11}R_4 + I_{22}(R_4 + R_6) = E_3 + E_4 = KI_{11}R_5 + r_2(I_{11} - I_{33})$$

$$-I_{11}R_2 + I_{33}(R_1 + R_2) = -E_2 - E_3 + E_1 = -E_2 + E_1 - KI_{11}R_5$$

Değerler yerine konulup denklem gruplaştırılırsa

$$I_{11} \cdot 15 \cdot 10^3 - I_{22} \cdot 4 \cdot 10^3 - I_{33} \cdot 6 \cdot 10^3 = 15$$

$$I_{11} \cdot 15,5 \cdot 10^3 + I_{22} \cdot 10 \cdot 10^3 = 10$$

$$I_{11} \cdot 5,5 \cdot 10^3 + I_{33} \cdot 3 \cdot 10^3 = -5$$

Denklemler çözülerek dal ve çevre akımlar bulunur.

$$I_{11} = 0,45mA \quad ; \quad I_{22} = 1,7mA \quad ; \quad I_{33} = 2,5mA$$

$$I_1 = -2,5mA \quad ; \quad I_2 = 2,95mA \quad ; \quad I_3 = 4,2mA \quad ; \quad I_4 = 1,25mA \quad ;$$

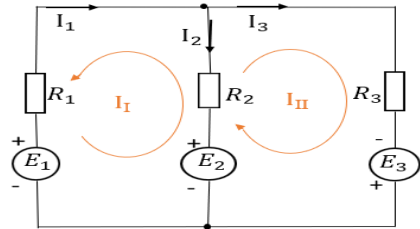
$$I_5 = 0,45mA \quad ; \quad I_6 = 1,7mA$$

Örnek3: Şekilde verilen devrede çevre akımlar yöntemini kullanarak dal akımlarını bulunuz. Devre parametreleri;

$$E_1 = 40V; E_2 = 5V; E_3 = 10V; R_1 = 20\Omega; R_2 = 40\Omega; R_3 = 140\Omega$$

Çözüm:

$$I_1 = 0,75A \quad ; \quad I_2 = 0,5A \quad ; \quad I_3 = 0,5A$$



Örnek4: Şekilde verilen devrenin akımlarını hesaplayınız ve güçler balansını kontrol ediniz.

$$J = 50mA; E = 60V; R_1 = 5k\Omega; R_2 = 4k\Omega$$

$$R_3 = 16k\Omega; R_4 = 2k\Omega; R_5 = 8k\Omega$$

Çözüm:

Devrenin $D=4$ düğümü, $B=6$ dalı mevcuttur. Çevre akımları yöntemine göre bağımsız denklem sayısı; $6-4+1-1=2$ Bir çevre akımı J verildiğinden denklemlerin sayısından çıkarılır. Çevre akımlarının yönü şekilde verildiği gibi alınırsa denklemler;

$$(R_1 + R_2 + R_5)I_I + I_{II}R_5 + R_1J = E$$

$$R_5I_I + (R_3 + R_4 + R_5)I_{II} - R_3J = 0$$

Değerler yerine konulursa

$$17I_I + 8I_{II} = -190$$

$$8I_I + 26I_{II} = 800$$

Bu denklemleri çözerek

$$I_I = -30mA; I_{II} = 40mA$$

Dalların akımları

$$I_1 = I_I + J = 20mA; I_2 = -I_I = -30mA; I_3 = -I_{II} + J = 10mA; I_4 = I_{II} = 40mA$$

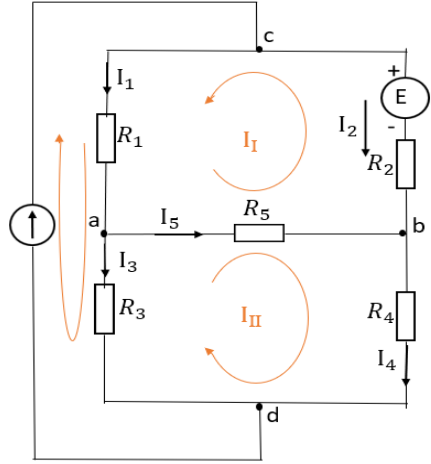
$$I_5 = I_I + I_{II} = 10mA$$

Güçler balansı

$$-EI_2 + V_{cd}J = -EI_2 + (R_1I_1 + R_3I_3)J$$

$$= I_1^2R_1 + I_2^2R_2 + I_3^2R_3 + I_4^2R_4 + I_5^2R_5$$

Değerler yerine konulup hesaplanırsa $11,2wt$ elde edilir.



5. Kaynaklar

- Mohindru, P., & Mohindru, P. (2021). *Electronic Circuit Analysis using LTspice XVII Simulator. Electronic Circuit Analysis using LTspice XVII Simulator*. doi:10.1201/9781003199489
- Rahmani-Andebili, M. (2021). *AC Electrical Circuit Analysis. AC Electrical Circuit Analysis*. doi:10.1007/978-3-030-60986-3

BÖLÜM III

OZON UYGULAMALARIYLA GIDALARDAN PESTİSİT GİDERİMİ

Ayşe Kurt

(Öğr. Gör. Dr.) Bursa Uludağ Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve
Araştırma Merkezi (BİTUAM), Görükle Kampüsü, 81620, Bursa, Türkiye;

E-posta: kurtayse1987@gmail.com

Orcid: 0000-0003-0085-7517

1. Giriş

Bir bireyin diyetinin %30'unu oluşturan taze meyve ve sebzelerin, çiğ veya işlenmiş olarak tüketilmesi pestisit maruziyetine yol açmaktadır (Qi, Huang, & Hung, 2018). Meyve ve sebzelere duyulan tüketim ihtiyacı arttıkça, hasat edilen tarımsal ürünler bekletilmeden, büyük miktarda pestisit yüklü olarak doğrudan pazara sunulmaktadır (Misra, 2015). Bununla birlikte, taze ürünler işlenmiş gıdalarda kullanıldığında, pestisitlerle kontaminasyona yol açmakta ve bu da var olan konsantrasyonu artırarak nihai ürünün bileşimini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, gıda işleme prosesleri sırasında, kalıntı pestisitler, ana pestisit bileşiklerinden daha toksik olan çeşitli metabolik ürünlere dönüşmektedir (González-Rodríguez, Rial-Otero, Cancho-Grande, Gonzalez-Barreiro, & Simal-Gándara, 2011).

Bulantı, baş ağrısı (Qi ve ark., 2018), kronik hastalıklar ve uzun süreli nörodejeneratif hastalıklar ve solunum problemleri gibi çeşitli istenmeyen etkilere neden olan pestisitlerden en çok etkilenen canlı grubunda insanlar bulunmaktadır (Hernández ve ark., 2013). Bu nedenle tarım ürünlerinden pestisitlerin uzaklaştırılması için gerekli önlemlerin alınması zorunludur. Tarımsal ürünlerdeki pestisitleri uzaklaştırmak için çeşitli kimyasal ajanlarla yıkama, tuzlama, soyma, pişirme, kurutma ve kimyasal oksidasyonlar gibi çeşitli konvansiyonel yöntemler kullanılmıştır. Günümüzde ticari uygulamalarda, taze meyve ve sebzeleri yıkamak için sanitasyon maddesi içeren veya içermeyen sular kullanılmaktadır. Kalıntının yeri, polaritesi, zamanı, sıcaklığı ve yıkama türü gibi çeşitli faktörler (Lozowicka, Jankowska, Hrynko, & Kaczynski, 2016) yıkamanın verimliliğini etkileyen unsurlardır. Pestisitlerin çoğu doğada hidrofobik olduğundan, musluk suyuyla yıkamanın

pestisit giderimi üzerinde çok az etkisi vardır (Balawejder, Antos, & Sadlo, 2013). Klorla yıkamanın, özellikle daha yüksek bir pH'ta veya spor oluşturan bakterilere karşı sınırlı uygulamaları bulunmakla birlikte bu uygulama sonrasında; insan sağlığına ve çevreye zararlı olduğu düşünülen haloasetik ve trihalometan asitleri içeren zararlı yan ürünler açığa çıkmaktadır (Horvitz & Cantalejo, 2014). Klor, taze ürünler için en yaygın olarak kullanılan sanitasyon maddesidir, ancak meyve ve sebzelerin yüzeyinde bulunan mikroorganizmaların inaktive edilmesinde sınırlı bir etkiye sahiptir (Horvitz and Cantalejo, 2014).

Bu sebeple, son zamanlarda bilim adamları, pestisitlerin gıda matrislerindeki istenmeyen etkilerini ortadan kaldırmak için termal ve geleneksel olmayan tekniklerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Son yıllarda, pestisit içermeyen organik ve kaliteli gıda ürünlerine olan talep artış gösterdiğinden önemli bir dezenfektan türü oluşu ve antimikrobiyal aktivitesi nedeniyle ozon (O₃) uygulamaları gibi yeşil teknikler dikkat çekmeye başlamıştır (Pandiselvam, Sunoj, Manikantan, Kothakota, & Hebbar, 2017). Ozon molekülü, birçok organik bileşiği oksitleyen bir allotrop oksijen formudur (R Pandiselvam ve ark., 2020). 2001 yılında, gıda endüstrisinde mikroorganizmaların büyümesini durdurmak için ozonun kullanımı, ABD FDA (Birleşik Devletler Gıda ve İlaç Dairesi) güvenli kabul edilmiştir (Smilanick, 2003). Bununla birlikte, ABD Çevre Koruma Ajansı (U.S. EPA), ozonun atıksu arıtımında kullanımını bir dezenfeksiyon işlemi olarak görmektedir. Ayrıca, gıdaların ve gıda ile temas eden yüzeylerin ozonlu suyla durulanması bir sanitasyon önlemi olarak kabul edilmektedir (Perry & Yousef, 2011). Ozon, pestisitlerin bozunmasını sağlamak için gıdalarda düzenli olarak uygulanmaktadır ve diğer geleneksel kimyasal tekniklere göre çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Ek olarak, gaz halinde ve sulu halde etkili olduğu için ekonomik ve ticari olarak uygulanabilir bir yaklaşım olarak görülmektedir. Tarımsal ürünlerdeki pestisit kalıntılarının bozunması için ozon uygulamasının yıllık ortalama maliyeti 100\$'dır (Shizong Wang & Wang, 2019). Öte yandan, kimyasal yöntemler etkinliklerine rağmen nispeten daha pahalıdır. Hidrojen peroksit gibi pestisitlerin bozunması için yaygın olarak kullanılan kimyasal maddeler, nakliye ve depolama için özel önlemlere ve araçlara ihtiyaç duymakta, böylece kullanım ve işletme maliyeti yüksek oranda artış göstermektedir (Shizong Wang & Wang, 2019; Zohair, 2001).

Yapılan araştırmalar, güçlü bir oksidan olan ozonun geleneksel sanitasyon ajanlarının yerini alabileceğini bildirmektedir. Günümüzde, ozonun gıdaların işlenmesinde kullanımı, ABD Gıda ve İlaç Dairesi'nin gıda işleme ve depolama için ozonun anti-mikrobiyal ajan olarak kullanımını onaylamasıyla birlikte, tüketicilerin 'doğal' gıda katkı maddelerine yönelik taleplerine, yasal düzenlemelere ve ozonun çevre dostu bir teknoloji olduğu yönündeki

bilinçlenmeye bağlı olarak artmıştır. Elektriksel olarak birbirine bağlanmış üç oksijen molekülünden oluşan ozon, hedeflenen organik madde veya mikroorganizma ile reaksiyona girerek hızla diatomik oksijene (O₂) ayrışabilmektedir. Ozon, ortam havası, oksijen gazı veya oksijenle zenginleştirilmiş hava ile iki elektrot arasında elektriksel deşarj (veya korona deşarjı) kullanılarak oluşturulmakta ve ozonlu su üretmek için hemen suya veya ozonlanmış hava üretmek için hemen bir odaya (örn: laboratuvarlar veya soğutma depoları) verilmektedir.

Bununla birlikte, ozon, çok çeşitli pestisitleri, zararlı mikroorganizmaları ve mantarları ve ayrıca depolanan ürünlerdeki böcekleri yok etme kapasitesine sahiptir ve biyolojik olarak parçalanamayan organik maddeleri biyolojik olarak parçalanabilen formlara dönüştürebilmektedir (R. Pandiselvam ve ark., 2020; Pandiselvam ve ark., 2017). Hızla oksijene ayrışmakta ve ozonla işlenmiş ürünler hızla zararlı kalıntılardan arındırılmaktadır. Bu nedenle, organik gıda sertifikası gerektiren gıda işleme endüstrileri için kullanımı uygundur (Selma, Ibáñez, Cantwell, & Suslow, 2008). Ozonun gıda endüstrisindeki mevcut kullanımları arasında sebze, meyve ve meyve sularının raf ömrünün uzatılması, ekipmanların sterilizasyonu, depolama ve nakliye sırasında istenmeyen katkı maddeleri ve çeşitli mikroorganizmaların ortadan kaldırılması yer almaktadır (R. Pandiselvam ve ark., 2020).

2. Pestisitler ve Gıdalarda Kullanımı

Tüketiciler ne yediklerine her geçen gün daha fazla önem göstermekte ve antioksidanlar açısından zengin olduğu düşünülen taze ürünleri “sağlıklı gıda” olarak kabul etmektedirler. Bununla birlikte, gıda güvenliği, bir ulusun ekonomisi ve insanların geçim kaynakları açısından oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Ancak taze ürünlerin raf ömrü sınırlıdır ve hasat ile birlikte işleme ve muhafaza koşulları kalitelerini, güvenilirliklerini ve raf ömürlerini etkilemektedir. Bu sebeplerle, üretim, depolama ve dağıtım zincirinin tüm aşamalarında istenmeyen mikrobiyal kontaminasyonu ve bozulmayı azaltmanın yanı sıra ürünün görsel, dokusal, duyusal ve besinsel kalitesini korumaya yönelik yeni teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda, gıda güvenliği açısından meyve ve sebzelerde ve özellikle taze ürünlerde patojen (bakteriler, virüsler ve parazitler vb.) riskini azaltmaya yönelik uygulamalara ilgi artmaya başlamış ve bununla birlikte, araştırmacılar pestisitlerin gıda matrisindeki istenmeyen etkilerini ortadan kaldırmak için gerekli tekniklerin geliştirilmesine odaklanmaya başlamıştır.

Pestisitler, gıda ürünlerini böcek, fungus, yabancı otlar ve diğer zararlılara karşı korumak amacıyla tarımsal üretimde kullanılan kimyasal

maddelerdir. Tarımsal üretim sırasında, zararlıların olumsuz etkilerini kontrol etmek ve önlemek ve ürün veriminin artması amacıyla pestisitlerin kullanılmasıyla birlikte ekonomik kayıpların yaklaşık % 30'u önlenebilmektedir. Pestisitlerin tarımda kullanılmasıyla, tropikal hastalık faktörlerinin kontrol edilerek halk sağlığının korunmasına da katkı sağlanmaktadır.

Pestisitler, tarımda kullanılan zararlıları öldürmek, mantar büyümesini ve böcekleri kontrol etmek ve böylece mahsul üretimini stabilize etmek için kullanılan tüm ayırt edici kimyasalları kapsamaktadır [3]. Zirai ilaçların uygulanması ihtiyacı, daha yüksek verim ve kaliteli tarımsal ürün üretimindeki katkısı nedeniyle kaçınılmazdır. Pestisitlerin maksimum kalıntı limitleri (MRL), kalıntı seviyelerinin düzenlenmesinde ve diyetle alımlarının değerlendirilmesinde çok önemlidir [70]. Genel olarak, pestisit kullanımıyla ilgili duyulan en büyük endişe, çevreye, yaban hayatı popülasyonlarına ve insan sağlığına olan potansiyel zararlı etkisidir. Pestisit karışımları gıda ürünlerine uygulandığında, yiyeceklerde, içme suyu kaynaklarında kalıntı bırakmakta ve ayrıca alıcı su ortamını da etkilemektedir. Çiğ veya işlenmiş olarak tüketildiklerinde bir bireyin diyetinin % 30'unu oluşturan taze meyve ve sebzelerden pestisit maruziyeti yüksektir [1].

Tarımsal ürünlerdeki pestisitleri uzaklaştırmak için çeşitli maddelerle yıkama, tuzlama, soyma, pişirme, kurutma ve kimyasal oksidanlar gibi geleneksel teknikler kullanılmıştır. Ancak kalıntı yeri, polaritesi, zamanı, sıcaklığı ve yıkama türü gibi çeşitli faktörler yıkama verimliliğini etkilemektedir (Lozowicka ve ark., 2016). Pestisitlerin çoğu doğası gereği hidrofobik olduğundan musluk suyunda yıkamanın pestisit giderimi üzerinde çok az etkisi vardır (Balawejder ve ark., 2013). Klor ile yıkamanın, özellikle daha yüksek bir pH'ta veya spor oluşturan bakterilere karşı, bazı sınırlamaları vardır ve bu uygulama insan sağlığına ve çevreye zararlı olduğu düşünülen haloasetik ve trihalometan asitleri içeren zararlı yan ürünler üretir (Horvitz and Cantalejo, 2014). Son yıllarda araştırmacılar, pestisitlerin gıda matrisindeki istenmeyen etkilerini ortadan kaldırmak için geleneksel olmayan termal teknikler ve termal olmayan tekniklerin geliştirilmesine odaklanmaya başlamıştır. Bunlar arasında en önemli ve yaygın kullanılan tekniklerden biri ozon uygulamalarıdır.

Böcek ilacı içermeyen, organik ve kaliteli gıda ürünlerine olan talep ivme kazandıkça, önemli dezenfektan ve antimikrobiyal aktivitesi nedeniyle ozon (O₃) uygulamalarını içeren yeşil teknikler dikkat çekmeye başlamıştır (Pandiselvam ve ark., 2017). Ozon, birçok organik bileşiği oksitleyen bir allotrop oksijen formudur (Pandiselvam ve ark., 2020). 2001 yılında, ozonun gıda endüstrisinde mikroorganizmaların büyümesini durdurmak için kullanılması ABD FDA tarafından genel olarak güvenli (GRAS) kabul

edilmiştir (Food and Drug, 2001; Smilanick, 2003). Ayrıca, ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA, 1991) ozonun atık su arıtımında bir dezenfeksiyon işlemi olarak kullanılmasını kabul etmektedir. Ayrıca, gıdalla temas eden yüzeylerin veya gıdanın sulu ozonla durulanması bir sanitasyon önlemi olarak kabul edilmektedir (Perry and Yousef, 2011).

3. Ozon Üretimi ve Gıda Uygulamalarında Geliştirilen Yeni Yöntemler

Sebze ve meyvelerdeki pestisit kalıntılarının giderilmesi veya azaltılması için birçok geleneksel yöntem uygulanmaktadır (Liang, Wang, Shen, Liu, & Liu, 2012; Qi ve ark., 2018). Bununla birlikte, uygulanan pestisit uzaklaştırma teknikleri, sebze ve meyvelerin duysal ve fizikokimyasal özelliklerini değiştirmemelidir. Bu konuda ozon uygulamaları, istenilen özelliklerinden dolayı gıdalarda pestisit kalıntısı yayılımının önlenmesi için potansiyel bir teknoloji olarak görülmektedir.

Ozon su içerisinde oldukça kararsızdır ve hızlı bir şekilde zararsız bir molekül olan oksijene dönüşmektedir. Dolayısıyla, gaz halindeki uygulamaları, havadaki yüksek stabilitesi nedeniyle sebze&meyve depolarında yaygın olarak tercih edilirken, su içerisinde çözülmüş ozon formu, kısa yarı ömrü nedeniyle yerinde uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ozon suda hızla ayrıştığı için oksidasyon kabiliyeti sağlayan serbest radikaller oluşturmak için arzu edilen özelliğe sahiptir. Bu oksidasyon kabiliyeti, hidroksil radikalleri gibi diğer indükleyicilerle birlikte, pestisit kalıntıları da dahil olmak üzere birçok organik bileşiği parçalayabilen oksidasyon gücünü arttırmaktadır. Daha da önemlisi, ozon molekülü oksijene bozunması sırasında ikincil kirleticiler oluşturmamaktadır (Xiong, Cheng, & Sun, 2011).

Bununla birlikte, ozon, kirletilmiş atıksuların arıtımında gerçek uygulanabilirliği olan en güçlü oksidanlardan biridir. Çok yüksek oksidasyon potansiyeline ek olarak, uygulaması sırasında oluşan indirgeme ürünleri zararsızdır, bu da özellikle bu oksidantı klor gibi diğerleriyle karşılaştırırken çok önemli bir husus haline gelmektedir, çünkü ne yazıkki klorun uygulanması sonucunda ana bileşiklerden daha tehlikeli moleküller açığa çıkmaktadır (Misra, 2015; Qi ve ark., 2018). Başlıca dezavantajları olarak yüksek üretim maliyetleri, tipik olarak elektrik deşarjlı üretim yönteminde (genellikle korona deşarjı olarak bilinmektedir) uygulanan çok yüksek voltajlar, ısı olarak dağılan büyük miktarda enerji (González-Rodríguez ve ark., 2011; Hernández ve ark., 2013; Lozowicka, Ilyasova, ve ark., 2016), ve gerekli olduğu yerde ozon gazının sıvı içindeki düşük çözünürlüğü ile ilişkilidir.

Gıda işleme endüstrisinde ozon üretiminin ana yöntemleri, korona deşarj (CD) teknolojisi (yüksek enerjili elektrik alanı), ultraviyole (UV) teknolojisi

(fitokimyasal yöntem) ve oksijen moleküllerinin (O_2) ozona (O_3) dönüştürülmesidir (kimyasal yöntem). Ancak oksijene hızlı bozunması nedeniyle kullanımından hemen önce üretilmesi gerekmektedir. Biriktirilemediği için ihtiyaç duyulduğunda sürekli olarak üretilmesi gerekmektedir. Ozon üretiminin diğer yöntemleri arasında elektroliz, elemental fosfor ile elemental fosforun su ile reaksiyonu ve radyokimyasal üretim yöntemleri yer almaktadır (Brodowska, Nowak, & Śmigielski, 2018).

Korona deşarjına alternatif bulmaya çalışılırken, en umut verici proseslerden biri ozonun elektrolitik üretimidir (Balawejder ve ark., 2013; Horvitz & Cantalejo, 2014; R Pandiselvam ve ark., 2020; Pandiselvam ve ark., 2017). Bu proses birçok yeni çalışmada değerlendirilmiştir ve bazı şirketler çok düşük iletkenliğe sahip sıvılarda bile ozon oluşumunu destekleyen cihazlar pazarlamaktadır (Perry & Yousef, 2011; Smilanick, 2003; Shan Wang, Wang, Wang, Li, & Wu, 2019). Bu cihazların çoğu elmas elektrotların kullanımına dayanmaktadır. Bu elektrotlar, düşük adsorpsiyon kapasitesine sahip inert yüzeyleri, korozyon stabilitesi, geniş bir potansiyel penceresi ve oksijen için çok yüksek potansiyeli dahil olmak üzere ozon elektrojenasyonu için önemli avantajlar göstermiştir. Bu durum, suyun oksijene oksidasyonu ile rekabeti nedeniyle ozon üretimi için seçilen elektrolitik malzemelerde önemli bir husustur. Ayrıca PEM (Polimer Elektrolit Membran) elektrolizleri gibi iyileştirilmiş kütle transfer koşuluna sahip yeni hücre konseptlerinin tasarımı da iyi bir alternatif göstermiştir (Hwang, Cash, & Zabik, 2001; Liang ve ark., 2012; Ong, Cash, Zabik, Siddiq, & Jones, 1996; R Pandiselvam ve ark., 2020; Selma ve ark., 2008; Shan Wang ve ark., 2019; Xiong ve ark., 2011; Zohair, 2001).

Elektrokimyasal ozon üretiminin birçok avantajı bulunmaktadır, bunlar; doğrudan su bünyesinde ozon üretiminin mümkün olması, basit sistem dizaynı, gaz ve sıvı ortamda çok yüksek verimliliklerde ozon üretme potansiyeli, anoda herhangi bir gaz beslemesine gerek olmaması, kolay uygulanabilirlik ve sistemin sağlıklı işleyişi, gaz olarak üretilen CCD (cold corona discharge/soğuk korona deşarjı) ozonunun suya transferinde yaşanan kayıp ve kütle transferi kısıtlamalarının olmaması, kuru, nemsiz hava veya saf oksijen gibi herhangi bir girdiye ihtiyaç duyulmaması, düşük voltaj altında işletme olanağı ile ekonomik açıdan büyük tasarruf ve klor-alkali sanayi için kurulmuş tesislerde test edilmiş yüksek verimliliğidir.

3.1. Ozon Uygulamalarıyla Gıdalardan Pestisit Giderimine Dair Yapılmış Bilimsel Çalışmalar

3.1.1. Ozonlu su uygulamaları

Meyve ve sebzelerde pestisitlerin ozonla giderimiyle ilgili çalışmalardan ozonlanmış su kullanılarak elma yüzeyinde kaptan, metil-azinofos ve

formetanat hidroklorik asit gibi farklı pestisit kalıntılarının parçalanması Ong ve ark. (1996) tarafından rapor edilmiştir (Ong ve ark., 1996). Hwang ve ark. (2001) (Hwang ve ark., 2001) 1-10 mg kg⁻¹ ozon konsantrasyonu ile muamele edilen elma yüzeyinde bulunan mankozepte %56-97 azalma olduğunu belgelemiştir. Ozonlanmış su ile (2 mg L⁻¹) farklı hurma çeşitlerinden pestisit uzaklaştırma yüzdeleri, meyvelerin sadece damıtılmış suya daldırılmasında elde edildiğinden önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur (Osman, 2015). Ayrıca, ozon uygulamalarıyla birlikte pestisitlerin uzaklaştırılma yüzdeleri, pestisit türüne ve ozonla muamele süresine bağlı olarak değişmiştir.

Antos ve ark. (2018), soğuk depolama sırasında elmalarda trifloksistrobin, kaptan ve boskalit gibi fungusit kalıntıları üzerine ozon uygulamasının etkisini incelemiştir (Antos ve ark., 2018). Depolama deneyi 84 gün sürmüş ve her 12 saatte bir 1 dakika süreyle 1 ppm (mg L⁻¹) ozon dozu uygulanmıştır. Ozonla zenginleştirilmiş atmosfer, soğuk depolama sırasında elmalarda mantar ilacı kalıntısı seviyesini azaltmıştır. Bunun aksine, Sadlo ve ark. (2017), elmalara gaz halinde ve sulu ozon uygulamasının kaptan kalıntıları seviyesinde önemli bir azalmaya neden olmadığı sonucuna varmıştır (Sadlo ve ark., 2017). Bunun nedeninin, 2 ppm'lik ozon konsantrasyonunun elmalarda kaptan bozunma etkinliğini artırmak için yetersiz olmasından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, araştırmacılar ozon uygulamasının elma yüzeylerindeki boskalit kalıntısında önemli bir azalmaya neden olduğunu bildirmiştir.

Antos ve ark. (2013) gaz halinde ve sulu ozonun kullanılmasının frenk üzümü içindeki ditiyokarbamat kalıntılarının parçalanmasında etkili olduğunu kanıtlamıştır (Antos, Kurdziel, Sadlo, & Balawejder, 2013). 2019 yılında Karaca, meyveleri ozonla zenginleştirilmiş havada (0,64 mg m⁻³) bırakarak üzümlerden altı pestisit giderildiğini göstermiştir (Karaca, 2019). Gaz halinde ozon kullanımı ile, azoksistrobin fungusitinde 2,8 kat daha fazla azalma meydana gelmiştir. Fernanda ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada gaz halinde ve sulu ozon uygulamaları ile sofralık üzümlerdeki klorotalonil kalıntıları sırasıyla %67,4 ve %78,9 oranında azalma göstermiştir (F. F. Heleno ve ark., 2015). Gabler ve ark. (2010) sofralık üzümleri 10 000 µL L⁻¹ ozon konsantrasyonu ile 1 saat süreyle prosten geçirmiş ve piraklostrobin kalıntısının %100 bozunmasını belgelemiştir (Gabler, Smilanick, Mansour, & Karaca, 2010). Pestisitlerin uzaklaştırılmasının verimliliğindeki farklılıklar, pestisitlerin yapısındaki çeşitliliğe bağlanabilmektedir. Ayrıca üzümün yüzeyinde epikütiküler bir mum tabakası vardır ve bu da pestisitlerin oksidatif reaksiyonlardan korunmasını sağlayabilmektedir (Karaca, 2019).

Ozonlanmış suyun sebzelerde paration, diazinon, sipermetrin ve metilparation üzerindeki etkileri iki farklı metodolojide incelenmiştir (J. Wu, Luan, Lan, Hung Lo, & Chan, 2007). Bunlardan birinci yöntemde 1 ml, 10 mg L⁻¹

pestisit çözültisi aşırı dozda ozon (99 ml, 1,4 mg L⁻¹ ozonlu su) ile karıştırılırken, ikinci yöntemde pestisit katkılı sebzeler ozonlu su ile farklı oranlarda muamele görmüştür. Metil-paration hariç, tüm pestisitlerin %75'inden fazlası, 10 dakika boyunca süren ozon uygulamasının ardından bozunmuştur. Benzer şekilde, pestisitlerin bozunma hızı proses süresi ile doğru orantılı çıkmıştır. Bununla birlikte, sıcaklık, temas süresi ve ozon konsantrasyonundan etkilendiği için sebze örneklerinde pestisit giderim yüzdeleri nispeten düşük bulunmuştur. Bu çalışmada, her proses için sadece iki ozon konsantrasyonu ele alınmış ve bu nedenle sonuca varma süreci zorlaşmıştır. Nihai amaç maksimum pestisit giderimi elde etmek olduğundan, bu parametrelerin yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak optimize edilmesi önerilmiştir.

Kiriş ve Velioglu (2016), 15 kg zeytin yaprağına, her bir pestisitten 5 mg L⁻¹ olmak üzere, imidakloprit, alfa-sipermetrin, beta-siflutrin ve klorpirifos içeren 1,5 L pestisit solüsyonu uygulamışlardır (Kiriş & Velioglu, 2016). Pestisit solüsyonu eklenmiş zeytin yaprakları çeşme suyu ve ozonlu suda sırasıyla 2 ve 5 dakika durulandıktan sonra açık havada kurutulmuştur. 5 dakikalık sulu ozonlama işleminin (600 mL dk⁻¹ gaz akışı) imidakloprit, alfa-sipermetrin, beta-siflutrin ve klorpirifos içeriklerini sırasıyla %61, %55, %50 ve %38 oranında azalttığını gözlemlemiştir. Zeytinde 5 dakikalık sulu ozon uygulaması, pestisit konsantrasyonunu önemli ölçüde azaltmış olsa da, pestisit seviyesi izin verilen seviyenin üzerinde bulunmuştur. Bu durum, gıda matrisinin yapısal özelliklerinden (yüzey alanı, kalınlık vb.) ve ozonun dokuya düşük nüfuz etme kabiliyetinden ve ayrıca gıda matrisi üzerindeki yüksek pestisit konsantrasyonundan kaynaklanabilmektedir. Kiriş ve Velioglu (2016) (Kiriş & Velioglu, 2016) ayrıca ozonlu su ile proses süresinin uzatılmasının gıdalarda ile gerçekleşen pestisit bozunma oranını artırdığını bildirmiştir. Ozon, yüksek oksidasyon potansiyeline sahiptir ve hemen hemen tüm inorganik ve organik bileşiklerle hızla reaksiyona girmektedir. Hedeflenen gıda ürününe uygulandıktan sonra arıtma ortamındaki (su) ozon ve/veya atık ozon konsantrasyonunun stabilitesi prosesin etkinliğini belirlemektedir. Saf su, diğer solüsyonlara/ortamlara kıyasla en düşük ozon talebini gerektirdiğinden ozonlamayla giderim prosesi için en uygun ortam olarak kabul edilmektedir (Karaca & Velioglu, 2007). Ikeura ve ark. (2013) (H Ikeura, Kobayashi, & Tamaki, 2013) fenitrothion kalıntıları için kiraz domateslerinde çileklere kıyasla gerçekleşen daha düşük bozunma hızının, ilk matrisin ikincisine kıyasla daha düşük yüzey alanına sahip olduğundan kaynaklandığını vurgulamıştır. Düşük yüzey alanı, ozon ile teması etkili bir şekilde azaltmakta, dolayısıyla fenitrothionun kiraz domateslerinin sarkokarp dokusundan verimsiz şekilde uzaklaştırılmasına yol açmaktadır. Wu ve ark. (2019)'a (Y. Wu, An, Li, Wu, & Pan, 2019) ait bir çalışmada yüksek yüzey alanı nedeniyle ıspanakta biriken

pestisit kalıntılarının salatalık ve kamkattan daha kolay uzaklaştırıldığı belgelenerek bu durum doğrulanmıştır. Kiriş ve Velioglu (2016) (Kiriş & Velioglu, 2016), pestisit giderimi için musluk suyu kullanıldığında, yıkama süresinin pestisit azaltım oranını önemli derecede etkilenmediğini bildirmiştir. İlginç bir şekilde, araştırmacılar ozonun yıkıcı etkilerini ortadan kaldırmak için musluk suyuyla yıkama sırasında kullanılan nitrojen gazının (600 mL dak⁻¹) miktarını saf suyla yıkama sırasındaki kullanılan miktarla eşit olarak uygulamış ve bu sonucu elde etmişlerdir. Yukarıda bahsedilen çalışmalardan, pestisit bozunması için ozonlama prosesinin etkinliğinin, uygulanan ozonun konsantrasyonuna, gıda matrisinin fiziksel özelliklerine ve ortamdaki atık ozonun mevcudiyetine bağlı olduğu açıktır. Tablo 1’de meyve ve sebzelerde ozonlu suyla gerçekleştirilen farklı çalışmalara ait ürüne, pestisit türüne ve prosese bağlı olarak elde edilen pestisit giderim düzeyleri belirtilmiştir.

Tablo 1. Meyve ve sebzelerde ozonlu suyla gerçekleştirilen farklı çalışmalara ait ürüne, pestisit türüne ve prosese bağlı olarak elde edilen pestisit giderim düzeyleri

Ürün	Pestisit türü	Proses şartları	Giderim (%)	Referans
Elma	Azinfos-metil	15 dakika boyunca	75	Ong ve ark. (1996)
	Kaptan	0,25 mg L ⁻¹ ozonlu su uygulaması	72	
	Formetanat		46	
	Hidroklorit			
	Difenilamin	20 dakika boyunca	75,5	Jijun ve ark. (2011)
Karbendazim	16 mg L ⁻¹ ozonlu su uygulaması	59,1		
Klorotalonil		64,8		
Havuç	Boskalit	Ozonlu su	40	Sadlo ve ark. (2017)
	Piraklostrobin	Ozonlu su	20	
Turunçgil	Linuron	Suda çözülmüş ozon (5 mg L ⁻¹)	>95	Souza ve ark. (2018)
	Difenokonazol		70,3	
	Linuron		50,9	
Marul	Klorotalonil	5 dakika süre boyunca 10 mg L ⁻¹ ozon içeren su uygulaması	100	Kusvuran ve ark. (2012)
	Tetradifon		98,6	
	Kloropirifos-etil		94,2	
Lıci	Miklobutanil	15 dakika boyunca 5 ppm ozonlu su	99	Al-Dabbas ve ark. (2018)
	Klorfenapir	15 dakika boyunca 5 ppm ozonlu su	97,15	Al-Antary ve ark. (2019)
Ispanak	Klorpirifos	60 dakika boyunca 3,2 mg L ⁻¹ ozonlu suya daldırma	10	Whangchai ve ark. (2011)
	Miklobutanil		53	Wu ve ark. (2019)
	Tebukonazol		72	
	Bifentrin	Ozon solüsyonunda (0,4 mg L ⁻¹) 30 dakika yıkama	73	
	Lambda-sialotrin		62	
	Beta-sipermetrin		67	
	Esfenvalerat		63	
	Difenokonazol		78	
	Asetamiprit		68	
	İmidakloprit		64	
		63		
Sofralık üzüm	Klorpirifos	1 mg L ⁻¹ sulu ozon, 5 dak	75,1	Lozowicka ve ark. (2016)

Wu ve ark. (2019), ıspanak, kamkat ve salatalıktan 10 pestisit kalıntısının giderilmesi için altı farklı pestisit yıkama yöntemini (musluk suyu, ozonlu su, alkalın elektrolize su, kalsiyum çözeltisi, sodyum bikarbonat ve aktif oksijen)

karşılaştırmıştır (Y. Wu ve ark., 2019). Taze sebzeler (salatalık ve kamkat) 10 adet karışık pestisit solüsyonunda (5 L hacim) 15 dakika bekletilirken, ıspanak ise 10 L karışık solüsyonda 15 dakika bekletilmiştir. Kontamine sebzeler 24 saat boyunca açık havada kurutulmuştur. Pestisit kalıntıları, kromatografi-tandem kütle spektrometresi cihazları (GC-MS/MS, LC-MS/MS) kullanılarak belirlenmiş ve aktif oksijen çözeltisi uygulamasının oksitlenebilirliği ve alkalitesi nedeniyle üç sebze içindeki 10 pestisit kalıntısını gidermede diğer yıkama yöntemlerine göre daha etkili olduğu bildirilmiştir. Pestisit kalıntılarının, sebzelerin ozonlu suyla ($0,4 \text{ mg L}^{-1}$) yıkanmasıyla, musluk suyuyla yıkanmasından %20-40 daha fazla uzaklaştırılması mümkün olmuştur. Araştırmacılar, aktif oksijen ve ozonun, pestisitlerdeki doymamış bağları bozabilen ve organik bileşiklerin çoğunu yok etmek için fonksiyonel grupları oksitleyebilen güçlü bir oksidasyon potansiyeline sahip olduğunu ispatlamışlardır. Bununla birlikte, araştırmacılar, pestisit gideriminin ozonun uygulama süresine, yıkama solüsyonlarının pH'ına ve etki modu, oktanol-su bölme katsayısı, hidroliz ve fotolizin kararlılığı gibi pestisitlerin içsel karakterizasyon özelliklerine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Klorpirifos, klorfenapir ve sipermetrin toprak ve yaprak zararlılarını kontrol etmek için birçok sebze ürünüde yaygın olarak kullanılan başka bir geniş spektrumlu organofosforlu (OP) insektisit türüdür. Bir deneyde, klorpirifosun farklı bitkisel ürünlerin yüzeyinden uzaklaştırılması, daha düşük bir ozon konsantrasyonu (2 mg L^{-1}) kullanılarak sağlanmıştır. Farklı ürünler iki farklı sıcaklıkta (25 ve $35 \text{ }^\circ\text{C}$) çeşitli sürelerde ozonlu suyla proses edilmiştir (Khaled, Fahad, & Abdullah, 2017). Dolmalık biber, salatalık, domates, lahana, havuç, maydanoz, roka ve pırasadaki klorpirifosların farklı maruziyet sürelerinde uzaklaştırılma yüzdeleri $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sırasıyla 30-83, 91-97, 80-92, 92-95, 87-97, 95-97, 64-100 ve %90-97 arasında değişmiştir. Ancak, $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de maydanoz dışındaki ürünlerin giderim yüzdeleri zamana bağımlılık göstermezken, daha düşük sıcaklıklardakiler ile benzer kalmıştır (Khaled ve ark., 2017). Al-Antary ve ark. (2019), ozonlama prosesinin (5, 10 ve 15 dakikalık maruz kalma süreleri için 0,5, 2 ve 5 ppm) marul yapraklarındaki spike edilen klorfenapir seviyesini azaltma üzerindeki etkisini incelemiştir (Al-Antary, Shaderma, & Al-Dabbas, 2019). Marul yaprakları üzerindeki pestisit konsantrasyonu, bir mikro-elektron yakalama detektörü ile donatılmış gaz kromatografisi kullanılarak tespit edilmiştir. 15 dakika boyunca 5 ppm'lik ozon uygulaması, marul yapraklarında maksimum klorfenapir (%97,15) azalması ile sonuçlanmıştır. Wu ve ark. (2019) ayrıca, 15 dakika boyunca ozonlu suyla yıkama ile 10 pestisit kalıntısının uzaklaştırma yüzdesinin 5 dakikada olduğundan önemli ölçüde yüksek olduğunu bildirmiştir (Y. Wu ve ark., 2019). Al-Dabbas ve ark. (2018), farklı konsantrasyonlardaki domates meyvelerinde bulunan klorpirifos ve sipermetrin kalıntılarının azaltılmasında

ozon uygulamasının (0,4 ppm) etkisini incelemiştir (M. M. Al-Dabbas, Shaderma, Al-Antary, Ghazzawi, & Hamad, 2018). 30 dakikalık maruziyetten sonra klorpirifos ve sipermetrin kalıntılarında maksimum azalma gözlemlenmiştir. Sipermetrin kalıntısının, klorpirifos kalıntısına göre ozona karşı daha dirençli olduğu sonucuna varılmıştır. Karaca ve ark. (2012) üzümde bulunan boskaltit kalıntısının ozona karşı daha dirençli olduğunu belirtmişlerdir (Karaca, Walse, & Smilanick, 2012). Bunun nedeninin aromatik halka yapısına sahip boskaltitin yüksek stabilitesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca ozonun bitkinin iç dokularına nüfuz etme gücü de düşüktür. Bu nedenle, pestisit kalıntıları hücre duvarını veya bitkinin içini geçerse ozon etkili olamamaktadır. Al-Antary ve ark. (2018), domatestede klorfenapir kalıntısının 15 dakika boyunca 2 ppm konsantrasyonundaki ozon maruziyetinden sonra maksimum azalma gösterdiğini bildirmiştir (Al-Antary, Shaderma, & Al-Dabbas, 2018). Domatesteki miklobutanil kalıntısı için ise 15 dakikalık 5 ppm konsantrasyondaki ozon maruziyetinden sonra maksimum bozunma oranı (%98,32) elde edilmiştir. Al-Dabbas ve ark. (2018), 15 dakika boyunca 5 ppm konsantrasyondaki ozonlamanın marul yapraklarındaki miklobutanil kalıntısında önemli bir azalma olduğu sonucuna varmıştır (M. B. Al-Dabbas, Shaderma, & Al-Antary, 2018).

3.1.2. Gaz halinde ozon uygulamaları

Balawejder ve ark. (2014), ozonlama prosesi esnasında meyvelerin kurutulması nedeniyle gaz halinde ozon uygulamasından sonra ahududu ve frenk üzümünde kaptan kalıntısında büyük bir azalma gözlemlenmiştir (Balawejder ve ark., 2014). Bu nedenle kurutma işleminin pestisitlerin uzaklaştırılmasında ozonun etkinliğini potansiyel olarak arttırabileceği düşünülmüştür.

Klorpirifos etil, malation, tetradifon, imazalil, difenokonazol ve klorotalonil, turunçgil meyvelerinin kalitesini ve verimini artırmak için çok sık kullanılan pestisitlerden bazılarıdır. Bu nedenle, turunçgillerde maksimum kalıntı limitleri (MRL'ler) hükümet yetkililerinin dikkatli gözlemi altındadır. Whangchai ve ark. (2011), klorpirifos bozunmasında ozonun gaz halindeki formunun sulu haldeki formundan daha etkili olduğunu öne sürmüştür (Whangchai, Uthaibutra, Phiyanalinmat, Pengphol, & Nomura, 2011). Metzger ve ark. (2007), ozonla zenginleştirilmiş yarı ticari koşullarda depolanan turunçgillerde malation, imazalil ve klorpirifos kalıntı düzeylerinin 35 günlük depolama sonrasında minimum seviyelere düştüğünü bildirmiştir (Metzger & Holmes, 2008). Ozon uygulaması, çileklerdeki difenokonazol kalıntısı miktarını 5 mg kg⁻¹'den 0,5 mg kg⁻¹'e düşürmüştür (F. Heleno ve ark., 2014). Limon, portakal ve greylifurt olmak üzere 3 farklı matris kullanılarak yapılan

bir çalışmada, klorpirifos etil, tetradifon ve klorotalonil adsorpsiyonunun matrise bağlı olarak değişiklik gösterdiği bulunmuştur (Kusvuran, Yıldırım, Mavruk, & Ceyhan, 2012). Araştırmacılar, 5 dakikalık ozonlamanın, turuncuğil matrisindeki klorotalonil kalıntılarının tamamen giderimine sebep olduğunu bulmuşlardır. Limon matrisinde en yüksek adsorpsiyon ve difüzyon tetradifon için rapor edilmiştir. Bununla birlikte, ozonun hem soyulmuş hem de soyulmamış matrislerde üç pestisit kalıntısının tümünün giderilmesinde etkili olduğu bulunmasıyla birlikte, matrislerin yapısal özellikleri ile pestisitlerin uzaklaştırılması arasında bir ilişki kurulamamıştır. Buna karşılık Wu ve ark. (2007) tarafından elde edilen bulgular, ozon dozunun pestisit giderimi üzerinde herhangi bir etki göstermediğini ve sıcaklığın artmasının da olumsuz etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Ozon uygulamasının etkinliğindeki bu farklılıklar, bu araştırmalarda kullanılan gıda matrislerinin ve pestisitlerin farklı fiziko-kimyasal özelliklerine bağlanabilmektedir (J. Wu ve ark., 2007).

Chen ve ark. (2013), ozonun saha düzeyinde gerçekleşen bir uygulamasıyla pestisitlerin uzaklaştırılmasındaki etkinliğini test etmiştir. Bu test, sahada hüküm süren koşullardan oldukça farklı olan laboratuvar bazlı pestisit spike uygulamasına kıyasla, gerçek bir saha senaryosundaki ozonlama prosesinin pestisitlerin üzerine akıbetini yakından taklit etmiştir. Ayrıca, yerel düzeyde bir ozonlama prosesi içeren sebze temizleyicisi de geliştirmişlerdir (Şekil 1).



Şekil 1. Ozon jeneratörüne bağlı sebze temizleme ünitesi

Temizleme ünitesi, harici bir ozon jeneratörüne bağlı bir devirdaim bileşeninden oluşmuştur (Chen, Lin, & Kuo, 2013). Ozon konsantrasyonu, odanın içine yerleştirilmiş ve jeneratöre zamanında ozon üretimi için sinyal gönderen bir ozon gazı analizörü aracılığıyla yakından kontrol edilmiştir.

Sistem, Çin lahanası ve yeşil saplı Çin lahanasında, klorflozuron ve klorotalonil giderimi için test edilmiştir. Sistemin kendisinin klorotalonili %53 ve klorflozuronu %51 uzaklaştırma kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ekipmanın ozon üretimi ile 15 dakika çalıştırılmasıyla, giderilen bu pestisit yüzdeleri, 250 mg sa⁻¹ ozon üretim hızında klorflozuron ve klorotalonil için sırasıyla %60 ve %55'e çıkmıştır. Ozon üretim hızının 500 mg sa⁻¹'e çıkarılmasıyla elde edilen giderim oranlarında sırasıyla %75 ve %77 olmak üzere önemli bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, proses süresinin 15 dakikadan 45 dakikaya çıkarılmasıyla birlikte pestisit giderim yüzdelerinde önemli bir artış gerçekleştiği bildirilmiştir (Chen ve ark., 2013).

Biber, birçok kompleks gıda ürününün içeriğinde yer alan temel bir bileşendir. Ancak biber yetiştiriciliğinde organofosfatlı pestisitlerin uygulanması, tarım zararlılarını kontrol etmek için tüm dünyada yaygın olarak benimsenmiştir. Kaewkiew ve ark. (2012) güneşte kurutulmuş biberlerdeki organofosfat türevlerinin yarı ömrünün 5 gün olduğunu vurgulamıştır (Kaewkiew, Nabnean, & Janjai, 2012). Genel olarak Türkiye'deki biberlerdeki pestisit kalıntıları miktarı, tarımsal ürün ihracatı için gerekli kalite ve güvenlik standartlarını karşılamamaktadır. Gaz halindeki ozon, bu açıda kurutulmuş tarım ürünleri üzerindeki pestisitlerin parçalanması için uygun bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Sintuya ve ark. (2018), 10 kg organik biber için gaz halindeki ozonun pestisit bozunması üzerindeki etkisini incelemek amacıyla biber numunelerinin üzerine 20 mL organofosfatlı pestisit karışımı çözeltisi püskürtmüştür (Sintuya ve ark., 2018). Pestisit çözeltisi, her bir pestisitten, yani klorpirifos, malation, etion ve profenofostan 1000 mg L⁻¹ konsantrasyon içermekteydi. Biber numuneleri, ozonlama işleminin başlamasından önce 10 saat boyunca (25°C/%60 RH) kurutulmuştur. Alev fotometrik dedektörü (GC-FPD) ile donatılmış bir gaz kromatografisi, biber numunelerinde pestisit kalıntısının, 30 dakika boyunca 5,5 g sa⁻¹ hızındaki gaz halinde ozonlama prosesinin malation, etion, klorpirifos ve profenofosu sırasıyla %68, 66, 51 ve %45 oranında giderdiğini ortaya çıkarmıştır. Öte yandan, 8 haftalık depolama süresinden sonra malation, etion, klorpirifos ve profenofosun kendi kendine bozunma yüzdeleri sırasıyla %46, %28, %39 ve %42 olarak bulunmuştur. Sintuya ve ark. (2018) ayrıca bu çalışmada, pestisit bozunma kinetiğinin birinci dereceden bozunma reaksiyonunu takip ettiği sonucuna varmıştır (Sintuya ve ark., 2018). Bourgin ve ark. (2013), 96 dakika boyunca gerçekleşen ozonlama prosesini takiben buğday tohumlarında bittanolün %90 ve imidaklopritin %99 bozunma oranı ile birinci dereceden kinetik bozunmaya uğradığını kaydetmiştir (Bourgin, Albet, & Violleau, 2013). Sintuya ve ark. (2018), biyokimyasal olarak ozon fümigasyonunun biberlerin kapsaisin içeriğini etkilemediğini fark etmiştir (Sintuya ve ark., 2018). Bunun nedeninin, gaz halindeki ozonun biberin yumurtalığına nüfuz etmesine izin vermek için

yeterli olmayan ve dolayısıyla kapsaisin içeriği üzerinde minimum etkiye sahip 30 dakikalık maruziyet süresi olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle, ürün kalitesinde herhangi bir önemli değişiklikten kaçınmak için proses süresinin ozon uygulamasında anahtar rol oynadığını vurgulamak yerindedir.

Ozonlu suyun büyük depolama birimlerinde uygulanmasının pratikte zor olması nedeniyle gaz halindeki ozon uygulaması, uzun süreli arıtma için faydalı bir alternatif haline gelmektedir. Karaca ve ark. (2012) tarafından iprodion, fenheksamit, pirimetanil, boskalit ve siprodinil çözeltilerinin bir karışımı püskürtülen üzüm taneleri, soğuk depolama sırasında $0,3 \mu\text{L L}^{-1}$ konsantrasyona sahip ozonla zenginleştirilmiş hava uygulama işlemine tabi tutulmuştur (Karaca ve ark., 2012). Ozonla zenginleştirilmiş atmosferde depolama, ortam havasında depolamaya kıyasla siprodinil, pirimetanil ve fenheksamit giderim oranları artışı hızlandırmış, ancak iprodion veya boskalitte bu mümkün olmamıştır. 36 günlük depolamadan sonra, pirimetanil, siprodinil ve fenheksamitin bozunması, ozonlu havada atmosferik havaya göre sırasıyla 3,6, 2,8 ve 1,6 kat daha yüksek bulunmuştur. 1 saat süre boyunca $10000 \mu\text{l L}^{-1}$ ozon ile fümigasyonun piraklostrobin, pirimetanil, siprodinil ve fenheksamit kalıntı seviyelerinde sırasıyla yaklaşık %100,0, %83,7, %75,4 ve %68,5 oranında önemli bir azalmaya sebep olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle ozonun gaz fazı, pestisit kalıntılarını gidermek için güvenilir bir alternatif olarak görülmüştür. Bununla birlikte, ürünlere hasat sonrası stres yüklememek için azami özen gösterilmesi gerekmektedir. Ayrıca, gaz halindeki ozonun verimliliği uzun arıtma periyodu ile arttığından, yöntem sadece yukarıda belirtilen seçilmiş birkaç üründe belirli pestisit türleri için uygun bulunmuştur. Tablo 2'de meyve ve sebzelerde gaz halinde ozonla gerçekleştirilen farklı çalışmalara ait ürüne, pestisit türüne ve prosese bağlı olarak elde edilen pestisit giderim düzeyleri belirtilmiştir.

Tablo 2. Gıdalarda gaz halinde ozonla gerçekleştirilen farklı çalışmalara ait ürüne, pestisit türüne ve prosese bağlı olarak pestisit giderimleri

Ürün	Pestisit türü	Proses şartları	Giderim (%)	Referans
Elma	Boskalit	Gaz halinde ozon	42	Sadlo ve ark. (2017)
	Piraklostrobin	Gaz halinde ozon	32	
Hasar görmemiş elma	Kaptan	Gaz halinde ozon: 1 ppm her gün dozlanmış	78,89	Antos ve ark. (2018)
Hasar görmüş elma		Gaz halinde ozon: 1 ppm, 12 saat, 1 dakika boyunca 84 güne kadar	70,64	
Lahana	Klorotalonil	15 dak proses süresi için 250 mg sa ⁻¹ ozon gazı akışı	77	Chen ve ark. (2013)
Havuç	Difenokonazol	Gaz halinde ozon (5 mg L ⁻¹)	95,3	Souza ve ark. (2018)
Acı biber	Malation Klorpirifos Profenofos Etion	5,5 g sa ⁻¹ akış hızıyla 30 dakika boyunca gaz halinde ozon fümigasyonu	68	Sintuya ve ark. (2018)
			51	
			45	
			66	
Liçi	Klorpirifos	60 dak boyunca gaz halinde 240 mg L ⁻¹ ozon	45	Whangchai ve ark. (2011)
Sofralık üzüm	Difenokonazol	0,8 mg L ⁻¹ ozon gazı, 60 dak	95	Heleno ve ark. (2014)
	Piraklostrobin Pirimetaniil Siprodinil Fenheksamit	10 ml L ⁻¹ ozon gazı, 60 dak	100	Gabler ve ark. (2010)
			83,7	
			75,4	
			68,5	
İprodion Boskalit Fenheksamit Pirimetaniil Siprodinil	Soğuk depolama, 0,300 mL L ⁻¹ ozon gazı, 36 gün	23,9	Karaca ve ark. (2012)	
		46,2		
		64,5		
		51,6		
		34,7		
Azoksistrobin Bupirimat Karbendazim Penkonazol Triadimenol Trifloksistrobin	0,64 mg m ⁻³ ozonla zenginleştirilmiş hava	90,7	Karaca (2018)	
		63,4		
		38,5		
		80,2		
		61,4		
		51,8		

3.1.3. Mikrokabarcık halinde ozon uygulamaları

Pestisit kalıntılarının giderilmesinde daha yüksek verim elde etmek amacıyla sebze ve meyveleri arındırma prosesi için ozon mikrokabarcıkları da oluşturulabilmektedir. Çapı 50 µm'den küçük olan mikrokabarcıklar, pestisit kalıntılarının uzaklaştırılmasında tercih edilen kendi kendine basınçlandırma, negatif şarj ve serbest radikal üretimi gibi spesifik özelliklerle karakterize edilmektedirler. Takahashi ve ark. (2003) tarafından dekompresyon ve gaz-su

sirkülasyon sistemi kullanılarak üretilen ozon mikrokabarcığı, marul yaprakları, domates ve çilekte bulunan fenitrothion üzerinde test edilmiştir. Ürünlerin fenitrothion bileşiği içeren bir çözeltiye daldırılarak bu bileşiğin ürünlere sızmasına izin verilmiş ve ardından ozon mikrokabarcıklarıyla 20 °C'de farklı sürelerle ozonlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Marul yapraklarında çilek ve domatese kıyasla daha yüksek pestisit giderim yüzdeleri gözlenmiştir. Giderim yüzdeleri, işlem süresinden ve daha çok bu mikrokabarcık oluşturma yöntemlerinden etkilenmiştir. Kalıntı fenitrothionun gideriminde dekompresyon ile üretilen ozon mikrokabarcıklarının, gaz-su sirkülasyonu ile üretilen mikrokabarcıklardan üstün olduğu ispatlanmıştır. Verimlilikteki farklılıklar, gaz-su sirkülasyonu ile elde edilen 40 µm mikrokabarcık boyutuna kıyasla 10 µm'lik dekompresyon tipi mikrokabarcıkların dokuya daha etkili bir şekilde sızabildiği için üretilen mikrokabarcıkların boyutuna bağlanmıştır (Takahashi ve ark., 2003).

Bu araştırmalardan yola çıkıldığında, pestisit gideriminin esas olarak ozon konsantrasyonuna, sıcaklığa ve proses süresine bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, bu parametrelerin optimizasyonu, ozon prosesini daha verimli ve ekonomik hale getirebilmektedir. Souza ve ark. (2018), havuçlardan linuron ve difenokonazolü gidermek için başarılı bir girişimde bulunmuştur (de Souza ve ark., 2018). Bahsedilen verimi etkileyen parametreler, merkezi bir kompozit tasarım kullanılarak hem gaz halinde hem de suda çözünmüş ozon için optimize edilmiştir. Havuçta herhangi bir ara ürün oluşmadan pestisit kalıntısının giderilmesinde her iki yöntemin de etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Bu optimize koşullar genotip veya çeşide, pestisit konsantrasyonuna, havuçtaki toprak kirliliğine ve diğer bazı faktörlere göre değişiklik gösterdiğinden, ürüne ve pestisit türüne bağlı olarak bu yaklaşımın uygulanabilirliği mevcuttur. Ayrıca ozon uygulamasının, ozonun etkinliğini arttırmak için ultrason, elektron ışını, perokson (H₂O₂) ve ultraviyole gibi diğer yöntemlerle kombinasyonları mümkündür (Fan, Zhang, Xiao, Qiu, & Jiang, 2015). Tablo 3'te meyve ve sebzelerde mikrokabarcık halinde ozonlamayla gerçekleştirilen farklı çalışmalara ait ürüne, pestisit türüne ve prosese bağlı olarak elde edilen pestisit giderim düzeyleri verilmiştir.

Tablo 3. Meyve ve sebzelerde mikrokabarcık halinde ozonlamayla gerçekleştirilen farklı çalışmalara ait ürüne, pestisit türüne ve prosese bağlı olarak elde edilen pestisit giderim düzeyleri

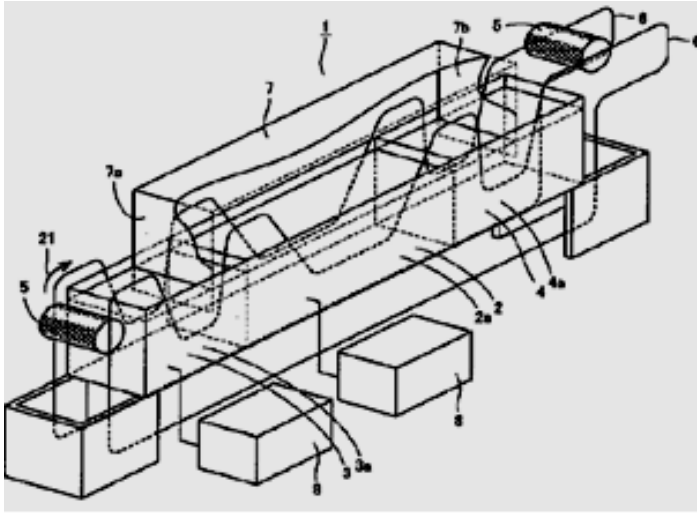
Ürün	Pestisit türü	Proses şartları	Giderim (%)	Referans
Marul	Fenitroton	Başlangıç konsantrasyonu 2 ppm olan ozon mikrokabarcıkları uygulaması	72,2	Ikeura ve ark. (2011)
		Mikrokabarcık ozon uygulaması, 2,5 L dak ⁻¹ akış hızı, 10 dak, mikrokabarcıkları oluşturan faktörler; • Gaz-su sirkülasyonu • Dekompres	73,2	
Başlangıç konsantrasyonu 2 ppm olan ozon mikrokabarcıkları		25,9		
2,5 L dak ⁻¹ , 10 dak, Mikrokabarcıkları oluşturan faktörler; • Gaz-su sirkülasyonu • Dekompres		45,7		
Çilek				

Tablo 2, 3 ve 4 pestisit giderim düzeylerinin ürüne, pestisit türüne ve prosese bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Ozon uygulama yöntemleri göz önüne alındığında, daha yüksek ozon dozu ve daha uzun uygulama süresinin uygulanması pestisitlerin daha yüksek oranlarda giderimini sağlamaktadır (Banerjee, Oulkar, Patil, Dasgupta, & Adsule, 2008). Bununla birlikte, ürün üzerindeki pestisit ilk konsantrasyonu da giderim yüzdesini etkilemektedir. Daha yüksek seviyelerde pestisit ile kontamine olmuş gıdalarda, daha yüksek giderim oranları gözlenmiştir. Bunların, indirgeme kinetikleri, (şözde birinci dereceden kinetik model) kullanılarak iyi bir şekilde açıklanması söz konusudur (Debabrata & Sivakumar, 2018). Ayrıca, ozonun pestisit bozunması üzerindeki etki şeklinin, criegee reaksiyon mekanizmasını (ozonoliz) takip ettiği öne sürülmektedir (Criegee, 1975).

Sebzeler ozon uygulaması ile pestisitlerin etkili bir şekilde giderimi için meyvelere göre daha avantajlı olarak kabul edilmekte, bu konuda meyvelerin ozon uygulamaları için sebzelerden daha farklı davrandığı vurgulanmalıdır. Dokuların yapısı, yoğunluğu ve ozona maruz kalan yüzey alanı bu farklı davranışa sebep olan ana faktörlerdendir. Bu nedenle ozon, daha geniş yüzey alanı nedeniyle sebzelerin yapraklarında bulunan pestisitler ile daha etkili bir şekilde reaksiyona girebilirken, kalın perikarp tabakasından dolayı meyvelere nüfuz etme konusunda daha az etkili kalmaktadır. Ikeura ve ark. (2011)'a göre, ozonlama için aynı proses koşulları altında marulla karşılaştırıldığında, çilekteki pestisit giderimi önemli ölçüde daha düşük bulunduğu için bu argüman doğrulanmıştır (H. Ikeura, Kobayashi, & Tamaki, 2011).

3.2. Ozon Uygulamalarıyla Gıdalardan Pestisit Giderimine Dair Patent Alınmış Tasarımlar

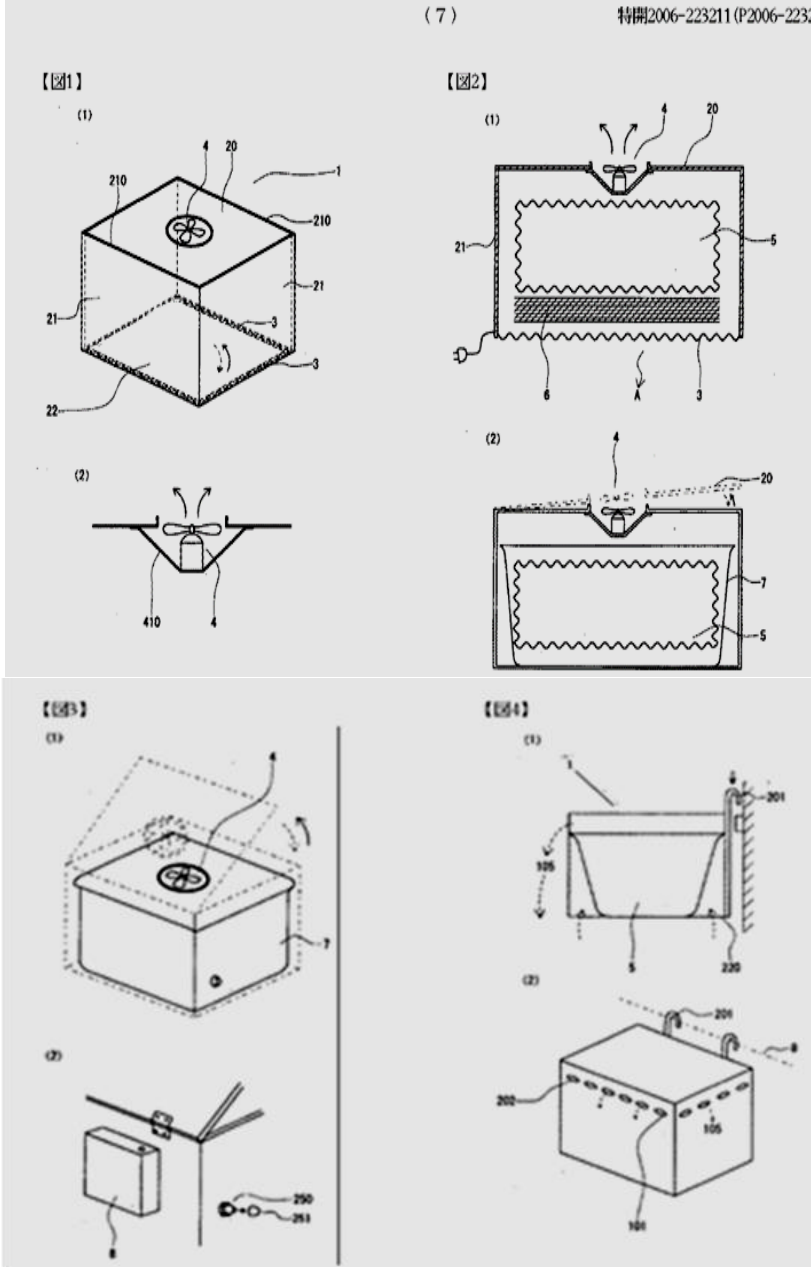
Tsutomu ve ark. (2003) ozon prosesi içeren bir “Gıda Yıkayıcı” tasarlamışlardır (Tsutomu, Toru, & Shoken, 2003). Bu tasarımda, ozon içeren su ile sebze gibi gıdaları yeterince yıkayabilen bir gıda yıkayıcı geliştirmek istemişlerdir. Tasarımın içerisinde, ozon-su içeren yıkama tankı (2), ön arıtma tankı (3) ve yıkama sonrası tank (4) gıda yıkayıcı (1)’ya bağlanmıştır. Gaz-sıvı karıştırıcı (8)’dan temin edilen ozonlu su (2a) ozon-su yıkama tankında, bir diğer tanktan temin edilen ozonlu su (3a) ise yıkama öncesi tank (3) içinde depolanmıştır. Yıkama sonrası tankta (4) su (4a) tutulmuştur. Bir kapak (7) aracılığıyla ozon-su yıkama tankından gelen atıksu (2), ön arıtma tankından (3) ve işlem sonrası bekletme tankından (4) geçtikten sonra bertaraf edilmiştir. Bir yan duvar (7a) ozon-su karışımına ve bir diğer yan duvar da (7b) suya daldırılmıştır. Ozon-su karışımına (2a) bakan 2 bölge, yıkama öncesi tank (3) ve yıkama sonrası tank (4a) ile kapatılmıştır. Bu sistem Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Ozon prosesi içeren bir “Gıda yıkayıcı” tasarımı (Tsutomu ve ark., 2003)

Akıyasu (2006), gıdalarda kullanılmak üzere “Ozon Üreten Araç” tasarlamıştır (Akıyasu, 2006). Bu ozon üreten cihaz, ozon buzu üreten ve ozon buzunu barındırmak için kullanılan bir üniteden oluşmaktadır. Ozon gazının nüfuz etmesi için yeterli kaliteye sahip bir malzemeden yapılmış bu ünite bakterisit ve çürümeyi önleyen kullanımlar için ozon temin etmeye yaramaktadır. Ozon buzunun çözülmesine eşlik eden ozon gazı üretimiyle uzun süre çiğ balık dilimleri gibi gıdaların tazeliğinin korunması sağlanmaktadır. Ayrıca bu aracın

tasarımında, ozon gazının nüfuz etmesi için bir malzeme kalitesine ihtiyaç duyulması ve çözünme sonucu oluşan suyun dışarıya sızmaması gereğinden, eğirerek birleştirme yöntemi ile üretilen bir "dokunmamış kumaş" türü kullanılmıştır. Bu ozon üreten aracın tasarımı Şekil 3'te belirtilmiştir.



Şekil 3. Ozon üreten araç (Akıyasu, 2006)

Hakan (2009) “Taşınabilir Kompakt Ozon Jeneratörü” tasarlamıştır (Hakan, 2009). Buluş konusu “Taşınabilir Kompakt Ozon Jeneratörü” su ve meşrubat şişeleme, içme sularında demir ve mangan arıtımı, gıda işletmeleri, soğuk hava depoları, et kesimhaneleri, tavuk üretim çiftlikleri, tavuk kesimhaneleri, balık işleme tesisleri, balık üretim çiftlikleri, sebze-meyve depolama, kot ağartma, koku giderimi, yüzme havuzları ve benzeri birçok alanda dezenfeksiyon amacıyla kullanım potansiyeline sahiptir. Bu tasarımın modüler yapısı sayesinde kapasite kontrolü kolaylaşmakta ve bir veya daha fazla modülün devre dışı kalması durumunda bile tek modül kalıncaya kadar sistemin çalışmasına ara verilmeden devam edilebilmektedir. Ayrıca taşınabilir yapıda olması ve kompakt boyutları sayesinde kullanıldığı işletme içerisinde mobil olarak kullanılabilirliktedir.

Sevim ve Yılmaz (2016) “Güneş Enerjili PEM (Proton Elektrolit Membran) Destekli Ozon Jeneratör Sistemi” bulmuşlardır (Sevim & Yılmaz, 2016). Bu buluş, taşıma işi yapan frigorifik araç kasalarına yerleştirilen gıda ürünlerinin ozon gazına maruz kalmalarıyla ürünlerin dışında meydana gelebilecek mikroorganizma, küf ve mantar gibi canlıların yok edilerek bu ürünlerin taze kalmasının sağlanması, korunması ve raf ömrünün uzatılması prensibine dayanmaktadır. Sistemde güneş panellerinden faydalanılarak elektrik enerjisi üretilip inverter vasıtasıyla oksijen gazının ozon jeneratörüne iletilmesiyle oluşan ozonun, ürünler üzerine sirkülasyon fanı tarafından ulaştırılması sağlanmıştır. Sistem, taşınacak ürünün teknik değerlerine uygun şekilde soğutma ve nemlendirme işleminin gerçekleşmesini sağlayacak ozon jeneratörü ekipmanları ile birim ekipmanlarının kontrolünü sağlayan kontrolör biriminden oluşmaktadır.

Atılmış (2019) “Evyeli Ozonlu Hava Kompresörlü Gıda Yıkama Sistemi” tasarlamıştır (E. Atılmış, 2019). Buluş konusu ürün, kolay monte edilecek şekilde tasarlanmış olup, yıkama haznesine (evyeye) hava verilerek sebze, meyve ve benzeri gıdaların kolay ve zahmetsizce yıkanmasını, ozon gazı verilerek ise mikroorganizma ve bakterilerden arındırılmasını sağlayan evyeli-ozonlu-hava kompresörlü sebze meyve ve benzeri bir gıda yıkama makinesidir.

Atılmış (2019) ayrıca “Sebze, Meyve ve Donmuş Gıda Yıkama ve Dezenfekte Makinesi” buluşu yapmıştır (E. Atılmış, 2019). Bu buluş; sebze, meyve ve donmuş gıdaların yıkanması ve dezenfeksiyonu için geliştirilmiştir. Bu sistem, sebzelerin ve meyvelerin üzerinde bulunan toprak, kum vb. görünen maddelerden temizlenmesini ve aynı zamanda hasat öncesinden kalan zirai ilaç atıklarının ve bu gıdaların bozulmasına ve çürümesine neden olabilecek bakterilerin giderimini sağlayan bir gıda yıkama ve dezenfeksiyon sistemidir. Bu sayede buluş, sebze ve meyvelerin hem daha sağlıklı olmasına hem de raf ömrünün uzamasına katkı sağlamaktadır. Aynı şekilde dondurulmuş balık,

tavuk gibi gıdaların çözülmesi sistem içerisinde sağlanmaktadır. Bu sistem, hava kanalı üzerine sıra ile konumlandırılmış hava yönlendirme başlıkları ile suyun içerisinde istenilen yönde ve kuvvette devir oluşmasını ve bu devir yardımıyla gıdaların zarar görmeden hem kendi etrafında hem de birbirlerinin arasında dönmesinin sağlanmasıyla görünen kirlerden arınmasını ve görünmeyen zirai atık ve bakterilerden de ozonlama ile temizlenme/dezenfeksiyon prosesini içermektedir.

4. Sonuç

Sebze ve meyvelerdeki pestisit kalıntılarının giderilmesi veya azaltılması için birçok geleneksel yöntem uygulanmaktadır. Bununla birlikte, uygulanan pestisit giderim metodlarının, sebze ve meyvelerin duyuşsal ve fizikokimyasal özelliklerini değiştirmemesi gerekmektedir. Bu konuda ozon uygulamaları, istenilen özelliklerinden dolayı gıdalarda pestisit kalıntısı yayılımının önlenmesi için potansiyel bir teknolojidir.

Bu çalışma kapsamında, sebze ve meyvelerde bulunan pestisitlerin yeni geliştirilen ozon içeren yöntemlerle giderimleri araştırılmış ve ortaya çıkan sonuçlar tartışılmıştır. Ozon içeren yöntemlerle gıdalardan pestisit giderimi için yapılan çalışmalar genel olarak; ozonlu su uygulamaları, gaz halinde ozon uygulamaları ve mikrokbarcık halinde ozon uygulamaları olarak kategorize edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, ozon uygulamalarıyla birlikte pestisitlerin giderim seviyeleri, başlıca pestisit türüne, sıcaklığa ve ozonla muamele süresine bağlı olarak değişmiştir.

Sulu ozon uygulamalarında, pestisitlerin bozunması için ozonlama prosesi verimi, uygulanan ozon konsantrasyonu, gıda matrisinin fiziksel özellikleri ve ortamdaki atık ozonun mevcudiyetine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca gıda ürünlerindeki düşük yüzey alanı, ozon ile teması etkili bir şekilde azaltmakta ve dolayısıyla pestisit giderim verimini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca üzüm gibi bazı meyveler yüzeyinde bulunan epikütiküler mum tabakasına sahip olduğundan pestisitlerin oksidatif reaksiyonlardan korunması söz konusudur. Bununla birlikte, ozon su içerisinde kararsızdır ve çok hızlı bir şekilde oksijene dönüşmektedir. Bu sebeple, gaz halindeki ozon uygulamaları, havadaki yüksek stabilitesi nedeniyle sebze ve meyve depolarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Sulu ozon uygulamaları, ozonun kısa yarı ömrü nedeniyle yerinde uygulamalar için çok daha uygundur. Ayrıca ozon suda hızla ayrıştığı için oksidasyonu gerçekleştiren serbest radikallerin oluşumu için gereken potansiyele sahiptir. En önemlisi de, ozon oksijene bozunurken ikincil kirleticiler oluşmamaktadır. Bununla birlikte, gaz halinde ozon uygulamaları, ozonlu suyun büyük depolama birimlerinde uygulanmasının pratikte zor olması nedeniyle, uzun süreli arıtma koşulları için

önemli bir alternatif olmaktadır. Mikrokabarcık halinde ozon uygulama proseslerinde ise proses verimleri, uygulama süresinden daha çok mikrokabarcıkların oluşturulma yöntemlerinden etkilenmektedir. Yapılan çalışmalarda, dekompresyon ile üretilen ozon mikrokabarcıklarının, gaz-su sirkülasyonu ile üretilen mikrokabarcıklardan daha etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu etki, gaz-su sirkülasyonu ile elde edilen 40 µm mikrokabarcık boyutuna kıyasla 10 µm'lik dekompresyon tipi mikrokabarcıkların dokuya daha etkili bir şekilde sızabildiği için üretilen mikrokabarcıkların boyutuna bağlanabilmektedir.

Sonuç olarak, sebzeler ozon uygulaması ile pestisitlerin etkili bir şekilde giderimi için meyvelere göre genel olarak daha avantajlı olarak kabul edilmiş, bu konuda meyvelerin ozon uygulamaları için sebzelerden daha farklı davrandığı tespit edilmiştir. Dokuların yapısı, yoğunluğu ve ozona maruz kalan yüzey alanı bu farklı davranışa sebep olan ana faktörlerdendir. Bu nedenle ozon, daha geniş yüzey alanı nedeniyle sebzelerin yapraklarında bulunan pestisitler ile daha etkili bir şekilde reaksiyona girebilirken, kalın perikarp tabakasından dolayı meyvelere nüfuz etme konusunda daha az etkili kalmaktadır.

Kaynaklar

- Akıyasu, I. (2006). Vehicle for Ozone Generation *JP2006223211A*·2006-08-31.
- Al-Antary, T. M., Shaderma, A. M., & Al-Dabbas, M. B. (2018). Effect of Ozonation treatment on spiked myclobutanil pesticide on tomato fruits. *Feb-Fresenius Environmental Bulletin*, 8574.
- Al-Antary, T. M., Shaderma, A. M., & Al-Dabbas, M. B. (2019). Effect of ozonation treatment on spiked chlorfenapyr pesticide on lettuce. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(1), 370-375.
- Al-Dabbas, M. B., Shaderma, A. M., & Al-Antary, T. M. (2018). Effect of ozonation treatment on spiked myclobutanil pesticide on lettuce. *Feb-Fresenius Environmental Bulletin*, 8600.
- Al-Dabbas, M. M., Shaderma, A. A., Al-Antary, T. M., Ghazzawi, H. A., & Hamad, H. J. (2018). Effect of ozonation on cypermethrin and chlorpyrifos pesticides residues degradation in tomato fruits. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(10), 6628-6633.
- Antos, P., Kurdziel, A., Sadło, S., & Balawejder, M. (2013). Preliminary Study on the Use of Ozonation for the Degradation of Dithiocarbamate Residues in the Fruit Drying Process: Mancozeb Residue in Blackcurrant is the Example Used. *Journal of Plant Protection Research* DOI - 10.2478/jppr-2013-0007, vol. 53(No 1).

- Antos, P., Piechowicz, B., Gorzelany, J., Matłok, N., Migut, D., Józefczyk, R., & Balawejder, M. (2018). Effect of Ozone on Fruit Quality and Fungicide Residue Degradation in Apples during Cold Storage. *Ozone: Science & Engineering*, 40(6), 482-486. doi: 10.1080/01919512.2018.1471389
- Atılmış, E. (2019). Evyeli Ozonlu Hava Kompresörlü Gıda Yıkama Sistemi *TR20190001201U 20190125*.
- Atılmış, E. (2019). Sebze, Meyve ve Donmuş Gıda Yıkama ve Dezenfekte Makinesi. In T. U. 20190427 (Ed.).
- Balawejder, M., Antos, P., & Sadlo, S. (2013). Potential of ozone utilization for reduction of pesticide residue in food of plant origin. A review. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 64(1).
- Balawejder, M., Szpyrka, E., Antos, P., Józefczyk, R., Piechowicz, B., & Sadło, S. (2014). Method for Reduction of Pesticide Residue Levels in Raspberry and Blackcurrant Based on Utilization of Ozone. *Environmental Protection and Natural Resources / Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 25(4), 1-5. doi: doi:10.2478/oszn-2014-0018
- Banerjee, K., Oulkar, D. P., Patil, S. H., Dasgupta, S., & Adsule, P. G. (2008). Degradation kinetics and safety evaluation of tetraconazole and difenoconazole residues in grape. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 64(3), 283-289.
- Bourgin, M., Albet, J., & Violleau, F. (2013). Study of the degradation of pesticides on loaded seeds by ozonation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 1004-1012.
- Brodowska, A. J., Nowak, A., & Śmigielski, K. (2018). Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58(13), 2176-2201.
- Chen, J. Y., Lin, Y. J., & Kuo, W. C. (2013). Pesticide residue removal from vegetables by ozonation. *Journal of Food Engineering*, 114(3), 404-411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.033>
- Criegee, R. (1975). Mechanism of ozonolysis. *Angewandte chemie international edition in english*, 14(11), 745-752.
- de Souza, L. P., Faroni, L. R. D. A., Heleno, F. F., Pinto, F. G., de Queiroz, M. E. L. R., & Prates, L. H. F. (2018). Ozone treatment for pesticide removal from carrots: Optimization by response surface methodology. *Food chemistry*, 243, 435-441.
- Debabrata, P., & Sivakumar, M. (2018). Sonochemical degradation of endocrine-disrupting organochlorine pesticide Dicofol: Investigations on the transformation pathways of dechlorination and the influencing operating parameters. *Chemosphere*, 204, 101-108. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.014>

- Fan, X.-D., Zhang, W.-L., Xiao, H.-Y., Qiu, T.-Q., & Jiang, J.-G. (2015). Effects of ultrasound combined with ozone on the degradation of organophosphorus pesticide residues on lettuce. *RSC Advances*, 5(57), 45622-45630.
- Gabler, F. M., Smilanick, J. L., Mansour, M. F., & Karaca, H. (2010). Influence of fumigation with high concentrations of ozone gas on postharvest gray mold and fungicide residues on table grapes. *Postharvest Biology and Technology*, 55(2), 85-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.09.004>
- González-Rodríguez, R. M., Rial-Otero, R., Cancho-Grande, B., Gonzalez-Barreiro, C., & Simal-Gándara, J. (2011). A review on the fate of pesticides during the processes within the food-production chain. *Critical reviews in food science and nutrition*, 51(2), 99-114.
- Hakan, E. M. (2009). N. N. Otomasyon.
- Heleno, F., de Queiroz, M. E., Neves, A. A., Freitas, R. S., Faroni, L. R. A., & De Oliveira, A. F. (2014). Effects of ozone fumigation treatment on the removal of residual difenoconazole from strawberries and on their quality. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 49(2), 94-101. doi: 10.1080/03601234.2014.846736
- Heleno, F. F., de Queiroz, M. E., Neves, A. A., Faroni, L. R., Sousa, F. A. d., & Oliveira, A. F. d. (2015). Ozone treatment for the removal of residual chlorothalonil and effects on the quality of table grapes. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 26, 687-694.
- Hernández, A. F., Parrón, T., Tsatsakis, A. M., Requena, M., Alarcón, R., & López-Guarnido, O. (2013). Toxic effects of pesticide mixtures at a molecular level: their relevance to human health. *Toxicology*, 307, 136-145.
- Horvitz, S., & Cantalejo, M. J. (2014). Application of ozone for the postharvest treatment of fruits and vegetables. *Critical reviews in food science and nutrition*, 54(3), 312-339.
- Hwang, E.-S., Cash, J. N., & Zabik, M. J. (2001). Postharvest Treatments for the Reduction of Mancozeb in Fresh Apples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(6), 3127-3132. doi: 10.1021/jf010234h
- Ikeura, H., Kobayashi, F., & Tamaki, M. (2011). Removal of residual pesticide, fenitrothion, in vegetables by using ozone microbubbles generated by different methods. *Journal of Food Engineering*, 103(3), 345-349. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.11.002>
- Ikeura, H., Kobayashi, F., & Tamaki, M. (2013). Ozone microbubble treatment at various water temperatures for the removal of residual pesticides with negligible effects on the physical properties of lettuce and cherry tomatoes. *Journal of Food Science*, 78(2), T350-T355.
- Kaewkiew, J., Nabnean, S., & Janjai, S. (2012). Experimental investigation of

- the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand. *Procedia Engineering*, 32, 433-439.
- Karaca, H. (2019). The effects of ozone-enriched storage atmosphere on pesticide residues and physicochemical properties of table grapes. *Ozone: Science & Engineering*, 41(5), 404-414.
- Karaca, H., & Velioglu, Y. S. (2007). Ozone Applications in Fruit and Vegetable Processing. *Food Reviews International*, 23(1), 91-106. doi: 10.1080/87559120600998221
- Karaca, H., Walse, S. S., & Smilanick, J. L. (2012). Effect of continuous 0.3µL/L gaseous ozone exposure on fungicide residues on table grape berries. *Postharvest Biology and Technology*, 64(1), 154-159. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.07.004>
- Khaled, A., Fahad, B., & Abdullah, A. (2017). Ozone as a safety post-harvest treatment for chlorpyrifos removal from vegetables and its effects on vegetable quality. *Int J Food Nutr Sci*, 4(1), 38-48.
- Kırış, S., & Velioglu, Y. S. (2016). Reduction in pesticide residue levels in olives by ozonated and tap water treatments and their transfer into olive oil. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 33(1), 128-136.
- Kusvuran, E., Yildirim, D., Mavruk, F., & Ceyhan, M. (2012). Removal of chlorpyrifos ethyl, tetradifon and chlorothalonil pesticide residues from citrus by using ozone. *Journal of Hazardous Materials*, 241-242, 287-300. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.09.043>
- Liang, Y., Wang, W., Shen, Y., Liu, Y., & Liu, X. J. (2012). Effects of home preparation on organophosphorus pesticide residues in raw cucumber. *Food Chemistry*, 133(3), 636-640. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.016>
- Lozowicka, B., Ilyasova, G., Kaczynski, P., Jankowska, M., Rutkowska, E., Hrynko, I., . . . Szabunko, J. (2016). Multi-residue methods for the determination of over four hundred pesticides in solid and liquid high sucrose content matrices by tandem mass spectrometry coupled with gas and liquid chromatograph. *Talanta*, 151, 51-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.01.020>
- Lozowicka, B., Jankowska, M., Hrynko, I., & Kaczynski, P. (2016). Removal of 16 pesticide residues from strawberries by washing with tap and ozone water, ultrasonic cleaning and boiling. *Environmental monitoring and assessment*, 188(1), 51.
- Metzger, M., & Holmes, H. (2008). Time Scales in the Unstable Atmospheric Surface Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 126(1), 29-50. doi: 10.1007/s10546-007-9219-0
- Misra, N. N. (2015). The contribution of non-thermal and advanced oxidation technologies towards dissipation of pesticide residues. *Trends in Food*

- Science & Technology*, 45(2), 229-244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.06.005>
- Ong, K. C., Cash, J. N., Zabik, M. J., Siddiq, M., & Jones, A. L. (1996). Chlorine and ozone washes for pesticide removal from apples and processed apple sauce. *Food Chemistry*, 55(2), 153-160. doi: [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00097-6](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)00097-6)
- Osman, K. A. (2015). Production of date palm fruits free of acaricides residues by ozone technology as post-harvest treatment. *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3322-3335. doi: 10.1007/s13197-014-1398-3
- Pandiselvam, R., Kaavya, R., Jayanath, Y., Veenuttranon, K., Lueprasitsakul, P., Divya, V., . . . Ramesh, S. V. (2020). Ozone as a novel emerging technology for the dissipation of pesticide residues in foods—a review. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 38-54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.017>
- Pandiselvam, R., Mayookha, V., Kothakota, A., Sharmila, L., Ramesh, S., Bharathi, C., . . . Srikanth, V. (2020). Impact of Ozone Treatment on Seed Germination—A Systematic Review. *Ozone: Science & Engineering*, 42(4), 331-346.
- Pandiselvam, R., Sunoj, S., Manikantan, M. R., Kothakota, A., & Hebbar, K. B. (2017). Application and kinetics of ozone in food preservation. *Ozone: Science & Engineering*, 39(2), 115-126.
- Perry, J. J., & Yousef, A. E. (2011). Decontamination of raw foods using ozone-based sanitization techniques. *Annual review of food science and technology*, 2, 281-298.
- Qi, H., Huang, Q., & Hung, Y.-C. (2018). Effectiveness of electrolyzed oxidizing water treatment in removing pesticide residues and its effect on produce quality. *Food Chemistry*, 239, 561-568. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.144>
- RASFF. (2020). Avrupa Komisyonu Gıda ve Yem Güvenliği Uyarıları
- RASFF. (2021). Avrupa Komisyonu Gıda ve Yem Güvenliği Uyarıları
- Sadło, S., Szpyrka, E., Piechowicz, B., Antos, P., Józefczyk, R., & Balawejder, M. (2017). Reduction of Captan, Boscalid and Pyraclostrobin Residues on Apples Using Water Only, Gaseous Ozone, and Ozone Aqueous Solution. *Ozone: Science & Engineering*, 39(2), 97-103. doi: 10.1080/01919512.2016.1257931
- Selma, M. V., Ibáñez, A. M., Cantwell, M., & Suslow, T. (2008). Reduction by gaseous ozone of Salmonella and microbial flora associated with fresh-cut cantaloupe. *Food microbiology*, 25(4), 558-565.
- Sevim, D., & Yılmaz, E. N. (2016). Güneş Enerjili PEM (Proton Elektrolit Membran) Destekli Ozon Jeneratör Sistemi. In T. 20160204 (Ed.).
- Sintuya, P., Narkprasom, K., Jaturonglumlert, S., Whangchai, N., Peng-Ont,

- D., & Varith, J. (2018). Effect of Gaseous Ozone Fumigation on Organophosphate Pesticide Degradation of Dried Chilies. *Ozone: Science & Engineering*, 40(6), 473-481. doi: 10.1080/01919512.2018.1466690
- Smilanick, J. L. (2003). *Use of ozone in storage and packing facilities*. Paper presented at the Washington tree fruit postharvest conference.
- Takahashi, M., Kawamura, T., Yamamoto, Y., Ohnari, H., Himuro, S., & Shakutsui, H. (2003). Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(10), 2171-2173.
- Tsutomu, H., Toru, K., & Shoken, K. K. (2003). Food Washer. In JP2003299470A·2003-10-21 (Ed.).
- Wang, S., & Wang, J. (2019). Oxidative removal of carbamazepine by peroxymonosulfate (PMS) combined to ionizing radiation: Degradation, mineralization and biological toxicity. *Science of The Total Environment*, 658, 1367-1374.
- Wang, S., Wang, J., Wang, T., Li, C., & Wu, Z. (2019). Effects of ozone treatment on pesticide residues in food: a review. *International journal of food science & technology*, 54(2), 301-312.
- Whangchai, K., Uthaibutra, J., Phiyalaninmat, S., Pengphol, S., & Nomura, N. (2011). Effect of Ozone Treatment on the Reduction of Chlorpyrifos Residues in Fresh Lychee Fruits. *Ozone: Science & Engineering*, 33(3), 232-235. doi: 10.1080/01919512.2011.554313
- Wu, J., Luan, T., Lan, C., Hung Lo, T. W., & Chan, G. Y. S. (2007). Removal of residual pesticides on vegetable using ozonated water. *Food Control*, 18(5), 466-472. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.12.011>
- Wu, Y., An, Q., Li, D., Wu, J., & Pan, C. (2019). Comparison of Different Home/Commercial Washing Strategies for Ten Typical Pesticide Residue Removal Effects in Kumquat, Spinach and Cucumber. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3), 472.
- Xiong, Z., Cheng, X., & Sun, D. (2011). Pretreatment of heterocyclic pesticide wastewater using ultrasonic/ozone combined process. *Journal of Environmental Sciences*, 23(5), 725-730. doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60465-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60465-2)
- Zohair, A. (2001). Behaviour of some organophosphorus and organochlorine pesticides in potatoes during soaking in different solutions. *Food and chemical Toxicology*, 39(7), 751-755.

BÖLÜM IV

GENİŞ ÖLÇEKLİ OPTİMİZASYON PROBLEMLERİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ FARE SÜRÜSÜ ALGORİTMASI

Emine Baş

(Dr.Öğr. Gör.), Selçuk Üniversitesi, e-mail: ozcan_emine99@hotmail.com

Orcid: 0000-0003-4322-6010

1. Giriş

Gerçek dünya problemleri için, çeşitli kombinatoryal problemlerin çözümü için stokastik optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Bu optimizasyon problemleri doğrusal değildir, çok modludur, hesaplama açısından pahalıdır ve geleneksel yöntemleri çözmek için geniş çözüm uzaylarına sahiptir. Metasezgisel algoritmalar, bu tür karmaşık problemleri makul bir sürede çözebilir. Günümüzde, hesaplama açısından ucuz, esnek ve gradyan içermeyen metasezgisel optimizasyon algoritmaları geliştirmeye büyük ilgi duyulmaktadır. Bu metasezgisel algoritmalar üç kategoride sınıflandırılmıştır: Evrimsel tabanlı, Fiziksel tabanlı ve Sürü zekası tabanlı algoritmalar.

Evrimsel tabanlı algoritmalar, doğadaki üreme, mutasyon, yeniden birleştirme ve seçim gibi evrimsel süreçleri taklit eder. Bu algoritmalar, belirli bir çevre için bir popülasyondaki en büyük adayın hayatta kalmasına dayanır. Bu süreç, tatmin edici bir çözüm bulununcaya kadar birkaç nesil boyunca devam eder. En popüler evrimsel algoritmalarından bazıları Genetik Programlama(GP) (Koza 1992), Genetik Algoritma (GA) (Bonabeau ve diğerleri, 1999), Diferansiyel Evrim (DE) (Storn ve Price, 1997), Evrim Stratejisi (ES) (Beyer ve Schwefel, 2002) ve Biyocoğrafya Tabanlı Optimize Edici (BTO) (Simon, 2008).

Fiziksel tabanlı algoritmalar, fiziksel süreçlerden ilham alır. Bu işlemler elektromanyetik kuvvet, yerçekimi kuvveti, malzemelerin ısıtılması ve soğutulması, atalet kuvveti vb. fizik kurallarına göre tanımlanır. Popüler fiziksel tabanlı algoritmalarından birkaçı Yerçekimi Arama Algoritması (YAA)

(Rashedi ve diğerleri, 2009), Simüle Tavlama (ST) (Kirkpatrick ve diğerleri, 1983), Ücretli Sistem Arama (ÜSA) (Kaveh ve Talatahari, 2010a), Büyük Patlama (BP) (Erol ve Eksin, 2006), Kara Delik Algoritması (KDA) (Hatamlou, 2013), vb.

Sürü zekası tabanlı algoritmalar, grupların toplu zekasından ilham alır. Bu zeka kuş sürülerinde, balık sürülerinde, karınca kolonilerinde ve benzerlerinde mevcuttur. Sürü zekası tekniğinin en popüler algoritması, doğadaki balıkların, kuşların, hayvanların vb. sosyal davranışlarından esinlenen Parçacık Sürü Optimizasyonudur (PSO) (Kennedy ve Eberhart 1995). Bu algoritmadaki her parçacık, arama uzayı boyunca hareket edebilir ve global en iyi çözüme göre mevcut konumunu güncelleyebilir. Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) (Dorigo ve diğerleri, 2006), Arı Toplama Polen Algoritması (ATPA) (Lu ve Zhou, 2008), Kurt Sürüsü Arama Algoritması (KSAA) (Yang ve diğerleri, 2007), Maymun Arama Algoritması (MAA) (Mucherino ve Seref 2007), Guguk Kuşu Arama algoritması (GKA) (Yang ve Deb, 2009), Ateşböceği Algoritması (AA) (Yang, 2010a), Yarasa Algoritması (YA) (Yang, 2010b) gibi diğer popüler sürü zekası tabanlı teknikler vardır.

Buna ek olarak, sürü zekası tabanlı algoritmaların aşağıdaki gibi bazı başka avantajları da vardır: (1) Bu algoritmalar, evrimsel tabanlı algoritmalara kıyasla çok az operatör içerir; (2) Sürü istihbaratı temel algoritmaları, tüm arama alanı hakkındaki bilgileri koruyabilir ve uygulanması çok kolaydır; (3) Bu algoritmalar, algoritmaların daha az bellek alanı kullanmasını sağlayan daha az parametreye sahiptir; (4) Bu algoritmaların hesaplama verimliliği, diğer meta sezgisellere kıyasla düşüktür (Dehghani ve diğerleri, 2020; Dhiman ve ark., 2020a).

Bununla birlikte, her optimizasyon algoritmasının, bir arama uzayının keşif ve kullanım aşamaları arasında iyi bir dengeyi ele alması ve sürdürmesi gerekir. Keşif aşaması, belirli bir arama uzayındaki farklı umut verici bölgeleri araştırırken, sömürü aşamasında, umut verici bölgeler etrafında optimal çözümler aranır. Oysa bir optimizasyon algoritmasının performansı, diğer gerçek hayat problemleri için eşit derecede iyi olmayı garanti etmez (Wolpert ve Macready 1997). Bu nedenle, keşif/sömürme arasındaki uygun dengeleme, gerçek yaşam yaklaşımlarını çözmek için yeni bir sürü zekası tabanlı optimizasyon algoritması geliştirmeye motive eder.

Bu bölüm, küresel optimizasyon problemleri için Fare Sürüsü Optimize Edici (Rat Swarm Optimizer) (FSO) olarak adlandırılan, biyo-ilham tabanlı yeni bir meta-sezgisel algoritmayı incelemektedir. Fare Sürüsü Optimize Edici (FSO), farelerin kovalama ve saldırma davranışlarından ilham almıştır. FSO ilk defa Dhiman ve ark. tarafından 2021 de sunulmuştur (Dhiman ve ark., 2021). Dhiman ve ark. FSO nun başarısını düşük ölçekli boyutlarda test etmişlerdir. Fakat gerçek dünya problemleri her zaman düşük boyutlarda

olmamaktadır. Bu yüzden bir algoritmanın başarısı sadece düşük boyutlarda değil geniş boyutlarda da test edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada dört farklı boyut seçilmiştir. Bunlar 10, 30, 50, ve 100 dür. FSO algoritmasının performansı, yirmi dokuz kıyaslama test işlevi içeren CEC-2017 ve on kıyaslama test işlevi içeren CEC-C06-2019 test fonksiyonları üzerinde test edilmiştir. Ayrıca FSO bu çalışmada geliştirilerek Geliştirilmiş FSO (GFSO) önerilmiştir. FSO ve GFSO nun ortalama ve standart sapma karşılaştırma kriterlerine göre karşılaştırmaları, yakınsama grafikleri ve istatistiksel test sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar, GFSO'nun performansının FSO ya göre düşük boyutlarda geliştiğini göstermiştir. Geniş boyutlarda ise FSO ve GFSO nun alternatif optimizasyon algoritması olarak seçilebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmanın geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2 de FSO ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Bölüm 3 de IFSO detaylandırılmıştır. Bölüm 4 de FSO ve IFSO algoritmaları CEC 2017 test fonksiyonları üzerinde ve CEC-C06-2019 test fonksiyonları üzerinde performans testleri gerçekleştirilmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Yakınsama grafikleri çizdirilmiştir.

2. Fare Sürüsü Algoritması (FSO)

Fareler, büyüklük ve ağırlık olarak farklı olan uzun kuyruklu ve orta boy kemirgenlerdir. İki ana fare türü vardır: Siyah fareler ve Kahverengi farelerdir. Fare ailesinde erkek farelere *bucks*, dişi farelere *does* denir (Dhiman ve ark., 2021). Farelere genellikle doğaları gereği sosyal olarak zekidir. Birbirlerini tımar ederler ve zıplama, kovalama, yuvarlanma ve boks gibi çeşitli aktivitelere katılırlar. Fareler, hem erkek hem de dişi bir grup halinde yaşayan bölgesel hayvanlardır. Farelerin davranışı birçok durumda çok saldırgandır ve bu, bazı hayvanların ölümüyle sonuçlanabilir. Bu saldırgan davranış, av kovalarken ve avlanırken bu çalışmanın ana motivasyonudur., FSO algoritması tasarlamak ve optimizasyon gerçekleştirmek için farelerin kovalama ve dövüş davranışları matematiksel olarak modellenmiştir.

2.1. Matematiksel model ve optimizasyon algoritması

Bu alt bölüm, farenin, yani kovalama ve dövüşme davranışını açıklar. Daha sonra FSO algoritması özetlenmiştir.

2.1.1. Avı kovalamak

Genel olarak fareler, sosyal agonistik davranışlarıyla bir grup halinde avını kovalayan sosyal hayvanlardır. Bu davranışı matematiksel olarak tanımlamak için en iyi arama ajanının avın yerini bildiği varsayılır. Diğer arama ajanları,

şimdiye kadar elde edilen en iyi arama ajanına göre konumlarını güncelleyebilir. Bu mekanizmada aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$\vec{P} = A \cdot \vec{P}_i(x) + C \cdot (\vec{P}_r(x) - \vec{P}_i(x)) \quad (1)$$

Burada $\vec{P}_i(x)$ farelerin konumlarını gösterirken, $\vec{P}_r(x)$ en iyi optimum çözümdür. A ve C parametreleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$A = R - x \times \left(\frac{R}{\text{MaxIterasyon}} \right) \quad (2)$$

$$x = 1, 2, 3, \dots, \text{MaxIterasyon}$$

$$C = 2 \cdot \text{rand}() \quad (3)$$

R ve C sırasıyla $[1, 5]$ ve $[0, 2]$ arasında rastgele sayılardır. A ve C parametreleri, yinelemeler boyunca daha iyi keşif ve kullanımdan sorumludur.

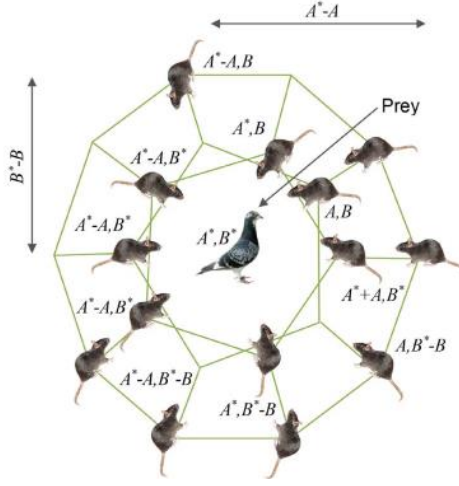
2.1.2. Av ile mücadele

Farelerin av ile savaşma sürecini matematiksel olarak tanımlamak için aşağıdaki denklem önerilmiştir:

$$\vec{P}_i(x+1) = |\vec{P}_r(x) - \vec{P}| \quad (4)$$

$\vec{P}_i(x+1)$, farenin güncellenen yeni pozisyonunu tanımlamaktadır. En iyi çözümü kaydeder ve diğer arama araçlarının en iyi arama aracısına göre konumlarını günceller.

Şekil 1, üç boyutlu ortamda (1) ve (4) denklemlerinin etkisini göstermektedir. Bu şekilde fare(A, B) konumunu av konumuna(A*, B*) göre güncelleyebilir. Parametreler ayarlanarak, (2) ve (3) denklemler' de gösterildiği gibi mevcut konum hakkında farklı sayıda pozisyona ulaşılabilir. Ayrıca bu kavram n-boyutlu ortamda da genişletilebilir.



Şekil 1: Farelerin 3D konum vektörleri(Dhiman ve ark., 2021).

Bu algoritmada, keşif ve sömürü, A ve C parametrelerinin ayarlanmış değeri ile garanti edilir. FSO algoritması, en az operatörle en uygun çözümü kaydeder. FSO algoritmasının sözde kodu Algoritma 1'de sunulmuştur.

Algoritma 1: Fare Sürüsü Algoritması

Giriş: Fare popülasyonu P_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)

Çıktı: Optimum arama ajanı

- 1: **Prosedür:** FSO
 - 2: Parametreleri başlat A, C, ve R
 - 3: Her arama ajanının uygunluk değerini hesapla
 - 4: P_r en iyi arama ajanı
 - 5: **While** ($x < Mak_{Iterasyon}$) **do**
 - 6: **for** her arama ajanı **do**
 - 7: Şu anki arama ajanının konumunu güncelle (Denklem 4 e göre)
 - 8: **end for**
 - 9: Parametreleri güncelle (A, C ve R)
 - 10: Arama ajanlarını kontrol et
 - 11: Her arama ajanının uygunluk değerini hesapla
 - 12: Önceki optimum çözümden daha iyi bir çözüm varsa P_r güncelle
 - 13: $x \leftarrow x+1$
 - 14: **end while**
 - 15: P_r geri döndür
 - 16: **end prosedür**
-

3. Geliştirilmiş Fare Sürüsü Algoritması (GFSO)

Geliştirilmiş Fare Sürüsü Algoritmasında (GFSO) farelerin avı kovalama aşaması güncellenmiştir. Fareler, bir grup halinde avını kovalayan sosyal hayvanlardır. FSO'da bu davranışı matematiksel olarak tanımlamak için en iyi arama ajanının avın yerini bildiği varsayılır. Diğer arama ajanları, şimdiye kadar elde edilen en iyi arama ajanına göre konumlarını günceller. Fakat avın yerini bilmeyen en kötü arama ajanı bilgilerini kullanmazlar. Önerilen GFSO'da sadece en iyi arama ajanına göre değil en kötü arama ajanına göre de diğer arama ajanları konum bilgilerini güncellerler. GFSO'da diğer arama ajanları en iyi arama ajanına yaklaşmaya çalışırken en kötü arama ajanından ise uzaklaşmaya çalışırlar. Böylece GFSO'ya eklenen yeni yürüyüş denklemi sayesinde FSO'nun yerel arama yeteneği geliştirilmiştir. FSO'da av kovalanırken kullanılan Denklem 1 yerine GFSO da aşağıdaki denklem kullanılmıştır. Bu aşama dışındaki diğer FSO adımları ile GFSO çalışma adımları aynıdır.

$$\vec{P} = A \cdot \vec{P}_i(x) + C \cdot (\vec{P}_r(x) - \vec{P}_i(x)) - D \cdot (\vec{P}_w(x) - \vec{P}_i(x)) \quad (5)$$

Burada $\vec{P}_i(x)$ farelerin konumlarını gösterirken, $\vec{P}_r(x)$ en iyi optimum çözüm, $\vec{P}_w(x)$ en kötü çözümü ifade etmektedir. D parametresi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$D = 2 \cdot rand() \quad (6)$$

4. Deneysel Bölüm

Bu bölümdeki bütün uygulamalar Matlab programı üzerinde kodlanmış olup, performansları için Corel i5 işlemci, 12 GB ram olan PC seçilmiştir.

4.1. CEC 2017 kıyaslama fonksiyonları için FSO ve GFSO

Bu çalışmada FSO algoritması tanıtılmıştır ve FSO algoritmasının başarısı yirmi dokuz adet çeşitli kıyaslama fonksiyonlarında test edilmiştir. Bu kıyaslama fonksiyonları CEC 2017 şeklinde literatürde geçmektedir. FSO algoritması daha sonra geliştirilerek bu çalışmada Geliştirilmiş FSO (GFSO) önerilmiştir. GFSO algoritmasının da başarısı CEC 2017 kıyaslama fonksiyonlarında test edilmiştir. Sonuçlar Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4 de gösterilmiştir.

Bu çalışmada FSO ve GFSO algoritmalarının kıyaslamalarında adil bir karşılaştırma yapabilmek için eşit parametre ayarları kullanılmıştır. Bu parametre ayarları: popülasyon boyutu 30 ve maksimum iterasyon sayısı 1000 olarak belirlenmiştir. FSO ve GFSO dört farklı düşük, orta ve geniş ölçekli boyutlarda çalıştırılmıştır. Bu boyutlar 10, 30, 50 ve 100 dür. Böylece FSO ve GFSO sadece düşük ölçekli boyutlarda değil geniş ölçekli boyutlarda da başarısı bu çalışmada gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar iki farklı karşılaştırma kriterine göre değerlendirilmiştir (ortalama ve standart sapma). Üstün performans gösteren sonuçlar kalın olarak işaretlenmiştir.

Ortalama sonuçlarına göre, boyut 10 da 29 kıyaslama fonksiyonunun 23 tanesinde GFSO, 5 tanesinde FSO üstün başarı göstermiştir. 2 nolu kıyaslama fonksiyonunda her iki algoritma da eşit sonuçlar elde etmişlerdir. Ortalama sonuçlarına göre, boyut 30 da kıyaslama fonksiyonunun 20 tanesinde GFSO, 8 tanesinde FSO üstün başarı göstermiştir. 2 nolu kıyaslama fonksiyonunda her iki algoritma da eşit sonuçlar elde etmişlerdir. Ortalama sonuçlarına göre, boyut 50 da kıyaslama fonksiyonunun 13 tanesinde GFSO, 16 tanesinde FSO üstün başarı göstermiştir. 2 nolu kıyaslama fonksiyonunda her iki algoritma da eşit sonuçlar elde etmişlerdir. Ortalama sonuçlarına göre, boyut 100 da kıyaslama fonksiyonunun 12 tanesinde GFSO, 16 tanesinde FSO üstün başarı göstermiştir. 2 nolu kıyaslama fonksiyonunda her iki algoritma da eşit sonuçlar elde etmişlerdir. Ortalama sonuçlarına göre düşük ölçekli boyutlarda GFSO, geniş ölçekli boyutlarda FSO daha başarılı olmuştur. FSO'nun yerel arama yeteneğinin geliştirilmesi için eklenen metot düşük boyutlarda olumlu sonuç verirken, geniş boyutlarda çok da olumlu sonuçlar göstermemiştir.

FSO ve GFSO sonuçları arasında anlamsal bir fark olup olmadığı istatistiksel bir yöntem olan Wilcoxon İşaretli Rank Testi ile gösterilebilmektedir. Wilcoxon İşaretli Rank Testinde iki farklı sonuç elde edilir. Bunlar p ve h değerleridir. P değeri 0.05'den altında ise anlamsal bir fark vardır demektir. Bunun sonucu olarak h değeri 1 olmaktadır. Eğer p değeri 0.05'ten daha fazla bir değer elde edilirse h değeri 0 olmaktadır ve bu sonuç FSO ve GFSO sonuçları arasında anlamsal bir fark yok anlamındadır. FSO ve GFSO sonuçlarına Wilcoxon İşaretli Rank Testi uygulandıktan sonra elde edilen p ve h sonuçları farklı boyutlar için Tablo 5 ve Tablo 6 da gösterilmiştir. Sonuçlara göre geliştirilen yöntem ile elde edilen sonuçlar arasında anlamsal bir fark oluşmuştur.

Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5 de 10, 30, 50 ve 100 boyutları için CEC 2017 kıyaslama fonksiyonlarından rastgele seçilen dokuz fonksiyon için FSO ve GFSO algoritmalarının yakınsama grafikleri gösterilmiştir.

Tablo 1: Boyut 10 için FSO ve GFSO algoritmalarının ortalama ve standart sapma kriterlerine göre karşılaştırması

F_No	FSO		GFSO	
	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma
<i>F_1</i>	4,49E+09	1,47E+09	2,42E+09	1,42E+09
<i>F_2</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F_3</i>	3,72E+03	1,61E+03	6,40E+03	3,15E+03
<i>F_4</i>	7,51E+02	1,50E+02	4,86E+02	2,85E+01
<i>F_5</i>	5,81E+02	8,73E+00	5,67E+02	8,54E+00
<i>F_6</i>	6,49E+02	7,36E+00	6,34E+02	5,20E+00
<i>F_7</i>	8,11E+02	1,31E+01	7,98E+02	1,12E+01
<i>F_8</i>	8,44E+02	8,68E+00	8,56E+02	1,04E+01
<i>F_9</i>	1,51E+03	1,91E+02	1,26E+03	1,69E+02
<i>F_10</i>	2,57E+03	1,83E+02	2,26E+03	2,68E+02
<i>F_11</i>	1,94E+03	7,72E+02	1,41E+03	1,83E+02
<i>F_12</i>	1,24E+08	1,83E+08	1,61E+07	1,17E+07
<i>F_13</i>	1,79E+05	2,56E+05	2,76E+05	2,72E+05
<i>F_14</i>	5,52E+03	7,14E+03	2,45E+03	9,81E+02
<i>F_15</i>	1,14E+04	5,63E+03	3,94E+03	2,92E+03
<i>F_16</i>	1,90E+03	1,05E+02	1,83E+03	8,95E+01
<i>F_17</i>	1,79E+03	1,32E+01	1,82E+03	2,68E+01
<i>F_18</i>	2,57E+05	8,88E+05	2,33E+05	2,66E+05
<i>F_19</i>	1,30E+05	2,90E+05	2,60E+04	5,63E+04
<i>F_20</i>	2,19E+03	5,12E+01	2,17E+03	4,98E+01
<i>F_21</i>	2,26E+03	4,98E+01	2,27E+03	5,71E+01
<i>F_22</i>	2,69E+03	5,71E+01	2,52E+03	2,53E+02
<i>F_23</i>	2,68E+03	1,29E+01	2,67E+03	9,02E+00
<i>F_24</i>	2,85E+03	5,09E+01	2,79E+03	4,98E+01
<i>F_25</i>	3,16E+03	8,34E+01	3,05E+03	5,52E+01
<i>F_26</i>	3,50E+03	2,38E+02	3,20E+03	2,29E+02
<i>F_27</i>	3,13E+03	2,52E+01	3,11E+03	1,29E+01
<i>F_28</i>	3,36E+03	1,81E+02	3,33E+03	7,47E+01
<i>F_29</i>	3,37E+03	5,11E+01	3,26E+03	5,24E+01

Tablo 2: Boyut 30 için FSO ve GFSO algoritmalarının ortalama ve standart sapma kriterlerine göre karşılaştırması

F_No	FSO		GFSO	
	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma
F_1	3,68E+10	4,09E+09	3,09E+10	5,62E+09
F_2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
F_3	7,06E+04	1,09E+04	1,09E+05	3,37E+04
F_4	1,31E+04	2,93E+03	2,25E+03	6,55E+02
F_5	8,78E+02	3,26E+01	8,66E+02	3,00E+01
F_6	6,87E+02	7,97E+00	6,78E+02	9,84E+00
F_7	1,31E+03	5,90E+01	1,33E+03	5,52E+01
F_8	1,08E+03	2,26E+01	1,14E+03	3,57E+01
F_9	9,25E+03	1,49E+03	1,21E+04	3,09E+03
F_10	8,25E+03	6,75E+02	8,75E+03	3,12E+02
F_11	6,02E+03	1,53E+03	6,20E+03	2,13E+03
F_12	1,18E+10	1,45E+09	3,97E+09	1,24E+09
F_13	1,20E+10	2,99E+09	1,77E+09	1,30E+09
F_14	3,49E+06	2,28E+06	1,39E+06	1,23E+06
F_15	1,43E+08	2,93E+08	1,17E+08	9,77E+07
F_16	4,41E+03	2,13E+02	4,30E+03	2,91E+02
F_17	3,15E+03	1,56E+02	2,90E+03	2,55E+02
F_18	7,72E+06	9,10E+06	1,89E+07	1,27E+07
F_19	5,91E+08	2,55E+08	2,11E+08	1,60E+08
F_20	2,97E+03	1,53E+02	2,95E+03	1,45E+02
F_21	2,69E+03	3,83E+01	2,63E+03	2,71E+01
F_22	9,27E+03	1,16E+03	9,19E+03	2,21E+03
F_23	3,24E+03	6,97E+01	3,12E+03	6,80E+01
F_24	3,48E+03	9,59E+01	3,28E+03	6,52E+01
F_25	4,64E+03	2,45E+02	3,75E+03	3,91E+02
F_26	9,07E+03	8,53E+02	8,73E+03	9,16E+02
F_27	3,94E+03	1,94E+02	3,46E+03	8,09E+01
F_28	6,33E+03	4,98E+02	4,89E+03	7,25E+02
F_29	5,19E+03	3,99E+02	5,40E+03	4,56E+02

Tablo 3: Boyut 50 için FSO ve GFSO algoritmalarının ortalama ve standart sapma kriterlerine göre karşılaştırması

F_No	FSO		GFSO	
	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma
F_1	8,09E+10	5,38E+09	8,20E+10	9,68E+09
F_2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
F_3	1,77E+05	1,90E+04	2,90E+05	6,93E+04
F_4	1,91E+04	2,01E+03	1,94E+04	5,46E+03
F_5	1,12E+03	5,09E+01	1,22E+03	6,12E+01
F_6	6,99E+02	6,11E+00	6,99E+02	9,21E+00
F_7	1,85E+03	6,60E+01	2,12E+03	1,34E+02
F_8	1,41E+03	4,11E+01	1,59E+03	6,02E+01
F_9	3,33E+04	4,40E+03	4,33E+04	1,19E+04
F_10	1,42E+04	1,35E+03	1,54E+04	3,98E+02
F_11	1,60E+04	2,84E+03	1,99E+04	7,41E+03
F_12	6,16E+10	6,82E+09	3,24E+10	9,62E+09
F_13	3,04E+10	5,07E+09	1,03E+10	3,66E+09
F_14	1,45E+07	6,10E+06	9,36E+06	4,83E+06
F_15	3,63E+09	8,54E+08	1,75E+09	4,85E+08
F_16	6,14E+03	7,42E+02	6,54E+03	5,72E+02
F_17	6,87E+03	1,30E+03	6,31E+03	8,60E+02
F_18	5,64E+07	3,78E+07	5,85E+07	3,02E+07
F_19	4,13E+09	9,83E+08	1,22E+09	7,37E+08
F_20	3,84E+03	2,63E+02	4,62E+03	2,61E+02
F_21	3,10E+03	6,16E+01	3,01E+03	3,36E+01
F_22	1,67E+04	6,37E+02	1,68E+04	4,64E+02
F_23	3,95E+03	1,55E+02	3,81E+03	1,05E+02
F_24	4,35E+03	1,92E+02	3,84E+03	7,88E+01
F_25	1,33E+04	5,47E+02	9,41E+03	1,79E+03
F_26	1,45E+04	8,20E+02	1,65E+04	1,67E+03
F_27	5,56E+03	3,06E+02	4,56E+03	3,64E+02
F_28	9,30E+03	1,03E+03	9,72E+03	1,38E+03
F_29	2,41E+04	7,92E+03	1,03E+04	2,16E+03

Tablo 4: Boyut 100 için FSO ve GFSO algoritmalarının ortalama ve standart sapma kriterlerine göre karşılaştırması

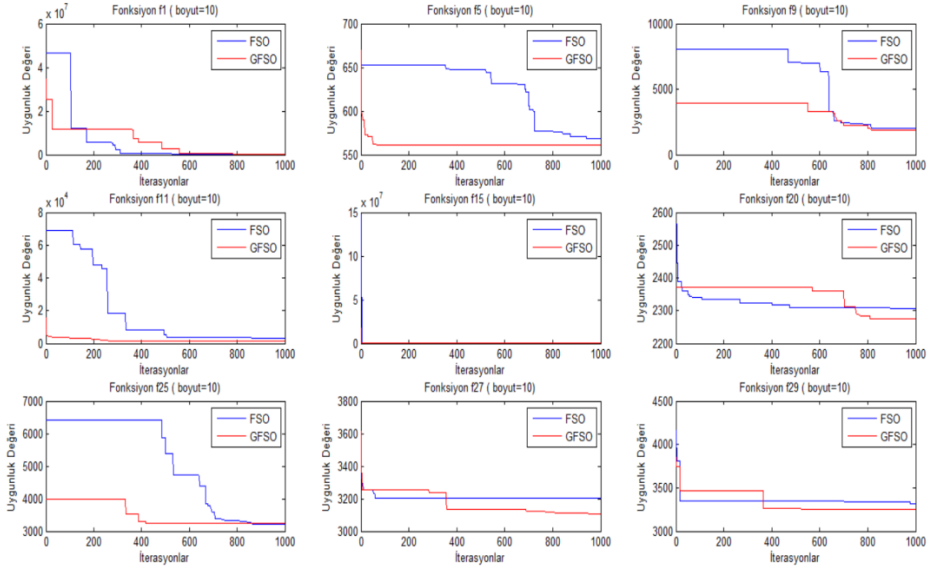
F_No	FSO		GFSO	
	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma
<i>F_1</i>	2,37E+11	1,51E+10	2,65E+11	2,97E+10
<i>F_2</i>	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<i>F_3</i>	3,42E+05	1,42E+04	7,41E+05	1,84E+05
<i>F_4</i>	7,22E+04	7,91E+03	5,69E+04	1,51E+04
<i>F_5</i>	1,98E+03	5,20E+01	2,20E+03	6,41E+01
<i>F_6</i>	7,07E+02	4,63E+00	7,23E+02	9,15E+00
<i>F_7</i>	3,82E+03	9,98E+01	4,73E+03	5,66E+02
<i>F_8</i>	2,41E+03	5,90E+01	2,68E+03	9,58E+01
<i>F_9</i>	7,33E+04	5,63E+03	1,09E+05	1,30E+04
<i>F_10</i>	3,09E+04	1,90E+03	3,29E+04	7,09E+02
<i>F_11</i>	1,74E+05	3,56E+04	2,12E+05	6,50E+04
<i>F_12</i>	1,62E+11	1,64E+10	1,12E+11	1,46E+10
<i>F_13</i>	4,23E+10	2,72E+09	2,48E+10	5,39E+09
<i>F_14</i>	2,83E+07	1,27E+07	9,44E+07	5,20E+07
<i>F_15</i>	1,60E+10	1,89E+09	1,08E+10	2,46E+09
<i>F_16</i>	1,85E+04	1,13E+03	1,54E+04	1,04E+03
<i>F_17</i>	3,88E+05	4,56E+05	2,52E+05	2,10E+05
<i>F_18</i>	3,98E+07	2,92E+07	2,40E+08	1,22E+08
<i>F_19</i>	1,60E+10	2,58E+09	9,74E+09	3,24E+09
<i>F_20</i>	7,16E+03	5,32E+02	8,31E+03	3,30E+02
<i>F_21</i>	4,82E+03	2,02E+02	4,17E+03	1,15E+02
<i>F_22</i>	3,38E+04	1,74E+03	3,53E+04	6,34E+02
<i>F_23</i>	6,02E+03	4,47E+02	5,28E+03	1,63E+02
<i>F_24</i>	9,12E+03	6,73E+02	7,45E+03	5,31E+02
<i>F_25</i>	2,04E+04	1,96E+03	3,38E+04	5,86E+03
<i>F_26</i>	4,12E+04	3,71E+03	4,95E+04	4,09E+03
<i>F_27</i>	1,06E+04	1,17E+03	8,61E+03	1,00E+03
<i>F_28</i>	2,17E+04	2,28E+03	3,70E+04	4,71E+03
<i>F_29</i>	1,91E+05	1,31E+05	1,11E+05	8,82E+04

Tablo 5: Boyut 10 ve 30 için FSO ve GFSO algoritmalarının Wilcoxon İşaretli Rank Test Sonuçları

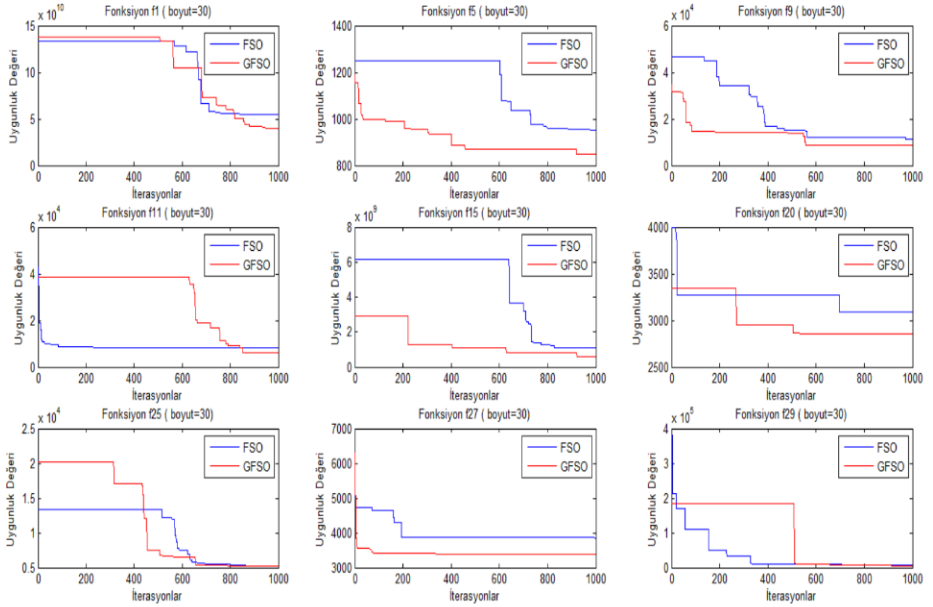
F_No	Boyut=10		Boyut=30	
	p	h	p	h
F_1	0,0002471	1	0,0017824	1
F_2	NaN	0	NaN	0
F_3	0,0025606	1	5,25E-05	1
F_4	7,90E-08	1	6,80E-08	1
F_5	6,61E-05	1	0,1805774	0
F_6	3,94E-07	1	0,0051153	1
F_7	0,0036388	1	0,2502968	0
F_8	0,0012272	1	5,17E-06	1
F_9	0,0005091	1	0,0017824	1
F_10	0,0005091	1	0,0239031	1
F_11	0,0027986	1	0,8817308	0
F_12	0,0001294	1	6,80E-08	1
F_13	0,1198556	0	6,80E-08	1
F_14	0,0256393	1	0,0010141	1
F_15	6,67E-06	1	0,1555699	0
F_16	0,0531031	0	0,1332832	0
F_17	0,0023413	1	0,0025606	1
F_18	7,41E-05	1	0,0013486	1
F_19	5,90E-05	1	2,60E-05	1
F_20	0,1135514	0	0,5792184	0
F_21	0,3104023	0	3,29E-05	1
F_22	7,58E-06	1	0,1635957	0
F_23	0,1635957	0	2,60E-05	1
F_24	6,92E-07	1	2,56E-07	1
F_25	0,000161	1	1,05E-06	1
F_26	1,20E-06	1	0,3793319	0
F_27	1,58E-06	1	6,80E-08	1
F_28	0,2976768	0	9,13E-07	1
F_29	3,50E-06	1	0,1332832	0

Tablo 6: Boyut 50 ve 100 için FSO ve GFSO algoritmalarının Wilcoxon İşaretli Rank Test Sonuçları

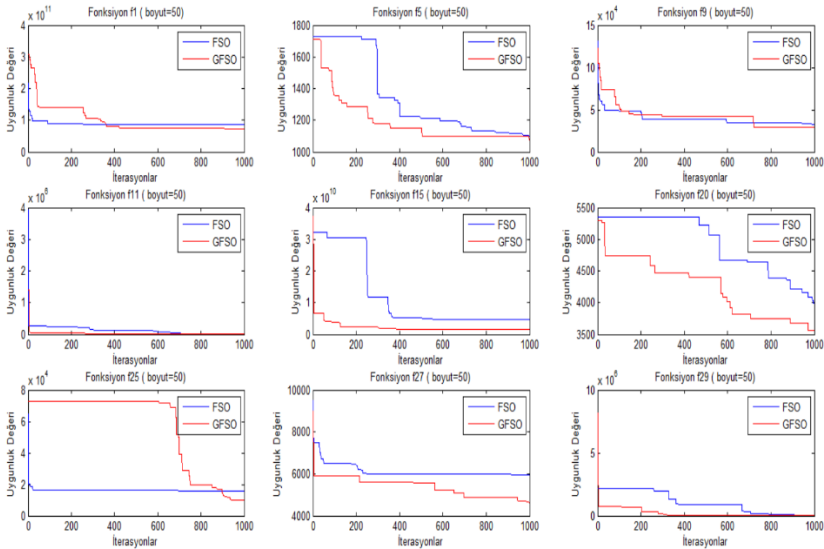
F_No	Boyut=50		Boyut=100	
	p	h	p	h
F_1	0,3104023	0	0,0013486	1
F_2	NaN	0	NaN	0
F_3	2,96E-07	1	6,80E-08	1
F_4	0,4569506	0	0,0012272	1
F_5	1,10E-05	1	6,80E-08	1
F_6	0,9892089	0	5,23E-07	1
F_7	1,06E-07	1	6,80E-08	1
F_8	1,66E-07	1	6,80E-08	1
F_9	0,0025606	1	7,90E-08	1
F_10	0,0017824	1	0,0021393	1
F_11	0,0858549	0	0,0438804	1
F_12	7,90E-08	1	1,23E-07	1
F_13	6,80E-08	1	6,80E-08	1
F_14	0,0090454	1	9,13E-07	1
F_15	5,23E-07	1	3,07E-06	1
F_16	0,1198556	0	1,20E-06	1
F_17	0,1017286	0	0,9031165	0
F_18	0,5249869	0	1,43E-07	1
F_19	1,06E-07	1	3,99E-06	1
F_20	3,42E-07	1	3,42E-07	1
F_21	1,41E-05	1	6,80E-08	1
F_22	0,860431	0	0,0154786	1
F_23	0,0051153	1	1,06E-07	1
F_24	6,80E-08	1	9,17E-08	1
F_25	6,92E-07	1	7,90E-08	1
F_26	0,0001159	1	1,05E-06	1
F_27	1,66E-07	1	9,75E-06	1
F_28	0,2616165	0	6,80E-08	1
F_29	2,22E-07	1	0,0133205	1



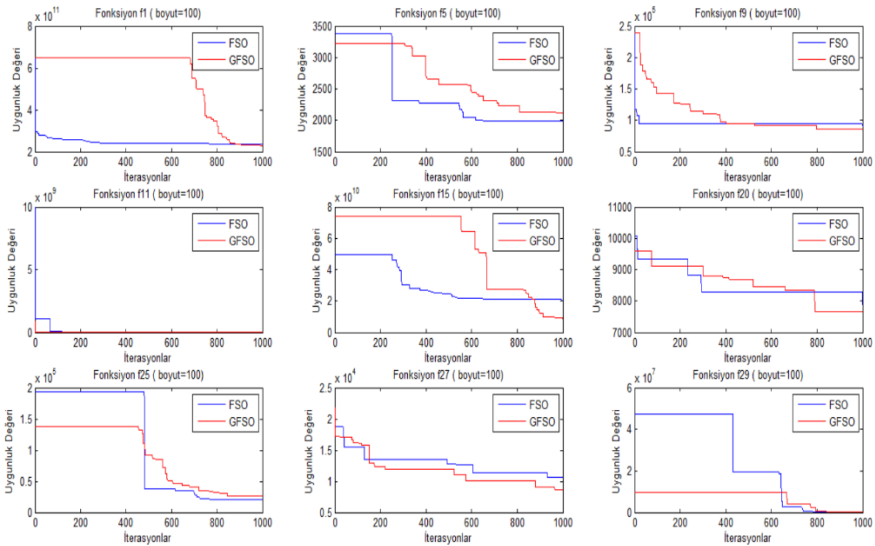
Şekil 2: Boyut 10'da çeşitli kıyaslama fonksiyonları için yakınsama grafikleri



Şekil 3: Boyut 30'da çeşitli kıyaslama fonksiyonları için yakınsama grafikleri



Şekil 4: Boyut 50’da çeşitli kıyaslama fonksiyonları için yakınsama grafikleri



Şekil 5: Boyut 100’da çeşitli kıyaslama fonksiyonları için yakınsama grafikleri

4.2. CEC-C06-2019 kıyaslama fonksiyonları için FSO ve GFSO

FSO ve GFSO’ nun başarıları CEC-C06-2019 test fonksiyonları üzerinde de gösterilmiştir. Böylece GFSO’ nun üstün performansı kanıtlanmıştır. Her iki algortmada da adil bir karşılaştırma için kullanılan parametre ayarları Tablo 7’ de gösterilmiştir. CEC-C06-2019 test fonksiyonlarının detayları Tablo 8’de

gösterilmiştir. Her bir çalışma bağımsız yirmi kere çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçların ortalaması ve standart sapma değerleri hesaplanarak Tablo 9’da karşılaştırılmıştır. Üstün başarı gösteren sonuçlar kalın font ile işaretlenmiştir.

Ortalama sonuçlarına göre, on kıyaslama fonksiyonundan beşinde FSO üstün başarı gösterirken, on kıyaslama fonksiyonundan dördünce GFSO üstün başarı göstermiştir. CEC03 de ise eşit performans göstermişlerdir. Standart sapma sonuçlarına göre, on kıyaslama fonksiyonundan beşinde FSO üstün başarı gösterirken, on kıyaslama fonksiyonundan dördünce GFSO üstün başarı göstermiştir. CEC07 de ise eşit performans göstermişlerdir. Sonuçlara göre FSO daha başarılıdır. Geliştirilen metodun performans üzerindeki etkisi azdır.

Tablo 7: Parametre ayarları

Parametre	Değer
Populasyon sayısı	30
Boyut	{9, 10, 16, 18}
Maksimum iterasyon	1000

Tablo 8: CEC-C06 2019 Test Fonksiyonlarının Tanımlaması

ID	Fonksiyon	Boyut	Aralık	f_{min}
1	<i>Storn’s Chebyshev Polynomial Fitting Problem</i>	9	[-8192, 8192]	1
2	<i>Inverse Hilbert Matrix Problem</i>	16	[-16384, 16384]	1
3	<i>Lennard-Jones Minimum Energy Cluster</i>	18	[-4, 4]	1
4	<i>Rastrigin’s Function</i>	10	[-100, 100]	1
5	<i>Griewank’s Function</i>	10	[-100, 100]	1
6	<i>Weierstrass Function</i>	10	[-100, 100]	1
7	<i>Modified Schwefel’s Function</i>	10	[-100, 100]	1
8	<i>Expanded Schaffer’s F6 Function</i>	10	[-100, 100]	1
9	<i>Happy Cat Function</i>	10	[-100, 100]	1
10	<i>Ackley Function</i>	10	[-100, 100]	1

Tablo 9: FSO ve GFSO'nun CEC-C06 2019 test fonksiyonları üzerindeki performans sonuçları

Fonksiyon No	FSO		GFSO	
	Ortalama	Standart Sapma	Ortalama	Standart Sapma
<i>CEC01</i>	5,87E+04	7,77E+03	5,01E+09	9,61E+09
<i>CEC02</i>	1,75E+01	1,43E-01	1,77E+01	1,89E-01
<i>CEC03</i>	1,27E+01	2,64E-05	1,27E+01	3,04E-04
<i>CEC04</i>	8,71E+03	1,82E+03	2,62E+03	8,82E+02
<i>CEC05</i>	3,49E+00	3,57E-01	2,62E+00	2,53E-01
<i>CEC06</i>	1,04E+01	9,19E-01	1,07E+01	7,94E-01
<i>CEC07</i>	6,86E+02	1,87E+02	7,16E+02	1,78E+02
<i>CEC08</i>	6,17E+00	3,64E-01	6,10E+00	5,13E-01
<i>CEC09</i>	6,02E+02	1,24E+02	4,37E+02	2,40E+02
<i>CEC10</i>	2,04E+01	1,27E-01	2,05E+01	9,72E-02

5. Sonuç

Bu çalışmada, küresel optimizasyon problemleri için Fare Sürüsü Optimize Edici (Rat Swarm Optimizer) (FSO) olarak adlandırılan, biyo-ilham tabanlı yeni bir meta-sezgisel algoritmayı incelenmiştir. Fare Sürüsü Optimize Edici (FSO), farelerin kovalama ve saldırma davranışlarından ilham almıştır. FSO son yıllarda literatüre tanıtılmıştır, bu yüzden geliştirmeye açıktır. Orijinal makalesinde FSO'nun başarısı düşük ölçekli boyutlarda test edilmiştir. Fakat gerçek dünya problemleri her zaman düşük boyutlarda olmamaktadır. Bu yüzden bir algoritmanın başarısı sadece düşük boyutlarda değil geniş boyutlarda da test edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada FSO sadece düşük ölçeklerde değil geniş ölçeklerde de test edilmiştir. Bu çalışmada dört farklı boyut seçilmiştir. Bunlar 10, 30, 50 ve 100 dür. FSO algoritmasının performansı, yirmi dokuz kıyaslama test işlevi içeren CEC-2017 ve on kıyaslama test işlevi içeren CEC-C06-2019 test fonksiyonları üzerinde test edilmiştir. Ayrıca FSO bu çalışmada geliştirilerek Geliştirilmiş FSO (GFSO) önerilmiştir. FSO ve GFSO nun ortalama ve standart sapma karşılaştırma kriterlerine göre karşılaştırmaları, yakınsama grafikleri ve istatistiksel test sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar, GFSO'nun performansının FSO ya göre düşük boyutlarda geliştiğini göstermiştir. Geniş boyutlarda ise FSO ve GFSO nun alternatif optimizasyon algoritması olarak seçilebileceğini göstermiştir.

Kaynakça

- Beyer, H-G., Schwefel, H-P. (2002). Evolution strategies-a comprehensive introduction. *Nat Comput* 1(1):3–52.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford University Press, Inc., Oxford.
- Dehghani, M., Montazeri, Z., Dhiman, G., Malik, O., Morales-Menendez, R., Ramirez-Mendoza, R.A., Parra-Arroyo, L. (2020). A spring search algorithm applied to engineering optimization problems. *Appl Sci* 10(18):6173.
- Dhiman, G., Singh, K.K., Slowik, A., Chang, V., Yildiz, A.R., Kaur, A., Garg, M. (2020a). Emosoa: a new evolutionary multi-objective seagull optimization algorithm for global optimization. *Int J Mach Learn Cybernet* 1–26.
- Dhiman, G., Garg, M., Nager, A., Kumar, V., Dehghani, M. (2021). A novel algorithm for global optimization: Rat Swarm Optimizer, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* (2021) 12:8457–8482 <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02580-0>.
- Dorigo, M., Birattari, M., Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization—artificial ants as a computational intelligence technique. *IEEE Comput Intell Mag* 1:28–39.
- Erol, O.K., Eksin, I. (2006). A new optimization method: big bang-big crunch. *Adv Eng Softw* 37(2):106–111.
- Hatamlou, A. (2013). Black hole: a new heuristic optimization approach for data clustering. *Inf Sci* 222:175–184.
- Kaveh, A., Talatahari, S. (2010). A novel heuristic optimization method: charged system search. *Acta Mech* 213(3):267–289.
- Kennedy, J., Eberhart, R.C. (1995). Particle swarm optimization. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, pp 1942–1948 Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP (1983) *Optimization by simulated annealing*. *Science* 220(4598):671–680
- Koza, J.R. (1992). *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*. MIT Press, Cambridge.
- Lu, X., Zhou, Y. (2008). A novel global convergence algorithm: Bee collecting pollen algorithm. In: *4th International Conference on Intelligent Computing*, Springer, pp 518–525.
- Mucherino, A., Seref, O. (2007). Monkey search: a novel metaheuristic search for global optimization. *AIP Conference Proceedings* 953(1).
- Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H., Saryazdi, S. (2009). GSA: a gravitational search algorithm. *Inf Sci* 179(13):2232–2248.
- Simon, D. (2008). Biogeography-based optimization. *IEEE Trans Evol*

Comput 12(6):702–713.

- Storn, R., Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J Global Optim* 11(4):341–359.
- Wolpert, D.H., Macready, W.G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Trans Evol Comput* 1(1):67–82.
- Yang, X.S., Deb, S., (2009). Cuckoo search via levy flights. In: *World congress on nature biologically inspired computing*, pp 210–214.
- Yang, X-S. (2010). Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation. *Int J Bio-Inspir Comput* 2(2):78–84.
- Yang, X-S. (2010). A new metaheuristic bat-inspired algorithm. Springer, Berlin, pp 65–74.

BÖLÜM V

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMIN TARİHSEL GELİŞİMİ

Historical Development of Computer-Aided Design in Civil Engineering

**Duygu Çelik¹ & Furkan Azak² & Tarkan Karaçay³ &
Yunus Eren Kaya⁴ & Batuhan Şanlı⁵ & Büşranur Azak⁶ &
Hakan Özbaşaran⁷**

¹(*Lisans Öğr.*), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
e-mail: duyguucelik3@gmail.com
Orcid: 0000-0002-3912-9202

²(*Lisans Öğr.*), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
e-mail: furkanazak26@gmail.com
Orcid: 0000-0002-6962-0051

³(*Doktora Öğr.*), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
e-mail: mail@tarkankaracay.com
Orcid: 0000-0002-4893-5126

⁴(*Lisans Öğr.*), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
e-mail: yunuserenkaya1@gmail.com
Orcid: 0000-0002-2622-4630

⁵(*Yüksek Lisans Öğr.*), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
e-mail: batuhansanli@gmail.com
Orcid: 0000-0002-8817-4026

⁶(*Yüksek Lisans Öğr.*), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
e-mail: busrazak26@gmail.com
Orcid: 0000-0002-8913-9716

⁷(*Doç. Dr.*), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
e-mail: ozbasaran@ogu.edu.tr
Orcid: 0000-0003-1959-5297

1. Giriş

İnşaat mühendisliğinde tasarım; bir yapıyı etkileyen iç ve dış yüklerin analiz edilerek yapının güvenli, ekonomik, kullanıcının isteğine uygun ve ihtiyacını karşılayacak bir şekilde inşa edilebilmesi için yapılması gereken çalışmalardır. Diğer bir bakış açısı ile inşaat mühendisliğinde tasarım fikir üretme, hesaplama ve görselleştirme işlemlerinin bir bütünü olarak da düşünülebilir.

İnşaat mühendisliğinde tasarımın tarihini üç ana döneme ayırmak mümkündür. Bunlar sırası ile erken dönem, gelenekçi tasarım (BDT - Bilgisayar Destekli Tasarım) dönemi ve yenilikçi tasarım (BOT - Bilgisayar ile Otomatik Tasarım) dönemidir. Bu çalışmada gelenekçi tasarım döneminin ilk zamanları, yani BDT'nin bir düşünce olmaktan çıkıp mühendislik pratiğine yerleşmeye başladığı dönem incelenmiştir. Gelenekçi tasarım dönemine geçişin daha iyi açıklanabilmesi için erken dönem hakkında da bilgi verilmiştir.

Erken dönem, kâğıt üzerine yapılan iki boyutlu çizimlerden ve üç boyutlu maketlerden faydalanılan tasarım dönemidir. Söz edilen dönemde tasarım sürecinde ihtiyaç duyulan hesaplamalar, hesap cetveli (ve ileriki zamanlarda hesap makinesi) gibi basit araçlar ile yapılmıştır. Erken dönem tasarımda kullanılan yöntemler önemli zaman ve insan gücü kayıplarına neden olmaktadır. Diğer bir önemli konu ise, tüm hesapların ve çizimlerin el ile yapılıyor olmasından kaynaklanan yüksek hata oranıydı.

BDT (bu çalışmadaki diğer adıyla “gelenekçi tasarım”) ile yapılan çalışmalar, erken dönemde yapılan çalışmalara göre hataları daha aza indirirken, zamandan ve insan gücünden tasarruf sağlamaktadır. Dahası, hassas ölçümler ve hesaplamalar yapılmasını sağlamaktadır. Tasarımın bilgisayar yardımı ile yapılmasını sağlayan işlemler bütünü BDT (İngilizce karşılığı ile “CAD – Computer Aided Design”) olarak adlandırılır.

İnşaat mühendisliği birçok disiplinde olduğu gibi farklı dallara ayrılmaktadır. Yapı mühendisliği çok katlı yapılar, köprüler, kuleler ve fabrikalar gibi yapıların statik ve dinamik davranışlarını incelemektedir. Canlı veya cansız varlıkların bir yerden diğer bir yere ulaşımını sağlayan yapıların inşasından ve ilgili problemlerin çözümünden ulaştırma dalı sorumludur. Akışkanlar ile ilgili mühendislik problemlerinin çözümü, su kaynaklarının geliştirilmesi, dağıtılması, iletilmesi ve depolanması ile hidrolik dalı ilgilenmektedir. Zeminin fiziksel ve mühendislik özelliklerini geoteknik dalı araştırırken yapıların çeşitli kuvvet etkileri altındaki davranışlarını, statik, dinamik ve stabilite analizleri konularını da mekanik dalı incelemektedir. Projelerin imalat süreçlerinin verimliliğini, kalitesini ve iş güvenliğini arttırmak üzerine çalışan, bütçe yönetimini sağlayan dal yapım yönetimi

dalıdır. Deprem dalı deprem risk analizlerinin yapılması ve yapıların depreme karşı dayanıklılığı konularında çalışılan daldır. Son olarak, yapıların sağlamlığı, ekonomikliği, güvenilirliği ve işlevselliğini bir arada düşünen mühendisin ilgili yapıyı tasarlarken kullanacağı malzemenin seçimi, özellikleri ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ile ilgilenen dal ise yapı malzemeleri dalıdır. Tanımları yukarıda yapılmış olan inşaat mühendisliği dalları Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Bu noktada söylemek gerekir ki farklı açılardan bakıldığında bu dallardan bazıları yine bu dallardan bazılarını kapsayabilir. Bu sebeple Şekil 1.1, inşaat mühendisliği dallarının tamamını ve bu dalların arasındaki tüm ilişkileri özetleyen bir görsel olarak düşünülmemelidir.



Şekil 1.1: İnşaat Mühendisliği Dalları

İNşaat mühendisliğinde bilgisayar destekli tasarımın tarihçesi konusunda 100’den fazla anahtar kelime ile yapılan literatür taraması sonucunda BDT’nin mühendislik pratiğine henüz yerleşmediği döneme ait olduğu düşünülen 73 adet çalışmaya ulaşılmıştır. Kaynak taraması için scholar.google.com, sciencedirect.com, tandfonline.com, lens.org, techno-press.org, researchgate.net, academia.edu veri tabanları ve çeşitli veri tabanlarını tarayan

web siteleri kullanılmıştır. Tarama için kullanılan anahtar kelimeler “bilgisayar” kelimesinin İngilizce karşılığı olan “computer” kelimesinin yanına inşaat mühendisliği ile ilgili kelimeler eklenerek oluşturulmuştur (“computer structural engineering” ve “computer hydrology” gibi)

Ulaşılan çalışmalar inşaat mühendisliği dallarına göre sınıflandırılarak sunulmuştur. Sınıflandırma sonucu yapı mühendisliği dalında 16 adet, ulaştırma alanında 11 adet, hidrolik alanında 15 adet, mekanik alanında 20 adet, geoteknik alanında 3 adet ve yapım yönetimi alanında 1 adet çalışma olduğu belirlenmiştir. Yapım yönetimi alanına ait 1 çalışma bulunduğundan ilgili çalışma için ayrı bir başlık açılmamış olup Bölüm 3.6’nın (Diğer Çalışmalar) ilk paragrafında anlatılmıştır. Ek olarak 7 tane de inşaat mühendisliğinin tek bir dalına ait olmadığı düşünülen çalışmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmalar “Diğer” sınıfına dâhil edilmiştir. “Diğer” sınıfındaki bu 7 çalışmadan 3 tanesinde mühendislik dallarında bilgisayar kullanımı konusu incelenmiş, 2 tanesinde bilgisayar destekli tasarımın geçmişi ve özellikleri incelenmiş ve genel bir rapor sunulmuştur. Kalan 2 çalışmadan ilki STRUDL adında bir bilgisayar programını tanıtmaktadır; diğer çalışma ise bilgisayar desteği ile bina tasarımını üzerinedir. İnşaat mühendisliği dallarına göre ulaşılan çalışmaların dağılımı Şekil 1.2’de gösterilmiştir.

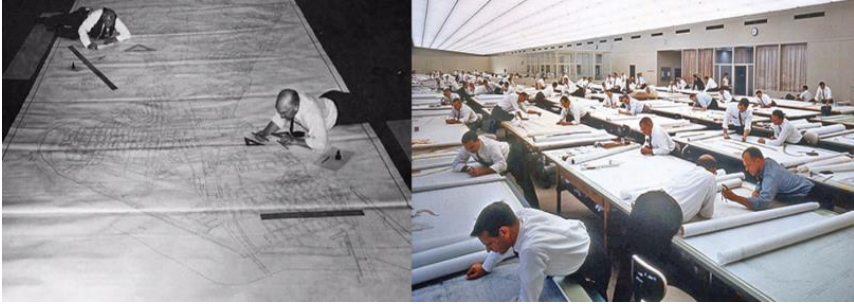


Şekil 1.2: Yapılan Çalışmaların İnşaat Mühendisliği Dallarına Göre Dağılımı

Sonraki bölüm (Bölüm 2) erken dönem ve bilgisayar destekli tasarım dönemi hakkında bilgi sunmaktadır ve bu iki dönemi karşılaştırmaktadır. Bölüm 3'te inşaat mühendisliğinde bilgisayar destekli tasarımın ilk evrelerinde yapılmış çalışmaların derlemesi sunulmuştur. Son bölümde ise (Bölüm 4) bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. Erken Dönemde Tasarım ve Bilgisayar Destekli Tasarım

Erken dönemde çizim aracı olarak kâğıt, kalem, makas ve yapıştırıcı gibi insan gücünü harcayan araçlar kullanıldığı için tasarımın görselleştirilmesi için epey zaman harcanması gerekirdi (Şekil 2.1); çizimlerin yapılabilmesi için büyük masalar, bu masalar için de gerekli alanın sağlanması gerekiyordu. Çizimlerde yapılan hatalar nedeniyle çoğu zaman çok sayıda sayfa harcanırdı ya da tek bir sayfada temiz olmayan bir görüntü elde edilirdi. Diğer taraftan, projenin birden fazla örneği gerektiği durumda da hızlı bir biçimde çoğaltılması oldukça zor olabilmekteydi. Erken dönem tasarımcıları için hesaplama da en az çizim kadar güç olmuştur. Yoğun ve zor hesaplamalar içeren inşaat mühendisliği alanında, “işlem hatası yapmadan bir projelendirme sürecini tamamlamanın bilgisayar kullanmadan pek mümkün olmadığı” kabul gören bir söylemdir. Erken dönemde yürütülen hesaplama süreçlerinde bir hata ile karşılaşıldığında tüm sürecin ya da sürecin bir kısmının tekrar edilmesi gerekebilmekteydi.

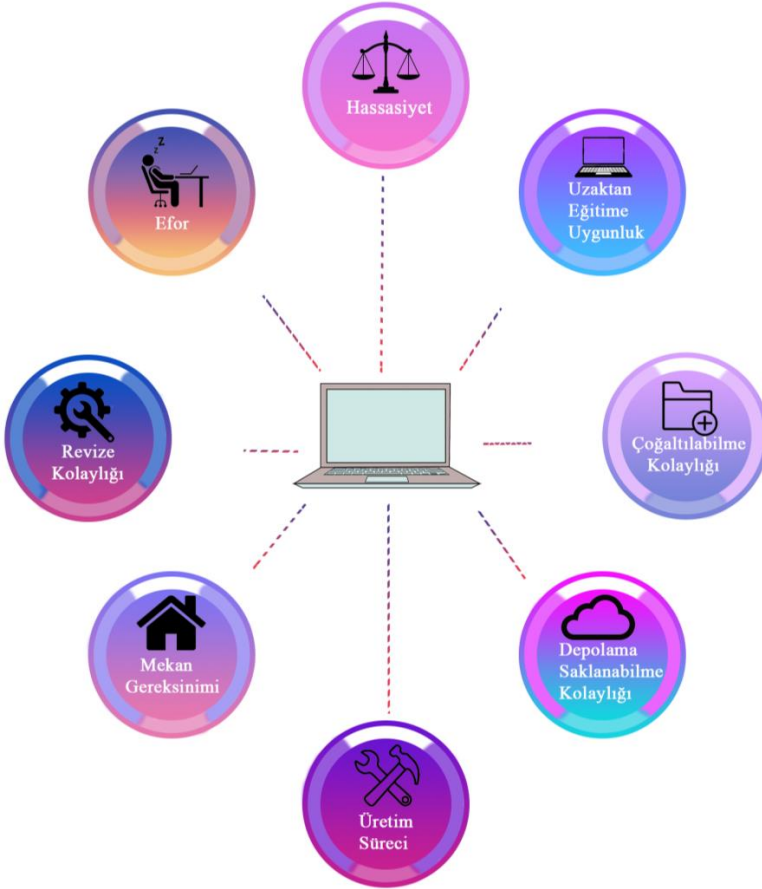


Şekil 2.1: Erken Dönemde Çalışma Koşulları (Ajmal, 2018)

BDT döneminde yapılan çizimler için kâğıt, kalem gibi araçların yerine bilgisayarlar kullanılmaktadır. Vektör ve nesne tabanlı BDT yazılımları ile çizim yapmak için büyük masalar yerine küçük çalışma alanları yeterli olmaktadır. Bilgisayar ile yapılan çizimlerde hatalar kolaylıkla (çoğunlukla tek tuş ile) düzeltilebilir ve böylece hatanın düzeltilmesi için oluşabilecek ek masrafların (çalışma zamanı ve kâğıt gibi) önüne geçilebilir. Revizyon kolaylığı sağlayan BDT yazılımları aynı zamanda tasarımın çoğaltılmasını da saniyeler içinde tamamlar. Ayrıca bu yazılımlar ile yapılan tasarımların

üzerinde oynama yapılamaması ve tasarımcı dışındaki kişilerin müdahalesine kapalı olması için ilgili dosyalara erişim sınırı konulabilir.

Bilgisayar ile yapılan hesaplamalarda insanın dâhil olmadığı süreçlerde (kullanılan yazılımda ve/veya donanımda bir problem yoksa) işlem hatası olmaz. Ayrıca, BDT süreçlerinde sayılarda virgülden sonra daha çok basamak ile hesap yapılabildiğinden daha hassas sonuçlar alınır, buna bağlı olarak hata payları düşer. Çizimleri ve hesaplamaları bilgisayar ortamında BDT yazılım(lar)ı ile gerçekleştiren tasarımcı, erken dönem tasarımı ile karşılaştırıldığında oldukça az efor ve zaman harcamaktadır. BDT süreçlerinin avantajları Şekil 2.2’de özetlenmiştir.



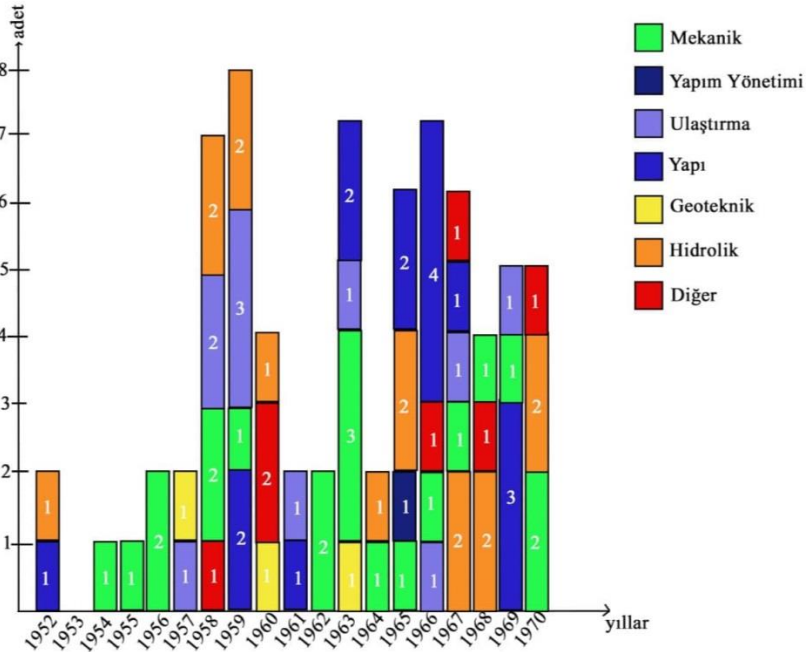
Şekil 2.2: BDT Süreçlerinin Avantajları

3. Tarihçe

Yapılan literatür taraması sırasında inşaat mühendisliğinde bilgisayar destekli tasarım konusunda 1970’li senelerden sonra yapılan bazı çalışmaların

başlığında ve anahtar kelimelerinde bilgisayar (computer) kelimesinin geçmediği fark edilmiştir (Allentuch & Golub, 1971; Clough & Wilson, 1971; Fenves, 1971; Golub & Allentuch, 1971; Hatfield & Fenves, 1971; Macneal, 1971; Melosh, 1971; Stanton & McGovern, 1971; Venkayya, 1971; Weaver, Brandow, & Manning, 1971). Diğer taraftan, 1971 yılında Computers & Structures isimli bilgisayar ve yapı temalı dergi yayın hayatına başlamıştır. Bu iki durum o yıllarda (1970'lerin başı) inşaat mühendisliğinde bilgisayar kullanımının oldukça yaygınlaştığını düşündürmektedir. Bu nedenle söz edilen dönemden sonra yapılan çalışmaların tarihsel niteliği olmadığı kabul edilerek bu çalışmalar incelenmemiştir.

Yayımlanma tarihi dikkate alındığında bulunabilen en eski iki çalışma 1952 yılında yayımlanmıştır. Galletly statik yükler altında betonarme perde davranışı üzerine bir çalışma yayımlanmıştır. Bu çalışmanın detaylı açıklaması Bölüm 3.2'de verilmiştir. Glover vd. haliçlerdeki gelgitlerin analizlerinin yapılması konusunda bilgi ve tecrübelerini aktarmışlardır. Bu çalışma hakkında detaylar ise Bölüm 3.4'te verilmiştir. Bölüm 3'te sunulan çalışmalar kronolojik sırayla incelenmiştir. Fakat birbiriyle konu bütünlüğü oluşturacağı düşünülen çalışmalar art arda açıklanmıştır. Şekil 3.1'de hangi yılda kaç çalışma yayımlandığı ve çalışmaların hangi alanlara ait olduğu görülmektedir.



Şekil 3.1: Çalışmaların Alan ve Yıl Dağılımı

3.1. *Mekanik Dalındaki Çalışmalar*

Livesley bilgisayar kullanımı ile yapısal analiz ve tasarım yapılması konusunda bir tez yayımlamıştır. Çalışmalarını Eylül 1951 ile Nisan 1954 tarihleri arasında sürdürdüğünü belirtmiştir. Statik yükler altında çelik çerçevelerin doğrusal analizi üzerine matris metodu geliştirmiştir ve geliştirdiği metodu bilgisayar programı haline getirmiştir. Sonrasında, yazdığı bilgisayar programını yapı elemanlarına eksenel kuvvet gelmesi durumu için geliştirmiştir. Yine Livesley, titreşim problemlerinin çözümü için de bir bilgisayar programı tasarlamıştır. Yazar tarafından ilerleyen zamanlarda iki adet bilgisayar programı daha tasarlanmıştır. Bu tasarlanan programlar biharmonik denklemlerin çözümü ve kirişli kare döşemelerin analizleri için kullanılmıştır. Çalıştığı tezin son kısımları yapısal tasarım konusunda bilgisayar kullanım imkânı ve mühendislik problemlerinin çözümünde bilgisayar kullanımı konusundadır (Livesley, 1954). Maugh vd. sundukları çalışmada Glen Lyn Santrali'nin (American Electric Power'e ait 2015 yılında kapatılan bir elektrik santrali) 325 ft (99,06 metre) uzunluğundaki bacasının yapısal dinamik davranışını incelemişlerdir. Yazarlar yapının titreşim karakteristikleri üzerine analitik çalışma yapmışlardır. Nümerik çözümlerin ve hesaplamaların analog bilgisayarlardan elde edildiğinden bahsetmişlerdir (Maugh, Rumman, & Isada, 1955). Turner vd. kompleks kabuk yapıların rijitlik katsayılarının hesaplanması üzerinde durmuşlardır ve yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Amaç, sonraki dinamik ve aeroelastik analizler için yeterli olacak şekilde yapısal verileri yeterli doğrulukta değerlendirecek bir yöntem sağlamaktır (Turner, Clough, Martin, & Topp, 1956). Livesley farklı yüklenme durumlarına maruz kalan çerçeve elemanının en düşük ağırlıklı geometrik formunun otomatik olarak belirlenmesi konusunu ele almıştır. Yazar konu için interaktif bir yöntem geliştirmiş ve bu yöntem için bilgisayar kullanımının uygun olduğunu belirtmiştir. Çalışmasına Manchester Üniversitesi için geliştirilmiş bir programın kısa açıklamasını da dâhil etmiştir. Programda yapılan değişikliklerle çerçevenin göçme yükünü bulabildiğini belirtmiştir (Livesley, 1956).

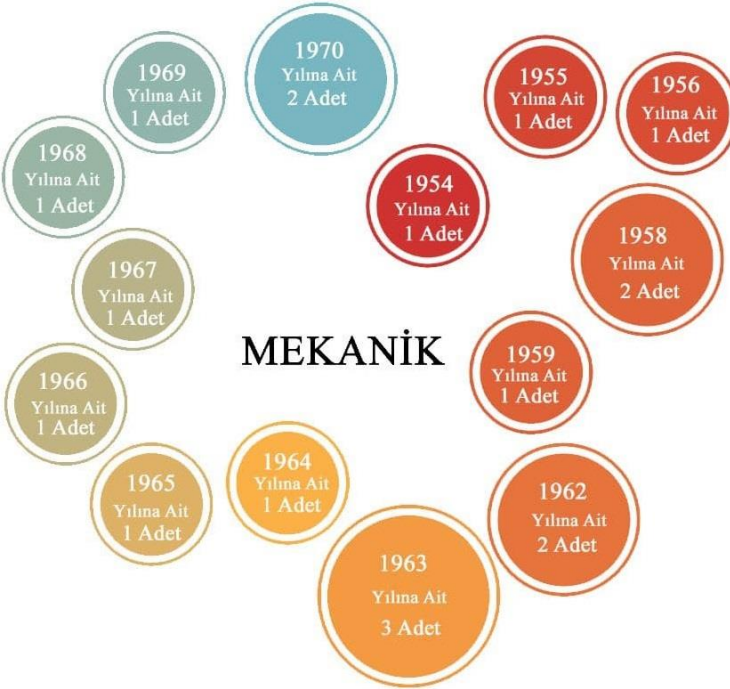
Czerniak statikçe belirsiz yapıların o dönemdeki matematiksel işlemler ve mevcut temel mühendislik birikimleri ile bilgisayarlarda kolay analiz edilebileceğini gösteren bir çalışma yayımlamıştır. Geliştirdiği yöntemi çok bölmeli üçgen şeklinde eğimli ve konik kirişli çerçeveleri içeren örneklerle açıklamıştır (Czerniak, 1958). Archer çalışmasında bilgisayarlara kullanarak yüksek dereceden hiperstatik yapıların gerilme ve modal analizinin yapılmasını sağlayabilen bir matris yöntemi geliştirmiştir. Sunulan yöntemin inşaat mühendisliği yapılarının analizi için uygulanması, gerilmeler ve sehimler için basit bina çerçeve probleminin çözümü için kullanılması

işlemlerinden bahsetmiştir (Archer, 1958). Lount 100 düğüm noktasına kadar olan bina çerçevelerini analiz edebilen bir bilgisayar programı geliştirmiştir. Böylece bilgisayar yardımıyla büyük ölçekli problemlerde ardışık yaklaşım yöntemleri sunulmuştur (A. M. Lount, 1959).

Adams ve Morris deprem etkisi altındaki çeşitli inşaat mühendisliği yapılarının simülasyonunu hazırlamışlardır (Adams & Morris, 1962). Chan, rijit çerçevelerin analizi konusunda bir tez sunmuştur. Çerçeve elemanların analizleri IBM-1620 model bilgisayarla Fortran (önceleri FORTRAN) dilinde yazılan programlarla gerçekleştirilmiştir (Y.-F. Chan, 1962). Wang rijit çerçevelerin limit analizleri için bir bilgisayar programı tasarlamıştır. Program bir yük sistemi için yer değiştirme yöntemiyle bir dizi elastik analiz yapmaktadır (Wang, 1963). Monforton ve Wu yarı rijit bağlantılı çerçevelerin matris analizinin bilgisayar desteği ile yapılabilceğini açıklayan bir çalışma yürütmüşlerdir. İşlemlerin yüksek hızlı bilgisayarlar tarafından yapıldığını söylemişlerdir (Monforton & Wu, 1963). Levien ve Hartz sundukları çalışmada çerçeve analizi için dinamik esneklik matrisi geliştirmişler ve bilgisayarda kodlamasını yapmışlardır. Sürekli kirişlerin ve çerçevelerin dinamik tepkisi için bir kuvvet yöntemi yaklaşımı geliştirmişlerdir. Doğal frekansların ve dinamik tepkinin belirlenmesi için gerekli olan tüm denklemler matris biçiminde geliştirilmiş ve IBM 709 model bilgisayarda programlanmıştır. Elde ettikleri sayısal sonuçların diğer yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalarını yapmışlardır (Levien & Hartz, 1963).

Goldberg vd. bir dizi kiriş probleminin bilgisayar ile çözümü için kapsamlı bir yöntem sunmuşlardır. Yöntemlerin statik veya dinamik yükleme altındaki kirişlerin sehim ve gerilmelerinin hesaplanması; burkulma yüklerinin, doğal frekanslarının ve mod şekillerinin belirlenmesi için kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Goldberg, Bogdanoff, & Glauz, 1964). Clough vd. büyük ve çok katlı yapı çerçevelerinin analizi için bir bilgisayar metodu geliştirip sunmuşlardır (Clough, King, & Wilson, 1965). Tezcan düzlem ve uzay yapıların analizleri için rijitlik yöntemi üzerinde çalışmıştır (Tezcan, 1966). Brooks ve Brotton büyük çerçevelerin doğrusal yapısal analizi için oluşturulan denklemleri çözmenin verimli yöntemlerini Gauss eliminasyonunu dikkate alarak tartışmışlardır ve bilgisayar kullanarak bu yöntemeye dayalı çok sayıda hesaplama varyasyonu geliştirmişlerdir (Brooks & Brotton, 1967). Lowrey çalışmasında elastik çerçevesel yapıların titreşimlerinden ortaya çıkan çıktılarına yönelik bilgisayar kullanımını da içeren bir çalışma yapmıştır (Lowrey, 1968). Whetstone doğrusal çerçevelerin statik analizi için yapının rijitlik matrisinin sıfır olmayan alt matrisleriyle ilgilenen, böylece önemsiz aritmetiği ortadan kaldırarak analiz maliyetlerini düşüren bir yöntem sunmuştur ve bu yöntemin bilgisayarlarda uygulanmasının üzerinde durmuştur (Whetstone, 1969). Emkin ve Litle çok katlı çelik çerçevelerin plastik analizleri için program

geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır (Emkin & Little, 1970). Driscoll vd. tarafından Fortran ile çok katlı çerçevelerin ön tasarımına yardımcı olmak için bir program geliştirilmiştir. Program, sekiz açıklık ve 48 kata kadar düzgün dikdörtgen çerçeveler için kullanılabilir. Geliştirilen programın çalışma biçimi iki aşamalıdır. Birinci aşamada yapının geometrisi ve genel yük modelleri hakkındaki veriler alınır ve bunlar elemanlar üzerindeki yüklere çevrilir. İkinci aşamada çerçeve geometrisi ve yapı yükleme durumu alınır. Kirişler için gerekli plastik momentler hesaplanır. Kirişler ve kolonlar için moment diyagramları hazırlanır (Driscoll, Armacost, & Hansell, 1970). Şekil 3.1.1 mekanik alanında yapılmış çalışmaların hangi yıllarda yapıldığını ve kaç tane olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1.1: Mekanik Alanında Yapılmış Çalışmaların Yıllara Göre Dağılımı

3.2. Yapı Mühendisliği Dalındaki Çalışmalar

Galletly statik yükler altında betonarme perdelerin davranışı hakkında 10 bölümden oluşan detaylı bir rapor sunmuştur. Yazar masaüstü bilgisayar ile yaptığı analizlerin zahmetli olduğunu belirtmiştir. Sonrasında MIT (Massachusetts Institute of Technology) içerisindeki Whirlwind adlı yüksek hızlı bir bilgisayarda 3 hafta zaman ayırarak bir program geliştirmiştir. Bu sayede 10-15 saat arasında süren işlemlerin, geliştirdiği program ile sadece birkaç dakikaya düştüğünü belirtmiştir (Galletly, 1952). White sabit yükleme

altında ve sınırlı sayıda geometrik konfigürasyona sahip simetrik kesitli, üçgen kirişli, tek açıklıklı çelik rijit çerçeveleri analiz etmek için bir yazılım geliştirmiştir (White, 1959). Bonasia bilgisayarların yapı mühendisliği alanındaki uygulamalarının gösterilmesi ve yapısal problemlerin programlanması için mühendislere kılavuz sağlamayı hedefleyerek bir yazı kaleme almıştır (Bonasia, 1959). Aynı yazar önerilmeli beton kirişlerin bilgisayarla tasarımı konusunda da çalışma yapmıştır. Çalışma kirişlerin seçimi ve tasarımını kapsamaktadır (Bonasia, 1961). Beck ve Zar'ın literatüre kazandırdığı çalışma çok katlı rijit çerçevelerde çelik kolon tasarımlarının yapılması hakkındadır. Yazarlar simetrik olmayan ve düzensiz çerçevede eksenel kuvvet ve iki eksenli eğilme momenti altındaki kolonların tasarımının bilgisayarsız yapılmasının zor olduğunu belirtmişlerdir. Kolon tasarımı için kullandıkları programın açıklamasını sunmuşlardır. Kolon tasarımında bilgisayar kullanımı konusundaki avantajlara değinmişlerdir (Beck & Zar, 1963). Mauch ve Holley betonarme kolonlarda burkulma analizinin gerçekleştirilmesi için bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Betonarme kolonlar için sünme analizi gerçekleştirilmesi için gereken adımları detaylandırmışlardır. Çalışmada, değişen malzeme parametrelerinin etkileri ve sürekli yük altında kolon ömrü konusu tartışılmıştır (Mauch & Holley, 1963).

Sennett ve Wait tarafından elastik temel problemlerinin çözümü için bir analog bilgisayar geliştirilmiştir. Sonuçlar Galerkin yöntemiyle yapılan yaklaşık çözümlerle karşılaştırılmıştır. Analog bilgisayarda elde edilen çözümler, yaklaşık yöntemlerle elde edilenlerle karşılaştırıldığında iyi seviyede doğruluk sağlamıştır (Sennett & Wait, 1965). Hill optimum maliyetle betonarme bir yapıyı otomatik olarak tasarlayacak olan bir bilgisayar programı geliştirmiş ve sunmuştur (Hill, 1966). Bathurst çelik binaların tasarım aşamalarını sıralamış, ardından bu aşamalardan bilgisayarlar ile yapılabilenleri ve bunları yapan program isimlerini sunan bir araştırma yapmıştır (Bathurst, 1965). Rubinstein ve Karagozian çelik binaların ön boyutlandırması için doğrusal programlama yaklaşımı önermişlerdir. Tasarım kriteri olarak çökmeye karşı güvenlik ve elastik aralıktaki servis yükleri altında yanal yer değiştirmelerin sınırlandırılmasını kullanmışlardır (Rubinstein & Karagozian, 1966). Khan vd. tarafından 100 katlı ve yaklaşık 2.800.000 ft² taban alanına sahip bir yapının bir yıl içinde tamamen tasarlanmasını sağlamak amacıyla büyük ve küçük bilgisayarların koordineli kullanımını sağlamak için ayrıntılı bir program geliştirilmiştir (Khan, Iyengar, & Colaco, 1966). Lount ve Smyth metro gibi yeraltı yapılarında yaygın olarak kullanılan düzlem beton çerçevelerin tasarımı için geliştirilmiş özel amaçlı bir bilgisayar programı sunmuşlardır. Bilgisayar programındaki özellikler ile benzer tarzdaki yapılarda karşılaşılabilecek problemlerle başa çıkılabileceğinden söz etmişlerdir. Program ilk olarak Toronto metrosunda kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

Sonrasında San Francisco metrosunda kullanılmak üzere geliştirilmiş ve değiştirilmiştir. Sonrasında benzer tarz yapıların tasarımı için genel bir araç olmuştur (Albert M. Lount & Smyth, 1966).

Clough ve Benuska'nın çalışması yüksek binaların doğrusal olmayan deprem davranışı konusundadır. Çalışmada El Centro depreminde kaydedilen yer hareketlerinin yapılar üzerindeki etkilerini görmek için simülasyonlar yapılmıştır. Titreşim süreleri, yer değiştirme miktarları, süneklik faktörleri ve akma dayanımındaki değişimler gibi birçok parametrenin değerlendirilmesi yapılmıştır (Clough & Benuska, 1967). Bond kolonlar üzerine oturan betonarme basit dikdörtgen yapıların tasarımı için bir bilgisayar programı sunmuştur. Sunulan program basit bina ve köprü tasarımları yapabilmektedir. Yazar ayrıca maliyet minimizasyonu için malzeme özellikleri ve geometrik konfigürasyon üzerine açıklamalar yapmıştır (Bond, 1969). Kent tekrarlı yüke maruz kalan betonarme elemanların elastik olmayan davranışı konusunda tez yayımlamıştır. Tez betonarme yapı elemanlarının eğilme davranışı üzerine teorik yöntemlerin geliştirilmesi ve geliştirilen yöntemlerin doğruluğunun deneysel olarak test edilmesini kapsamaktadır (Kent, 1969). Goel ve Fenves'in çalışması bilgisayar destekli yapısal tasarım üzerinedir. Yazarlar yapısal tasarımın karmaşıklığının büyük kısmının tasarım kısıtlarının kontrol edilmesi olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile kısıtların bilgisayar destekli tasarım süreci içine entegre edilmesini hedeflemişlerdir (Goel & Fenves, 1969). Şekil 3.2.1 yapı mühendisliği alanında yapılmış çalışmaların hangi yıllarda yapıldığını ve kaç tane olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.2.1: Yapı Mühendisliği Alanında Yapılmış Çalışmaların Yıllara Göre Dağılımı

3.3 Geoteknik Dalındaki Çalışmalar

Scott'un çalışması konsolidasyon problemlerinin çözümü konusundadır. Yazar problemlerin çözümü için bir analog bilgisayar geliştirdiğini belirtmiştir. Yazı hem bilgisayarın tasarımı ve çalışması hem de konsolidasyon problemlerinin bilgisayar ile çözümü konusundadır (Scott, 1957). Horn'un yayını şev stabilitesi problemlerinin bilgisayar ile çözümleri konusundadır. Yazar, farklı zemin durumları için şev stabilitesi problemlerinin bilgisayar ile sadece birkaç dakikada çözülebileceğini belirtmiştir (Horn, 1960). Christie analog bilgisayarların inşaat mühendisliğinde kullanımı konusunda bir yazı yayımlamıştır. Yazı denge bacası ve killi zeminlerde konsolidasyon konusunda analog bilgisayar kullanımı örnekleri sunmaktadır. Yazar analog bilgisayarların inşaat mühendisliği problemleri için iyi doğrulukta ve hızlı sonuç veren kullanışlı bir araç kutusu olduğu sonucuna varmıştır (Christie, 1963). Şekil 3.3.1 geoteknik alanında yapılmış çalışmaların hangi yıllarda yapıldığını ve kaç tane olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.3.1: Geoteknik Alanında Yapılmış Çalışmaların Yıllara Göre Dağılımı

3.4 Hidrolik Dalındaki Çalışmalar

Glover vd. haliçlerdeki gelgit analizlerinin yapılması konusunda bilgi ve tecrübelerini aktarmışlardır. Üç farklı yöntem ile bu konudaki verilerin analiz edilebileceğini ve elde edilen sonuçların iyileştirilebileceğini yazmışlardır. Bu yöntemlerden bir tanesi bilgisayar kullanımındır. Bilgisayar ile analiz yapıldığında sonuçlarda diğer yöntemlere göre daha az hata payları oluştuğunu ve hızlı sonuç elde edilebildiğini belirtmişlerdir (Glover, Herbert, & Daum, 1952). Swain ve Riesbol karmaşık hidroloji problemlerinin çözümünü hızlandırmak için bilgisayarlardan yararlanmışlardır. Çalışmada su kaynakları, su gereksinimleri, su kullanımı, taşkın hidrolojisi gibi problemlerin çözümü

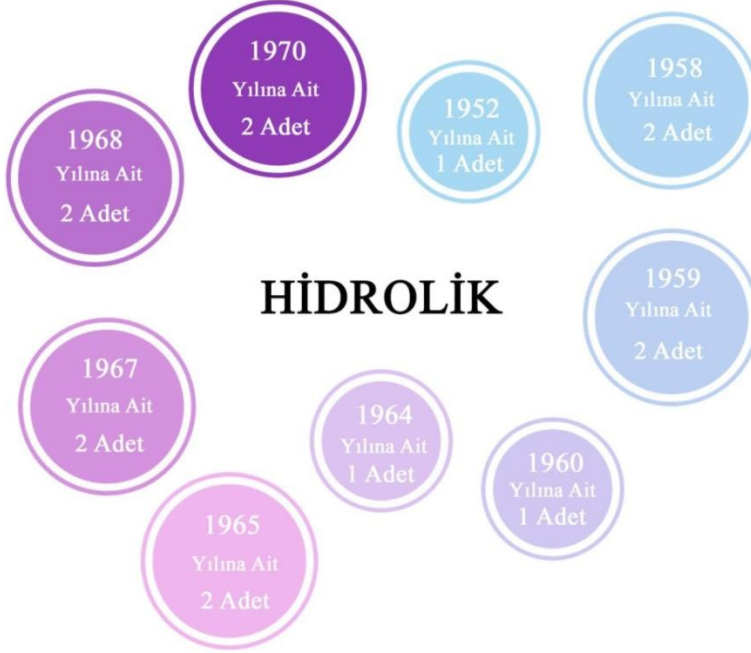
için uygulamalar yapılmıştır. Sonuçları yüksek doğruluklu olarak zamanın koşullarına göre hızlı ve ekonomik olarak elde ettiklerini belirtmişlerdir (Swain & Riesbol, 1959). Rockwood Amerika'daki Columbia bölgesindeki havza için akış yönlendirme konusunda çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmasında bilgisayar kullanarak yeni bir yönlendirme tekniğinin mümkün olduğunun üzerinde durmuştur (Rockwood, 1958). Vemuri ve Dracup yer altı sularının akışının incelenmesinde gerekli olan doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemleri çözülebilmek için hibrit bir bilgisayar metodu geliştirmişlerdir (Vemuri & Dracup, 1967).

Thomas boru hattı tasarımı konusunda bir çalışma yapmıştır. Çalışmasını gaz iletim hatlarının tasarımı için bilgisayarlardan destek alarak tamamlamıştır (Thomas, 1958). Harbeck ve Isherwood yayımlanmış akarsu akış verilerini analiz etmek ve su kaybı üzerine çalışmalarını yürütmek için bilgisayarlar kullanmışlardır (Harbeck & Isherwood, 1959). Foley yeraltı hidrolojisi konusunda 4 farklı problemin bilgisayarlı çözüm uygulamasını konu alan bir yazı yayımlamıştır. Problemlerden hangilerinin elektronik hangilerinin analog bilgisayarlı çözüm için daha uygun olduğuyula ilgili yorumlar paylaşmıştır (Foley, 1960).

Tyson ve Weber'in çalışması yer altı su havzalarının matematiksel modellenmesi üzerinedir. Modelin geliştirilmesi ve testleri için bilgisayarlardan yararlanılmıştır. Geliştirilen model havza içerisindeki su seviyesi yükselmelerini tahmin etmek için kullanılmıştır (Tyson & Weber, 1964). Remson vd. yer altı suyu probleminin çözümü konusunda çalışma yapmışlardır. Yazarlar yer altı su verilerinin depolanabildiğini ve depolanan veriler ile bilgisayar kullanılarak akifer performansının incelenebileceğini belirtmişlerdir. Bilgisayar kullanımını da içinde barındıran bir yöntem ile bir rezervuarın su seviyesi tahmini üzerine çalışmışlardır (Remson, Appel, & Webster, 1965). James kentsel yapılaşmanın taşkınlar üzerine etkilerini inceleyen bir çalışma kaleme almıştır. Su taşkınları ile değişen arazi yapısının etkilerinin incelenmesi için bilgisayardan yararlanmıştır (James, 1965). Riley ve Chadwick'in çalışmaları nehir havzası problemlerinin bilgisayar destekli çözüm uygulamalarına yöneliktir. Çalışma içerisinde çok sayıda uygulama örneği bulundurmaktadır (Riley & Chadwick, 1967).

Singh çift kütle analizinin yapılması amacıyla bilgisayar destekli bir çalışma yapmıştır (Singh, 1968). Liao ve Scheidegger sundukları çalışmada hidroloji alanındaki dallanma tipi olayların (doğal nehir oluşumu gibi durumlarda su kanallarının ayrılması ve birleşmesi gibi olaylar) simülasyonunu geliştirmişlerdir (Liao & Scheidegger, 1968). Heitner ve Housner deprem sonucunda oluşan tsunami tipi dalgaların yayılmasının ve ilerlemesinin incelenmesi için sonlu eleman formülasyonu sunmuşlar ve bilgisayar ile analizini yapmışlardır (Heitner & Housner, 1970). Chan ve Street

su dalgalarının doğrusal olmayan özelliklerinin iki boyutta bilgisayarlı modellenmesi konusunda çalışmışlardır (R. K.-C. Chan & Street, 1970). Şekil 3.4.1 hidrolik alanında yapılmış çalışmaların hangi yıllarda yapıldığını ve kaç tane olduğunu göstermektedir.



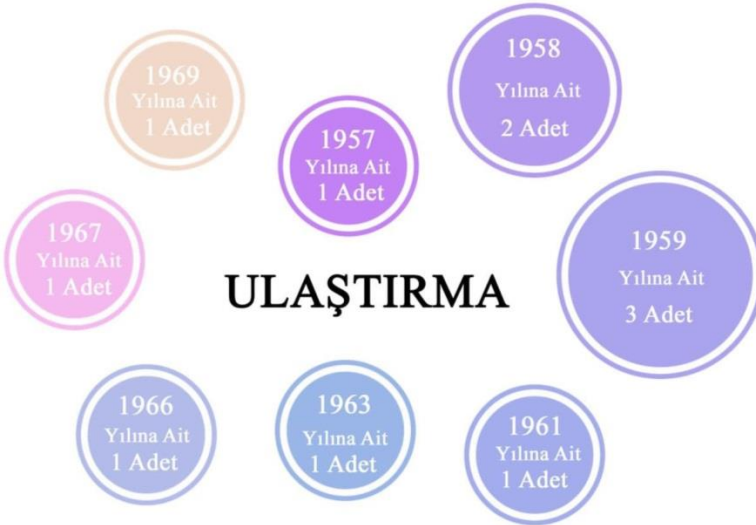
Şekil 3.4.1: Hidrolik Alanında Yapılmış Çalışmaların Yıllara Göre Dağılımı

3.5. Ulaştırma Dalındaki Çalışmalar

Scheffey bilgisayarların köprü tasarımı ve analizinde kullanımını ele almıştır. Yazı o yıllardaki kodlama tekniğindeki son gelişmeleri, analiz ve optimizasyon konusunda bilgisayarların mevcut potansiyellerini ele almaktadır (Scheffey, 1957). Looney karayolu köprüleri üzerine bir çalışma yayımlamıştır. Analizler Fortran ile programlanarak IBM 704 model bilgisayarda yapılmıştır (Looney, 1958). Tung'un çalışmasında köprü ayağı ve rijit çerçevelerin tasarımı için kullanılabilir moment dağılımlarının analizi konusunda bilgisayarlı bir yaklaşım sunulmuştur. Aynı yaklaşım kullanılarak başka yapısal çözümlerin yapılabileceği hakkında örneklerle değinilmiştir (Tung, 1958). Briggs vd. ağır araçların geçişinden kaynaklanan karayolu-köprü titreşiminin büyüklüğünü ve karakterini tahmin etmek için analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemin doğruluğunu ve sunulan varsayımların geçerliliğini, model köprüler üzerindeki laboratuvar testleri ile karşılaştırmışlardır. Geliştirdikleri yöntemlerin sahada uygulanabilirliği kanıtlamak ve tasarım için gereken koşulları anlamak için gerçek yapılarla testler yapmışlardır. Çalışma için bilgisayarlardan destek

almışlardır (Briggs, Suer, & Louw, 1959). Hansen vd. o dönemde kullanılmakta olan tüm hafriyat hesaplamaları sisteminin incelenmesi ve temel hafriyat miktar hesaplamalarının yapılması için bilgisayardan yararlanmışlardır (Hansen, Cason, & Yeager, 1961).

Sturman vd. karayolu köprüsü tasarımcılarına yardımcı olmak için bir bilgisayar sistemi geliştirmişlerdir. Sunulan sisteme kısa açıklıklı köprüler için veri işleme, analiz ve kısmen-tamamen otomatikleştirilmiş tasarıma yardımcı komutlar entegre edilmiştir (Sturman, Albertson, Cornell, & Roesset, 1966). Wait sinyalizasyon kavşaklarında geçmiş verileri kullanmış ve araç trafiğinin kontrolünün sağlanması üzerine bilgisayar destekli bir yaklaşım sunmuştur (Wait, 1959). Schureman karayolu mühendisliği başta olmak üzere mühendislik problemlerinde bilgisayarların kullanımı hakkında prosedür sunduğu bir çalışma yayımlamıştır (Schureman, 1959). Glickstein trafik simülasyonu üzerine yapılmış geçmiş çalışmaların derlemesini sunmuştur. Ayrıca çalışma yeni bir otoyol trafik akışı simülasyonu sunmaktadır (Glickstein, 1963). Smith gergin eğik askılı köprülerin yük altındaki davranışlarının iki boyutlu analizlerini yapmıştır. Analizler için gereken denklemlerin bilgisayar ile yaptığını belirtmiştir (Smith, 1967). West demiryolu tasarımlarında bilgisayarların kullanılmasının zorluk ve avantajlarına değinmiştir (West, 1969). Şekil 3.5.1 ulaştırma alanında yapılmış çalışmaların hangi yıllarda yapıldığını ve kaç tane olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.5.1: Ulaştırma Alanında Yapılmış Çalışmaların Yıllara Göre Dağılımı

3.6. Diğer Çalışmalar

Galbreath CPM metodunun (kritik yol yöntemi) uygulanması için bir bilgisayar programı yazılması üzerinde çalışmıştır (Galbreath, 1965). Clough

tarafından yayımlanan çalışma bilgisayarların kullanımıyla birlikte değişen piyasaya yönelik bir değerlendirme üzerinedir (Clough, 1958). Livesley'in yayınında inşaat mühendisliği uygulamalarının o dönemdeki ve gelecekteki olası kullanımlarına atıfta bulunularak bilgisayarların geliştirilmesi açıklanmaktadır. İnşaat mühendisliğiyle alakalı 3 uygulama ayrıntılarıyla tartışılmış ve genel sonuçların çıkarılabileceği örnekler dahil edilmiştir (Livesley, 1960). Fisher'in yazısında, modern bilgisayarların mühendislik mesleğinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu ve mühendislik okullarında da modern bilgisayarların üstünde durulduğundan bahsedilmiştir. Ayrıca bilgisayarların müfredat, araştırma ve mühendislik kavramları arasındaki ilişkilere etkisi incelenmiştir (Fisher, 1960).

Logcher ve Struman mühendislik kararlarının daha hızlı alınması ve hesaplamaların yapılabilmesi amacıyla STRUDL isimli bir bilgisayar programı oluşturmuşlardır. Oluşturulan program veri işleme, çeşitli analizlerin yapılması, tasarım ve süreç kontrolü yapılmasını sağlayan işlemlere sahiptir (Logcher & Struman, 1966). Ross ve Ward MIT'nin bilgisayar destekli tasarım ile ilgili tüm faaliyetlerini inceleyen bir rapor sunmuşlardır (Ross & Ward, 1967). Teague ve Hershendorfer bilgisayar destekli bina tasarımı araştırmaları için bir bilgisayar sisteminin pilot versiyonundan bahsetmişlerdir. Bahsedilen sistem pratik bir tasarım yazılımı olmamakla beraber bina modelleme problemlerini incelemek için bir araçtır (Teague & Hershendorfer, 1968). Allwood mühendislerin bir kısmının bilgisayarları neden kullanmayı tercih etmediklerini ve bu konudaki bazı zorlukları dile getirmiştir. Aynı zamanda yapı ve ulaştırma alanındaki bazı başarılı uygulamaları açıklamıştır (Allwood, 1970). Şekil 3.6.1 yapım yönetimi alanında yapılan çalışmanın yayımlandığı yılı göstermektedir. Ayrıca "Diğer" başlığı altında sınıflandırılmış çalışmaların hangi yıllarda yapıldığını ve kaç tane olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.6.1: Yapım Yönetimi ve "Diğer" Başlığı Altında Sınıflandırılmış Çalışmaların Yıllara Göre Dağılımı

4. Sonuç

Çok sayıda anahtar kelime ile farklı veri tabanlarında yapılan tarama sonucunda inşaat mühendisliğinde bilgisayar destekli tasarım konusunda tarihi niteliği olduğu düşünülen 73 çalışmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmalar ait oldukları dallara göre sınıflandırılarak birkaç cümle ile özetlenmiştir. Ulaşılan dikkat çekici sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Ulaşılan en eski çalışmalar 1952 yılına aittir. Bu yılda biri yapı mühendisliği dalında biri hidrolik dalında olan iki farklı çalışma yayımlanmıştır.
- Çalışmaların yaklaşık %27'si (20) mekanik, %22'si (16) yapı, %21'i (15) hidrolik, %15'i (11) ulaştırma, %4'ü (3) geoteknik ve %1'i (1) yapım yönetimi dallarındadır. Çalışmalardan %10'u (7) "Diğer" (tek bir dal altında sınıflandırılmayan çalışmalar) sınıfındadır. İnşaat mühendisliğinde bilgisayar desteğinin ilk kullanılmaya başlandığı zamanlarda bilgisayar destekli çalışmalar en çok mekanik dalında gerçekleştirilmiştir. Yapım yönetimi dalı ise en az (bilgisayar desteği ile) çalışma yapılan dal olmuştur.
- İnşaat mühendisliğinde bilgisayar kullanımının 1970'lerde yaygınlaştığı düşünülmektedir. Bunun nedenlerinden biri 1971'de Computers & Structures isimli bilgisayar ve yapı temalı derginin yayın hayatına başlamış olmasıdır. Diğer 1970'lerden sonra yayımlanan yazıların bir kısmında başlıkta ve anahtar kelimelerde bilgisayar kelimesi geçmediği halde çalışmanın bilgisayar ile yapıldığının fark edilmesidir.

İnşaat mühendisliğindeki tasarım uygulamaları erken dönemde insan gücünün sınırlarını zorlamakta iken bilgisayar desteğinin kullanılmaya başlanması ile daha konforlu tasarım süreçleri ve sonuçlar ortaya çıkmıştır. Mühendisler bilgisayar ve yazılım teknolojisinin gelişimi ile daha hızlı ve güvenilir çözümler elde etmişlerdir. Bilgisayar desteğinin mühendislikte kullanılmaya başlandığı ilk zamanlar ortaya çıkan bilgi birikimi günümüzde kullanılan yazılımların doğmasına öncülük etmiştir. Bu nedenle ilk çalışmalar günümüzdeki ilerleme seviyesinin anlaşılmasında önem teşkil etmektedir.

Kaynakça

- Adams, K. M., & Morris, R. A. (1962). An Analogue Computer for the Simulation of the Behaviour of Structures During Earthquakes. *Journal of Electronics and Control*, 12(2), 143–176. <https://doi.org/10.1080/00207216208937374>
- Ajmal, A. (2018). These Images Show How People Used To Work Before AutoCAD. 19 Ocak 2022 tarihinde, Erişim adresi

- <https://wonderfulengineering.com/these-images-show-how-people-used-to-work-before-autocad-era/>
- Allentuch, A., & Golub, E. (1971). Design Program for Rings of Non-Uniform Thickness. *Computers and Structures*, 1(1–2), 131–155. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(71\)90008-3](https://doi.org/10.1016/0045-7949(71)90008-3)
- Allwood, R. J. (1970). Computers and the Civil Engineer. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 1(1), 99–103. <https://doi.org/10.1080/0020739700010111>
- Archer, J. S. (1958). Digital Computation for Stiffness Matrix Analysis. *Journal of the Structural Division*, 84(6). <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000284>
- Bathurst, L. L. (1965). Automated building design. *DAC '65: Proceedings of the SHARE Design Automation Project*. <https://doi.org/10.1145/800266.810770>
- Beck, C. F., & Zar, M. (1963). Steel Column Design for Multistory Rigid Frames. *Journal of the Structural Division*, 89(4), 537–556. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000957>
- Bonasia, J. J. (1959). Use of the Electronic Computer to Solve Structural Problems.
- Bonasia, J. J. (1961). Design of Prestressed Concrete Beams by Computer. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 126(2), 901–927. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0008177>
- Bond, D. (1969). A Computer Program for Studying the Design of Reinforced Concrete Structures Supported On Columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 43(2), 195–216. <https://doi.org/10.1680/iicep.1969.7382>
- Briggs, J. M., Suer, H. S., & Louw, J. M. (1959). Vibration of Simple-Span Highway Bridges. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 124(1), 291–318. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007660>
- Brooks, D. F., & Brotton, D. M. (1967). Computer System for Analysis of Large Frameworks. *Journal of the Structural Division*, 93(6), 1–24. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001818>
- Chan, R. K.-C., Street, R. L., & Fromm, J. E. (1970). *The Digital Simulation of Water Waves -- An Evaluation of SUMMAC*.
- Chan, Y.-F. (1962). The Analysis of Rigid Frames by Electronic Computer.
- Christie, I. F. (1963). The Use of Analogue Computers for Civil Engineering Problems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 25(3), 267–286. <https://doi.org/10.1680/iicep.1963.10590>
- Clough, R. W. (1958). Use of Modern Computers in Structural Analysis. *Journal of the Structural Division*, 84(3). <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000231>
- Clough, R. W., & Benuska, K. L. (1967). Nonlinear Earthquake Behavior of Tall Buildings. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 93(3), 129–146. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000855>
- Clough, R. W., King, I. P., & Wilson, E. L. (1965). Closure to “Structural

- Analysis of multistory Buildings.” *Journal of the Structural Division*, 91(4). <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001296>
- Clough, R. W., & Wilson, E. L. (1971). Dynamic Finite Element Analysis of Arbitrary Thin Shells. *American Concrete Institute, ACI Special Publication*, 1(1–2), 33–56.
- Czerniak, E. (1958). Rigid Frame Analysis with the Aid of Digital Computers. *Journal of the Structural Division*, 84(3). <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000236>
- Driscoll, G. C., Armacost, J. O., & Hansell, W. C. (1970). Plastic Design of Multistory Frames by Computer. *Journal of the Structural Division*, 96(1), 17–33. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002491>
- Emkin, L. Z., & Litle, W. A. (1970). Plastic Design of Multistory Steel Frames by Computer. *Journal of the Structural Division*, 96(11), 2373–2388. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002748>
- Fenves, S. J. (1971). Truss Analysis by Method of Joints. *Computers & Structures*, 1(1–2), 347–359.
- Fisher, G. P. (1960). The Impact of Computers on Engineering Education. *Journal of the Structural Division*, 86(4), 1–9. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000492>
- Foley, J. (1960). Computer Applications in Groundwater Hydrology. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 86(3), 83–99. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000157>
- Galbreath, R. V. (1965). Computer Program for Leveling Resource Usage. *Journal of the Construction Division*, 91(1), 107–124. <https://doi.org/10.1061/JCCEAZ.0000122>
- Galletly, G. D. (1952). *Behavior of Reinforced Concrete Shear Walls Under Static Load*. Erişildi <https://hdl.handle.net/11681/8921>
- Glickstein, A. (1963). Analytical Methods in Transportation: Digital Simulation of Traffic. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 89(6), 1–13. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000429>
- Glover, R. E., Herbert, D. J., & Daum, C. R. (1952). *Solution of an Hydraulic Problem by Analog Computer*.
- Goel, S. K., & Fenves, S. J. (1969). Computer-Aided Processing of Design Specifications. *Journal of the Structural Division*, 97(1), 463–479. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002808>
- Goldberg, J. E., Bogdanoff, J. L., & Glauz, W. D. (1964). General Computer Analysis of Beams. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 90(3), 135–146. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000484>
- Golub, E., & Allentuch, A. (1971). Design Program for Short Ring-Reinforced Oval Cylinder. *Computers and Structures*, 1(3), 435–464. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(71\)90023-X](https://doi.org/10.1016/0045-7949(71)90023-X)

- Hansen, R. J., Cason, S. R., & Yeager, P. (1961). Earthwork Computations on Electronic Computers. *Journal of the Highway Division*, 87(1), 21–54. <https://doi.org/10.1061/JHCEA2.0000134>
- Harbeck, G. E., & Isherwood, W. L. (1959). Digital Computers for Water Resources Investigations. *Journal of the Hydraulics Division*, 85(11), 31–38. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000377>
- Hatfield, F. J., & Fenves, S. J. (1971). The Information Organizer: A System for Symbolic Data Manipulation. *Computers & Structures*, 1(1–2), 85–102.
- Heitner, K. L., & Housner, G. W. (1970). Numerical Model for Tsunami Run-Up. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 96(3), 701–719. <https://doi.org/10.1061/AWHCAR.0000039>
- Hill, L. A. (1966). Automated Optimum Cost Building Design. *Journal of the Structural Division*, 92(6), 247–263. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001553>
- Horn, J. A. (1960). Computer Analysis of Slope Stability. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 86(3), 1–17. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000266>
- James, L. D. (1965). Using a Digital Computer to Estimate the Effects of Urban Development on Flood Peaks. *Water Resources Research*, 1(2), 223–234. <https://doi.org/10.1029/WR001i002p00223>
- Kent, D. C. (1969). Inelastic behavior of reinforced concrete members with cyclic loading. University of Canterbury.
- Khan, F. R., Iyengar, S. H., & Colaco, J. P. (1966). Computer Design of 100-Story John Hancock Center. *Journal of the Structural Division*, 92(6), 55–73. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001570>
- Levien, K. W., & Hartz, B. J. (1963). Dynamic Flexibility Matrix Analysis of Frames. *Journal of the Structural Division*, 89(4), 515–536. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000955>
- Liao, K. H., & Scheidegger, A. E. (1968). A Computer Model for Some Branching-Type Phenomena in Hydrology. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 13(1), 5–13. <https://doi.org/10.1080/02626666809493561>
- Livesley, R. K. (1954). The Application of an Electronic Computer to Problems of Structural Analysis and Design and Some Notes on the Mathematical Theory of a Loaded Elastic Plate Resting on an Elastic Foundation. <https://doi.org/10.1093/qjmam/6.1.32>
- Livesley, R. K. (1956). The Automatic Design of Structural Frames. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 9(3), 257–278. <https://doi.org/10.1093/qjmam/9.3.257>
- Livesley, R. K. (1960). The Place of Digital Computers in Civil Engineering.

Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 15(1), 15–34.
<https://doi.org/10.1680/iicep.1960.11916>

- Logcher, R. D., & Struman, G. M. (1966). STRUDL—A Computer System for Structural Design. *Journal of the Structural Division*, 92(6), 191–211.
<https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001550>
- Looney, C. T. G. (1958). High-Speed Computer Applied to Bridge Impact. *Journal of the Structural Division*, 84(5).
<https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000279>
- Lount, A. M. (1959). Computer Design of Multistory Frame Building. *Journal of the Structural Division*, 85(10), 75–116.
<https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000464>
- Lount, Albert M., & Smyth, W. F. (1966). Computer Analysis of Underground Frames. *Journal of the Structural Division*, 92(6), 93–116.
<https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001572>
- Lowrey, M. J. (1968). An Assessment of Methods for the Free-Vibration Analysis of Elastic Framed Structures. *Wollongong University College Bulletin*. Erişildi <http://ro.uow.edu.au/wucbull/10>
- Macneal, R. H. (1971). A Hybrid Method of Component Mode Synthesis. *Computers and Structures*, 1(4), 581–601.
- Mauch, S., & Holley, M. J. (1963). Creep Buckling of Reinforced Concrete Columns. *Journal of the Structural Division*, 89(4), 451–481.
<https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000953>
- Maugh, L. C., Rumman, W. S., & Isada, N. M. (1955). *Structural Behavior of the 325-FT Steel Stack for Unit No. 6 - Glen Lyn Plant*.
- Melosh, R. J. (1971). The Optimum Approach to Analysis of Elastic Continua. *Computers and Structures*, 1(1–2), 241–263.
[https://doi.org/10.1016/0045-7949\(71\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0045-7949(71)90012-5)
- Monforton, G. R., & Wu, T. S. (1963). Matrix Analysis of Semi-Rigidly Connected Frames. *Journal of the Structural Division*, 89(6), 13–42.
<https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000997>
- Remson, I., Appel, C. A., & Webster, R. A. (1965). Ground-Water Models Solved by Digital Computer. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(3), 133–147. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001234>
- Riley, J. P., & Chadwick, D. G. (1967). *Application of an Electronic Analog Computer to the Problems of River Basin Hydrology*.
- Rockwood, D. M. (1958). Columbia Basin Streamflow Routing by Computer. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 84(5).
<https://doi.org/10.1061/JWHEAU.0000100>
- Ross, D. T., & Ward, J. E. (1967). *Investigations in Computer-Aided Design for Numerically Controlled Production*. Erişildi <http://hdl.handle.net/1721.1/755>

- Rubinstein, M. F., & Karagozian, J. (1966). Building Design Using Linear Programming. *Journal of the Structural Division*, 92(6), 223–245. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001552>
- Scheffey, C. F. (1957). Application of Digital Computers to Bridge Design. *Journal of the Structural Division*, 83(4). <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000127>
- Schureman, L. R. (1959). The Electronic Computer in Highway Engineering. *Journal of the Highway Division*, 85(3), 37–61. <https://doi.org/10.1061/JHCEA2.0000095>
- Scott, R. F. (1957). An Hydraulic Analogue Computer for Studying Diffusion Problems in Soil. *Géotechnique*, 7(2), 55–72. <https://doi.org/10.1680/geot.1957.7.2.55>
- Sennett, R. E., & Wait, J. (1965). Analog Computer Analysis of Static Beams. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 91(2), 47–62. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000603>
- Singh, R. (1968). Double-Mass Analysis on the Computer. *Journal of the Hydraulics Division*, 94(1), 139–142. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001740>
- Smith, B. S. (1967). The Single Plane Cable-Stayed Girder Bridge: A Method of Analysis Suitable for Computer Use. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 37(1), 183–194. <https://doi.org/10.1680/iicep.1967.8445>
- Stanton, E. L., & McGovern, D. J. (1971). The Application of Gradient Minimization Methods and Higher Order Discrete Elements to Shell Buckling and Vibration Eigenproblems. *Computers and Structures*, 1(3), 413–434. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(71\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0045-7949(71)90022-8)
- Sturman, G. M., Albertson, L. C., Cornell, C. A., & Roesset, J. M. (1966). Computer-Aided Bridge Design. *Journal of the Structural Division*, 92(6), 141–165. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001547>
- Swain, F. E., & Riesbol, H. S. (1959). Electronic Computers Used for Hydrologic Problems. *Journal of the Hydraulics Division*, 85(11), 21–29. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000376>
- Teague, L. C., & Hershendorfer, A. M. (1968). Build—An Integrated System for Building Design. *Journal of the Structural Division*, 94(4), 983–994. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001943>
- Tezcan, S. S. (1966). Computer Analysis of Plane and Space Structures. *Journal of the Structural Division*, 92(2), 143–174. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001417>
- Thomas, H. E. (1958). Digital Computers Applied To Pipeline Design. *Journal of the Pipeline Division*, 84(1). <https://doi.org/10.1061/JPLEAZ.0000013>
- Tung, C. P. C. (1958). Design of Pier Bent and Rigid Frame by a Computer. *Journal of the Structural Division*, 84(7).

<https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000298>

- Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., & Topp, L. J. (1956). Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 23(9), 805–823. <https://doi.org/10.2514/8.3664>
- Tyson, H. N., & Weber, E. M. (1964). Ground-Water Management for the Nation's Future—Computer Simulation of Ground-Water Basins. *Journal of the Hydraulics Division*, 90(4), 59–77. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001093>
- Vemuri, V., & Dracup, J. A. (1967). Analysis of Nonlinearities in Ground Water Hydrology: A Hybrid Computer Approach. *Water Resources Research*, 3(4), 1047–1058. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01047>
- Venkayya, V. B. (1971). Design of Optimum Structures. *Computers and Structures*, 1(1–2), 265–309. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(71\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0045-7949(71)90013-7)
- Wait, J. V. (1959). A Study of the Application of Digital Computers for Controlling Vehicle Traffic at a signalized Intersection.
- Wang, C.-K. (1963). General Computer Program for Limit Analysis. *Journal of the Structural Division*, 89(6), 101–117. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000994>
- Weaver, W., Brandow, G. E., & Manning, T. A. (1971). Tier Buildings with Shear Cores, Bracing, and Setbacks. *Computers and Structures*, 1(1–2), 57–83. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(71\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0045-7949(71)90005-8)
- West, P. E. (1969). Computers in the design of railway structures. *Computer-Aided Design*, 1(4), 25–33. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(69\)80056-4](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(69)80056-4)
- Whetstone, W. D. (1969). Computer Analysis of large Linear Frames. *Journal of the Structural Division*, 95(11), 2401–2418. <https://doi.org/10.1061/jsdeag.0002396>
- White, A. (1959). Analysis of Rigid Frames by Electronic Computation. *Journal of the Structural Division*, 85(9), 65–77. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000448>

BÖLÜM VI

ENDÜSTRİYEL ATIK TÜRÜ BAĞLAYICI İÇEREN SÜRDÜRÜLEBİLİR HİBRİT ÇİMENTO HARÇLARININ POR YAPISI ÖZELLİKLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Levent Bostancı

Beykent Üniversitesi, leventbostanci@beykent.edu.tr

Orcid: 0000-0002-4686-9102

1. Giriş

Sürdürülebilirlik kavramı köken olarak Latince'den gelmekte olup insan – çevre etkileşimlerinde verimlilik, zaman, kalıcılık, düşük maliyet ve azaltılmış kirlilik gibi yaşamsal temel kavramlara olan bağlılığı ifade etmektedir (Nidheesh ve Kumar, 2019). Bir başka tanımlama ile sürdürülebilirlik, kalkınma fikri ile ilişkilendirilen refah talebi ile doğal destek sistemlerinin korunması arasındaki gerekli uzlaşmayı ifade eder (Carvajal-Arango vd, 2019). Günümüzde küresel düzeyde yaşanan iklim değişikliklerinin dünya üzerindeki yıkıcı etkileri, sürdürülebilirlik politikalarına olan adaptasyonun önemini her geçen gün öne çıkarmaktadır. Sürdürülebilirlik ile alakalı politikaların odak noktasının mevcut insan jenerasyonun ihtiyaçlarının gelecek neslin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden karşılanabilmesi ilkesine dayandığı dikkate alındığında verimli enerji kullanımı, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma ile alakalı tüm endüstriyel girişimler, günümüzde daha sürdürülebilir bir çevre için oldukça değerlidir (Kissi vd., 2018; Ucal ve Xydis, 2020).

İnşaat endüstrisi, yoğun kaynak kullanımı ve üretim faaliyetleri esnasında küresel ısınmaya katkı sunan negatif çıktılar ile iklim değişikliğini tehdit eden endüstrilerin başında gelmektedir (Udomsap ve Hallinge, 2020). İnşaat sektörü, dünyadaki ham kaynakların küresel düzeyde %50'sini tüketen ve Avrupa kıtası düzeyinde tüm katı atık oluşumunun %25-33'üne sebep olan bir sektör olarak dikkat çekmektedir (Murtagh vd., 2020). Gelişmekte olan

kategorideki ülkeler otoyollar, yüksek hızlı tren sistemleri, yeni kentsel alanlar ve kamu hizmet yapıları ile yeni altyapılara yatırım yaparken gelişmiş ülkelerde mevcut altyapılarını sürekli olarak onarma ve yenileme çabası içindedir (Vázquez-Rowe vd., 2019). Artmakta olan insan popülasyonu ve beraberinde getirdiği barınma, ulaşım gibi temel ihtiyaçların açısından sürekli olarak üretim halinde olan inşaat sektörü, yapı ve yapı malzemeleri üretiminde gerçekleşen ciddi ölçekteki doğal hammadde tüketimi, yüksek gaz salınımı ve enerji tüketimi ile günümüz sürdürülebilirlik politikalarının odaklandığı sektörlerin başında gelmektedir (Saeli vd., 2019).

İnşaat endüstrisinde “sürdürülebilir inşaat” kavramı ile alakalı ilk ciddi yaklaşım, daha geniş bir sürdürülebilir kalkınmayı destekleme ve sektör kaynaklı çevresel sorunlara çözüm bulma girişiminin bir parçası olarak 1994 yılında Charles Kibert tarafından geliştirilmiş ancak bu yaklaşım, “değişime isteksizlik” kültürü nedeniyle sektörde hala beklenen ölçüde uygulama alanı bulamamaktadır (Goh vd., 2020). Hâlbuki malzemelerin atık konumuna gelmesinin engellenmesi, atık konumundaki malzemelerin yeniden değerlendirilmesi, atık depolama alanlarının azaltılması, doğal ham malzeme kaynaklarının korunması ve enerji tasarrufu gibi pek çok endüstri için geçerli olan yeşil ekosistem politikaları, inşaat sektörü için oldukça büyük bir uygulama potansiyeli teşkil etmektedir (Mohammadhosseini vd., 2019). Bu açıdan ele alındığında, inşaat sektöründe sürdürülebilirlik üzerine gerçekleştirilen çalışmalar son zamanlarda yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımına, klinker üretim süreçlerindeki modifikasyonlara ve çimentoün kısmen veya tamamen yerini alabilecek alternatif malzemeler üzerine odaklanmaktadır (Khan vd., 2020).

Sürdürülebilirlik esaslı ilkeler açısından çimento üretim faaliyeti ele alındığında, her 1 ton çimento üretimi için yaklaşık 1.7 ton doğal hammadde gereksinimine ihtiyaç duyulmakta ve hammaddelerin çimentoün yapı taşı olan klinkere dönüşmesi esnasında 3.2– 6.3 GJ düzeyinde enerji sarfiyatı gerçekleşmektedir (Hossain vd., 2019). Üretim esnasındaki yüksek enerji tüketimi daha net olarak ifade edilmek istenirse harcanan enerji çimento maliyetinin tek başına %20-40’ını oluşturmaktadır (Singh vd., 2019). Doğal hammaddelerin tüketimi ve yüksek enerji maliyetlerine ilaveten üretilen her 1 ton çimento için yaklaşık olarak 1 ton da CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Mevcut durum detaylandırılırsa; çimento doğal hammadde kökeninde kalker ve kil yer almakta, doğal kalkerin kimyasal yapısı da çimento klinkerinin elde edilmesi için kalsinasyon işlemine maruz kalacak %98.5 oranında CaCO₃ ve %1.5 düzeyinde MgCO₃ içermektedir (Zhang vd., 2018). Klinker oluşumu esnasında ortaya çıkan toplam salınımın sadece %60’ı kalker ‘in kalsinasyonu neticesinde gerçekleşmekte ve kalan kısmın önemli bir parçası da ısı üretmek için kullanılan yakıtlardan kaynaklanmaktadır (Teixeira vd., 2018). Petrokok,

kömür, doğal gaz çimento üretimi esnasında en çok kullanılan yakıtlar olup bahsedildiği üzere gaz salınımına katkıda bulunmaktadırlar (Çankaya ve Pekey, 2019). Açığa çıkan yüksek düzeydeki emisyon, çimento endüstrisinin ekosistemde gerçekleşen global düzeyde toplam CO₂ salınımının %7'sinden tek başına sorumlu olduğunu işaret etmektedir (Ahmadi vd., 2018). İlaveten, dünyada artan nüfus ve barınma ihtiyacı ile 2050 yılına kadar çimentoya olan talebin günümüzdekine kıyasla %200 düzeyinde artacağı da öngörülmektedir (Huseien vd., 2017). Öte yandan, çeşitli sektörlerde endüstriyel üretim ve hatta tarım faaliyetleri neticesinde katı atık olarak ortaya çıkan cüruf, uçucu kül, silis dumanı, cam tozu, hindistan cevizi kabukları, palmiye yağı kabukları ve deniz kabuğu gibi pek çok atık ürün inşaat sektöründe malzeme üretimi için değerlendirilebilmektedir (Chen vd., 2019). Bu sebeple, klasik Portland çimentosu klinkerine kıyasla üretimi esnasında 9 kat daha az CO₂ salınımının gerçekleştiği çimento alternatifi bağlayıcı malzemeler günümüzde sürdürülebilirlik amaçları doğrultusunda ilgi çekici bir alternatif haline gelmiştir (Chindaprasirt ve Rattanasak, 2017).

Çimento esaslı alternatif bağlayıcı malzemeler genel olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi puzolanik özellik gösteren endüstriyel yan ürünlerden oluşmakta olup global düzeyde nüfus artışı ve hızlı şehirleşme nedeniyle yakın gelecekte beton kullanımına olan ihtiyacın artacağı gerçeğinin negatif etkilerini sınırlandırabilmesi açısından önem arz etmektedir (Shaikh vd., 2014). Uçucu kül, kömür ile çalışan elektrik santrallerinden elde edilen bir yan ürün olup dünyada yıllık yaklaşık 20 milyon ton uçucu kül üretildiği bilinmektedir (Yu vd., 2016). Uçucu kül, inşaat sektöründe çimento endüstrisi için bir hammadde olarak kullanılmasının yanı sıra çimento esaslı malzemelerde dolgu malzemesi olarak ya da puzolanik karakteri ile bir tür çimento olarak uzun yıllardan beri çok fonksiyonlu malzeme olarak kullanım alanı bulmaktadır (Nguyen vd., 2018). Kömür kökenli uçucu kül, sahip olduğu puzolanik karakter ile ABD' de 1937 yılından beri çimento esaslı malzemeler için alternatif bir bağlayıcı malzeme olarak kabul edilmektedir (Yin vd., 2018). Sürdürülebilir üretim faaliyetleri açısından atık kökenli bir yan ürün olan uçucu külün çimento esaslı malzeme üretiminde kullanımının yaygınlaşması, klinker üretimi için gerekli olan yüksek enerji tüketiminin ve klinker üretimi esaslı CO₂ salınımının sınırlandırılması açısından oldukça değerlidir (Fanghui vd., 2015). Fonksiyonel açıdan normal şartlar altında, kimyasal yapısında yüksek düzeyde Al₂O₃ ve SiO₂ barındıran uçucu küller erken yaşlarda düşük dayanım gösterebilse de aktivatör desteği ile yüksek sıcaklık altında çimento benzeri yüksek dayanım gösterebilir hale getirilebilmektedir (Kaur vd., 2018).

Uçucu kül'e benzer şekilde çimento yerine kullanılacak alternatif puzolanik özellik gösteren yan ürünlerden biri de cüruftur. Cüruf, çelik endüstrisinin bir yan ürünü olup ortalama 1 ton çelik üretimi neticesinde 90 kg

kadar cüruf elde edilebilmektedir (Liu vd., 2020). Benzer metalik üretim süreçleri için bakır ve nikel gibi üretim faaliyetleri sonucunda da özgün türde cüruf, yan ürün olarak elde edilebilmektedir (Ameri vd., 2020). Her 1 ton bakır üretimi neticesinde 2.2 ton bakır cürufu yan ürün olarak oluşmaktadır (Panda ve Sarka, 2020). Cürufların kimyasal kompozisyonu, elde edildikleri metalik kaynağa bağlı olarak çok çeşitlilik göstermekle birlikte tane dağılımları ve camsı faz içerikleri de çimento hidrasyonu üzerinde oldukça etkilidir (Nguyen vd, 2020). Çelik kökenli cüruflar CaO , SiO_2 ve Al_2O_3 açısından zengin iken nikel kökenli cürufların kimyasal kompozisyonunda da yüksek düzeyde SiO_2 ve Al_2O_3 mevcuttur (You vd., 2019). Cüruflar, kimyasal kompozisyon açısından çimento klinkerine oldukça benzese de mineralojik karakterleri açısından bazı farklılıkları hidrasyon sürecine etki edebilecek düzeydedir. Çimento klinkerinin mineralojik yapısında baskın olan Ca_3SiO_5 hidrasyon hızında artış sağlarken cüruf mineralojisinde yer alan Ca_2SiO_4 hidrasyon hızını yavaşlatabilmektedir (Lu vd., 2018). Öte yandan, klinker ile harmanlanarak kullanılan cüruf, genellikle CaO ile tepkimeye girerek özellikle mikro yapı ve kimyasal etkilere karşı durabilite özelliklerini geliştiren ilave hidrat oluşumuna olanak sağlamaktadır (Sadok ve Courard, 2018). Uçucu kül hidrasyonunda olduğu gibi mekanik performans özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla cüruf, NaOH veya camsuyu gibi alkali aktivatörlerle etkinleştirilebilmekte ve neticesinde oda sıcaklığında dahi erken yaşta yüksek dayanım değerlerine ulaşılabilir (Zhang vd., 2020).

Çimento esaslı malzemelerde alternatif bağlayıcı malzeme olarak en çok kullanılan yan ürünlerden bir diğeri de silis dumanı olup silis dumanı içeren çimento esaslı malzemelerde hidrasyonun gerek erken gerekse ileriki yaşlarında gelişmiş mekanik ve durabilite özelliklerine rastlanabilmektedir (Gupta vd., 2020). Silis dumanı, silikon metalinin ve diğer silikon alaşımlarının üretilmesi esnasında elde edilen bir yan ürün olup her 1 ton silikon metali üretiminde yaklaşık olarak 200 kg silis dumanı atık ürün olarak ortaya çıkmaktadır (Chen vd., 2020). Elde edildiği silikon kökenli metal endüstrisine bağlı olarak kimyasal kompozisyonunda yüksek düzeyde yer alan SiO_2 içeriği %85-98 aralığında değişebilmektedir (Wang vd., 2019). Çimento esaslı karışımlara eklenen silis dumanı, hidrasyon esnasında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girer ve çimento esaslı malzemenin mekanik özelliklerinde belirleyici role sahip kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazını oluşturur (Kim vd., 2019). Silis dumanın yüksek puzolanik aktivesi ile hidrasyonun özellikle 7 ve 28 inci günleri arasında serbest formdaki kireç tamamıyla tüketilebilmekte ve klasik çimento klinkerine kıyasla silis dumanı sayesinde çok daha yüksek düzeyde kristalize formda C-S-H bağları oluşabilmektedir (Esfandiari ve Loghmani, 2019). Bu açıdan silis dumanı, özgün puzolanik bağlayıcı karakteristiği ile oldukça yüksek yüzey alanına sahip olmasıyla ya da bir diğer

ifade ile sahip olduğu çok çok daha küçük partikül boyutlarıyla eşdeğerleri gibi gözükken uçucu kül ve yüksek fırın cürufundan da keskin bir şekilde ayrılmaktadır (Jeong vd., 2020). Yapılan deneysel çalışmalar, bağlayıcı malzeme içeriğinde çimento ikamesi olarak %10 düzeyinde silis dumanı içeren beton numunelerde %25 düzeyinde daha yüksek basınç dayanımlarının tespit edilebileceğini göstermektedir (Xu vd., 2020). Çimentonun tamamen ya da kısmen endüstriyel atık türü bağlayıcılar ile yer değiştirildiği alkali aktive edilmiş geopolimer esaslı malzemelerde 24 saatlik bir süre için 60-75 derecelik kür işlemi sonunda 62-66 MPa'lık mekanik dayanımlara ulaşılabilmekte, sülfat direnci gibi durabilite özellikleri de eş zamanlı olarak iyileşebilmektedir (Lee ve Lee, 2013).

Puzolanik özellik gösteren uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi atık ürünlerin çimento esaslı malzemelerde optimum düzeyde kullanımı CO₂ salınımında %26-45 düzeyinde düşümlere ve yapı maliyetinin azaltılmasına katkı sunabilmektedir (Alanazi vd., 2019). Çevresel ve ekonomik kazançların yanı sıra taze ve sertleşmiş malzeme özellikleri de gelişebilmektedir (Guo vd., 2020). Bu noktada, puzolanik katkıların kullanıldığı çimento esaslı karışımlarda başta mekanik ve durabilite özellikleri olmak üzere malzeme özelliklerinin kullanılan mineral katkıdan nasıl etkileneceği önem arz etmektedir. Bu açıdan, çimento esaslı malzemelerde dayanım ve durabilite üzerinde belirleyici role sahip temel faktörlerden biri olan ve toplam porozite, ortalama por çapı ve por çapı dağılımı gibi parametrelerle ortaya konulmaya çalışılan malzemenin boşluk yapısı karakterinin tespiti önem arz etmektedir (Horsakulthai, 2021). Kalsiyum-silikat esaslı malzemelerde malzemelerin boşluk yapısı özellikleri cıva porozimetresi testi (MIP) gibi hasarlı yöntemlerle veya bilgisayarlı tomografi (CT) gibi hasarsız yöntemlerle ölçülebilmektedir (Bostanci, 2021). MIP testi ile jel ve küçük kapiler boşluklar daha hassas ölçülebilir iken CT tekniği çalışma prensibi daha çok büyük kapiler boşluklar ve makro boşluklar için hassasiyet göstermektedir (Wang vd., 2022a). Boşluklu malzemelerde 10 nm'den küçük boşluklar genellikle jel boşlukları olarak adlandırılırken 10-100 nm arasındaki boşluklar küçük kapiler boşluklar, 100-1000 nm arasındaki boşluklar orta düzey kapiler boşluklar, 1000 -10000 nm arasındaki boşluklar büyük kapiler boşluklar ve 10000-50000 nm arasındaki boşluklarda büyük boşluklar olarak sınıflandırılabilir (Wang vd., 2022b). Boşluk doldurucu etkiye sahip mineral katkı esaslı malzemeler çimento esaslı karışımlara dahil edildiklerinde boşluk doldurucu etkileri kontrol durumuna kıyasla ölçülen belirli çap aralığındaki porozite özellikleri ile net olarak ortaya konulabilmektedir (Yang vd., 2019). Uçucu kül içeren karışımlarda genellikle artan uçucu kül içeriği toplam porozitede bir artışa neden olmakta ve bu artış da genellikle 10 ile 10000 nm arasındaki por içeriğinin artışından

kaynaklanmaktadır (Hu vd, 2019). Mineral katkı içeren çimento karışımlarında artan gözeneklilik durabilite özelliklerini olumsuz yönde etkilerken cüruf içeren beton karışımlarda kullanılan cüruf içeriğinin bu sebeple %50'nin altında olması literatürde önerilmektedir (Alderete vd., 2017).

Literatür çalışması net bir şekilde göstermektedir ki yapı sektörünün sürdürülebilirlik politikalarına olan uyumu için çimento esaslı malzemelerde çimento içeriğinin tamamen ya da kısmen azaltılıp endüstriyel atık türü bağlayıcıların kullanımının teşvik edilmesi önem arz etmektedir. Bu noktada, yakın gelecekte bağlayıcı malzeme içeriğinde salt çimento içeren karışımların yerini alması öngörülen atık türü bağlayıcı içeren çimento harçlarının başta mekanik ve durabilite özellikleri olmak üzere diğer malzeme özelliklerinin karışımlardaki atık türü bağlayıcı içeriği ile nasıl değiştiğinin ortaya koyulması önem teşkil etmektedir. Bu amaçla bu çalışmada bağlayıcı malzeme içeriğinde uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı içeren harçların detaylı por yapısı özellikleri çimento harçları ile karşılaştırmalı olarak incelenerek analiz edilmiştir. Endüstriyel atık türü bağlayıcı içeren harçların por yapısı özelliklerinin ortaya konulması por yapısı özelliklerinin diğer malzeme özellikleri ile olan yüksek korelasyonu dikkate alındığında başta mekanik ve durabilite özellikleri olmak üzere genel malzeme özelliklerinin öngörülebilmesi açısından oldukça değerlidir.

2. Malzeme ve yöntem

Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen harç karışımlarında bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 R tipi çimento, granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır.

Harç karışımlarında TS EN 196-1 (2016) standartlarına uygun olarak hazırlanmış, yoğunluğu ve özgül ağırlığı sırasıyla 1.35 kg/dm³ ve 2.63 olan standart Rilem kumu kullanılmıştır. Karma suyu olarak ise şebeke suyu kullanılmıştır. Üretilen harç karışımlarına ait karışım oranları Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1 Harç karışım oranları.

Karışım	Çimento (g)	Cüruf (g)	Uçucu Kül (g)	Silis dumanı (g)	Su (ml)	Kum (g)
ÇİM	450	-	-	-	225	1350
CRF	225	225	-	-		
UK	225	-	225	-		
SD	225	-	-	225		

Deneysel program çerçevesinde toplam 4 farklı harç karışımı oluşturulmuştur. Karışımlardan ilki kontrol numunesi amacıyla tasarlanmış olup bağlayıcı malzeme içeriğinde tamamıyla çimento bulunmaktadır. Oluşturulan diğer karışımlar ise bağlayıcı malzeme içeriklerinde %50 oranında çimento %50 oranında ise tek tür endüstriyel atık türü bağlayıcı (cüruf, uçucu kül veya silis dumanı) içermektedir. Harç karışımlarında su /bağlayıcı / kum oranları tüm karışımlarda 0.5:1:3 oranında olacak şekilde düzenlenmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında 4 cm x 4 cm x 16 cm boyutlara sahip çelik kalıplar vasıtasıyla her bir karışımdan 3'er adet harç numunesi üretilmiştir. Homojen bir karışım oluşturmak için başlangıçta kuru bir karıştırma işlemi uygulanmış, karışımlara su ilavesi azar azar yapılmış ve üretilen numuneler etkin bir vibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen harç numuneleri ilk 24 saat oda sıcaklığı koşullarında kalıpta bekletilmiştir. Ertesi gün ise kalıptan çıkarılarak 28 gün boyunca suda kür işlemine tabi tutulmuştur.

Kür süresini tamamlayan harç numunelerine por yapısı özelliklerinin tespit edilebilmesi amacıyla cıva porozimetresi deneyi uygulanmıştır. Ölçüm esnasında Micromeritics marka cihaz kullanılmıştır. Cihaz ile harç numunelerindeki 3-360,000 nm gözenek boyutu aralığındaki por yapısı özellikleri tespit edilebilmektedir.

3. Bulgular ve tartışma

3.1. Cıva porozimetresi test sonuçları

Harç numunelerine ait cıva porozimetresi test sonuçları Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2 Cıva porozimetresi test sonuçları.

	ÇİM	CRF	UK	SD
Toplam por alanı (m²/g)	5.72	8.76	6.01	22.01
Hacimsel medyan por çapı (nm)	82.3	97.1	155.4	29.4
Alansal medyan por çapı (nm)	25	10.6	23.9	5.3
Ortalama por çapı (nm)	48.8	33.4	61.6	15.5
Toplam porozite (%)	12.67	15.32	18.70	16.72

Deneyssel çalışmalar kapsamında kontrol numunesi olarak üretilen ve bağlayıcı malzeme içeriği tamamıyla çimentodan oluşan ÇİM numunesinde toplamda 5.72 m²/g 'lık por alanı tespit edilmiştir. Deneyssel tasarımımda çimentodan %50 düzeyinde tasarruf edilerek çimento yerine uçucu külün kullanıldığı UK numunesinde, ÇİM numunesindeki benzer düzeyde por alanı oluşumu saptanmış olup değişiklik sadece %5.06 düzeyinde bir gözeneklilik artışına denk gelmektedir. Bağlayıcı malzeme içeriğinde %50 düzeyinde çimentodan tasarruf edilip çimento yerine cüruf ve silis dumanı kullanılan harçlarda ise ciddi düzeyde gözenek gelişimi gözlenmektedir. CRF ve SD numunelerinin por alanlarında kontrol durumuna kıyasla sırasıyla %53.14 ve %284.79'luk ilave boşluk alanı gelişimi ölçülmüştür. Bu noktada çimento yerine kısmi oranda endüstriyel yan ürünün bağlayıcı malzeme içeriğine dahil edilmesinin numunelerin toplam por alanını arttırıcı bir etki gösterdiği ve bu etkinin endüstriyel yan ürün kökenine bağlı olmakla birlikte özellikle silis dumanı kullanımında zirve yaptığı net olarak söylenebilir.

Numunelerin toplam porozite değerleri incelendiğinde, ÇİM numunesinde numune grubu içinde saptanan en düşük por alanı değeri ile uyumlu olarak numune grubunun en düşük toplam porozite değeri de %12.67 olarak saptanmıştır. ÇİM numunesine kıyasla neredeyse benzer toplam gözenek alanının ölçüldüğü UK numunesinde ise tüm numune grubunda saptanan en büyük porozite değerine karşılık gelen %18.70'lik toplam porozite değeri ölçülmüştür. Yaklaşık eşit seviyede por alanlarına sahip ÇİM ve UK numunelerinin porozite değerleri arasında saptanan ciddi düzeydeki fark, kalsiyum – silikat esaslı malzemelerde por yapısı karakteristiğinin sadece toplam porozite ya da toplam por alanı gibi tek boyutlu parametrelerle tek başına açıklanamayacağı gerçeğini ortaya koyması açısından mühimdir. Öte yandan, SD ve CRF numunelerinin toplam por alanları için kontrol numunesine kıyasla ciddi düzeyde artış ölçülmesine karşın bu artışın kontrol numunesinin porozite değeri olan %12.67'den numunelerde tespit edilmiş maksimum %16.72 düzeyindeki bir porozite ile değerlendirilmesi de toplam porozitenin por yapısını tek başına ancak kısmi bir şekilde temsil edebileceğinin göstergesidir.

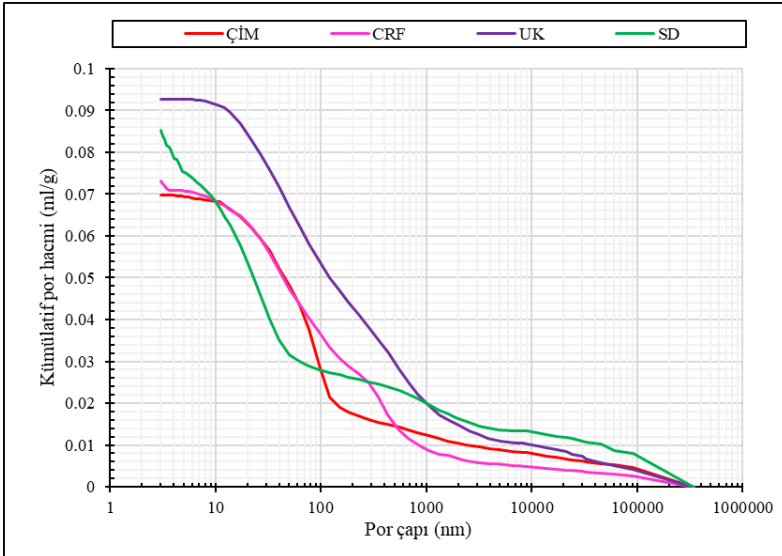
Benzer düzeyde toplam por alanlarının ölçüldüğü ÇİM ve UK numunelerinde alansal medyan por çapı değerleri de sırasıyla 25 nm ve 23.9 nm olarak birbirine oldukça yakın düzeyde tespit edilmiştir. Ancak, kontrol durumuna kıyasla toplam gözenek alanları sırasıyla %53.14 ve %284.79 düzeyinde genişlemiş olan CRF ve SD numunelerinde sırasıyla %57.6 ve %78.8 düzeylerinde daha düşük alansal medyan por çapı değerleri saptanmıştır. Bu noktada por yapısına ait özgün bir karakteristik davranışın ortaya çıktığı söylenebilir. Genişleyen toplam por alanına karşılık daralan alansal medyan por çapları, karışımlara ilave edilen CRF ve özellikle de SD

içerikleri aracılığı ile daha küçük çapta ancak daha çok sayıda ilave gözeneklerin temelini oluşturduğu bir por yapısının gelişebileceğini ortaya koymaktadır. Bu noktada endüstriyel atık türü bağlayıcıların por yapısı üzerindeki baskın etkisi oldukça değerlidir.

SD içerikli hibrit harç numunesi için alansal medyan por çapı değerlerinin ölçümü aracılığı ile öngörülen “küçük çapta ancak çok sayıda” gözenek içeren por yapısı gelişimi hipotezi, numunenin eş zamanlı olarak ölçülen hacimsel medyan por çapı ve ortalama por çapı değerleri aracılığı ile de desteklenmektedir. Kontrol numunesine kıyasla SD numunesinin hacimsel medyan por çapı ve ortalama por çapı değerlerinde tespit edilen sırasıyla %64.27 ve %68.23 düzeyindeki düşüşler, SD içeriğinin gözeneklerde çap küçülmesi olarak kendini gösteren mineral dolgu fonksiyonunun bir işaretidir. Aksine, UK içerikli numunenin hacimsel medyan por çapı ve ortalama por çapı değerlerinde tespit edilen sırasıyla %88.82 ve %26.22 düzeyindeki artışlar, numunede neden maksimum porozite değerinin ölçüldüğünü ortaya net olarak koymaktadır. Benzer şekilde kontrol durumuna kıyasla CRF numunesinin hacimsel medyan por çapı değerinde ölçülen %17.98’lik artış, ÇİM ve CRF numuneleri arasındaki porozite farkını açıklamaktadır. Bu noktada por yapısı modelinin daha net anlaşılması için ileri por yapısı ilişkilerinin ortaya çıkarılması önem arz etmektedir.

3.2. Kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisi

Şekil 1’de hibrit numunelerde ölçümlenen kümülatif por hacmi ile por çapları arasındaki ilişkiler görülmektedir.

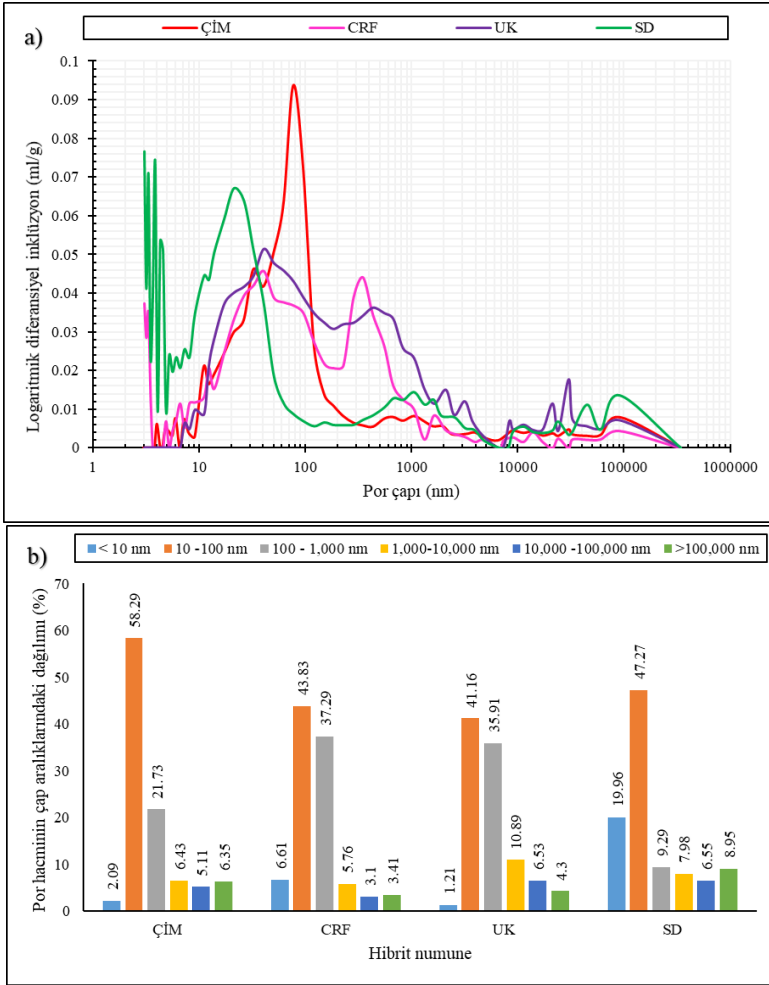


Şekil 1 Hibrit numunelerde kümülatif por hacmi – por çapı ilişkileri.

Şekil 1’de hibrit harç numunelerindeki kümülatif por hacminin numunelerin 3 – 360,000 nm ölçüm aralığındaki por yapısı içerisindeki seyri şekilde karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Numuneleri temsil eden eğriler incelendiğinde, kontrol numunesi ile gerek toplam porozite gerekse hacimsel medyan por çapı değerleri açısından kontrol numunesine en yakın por yapısı karakteristiklerinin tespit edildiği CRF numunesi arasında özellikle 10 nm ile 80 nm aralığına denk gelen kapiler por çaplarındaki yakınlık dikkat çekmektedir. ÇİM ve CRF numuneleri, tespit edilen en küçük toplam porozite değerlerine bağlı olarak ölçüm aralığındaki por çapları boyunca genellikle grafiğin altında kalacak şekilde bir davranış seyretilmektedir. UK numunesine ait eğri de özellikle 3-1000 nm’lik çap aralığı boyunca ki seyriyle %18.70’lik maksimum porozite değerinin ve 61.6 nm’lik maksimum ortalama por çapının tespitinde kapiler por çaplarının etkisini vurgulamaktadır. Grafikte 3 -10 nm aralığındaki davranışlar incelendiğinde ÇİM, CRF ve UK numuneleri neredeyse yatay bir doğruya yakın seyir gösterirken, SD numunesine ait eğrinin aşağı yönlü seyrinde oldukça dik bir davranış gözükmektedir. Bu durum, SD numunesinde diğer numunelere kıyasla ciddi düzeyde bir jel boşluğu oluşumunun en ciddi göstergesidir. SD numunesi için özellikle 100 -10,000 nm aralığındaki eğride yataylaşma davranışı da kapiler por çapı oluşumunda diğer numunelere kıyasla bir azalışın işaretidir. Bu durum, SD numunesinde tespit edilen numune grubunun en küçük 29.4 nm’lik hacimsel medyan por çapı değerini de izah etmektedir. Benzer şekilde 10,000 nm ile 360,000 nm aralığındaki makro çap oluşumları açısından duruma bakıldığında bu kez CRF numunesine ait eğride diğer numune eğrilerine kıyasla kısmi bir eğride yataylaşma görülmektedir. Bu davranış, makro boşluklar açısından CRF numunesinde diğer numunelere kıyasla daha farklı bir eğilimin göstergesidir. Grafikte gözlemlenen eğrisel davranışlar, her bir numune için toplam por hacminin %100 seviyesinde olduğu kabulüyle bu %100 ‘lük por içeriğinin numunenin kendi por yapısında nasıl dağıldığına yönelik sayısal olarak araştırılırsa daha net bir durum ortaya konabilecektir.

3.3. Diferansiyel inklüzyon–por çapı ilişkileri ve hacimsel por içeriklerinin dağılımı

Hibrit numuneler için por çapı aralıklarının dağılımını belirgin olarak ortaya koyan logaritmik diferansiyel inklüzyon – por çapı ilişkileri Şekil 2’de sunulmuştur.



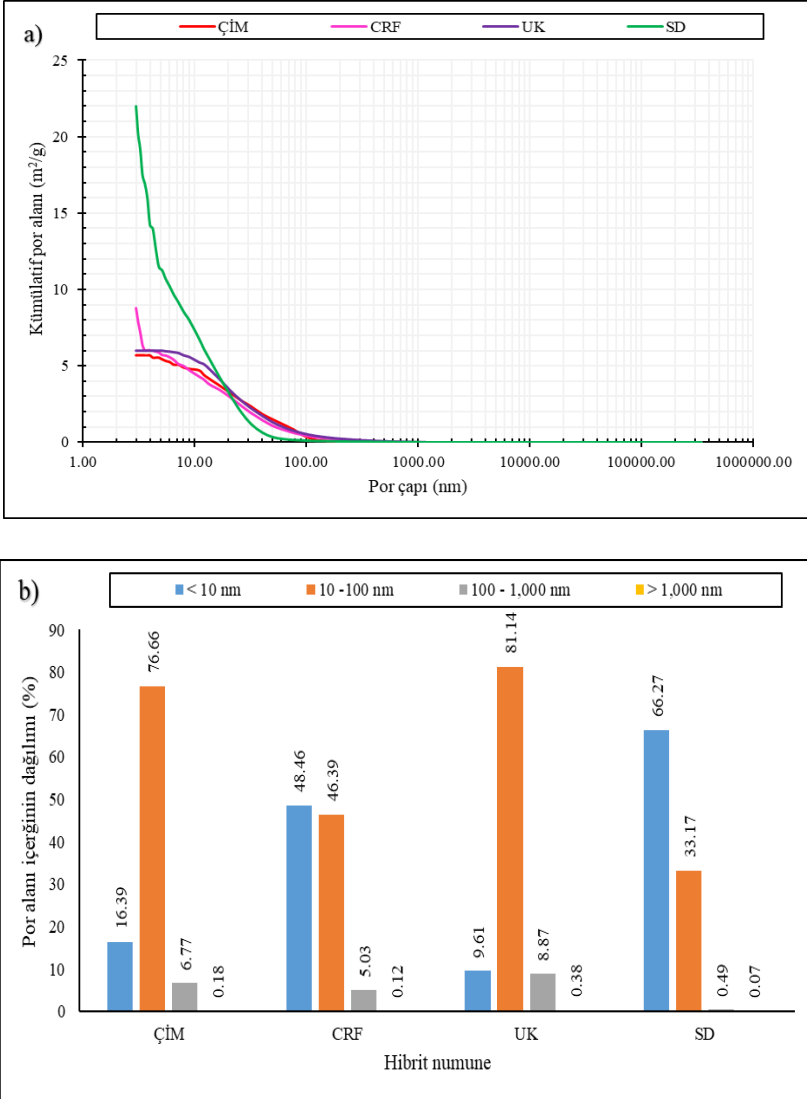
Şekil 2 (a) Logaritmik diferansiyel inklüzyon – por çapı ilişkileri ve (b) hacimsel por içeriklerinin dağılımı.

Şekil 2’de görüldüğü üzere karışımlara çimento yerine ilave edilen silis dumanı, diğer endüstriyel atık ürünlere kıyasla 3 nm ile 10 nm arasındaki por çaplarının miktarını derinden etkilemiştir. Belirtilen çap aralığında silis dumanı katkılı SD numunesi için eğrisel dalgalanma zirve yaparken kontrol numunesi, CRF ve UK numuneleri için eğriler oldukça basık bir seyir izlemektedir. Söz konusu eğrisel dalgalanma, toplam por hacimlerinin seçilen belirli aralıklar için yüzdelik olarak oranlanması neticesinde belirli çap aralıklarına düşen por içerikleri olarak hesaplandığında kontrol numunesinde %2.09 düzeyinde jel boşluk oluşumu tespit edilmiştir. Benzer düzeydeki jel boşluk oluşumu, uçucu kül içeren UK numunesinde de %1.21 seviyesinde ölçülmüştür. Cüruf ve silis dumanı içerikli numunelerde ise sırasıyla %6.61 ve %19.96 düzeylerinde

oluşan jel boşlukları, endüstriyel atık kullanımı ile jel boşluk oluşumu arasındaki ilişkiyi net olarak ortaya koymaktadır. Bu noktada uçucu kül kullanımı jel boşlukların oluşumu açısından salt çimentolu duruma kıyasla belirgin bir değişikliğe sebep olmazken cüruf ve özellikle silis dumanı içeriğinin jel boşluk oluşumu açısından hidrasyon sürecini derinden etkilediğini göstermektedir. 10 – 100 nm aralığındaki küçük kapiler boşluk oluşumunda gerek salt çimentolu gerekse silis dumanı içerikli numunelerde eğrisel tepelenme gözlemlenmektedir. Bu durum sayısallaştırıldığında ÇİM numunesi için %58.29, SD numunesi için %47.27'lik bir kapiler por oluşumundan bahsedilebilir. Burada bir kez daha SD içerikli numunenin tepelenme eğiliminin hem jel hem de küçük kapiler por içerikleri için eş zamanlı söz konusu olduğunun altını çizmekte fayda vardır. Cüruf ve uçucu kül içerikli numuneler, bu açıdan salt çimentolu ve silis dumanı katkılı numunelerden ayrılmaktadır. 100-1000 nm düzeyindeki por içerikleri için de benzer durum söz konusudur. Cüruf ve uçucu kül içerikli numuneler eğrisel olarak yukarıda seyrederken bu kez yine birlikte fakat alt bölgede benzer davranış sergileyen silis dumanı ve salt çimento içerikli numunelerden ayırt edici bir şekilde bahsedilebilir. 1000-10,000 nm aralığındaki por içeriklerinde ise uçucu kül içeriği kendini net olarak göstermektedir. Söz konusu por çapı aralığında UK numunesinde %10.89 olarak ölçülmüş olan por içeriği ÇİM, CRF ve SD numunelerinde daha düşük düzeyde saptanmıştır. 10,000-100,000 nm düzeyinde ve makro boşluklar olarak adlandırılabilir por içeriklerine bakıldığında grafiğin en altında basık bir eğrisel dalgalanmanın gözlemlendiği cüruf içerikli numunede minimum düzeyde makro boşluk oluşumu ölçülmüştür. Uçucu kül ve silis dumanı içerikleri, %6 düzeyinin üzerinde bir makro boşluk oluşumuna neden olurken bu oluşum kontrol durumu olarak kabul edilebilecek %5.11 seviyesinin hafif üzerindedir. Makro düzeydeki boşlukların en yüksek seviyesi olarak kabul edilebilecek 100,000 nm üzeri por içeriklerinin oranı ise önemli bir hususun altını çizmektedir. Kontrol durumunda %6.35 seviyesinde ölçülen söz konusu por içeriği, cüruf ve uçucu kül içeren numunelerde sırasıyla %3.41 ve %4.3 seviyelerindedir. Bu noktada endüstriyel atık bağlayıcı olarak cüruf ve uçucu kül kullanılması durumunda mineral dolgu fonksiyonunun daha çok makro por içeriğinde bir azalma olarak kendini gösterdiği durumu ortaya çıkmaktadır. Nitekim, silis dumanı ilavesi, diğer cüruf ve uçucu kül kullanılması durumlarına kıyasla makro boşluk oranını kısmi olarak arttırmaktadır. Özetle por yapısı dağılımlarından elde edilen sonuçlar silis dumanı varlığında jel ve küçük kapiler boşluk oluşumunun artışı ile en küçük por içeriklerinde silis dumanının mineral dolgu fonksiyonunu işaret ederken aynı fonksiyonel görev cüruf ve uçucu kül içeriklerinde makro düzeydeki por çapları için geçerlidir.

3.4. Kümülatif por alanı–por çapı ilişkileri ve alansal por içeriklerinin dağılımı.

Hibrit harç numunelerinin bağlayıcı malzeme içeriğinde yer alan endüstriyel atık türü bağlayıcıların numunelerin por yapısı özelliklerine olan etkisinin ortaya çıkarılmasında 2 boyutlu por yapısı özelliklerini ortaya çıkaran por alanı özelliklerinin ortaya konulması oldukça önemlidir. Şekil 3'te numuneler için kümülatif por alanı–por çapı ilişkileri görülmektedir.



Şekil 3 (a) kümülatif por alanı–por çapı ilişkileri ve (b) por alanı içerikleri.

Şekil 3'te görüldüğü üzere kontrol numunesi ÇİM'de $5.72 \text{ m}^2/\text{g}$ 'lik toplam por alanı saptanmıştır. Karışımlara çimento yerine ilave edilen cüruf, uçucu kül ve silis dumanı içeriklerinin CRF, UK ve SD numunelerinde sırasıyla %53.14, %5.06 ve %284.79 düzeylerinde por alanı artışlarına sebep olduğu önceki bölümde belirtilmişti. Numunelerde ölçülen alansal medyan por çapı değerlerinin tüm numune grubunda 5.3 nm ile 25 nm arasında değiştiği göz önüne alındığında özellikle bu değerlerin saptanmasında 3-10 nm ve 10 – 100 nm aralığındaki davranışın belirleyici olacağı açıktır. 3-10 nm aralığındaki por çapları için davranış değerlendirildiğinde kontrol numunesi ÇİM ile UK numune davranışının birbirine oldukça yakın olduğu ve grafiğin en alt bölümünde bir yataylaşma şeklinde kendini gösterdiği söylenebilir. Bu durum, jel boyutundaki çaplarda düşük düzeyde bir içeriğin oluşumunun göstergesi olup durum sayısallaştırıldığında ise en düşük jel por oluşumunun ÇİM ve UK numunelerinde sırasıyla %16.39 ve %9.61 düzeylerinde olduğunu göstermektedir. Aynı por çapı aralığında, CRF numunesinde kısmi düzeyde ve SD numunesinde ise aralık boyunca meydana gelen aşağı yönlü bir dikey kırılma söz konusudur. Bu dikey dalgalanmanın CRF numunesinde 3-4.5 nm çap aralığında baskın olduğu ve bu numune için 4.5 – 10 nm aralığındaki davranışın ÇİM ve UK numunelerinde olduğu gibi yataylaşma ile devam ettiği söylenebilir. CRF numunesinde, sadece 3-4.5 nm aralığındaki aşağı yönlü dikey dalgalanmanın baskın etkisi ile %48.46 düzeyinde jel por içeriğinin oluştuğu söylenebilir. Bu eğilim, SD numunesi için tüm aralık boyunca baskın olduğundan SD numunesinde %66.27 düzeyinde jel por oluşumu gözlenmektedir. Bu noktada, jel por oluşumunda mineral dolgu vazifesi gösteren silis dumanı içeriği diğer endüstriyel atık türü bağlayıcılardan ayrılmaktadır. %66.27 gibi en düşük por çaplarında saptanan baskın por içeriği ile SD numunesinde 5.3 nm gibi numune grubunun en düşük alansal medyan por çapı değerinin tespit edilmesi son derece olağandır. Yine aynı baskın etki ile numune grubunun en düşük ikinci alansal medyan por çapı değerinin CRF numunesinde 10.6 nm olarak tespit edilmesi de bu sebeptendir. 3-10 nm aralığındaki por çaplarında gözlemlenen yataylaşma da ÇİM ve UK numunelerinde numune grubunun en yüksek alansal medyan por çapı değerleri olan sırasıyla 25 nm ve 23.9 nm'lik ortalama çap değerlerinin tespitine yol açmaktadır. İki boyutlu por analizleri açısından 10 -100 nm 'lik ikinci baskın por aralığına bakıldığında ise ÇİM ve UK numuneleri grafiğin en üstüne çıkmakta; CRF ve SD numuneleri ise grafik altına doğru yönlenecek bir por dağılım eğrisi sergilemektedir. Bu davranış ÇİM, UK, CRF ve SD numunelerinde sırasıyla %76.66, %81.14, %46.39 ve %33.17 gibi por içeriklerinin oluşumuna neden olmaktadır. Oluşan sayısal içerikler değerlendirildiğinde yine ÇİM – UK ve kısmi olarak CRF-SD yakınlaşmasından bu aralıkta da bahsedilebilir. 3 – 100 nm aralığındaki jel ve

küçük kapiler boşluklar bir bütün olarak değerlendirildiğinde ise CRF numunesi en küçük jel boşluklardan en küçük kapiler boşluk oluşumuna geçişte en yumuşak geçişi sergileyen numune konumundadır. ÇİM ve UK numunelerinde düşük jel boşluğu içeriğine karşın ani bir sıçrayışla yüksek düzeyde küçük kapiler boşluk oluşumları gerçekleşirken SD numunesinde ise yüksek jel por içeriğinden düşük düzeyde küçük kapiler boşluk oluşumuna geçiş sert eğilimlidir. Orta düzeydeki kapiler boşluk oluşumlarına bakıldığında SD numunesinde bu içerik toplamda %0.6'nin altında iken UK numunesinde %9.25 ile maksimum halini almıştır. Bu noktada iki boyutlu por içerikleri açısından tamamıyla çimentodan oluşan ÇİM numunesine en yakın davranış CRF numunesinde benzer por içerikleri ile saptanmaktadır.

4. Sonuç ve öneriler

Endüstriyel atık türü bağlayıcı içeren hibrit cüruf, uçucu kül ve silis dumanı harçlarına uygulanan porozimetre testleri sonucunda aşağıdaki önemli sonuçlar elde edilmiştir:

- Endüstriyel atık türü bağlayıcı içeren numunelerde bağlayıcı malzeme içeriğinde çimento alternatifi olarak kullanılan uçucu kül, cüruf ve silis dumanı toplam porozite artışına neden olmaktadır.
- Endüstriyel atık türü bağlayıcı içeren numunelerde por yapısı özelliklerin toplam porozite gibi tekil ve bağımsız test parametreleri ile tek başına açıklanması mümkün görünmemekte; numune por yapısı karakteristiğinin ortaya çıkarılması için por çapı dağılımlarının belirli por fraksiyonları için iki ve üç boyutlu olarak ele alınması gerekmektedir.
- Hidratasyonun seyrini önemli ölçüde temsil etmesi açısından 3 – 10 nm'lik por içeriği tespiti oldukça değerli olup söz konusu por içeriği oluşumu açısından salt çimentolu duruma kıyasla en çok benzerlik gösteren durum bağlayıcı malzeme içeriğine uçucu kül ilavesinde gerçekleşmektedir.
- Çimentonun silis dumanı ile yer değişimi harç numunelerin por yapısındaki jel por oluşumunda ciddi bir artışa neden olmaktadır. Bu durumda silis dumanının mineral dolgu fonksiyonunun en çok jel por düzeyindeki por çaplarında gözlemlendiği söylenebilir.
- Uçucu kül ve cüruf içeriklerinde gözlemlenen mineral dolgu fonksiyonu silis dumanı ilavesi durumundan farklı olarak daha çok makro düzeydeki boşluklarda saptanmıştır.
- Endüstriyel atık türü bağlayıcı içeren numunelerde oluşan toplam por

alanları karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde çimento, uçucu kül ve cüruf partiküllerine kıyasla çok daha küçük çapta partiküllerden oluşan silis dumanı içeriğinde kontrol durumuna kıyasla %285 düzeyinde toplam por alanı artışı tespit edilmiştir.

- Silis dumanı ilavesinde maksimum seviyedeki toplam por alanına rağmen tespit edilen minimum düzeydeki alansal medyan por çapı değeri, silis dumanı içeriğinin harç bünyesinde küçük çapta ancak çok sayıya boşluk içeren bir por yapısı karakteristiğinin ortaya çıkmasına olanak sağladığını işaret etmektedir.
- Küresel formadaki uçucu kül tanecikleri salt çimentolu duruma kıyasla ortalama por çapını arttırıcı etki yaratırken cüruf ve silis dumanı partikülleri harç por yapısında ortalama por çaplarını düşürücü bir etkiye neden olmaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sürdürülebilirlik politikaları açısından geleceğin harç malzemesi olarak kullanılacak hibrit uçucu kül, cüruf ve silis dumanı harçlarına ait por yapısı özelliklerinin net olarak anlaşılmasına olanak sağlayacak düzeydedir. Ortaya çıkarılan por yapısı karakteristikleri, endüstriyel bağlayıcı içeren harç tasarımlarının gerek mekanik gerekse durabilite özelliklerinin tespiti ve geliştirilmesi açısından son derece önemlidir.

Kaynakça

- Ahmadi, Z., Esmaili, J., Kasaei, J., Hajialioghli, R. (2018). Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite, *Sustainable Materials and Technologies*, 16, 47–53.
- Alanazi, H., Hu, J., Kim, Y.R. (2019). Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature, *Construction and Building Materials*, 197, 747–756.
- Alderete, N., Villagrán, Y., Mignon, A., Snoeck, D. (2017). Pore structure description of mortars containing ground granulated blast-furnace slag by mercury intrusion porosimetry and dynamic vapour sorption, *Construction and Building Materials*, 145, 157–165.
- Ameri, F., Shoaie, P., Musaei, H.R., Zareei, S.A., Ban, C.C. (2020). Partial replacement of copper slag with treated crumb rubber aggregates in alkali-activated slag mortar, *Construction and Building Materials*, 256, Article 119468.
- Bostanci L. (2021). Effect of pore structure properties on strength properties of hybrid silica fume mortars containing randomly distributed carbon fibers, *Asian Journal of Civil Engineering*, 22, 1377–1399.

- Carvajal-Arango, D., Bahamon-Jaramillo, S., Aristizabal-Monsalve, P., Vásquez-Hernández, A., Botero Botero, L. F. (2019). Relationships between lean and sustainable construction: Positive impacts of lean practices over sustainability during construction phase, *Journal of Cleaner Production*, 234, 1322-1337.
- Chen, D., Zhang, P., Pan, T., Liao, Y., Zhao, H. (2019). Evaluation of the eco-friendly crushed waste oyster shell mortars containing supplementary cementitious materials, *Journal of Cleaner Production*, 237, Article 117811.
- Chen, H., Zhang, Y.J., He, P.Y., Li, C.J. (2020). Cost-effective and facile one step synthesis of ZSM-5 from silica fume waste with the aid of metakaolin and its NO_x removal performance, *Powder Technology*, 367, 558–567.
- Chindapasirt, P., Rattanasak, U. (2017). Characterization of the high-calcium fly ash geopolymer mortar with hot-weather curing systems for sustainable application, *Advanced Powder Technology*, 28, 2317–2324.
- Çankaya, S., Pekey, B. (2019). A comparative life cycle assessment for sustainable cement production in Turkey, *Journal of Environmental Management*, 249, Article 109362.
- Esfandiari, J., Loghmani, P. (2019). Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder, *Measurement*, 147, Article 106846.
- Fanghui, H., Qiang, W., Jingjing, F. (2015). The differences among the roles of ground fly ash in the paste, mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, 93, 172–179.
- Goh, C.S., Chong, H.Y., Jack, L., Faris, A.F.M. (2020). Revisiting triple bottom line within the context of sustainable construction: A systematic review, *Journal of Cleaner Production*, 252, Article 119884.
- Guo, Z., Jiang, T., Zhang, J., Kong, X., Chen, C., Lehman, D.E. (2020). Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume, *Construction and Building Materials*, 231, Article 117115.
- Gupta, S., Krishnan, P., Kashani, A., Kua, H.W. (2020). Application of biochar from coconut and wood waste to reduce shrinkage and improve physical properties of silica fume-cement mortar, *Construction and Building Materials*, 262, Article 120688.
- Horsakulthai V. (2021). Effect of recycled concrete powder on strength, electrical resistivity, and water absorption of self-compacting mortars. *Case Studies in Construction Materials*, 15, Article e00725.
- Hossain, M.U., Poon, C.S., Wong, M.Y.K., Khine, A. (2019). Techno-

environmental feasibility of wood waste derived fuel for cement production, *Journal of Cleaner Production*, 230, 663–671.

- Hu, X., Shi, C., Shi, Z., Zhang, L. (2019). Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars, *Cement and Concrete Composites*, 104, Article 103392.
- Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S.K., Hussein, A.A. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 54–74.
- Jeong, Y., Kang, S.H., Kim, M.O., Moon, J. (2020). Acceleration of cement hydration from supplementary cementitious materials: Performance comparison between silica fume and hydrophobic silica, *Cement and Concrete Composites*, 112, Article 103688.
- Kaur, M., Singh, J., Kaur, M. (2018). Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymer mortar: Role of nano-metakaolin. *Construction and Building Materials*, 190, 672–679.
- Khan, K., Ullah, M.F., Shahzada, K., Amin, M.N., Bibi, T., Wahab, N., Aljaafari, A. (2020). Effective use of micro-silica extracted from rice husk ash for the production of high-performance and sustainable cement mortar, *Construction and Building Materials*, 258, Article 119589.
- Kim, G.M., Kim, Y. K., Kim, Y.J., Seo, J.H., Yang, B.J., Lee, H.-K., (2019). Enhancement of the modulus of compression of calcium silicate hydrates via covalent synthesis of CNT and silica fume, *Construction and Building Materials*, 198, 218–225.
- Kissi, E., Sadick, M.A., Agyemang, D.Y. (2018). Drivers militating against the pricing of sustainable construction materials: The Ghanaian quantity surveyors perspective. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 507–516.
- Lee, N.K., Lee, H.K. (2013). Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature, *Construction and Building Materials*, 47, 1201–1209.
- Liu, G., Schollbach, K., Van der Laan, S., Tang, P., Florea, M. V.A., Brouwers, H.J.H. (2020). Recycling and utilization of high volume converter steel slag into CO₂ activated mortars – The role of slag particle size. *Resources, Conservation & Recycling*, 160, Article 104883.
- Lu, T.H., Chen, Y.L., Shih, P.H., Chang, J.-E. (2018). Use of basic oxygen furnace slag fines in the production of cementitious mortars and the effects on mortar expansion, *Construction and Building Materials*, 167, 768–774.
- Mohammadhosseini, H., Lim, N.H.A.S., Tahir, M.M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Samadi, M. (2019). Enhanced performance of green

- mortar comprising high volume of ceramic waste in aggressive environments, *Construction and Building Materials*, 212, 607–617.
- Murtagh, N., Scott, L., Fan, J. (2020). Sustainable and resilient construction: Current status and future challenges, *Journal of Cleaner Production*, 268, Article 122264.
- Nguyen, T.B.T, Saengsoy, W., Tangtermsirikul, S. (2018). Effect of initial moisture of wet fly ash on the workability and compressive strength of mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, 183, 408–416.
- Nguyen, H.V., Nakarai, K., Pham, K.H., Kajita, S., Sagawa, T. (2020). Effects of slag type and curing method on the performance of expansive concrete. *Construction and Building Materials*, 262, Article 120422.
- Nidheesh, P.V., Kumar, M.S. (2019). An overview of environmental sustainability in cement and steel production, *Journal of Cleaner Production*, 231, 856–871.
- Panda, S. Sarka, P. (2020). Leaching behavior of copper slag aggregate cement-mortar by atomic absorption spectroscopy (AAS), *Materials Today Proceedings*, 33, 5123–5129.
- Sadok, A.H., Courard, L. (2018). Chloride diffusion and oxygen permeability of mortars with low active blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, 181, 319–324.
- Saeli, M., Senff, L., Tobaldi, D.M., Seabra, M.P., Labrincha, J.A. (2019). Novel biomass fly ash-based geopolymeric mortars using lime slaker grits as aggregate for applications in construction: Influence of granulometry and binder/aggregate ratio, *Construction and Building Materials*, 227, Article 116643.
- Shaikh, F.U.A, Supit, S.W.M., Sarker, P.K. (2014). A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes, *Materials and Design*, 60, 433–442.
- Singh, G.V.P.B., Subramaniam, K.V.L. (2019). Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste, *Journal of Cleaner Production*, 239, Article 118024.
- Teixeira, E.R., Mateus, R., Camões, A., Branco, F.G. (2019). Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 197, 195–207.
- TS EN 196-1. (2016). Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- Ucal, M., Xydis, G. (2020). Multidirectional Relationship between Energy Resources, Climate Changes and Sustainable Development: Technoeconomic Analysis, *Sustainable Cities and Society*, 60, Article 102210.

- Udomsap, A.D., Hallinge, P. (2020). A bibliometric review of research on sustainable construction,1994-2018. *Journal of Cleaner Production*, 254, Article1200732.
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler-Rodriguez, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R., Kahhat, R. (2019). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications, *Resources, Conservation & Recycling*, 142, 283–292.
- Wang, X., Huang, J., Ma, B., Dai, S., Jiang, Q., Tan, H. (2019). Effect of mixing sequence of calcium ion and polycarboxylate superplasticizer on dispersion of a low grade silica fume in cement-based materials, *Construction and Building Materials*, 195, 537–546.
- Wang, S., Wang, Z., Huang, T., Wang, P., Zhang, G. (2022a). Mechanical strengths, drying shrinkage and pore structure of cement mortars with hydroxyethyl methyl cellulose, *Construction and Building Materials*, 314, Article 125683.
- Wang, Y., Ge, Y., Wang, X., Chen, X., Li, Q. (2022b). The effect of powder activated carbon on mechanical properties and pore structures of cement-based mortars, *Construction and Building Materials*, 316, Article 125798.
- Xu, W., Zhang, Y., Zuo, X., Hong, M. (2020). Time-dependent rheological and mechanical properties of silica fume modified cemented tailings backfill in low temperature environment, *Cement and Concrete Composites*, 114, Article 103804.
- Yang, H., Long, D., Zhenyu, L., Yuanjin, H. (2019). Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar, *Construction and Building Materials*, 224, 276–283.
- Yin, K., Ahamed, A., Lisak, G. (2018). Environmental perspectives of recycling various combustion ashes in cement production – A review, *Waste Management*, 78, 401–416.
- You, N., Li, B., Cao, R., Shi, J. (2019). The influence of steel slag and ferronickel slag on the properties of alkali-activated slag mortar, *Construction and Building Materials*, 227, Article 116614.
- Yu, Y., Yu, J., Ge, Y. (2016). Water and chloride permeability research on ordinary cement mortar and concrete with compound admixture and fly ash, *Construction and Building Materials*, 127, 556–564.
- Zhang, C.Y., Han, R., Yu, B., Wei, Y.-M. (2018). Accounting process-related CO₂ emissions from global cement production under Shared Socioeconomic Pathways, *Journal of Cleaner Production*, 184, 451–465.
- Zhang, J., Tan, H., Cai, L., He, X., Yang, W., Liu, X. (2020). Ultra-fine slag activated by sodium carbonate at ambient temperature, *Construction and Building Materials*, 264, Article 120695.

BÖLÜM VII

SÜRDÜRÜLEBİLİR HİBRİT UÇUCU KÜL HARÇLARINDA ATIK LASTİK PARTİKÜLLERİNİN HARÇ NUMUNELERİNİN POR YAPISI ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİSİ

*Effect of Waste Rubber Inclusion on Pore Structure Properties of
Hybrid Fly Ash Mortars*

Dr. Öğr. Üyesi Levent Bostancı

Beykent Üniversitesi, leventbostanci@beykent.edu.tr

Orcid: 0000-0002-4686-9102

1. Giriş

Yakın geçmişte yapılan çalışmalar, 2050 yılında dünya nüfusunun 9.7 milyara, içinde bulunduğumuz yüzyılın sonunda ise 11.2 milyar kişiye ulaşmasını öngörmektedir (Jannat vd., 2021). Global düzeydeki hızlı nüfus artışının beraberinde getirdiği barınma talebi de beton üretimine olan ihtiyacı global düzeyde her geçen gün arttırmaktadır (Ameri vd., 2020). Diğer alternatif malzemelere kıyasla düşük maliyeti, düşük enerji gereksinimi, kolayca şekil verilebilmesi ve yüksek dayanıklılığı gibi faktörler betonu ve diğer çimento esaslı malzemeleri en yaygın kullanılan yapı malzemesi konumuna getirmektedir (Li vd., 2021a). Çimento esaslı malzemelerin omurgasını oluşturan Portland çimentosu ise çevresel açıdan sürdürülebilirliği olmayan malzemeler arasında en başlarda olup her 1 ton çimento üretimi esnasında 1.35 ton CO₂ ve tehlikeli gaz salınımı gerçekleşmektedir (Moghaddam vd., 2021). Bu sebeple çimento yerine endüstriyel atık türü bağlayıcı malzemelerin kullanıldığı yeşil malzemelere olan talep her geçen gün artmaktadır (Zhong vd., 2019).

Bağlayıcı malzeme içeriğinde kısmı oranda çimento ile yer değiştirmek suretiyle puzolanik özellik gösteren malzemelerin dahil edildiği yeşil hibrit

harçlar, sürdürülebilir bir ekosistem için giderek popüler hale gelmektedir (Bostanci ve Sola, 2018; Bostanci, 2020). Bu tür hibrit harçlarda ferrosilikon üretiminden elde edilen silis dumanı, demir endüstrisinden elde edilen yüksek fırın cürufu veya termik santrallerden elde edilen uçucu kül bağlayıcı malzeme içerisinde çimento yerine kullanılmak suretiyle çimento üretimine olan ihtiyacı azaltabilmektedir (Li vd., 2021b). Mineral esaslı yan ürünlerin karışımlara dahil edilmesi, her ne kadar saf çimento durumuna kıyasla numunelerde daha düşük dayanım değerlerine sebep olsa da bu durum tamamıyla yan ürünlerin göreceli olarak daha yavaş puzolanik/hidrolik reaksiyon hızları ile alakalı olup son derece olağandır (Guo vd., 2020).

Hızlı nüfus artışı ile orantılı olarak artış gösteren bir diğer parametre de kullanım ömrünü tamamlamış atık lastiklerdir (Thakare vd., 2020). Dünyada her yıl yaklaşık olarak 1.5 milyar lastiğin kullanım ömrünü tamamlayıp atık konumuna geldiği bilinmektedir (Letelier vd., 2021). 2030 yılı itibari ile ise bu rakamın 5 milyar düzeyine ulaşacağı ön görülmektedir (Saloni vd., 2021). Ciddi düzeydeki atık lastik tüketimine rağmen atık lastiklerin sürdürülebilir ekonomide geri dönüşüm düzeyinin yalnızca %19 düzeyinde olduğuna dair çalışmalar mevcuttur (Feng vd., 2021). Öte yandan; atık lastiklerin doğada depolandıklarında geniş depolanma alanlarına ihtiyaç duyulması, doğal yöntemlerle kendiliğinden bozulmamaları, sivrisinek ve zararlı diğer mikroorganizmalar için üreme ortamı yaratmaları, stiren gibi insan sağlığına zararlı bileşenler içermeleri ve yakıldıklarında zehirli gaz emisyonları aracılığı ile hava kirliliğine neden olmaları gibi faktörlerden ötürü depo edilmeleri de ayrıyeten ekosistem için ciddi bir problem teşkil etmektedirler (Xu vd., 2021). Ekosistemin sürdürülebilirliği açısından atık lastiklerin geleneksel yöntemlere kıyasla çevre odaklı politikalar ile güvenli bir şekilde ekonomik döngüye dahil edilerek başta inşaat sektörü olmak üzere endüstriyel alanlarda yeniden kullanım alanı bulması önem arz etmektedir (Thakare vd., 2022).

Hammadde olarak polimer kökenli olan atık lastikler, diğer sektörlerde kıyasla inşaat endüstrisinde yeniden kullanılabilmek için önemli bir potansiyel teşkil etmektedir (Jin vd., 2022). Beton içerisinde doğal agreganın yerini alabilecek şekilde kullanılabilen atık lastik partikülleri, nehir ve dağların agrega temini araçlı tahribatlarını engelleyerek kısıtlı potansiyeldeki doğal kaynakların kullanımının sınırlandırılmasına olanak sağlamaktadır (Assaggaf vd., 2022). Lastik partikülleri çimento esaslı karışımlara ilave edildiklerinde karışıma giren bileşenlerde herhangi bir kimyasal değişime sebep olmadan sadece matrisin fiziksel iç yapısında meydana gelen modifikasyon ile numunelerin aşınmaya karşı dayanıklılık, karbonotlaşma, büzülme, donma ve çözülme dayanıklılığı ve klorür iyonlarına karşı direnci gibi üzere pek çok durabilite özelliğini geliştirebilmektedir (Liang vd., 2020). Polimer ilavesiyle daha kompozit bir forma bürünen çimento esaslı malzeme, başta çekme

dayanımı ve kırılma mekanizması olmak üzere kısmi olarak iyileştirilmiş bir mekanik performans da gösterebilmektedir (Jiang vd., 2021). Lastik partikülleri çimento matrisi ile sadece mekanik bir etkileşime girmekte ve hidrasyon sürecine dahil olmamaktadırlar (Wang vd., 2020). Bu sebeple, atık lastik içeren çimento esaslı numunelerde gerek basınç gerekse eğilme etkisi altında kontrol durumuna kıyasla daha düşük dayanım değerleri tespit edilebilmekte ancak numunelerde şekil değişimleri açısından lastik içeriği ile orantılı olarak daha yüksek süneklik, enerji yutma kapasitesi değerleri ve deformasyon kapasitelerinde gelişim tespit edilebilmektedir (Fantilli ve Chiaia, 2018). Dayanım değerlerindeki düşüş karışımlara ilave edilen lastik partiküllerinin çimento matrisi ile olan zayıf kenetlenmesi ile alakalı olup karışımlara ilaveten giren %1 seviyesindeki atık lastik içeriği basınç dayanımlarında genel olarak %4.5 düzeyinde düşüslere neden olabilmektedir (Si vd., 2017).

Atık lastik partiküllerinin karışımlara ilavesini inceleyen pek çok deneysel çalışmada yukarıda bahsedilen benzer dayanım düşüslerinin altını çizmektedir. He vd. (2021), çimento esaslı karışımlara hacimce ilave edilen %10 seviyesindeki lastik tozunun basınç dayanımında %14.2 seviyesinde düşüşe yol açtığını saptadılar. Benzer şekilde çimento katkı maddesi olarak ağırlıkça %5 oranında lastik partikülleri içeren numunelerin basınç dayanımlarındaki düşüş %53.5 seviyesine çıkabilmektedir (Bostanci vd., 2020). Nehir agregası yerine tamamıyla lastik partiküllerinin kullanıldığı karışımlarda ise basınç dayanımlarındaki düşüş %93 seviyesine ulaşmaktadır (Wongsa vd., 2018). Bu seviyedeki düşüslere genellikle sebep olarak gösterilen zayıf kenetlenme hali, lastik partiküllerinin güçlü hidrofobik özellikleri, düşük işlenebilirlikleri ve hapsolmuş hava miktarını arttırıcı eğilimleri neticesinde ortaya çıkmaktadır (Assaggaf vd., 2022b). Esasen, lastik partiküllerin ilavesi ile kalsiyum-silikat yapısının iç gözeneklilik düzeyi artmakta ve artan boşluk miktarı dayanım düşüşünü beraberinde getirmektedir (Jinshuai vd., 2021). Kullanılan lastik partiküllerinin şekli, boyutu, miktarı, karışımlara dahil edilme yöntemi, karışıma dahil edilmeden önce herhangi bir iyileştirme işlemine tabi tutulup tutulmamaları gibi faktörler ortaya çıkacak performansı etkilemekle birlikte %20 düzeyine kadar dahil edilme durumlarında önemli ölçüde dayanım düşüslerinin saptanacağı bilinmektedir (Liu vd., 2021). Dayanım değerlerindeki ciddi düşüslere rağmen lastik partikülleri içeren çimento esaslı malzemeleri popüler hale getiren faktörlerden belki de en değerlisi lastik ilavesinin malzemenin ısı yalıtım özelliklerine olan katkısıdır. Ağırlıkça %18 düzeyinde lastik partikülleri içeren numunelerin yalıtımlık özellikleri %34.3 düzeyinde gelişebilmektedir (Bostanci vd., 2020). Tamamıyla agrega olarak lastik partikülleri bulunması durumunda ise ısı

yalıtkanlık performansı %79 seviyesinde gelişebilmektedir (Wongsa vd., 2018).

Literatür araştırması tartışılmaz bir şekilde göstermektedir ki kalsiyum-silikat esaslı malzemelere ilave edilen lastik içeriği, malzeme dayanımlarında düşüslere sebep olsa da süneklik, tokluk gibi diğer mekanik özelliklere ve bilhassa ıslal yalıtım özelliklerine olan pozitif katkıları nedeniyle sürdürülebilir harç tasarımımda kullanımı giderek artmaktadır. Bu sebeple; bu çalışmada atık lastik katkısı içeren harç numunelerinin iç yapı özellikleri detaylı olarak araştırılarak üstün yalıtım ve artan şekil değişimi kapasitesi gibi çıktıların elde edilmiş mekanizmaları araştırılmaktadır.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1 *Kullanılan malzemeler ve karışım oranları*

Üretilen harç numunelerinde kullanılan temel malzemeler aşağıdaki gibidir:

- Bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 tipi Portland çimentosu ve uçucu kül.
- Karma suyu olarak şebeke suyu.
- TS EN 196-1 (2016) standardı esaslarına uygun olarak hazırlanan paketlenmiş haldeki Rilem kumu.
- 0-0.6 mm ve 0-1.0 mm partikül aralığındaki atık lastik partikülleri.

Toplamda 7 farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Karışımların tamamında bağlayıcı malzeme içeriğinde çimento ve uçucu külden oluşan karma hibrit bağlayıcı kullanılarak sürdürülebilir bağlayıcı malzeme tasarımı üzerine çalışılmıştır. Karışımlar, başlangıçta kuru haldeki karışım partiküllerinin bir araya gelmesini öngören ve daha sonra karma suyunun azar azar ilavesine odaklanan iki aşamalı bir süreç neticesinde hazırlanmıştır. Bu amaçla çimento, uçucu kül, Rilem kumu ve atık lastik partiküllerini içeren kuru nem durumundaki katı bileşenler bir araya getirilerek harmanlanmıştır. Daha sonra ise kademeli olarak musluk suyu kuru karışımlara ilave edilmiştir. Tüm karışımlar için 1:1 (ağırlıkça) çimento ve uçucu kül bağlayıcı bileşimi kullanılmıştır. Su/ bağlayıcı oranı tüm karışımlarda 0.5 iken hibrit bağlayıcı/kum oranı 1:3 olacak şekilde karışım numuneleri tasarlanmıştır. Karışımlara, hibrit bağlayıcı malzeme ağırlığınca iki farklı partikül aralığında (0-0.6 mm ve 0-1.0 mm) ve dört farklı katkı oranında (%0, %1.0, %2.0 ve %3.0) atık lastik partiküllerinin dahil edilmesi durumu üzerine deneysel olarak çalışılmıştır. Harç karışım oranları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Karışım Oranları

Numune	CEM 42.5 R (g)	UK (g)	İL (g)	KL (g)	Su (ml)	Kum (g)
UK-0	225	225	-	-	225	1350
UK-İL1			4.5	-		
UK-KL1			-	4.5		
UK-İL2			9	-		
UK-KL2			-	9		
UK-İL3			13.5	-		
UK-KL3			-	13.5		

Numune etiketlerinin tasarımında;

- UK: uçucu kül harcını,
- İL: numunenin ince (0-0.6 mm) lastik partikülleri içerdiğini,
- KL: numunenin kalın (0-1.0 mm) lastik partikülleri içerdiğini,
- İL/KL etiketinden sonra gelen (1/2/3) rakamları ise karışımlardaki ağırlıkça atık lastik katkı oranlarını temsil etmektedir.

Bu sebeple bulguların tartışılması esnasında UK-0 kontrol harcı, (UK-İL1, UK-İL2 ve UK-İL3) numuneleri ince lastik katkı içeriğinde hazırlanmış ve (UK-KL1, UK-KL2 ve UK-KL3) numuneleri kalın lastik katkı içeriğinde hazırlanmış numuneler olarak nitelendirilecektir.

2.2. Numune hazırlanması, kür koşulları ve uygulanan testler

Yukarıda belirtilen karışım oranlarında elde edilen taze harç karışımları, 40x40x160 ölçülerinde (mm) çelik kalıplara dökülmüştür. Her karışım için toplamda üç prizmatik numune üretilmiştir. Numunelerin sıkıştırılması, mekanik bir titreşim işlemi neticesinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 24 saat boyunca kalıpta bekletilmiş ve ertesi gün kalıptan çıkarılarak $21 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %65 bağıl nem içeren iklimlendirme koşullarında 28 gün boyunca kür işlemine tabi tutulmuştur.

Numuneler, iç yapı özelliklerinin tespiti amacıyla cıva porozimetresi deneyine tabi tutulmuştur. Deney, Micromeritics marka Autopore IV 9510 model porozimetre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında cıva-harç numunesi temas açısı 130° olarak alınmış ve 3-360.000 nm aralığındaki gözenek çapları 413,6 MPa'ya kadar varan bir maksimum basınçla ölçülmüştür. Deney ile harç numunelerine ait toplam porozite, ortalama por çapları, kümülatif por hacminin por çapları için dağılımı, kümülatif por alanının por çapları için dağılımı, iki ve üç boyutlu por boyutlarına bağlı olarak por içeriklerinin dağılımı gibi por yapısı özelliklerini ortaya koyan bulgular elde edilebilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Porozimetre analizi

Cıva porozimetresi testinden elde edilen analiz sonuçları Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Porozimetre Test Sonuçları

Numune	Toplam por alanı (m^2/g)	Hacimsel medyan por çapı (nm)	Alansal medyan por çapı (nm)	Ortalama por çapı (nm)	Toplam porozite (%)
UK-0	10.48	206.3	5.3	37	19.39
UK-İL1	9.53	216.2	6.4	39.2	18.66
UK-KL1	6.29	221.9	14.5	55.1	17.61
UK-İL2	6.33	314.8	14.3	60	19.19
UK-KL2	7.51	212.5	8.4	49.5	18.47
UK-İL3	9.52	215.9	6	39.3	18.48
UK-KL3	9.38	241.5	5.1	40.4	18.79

Kontrol numunesi UK-0'da %19.39 düzeyinde toplam porozite değeri saptanmıştır. Atık lastik katkılı numunelerde ölçülen toplam porozite değerleri incelendiğinde, karışımlara hibrit bağlayıcı malzeme ağırlığınca ilave edilen atık lastik partikül içeriklerinin tüm katkı oranları ve partikül aralıkları için numunelerin toplam porozite değerlerinde porozite düşürücü bir etkiye sebep oldukları görülmektedir. Porozite düşüşünün; %1.0 ve %2.0 atık lastik katkı oranları için kalın lastik katkılı numunelerde, %3.0 atık lastik katkı oranı için ise ince lastik ilavesinde keskinleştiği göze çarpmaktadır. Bu durumda lastik ilavesi kaynaklı porozite düşüşünün ince partikül aralığı için daha çok yüksek, kalın partikül aralığı için düşük katkı oranlarında baskın olduğu söylenebilir.

Öte yandan; numunelerde toplam porozite değerleri ile uyumlu olarak atık lastik içeriği ile numunelerin por yapılarında daha düşük toplam por alanlarının ölçüldüğü görülmektedir. Kontrol numunesinde 10.48 m²/g seviyesinde ölçülen toplam por alanı UK-İL1, UK-KL1, UK-İL2, UK-KL2, UK-İL3, UK-KL3 numunelerinde sırasıyla %9.06, %39.98, %39.59, %28.33, %9.16 ve %10.49 seviyelerinde azalmaktadır. Maksimum düzeydeki düşüşler ince lastik katkılı numunelerde %2.0 katkı oranında, kalın lastik katkılı numunelerde %1.0 katkı oranında benzer seviyelerde gerçekleşmektedir. Bu sebeple toplam por alanı değişimi açısından %1.0 kalın lastik katkı oranında gözlemlenen etkinin ince lastik katkı oranında ancak %2.0 katkı oranında ölçüldüğü söylenebilir. %3.0 seviyesine gelen atık lastik içeriğinde gerek ince gerekse kalın aralıktaki lastik ilavelerinde por alanı azalışındaki gerilemenin ciddi oranda azaldığı görülmektedir. Genel olarak, toplam por alanı değerlerinin tüm lastik içeriklerinde azalıyor oluşu oldukça önemlidir. Toplam porozite ve por alanlarındaki değişimler, bağlayıcı malzeme ağırlığınca karışımlara ilave edilen atık lastik içeriğinin hibrit uçucu kül harçlarında özellikle %1.0 ve %2.0 katkı oranları için gözenek doldurucu bir etkiye neden olduğunu göstermektedir.

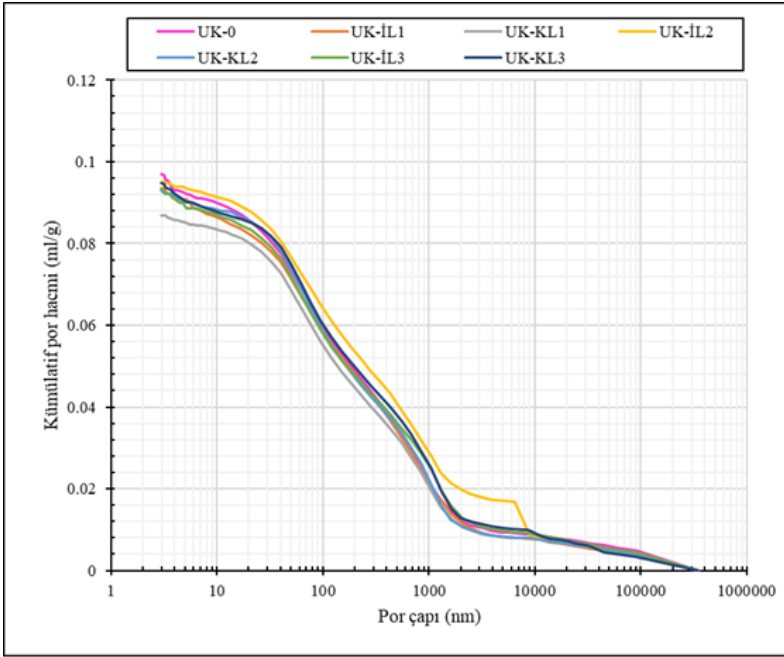
Porozimetre analizi neticesinde ölçülen ortalama çap değerleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde ise yukarıda lastik partiküllerinin gözenek doldurucu işleviyle açıklanan etki daha net olarak anlaşılmaktadır. İstisnasız %1.0 ve %2.0 atık lastik katkı oranı içeren tüm numunelerde kontrol durumuna kıyasla daha yüksek seviyede ortalama por çapları ölçülmüştür. Kontrol durumuna kıyasla tüm katkı oranları için hacimsel medyan por çaplarındaki artışlar minimum %3.0 (UK-KL2), ortalama por çaplarındaki artışlar minimum %5.94 (UK-İL1) seviyesinde iken hacimsel medyan por çaplarındaki artışlar %52.59'a (UK-İL2), alansal medyan por çaplarındaki artışlar %173.58'e (UK-KL1) ve ortalama por çaplarındaki artışlar %62.16'a (UK-İL2) kadar varmaktadır. Hatta UK-KL3 numunesinin alansal medyan por çapında kontrol durumuna kıyasla saptanan %3.77'lik düşüş göz ardı edilirse tüm lastik katkı

oranları ve partikül aralıkları için atık lastik ilavesinin por çaplarını kesin olarak genişlettiği söylenebilir.

Porozimetre sonuçları genel anlamda değerlendirildiğinde elde edilen tablo şu gerçeği göstermektedir ki bağlayıcı malzeme ağırlığınca karışımlara ilave edilen atık lastik içeriği, hibrit uçucu kül harçlarında bir gözenek modifikasyonuna yol açmaktadır. Bu modifikasyon toplam porozite ve por alanlarında düşüştü; ortalama por çaplarında ise artışı beraberinde getirmektedir. Bu noktada; ortaya çıkan gözenek modifikasyonu, atık lastik içeriğinin bir gözenek doldurucu etkiye sebep olduğunu işaret etmektedir. Durumun net olarak anlaşılması için detaylı bir por yapısı analizinin gerektiği açıktır.

3.2. Kümülatif por hacmi – por çapı ilişkileri

Şekil 1’de atık lastik katkılı uçucu kül harç numuneleri için elde edilen ve kümülatif por hacmi – por çapı ilişkilerini gösteren etkileşim görülmektedir.



Şekil 1. Atık Lastik Katkılı Uçucu Kül Harç Numuneleri İçin ve Kümülatif Por Hacmi – Por Çapı İlişkileri

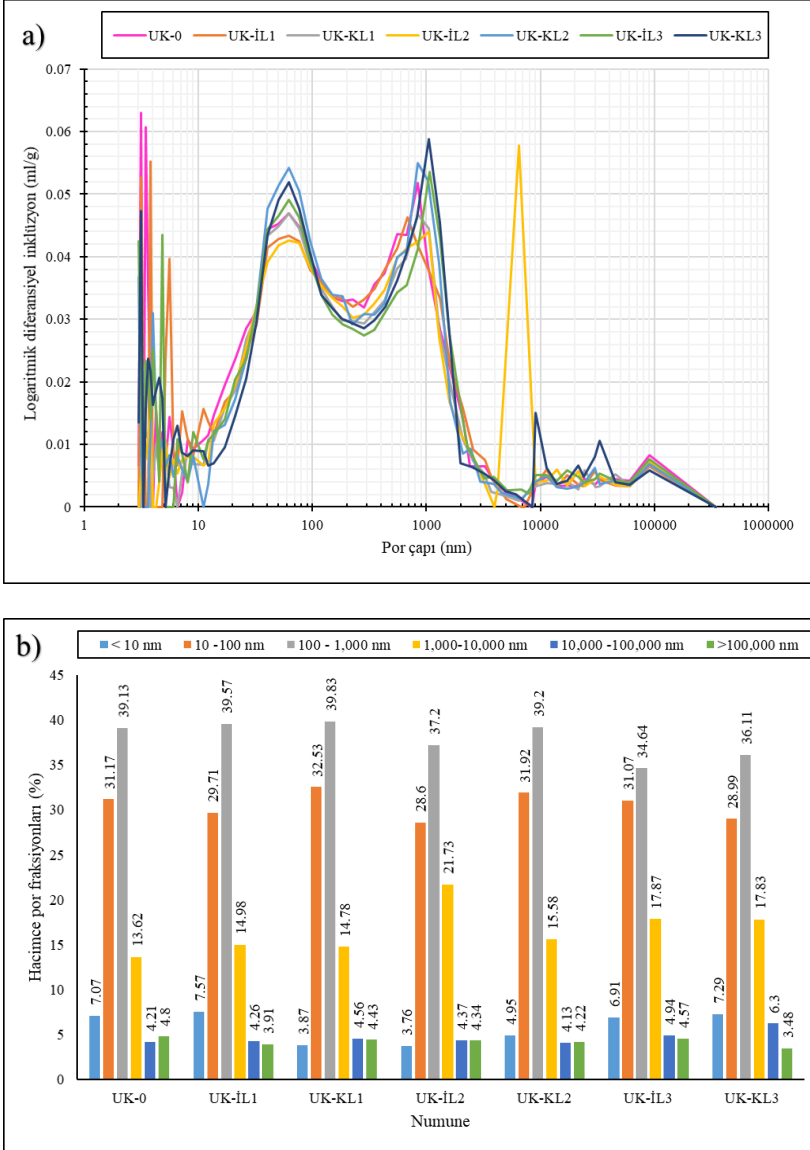
Por hacminin 3-360,000 nm aralığındaki por çapları için dağılımını ifade eden kümülatif por hacmi – por çapı ilişkileri incelendiğinde 3 nm seviyesi için en yüksek porozite değerine sahip olan kontrol numunesi için numunenin porozite

değeri ile uyumlu olarak numuneyi temsil eden eğrinin grafiğinin en üst noktasından başladığı görülmektedir. UK-0 numunesine en yakın toplam porozite değerinin tespit edildiği UK-İL2 numunesi için de numuneyi temsil eden eğri, kontrol numunesini temsil eden eğrinin hemen bir miktar altındaki bir seviyeden başlamaktadır. Genel olarak UK-0 numunesi için numuneyi temsil eden eğri, grafiğinin üst bölgesinde ilerlemekte olup özellikle 100 nm ile 10,000 nm aralığındaki kapiler çaplar hariç makro düzeydeki 10,000 nm ve üzeri por çaplarında da grafiğinin üst bölgesinde seyretmektedir. Bu noktada atık lastik ilavesinin harç numunelerindeki jel, kapiler ve makro gözenek oluşumları açısından katkı oranı ile orantılı olarak kısmi oranda değişiklikleri tetiklediği söylenebilir. Bu durum; UK-0 numunesini temsil eden eğrinin jel, kapiler ve makro boşluklara denk gelen por çapı aralıkları için sırasıyla grafiğinin üst – alt– üst bölgelerinde seyretmesi durumu göz önüne alındığında diğer numuneler için lastik içeriği nedeniyle numunelerin gözenek yapısında kapiler boşluk oluşumu esaslı por modifikasyonlarının yaşandığını işaret etmektedir.

İnce lastik katkılı numunelerde; hacimsel medyan por çapları, alansal medyan por çapları ve ortalama por çapları açısından en belirgin etkinin UK-İL2 numunesi için %2.0 katkı oranında ölçüldüğü daha önceden tartışılmıştı. Bu noktada; bu numunede %62.16 seviyesinde ölçülmüş olan ortalama por çapı artışının 4.0 nm ile 10,000 nm arasındaki por çapı dağılımından kaynaklandığı görülmektedir. 100 nm seviyesinden sonra değişen por çap dağılım seyri, 100 nm ile 360,000 nm aralığındaki kısmi yükselme neticesinde UK-İL1 ve UK-İL3 numunelerinde de sırasıyla %5.94 ve %6.21 gibi kısmi oranlarda genişlemelere sebep olmaktadır. UK-İL1 ve UK-İL3 numunelerinde özellikle 1,000 ile 10,000 nm arasında bir gözenek genişlemesi meydana geldiği görülmektedir. Kalın lastik katkılı numunelerde ise yine 3 nm ile 21 nm aralıklarında kontrol numunesi için grafiğinin üst bölgesinde maksimum düzeyde seyreden por hacmi, 21 nm ile 10,000 nm aralığındaki por çaplarında tüm numunelerde oldukça yakınlaşmaktadır. 33,000 nm ile 360,000 nm aralığında ise kontrol numunesini temsil eden eğrinin tekrar bir grafiğinin üst bölgesinde seyredişi söz konusudur. Rölatif olarak gözlemlenen davranış, logaritmik diferansiyel eğriler aracılığı ile daha net bir şekilde yorumlanabilir.

3.3. Logaritmik diferansiyel giriş eğrileri – por çapı ilişkileri

Şekil 2’de atık lastik katkılu uçucu kül harç numuneleri için logaritmik diferansiyel giriş eğrileri – por çapı ilişkileri ve numunelerdeki por hacmi kökenli por içeriklerinin dağılımları görülmektedir.



Şekil 2. Harç Numunelerinde Logaritmik Diferansiyel Giriş Eğrileri – Por Çapı İlişkileri ve Por Hacmi İçerikleri

Harç numunelerinde por yapısı ölçümlerinin gerçekleştirildiği en küçük por çapı aralığı olan 3 ile 10 nm arasındaki por çapları için duruma bakıldığında, kontrol numunesinde baskın bir eğrisel tepelenmenin söz konusu olduğu ve UK – İL1 numunesinde gözlemlenen davranışın da kontrol numunesi ile benzer şekilde seyrettiği görülmektedir. Bahsedilen durum, por fraksiyonları için sayısallaştırıldığında ise kontrol numunesinde 3 ile 10 nm arasındaki por çap oluşumlarını temsil eden jel por oluşumu %7.07 seviyesinde iken aynı aralıkta %1.0 düzeyinde ince atık lastik katkılı UK-L1 numunesinde de %7.57 düzeyinde jel gözenek ölçülmüştür. Diğer ince lastik katkılı numuneler için artan ince lastik içeriği ile daha düşük düzeyde jel gözenek oluşumları da saptanabilmektedir. Kalın lastik partikülleri içeren numunelerde ise %3.0 atık lastik içerikli UK- KL3 numunesindeki jel gözenek oluşumu kontrol numunesine yakın iken daha düşük katkı oranlarında daha düşük jel gözenek oluşumları görülmektedir.

10 – 100 nm arasındaki küçük kapiler boşluklar üzerinden por yapısı incelendiğinde, yaklaşık 30 nm civarı numune eğrilerinin kesiştiği görülmekte ve numunelerde 30 nm – 100 nm arasındaki por içerikleri dağılımının numunelerdeki küçük kapiler boşluk oluşumları açısından belirleyici olduğu görülmektedir. 30 – 100 nm’lik por çapı aralığında özellikle kalın lastik partikülleri içeren numunelerde yukarı yönlü bir eğrisel tepelenme meydana gelmiş ve gözenekler genişlemiştir. Bu noktadan yola çıkarak durum sayısallaştırıldığında, tüm ince lastik partikülleri içeren numunelerde 10-100 nm aralığı için kontrol durumunun altında gözenek oluşumları ölçülürken kalın lastik içeriğinin etkisiyle UK-KL1 ve UK-KL2 numunelerinde kontrol durumuna kıyasla kısmi olarak daha yüksek düzeyde gözenek oluşumları ölçülebilmektedir. 100 nm ile 1000 nm arasındaki kapiler por çaplarında ise yüksek katkı oranları için inklüzyon eğrilerinde aşağı yönlü bir basıklaşma dikkat çekmektedir. Bu durum sayısallaştırıldığında ise, %3.0 katkı oranında atık lastik içeren UK-İL3 ve UK-KL3 numunelerinde lastik partiküllerinin tane dağılım aralığından bağımsız olarak numunelerde daha düşük seviyede kapiler por oluşumlarının ölçüldüğü söylenebilir. Özellikle yine lastik partiküllerinin tane dağılım aralığından bağımsız olarak %1.0 atık lastik katkılı numunelerde, kontrol numunesine benzer düzeyde kapiler por oluşumlarından bahsedilebilir.

En geniş kapiler por çaplar olarak nitelendirilebilecek 1,000 nm ile 10,000 nm arasındaki por çapları için numunelerdeki por yapısı oluşumları bu aralık için inklüzyon eğrilerinden incelendiğinde özellikle 4,000 – 10,000 nm arasındaki por çaplarında kontrol numunesinde taban yapma durumu görülmektedir. Bu sebeple 1,000- 10,000 nm aralığındaki por çapları için en düşük düzeyde por oluşumu %13.62 ile UK-0 numunesinde ölçülmüştür. Bu noktadan yola çıkarak tüm katkı oranları ve tane dağılım aralıkları için karışımlara ilave edilen atık lastik içeriğinin 1,000 nm ile 10,000 nm

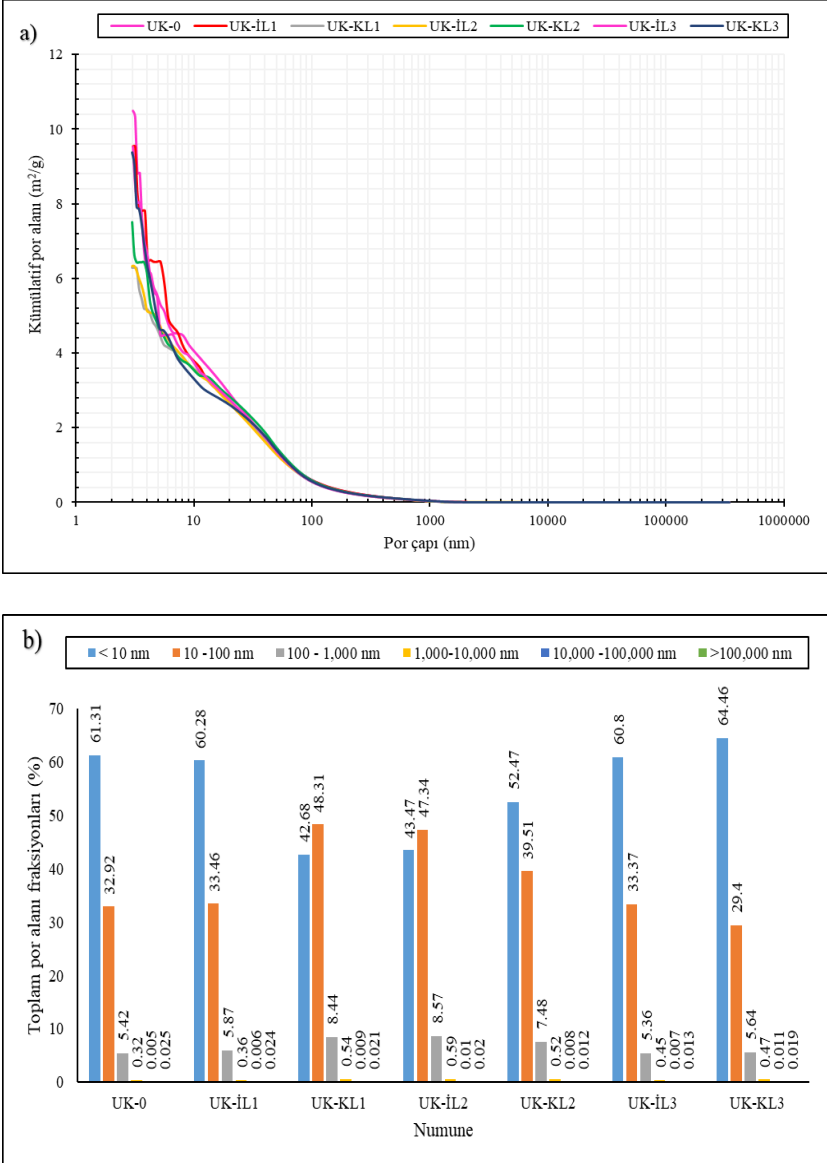
arasındaki por oluşumlarını arttırdığı söylenebilir. Bu artış %1.0 atık lastik katkılı numunelerde sınırlı iken artan katkı oranı ile durum keskinleşmektedir.

Diferansiyel inklüzyon eğrileri, %3.0 katkı oranını temsilen maksimum düzeyde kullanılan atık lastik içeriğinin numunelerde 10,000-100,000 nm arasındaki por oluşumlarına karşılık gelen makro boşluk oluşumunu arttırdığını işaret etmektedir. Özellikle, daha büyük partiküllerden oluşan kalın lastik içeriğinde durum belirginleşmektedir. Durum sayısallaştırıldığında, kontrol numunesinde %4.21 olarak saptanan 10,000-100,000 nm arasındaki makro gözenek oluşumu, UK-İL3 ve UK-KL3 numunelerinde sırasıyla %4.94 ve %6.4 düzeylerinde saptanmıştır. Düşük atık lastik katkı oranları için ise lastik partiküllerinin tane dağılım aralığından bağımsız olarak kontrol numunesine yakın bir davranış görülmektedir.

100,000 nm ile 360,000 nm aralığındaki por çapları için diferansiyel inklüzyon eğrilerinde kontrol numunesi için bir tavan yapma durumu gözlemlenmektedir. Durum sayısallaştırıldığında kontrol numunesinde % 4.8 düzeyinde 100,000 nm ile 360,000 nm aralığındaki por çaplarına denk gelen por oluşumu ölçülmüştür. Inklüzyon eğrilerinden görüldüğü üzere, atık lastik içeriğinde hiçbir katkı oranı ve partikül dağılım aralığı için daha yüksek düzeyde gözenek oluşumu gözlemlenmemiştir. Bu noktada bağlayıcı malzeme ağırlığınca karışımlara ilave edilen atık lastik partiküllerinin 100,000 nm üzerindeki por oluşumlarını sınırladığı söylenebilir. Lastik partikülleri aracılığıyla oluşan gözenek modifikasyonu, en geniş makro boşluklar açısından bir boşluk doldurma şeklinde izlenmiştir.

3.4. Kümülatif por alanı – por çapı ilişkileri

Şekil 3'te atık lastik katkılu uçucu kül harç numuneleri için kümülatif por alanı– por çapı ilişkileri ve numunelerdeki por alanı kökenli por içeriklerinin dağılımları görülmektedir.



Şekil 3. Harç Numunelerinde Kümülatif Por Alanı – Por Çapı İlişkileri ve Por Alanı İçerikleri

Cıva porozimetresi analiz sonuçlarında belirtildiği üzere maksimum düzeyde toplam por alanının tespit edildiği UK-0 numunesi için numunenin temsil eğrisi, numunenin toplam $10.48\text{m}^2/\text{g}$ 'lik toplam por alanı ile uyumlu olarak grafiğin en üst seviyesinden başlamaktadır. Atık lastik partiküllerinin tane dağılım aralıklarından bağımsız olarak %3.0 lastik katkılı UK-İL3 ve UK-KL3 numuneleri için de benzer durum söz konusudur. %2.0 atık lastik katkılı numunelerde de tane dağılım aralıklarından bağımsız olarak kontrol durumuna kıyasla minimum yükseklik seviyesinde grafik başlangıcı görülmektedir. Kümülatif por alanı – por çapı ilişkileri belirli por fraksiyonları için detaylı olarak incelendiğinde, kontrol numunesine kıyasla daha düşük por alanı oluşumlarının ölçüldüğü UK-KL1, UK-İL2 ve UK-KL2 numunelerinde 3 ile 10 nm arasındaki por çapları için de numunelerin düşük toplam por alanları ile uyumlu olarak %10 ile %20 düzeylerinde daha küçük düzeyde por alanları ölçülmüştür. Bu noktada; %2.0 seviyesindeki atık lastik içeriğinin yine atık lastik partikül aralığından bağımsız olarak jel por düzeyindeki por alanı oluşumunu azalttığı söylenebilir. Sadece UK-KL3 numunesinde kontrol numunesine kıyasla daha fazla jel por çaplarında por alanı oluşumunun arttığı görülmektedir. UK-İL1 ve UK-İL3 numunelerindeki durum da kontrol durumuna benzer seviyededir.

Toplam por alanlarının ortaya çıkışında jel por düzeyindeki çaplardan sonra ikinci etkili çap aralığı olarak kabul edilebilecek 10-100 nm arasındaki por çapları için durum değerlendirildiğinde ise genel olarak tüm atık lastik katkı oranları ve tane dağılım aralıkları için karışımlara ilave edilen atık lastik içeriğinin kapiler düzeye denk gelen por çapları için numunelerdeki por alanı oluşumunu desteklediği söylenebilir. Bu sebeple kontrol durumuna kıyasla UK-İL1, UK-KL1, UK-İL2, UK-KL2 ve UK-İL3 numunelerinde 10-100 nm arasındaki por çapları için daha yüksek düzeyde por alanı oluşumları görülmektedir. Bu konuda tek istisna UK-KL2 olup kontrol durumuna göre bir miktar daha az düzeyde kapiler por çap aralığına denk gelen por alanı oluşumu saptanmaktadır. Bu noktada şu yargıya varılabilir: Karışımlara bağlayıcı malzeme ağırlığınca ilave edilen atık lastik içeriği, ince lastik partikül aralığı olarak belirtilen tane dağılım aralığında tüm katkı oranları için 10-100 nm aralığındaki por çaplarının oluşturduğu por alanlarını arttırırken kalın lastik partikül aralığı olarak belirtilen tane dağılım aralığı için %1.0 ve %2.0 katkı oranlarında por alanı arttırıcı etki yaratmaktadır.

Por alanlarının ölçülmesi esnasında göze çarpan bir diğer etki de karışımlara %1.0 ve %2.0 katkı oranlarında ilave edilen atık lastik içeriğinin numunelerde daima 100 -1000 nm aralığındaki por çaplarına denk gelen por alanlarını arttırıcı etkisidir. Bu etki özellikle lastik partikül aralığından bağımsız olarak %2.0 atık lastik katkı oranında ortaya çıkmaktadır. %3.0 katkı oranı için ise UK-İL3 ve UK-KL3 numunelerinde kontrol durumuna benzer

por alanları ölçülmüştür. Kümülatif por alanlarının oluşumunda genel bir benzerlik ve ayırt edici durum tespitleri için detaylı olarak por alanı dağılımları incelendiğinde ise yukarıdakine benzer bir durum söz konusu olmaktadır. %3.0 katkılı numuneler, tüm por aralıkları için kontrol durumuna en çok benzeyen por alanı dağılımı durumlarını göstermektedirler. Kontrol durumuna kıyasla ayırt edici por alanı dağılımları, UK-KL1 ve UK-İL2 numuneleri için göze çarpmaktadır. Bu açıdan da ince lastik partikül aralığında %2.0 katkı oranında ortaya çıkan farklılığın kalın lastik partikül aralığı için %1.0 katkı oranında ortaya çıkabilmesi dikkat çekicidir.

UK-İL3 ve UK-KL3 numuneleri ile UK-0 numunesi arasında gözlemlenen benzer por alanı dağılımı ölçümü, esasen numunelerde ölçülen alansal medyan por çapları değerlerine de yansımaktadır. Bu benzer dağılım sayesinde kontrol numunesinde 5.3 nm olarak ölçülen alansal medyan por çapı, UK-İL3 ve UK-KL3 numunelerinde sırasıyla 6.0 nm ve 5.1 nm olarak saptanmıştır. Yine yukarıda bahsedildiği üzere kontrol durumuna kıyasla ayırt edici por alanı dağılımlarının tespit edildiği UK-KL1 ve UK-İL2 numunelerinde de sırasıyla 14.3 nm ve 14.5 nm olarak ölçülen alansal medyan por çapı tespitleri bu durumu doğrulamaktadır. Daha net bir ifade ile bu ayırt edicilik gözlemi, kontrol durumuna kıyasla yaklaşık %170 düzeyinde bir por alanı genişlemesini ifade etmektedir.

UK-0, UK-İL3 ve UK-KL3 numunelerinde oldukça düşük düzeyde ölçülen alansal medyan por çapı değerlerinin ortaya çıkışında bu numunelerde %60 seviyesinin üzerinde ölçülen 3-10 nm'lik por çapları seviyesindeki por alanlarının baskın etkisi belirleyici bir rol oynamaktadır. Öte yandan; aynı seviyedeki por alanı oluşumu, maksimum alansal medyan por çapı değerlerinin tespit edildiği UK-KL1 ve UK-İL2 numunelerinde %40 düzeyine gerilemektedir. Bu gerilemenin bir diğer okunuşu da aslında bu numunelerdeki küçük ve orta seviyedeki kapiler çaplara denk gelen por alanı artışının fark edilmesi olacaktır. UK-KL1 ve UK-İL2 numunelerinde kontrol durumuna kıyasla yaklaşık 3 kat genişleyen alansal medyan por çapı değerlerinin tespitinde, numunelerde ölçülen 10-100 nm ve 100 -1000 nm aralığındaki çaplara denk gelen por alanlarının artmış olması baskın rol oynamaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme bünyesinde %50 oranında çimentodan vazgeçilip yerine uçucu külün ikame edildiği hibrit uçucu kül karışımlarına bağlayıcı malzeme ağırlığınca %0, %1.0, %2.0 ve %3.0 katkı oranlarında ve iki farklı partikül dağılım aralığında (0-0.6 mm ve 0-1.0 mm) dahil edilen atık lastik partiküllerinin harç por yapısına olan etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Atık lastik katkı oranı ve lastik partikül dağılım aralığından bağımsız olarak karışımlara ilave edilen atık lastik partikülleri numunelerde genel olarak toplam porozite ve ortalama por çapı artışlarına sebep olmaktadır.
- Toplam porozite ve por çaplarındaki artışlara rağmen istisnasız atık lastik partikülü içeren tün numunelerin toplam por alanları azalmaktadır.
- 0-0.6 mm partikül tane dağılım aralığına sahip atık lastik içeriği toplam por alanlarında %39.19'a varan düşüslere yol açarken hacimsel medyan por çaplarını %52.59, alansal medyan por çaplarını %169.81, ortalama por çaplarını %62.16 düzeylerinde arttırabilmektedir.
- 0-1.0 mm partikül tane dağılım aralığına sahip atık lastik içeriği toplam por alanlarında %39.98'e varan düşüslere yol açarken hacimsel medyan por çaplarını %17.06, alansal medyan por çaplarını %173.58, ortalama por çaplarını %48.91 düzeylerinde arttırabilmektedir.
- Artan toplam porozite ve ortalama por çaplarına karşın azalan por alanları atık lastik partiküllerinin harç por yapısında özgün bir por modifikasyonuna yol açtığını göstermektedir. Bu por modifikasyonu atık lastik partikülleri aracılığıyla daha geniş çaplarda ancak toplamda daha az sayıda gözenek oluşumunu işaret etmektedir.
- Atık lastik içeriğinde saptanan por modifikasyonu, atık lastik içeriğinin %1.0 ve %2.0 katkı oranlarında şiddetli iken %3.0 katkı oranı için modifikasyon etkisi zayıflayarak katkısız kontrol duruma yakın bir por yapısı elde edilmektedir.
- Por yapısı modifikasyonu en yoğun olarak 0-1.0 mm partikül tane dağılım aralığına sahip atık lastik içeriğinin %1.0 katkı oranında ve 0-0.6 mm partikül tane dağılım aralığına sahip atık lastik içeriğinin %2.0 katkı oranlarında benzer düzeylerde gözlemlenmektedir. Bu açıdan kalın atık lastik partiküllerinin %1.0 ilavesi durumu ile ince lastik partiküllerinin %2.0 ilavesi por yapısı açısından neredeyse eşitlenmektedir.
- Atık lastik partiküllerinin ilavesi hiçbir durumda 100,000 nm ve üzerindeki makro düzeydeki por çaplarında gözenek oluşumunu arttırmamaktadır, aksine azaltmaktadır.
- Atık lastik içerikli numunelerde azalan jel gözenek oluşumu ve artan 1,000-10,000 nm çap aralığındaki orta düzey kapiler por oluşumu, ölçülen por modifikasyonunun temelini oluşturmaktadır.

Kaynakça

- Ameri, F., Shoaee, P., Musaei, H. R., Zareei, S. A. ve Ban, C. C. (2020). Partial replacement of copper slag with treated crumb rubber aggregates

- in alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, 256, Article 119468.
- Assaggaf, R.A., Maslehuddin, M., Al-Dulaijan, S. U., Al-Osta, M.A., Ali, M. R. ve Shameem, M. (2022a). Cost-effective treatment of crumb rubber to improve the properties of crumb-rubber concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, Article 00881.
- Assaggaf, R. A., Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., Al-Amoudi, O. S. B., Ahmad, S. ve Ibrahim, M. (2022b). Effect of different treatments of crumb rubber on the durability characteristics of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 318, Article 126030.
- Bostanci, L. ve Sola, O. C. (2018). Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Aerogel-Incorporated Alkali-Activated Slag Mortars, *Advances in Civil Engineering*, 2018, Article 4156248.
- Bostanci, L. (2020). Effect of waste glass powder addition on properties of alkali-activated silica fume mortars. *Journal of Building Engineering*, 29, Article 101154.
- Bostanci, L., Ustundag, O., Sola, O.C. ve Uysal, M. (2020). Effect of curing methods and scrap tyre addition on properties of mortars. *Građevinar*, 72, 311-322.
- Fantilli, A.P. ve Chiaia, B. (2018). Mechanical performances of mortar prisms and concrete slabs incorporating rubber aggregates. *Mechanics Research Communications*, 92, 118–123.
- Feng, W., Liu, F., Yang, F., Jing, L., Li, L., Li, H. ve Chen, L. (2021). Compressive behaviour and fragment size distribution model for failure mode prediction of rubber concrete under impact loads. *Construction and Building Materials*, 273, Article 121767.
- Guo, Z., Jiang, T., Zhang, J., Kong, X., Chen, C. ve Lehman, D. E. (2020). Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume. *Construction and Building Materials*, 231, Article 117115.
- He, L., Cai, H., Huang, Y., Ma, Y., Den Bergh, W. V., Gaspar, L., Valentin, J., Vasiliev, Y. E., Kowalski, K. J. ve Zhang, J. (2021). Research on the properties of rubber concrete containing surface-modified rubber powders. *Journal of Building Engineering*, 35, Article 101991.
- Jannat, N., Al-Mufti, R. L., Hussien, A., Abdullah, B. ve Cotgrave, A. (2021). Utilisation of nut shell wastes in brick, mortar and concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 293, Article 123546.
- Jiang, W., Zhu, H., Haruna, S. I., Zhao, B., Shao, J. ve Yu Y. (2021). Effect of crumb rubber powder on mechanical properties and pore structure of polyurethane-based polymer mortar for repair. *Construction and Building Materials*, 309, Article 125169.

- Jin, H., Tian, Q. ve Li, Z. (2022). Aging test and performance prediction of rubber in mortar medium. *Journal of Cleaner Production*, 331, Article 129981.
- Jinshuai, Y., Han, Z., Sui, C.-e., Borito, S. M., Yang, Z. ve Jianwen, S. (2021). Research on the effect of carbon nanotubes on cracking and impact properties of rubber aggregate mortar. *Journal of Building Engineering*, 43, Article 103127.
- Letelier, V., Bustamante, M., Munoz, P., Rivas, S. ve Ortega, J. M (2021). Evaluation of mortars with combined use of fine recycled aggregates and waste crumb rubber. *Journal of Building Engineering*, 43, Article 103226.
- Li, G., Morlor, C. S., Leung, C. ve Wang, H. (2021a). Mechanical properties and fractal analysis of cement mortar incorporating styrene-butadiene rubber latex and carboxylated MWCNTs. *Construction and Building Materials*, 309, Article 125175.
- Li, L., Yang, J., Li, H. ve Du, Y. (2021b). Insights into the microstructure evolution of slag, fly ash and condensed silica fume in blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 309, Article 125044.
- Liang, J., Zhu, H., Zhang, B., Zhang, C., Shao, J., Duan, F. ve Wang, J. (2020). Experimental research on controlling the floating of rubber particles in mortar based on the layering degree index. *Construction and Building Materials*, 247, Article 118567.
- Liu, M., Lu, J., Ming, P. ve Yin, Y. (2021). Study of fracture properties and post-peak softening process of rubber concrete based on acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 313, Article 125487.
- Moghaddam, S. C., Madandoust, R., Jamshidi, M.ve Nikbin, I. M. (2021). Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions. *Construction and Building Materials*, 281, Article 122571.
- Saloni, Parveen, Pham, T. M., Lim, Y. Y. ve Malekzadeh, M. (2021). Effect of pre-treatment methods of crumb rubber on strength, permeability and acid attack resistance of rubberised geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 41, Article102448.
- Si, R., Guo, S. ve Dai, Q. (2017). Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles. *Construction and Building Materials*, 153, 496–505.
- Thakare, A. A., Siddique, S., Sarode, S. N., Deewan, R., Gupta, V., Gupta, S. ve Chaudhary, S. (2020). A study on rheological properties of rubber fiber dosed self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 262, Article 120745.
- Thakare, A.A., Gupta, T., Deewan, R. ve Chaudhary, S. (2022). Micro and

- macro-structural properties of waste tyre rubber fibre-reinforced bacterial self-healing mortar. *Construction and Building Materials*, 322, Article 126459.
- TS EN 196-1, (2016). Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Wang, J., Guo, Z., Yuan, Q., Zhang, P. ve Fang, H. (2020). Effects of ages on the ITZ microstructure of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 254, Article 119329.
- Wongsa, A., Sata, V., Nematollahi, B., Sanjayan, J. ve Chindapasirt, P. (2018). Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1069-1080.
- Xu, J., Niu, X., Ma, Q. ve Han, Q. (2021). Mechanical properties and damage analysis of rubber cement mortar mixed with ceramic waste aggregate based on acoustic emission monitoring technology. *Construction and Building Materials*, 309, Article 125084.
- Zhong, H., Poon, E. W., Chen, K. ve Zhang, M. (2019). Engineering properties of crumb rubber alkali-activated mortar reinforced with recycled steel fibres. *Journal of Cleaner Production*, 238, Article 117950.

BÖLÜM VIII

3, 4 VE 5 BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİSİNİN İNCELENMESİ VE UYGULAMA ALANLARININ ARAŞTIRILMASI

Dr. Meltem Eryıldız

Beykent Üniversitesi, Makine Mühendisliği, e-mail:

meltemeryildiz@beykent.edu.tr

Orcid: 0000-0002-2683-560X

1. Giriş

Üretim süreci veya mühendislik, hammaddenin nihai ürüne dönüştürülmesinin gerçekleştiği adımları içermektedir. İmalat, ürünün tasarımından başlamaktadır. Daha sonra başlangıç malzemesi kullanılarak, malzemenin görünüşü fiziksel ve kimyasal uygulamalarla değiştirilmektedir. İmalat, el sanatlarından yüksek teknolojiye kadar bir dizi ürünü ifade etmekte, ancak çoğunlukla, hammaddenin büyük ölçekte nihai veya bitmiş ürüne dönüştürüldüğü endüstriyel tasarıma uygulanmaktadır (Anas vd., 2021; Groover, 2002).

Eklemeli imalat eksiltici imalat yöntemlerinin aksine, bilgisayar ortamında hazırlanmış herhangi bir üç boyutlu model verilerinden nesnelere oluşturmak için genellikle katman üzerine katmanlı malzeme birleştirme işlemi olarak tanımlanmaktadır (Bose vd., 2019). Eklemeli imalat olarak da bilinen 3B baskı teknolojisi, metal, polimer, seramik vb. hammaddelerden karmaşık fonksiyonel yapıların üç boyutlu (3B) üretilmesinde çok yönlü bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır (Oropallo vd., 2016). 3B baskı teknolojisinde, tasarlanan 3B nesnelere, bilgisayar model verilerine dayalı olarak katman katman üretilir. Son birkaç yılda 3 boyutlu baskı teknolojisi, endüstriyel imalat, tıp ve sağlık, havacılık ve uzay, mimarlık ve inşaat, askeri uygulamalar, tekstil, gıda, eğitim ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır. 4B baskı kavramı ise yakın zamanda 2014 yılında tanıtılmıştır ve farklı alanlardaki uygulamaları hakkında ilgili araştırmaların yapılmasına halen ihtiyaç duyulmaktadır. İçerisinde üç boyutlu (3B) baskı teknolojisini de barındıran dört boyutlu (4B)

baskı teknolojisi, akıllı malzemeden üç boyutlu olarak basılmış statik ürünlerin, ısı, su, ışık vb. dış uyurıcılarla uyarılması ile bu ürünlerin zamanla şekil değiştirmesine olanak tanımaktadır (Anas vd., 2021; Ergene ve Yalçın, 2020). 5B baskı konsepti ise ilk olarak Mitsubishi Electric Araştırma Laboratuvarı (MERL), William Yerazunis (Kıdemli Baş Araştırmacı) tarafından uygulanmıştır. 5 boyutlu baskı teknolojisi, eklemeli imalatın yeni bir dalıdır. 3B baskıda kullanılan 3 eksen yerine 5B baskı teknolojisi, nesnelere çok boyutlu olarak üreten beş eksenli baskı teknolojisini kullanmaktadır. Geleneksel 3B baskı teknolojisinde X,Y ve Z eksenlerine ek olarak iki ek eksen eklenmesi ile 5 boyutlu baskı teknolojisi geliştirilmiştir. Bu teknolojiye, yazıcı kafası ve yazdırılabilir nesne beş serbestlik derecesine sahiptir ve böylece düz katman yerine kavisli katmanlar üretilmektedir. 3B yazıcılarda olduğu gibi düz bir katmanda ilerlemek yerine, basılan parçanın eğri yolunu üstlenir. 5 boyutlu baskı teknolojisinde yazdırmada ise model aşağıdan yukarı doğru tek bir hareketle değil, 5 farklı yönde ilerleyen bir mekanizma sayesinde yazdırılmaktadır. Böylece yazdırma işleminde ince detaylar elde edilebildiği gibi kavisli katmanlar da üretilebilmektedir. Böylece bu teknoloji, 3B baskı ile yapılan parçalara kıyasla daha güçlü ürünler üretme kabiliyetine sahip olmaktadır. Bu teknolojinin avantajı, mukavemeti artırılmış kavisli bir katmana sahip model üretilebilmesidir (Anas vd., 2021; Haleem vd., 2019). Tablo 1’de eklemeli imalat teknolojileri arasındaki temel farklılıklar verilmiştir.

Tablo 1. 3B, 4B ve 5B Baskı Teknolojisi Farklılıkları

	3B Baskı Teknolojisi	4B Baskı Teknolojisi	5B Baskı Teknolojisi
Ham madde	PLA, ABS gibi termoplastikler	Şekil hafızalı metaller, şekil hafızalı polimerler	PLA, ABS gibi termoplastikler
Yazıcı kafası hareketi	Hareketli	Hareketli	Hareketli
Baskı plakası hareketi	Hareketsiz	Hareketsiz	Hareketli
Serbestlik derecesi	3	3	5
Basılan Parça	Statik	Dinamik	Statik

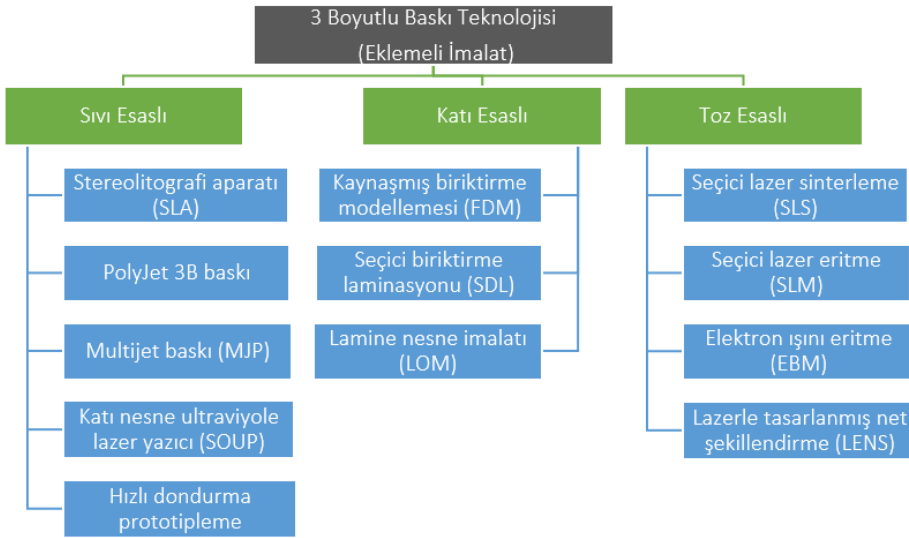
Bu çalışmada, 3, 4 ve 5 boyutlu baskı teknolojileri incelenmektedir. Bu baskı teknolojileri birbirleriyle karşılaştırılarak, birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıflıkları belirtilmiştir. Ayrıca bu teknolojilerin uygulama alanları incelenmiş ve gelecekteki potansiyel uygulama alanları belirtilmiştir.

2. Baskı Teknolojisi Esasları

2.1 3B Baskı Teknolojisi

3B baskı teknolojisinde, bilgisayar ortamında saklanan dijital üç boyutlu veriler gerçek fiziksel nesnelere dönüştürülmektedir. Parçalar katmanlar halinde elde edilmektedir. Sürecin ilk aşamasında, üretilecek parça bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları kullanılarak modellenmektedir. Tasarlanan bu üç boyutlu model STL formatına dönüştürülmekte ve genellikle dilimleme yazılımıyla yapılan dilimleme işlemi sırasında yüzlerce farklı katmana bölünmektedir. Dilimlenmiş dosya daha sonra katman katman 3 boyutlu olarak yazdırılmaktadır. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında karmaşık şekillerde parça üretme ve atık tasarrufu sağlama gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu baskı teknolojisi ile oluşturulan parçalar genellikle düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek darbe direnci gibi iyi mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Ayrıca birçok alan için gerekli bir özellik olan tasarım esnekliği de bu yöntemin avantajlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle otomotiv, havacılık, savunma sanayi, inşaat, tıp ve sağlık başta olmak üzere birçok uygulamada kullanılmaktadır. Tıbbi görüntüleme, hastalık modelleme, kişiye özel tıbbi ekipman üretimi, dental ve doku mühendisliği uygulamaları başta olmak üzere çeşitli biyomedikal uygulamalarda 3B baskı teknolojileri tercih edilmektedir. Özellikle kişiye özel üretim sağlanabildiğinden, hastaya mükemmel uyumlu tıbbi ekipmanların üretimi, geleneksel yöntemlere göre çok daha kısa zamanda yapılabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda tıbbi ekipmanların üretiminde 3 boyutlu baskı teknolojisinin kullanımı ivme kazanmıştır. Ameliyathanelerde kullanılan cerrahi aletlerin üretimi için de oldukça kullanışlıdır (Anas vd., 2021; Bozkurt vd., 2021; Reddy and Devi, 2018).

3B baskı teknolojisi, girdi malzemesine göre üç kategoriye ayrılmaktadır: katı, sıvı ve toz esaslı (Resim 1). Kaynaşmış biriktirme modelleme (FDM) katı malzeme esaslı bir yöntemdir, oysa dijital işleme (DLP), stereolitografi (SLA) ve doğrudan mürekkeple yazma, sıvı malzeme esaslı yöntemlerdendir. Seçilmiş lazer eritme (SLM) ve seçici lazer sinterleme (SLS) toz esaslı yöntem olarak sınıflandırılmaktadır (Li vd., 2017).



Resim 1. Üç Boyutlu Baskı Teknolojilerinin Sınıflandırılması

Piyasada şu anda 100'e yakın farklı tipte 3B yazıcı bulunmaktadır. Uygulamaya dayalı olarak, bazıları uygun fiyatlı ve hafif ürünler için uygun olabilen küçük, masaüstü 3B yazıcılar olarak karşımıza çıkmaktadır. 3B baskı teknolojilerinin geleneksel imalata göre zaman, verimlilik, kalite, esneklik, düşük maliyet gibi birçok avantajı olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca bu yöntemle elde edilen parçalar dayanıklı ve uzun ömürlü olmaktadır. Ancak aynı zamanda sınırlı malzeme, kısıtlı parça boyutu, insan emeğindeki potansiyel azalma nedeniyle imalat sektöründe iş kaybı, telif hakkı sorunu vb. gibi bazı sınırlamaları da mevcuttur (Anas vd., 2021; Reddy ve Devi, 2018).

2.2 4B Baskı Teknolojisi

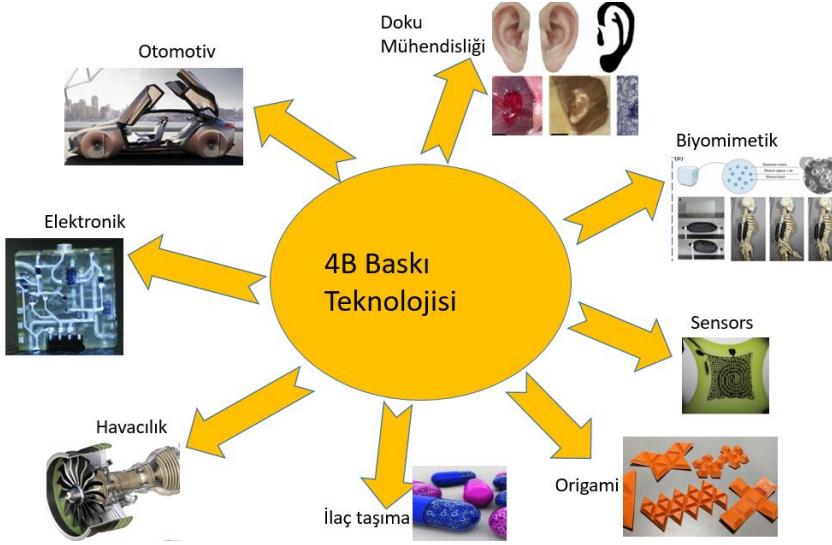
Dört boyutlu (4B) baskı terimi ilk olarak 2013 TED konuşmasında, 3B endüstriyel statik nesnelerin zaman içinde şekil değiştirmesine izin veren bir teknoloji olarak tanımlanmıştır ve 4B baskı üzerine ilk araştırma makalesi de aynı yıl içinde yayınlanmıştır (Ergene ve Yalçın, 2020). Bu ilk çalışmada sac halinde 3B basılı kompozit malzemenin programlanarak şekil hafıza kazandırılması ve karmaşık bir şekle dönüşebilmesi çalışılmıştır (Ge vd., 2013). Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nün (MIT) Self-Assembly Lab'ı, 4B baskı teknolojisini geliştiren ilk kişiler arasında bulunmaktadır (Lee vd., 2017). Günümüzde halen araştırmacılar 3B baskı teknolojisi ile birlikte akıllı malzemeleri kullanan 4B baskı teknolojisini yoğun bir biçimde araştırmaktadırlar. Başlangıçta 4B baskı teknolojisinde zaman dördüncü boyut

olarak tanımlanmıştı. 4 boyutlu baskı, "3B baskı + zaman" şeklinde tanımlanmaktaydı, ancak zamanla bu tanım ısı (Goo vd., 2020), su (Mazurek-Budzyńska vd., 2022), ışık (Jeong vd., 2020), pH (Muzaffar vd., 2020) gibi dış uyaranlara maruz kaldığında özellikleri, işlevi ve şekilleri değişen 3B baskı ürünlerinin üretimi şeklinde geliştirilmiştir. Bu teknoloji ile elde edilen parçalar kendi kendine montaj, kendi kendine onarım sağlama yeteneğine sahiptir. Önümüzdeki yıllarda, 4B baskı teknolojisinin daha da önemli hale gelmesi beklenmektedir (Ergene ve Yalçın, 2020).

Dört boyutlu baskı, yukarıda 3B baskı bölümünde tartışılan aynı eklemeli imalat yöntemlerini ve cihazlarını kullanmaktadır. 3B ve 4B baskı arasındaki temel farkı oluşturan şey, kullanılan malzemelerin doğasıdır. 3B yazdırılan bir ürünün 4B yazdırılmış olarak kabul edilebilmesi için, "şekil hafızası" veya "kendi kendini çalıştırma" gibi en az bir tür akıllı davranış sergilemesi gerekmektedir (Tamay vd., 2019).

4B baskının 3B baskıya göre birçok avantajı mevcuttur. 3 boyutlu düzenlemeye ek olarak dördüncü boyut olan zamanın tanıtılması, üretilen ürün üzerinde hem mekânsal hem de zamansal kontrol sağlamaktadır. Bu nedenle 4B baskı, 3B baskının en büyük dezavantajlarından birinin üstesinden gelerek dinamik ve hareketli yapılar üretebilmektedir. Akıllı malzemeler en yaygın olarak "ısı, nem, ışık, manyetik alan veya pH gibi harici bir uyarana maruz kaldıklarında kontrollü ve işlevsel bir şekilde fiziksel veya kimyasal özelliklerinde değişiklikler sergileyen malzemeler" olarak adlandırılmaktadır. Böylece, 4B baskılı bir ürün, yukarıda belirtilen uyaran türlerine yanıt olarak şeklini, rengini, işlevini veya diğer fiziksel veya kimyasal özelliklerini değiştirebilmektedir. Son yirmi yılda, akıllı malzemeler olarak da bilinen şekil hafızalı malzemeler üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu materyaller, doğru uyaranlar altında şekillerini veya özelliklerini değiştirme kapasitesine sahiptirler. Metal alaşımları ve polimerler bu malzemelerin en popüler olanlarıdır ve büyük ilgi görmektedir (Lee vd., 2017; Tamay vd., 2019; Mitchell vd., 2018).

4B baskılı ürünün durum ve fonksiyonunun akıllı malzemeler ile programlanabilmesi, sonradan işleme için harici cihaz veya yöntemlere olan ihtiyacı ortadan kaldırmakta ve üretim süresini kısaltmakta ve bazı durumlarda uygulama sürecine de yardımcı olabilmektedir (Tibbits, 2014). Örneğin, in vivo uygulamadan önce kompaktlık sergileyen şekil değiştiren akıllı doku iskeleleri, implantasyondan sonra vücut ısısı etkisiyle ısıya maruz kalarak istenen karmaşık şekle dönüşebilmektedir (Miao vd., 2016).



Resim 2. 4B Baskı Teknolojisi Uygulama Alanları

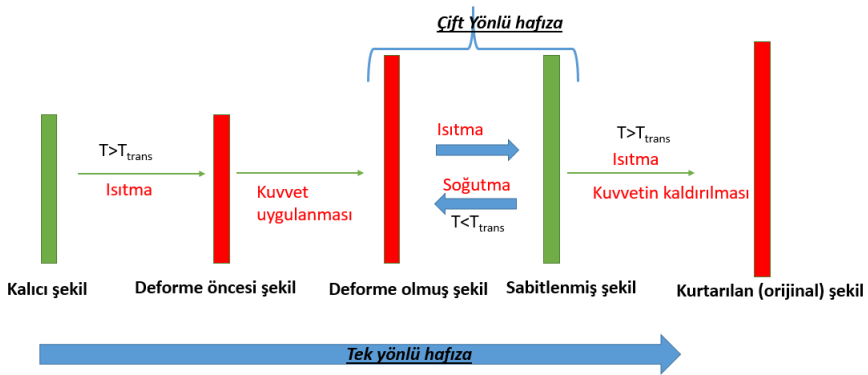
4B baskı, Resim 2'de gösterilen paketlenme, tıp, inşaat ve otomotiv alanları gibi birçok uygulama için umut verici bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak çözüm gerektiren birçok zorluğu barındıran hala çok yeni bir teknolojidir. Bu çözülmesi gereken zorluklar arasında tersine çevrilebilirliğe sahip şekil hafızalı materyallerin geliştirilmesi; şekil hafızalı malzemelerin yazdırılabilirliği, özellikle tersine çevrilebilir şekil hafızalı malzemelerin yazdırılabilirliği; ve 4B basılı nesnelerin tekrarlanabilirliği bulunmaktadır. Şekil hafızalı malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), şekil hafızalı polimerler (ŞHP), şekil hafızalı seramikler (ŞHS), şekil hafızalı jeller (ŞHJ) ve şekil hafızalı hibritler (ŞHH) olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Ergene ve Yalçın, 2020; Lee vd., 2017).

Şekil hafızalı alaşımlarda martenzitik (düşük sıcaklık fazı) ve östenitik (yüksek sıcaklık fazı) dönüşümün başlama ve bitiş sıcaklıkları oldukça önemlidir. Şekil hafızalı malzemelerin kristal faz değişimi (“termo elastik martenzitik dönüşüm” şekil hafızalı alaşımlar olarak da bilinir), dönüşüm sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda martenzitik faz göstermektedir. Martenzitik durumda iken şekil hafızalı bir alaşım yeni bir şekle kolayca deforme edilebilmektedir. Ayrıca, şekil hafızalı alaşım östenit dönüşüm sıcaklığı üzerine ısıtıldığında önceki şeklini hatırlayacaktır. Malzemelerdeki bu özelliğe ise şekil hafıza etkisi denmektedir (Lee vd., 2017; Vates vd., 2021).

Şekil hafızalı polimerlerin mekanizmaları, şekil hafızalı alaşımlardan tamamen farklıdır. Şekil hafızalı polimerlerin, şekil hafıza etkisi kazanabilmesi camsı geçiş sıcaklığına (Tg) bağlıdır ve Tg sıcaklığının altında moleküllerin hareket kabiliyeti oldukça düşük olmaktadır. Tg sıcaklığının üzerinde polimer

zincirleri arasındaki bağlar zayıflamakta ve molekül hareket kabiliyeti artmaktadır (Ergene ve Yalçın, 2020; Muzaffar vd., 2020).

Şekil hafızalı alaşımlar, kritik bir sıcaklığın (dönüşüm sıcaklığı) alt ve üst değerlerinde farklı iki şekil veya kristal yapıya sahip olabilmektedirler. Deforme olmuş bir şekil hafızalı alaşım başlangıç sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılınca orijinal şekline geri dönüyorsa tek yönlü şekil hafıza özelliği sergilenmektedir. Polimerlerde ise deforme olmuş bir şekil hafızalı polimer, camsı geçiş sıcaklığının (T_g) üzerinde ısıtıldığında orijinal şekline ve yapısına geri dönecektir. Çift yönlü şekil hafıza özelliğinde ise, uyararı değiştirerek (örneğin, soğutma) kalıcı şekle geri dönmek mümkün olmaktadır. "Tek yönlü şekil hafızalı malzemelerde" dönüşüm geri döndürülemez ve orijinal şekil kurtarıldıktan sonra deforme olmuş şekli yeniden oluşturmak için yeni bir programlama adımı ihtiyacı bulunmaktadır. Bununla birlikte, "iki yönlü şekil hafızalı malzemelerde" şekil tersine çevrilebilmektedir. Tersine çevrilebilirlik, malzemeye iki kalıcı şekil verdiği için genellikle "çift yönlü hafıza" olarak adlandırılmaktadır. Mevcut 4B baskı yöntemlerinin çoğu tek yönlüdür. Burada programlama veya yeniden programlama, geçici bir şeklin manuel olarak ayarlanmasını ifade etmektedir. 4B baskıya tersine çevrilebilirlik eklemek, sürekli tekrarlayan bir çalışmaya izin verecek, zaman ve emek harcayan yeniden programlama ihtiyacını ortadan kaldıracaktır. Resim 3, uyararı olarak ısıtma ve soğutma uygulanması ile tek yönlü (tersinmez) ve çift yönlü (tersinir) şekil hafıza olayını göstermektedir (Muzaffar vd., 2020; Vates vd., 2021; Valvez vd., 2021).



Resim 3. Tek ve Çift Yönlü Şekil Hafıza Olayının Şematik Gösterimi

4B baskı teknolojisinde kullanılan en popüler malzemeler, diğer akıllı malzemelere göre daha olumlu özelliklere sahip oldukları için şekil hafızalı polimerlerdir. ŞHP'ler daha iyi esneklik özellikleri, camsı durumda yüksek Young modülü ve daha kolay üretim gibi özellikler sunmaktadır. Şekil hafızalı polimerler kolaylıkla temin edilebilen filamentler veya bir ekstrüder

kullanılarak üretilen filamentler ile FDM yöntemi ile üretilmektedirler (Alshehly vd., 2021).

4B baskıya ilginin artmasıyla birlikte, tıbbi cihazlar, akıllı tekstiller, savunma ve havacılıkta kullanım için yumuşak robotlar ve yazdırılabilir eyleyiciler için çalışmalar da artmıştır (López-Valdeolivas vd., 2018; Shiblee vd., 2019). Bu teknolojinin gelişmesi ile kendi kendine montaj edilebilirlik ortaya çıkmıştır. Bu sayede eklemeli imalat parçalarının boyutu artık baskı yatağının boyutuyla sınırlı olmak zorunda değildir. Parçalar, üretim sonrası için programlanabilir, bu sayede ilk depolama için gereken hacmi azalmış, kendi kendine monte edilebilen ürünler kullanılabilir. Bu duyarlı yapılar, genel baskı süresini ve üretim karmaşıklığını azaltmak için daha büyük ve daha karmaşık bir tasarıma dönüşmeden önce basit bir geometrik biçimde basılabilmektedirler. Bireysel parçalar daha küçük eklemeli imalat sistemleri kullanılarak yazdırılabilmekte ve daha sonra daha büyük bir bileşene kendi kendine monte edilebilmektedir. Tibbits ve arkadaşlarının yaptığı bir uzay çalışmasına göre, harici bir güç kaynağına veya insan müdahalesine ihtiyaç duymadan parçalar 4 boyutlu baskı teknolojisi ile önceden belirlenmiş bir ortamda birleştirile bilinmektedir (Tibbits vd., 2014).

Zhou vd., (2015) tarafından sunulmuş bir çalışmaya göre, belirli bir tıbbi amaç sebebiyle vücutta belirlenen bir yere kendi kendine monte edilebilen nano ölçekli parçalar insan vücuduna gönderilmiştir. 4 boyutlu baskı teknolojisi ayrıca yumuşak robotik alanında da kullanılmaktadır. Geleneksel yumuşak robotik mekanizmaları genellikle hantal, enerji tüketen ve montajı zor olduğundan, 4B baskı, motorlar, sensörler ve elektronikler gibi pahalı, hataya açık ve karmaşık elektro-mekanik cihazlara olan ihtiyacı en aza indirmekte veya ortadan kaldırmaktadır (Lee vd., 2017).

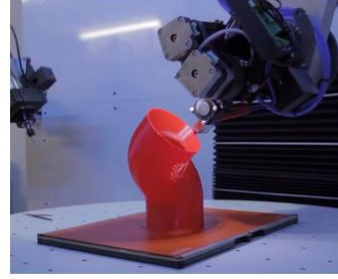
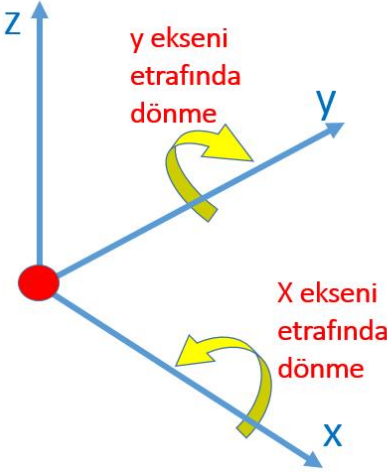
4B baskılı yapılar ayrıca kendi kendini onaracak şekilde de tasarlanabilmektedir. Buna örnek çalışmalar arasında, Campbell tarafından geliştirilen esnek kendi kendini iyileştiren borular ve kendi kendini iyileştiren hidrojeller verilebilir (Cambell vd., 2014). 4B baskı, doku mühendisliği ve özellikle biyomedikal mühendisliğinde yüksek potansiyele sahip bir teknolojidir. Özellikle, vücut ısısının artıp azalmasıyla genişleyen ya da daralan akıllı stentlerin yapımında (Subash ve Kandasubramanian, 2020; Zarek vd., 2017), kontrollü ilaç salınımında (Wischke vd., 2009) ve akıllı medikal cihazların imalatı (Huang vd., 2013) gibi uygulamalarda bir çok yenilik sunmaktadır. 4B baskı teknolojisinin kullanımının, farklı sektörlerde daha fazla uygulama alanı bulmasıyla, önemli ölçüde daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Gelecekte 4B baskı teknolojisi ile yapay organların biyolojik olarak basılabilmesi, uzay ve otomotiv parçaları için uyarlanabilir sensörler üretilbileceği öngörülmektedir. Tablo 2’de 4B baskı teknolojisinin uygulama alanları belirtilmiştir (Pei ve Loh, 2018).

Tablo 2. 4B Baskı Teknolojisi Örnek Uygulama Alanları

Uygulama alanı	Tanım	Ref.
Origami yapıları, Biyo origami	Akıllı hidrofilik polimerik malzemeden oluşan menteşelerle ambalajsız bir küpün katlanması; suya batırıldığında, akıllı malzeme harekete geçer ve nesne bir küp şeklinde katlanır.	(Lee vd., 2017; Raasch vd., 2015)
Akıllı tutucu, Yumuşak robotlar	Isı uygulamasıyla etkinleştirilir ve ilaç dağıtım sisteminde mikro tutucu olarak kullanılabilir akıllı tutucu tasarımları.	(Ge vd., 2016; Rayate ve Jain, 2018)
Sağlık izleme cihazları	Dinamik ilaç dağıtımında uygulamalar sunmak için biyomedikal cihazlar, biyolojik taklit için elektronik-deriler, kendi kendini sıkın zimbalar ve biyomimetik robotlar karmaşık yapay kas sistemleri.	(Jamal vd., 2013; Bodaghi vd., 2018)
Elektrikli aletler	Bir cihazın bozuk bir devreyi yeniden bağlayarak iyileşmesini sağlamak için kendi kendini onaran sistemler.	(Zarek vd., 2016)
Akıllı Tekstil	Isıtıldığında şekil değiştiren kumaşlar, su geçirmez olan ayakkabılar	(Leist vd., 2017)
Akıllı tesisat cihazları	Debi talebine göre çapı dinamik olarak ayarlayan cihazlar, çatladıklarında veya kırıldıklarında kendilerini onarabilme yeteneği.	(Haleem vd., 2021)
Yiyecek Endüstrisi	pH'da değişikliğe maruz kaldığında renk değiştirebilen yiyecekler.	(Ghazal vd., 2019; He vd., 2020)

2.3 5B Baskı Teknolojisi

5B baskı, yazıcı kafasının ve baskı yatağının (ısıtılmış plaka) x, y ve z eksenini boyunca toplam beş serbestlik derecesinde döndüğü yeni bir eklemeli imalat teknolojisidir. Bu teknoloji ile daha doğru bir şekilde kavisli katman veya içbükey şekiller oluşturulabilmektedir. 5B baskı teknolojisinde yazıcı kafası beş eksenle baskı yaparken aynı anda baskı yatağı da x, y ve z ekseninde ileri ve geri hareket etmekte, bu da nesnenin tek bir baskı noktasında oluşturulması yerine, 5 eksenin tümünden yazdırılmasına izin vermektedir. Resim 4, 5 boyutlu baskıdaki yazıcı kafası ve baskı yatağı hareketlerini göstermektedir. Yazıcı kafasının yalnızca X, Y ve Z eksenlerini kullanan standart 3B baskı teknolojisinin aksine, 5 boyutlu baskı teknolojisi, ilave iki eksen daha kullanmaktadır; bunlar Resim 4'te de gözüktüğü gibi X ekseninde dönüş ve Y ekseninde dönüş hareketidir. "Z ekseninde dönüş hareketinden de yararlanan 6 eksenli baskı teknolojisi de bulunmaktadır, dört eksenli yazıcılar gibi bunlar da oldukça nadirdir ve çok kullanılmamaktadır (Anas vd., 2021; Haleem vd., 2019; Haleem ve Javaid, 2019).



Resim 4. 5 Boyutlu Baskı Teknolojisi Eksen Hareketleri

5B baskı teknolojisinin 3B baskı teknolojisine göre bazı avantajları mevcuttur.

Daha az destek: Yazıcı kafasının veya yatağın x ve y eksenleri etrafında dönebilme kabiliyeti sayesinde yazıcı, modelin sağlam (katı) bir bölümüne yazdırma işlemi yapmaktadır. Modelde kritik bir açıya veya inceliğe sahip bir kısım bulunuyor ise, o kısmın desteklenmesi bu dönme hareketleri ile sağlanmaktadır. Böylece model üretimi sırasında desteğe olan ihtiyaç ortadan kalkmakta ve desteklerin çıkarılmasının imkansız olacağı karmaşık modeller basılabilmektedir.

Daha güçlü baskı: Standart 3B baskılarda en zayıf dayanım her zaman katmanlar arasında meydana gelmektedir (Taufik ve Jain, 2013). 5 boyutlu baskı ile, düz katmanların aynı şekilde istiflenmesi zorunluluğu yoktur ve böylece çok daha güçlü baskılar üretilebilmektedir.

Daha az malzeme kullanılır: Çeşitli açılarda baskı yapabilen 5 boyutlu baskı teknolojisi ile dolgu ve destek ihtiyacı azalmaktadır. Böylece kullanılan malzeme miktarı da önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Daha az son işlem: Çok fazla desteğe ihtiyaç duymayan ve düz katmana sınırlı kalmadan imalat gerçekleştirebilen 5 boyutlu baskı teknolojisinde, daha az son işlem ihtiyacı olmaktadır. Çok daha pürüzsüz, daha yüksek kaliteli baskılar üretmek mümkündür.

5 boyutlu baskı teknolojisinin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Ancak bu teknolojinin her bir dezavantajının temel sebebi bu teknolojinin daha çok yeni olmasıdır, gelecek çalışmalar ile birlikte araştırmalar devam ettikçe ve 5 eksenli baskı teknolojisi popülerlik kazandıkça bu dezavantajların giderek azalacağı düşünülmektedir.

Az seçenek: Piyasada çok fazla seçenek olmamakla birlikte mevcut seçenekler endüstriyel kullanım için tasarlanmış veya oldukça pahalı olduğundan, çoğu kişi için 5 boyutlu baskıyı oldukça erişilemez hale getirmektedir.

Karmaşık dilimleme: 5 boyutlu baskı için modeli oluşturmak ve dilimlemek zor bir işlem olabilmektedir. 5 boyutlu baskı, 3 boyutlu baskıya göre farklı bir yaklaşım gerektirir. Ayrıca, çoğu dilimleyici programları beş boyutlu yazdırmayı desteklememektedir.

5 boyutlu baskı teknolojisi, 3 boyutlu baskıya göre oldukça avantajlıdır. Örnek olarak, içbükey bir parça imalatını ele alabiliriz, bu parçanın imalatında 3 boyutlu baskı teknolojisinde çok fazla dolgu ve desteğe ihtiyaç duyulmaktadır ve tasarımı çok karmaşık olduğu zaman 3 boyutlu olarak basmak oldukça zor olmaktadır. 5B baskı ise kavisli katmanları kolaylıkla basabilecek eksen hareketleri özelliğinden dolayı baskıyı kolaylaştırmaktadır (Reddy ve Devi, 2018).

3 boyutlu baskı, modelin profilini elde etmek için düz katmanların üst üste ilave edilmesiyle, üretimine dayanmaktadır ve içinde zayıf noktaların bulunma olasılığı vardır. 5B baskı teknolojisi kullanılarak bu önlenilmektedir. 3B ve 5B baskı ile aynı parçalar basıldıktan sonra ve MERL'de test edilmiştir ve 5B baskılı parçaların, 3B baskılı parçalardan 3 ila 5 kat daha güçlü oldukları belirtilmiştir. 3B basılan parçaların yatay katmanlara sahip olması, bu katmanlar arası zayıf dayanımın olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü katmanlar arasındaki ara yüz güçlü değildir ve katmanları yazma doğrultularından zıt yönde iten bir kuvvet olduğunda, katmanlar birbirinden kolayca ayrılabilir. 5 boyutlu baskı ile katmanlar aynı yönde dizilmemektedir ve daha güçlü bir parça üretilebilmesine neden olmaktadır (Reddy ve Devi, 2018; Haleem ve Javaid, 2019; Taufik ve Jain, 2013).

3B baskı ile 5B baskı arasındaki temel fark, 5B baskının kavisli bir katmanla daha güçlü bir parça oluşturması, 3B baskının ise düz bir yüzey ile parça oluşturmasıdır. Her iki teknolojiye aynı baskı malzemesini kullanır. Ancak 4B baskı bu iki teknolojiden farklıdır. Programlanabilir, zaman ve sıcaklığa bağlı olarak şeklini ve işlevini değiştirebilen farklı türde malzemeler kullanır. Bu malzemeler termo-mekanik özelliklere sahip oldukları için akıllı malzemeler olarak adlandırılmaktadır (Haleem ve Javaid, 2019; Haleem vd., 2018).

5B baskı teknolojisi ile basılmış bir model, cerrahi olarak kemik doku naklinin söz konusu olduğu müdahaleler için, yapay kemik doku iskelesi imalatında büyük bir potansiyele sahiptir. Kişiye özel olarak kusurlu kemik doku iskelelerin üretilebilmesi ve gözenek boyutu, şekli ve gözenekliliğin tam olarak kontrol edilebilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca insan kemikleri düz bir yapıda değildir ve kavisli birçok yüzeye sahiptir, bu sebeple 5B baskı

teknolojisi kavisli yüzeyleri üretmekteki kabiliyetleri sayesinde yapay kemik doku iskelelerini mükemmel dayanıklılık ile üretebilmektedir (Haleem vd., 2019). Ortopedik cerrahide, kavisli yüzeylere sahip karmaşık ve sağlam implantlara ihtiyaç oldukça fazladır. Kavisli karmaşık ortopedik implantların üretiminde 3B baskı, düz katmanlar kullandığından yeterli olmamaktadır. Ayrıca, kavisli katmanların yazılması sırasında nesneyi daha dayanıklı yapan malzemenin şekilsel gücü ve desteği de 5 boyutlu baskı teknolojisinde mevcuttur. Bu nedenle, aynı dayanımda implantlar elde etmek için 5 boyutlu baskıda, 3B baskıya kıyasla daha az hammadde gereksinimi mevcuttur (Anas vd., 2021; Haleem vd., 2019). Sonuç olarak, 5B baskı, kavisli katmanlar üreterek, mükemmel mukavemete sahip yapay kemikler üretmek için çok faydalı bir araç olacaktır. Gelecekte, 3B ve 4B baskı gibi 5B baskı teknolojisi de Ortopedi alanında çığır açıcı yenilikler yaratacaktır. Hastanın hayatını kurtarmak için sonsuz olanaklar yaratacak ve mükemmel hizmet sunacaktır (Anas vd., 2021; Reddy ve Devi, 2018).

Tablo 3: Beş Boyutlu Baskı Teknolojisinin Sağlık Sektöründe Beklenen Potansiyel Uygulamaları

Uygulama alanı	Tanım
Tıbbi aletler/ekipmanlar	Yüksek mukavemetli, kişiye özel tıbbi alet/ekipman üretilmektedir. CAD verileri yardımıyla hastaya özel herhangi bir kavisli alet/ekipman oluşturulabilmektedir.
Cerrahi aletler/ekipmanlar	Her türlü cerrahi aksesuar, kit ve hasta bakım cihazı daha güçlü ve daha hassas bir şekilde ihtiyaca göre üretilmektedir.
İmplantlar	Dokular veya organlarımız geometrik şekillerde değildir; kavisler mevcuttur ve keskin kenarlar bulunmaktadır. Bu nedenle, kişiye özel ve tam uyumlu implant üretebilmek için kavisli parçalara ihtiyacımız vardır. Yüksek mukavemetle kavisli yüzeylere sahip her türlü implantı rahatlıkla yüksek hassasiyette üretebilmektedir.
Tıbbi borular	Daha yüksek mukavemetli ve daha uzun ömürlü cerrahi kesit boruları gibi medikal boruları kolaylıkla üretilmektedir.
Destek plakaları	Destek plakası, kırık kemik bölgesini yerinde tutmaya yardımcı olur. L-şekilli, T-şekilli ve bombeli uç şekilli levhalar gibi daha yüksek mukavemete sahip levhalar üretilmektedir.
Tıbbi bağlantı elemanları	Tıbbi bağlantı elemanları, cerrahi implantlar ve insan vücudu arasında sürekli bir etkileşim halindedir ve 5 boyutlu baskı ile üretilen tıbbi bağlantı elemanları mekanik gereksinimleri karşılamaktadır.
Protez	Yüksek mukavemetli hastaya özel protezler üretebilmektedir.
Kalp kapakçıkları	Bu teknoloji ile basılan kalp kapakçıkları, güvenilir bir sonuç sağlayacaktır.

Sağlık hizmetlerinde, özellikle diş cerrahisinde 5 boyutlu baskı ile, ortodontik diş telleri, kronlar, hizalayıcılar, implantlar, köprüler ve aletler oluşturmak mümkün olabilecektir. 5 boyutlu baskının diş cerrahisindeki kullanılmasındaki en önemli neden, düz katmanlar yerine implantın zayıf noktasını önleyen kavisli katmanlı yüksek mukavemetli bölümler oluşturabilmesidir (Anas vd., 2021, Ergene ve Yalçın, 2020; Haleem vd., 2019). Protezler, doğuştan sakat olan veya kaza sonucu eksik bir organın yerini tutması, bir sakatlığı örtmesi için yapılan ve takılan yapay bir organ ya da parçadır. 5B baskı teknolojisi ile karmaşık şekillere sahip el, bacak, alt çene ve diş gibi implantları yüksek mukavemetle üretebilmektedir. Tablo 3’de 5 boyutlu baskı teknolojisinin tıp alanında beklenen potansiyel uygulamaları verilmiştir (Anas vd., 2021; Haleem vd., 2019; Reddy ve Devi, 2018; Haleem ve Javaid, 2019).

3. Sonuç

3 boyutlu baskı teknolojisi bilgisayar ortamında hazırlanmış herhangi bir üç boyutlu bir nesnenin sanal olarak katmanlara bölünmesine ve her bir katmanının eritilen hammadde dökülerek üst üste gelecek şekilde basılmasına dayanır. Bu teknoloji basma işlemi yaparken 3 eksenin hareketinden yararlanmaktadır. 4B baskı teknolojisinde ise dördüncü eksen zamandır. Bu baskı teknolojisinde 3 boyutlu baskı teknolojisiyle statik bir nesne katman-katman inşa edilmektedir. Ancak kullanılan malzeme 3 boyutlu baskı teknolojisinde kullanılanlardan farklıdır, 4 boyutlu baskı teknolojisinde su, sıcaklık, ışık veya diğer çevresel uyarıcılar aracılığı ile harici enerji girişinin etkisi altında kendisini başka bir yapıya dönüştüren akıllı malzemeler kullanılmaktadır. 3B baskı teknolojisinde büyük hacimli nesnelerin üretilmesi oldukça zordur, dört boyutlu baskı teknolojisi bu sorunu aşabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Çünkü dört boyutlu baskı teknolojisinde 3 boyutlu baskı teknolojisi yardımıyla basılan parçaların şeklini akıllı malzemeler ve buna özel tasarım ile sonradan değiştirme imkânı bulunmaktadır. Böylece baskı zamanından %70 ila %90 arasında tasarruf sağlanabilmektedir. Gelecekte 4B baskı, özellikle cerrahi uygulamalar, medikal cihazlar, yapay organların tasarımı gibi tıp alanında yüksek potansiyele sahip olacaktır. Vücut sıcaklığına göre şekil değiştirebilen kıyafetler gibi moda ve tekstil alanında da geniş bir potansiyele sahip olabilecektir. 4B baskılı nesnelerin şekil değiştirme davranışı, ona 3B baskıya göre bir avantaj sağlamaktadır, ancak kavisli katmanlara sahip ve daha yüksek mukavemet gerektiren nesnelere üretebilme kısıtlaması bulunmaktadır.

3B ve 4B baskıda kullanılan 3 eksen yerine 5B baskı teknolojisi, nesnelere çok boyutlu olarak üreten beş eksenli baskı tekniğini kullanır. Bu teknolojiye, yazıcı kafası ve yazdırılabilir nesne beş serbestlik derecesine

sahiptir ve böylece kavisli katmanlar ve daha az karmaşık şekiller oluşturabiliriz. Bu işlemde yazıcı kafası baskı yaparken baskı kısmı hareket eder. Böylece baskı, 3B baskıda olduğu gibi düz bir katmanda ilerlemek yerine, basılan parçanın eğri kavisli yolunu takip eder. Böylece bu teknoloji, 3B baskı ile üretilen parçalara kıyasla daha güçlü ürünler üretme kabiliyetine sahiptir. Bu teknolojinin avantajı, mukavemeti arttırılmış kavisli bir katmana sahip model üretilmesidir. 5B baskı teknolojisi oldukça yeni bir teknolojisidi ve üzerinde araştırmalar halen devam etmektedir. 5 boyutlu baskı teknolojisiyle kavisli katmanların yazılabilmesi %25 ila %30 arasında malzeme tasarrufu sağlamaktadır. Gelecekte, bu teknoloji daha faydalı hale gelecek ve tıp, dişçilik, otomobil gibi çeşitli alanlarda sonsuz olanaklar yaratmaya yardımcı olacaktır. Gelecekte, 3B ve 4B baskı gibi 5B baskı teknolojisi de özellikle tıp ve sağlık alanında çığır açıcı yenilikler yaratacaktır. Hastanın hayatını kurtarmak için sonsuz olanaklar yaratacak ve mükemmel hizmet sunacaktır.

Kaynaklar

- Alsheby, Y. S., Nafea, M., Almurib, H. A., Ali, M. S. M., Faudzi, A. A. M., & Tan, M. T. (2021, June). Development of 4D Printed PLA Actuators with an Induced Internal Strain Upon Printing. In *2021 IEEE International Conference on Automatic Control & Intelligent Systems (I2CACIS)* (pp. 41-45). IEEE
- Anas, S., Khan, M. Y., Rafey, M., & Faheem, K. (2021). Concept of 5D printing technology and its applicability in the healthcare industry. *Materials Today: Proceedings*.
- Bodaghi, M., Damanpack, A. R., & Liao, W. H. (2018). Triple shape memory polymers by 4D printing. *Smart Materials and Structures*, 27(6), 065010.
- Bose, S., Sarkar, N., Vahabzadeh, S., Ke, D., & Bandyopadhyay, A. (2019). Additive manufacturing of ceramics. In *Additive Manufacturing* (pp. 183-231). CRC Press.
- Bozkurt, Y., Özkan, H. G., & Karayel, E. (2021). Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı. *El-Cezeri*, 8(2), 962-980.
- Campbell, T. A., Tibbitts, S., & Garrett, B. (2014). The programmable world. *Scientific American*, 311(5), 60-65.
- Ergene, B., & Yalçın, B. (2020). 4 boyutlu baskı teknolojisi ve uygulama alanlarının araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 12(3), 108-117.
- Gao, B., Yang, Q., Zhao, X., Jin, G., Ma, Y., & Xu, F. (2016). 4D bioprinting for biomedical applications. *Trends in biotechnology*, 34(9), 746-756.

- Ge, Q., Qi, H. J., & Dunn, M. L. (2013). Active materials by four-dimension printing. *Applied Physics Letters*, 103(13), 131901.
- Ge, Q., Sakhaei, A. H., Lee, H., Dunn, C. K., Fang, N. X., & Dunn, M. L. (2016). Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. *Scientific reports*, 6(1), 1-11.
- Ghazal, A. F., Zhang, M., & Liu, Z. (2019). Spontaneous color change of 3D printed healthy food product over time after printing as a novel application for 4D food printing. *Food and Bioprocess Technology*, 12(10), 1627-1645.
- Goo, B., Hong, C. H., & Park, K. (2020). 4D printing using anisotropic thermal deformation of 3D-printed thermoplastic parts. *Materials & Design*, 188, 108485.
- Groover, M. P. (2002). *Fundamentals of Modern Manufacturing* Wiley. New York.
- Haleem, A., & Javaid, M. (2019). Expected applications of five-dimensional (5D) printing in the medical field. *Current Medicine Research and Practice*, 9(5), 208-209.
- Haleem, A., Javaid, M., & Vaishya, R. (2018). 4D printing and its applications in orthopaedics. *Journal of clinical orthopaedics and trauma*, 9(3), 275.
- Haleem, A., Javaid, M., & Vaishya, R. (2019). 5D printing and its expected applications in Orthopaedics. *Journal of Clinical Orthopaedics & Trauma*, 10(4), 809-810.
- Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., & Suman, R. (2021). Significant roles of 4D printing using smart materials in the field of manufacturing. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(4), 301-311.
- He, C., Zhang, M., & Guo, C. (2020). 4D printing of mashed potato/purple sweet potato puree with spontaneous color change. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 59, 102250.
- Huang, W. M., Song, C. L., Fu, Y. Q., Wang, C. C., Zhao, Y., Purnawali, H., ... & Zhang, J. L. (2013). Shaping tissue with shape memory materials. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65(4), 515-535.
- Jamal, M., Kadam, S. S., Xiao, R., Jivan, F., Onn, T. M., Fernandes, R., ... & Gracias, D. H. (2013). Bio-origami hydrogel scaffolds composed of photocrosslinked PEG bilayers. *Advanced healthcare materials*, 2(8), 1142-1150.
- Jeong, H. Y., Woo, B. H., Kim, N., & Jun, Y. C. (2020). Multicolor 4D printing of shape-memory polymers for light-induced selective heating and remote actuation. *Scientific reports*, 10(1), 1-11.
- Lee, A. Y., An, J., & Chua, C. K. (2017). Two-way 4D printing: a review on the reversibility of 3D-printed shape memory materials. *Engineering*, 3(5), 663-674.

- Lee, J., Kim, H. C., Choi, J. W., & Lee, I. H. (2017). A review on 3D printed smart devices for 4D printing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(3), 373-383.
- Leist, S. K., Gao, D., Chiou, R., & Zhou, J. (2017). Investigating the shape memory properties of 4D printed polylactic acid (PLA) and the concept of 4D printing onto nylon fabrics for the creation of smart textiles. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(4), 290-300.
- Li, X., Shang, J., & Wang, Z. (2017). Intelligent materials: a review of applications in 4D printing. *Assembly Automation*, 37(2), 170-185.
- López-Valdeolivas, M., Liu, D., Broer, D. J., & Sánchez-Somolinos, C. (2018). 4D printed actuators with soft-robotic functions. *Macromolecular rapid communications*, 39(5), 1700710.
- Mazurek-Budzyńska, M., Behl, M., Neumann, R., & Lendlein, A. (2022). 4D-actuators by 3D-printing combined with water-based curing. *Materials Today Communications*, 30, 102966.
- Miao, S., Zhu, W., Castro, N. J., Nowicki, M., Zhou, X., Cui, H., ... & Zhang, L. G. (2016). 4D printing smart biomedical scaffolds with novel soybean oil epoxidized acrylate. *Scientific reports*, 6(1), 1-10.
- Mitchell, A., Lafont, U., Hołyńska, M., & Semprinoschnig, C. J. A. M. (2018). Additive manufacturing—A review of 4D printing and future applications. *Additive Manufacturing*, 24, 606-626.
- Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Deshmukh, K., Kovářik, T., Křenek, T., & Pasha, S. K. (2020). 3D and 4D printing of pH-responsive and functional polymers and their composites. In *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials* (pp. 85-117). Elsevier.
- Oropallo, W., & Pieggl, L. A. (2016). Ten challenges in 3D printing. *Engineering with Computers*, 32(1), 135-148.
- Pei, E., & Loh, G. H. (2018). Technological considerations for 4D printing: an overview. *Progress in Additive Manufacturing*, 3(1), 95-107.
- Raasch, J., Ivey, M., Aldrich, D., Nobes, D. S., & Ayranci, C. (2015). Characterization of polyurethane shape memory polymer processed by material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 8, 132-141.
- Rayate, A., & Jain, P. K. (2018). A review on 4D printing material composites and their applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 20474-20484.
- Reddy, P. R., & Devi, P. A. (2018). Review on the advancements of additive manufacturing-4D and 5D printing. *Int J Mech Prod Eng Res Dev*, 8(4), 397-402.
- Shiblee, M. N. I., Ahmed, K., Kawakami, M., & Furukawa, H. (2019). 4D printing of shape-memory hydrogels for soft-robotic functions. *Advanced Materials Technologies*, 4(8), 1900071.

- Subash, A., & Kandasubramanian, B. (2020). 4D printing of shape memory polymers. *European Polymer Journal*, 134, 109771.
- Tamay, D. G., Dursun Usal, T., Alagoz, A. S., Yucel, D., Hasirci, N., & Hasirci, V. (2019). 3D and 4D printing of polymers for tissue engineering applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, 164.
- Taufik, M., & Jain, P. K. (2013). Role of build orientation in layered manufacturing: a review. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 27(1-3), 47-73.
- Tibbits, S. (2014). 4D printing: multi-material shape change. *Architectural Design*, 84(1), 116-121.
- Tibbits, S., McKnelly, C., Olguin, C., Dikovsky, D., & Hirsch, S. (2014). 4D printing and universal transformation, Material Agency, Academia 2014, Design Agency, 539-548
- Valvez, S., Reis, P. N., Susmel, L., & Berto, F. (2021). Fused filament fabrication-4D-printed shape memory polymers: a review. *Polymers*, 13(5), 701.
- Vates, U. K., Mishra, S., & Kanu, N. J. (2021). Biomimetic 4D printed materials: A state-of-the-art review on concepts, opportunities, and challenges. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3313-3319.
- Wischke, C., Neffe, A. T., Steuer, S., & Lendlein, A. (2009). Evaluation of a degradable shape-memory polymer network as matrix for controlled drug release. *Journal of Controlled Release*, 138(3), 243-250.
- Zarek, M., Layani, M., Cooperstein, I., Sachyani, E., Cohn, D., & Magdassi, S. (2016). 3D printing of shape memory polymers for flexible electronic devices. *Advanced Materials*, 28(22), 4449-4454.
- Zarek, M., Mansour, N., Shapira, S., & Cohn, D. (2017). 4D printing of shape memory-based personalized endoluminal medical devices. *Macromolecular rapid communications*, 38(2), 1600628.
- Zhou, Y., Huang, W. M., Kang, S. F., Wu, X. L., Lu, H. B., Fu, J., & Cui, H. (2015). From 3D to 4D printing: approaches and typical applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(10), 4281-4288.

