

# MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR

EDİTÖR

DOÇ. DR. SELAHATTİN BARDAK

MART 2022

gece  
kitaplığı

**İmtiyaz Sahibi / Publisher • Yaşar Hız**

**Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel**

**Editörler / Editors • Doç. Dr. Selahattin BARDAK**

**Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı**

**Birinci Basım / First Edition • © Mart 2022**

**ISBN • 978-625-430-040-0**

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin  
almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Gece Kitaplığı.

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

**Gece Kitaplığı / Gece Publishing**

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

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

**Telefon / Phone:** +90 312 384 80 40

**web:** www.gecekitapligi.com

**e-mail:** gecekitapligi@gmail.com

**Baskı & Cilt / Printing & Volume**

**Sertifika / Certificate No: 47083**

# Mühendislikte Güncel Araştırmalar

Mart 2022

Editör

Doç. Dr. Selahattin BARDAK



# İÇİNDEKİLER

## **Bölüm 1**

CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYON YÖNTEMİNİN  
MALZEME BİLİMİNDE UYGULAMALARI

*Mehtap ERŞAN, Emre GÖRGÜN* ..... 1

## **Bölüm 2**

MİKROÇİPLERİN BİRLEŞİK JET ETKİSİYLE  
SOĞUTULMALARININ ARAŞTIRILMASI

*Koray KARABULUT, Doğan Engin ALNAK* ..... 11

## **Bölüm 3**

ÜLKEMİZİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ STRATEJİSİ VE ENERJİ  
TASARRUFU AÇISINDAN YAPILAN UYGULAMA HATA VE  
EKSİKLİKLERİ

*Koray KARABULUT* ..... 25

## **Bölüm 4**

TEK TİP BİR BETONARME YAPININ TBDY 2018'E GÖRE  
UYGUN PAKET PROGRAMLAR İLE MODELLENMESİ  
ANALİZİ VE SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

*Halit Erdem ÇOLAKOĞLU, Muhammed ÖZTEMEL,*

*Merdan Törehan TURAN* ..... 37

## **Bölüm 5**

PROTON DEĞİŞİM MEMBRANLI YAKIT HÜCRELERİNİN  
GENEL ÖZELLİKLERİ VE KİRLİLİK FAKTÖRÜNÜN  
PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

*Sinan ÜNVAR* ..... 53

## **Bölüm 6**

GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN GENEL YAPISI  
VE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ PERFORMANS  
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Sinan ÜNVAR* ..... 81

## **Bölüm 7**

### BİLİŞSEL VE YAZILIM TABANLI RADYO YAPILARI

*Fatih Yavuz ILGIN* ..... 105

## **Bölüm 8**

### ENDOKRİN HASTALIKLARININ TEŞHİSİNDE KLİNİK KARAR DESTEK SİSTEMLERİN ETKİSİ

*İnci ZAIM GÖKBAY, Seval BÜLBÜL GÖKÇEK* ..... 117

## **Bölüm 9**

### DOĞAL ATIKLARIN KOMPOZİT MALZEME OLARAK KULLANIM OLANAKLARI

*Gülşah ÖNER* ..... 131

## **Bölüm 10**

### SIVI TONERLİ ELEKTROFOTOGRAFİK DİJİTAL BASKI SİSTEMLERİNDE BLANKET SICAKLIĞI DEĞİŞİMİNİN BASKI KALİTESİNE ETKİSİ

*Serra ARSLAN, Türkün ŞAHİNBAŞKAN* ..... 145

## **Bölüm 11**

### YENİLİKÇİ NÜKLEER TEKNOLOJİ OLAN KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER VE KULLANIM ALANLARI

*Gizem BAKIR* ..... 157

## **Bölüm 12**

### KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLERİN UYGULAMAYA GEÇİRİLMESİ VE BU REAKTÖRLERİN UYGULANMAYA GEÇİRİLMESİNDE KARŞILAŞILAN SORUNLAR

*Gizem BAKIR* ..... 169



## ***BÖLÜM 1***

# **CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYON YÖNTEMİNİN MALZEME BİLİMİNDE UYGULAMALARI**

*Mehtap ERŞAN<sup>1</sup>*

*Emre GÖRGÜN<sup>2</sup>*

---

1 Doç. Dr. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü Sivas

2 Dr. Öğr. Üyesi Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Raylı Sistemler Makine Teknolojisi Bölümü Sivas

## 1. GİRİŞ

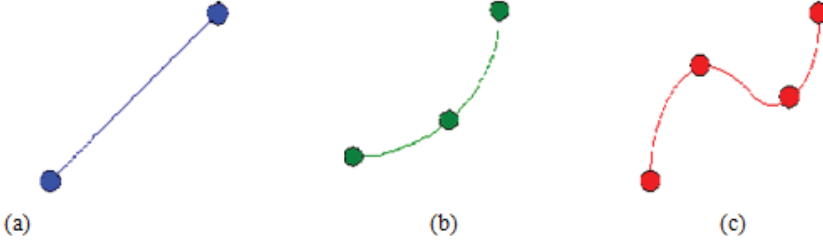
Optimizasyon, bir prosesin cevap değişkenlerine bağlı olarak sistem girdilerinin (bağımsız değişkenlerin) birbirleriyle olan etkileşimlerini ve cevap değişkenlerine olan etkilerinin tümünün değerlendirilerek sistem için en uygun koşulların belirlenmesi işlemidir. Çoğunlukla hedef değer en büyük ya da en küçük olması hedeflense de prosesin türüne göre yapılan işlemin içeriği de değişkenlik gösterir. Optimizasyon işlemi gerçekleştirilmek için geleneksel yöntemler kullanıldığında her bir değişkenin cevap değişkenleri üzerine etkisinin incelenmesi diğer girdi değişkenlerinin sabit tutulması ve çok sayıda deney yapılması ile mümkündür. Bu işlem çok fazla deney sayısı, madde ve zaman kaybı olarak karşımıza çıkmakta ve optimizasyon işlemi zorlaştırmaktadır. Ancak üretilen akıllı yazılımlar ve programlar ile optimizasyon işlemi kolaylaştırılabilmektedir. Günümüzde en çok kullanılan optimizasyon programı cevap değişkenlerini girdi değişkenlerine bağlayan, az sayıda deney ile optimizasyon yapma olanağı sunan, cevap değişkenlerini girdi değişkenlerine bağlayan polinomlar öğrenen cevap yüzey yöntemidir (CYY). CYY ilk kez G.E.P Box ve K. B. Wilson tarafından 1951’ de ortaya atılmış olan, girdi değişkenleriyle bir veya daha fazla çıktı değişkeninin arasındaki ilişkiyi inceleyen bir tasarımıdır. Bu tasarım ile deneylerle elde edilmiş verilere bağlanan polinomlar yardımıyla tasarım yapılabilir. CYY ile karmaşık sistemlerin modellenmesi yüksek dereceli polinomlar ile mümkün olup, girdi değişkenlerini (bağımsız değişken), çıktı değişkenine (bağımlı değişken) bağlayan bir modelleme yapıldığında bir eşitlik elde edilir (1).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (1)$$

$X_1$  ve  $X_2$  bağımsız değişkenleri ifade eder ve model katsayıları ( $\beta$ ) eşitlikteki her bileşen için hesaplanır. Burada  $\beta_1$  ve  $\beta_2$  sabit lineer model katsayısı  $\beta_{11}$  quadratik katsayı ve  $\beta_{12}$  interaktif etki sabiti olarak tanımlanır (Senthilkumar ve Tamizharasan, 2015). Verilere bağlı olarak gerçekleştirilen bu katsayıların hesaplanması en küçük kareler regresyonu ile mümkündür.

Eğer bir cevap fonksiyonu iki seviyeli (düşük ve yüksek) faktörlere ihtiyaç duyarsa Şekil 1.a’ daki gibi davranış sergiler. Bu tasarım modeli, basit iki seviyeli faktöryel ve kesirli faktöryel tasarımların temel varsayımıdır. Şekil 1.b’deki gibi bir cevap fonksiyonunun olması bu davranışı nitelendirmek için gerekli minimum seviye sayısının üç olması ile ifade edilir. Bireysel saf quadratik etkileri merkez noktaya bağlı ve iki seviyeli metot ile tahmin edilir. Üç-seviyeli faktör tasarımı kullanılarak, Şekil.1.c’deki basit kıvrımın tahminine izin veren bir tasarım matrisi bulunur (Lindman, 1974).

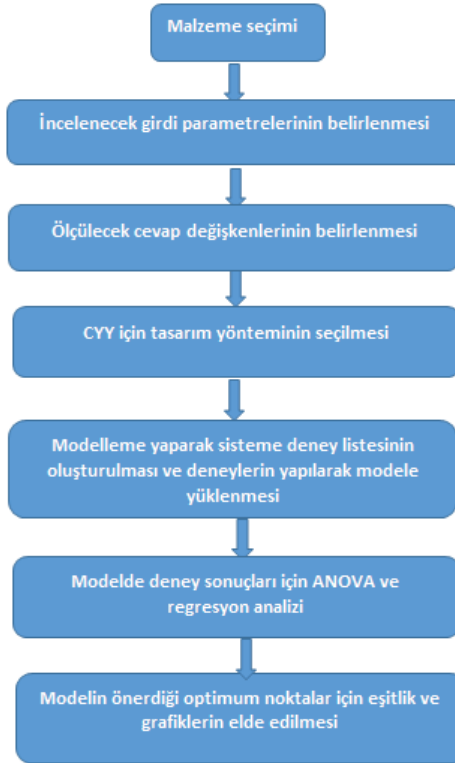




**Şekil 1.** Faktör dizilerinin fonksiyonu olarak cevapların olası (a) lineer, (b) kuadratik, (c) kübik fonksiyon davranışları

Deneylerin tasarımı ve modellenmesi bir düzen halinde, belirli bir sıralama ile gerçekleşir. Malzeme çalışmaları için, önerilen yöntem şemasına uyulması ve doğru bir modelleme yaparak cevap yüzeylerinin oluşturulması için önemlidir ( Tablo 1. ).

**Tablo 1.** Medelleme İçin Önerilen Yöntem Şeması



## 2. DENEY SAYISININ VE MODEL KATSAYILARIN HESAPLANMASI

Deney tasarımı yapılırken yapılacak deney sayısı aşağıdaki denklemler aracılığı ile hesaplanırken,  $\alpha$  bağımsız değişken düzeylerini ifade eder.  $\beta$  ise katsayı vektörüdür ve model en küçük kareler farkı yöntemi kullanılarak elde eder. Medelde N; deney sayısı, k ; bağımsız değişken sayısı ve  $n_0$  ; merkezdeki deney sayısını ifade eder (2-8). Amaç  $\beta$  katsayı vektörünü bularak model eşitliği elde etmektir (Ohata vd., 2003).

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad k < 5 \quad (2)$$

$$N = 2^{k-1} + 2k + n_0 \quad k > 5 \quad (3)$$

$$\alpha = 2^{k/4} \quad k < 5 \quad (4)$$

$$\alpha = 2^{(k-1)/4} \quad k > 5 \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_2 & x_2 & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (7)$$

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (8)$$

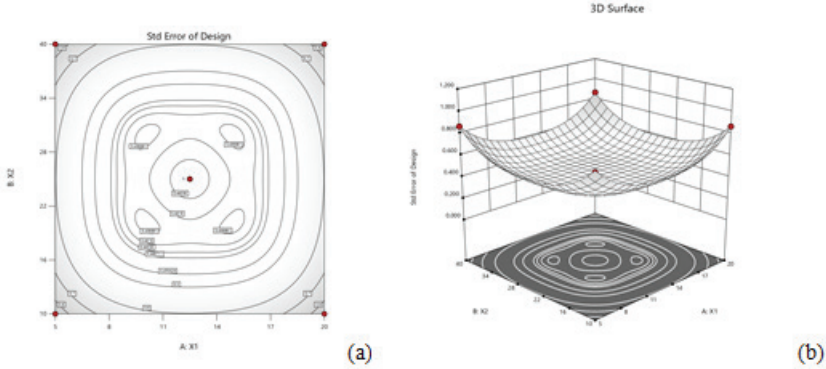
### 2.1. CYY İçin Kullanılan Tasarım Modelleri

CYY; tepki (response) değişkenine etki eden çok sayıda değişkenin olması durumunda; problemlerin analiz edilmesinde kullanılan istatistiksel tekniklerin ve matematiksel ifadelerin birleşimidir. Yeni ürünün formülasyonunda, var olan ürün tasarımının iyileştirilmesinde, süreç tasarımında, sürecin geliştirilmesinde ve iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılır. CYY genellikle Merkezi bileşke tasarımı, CCD; BBD Box-Behnken; tek faktör; Miscellaneous; Optimal; kullanıcı tanımlı ve Historical Data başlıkları altında toplanan dizayn yöntemlerinden en çok kullanılanları Merkezi bileşke tasarımı (CCD) ve üç boyutlu dizayn modeli Box-Behnken tasarımı (BBD)'dir. Bunun nedeni, girdi değişkenleri arasındaki etkileşimleri ikinci dereceden modellerle daha net göstermesidir. Optimal dizayn 1 ile 30 arasında girdi değişkeni ile modellenebilir ve esnek bir modelleme yapısında sahiptir. Definitive dizayn en az girdi değişkenli ve 4 faktörlü dizaynı temsil etmekte ve dizaynda temel etkileri göstermektedir. Ancak ikinci derece etkileri göstermekte yeterli olmayabilir.

Merkezi bileşke tasarımında (CCD), her sayısal faktör 5 seviyeye ayarlanır. Eksen noktaları artı alfa ve eksi alfa, faktöriyel noktalar ise +1 ve -1 ile merkez değeri ise 0 ile belirtilir. Bir kübün köşelerinde küp noktaları, kübün dışında yıldız noktaları ve orijinde merkez noktaları içermektedir. Kategorik faktörler eklenirse merkezi bileşke tasarımı, kategorik faktör seviyelerin her kombinasyonu için çoğalır.

Box-Behnken dizayn (BBD) ikinci dereceden polinomlara sahiptir ve bu her sayısal faktör 3 seviyeye ayarlanmıştır. Modelde doğrusal olmayan sonuçlar cevap yüzeyi grafiklerinde üç boyutlu olarak gösterilir. Üç değişken faktör için çizilen grafikte orta noktaların birleştirilmesi ile kübik yüzey elde edilir. CYY için yapılan Box-Behnken tasarımının avantajları üç boyutlu grafik çizimi ile yöntemdeki deneysel hataların görülebilmesi ve optimum nokta seçimliliğinin olmasıdır.

Şekil 2. ile CYY kullanılarak yapılan bir örnek Box Benkhen 3 faktörlü tasarımı gösterilmiştir. Tasarım ile cevap değişkenlerini ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ) girdi değişkenine (Y) bağlayan iki (a) ve üç boyutlu (b) bir tasarım yüzeyleri gösterilmiştir. İkinci dereceden etkiler kuadratik yüzeyleri oluşturmuştur.



Şekil 2. Box Benkhen tasarım için (a) kontür yüzeylerinin gösterimi (b) üç boyutlu yüzeylerin gösterimi

## 2.2. Regresyon ve Varyans Analizi

Deney verileri ile optimizasyon çalışmaları için CYY uygulandıktan ve cevap değişkenleri girilerek modelleme yapıldıktan sonra regresyon analizi yapılır. Böylece ortaya çıkan model ve eşitliğin deneysel verilere uyumu ile hassasiyeti ölçülür, ortaya çıkan denklemin değişkenler arası ilişkiyi ne derece doğru açıkladığı ortaya konur. İstatistiksel hesaplamalarla matematiksel verilerin uyumu varyans analizi (ANOVA) ile ifade edilir. ANOVA ile F-testi, model uygunsuzluğu testi ve regresyon analizi yapılarak modelin veriler için ne kadar anlamlı olduğu test edilir. Yapılacak tüm istatistiksel hesaplamalar için öncelikle regresyon katsayısı ( $R^2$ ), düzeltil-

miş regresyon katsayısı  $R^2_{adj}$  ve tahmin edilmiş çoklu belirleme katsayısı  $R^2_{Pred}$  belirlenmektedir. Ayrıca modelde DF serbestlik derecesini, PRESS tahmin edilmiş kalıntı hata kareler toplamını ifade etmektedir ve ANOVA ile elde edilen verilerin güvenilirliği hakkında bilgi edinilir. ANOVA'da anlamlılık düzeyinin 0,05 ve 0,01 ve hata yapma olasılığı %1-5 aralığında olması istenir. CYY de elde edilen model değerler ile deneysel değerler arasındaki fark deneysel hatayı ya da matematiksel ifadenin uyumsuzluğunu ifade eder. Buradan kaynaklanan hatalar ise regresyon modeli için önemli anlamlıdır (Şenol ve ark 2021).

### 2.3. Malzeme Biliminde CYY Uygulamaları

Malzeme biliminin gelişmesi ile artan talep ve üstün özellikli, yüksek mukavemetli kompozitlerin sentezlenebilir olması bu bilim dalının gelişmesine neden olmuştur (Kansal ve ark., 2007). Özellikle alüminyum gibi hafif ve tribolojik özellikleri geliştirilebilir metallerin geliştirilmesi endüstriyel önem arz etmektedir (Surappa, 2003). Literatürde kompozit hazırlamak için farklı uzunluklardaki bazalt lifleri (BF'ler), güçlendirilmiş fosfoalçı bazlı kompozitleri (BFRPGC'ler) hazırlamak için, farklı oranlarda yeni bir fosfoalçı bazlı kompozit (PGC) ile karıştırılmış, tek faktör testi ve iki faktörlü üç faktörlü yanıt yüzeyi metodolojisi (CYY) testi tasarlanmış ve model 13 adet deney önermiştir. BFRPGC'lerin mekanik özelliklerini, gözenekliliğini, su direncini, kompozitlerin arıza modunu ve mikro morfolojisini belirlemek için deneysel testler yapılmıştır.  $Y_1$  basınç dayanımı,  $Y_2$  eğilme mukavemeti,  $Y_3$  gözeneklilik ve  $Y_4$  su emme değerlerini ifade etmektedir. Kompozitlerin optimizasyonu iki faktör ve 3 cevap değişkenine bağlı olarak gerçekleştirilmiş CYY testi ile of the BFRPGCs with 18  $\mu$ m BF's dizaynı için fiber uzunluğu (A) ve boyu (B) girdi değişkeni polar olarak seçilmiştir (Xie et al., 2022).

Alama ve ark. 2020., yaptıkları çalışmada Alüminyum matrix kompoziti, ağırlıkça %x SiC (x = 5, 7.5 ve 10) kullanılarak mikropartiküller toz metalurjisi yolu ile sentezlenmiş ve mikrosertlik değerleri (VHN) Al/SiC kompozitlerinin yüzdesine bağlı olarak optimum değerleri CYY kullanılarak araştırılmıştır. Deneylerin tasarımı CYY 'ye dayalı, merkezi bileşke tasarım yöntemi izlenerek (CCD) yapılmıştır. Ampirik modeller ile ilişkiler kurmak için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Cevap değişkeni olarak kompoziti sertliği ve çok değişkenli girdi değişkenleri SiC konsantrasyonları ve sinterleme sıcaklığı seçilmiştir. ikinci dereceden bir modelin kontrol parametrelerinin, CCD tasarımları ekstra merkez ve eksen noktaları ile güçlendirilmiştir. Modelde önerilen 13 adet deneyin sonucunda yapılan optimizasyon ile optimizasyon koşullarında Taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), elemental haritalama, X-ışını kırınımı (XRD) ve optik mikroskopi yapılarak malzeme karak-

terizasyonu yapılmıştır. Çıktı parametreleri/yanıt değişkenleri sinterleşme yoğunluğu ( $\text{g/cm}^3$ ) ve mikrosertlik (VHN) seçilmiştir.

$$\text{Mkrosertlik} = +56.32 + 56.32A - 0.3233B - 0.7000AB - 8.53A^2 - 0.0407B^2$$

$$\text{Sinterlenmiş yoğunluk} = 2.55 + 0.0367A + 0.0233B - 0.0025AB - 0.0841A^2 + 0.0059B^2$$

Elde edilen eşitliklerle quadratik modele uyum %78,81 olarak bulunmuştur (Alama ve ark., 2020). Preetham ve ark. (2021), Hibrit %5  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve ağırlıkça %5 Grafit partikülleri içeren kompozit metal bileşikleri, hibrit metal matris bileşenleri, sıvı eriyik işlemi olarak adlandırılan yöntemle oluşturulmuştur. Deney tasarımı için CYY'nin dört faktörlü-3 seviyeli Box Behnken tasarımı (BBD) kullanıldı. Çalışmada girdi değişkeni olarak 4 faktör seçilmiştir. Bunlar; Darbe Açma Süresi (Ton) Darbe Kapanma Süresi (Toff), Tel Besleme (WF) Tel Gerilim (WT olarak seçilmiş, cevap değişkeninin yüzey pürüzlülüğü olduğu modelde 27 adet deney model tarafından öngörülmüştür. CYY'de, BBD özellikle ikinci dereceden model parametrelerin belirlenmesi için mümkün olan en az sayıda deney içeren modellemeyi yapmıştır. Bu çalışmada kullanılan tasarım dört parametre ve 27 çalıştırmadan oluşmaktadır. Yanıt tabloları ve grafikleri, ANOVA sonuçları ve 3 boyutlu yüzey çizimleri. Deneysel sonuçlar doğrulanmış ve yapılan doğrulama testleri ile sonuçların deneylerden elde edilen bulgularla daha iyi korelasyon gözlemlenmiştir. Shozib ve ark., (2021), Design-Expert" yazılımı aracılığıyla mikrosertlik deneysel sonuçları, CYY ve merkezi bileşke tasarımı modeli kullanılarak geliştirilmiştir. Bu çalışmada, sentezlenen Ni-P-TiO<sub>2</sub> kaplı alüminyum kompozit mikrosertliği üzerine modelleme yapılmış ve kaplanmış numuneler yüzey morfolojisi ve X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Model P-değeri 0,0001 ve F değeri 35,06 olarak bulunmuş bu ise modelin anlamlı olduğunu göstermiştir. ANOVA model analizi, NiSO<sub>4</sub> (A), NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub> (B) and TiO<sub>2</sub> (C) girdi değişkenlerinin cevap değişkeni üzerinde doğrudan etkin olduğunu ve interaktif etkilerin olmadığını göstermiştir.

Pugazhenthı ve ark (2021), alminyum ve alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için yaptığı çalışmada Al-TiC üretimi ve optimizasyonu koşullarını CYY kullanarak modellemiştir. Minitab 17 ile CYY uygulanmış ve deşarj akımı (A), darbe süresi (B), yıkama basıncı (C)'na bağlı olarak aşınma oranı yapılan 20 adet deneyle optimize edilmiş ve girdi değişkenlerinin aşınma oranı üzerinde interaktif etkileri görülmüştür (Pugazhenthı ve ark., 2021). Metal şekillendirme simülasyonları üretim süresi ve maliyetini en aza indirmek, deformasyon mekaniği ve sınırlayıcı faktörleri incelemek ve değerlendirmek için kullanılır. Chan ve ark., (2015), gerilim altındaki bir döküm numunesinin makroskopik geri-

lin-gerinim davranışını tahmin etmek için örnek bir hacim elemanı (RVE) kullanmıştır. Bu amaçla çeşitli mikro boşluklu uzamsal konfigürasyonlara sahip RVE modelleri oluşturulmuştur. CYY kullanılarak RVE'nin boyutu ( $X_1$ ), mikro boşlukların şekli ( $X_2$ ) ve mikro boşlukların konumu ( $X_3$ ) girdi değişkeni olarak seçilmiştir. Cevap değişkeninin akma mukavemeti ( $Y_1$ ) ve nihai gerilme mukavemeti UTS ( $Y_2$ ) olarak modellendiği sistemde Box-Benkhen deneysel tasarımı ile 15 deney önerilmiştir. Modelede  $Y_1$  'mean' modelle ifade edilirken,  $Y_2$  cevap değişkenlerine bağlanan interaktif ve ikinci dereceden terimlerle başarılı bir şekilde ifade edilmiştir. Senthilkumar ve ark. (2014), ise çelikte kesme hızı, besleme hızı ve kesme derinliğine bağlı olarak çoklu tepkileri optimize etmek için CYY ve merkezi bileşke tasarımı (CCD) yapılan 20 deney ile cevap değişkenleri modelleyerek bu tasarım yönteminin uygulanabilirliğini göstermiştir.

## SONUÇLAR

Yapılan çalışmalara bakıldığında CYY malzeme ve metal teknolojisini geliştirilmesi ve üretim tekniklerinin geliştirilmesinin optimizasyonu için uygun bir yöntem olmakla birlikte en çok karşılaşılan modellemeler Box-Benkhen ve Merkezi Bileşke tasarımı'dır. CYY kullanılarak malzeme üretim teknolojisinin optimizasyonunda zamandan ve malzemedan tasarruf edilmektedir. Böylece bilimsel çalışmaların geliştirilmesi hız kazanmaktadır. Üstelik modelleme çalışmalarının kullanılması ile girdi parametreleri arasındaki interaktif etkiler ortaya çıkmakta ve cevap değişkenini girdi değişkenine bağlayan modeller ile girdi parametrelerinin deneysel çalışmaların sonuçları üzerindeki etkilerinin lineer ve quadratik etkileri anlaşılmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Caplice, E., & Fitzgerald, G. F. (1999). Food fermentations: Role of microorganisms in food production and preservation. *International Journal of Food Microbiology*, 50, 131–149.
- Senthilkumar, N. Tamizharasan, T. (2015). Flank wear and surface roughness prediction in hard turning via artificial neural network and multiple regressions, *Austr. J. Mech. Eng.* 13 (1) 31–45.
- Shozib Imtiaz A., Ahmad A., Md Shokor A. Rahaman, Abdul-Rani A., Alam, M. A., Beheshti M., Taufiqurrahman I. (2021).Modelling and optimization of microhardness of electroless NiePeTiO<sub>2</sub> composite coating based on machine learning approaches and RSM *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1010-1025.
- Pugazhenthir R., Sreeram D., Scaria Clement T. Anbuechezhiyan G., Nanthakumar P. (2021). Effect of process parameters on machining of Al -TiC metal matrix composites using RSM 46, (9), 3282-3287.
- Surappa M.K., (2003). Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities. *Sadhana*, 28 (1–2) 319–334.
- Kansal H.K., Singh S., Kumar P., (2005). Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology, *J. Mat. Pro. Tech.* 169 427–436.
- Mahapatra S.S., Patnaik A., (2007). Optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) process parameters using Taguchi method, *Int. J. Adv. Manu. Tech.* 34, 911–925.
- Preetham N.S., Muniappan A., Jayakumar K.S., Maridurai T. (2021). Experimental investigation of machining conditions on Surface Roughness in WEDM of Aluminum hybrid composite by RSM *Materials*, in press, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.328>
- Alama M. A., Hamdan H. Yaa, Azeema M., Hussaina P. B., Bin Salit M. S., Khana R., Arif S., Ansari A. H. (2020) Modelling and optimisation of hardness behaviour of sintered Al/SiC composites using RSM and ANN: a comparative study. 9,(6), 14036-14050.
- Xie L, Zhou Y, Xiao S, Miao X, Murzataev A, Kong D , Wang L., (2022). Research on basalt fiber reinforced phosphogypsum-based composites based on single factor test and RSM test, *Construction and Building Materials* (316), 126084
- Ohata T., Nakamura Y., Katayama T., Nakamachi E. (2003). Development of optimum process design system for sheet fabrication using response surface method. *Journal of Materials Processing Technology.* 143-144,667-672.
- Lindman, H.R. (1974), *Analysis of variance in complex experimental designs*. San Francisco: W. H. Freeman & Co.

- Şenol H., Ersan M., Görgün E. (2020). Optimization of temperature and pretreatments for methane yield of hazelnut shells using the response surface methodology. *Fuel* (271), 117585.
- Chan L., Lu X., Yu K. (2015). Multiscale approach with RSM for stress–strain behaviour prediction of micro-void-considered metal alloy. *Materials & Design*. 83, 129-137.
- Senthilkumar N., Tamizharasan T., Gobikannan S. (2014). Application of Response Surface Methodology and Firefly Algorithm for Optimizing Multiple Responses in Turning AISI 1045 Steel. *Arab J Sci Eng*. 39, 8015–8030.



## **BÖLÜM 2**

### **MİKROÇİPLERİN BİRLEŞİK JET ETKİSİYLE SOĞUTULMALARININ ARAŞTIRILMASI**

*Koray KARABULUT<sup>1</sup>  
Doğan Engin ALNAK<sup>2</sup>*

1 Doç. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler M.Y.O., Elektrik ve Enerji Bölümü, Doğalgaz ve Tesisatı Teknolojisi Programı, kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr, (Sorumlu Yazar), ORCID: 0000-0001-5680-0988

2 Doç. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Enerji Sistemleri A.B.D., dealnak@cumhuriyet.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0126-1483

## 1. GİRİŞ

Mikroçipler, günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte tüm elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. Akıllı televizyonlardan, bilgisayarlara, buzdolaplarından, insansız hava araçları ve motorlu taşıtlara kadar günlük hayatın her aşamasında karşımıza çıkmaktadır. Yüksek hıza sahip cihazlar elde edebilmek amacıyla yarı iletken levhalar üzerine çok sayıda yerleştirilen mikroçipler beraberinde çözülmesi gerekli önemli bir problem olan ısınma sorununu gündeme getirmektedir. Bununla birlikte, mikroçiplerin küçültülebilmeleri teknolojinin elverdiği ölçüde soğutulabilme kapasite-  
 rindeki artışa bağlıdır. Bu nedenle, bu elemanların soğutulmasında çeşitli soğutma teknikleri uygulanmaktadır. Çapraz akış ile soğutma yöntemi, bu tekniklerden en yaygın olarak bilinenidir. Bu yöntem, soğuk akışkanın bir fanla tüm bileşenler üzerine gönderilmesi ve bu sayede elektronik bileşenlerinin bütünüünün soğutulması esasına dayanmaktadır. Ancak, bu metot bütün devre elemanlarının soğutulması esasında olduğundan çok yüksek sıcaklıklardaki bileşenlerin soğutulmasında başarısız olabilir. Bir diğer soğutma yöntemi de çarpan jetle soğutmadır. Bu yöntemde, soğuk akışkan lüleyle sıcaklığı yüksek bir elemana yersel şekilde püskürtülür. Çarpan jet ile sıcaklığı yüksek bir devre bileşeninin soğutulması sağlanabilirken, devrenin bütünüünün soğutulmasında yetersiz kalabilmektedir. Bir elektronik devrede sıcaklıkları birbirlerinden oldukça farklı birden çok eleman bulunabilir. Bu sebeple, tek çeşit soğutma yöntemi ile bütün devreyi güvenli şekilde tutabilecek şartlara erişilmekte sıkıntı olabilir. Bu nedenle; çarpan jet ve çapraz soğutma yönteminin bir arada işleme alınması soğutma kapasitesi yüksek faydalı bir durum oluşturabilir. Çapraz akışla devre elemanları bir bütün olarak belirli bir aşamaya kadar soğutulabilirken, devrede sadece çok yüksek sıcaklıktaki elemanlar ise çarpan jet akışıyla noktasal olarak soğutulabilmektedir (Kılıç, 2018; Teamah ve ark., 2015).

Literatürde, yalnızca çapraz akış veya yalnızca jet akışın değerlendirildiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma için incelenen model daha ziyade jet akışa benzediğinden, literatür incelemesinde daha çok jet akış üzerine odaklanılmıştır. Bununla birlikte, literatürde çarpan jetler hakkında birçok sayısal ve deneysel araştırma mevcuttur. Bu çalışmalarda ise temel olarak çarpan jetler için kullanılan akışkanın seçimi, akış alanına ait geometri, türbülanslı model, Reynolds sayısı, jet mesafesi ve ısı akısı gibi değişkenlerin devre bileşenlerinden olan ısı transferine etkileri üzerinde incelemelerde bulunulmuştur. Bunun yanı sıra, çapraz akış ve çarpan jet akışın birlikte kullanıldığı soğutma yöntemleriyle ilgili yapılan çalışmalar sınırlı olup, akışkanın kanal içerisindeki ısınmış yüzeylere yönlendirilmesine ilişkin herhangi bir çalışmaya elde edilen literatürde rastlanmamıştır.

Hadipour ve Zargarabadi (2018) çarpan dairesel bir jet akışının sabit

ısı akılı iç bükey bir yüzey üzerindeki akış ve ısı transferi özelliklerini, değişik jet-plaka arası oranlarında sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Farklı  $H/D$  (kanal yükseklik/jet giriş çapı) oranları,  $Re$  sayıları ve jet çapı değerlerinde araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Sabit  $Re$  sayısında jet çapı artışıyla ısı transferinin arttığını görmüşlerdir. Demircan (2019) elektronik devre elemanından olan ısı transferini çarpaz akış-çarpan jetle sayısal olarak incelemiştir.  $Re$  sayısı, jet - kanal hız oranlarının farklı değerlerinde araştırmalar yapmışlardır. Çalışmasında,  $Re$  sayısı ve hız oranlarının iyileşmesiyle ısı transferinin kayda değer oranda arttığı sonucuna ulaşmıştır. Mergen (2014),  $3500 \text{ W/m}^2$  lik sabit ısı akısında elektronik bir elemandan çarpan jet-çarpaz akışla olan ısı transferini incelemiştir. Çalışmasında jet  $Re$  sayısı/kanal  $Re$  sayısı ( $Re_j/Re_k$ ) oranı azaldıkça ısı transferinin düştüğünü saptamıştır. Maghrabie ve ark., (2017) kanal boyunca sıralı yedi adet devre elemanından meydana gelen bir sistemin çarpan jet-çarpaz akış kombinasyonu ile ısı transferini sayısal olarak değerlendirmişlerdir. Isı transferi üzerinde jet konumu değişikliğinin etkisini belirlemişlerdir.

Bu çalışmada, sabit ısı akılı bakır plakalı taç desenli yüzeylerin çarpan jet-çarpaz akış tekniği ile farklı kanatçık açılarına göre soğutulması sayısal bir yöntem ile incelenmiştir. Sayısal araştırma, sürekli ve üç boyutlu  $k-\varepsilon$  türbülans modeli düşünülerek enerji ve Navier-Stokes denklemlerinin Ansys-Fluent programı kullanılarak çözülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kanaldaki akışı sıcaklığı artmış desenli yüzeylere yönlendirmede kullanılan kanatçık açıları  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  olup, kanatçığın uzunluğu  $D$  jet giriş çapına eşittir. Akışkan olarak kanalda su kullanılmış olup, kanatçık ve kanalın alt ve üst yüzeyleri adiyabatiktir. Desenli yüzeyler,  $1000 \text{ W/m}^2$  lik sabit ısı akısına sahiptir. Jet - plaka arası mesafe ( $H$ )  $4D$  olup, akışkan Reynolds sayısı aralığı  $5000-9000$ 'dir. Kanala referans alınan çalışmalar gözetilerek üç adet desenli yüzey yerleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, literatürdeki deneysel çalışmanın sonuçlarıyla kıyaslanmış ve aralarında oldukça iyi bir uyum saptanmıştır. Sonuçlar, taç desenli her bir desen sırası için  $Nu$  sayısının ve yüzey sıcaklığının ortalama değişimleri şeklinde verilmiştir.  $Re$  sayısının  $9000$  olduğu değerde kanatçiksız ve  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  kanatçık açılı kanallar için kanal boyunca birleşik jet akışın hız ve sıcaklık konturları karşılaştırılmıştır.

## 2. SAYISAL ARAŞTIRMA

Taç şekilli yüzeylerdeki birleşik jet akışın zorlanmış taşınım ısı transferinin çözümünde Ansys-Fluent programı kullanılmıştır.

Akış ve ısı transferi, aşağıdaki gibi gövde kuvvetinin bulunmadığı sürekli, kanaldaki birleşik jet akış nedeniyle gerçekleşen türbülanslı akış için kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinden zaman ortalamalı olarak türetilen diferansiyel denklemlerin çözümleriyle yapılmış-

tır (Wang ve Mujumdar, 2015; Karabulut ve Alnak, 2021; Alnak ve ark., 2021).

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad [1]$$

Momentum denklemi

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad [2]$$

Enerji denklemi

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{T' u'_i} \right] \quad [3]$$

Türbülans kinetik enerji denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad [4]$$

Türbülans kinetik enerji yutulma terimi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad [5]$$

Bu denklemlerde,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $k$  türbülanslı akışın kinetik enerjisini belirtilirken,  $u_i$  x, y ve z yönlerindeki hız bileşenlerini,  $\mu$  akışkanın viskozitesini,  $\mu_t$  (1) türbülanslı kinetik enerji Pr sayısını göstermektedir. Türbülanslı kinetik enerji üretimi ( $G_k$ ) ve türbülanslı akışın viskozitesini gösteren eşitlikler aşağıdaki gibidir (Wang ve Mujumdar, 2015; Karabulut ve Alnak, 2021).

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad [6]$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad [7]$$

Türbülans yutulma Pr sayısı  $Pr_\varepsilon$  ile belirtilirken,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$  ve  $\sigma_\varepsilon = 1.3$  değerlerine sahip olan eşitliklerdeki katsayılarıdır (Saleha, 2015).

Ortalama ısı taşınım transfer katsayısı  $h$ , Eş. 8 ve Nusselt sayısı ( $Nu$ ) ise Eş. 9 ile hesaplanmaktadır (Incropera, 2007).

$$h = \frac{q''}{T_y - T_a} \quad [8]$$

Nu sayısı

$$-k_a \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_y = h(T_a - T_y) \quad \text{ve} \quad Nu = \frac{h(3m)}{k_a} \quad [9]$$

Bu eşitliklerde,  $T_a$  ve  $T_y$  sırasıyla akışkanının ve elemanın ortalama olarak yüzey sıcaklıklarını ( $K$ ),  $k_a$  akışkanın ısı iletim katsayısını ( $W/m.K$ ),  $3m$  akışkanın temas ettiği elemanın toplam yüzey uzunluğunu ( $m$ ),  $h$  ve  $h_m$  ise sırasıyla elemanın noktasal ve ortalama ısı taşınım katsayısını ( $W/m^2.K$ ),  $n$  ise yüzeye dik yön olup ortalama  $Nu$  sayısı ( $Nu_m$ ) aşağıda belirtilen eşitliklerden bulunmaktadır.

Elemanın ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_m = \frac{1}{3m} \int_0^{3m} h dx \quad [10]$$

Elemanın ortalama  $Nu$  sayısı

$$Nu_m = \frac{h_m(3m)}{k_a} \quad [11]$$

Kanalın hidrolik çapı

$$D_{kh} = \frac{4A_k}{P_k} = \frac{4(H.W)}{2(H+W)} \quad [12]$$

Bu eşitlikte,  $A_k$  ve  $P_k$  sırasıyla kanalın kesit alanı ve ıslak çevresini gösterirken, kanalın yükseklik ve genişliği ise  $H$  ve  $W$  ile temsil edilmektedir. Jet giriş çapı  $D$ , dairesel girişli jet hidrolik çapına  $D_{hjet}$  eşittir.

Kanalın ve Jetin  $Re$  sayıları ise sırasıyla Eş. (13) ve (14) kullanılarak belirlenmektedir.

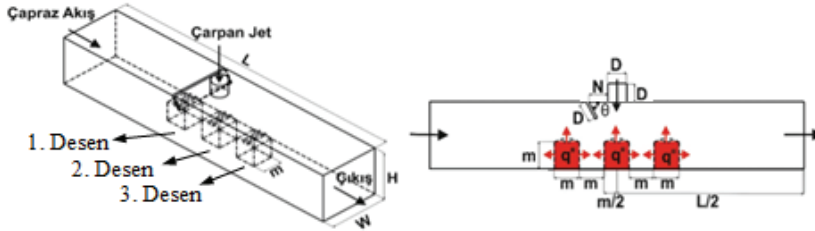
$$Re_k = \frac{\rho_a V_k D_{hk}}{\mu_a} \quad [13]$$

$$Re_j = \frac{\rho_a V_j D}{\mu_a} \quad [14]$$

Bu eşitliklerde, akışkanın kanal ve jet akış hızları sırasıyla  $V_k$  ve  $V_j$  (m/s) ile gösterilmektedir.

### 3. DESEN GEOMETRİLERİ

Çalışmadaki çarpan jet-çapraz akışlı kanal ve kanaldaki taç desenli yüzeylere sahip elemanların ölçüleri ve sınır şartları Şekil 1’de verilirken, kanalın boyutsal ölçüleri ise Tablo 1’de sunulmuştur. Bunun yanı sıra, bu çalışmadaki kabuller şu şekildedir: a) Sürekli, üç boyutlu ve türbülanslı akış hacmi kullanılmıştır, b) Sıkıştırılmaz akışkan olarak su, hem jet hem de çapraz akış akışkanı olarak kullanılmıştır, c) Akışkanının ısı özellikleri sabit olup, sıcaklıktan bağımsızdır, d) Kanalın ve kanatçığın yüzeyleri adyabatiktir, e) Akışkan olarak kullanılan su ve desenli yüzeylerde ısı kaynağı bulunmamaktadır.



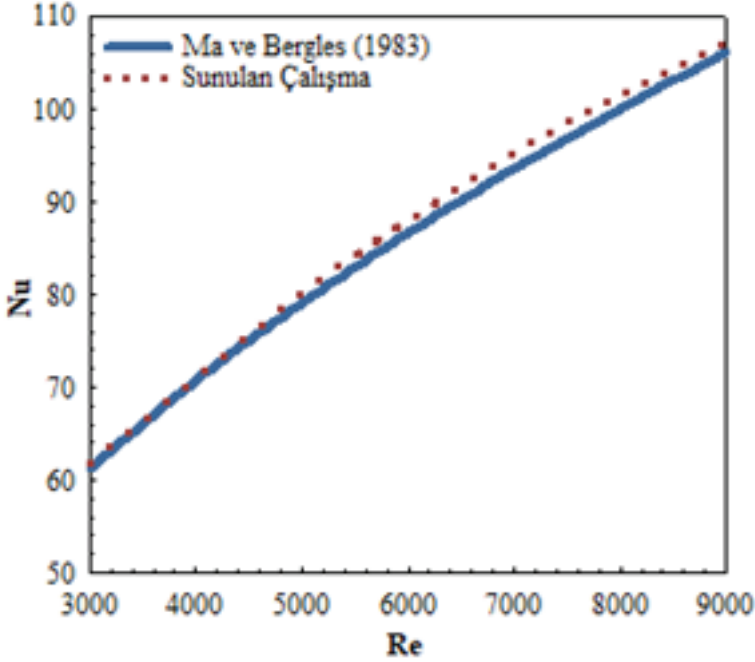
Şekil 1. Taç Şekilli Birleşik Jet Akışlı Kanalların Görünüşleri

Tablo 1. Kanaldaki Boyutsal Ölçüler

<b>Kanalın Ölçülendirilmesi</b>	
<b>D</b>	15 mm
<b>L</b>	66D
<b>W</b>	4D
<b>H</b>	4D
<b>m</b>	20 mm
<b><math>\theta</math></b>	60°, 90°
<b>N</b>	D

### 4. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Çalışmada, Şekil 2’de gösterildiği gibi sadece jet akışın olduğu durumda farklı Reynolds sayılarında incelemelerde bulunularak ulaşılan sonuçlar ile Ma ve Bergles (1983)’in deneysel incelemeleri sonucunda ulaşılanları bağıntı kullanılarak ( $\overline{Nu} = 1.29 Re^{0.5} Pr^{0.4}$ ) edinilen sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılmış ve Ma ve Bergles (1983)’in deneysel sonuçları ile sunulan çalışmanın sonuçlarının uyumlu oldukları belirlenmiştir.



Şekil 2. Sunulan Çalışma ve Ma ve Bergles (1983)'in Sonuçlarının Kıyaslanması

Ağ sayısına bağlı  $Nu$  sayısının değişimini belirlemek kaydıyla kanaldaki en uygun sayıdaki ağ elemanı belirlenerek kanatçıksız birleşik jet akışlı kanaldaki ağ sayısının  $Nu_m$  üzerindeki etkisi farklı Reynolds sayılarında Tablo 2' de sunulmuştur. Buna göre kanatçıksız kanal için 2022840 adet ağ elemanının güvenilir ve doğru sonucu vereceği bulunmuştur.

**Tablo 2.** Ağ Elemanı Sayısına Bağlı Olarak  $Nu_m$ 'nin Reynolds Sayısıyla Değişimi

Ağ elemanı sayısı	Re = 5000 $Nu_m$	Re = 7000 $Nu_m$	Re = 9000 $Nu_m$
1758412	86.48	108.84	127.40
2022840	86.52	108.88	127.43
2245786	86.52	108.87	127.42

Şekil 3'de kanatçıksız ve 60° ve 90° kanatçık açılına sahip kanallarda bulunan taç desenli bakır plakalı yüzeylerin ortalama  $Nu$  sayılarının farklı  $Re$  sayılarına ( $Re = 5000, 7000$  ve  $9000$ ) göre değişimleri verilmektedir. Kanatçıksız durumda kanaldan gelen çarpaz akış ve ikinci sıradaki desen (Desen 2) harici çarpan jet etkili bir şekilde desenli yüzeylere yön-

lendirilemediğinden bu durumda tüm desen sıraları için en düşük Nu sayısı değerlerine erişilmektedir. Bunun yanı sıra, kanala kanatçık eklendiğinde çapraz akış-çarpan jet birleşik jet etkisiyle akışkan soğutulacak desenli yüzeylere daha iyi ynlendirilebildiğinden ısı transferi dolayısıyla ortalama Nu sayısı değerleri artmaktadır.  $Re = 7000$  değerinde Desen 2 için  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  kanal kanatçık açılı durumlarda kanatçıksız duruma göre sırasıyla %8.67 ve %18.51'lik artışlar elde edilmektedir. Desen 2'de kanatçıksız duruma göre Nu sayısı için elde edilen bu artış miktarları, Desen 1 ve Desen 3'e göre daha fazla olmaktadır. Çünkü kanatçık etkisiyle çapraz akış-çarpan jet birleşik etkisinin en fazla olduğu desen sırası Desen 2 olmaktadır. Nu sayısı grafiklerinden de görülebildiği gibi kanalda son sırada bulunan Desen 3 için kanatçıksız ve kanatçıklı desenler için elde edilen Nu sayısı değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır.

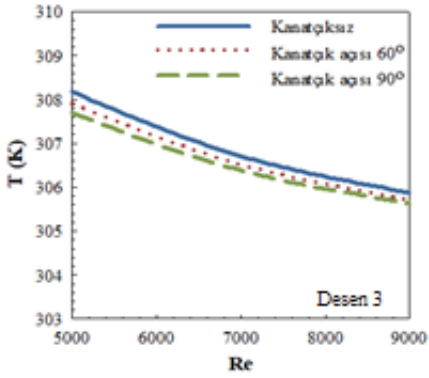
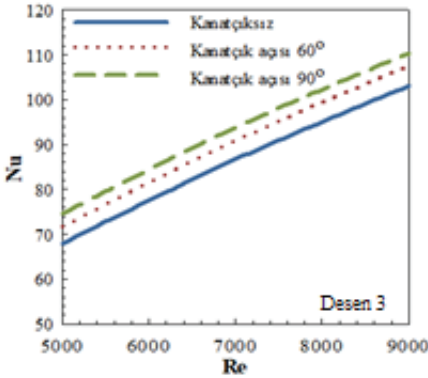
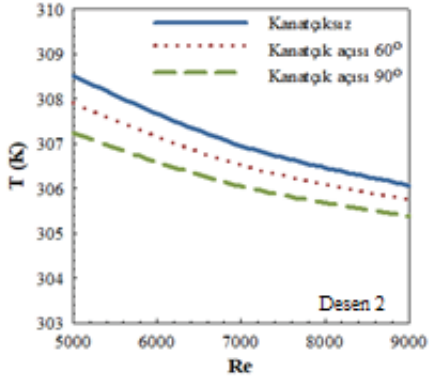
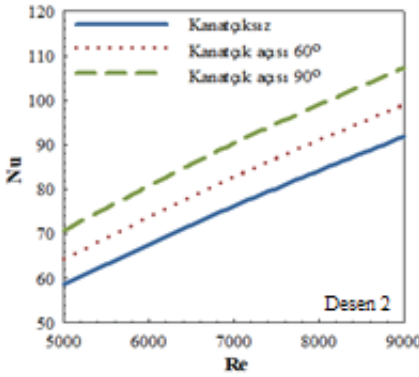
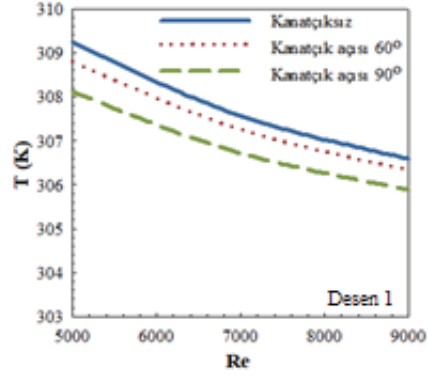
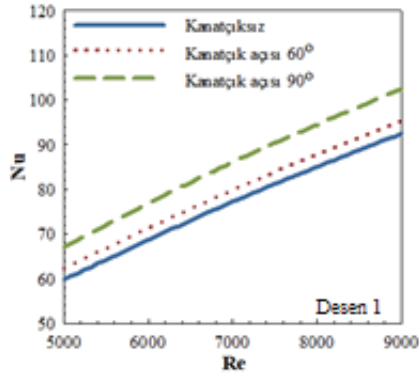
Desenli yüzeylere ait ortalama yüzey sıcaklığı değişimleri  $Re$  sayısı ve kanal kanatçık durumlarına göre (kanatçıksız,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  kanatçık açılı) Şekil 4'de gösterilmektedir.  $Re$  sayısının artışına bağlı olarak yüzeylerden olan ısı transferi oranı arttığından desenli yüzeyler soğumakta ve buna bağlı olarak yüzey sıcaklık değerleri azalmaktadır. Tüm desenli yüzeyler için en yüksek yüzey sıcaklık değerlerine kanatçıksız durumda ulaşılırken, kanala kanatçık eklenmesiyle yüzey sıcaklıkları artan ısı transferiyle azalmaktadır. Ayrıca, kanal kanatçık açısı  $90^\circ$  olduğunda kanatçık ile desenli yüzeyler arasında jet akış etkisi olduğuundan kanatçıksız ve  $60^\circ$  kanal kanatçık açılı durumlara göre daha düşük sıcaklık değerlerine ulaşılmaktadır. Ayrıca en düşük yüzey sıcaklık değerlerine  $90^\circ$  kanal kanatçık açılı ikinci sıradaki Desen 2'de erişilmektedir.

Şekil 5'de  $Re = 9000$  için kanatçıksız ve  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  kanatçık açılı kanallarda bulunan ta desenli yüzeylerin (a) hız konturu ve (b) sıcaklık konturunun dağılımları verilmektedir. Kanatçıksız durumda çapraz akışın olduğu kanal girişine göre birinci sıradaki Desen 1 yalnızca çapraz akışın etkisinde iken ikinci ve üçüncü sıralardaki Desen 2 ve Desen 3 ise çarpan ve çapraz akışın birleşik etkisi altındadırlar. Buna bağlı olarak sıcaklık dağılımlarından da görülebildiği gibi Desen 2 ve Desen 3 etrafında Desen 1'e göre daha fazla değişim olmaktadır. Kanala arpan jetin olduğu yüzeyle  $60^\circ$  açı yapacak Şekilde kanatçık yerleştirildiğinde çarpan jet-çapraz akış birleşik jet etkisi yüzeylere daha iyi ynlendirilebilirken desenli yüzey-jet arası kesit daraldığından Desen 1 zerindeki jet etkisi de artmaktadır. Ayrıca, kanallarda çarpan jetin üst sağ tarafında oluşan yeniden dolaşım bölgelerinin jet akışı desenli yüzeyler üzerine yönlendirdiği de görülebilmektedir. Bu bölgeler, akışın kendi içerisinde dolaşım halinde olduğu kısımlardır. Bu nedenle, özellikle desenler arası oyuk bölgelerinde eğer yeterli akışkan hareketliliği sağlanamazsa akışkan sıcaklıkları artarak ısı transferine olumsuz yönde katkı sağlanmaktadır. Kanala  $90^\circ$  aı



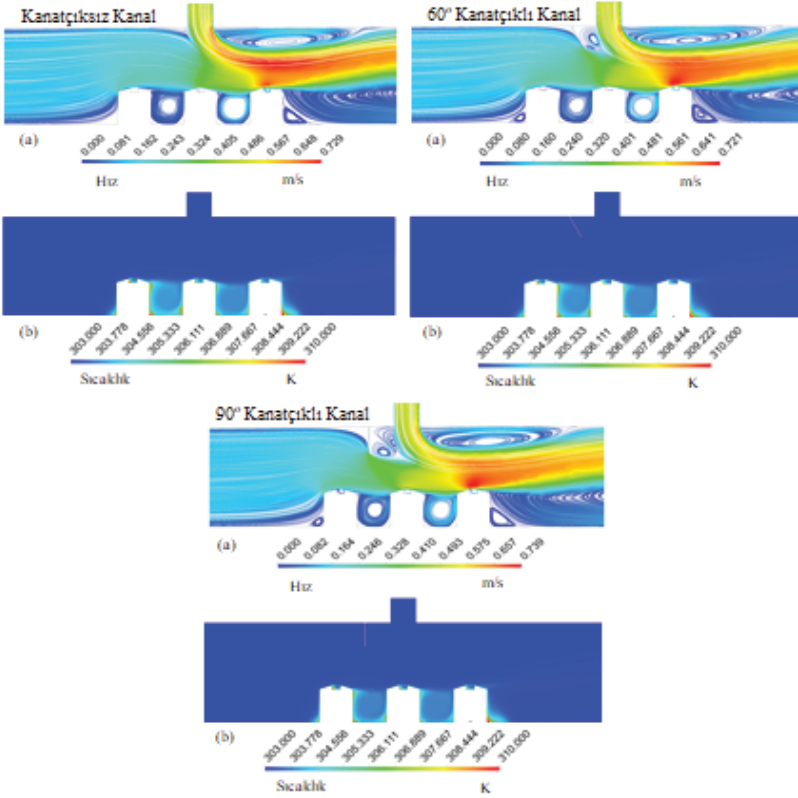
değerinde kanatçık eklendiğinde ise özellikle Desen 2 üzerinde çarpan jet-çapraz akış birleşik jet etkisi artarken, Desen 1 için de akış kesit alanı daralması nedeniyle çapraz akış desenli yüzey üzerinde jet akış etkisi göstererek yüzey etrafında akışkan sıcaklığını azaltmaktadır. Ayrıca, özellikle Desen 3'ün sağ alt köşelerinde oluşan yeniden dolaşım bölgeleri nedeniyle akışkan sıcaklığındaki artışlar dikkati çekmektedir. Yapılacak uygun desenli yüzey tasarımlarıyla bu etkiler minimuma indirilmelidir.

Tablo 3'de kanalda bulunan üç taç desenli yüzeyin ortalama Nu sayısı ( $Nu_m$ ) ve ortalama yüzey sıcaklığı ( $T_m$ ) değerleri sunulmaktadır. Tabloda da görüldüğü gibi kanala kanatçık eklendiğinde ortalama Nu sayısı değeri artarken yüzey sıcaklık değeri düşmektedir. Ayrıca, en yüksek ortalama Nu sayısı değerine çarpan jet-çapraz akış birleşik jet etkisinin en fazla olduğu 90° kanal kanatçık açılı durumda ulaşılmaktadır. 90° kanatçık açılı durumda kanatçiksiz duruma göre  $Nu_m$  değerinde %12.54'lük bir artış elde edilirken, bu artış miktarı 60° kanatçık açısı için %5.62 olmaktadır. Buna bağlı olarak da en düşük yüzey sıcaklığı değerlerine 90° kanatçık açılı durumda ulaşılmaktadır.



**Şekil 3.** *Desenli Yüzeyle Ait Ortalama Nu Sayılarının Kanatlık ve Desen Sırası Durumuna Göre Re Sayısı ile Değişimi*

**Şekil 4.** *Desenli Yüzeyle Ait Ortalama Yüzey Sıcaklıklarının Kanatlık ve Desen Sırası Durumuna Göre Re Sayısı ile Değişimi*



**Şekil 5.** Kanatçık Durumuna Göre  $H = 60$  mm ve  $Re = 9000$  için Desenli Yüzeylerin (a) Hız (b) Sıcaklık Konturu Dağılımları

**Tablo 3.**  $Re = 7000$ ' de Kanaldaki Tüm Desenli Yüzeyle Ait Ortalama Nu Sayısı ( $Nu_m$ ) ve Ortalama Yüzey Sıcaklığı ( $T_m$ ) Değerleri

Re = 7000	Taç Desenli Yüzey
Kanatçıksız - $Nu_m$	80.07
60° Kanatçıklı - $Nu_m$	84.57
90° Kanatçıklı - $Nu_m$	90.11
Kanatçıksız - $T_m$ (K)	307.07
60° Kanatçıklı - $T_m$ (K)	306.76
90° Kanatçıklı - $T_m$ (K)	306.38

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sabit ısı akısı uygulanan bakır plakalı taç desenli yüzeylerin çarpan jet -çapraz akış tekniği ile farklı kanatçık açılımlarına göre soğutulması sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal inceleme amacıyla Ansys-Fluent programı kullanılmıştır. Kanaldaki akışı sıcaklığı artmış desenli yüzeylere yönlendirmede kullanılan kanatçık açılımları 60° ve 90° olup, kanatçığın uzunluğu D jet giriş çapına eşittir. Kanalda akışkan olarak su kullanılmış olup, kanatçığın ve kanalın yüzeyleri adiyabatiktir. Desenli yüzeyler,  $1000 \text{ W/m}^2$ 'lik sabit ısı akısına sahiptir. Jet - plaka arası mesafe

(H) 4D olup, akışkanın Re sayısı aralığı 5000-9000'dir. Kanala referans çalışmalar gözetilerek u adet desenli yüzey yerleştirilmiştir.

Bu alışma neticesinde sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Kanatçksız durumda tüm desen sıraları için en düşük Nu sayısı değerlerine ulaşılmaktadır.

- Kanatklı durumda çapraz akış-çarpan jet birleşik jet etkisiyle akışkan soğutulacak desenli yüzeylere daha iyi ynlendirilebildiğinden ısı transferi dolayısıyla ortalama Nu sayısı değerleri artmaktadır.

-  $Re = 7000$  değerinde Desen 2 için  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  kanal kanatk açılı durumlarda kanatksız duruma göre sırasıyla %8.67 ve %18.51'lik artışlar elde edilmektedir. Desen 2'de kanatksız duruma göre Nu sayısı için elde edilen bu artış miktarları, Desen 1 ve Desen 3'e göre daha fazla olmaktadır.

- Kanatk etkisiyle çapraz akış-çarpan jet birleşik etkisinin en fazla olduğu desen sırası Desen 2 olmaktadır. Desen 3 için ise kanatksız ve kanatklı desenler için elde edilen Nu sayısı değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır.

- Tüm desenli yüzeyler için en yüksek yüzey sıcaklık değerlerine kanatksız durumda ulaşılırken, kanala kanatk eklenmesiyle yüzey sıcaklıkları artan ısı transferiyle azalmaktadır.

- Kanal kanatk açısı  $90^\circ$  olduğunda kanatk ile desenli yüzeyler arasında jet akış etkisi olduğuundan kanatksız ve  $60^\circ$  kanal kanatk açılı durumlara göre daha düşük sıcaklık değerlerine ulaşılmaktadır. Bununla birlikte, en düşük yüzey sıcaklık değerlerine  $90^\circ$  kanal kanatk açılı ikinci sıradaki Desen 2'de erişilmektedir.

-  $90^\circ$  kanatk açılı durumda kanatksız duruma göre desenli yüzeylerin toplam ortalama  $Nu_m$  sayısı değerinde %12.54'lk bir artış elde edilirken, bu artış miktarı  $60^\circ$  kanatk açısı için %5.62 olmaktadır.

- Sonuç olarak, birleşik jet akışlı bir kanala kanatkların konulması kanaldaki akış sıcaklığı artmış desenler üzerine daha iyi yönlendirerek desenlerden olan ısı transferini iyileştirmektedir. Bu iyileşmede, akışı engellemeyerek desenli yüzeyler üzerine en uygun şekilde gönderebilecek kanat açısı derecesi kadar, kanaldaki akışı yönlendirerek akışın karışmasını ve dolayısıyla ısı transferi miktarını etkileyebilecek desen şekli de önemli olduğuundan kanal dizaynlarında bu etkilere de dikkat edilmelidir.

## TEŐEKKÜR

Bu alışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CBAP) birimi tarafından TEKNO-2021-031 proje numarası ile desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA

- Alnak, D.E., Koca, F., Alnak, Y. A., 2021. Numerical investigation of heat transfer from heated surfaces of different shapes. *Journal of Engineering Thermophysics*. 30:494-507.
- Demircan, T., 2019. Numerical analysis of cooling an electronic circuit component with cross flow and jet combination. *Journal of Mechanics*. 35(3):395-404.
- Hadipour, A., Zargarabadi, M.R., 2018. Heat transfer and flow characteristics of impinging jet on a concave surface at small nozzle to surface distances. *Applied Thermal Engineering*.138:534-541.
- Incropera F.P, Dewit D.P, Bergman T.L, Lavine A.S. Fundamentals of heat and mass transfer (Sixth Edition), 2007, John Wiley&Sons, Indiana, 447-487.
- Karabulut, K., Alnak, D.E., 2021. Investigation of the variation of cooling performance with the channel height in a channel having impinging jet-cross flow. *ISPEC 12 th International Conference on Engineering & Natural Sciences*. 273-290. 24-25 December, Bingöl.
- Kılıç, M., 2018. Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 33(3):121-132.
- Ma, C.F., Bergles, A.E., 1983. Boiling jet impingement cooling of simulated microelectronic chips. *Heat Transfer In Electronic Equipment HTD*. 28:5-12.
- Maghrabie, H.M., Attalla, M., Fawaz, H.E., Khalil, M., 2017. Numerical investigation of heat transfer and pressure drop of in-line array of heated obstacles cooled by jet impingement in cross-flow. *Alexandria Engineering Journal*. 56:285-296.
- Mergen, S., 2014. Kanal içi akış ve çarpan jet ile birlikte elektronik eleman soğutulmasının sayısal olarak incelenmesi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Saleha, N., Fadela, N., Abbes, A., 2015. Improving cooling effectiveness by use chamfers on the top of electronic components. *Microelectronics Reliability*. 55:1067-1076.
- Teamah, M.A., Dawood, M.M., Shehata, A., 2015. Numerical and experimental investigation of flow structure and behavior of nanofluids flow impingement on horizontal flat plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 74:235-246.
- Wang, S.J., Mujumdar, A.S., 2005. A comparative study of five low Reynolds number k-ε models for impingement heat transfer. *Applied Thermal Engineering*. 25:31-44.



## **BÖLÜM 3**

### **ÜLKEMİZİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ STRATEJİSİ VE ENERJİ TASARRUFU AÇISINDAN YAPILAN UYGULAMA HATA VE EKSİKLİKLERİ**

*Koray KARABULUT<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Doç. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler M.Y.O., Elektrik ve Enerji Bölümü, Doğalgaz ve Tesisatı Teknolojisi Programı, kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr, (Sorumlu Yazar), ORCID: 0000-0001-5680-0988

Bilinen fosil yakıt rezervlerinin gün geçtikçe azalması ve küresel ısınma gibi kalıcı çevre sorunları insanlar için hala büyük zorluklardandır. Bu nedenle, dünya çapında enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı politikaları kabul edilmiştir. AB'nin 2030 yılına kadar enerji tüketimini azaltarak enerji verimliliğini %32.5 seviyesine çıkartma hedefi bulunmaktadır (Trotta, 2019). Güney Kore, her zamanki iş akışına kıyasla 2030 yılına kadar CO<sub>2</sub> emisyonlarını %37 azaltmayı planlamaktadır (Kwon ve Jeon, 2016). Bu sebeptir ki çevre problemleriyle baş edebilmek için enerji tüketimini azaltmak gereklidir. Toplam enerji tüketimleri içinde bina enerji tüketimi %30'un üzerinde katkıda bulunur (Yuan ve ark., 2013) ve binalarda kullanılan enerjinin %70.4'ü apartman binaları tarafından tüketilmektedir (Zhou ve ark., 2018). Ayrıca, apartman binaları için, ısıtma yükü toplam konut yükünün büyük bir bölümünü oluşturur ve ısınmak için daha fazla enerji harcanır. Apartman enerji tüketimini azaltmak için bina ekipman sistemlerinin performansı iyileştirilir ve yenilikçi bina bileşenleri kullanılır. Ayrıca, ısı yükünün bir kısmı kış aylarında toplam apartman binası enerji tüketiminin %30'una kadar çıkabilen ve bina yapı kabuğunda bulunan ısı köprüleri aracılığıyla olan ısı kayıplarından kaynaklanır (Brás ve ark., 2014; Theodosiou ve Papadopoulos, 2008). Bu nedenle, apartman binaları hem yapı kabuğundan olan ısı kayıplarının azaltılması hem de yenilikçi ve gelişmiş otomatik elektrik kontrol sistemlerinin kullanılması ile enerji tasarrufunun artırılarak enerjide verimlilik artışının sağlanmasında büyük bir potansiyele sahiptir.

Ülkemizde genel olarak öngörülen enerji politikasına bakacak olursak, Türkiye, enerji güvenliğini iyileştirmenin birincil temelini enerji verimliliğini artırarak tüketim artışını yavaşlatmak olduğunun farkında olarak 2017-2023 dönemini kapsayan Milli Enerji Eylem Planını devreye almıştır. Bu amaçla, Türkiye birincil enerji tüketimini binalar ve hizmetler, enerji ve ısı, ulaşım, sanayi ve teknoloji, tarım ve kesişen alanlar gibi çeşitli sektörlerde olağan iş seviyelerine göre %14 oranında azaltmayı planlamaktadır. Türkiye'de son yıllarda konut enerji tüketiminde biyoyakıt ve petrolden doğal gaz ve elektrik kullanımına büyük bir geçiş olmuştur. Özellikle, biyoenerji tüketimi 2008'den bu yana %76'lık bir düşüşle hızla azalmıştır. Bu arada, doğal gaz tüketimi dört kattan fazla artarken, elektrik kullanımı iki kattan fazla artmıştır. Doğal gaz, binalarda ısınma için temel kaynak iken elektrik ise esas olarak ev aletleri tarafından tüketilmektedir. Hacim ısıtma, konut enerji talebinin neredeyse yarısını oluştururken, geri kalanını ise su ısıtma, ev aletlerinde ve yemek pişirmede kullanmaktadır.

Türkiye hızla büyüyen ve dönüşen bir yapı stokuna sahiptir. TÜİK verilerine göre Ekim 2019 itibariyle, Türkiye'de yaklaşık %90'ı konut olmak üzere 9.5 milyon bina bulunmaktadır. 24 milyon civarında olan konut sayısına ek olarak yapı kullanım izin istatistiklerine göre bina stokuna her yıl



yüz binden fazla yeni bina eklenmektedir. Ayrıca, binalarda zaten yüksek olan enerji tüketimi devam eden nüfus artışı ve kentleşmeyle hızla artmaktadır. Hükümet, mevcut bina stokunun enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra yeni binaların enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmasını sağlayarak önemli enerji tasarrufları elde etmeyi olasılık dâhilinde görmektedir.

Enerji Verimliliği Stratejisi, “Binalar için maksimum enerji gereksinimlerini ve maksimum emisyonlar için sınırları belirlemek ve yasal olarak tanımlanmış sınırların üzerindeki miktarlarda karbondioksit yayanlara yaptırımları uygulamaya koymak, binaların enerji talebini ve karbon emisyonlarını azaltmak” stratejik hedefi altında sürdürülebilir çevre ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan dost canlısı binaları tanımlamaktadır. Bu strateji ayrıca, “2010 yılında yapı stokunun en az ¼’ ünü 2023 yılına kadar sürdürülebilir binalara dönüştürmek” stratejik hedefi kapsamında “yapı ruhsatlandırmasında sürdürülebilirliği gerekli kılacak” ve “toplu konut için yerinde üretimi yaygınlaştıracak” eylemleri de tanımlamaktadır.

Nisan 2010’dan bu yana 2000 m<sup>2</sup>’den büyük bir alana sahip yeni binaların merkezi ısıtma sistemine sahip olması gerekirken, Mayıs 2012’den beri merkezi ısıtma ve sıcak su için bireysel ölçüm ve kontrol sistemlerinin kurulumu zorunlu hale gelmiştir. Ayrıca, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde yapılan değişikliğe göre 2000 m<sup>2</sup>’nin üzerinde kullanım alanına sahip oteller ve spor salonları gibi konut dışı tesisler, hastaneler ve yurtlarda su ısıtmasını desteklemek için güneş enerjisinin kullanımı planlanmaktadır. Kamu binaları için ise Ağustos 2019 genelgesiyle, 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu’na göre atanan enerji yöneticisi bulunan kamu binalarının 2023 yılına kadar %15 enerji tasarrufu sağlaması hedefi yayınlanmıştır (IEA, 2021).

Bu bakımdan, yeni yapılacak binalarda zaten zorunlu olan ısı yalıtımının; mevcut binalarda da TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardına uygun olacak şekilde yapılması büyük önem arz etmektedir. Ülkemizde bulunan mevcut apartman binalarında genel olarak karşılaşılan hatalı ve eksik ısı yalıtımı uygulamaları neticesinde önlenemeyen ısı kayıplarının araştırılarak görselleştirilebilmesi ve bunun sonucunda bu uygulamaların sonlanması adına araştırmacıları ve ısı yalıtımı uygulayıcılarını bilinçlendirmek amacıyla termal kamera çekimi yapılan binalara ait görüntüler Şekil 1-6(a)’da verilmektedir.

Şekil 1-2(a)’da termal kamera görüntüleri (b)’de ise termal kamera çekimi yapılan bölgelerin görsel görüntüleri verilmektedir. Şekil 1’de iki farklı katın üst katı dıştan yalıtımlı iken alt kat duvarda yalıtım bulunmamaktadır. Buna bağlı olarak, termal kamera görüntüsünde de görülebildiği gibi üst katın duvar yüzey sıcaklığı düşüktür ki buna bağlı olarak duvar termal kamera görüntüsünde daha koyu renkli, yalıtımsız alt kat duvarı ise

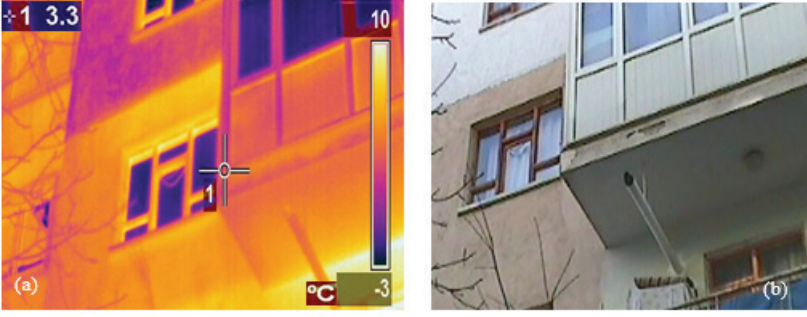
daha açık renklidir. Bu da bize alt kattan dış ortama daha fazla ısı kaybı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, yalıtımın bittiği nokta alt katın kiriş kısmını bölgesi olup, buradan olan yüksek ısı kayıpları sonucu termal kamera görüntüsünde duvar kısmına göre daha açık renkle görülmektedir. Bununla birlikte, üst katın kiriş-duvar birleşimleri ve ahşap doğrama çerçevelerinden olan yoğun ısı kayıpları da termal kamera görüntüsünde kendini belli etmektedir. Şekil 2’de de yine aynı şekilde katlar arası bir bütün halinde uygulanmamış dıştan yalıtım nedeniyle alt katın açıkta kalan yalıtımsız kiriş kısmından ısı kayıpları devam etmektedir. Ayrıca, aynı şekilde balkon uzantısının alt kısmında kombi bacasının olduğu kısımdaki kiriş kısmından yoğun bir şekilde olan ısı kayıpları oldukça açık renkle termal kamera görüntüsünde görülebilmektedir.

Şekil 3(a) ve (b)’de sırasıyla yalıtımsız kiriş kısmından olan ısı kayıpları için termal kamera ve görsel görüntüsü sunulmaktadır. Şekil 3(a)’da balkon uzantısının altındaki yalıtımsız kiriş kısmından olan ısı kaybı etkisi görülmektedir. Bu nedenle, pencerenin üst kısmında ısı geçirgenlik direnci düşük kiriş kısmında sıcaklık artmaktadır. Bu kısımdan olan ısı kayıpları tam olarak ancak balkonun uzantısını da içine alacak şekilde bir bütün olarak dıştan yalıtım uygulamasıyla önlenilecektir.

Şekil 4’de balkon uzantısı-duvar birleşimleri boyunca gerçekleşen ısı kayıplarına ait (a) termal kamera ve (b) görsel görüntüler gösterilmiştir. Bu birleşim noktalarında çok boyutlu (iki - üç) ısı kayıpları meydana gelmektedir. Bu kayıplar, yalıtımın duvara uygulanıp, balkon uzantısına uygulanmaması nedeniyle kesintiye uğraması sonucu oluşmaktadır. Bu nedenle, bu kısımlarda önlem alınmadığı takdirde ilerleyen süreçlerde yapı iç yüzeylerinde yoğunlaşma meydana gelebilecektir.



Şekil 1.

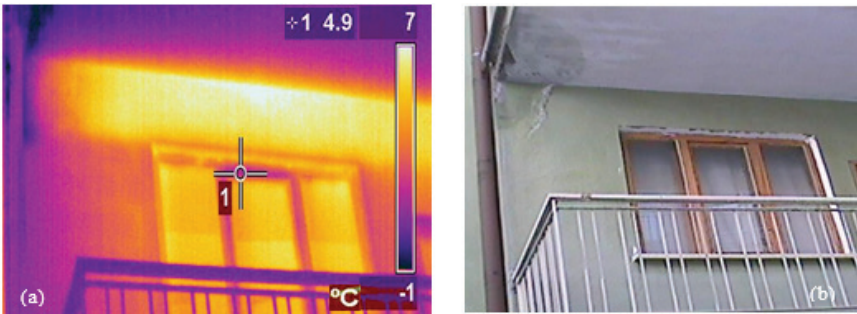


## Şekil 2.

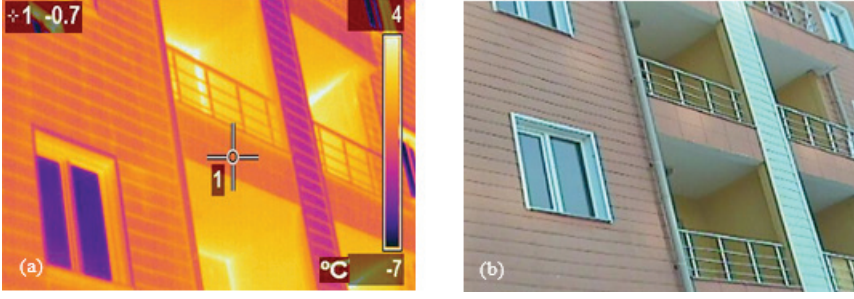
Şekil 1-2. Bölgesel Yalıtımlı Binalarda Isı Kayıpları (a) Termal Kamera (b) Görsel Görüntüsü

Şekil 5’de pencere kasasının etrafından olan ısı kayıplarına ait (a) termal kamera ve (b) görsel görüntüsü verilmektedir. Şekilden de görülebildiği gibi pencere kasası tam olarak yerine oturtulmadığında ve pencere fi-tillerinin yıpranmış, uygun ve yeterli kalitede malzemeden olmadıklarında konutlarda azımsanmayacak miktarlarda hava sızıntısı yoluyla ısı kayıpları oluşabilmektedir.

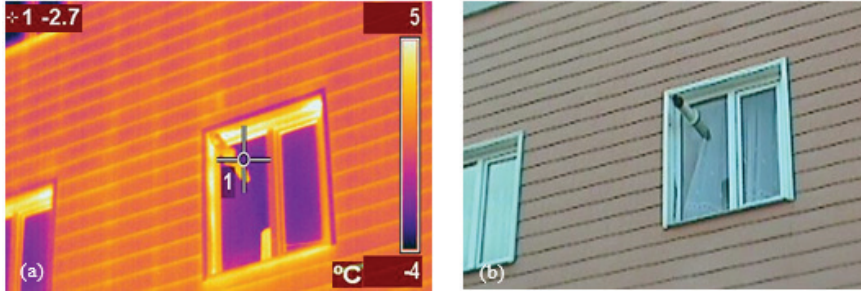
Binaya uygulanan dıştan yalıtımın sürekliliği sağlanmayarak belli bir noktada bırakıldığında meydana gelen ısı kayıplarına ait termal kamera görüntüsü Şekil 6(a)’da gösterilirken, Şekil 6(b)’de ise görseli sunulmaktadır. Burada oluşan ısı kayıplarının önlenmesi için yalıtımın tabana kadar sürekli bir şekilde uygulanıp, yalıtım profili içerisine yerleştirilerek uygulamanın sonlandırılması gerekmektedir.



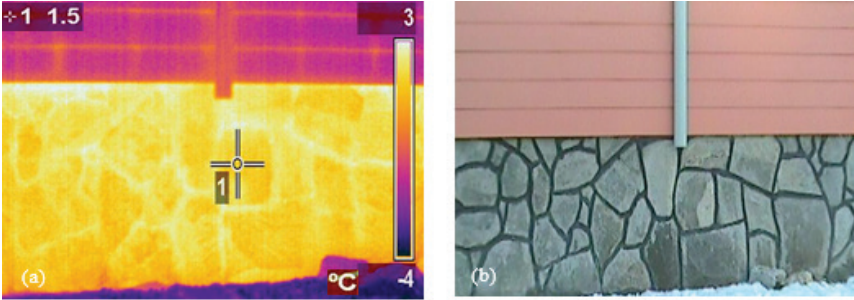
Şekil 3. Yalıtımsız Kiriş Kısmından Olan Isı Kaybı (a) Termal kamera (b) Görsel Görüntüsü



Şekil 4. Balkon Uzantısı Duvar Birleşimi Isı Kaybı (a) Termal Kamera (b) Görsel Görüntü



Şekil 5. Pencere Kasası Etrafından Isı Kayıpları (a) Termal Kamera (b) Görsel Görüntü



Şekil 6. Yalıtımda Süreksizlik Sonucu Isı Kaybı (a) Termal Kamera (b) Görsel Görüntü

Bunun yanı sıra, şu anda Türkiye’de güneş enerjisiyle ısıtma, jeotermal ve atık kullanımı için iyi koşullar ve önemli potansiyel olmasına karşın yenilenebilir enerjiye dayalı ısıtmayı teşvik edecek bir plan bulunmamaktadır. Özellikle, güneş enerjisiyle ısıtma, teknolojik olarak basit, uygun fiyatlı ve güvenilirdir ve ekonomik olarak daha az gelişmiş bölgelerde verimli bir şekilde kullanılabilir. Türkiye, özellikle güneş ısısını uygun hale getiren yüksek güneş ışınımı enerjisinden yararlanmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisiyle ısıtma doğal gaz veya ısı pompaları dâhil diğer kaynaklarla kolayca birleştirilebilmektedir. Ülkemizin şu anda güneydoğu kesiminde ağırlıklı olarak orta ve düşük gelirli hane halklarında ilgili düzenlemeler

veya yerinde teşvikler olmamasına rağmen çatılarda oldukça fazla sayıda toplamda kurulu kapasitesi yaklaşık 18 Gigawatt saat olan güneş enerjisi tesisatı bulunmaktadır. Bu başarı kısmen ithal yakıtların yüksek maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Ancak, eğilim bunları doğal gazlı ısıtma sistemleriyle değiştirmektir (IEA, 2021). Tabii ki bu duruma kısıtlayıcı faktör son dönemlerde dünya genelinde artan doğalgaz birim fiyatı ve ülkemizde de döviz fiyatına bağlı olarak doğalgaz fiyatlarının artışıdır.

Bu bağlamda, ülkemizde enerji elde amacıyla kullanılan yakıtların çevreye karşı emisyon değerlerinin de düşük olması ülkemiz tarafından onaylanan Paris Anlaşması bakımından da oldukça önemlidir. Bugüne kadar 191 ülkenin katıldığı anlaşma ile birlikte küresel olarak ortalama sıcaklık artışını 2 °C ile sınırlandırmayı ve eğer mümkünse 1.5 °C'nin altında tutabilmeyi ve bu kapsamda sera gazı emisyonlarının yüzyılın ortasına kadar sıfırlanması için ülkelerin birlikte çalışması teşvik edilmektedir.

Ülkemizin kişi başına düşen emisyon değerleri gün geçtikçe artmakta olup, dünyada en çok sera gazı emisyonuna sebep olan ülkeler kategorisinde 16. sırada yer almaktadır. Bu emisyonlarının azaltılması için öncelikle ülkemizin 2053 yılına kadarki süreci de içine alacak şekilde kısa vadeli iklim hedeflerini belirlemesi gerekmektedir. Bununla birlikte, ülkemizin yeni iklim politikası çerçevesinde seri gazı emisyonlarının azaltılması için yeni eylem planlarının hazırlanacak olduğu sektörler arasında iklim değişikliğinde en büyük etkiye sebep olan sektörler arasında enerji sektörü başta gelmektedir. Buna göre, ülkemizin fosil yakıt kullanımını aşamalı olarak bırakması, var olan fosil yakıtlara verilen teşviklerini sona erdirmesi ve kamu kaynaklarını başta güneş ve rüzgâr enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerji kaynakları yatırımlarına ve bu amaç doğrultusunda gerekli alt yapı çalışmalarına ve tüm kesimleri içine alacak adaletli dönüşüm planlarına ayırması başta gelen konular arasında ortaya çıkmaktadır.

Günümüz itibarıyla 19 Avrupa ülkesi kömür kullanmayı ya tamamen bırakmış ya da tamamen çıkma taahhüdünü duyurmuştur. İklim politikasında yeni bir süreçte olan ülkemiz de kömür kullanmaktan vazgeçmeyi planlayarak, bu konuda ileri gelen ülkeler arasında yerini alabilir (SEFIA, 2021).

Bu kapsamda günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanan bir terim olan karbon ayak izi, her bir insanın ulaşım, ısınma, enerji tüketimi veya satın aldığı her türlü ürün sonucunda atmosfere yayılmasına sebep olduğu karbon miktarını ifade etmek adına kullanılır.

21. yüzyılda sanayileşmenin başlamasıyla karbondioksit ve diğer sera gazlarının atmosferdeki miktarı artmış ve atmosferde daha fazla ısının tutulmasıyla dünyamızın ortalama sıcaklığı daha çok artmıştır. Bunun sonucunda da etkisini günümüzde her geçen yıl daha çok hissettiğimiz küresel

iklim değişikliği ortaya çıkmıştır. İnsanlık olarak yaptığımız her faaliyet sonucunda sera gazlarının salınımına sebep olarak evrenin geleceğini etkilemekteyiz. İşte bu etki de bizim karbon ayak izimizi oluşturmaktadır.

Her zaman taşıtların egzozundan çıkan gazlardaki gibi karbon salınımımızı açık olarak göremeyebiliriz. Örneğin, bir pazardan veya marketten aldığımız ürünlerin üretiminden taşınıp biz tüketicilere ulaştırılmasına kadar çeşitli safhalarda da açığa çıkan CO<sub>2</sub> gazı bireysel karbon ayak izimize katkıda bulunmaktadır (Şekil 7). Bu anlamda, karbon ayak izimizi azaltmak için öncelikle bu duruma neyin neden olduğunu belirlemek ve miktarını hesaplayabilmek gerekir ki böylece ölçtüğümüz niceliği kontrol altına alabilelim.

Ulusal Enerji Verimliliği Stratejimizde de olduğu gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından en yüksek düzeyde faydalanarak, enerji verimlilik sınıfı yüksek elektrikli aletler kullanarak enerji tüketimimizi azaltıp bu kullanımlar sonucu açığa çıkacak emisyon miktarlarını azaltabiliriz. Ulusal ağaçlandırma seferberliğini yaygınlaştırarak karbon emilimini artırabiliriz ki her bir ağaç yılda yaklaşık 12 kg CO<sub>2</sub> emilimi sağlayarak atmosferdeki sera gazı etkisinin azalmasına katkıda bulunur. Geri dönüşüme önem vererek kullandığımız ürünler için harcanan enerji seviyesini ve böylece emisyon miktarını düşürebiliriz. Mümkünse geleneksel fosil yakıtlı araçlar yerine hibrid ve elektrikli araçları ve ısınmada güneş enerjisi destekli doğalgazı tercih ederek karbon ayak izimizi azaltmaya katkıda bulunabiliriz. Hatta, ayrıca bireysel araç kullanımı yerine toplu taşımayı kullanarak ve kısa mesafelerde araç kullanmak yerine yürüyerek ve bisikleti kullanarak emisyon azaltımına yardımcı olabiliriz (Ç.Ş.İ.D.BAK., 2021).



Şekil 7. Karbon Ayak İzinde Etkili Olan Faaliyetler (Ç.Ş.İ.D.BAK., 2021)

Tüm bu öngörülen gelişmeler ve stratejiler bağlamında aşağıdaki sonuçlara ve önerilere ulaşılabilir:

- Termal kamera görüntüleri değerlendirildiğinde; binalarda ısı yalıtım uygulaması ve ısı kayıpları ile ilgili olarak apartmanlarda kat sahipleri arasında birliktelik sağlanarak yalıtımın bölgesel olarak uygulanması yerine binanın dış yüzeyinde bütünlük sağlayacak şekilde kesintisiz olarak uygulanması ısı kayıplarının önlenmesi ve var olan enerjiyi tasarruflu ve verimli kullanmak adına son derece önemlidir.

- Kolon-duvar ve kiriş-duvar gibi ısı kayıplarının çok boyutlu ve yoğun olduğu bina kesitlerinde ısı yalıtım uygulamalarına daha fazla önem verilmesi gerekmektedir.

- Pencere kasaları yapıdaki yerlerine yerleştirilirken iyi bir şekilde konumlandırılarak yuvasına oturtulmasına ve pencere fitillerinin kaliteli malzemeden üretilmiş ve düzgün bir işçilikle hava sızdırmaz şekilde uygulanmasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde iç ortamda sürekli ısı kaybına sebep olarak oda sıcaklığını düşürecek ve doğalgaz tüketiminin artmasına sebep olacaktır.

- Binaların dış yüzeyleri bir bütün olarak ve kesintisiz bir şekilde balkon uzantılarını da kapsayacak şekilde yalıtılmalıdır.

- Enerji tasarrufu ve enerji verimliliği açısından apartmanların girişleri ve kat araları merdiven sahanlıklarında fotoselli led elektrik aydınlatma sistemlerinin ve asansörlerde A (+++) sınıfı elektrik motorlarının kullanılmasına dikkat edilmelidir.

- Apartman girişlerinde eğer apartman içine hemen ulaşamayıp bir sahanlık kısmı varsa rüzgarlık denilen çift kapı sistemiyle soğuk dış havanın apartman içine girişi engellenerek dairelerden apartman içi merdiven sahanlığına olacak ısı kaybı azaltılabilir. Bunun yanı sıra, daire içlerinde ise zaman ayarlı oda termostatı ve termostatik vanaların kullanılmasıyla enerji ihtiyaca göre daha verimli kullanılabilir.

- Pencereelerde güneş ışığından maksimum düzeyde yararlanarak yüksek ışık geçirgenliği sağlayan ve özel kaplaması sayesinde ısıyı oda içine geri yansıtan sinerji camların kullanılmasıyla birlikte ısı kayıpları sırasıyla tek cam ve klasik çift cam ile karşılaştırıldığında %77 ve %50 azalarak yakıt giderlerinden tasarruf sağlanmasına katkıda bulunulacağı gibi kışın pencere etrafının soğuk olmasını engeller ve camın buğulanma olasılığını da azaltır.

- Bununla birlikte, ülkemizin var olan yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli düşünüldüğünde öncelikle güneş ve rüzgâr enerjisi olmak üzere jeotermal ve dalga enerjisi v.b. gibi yenilenebilir enerji kaynakların-

dan daha fazla yararlanılmasının milli ekonomimiz adına oldukça faydalı olacağı açıktır. Ayrıca, güneş enerjisinden ısıtmada yararlanabilmek adına doğalgaz ve ısı pompaları gibi sistemlerle de kombine bir şekilde kullanma yoluna gidilmesiyle enerjiden daha verimli ve etkin bir şekilde yararlanılabilir.

- Modern, rekabetçi bir ekonomiye ulaşmak için enerji sektörünün sürdürülebilirliği ve daha uzun vadeli karbon ayak izine dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunun yanında, sanayi politikasını temiz enerji geçişinin bir sonraki aşamasına yönlendirmek de aynı derecede önemlidir. Bu amaçla, elektrikli araçlar, enerji depolama ve dijital teknolojiler gibi alanlarda inovasyonu teşvik edecek politikalar ilerleyen zamanlarda daha da kritik olacaktır.

- Fosil yakıtların terkedilmesinden başka iklim değişikliğiyle mücadelede yapılacak her düzenleme, temiz ve sağlıklı hava başta olmak üzere istihdam, teknolojik gelişim gibi önemli faydaları da beraberinde getirecektir. Bu anlamda, yapılan araştırmalara göre ülkemizin aktif ve uygulanabilir bir iklim politikası izlemesi halinde milli gelirinin de %7 artacağı öngörülmektedir.



## KAYNAKÇA

- Brás, A., Gonçalves, F., Faustino, P., 2014. Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation. *Energy and Buildings*. 72:296-308.
- International Energy Agency (IEA), 2021. Turkey 2021 Energy Policy Review. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/cc499a7b-b72a-466c-88ded792a9daff44/Turkey\\_2021\\_Energy\\_Policy\\_Review.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/cc499a7b-b72a-466c-88ded792a9daff44/Turkey_2021_Energy_Policy_Review.pdf), (Erişim tarihi: 25.01.2021).
- Kwon, S., Jeon, E., 2016. A study on GHG emissions reduction and the social costs of the basic plan for electricity supply and demand. *Journal of Environmental Policy and Administration*. 24:69-87.
- Sürdürülebilir Ekonomi ve Finans Araştırma Derneği (SEFİA), 2021. Paris Anlaşması Onaylandı: Türkiye' nin İklim Politikasında Yeni Bir Dönem Başlıyor. <https://sefia.org/blog/paris-anlasmasi-onaylandi-turkiyenin-iklim-politikasinda-yeni-bir-donem-basliyor/>, (Erişim tarihi: 25.01.2021).
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (Ç.Ş.İ.D.BAK.), 2021. <https://yalova.csb.gov.tr/karbon-ayak-izi-nedir-haber-42218>, (Erişim tarihi: 25.01.2021).
- Theodosiou, T.G., Papadopoulos, A.M., 2008. The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings*. 40:2083-2089.
- Trotta, G., 2019. Assessing energy efficiency improvements, energy dependence, and CO<sub>2</sub> emissions in the European Union using a decomposition method. *Energy Efficiency*. 12:1873-1890.
- Yuan, X., Wang, X., Zuo, J., 2013. Renewable energy in buildings in China-A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 24:1-8.
- Zhou, Z., Wang, C., Sun, X., Gao, F., Feng, W., Zillante, G., 2018. Heating energy saving potential from building envelope design and operation in residential buildings: A case study in northern China. *Journal of Cleaner Production*. 174:413-423.



## **BÖLÜM 4**

### **TEK TİP BİR BETONARME YAPININ TBDY 2018'E GÖRE UYGUN PAKET PROGRAMLAR İLE MODELLENMESİ ANALİZİ VE SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

*Halit Erdem ÇOLAKOĞLU<sup>1</sup>, Muhammed ÖZTEMEL<sup>2</sup>*

*Merdan Törehan TURAN<sup>3</sup>*

1 Öğr. Gör, Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü.,  
erdem.colakoglu@giresun.edu.tr

2 Öğr. Gör, Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü.,  
muhammed.oztemel@giresun.edu.tr

3 Öğr. Gör, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Alanya Ticaret ve Sanayi  
Odası Meslek Yüksekokulu , Emlak Yönetimi Bölümü. torehan.turan@alanya.  
edu.tr

## 1. Giriş

Türkiye’de inşaat sektöründeki büyüme ivmesi her geçen gün artmakta ve bu artışa paralel olarak yeni projelerin üretilmesi ve bu projelerin hayata geçirilme süreci hızla devam etmektedir. Şüphesiz ki ülkemiz deprem riskinin çok yüksek olduğu bir bölgede yer almaktadır. Bu durum üretilcek yapı projelerin depreme karşı dayanıklı olarak tasarlanmasını gerektirmektedir. Temeli sonlu elemanlara dayanan ve günümüzde yapı projelerinin çizilmesi ile yapısal analizlerinin yapılmasında hem zaman hem de işgücü açısından büyük bir tasarruf sağlayan paket programların kullanımı oldukça yaygın hale gelmiştir.

Öyle ki ülkemizde şunda birçok kamu ve özel sektör firmalarında İdecad, Sta4cad, Sap2000, Probing, Etabs vb. paket programları çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak betonarme yapıların sonlu eleman yöntemi kullanılarak modellenmesinde ve yapısal olarak analiz edilmesindeki en önemli nokta, programa girilecek verilerin doğruluğu ile programın arka plandaki çalışma mantığının doğru bir şekilde bilinmesidir.

Bu çerçevede düşünüldüğünde inşaat paket programlarının çok ciddi anlamda faydasının olduğu tartışılmaz bir gerçekken, bu programların işin ehli olmayan yani inşaat mühendisliği diploması olmayan kişiler tarafından kullanılması ve ortaya çıkarılan projelerin iyi bir denetimden geçmemesi de bu programların ülkemizdeki yapılaşmada çok büyük bir tehlike yaratacağı açıktır.

Ülkemizde betonarme yapıların tasarımında kullanılması için birçok yönetmelik oluşturulmuş ve bu yönetmeliklere uyum sağlayan paket programlar geliştirilmiştir. Son depremler ve teknolojidaki hızlı ilerleme ile birlikte DBYBHY-2007’nin yeniliklere uyum sağlayamadığı ve güncellenmesi gerekliliği konusunda fikir birliğine varılmıştır. Yeni deprem yönetmeliği 18.03.2018 tarihli resmi gazetede yayınlanarak 2018 Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) olarak yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmeliğin yürürlüğe girmesiyle birlikte betonarme yapıların modellenmesi ve statik analizinde kullanılan paket programların da TBDY-2018’e uygun hale getirilmesi çalışmaları başlatılmıştır.

TBDY-2018’de bir yapının projelendirilmesinde, DBYBHY-2007’ye göre çok daha kapsamlı ve dikkatli bir çalışma yapılması gerekliliği dikkati çekmektedir. Öyle ki gelişen teknoloji ile birlikte yapıyı doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen deprem parametrelerinin daha iyi bir şekilde tespit edilebilir hale gelmesi, beraberinde daha karmaşık ve daha hassas bir deprem yönetmeliği oluşturulmasına sebep olmuştur. Buradaki en önemli nokta TBDY-2018 ’in sektörde faaliyet gösteren inşaat mühendislerine çok iyi bir şekilde anlatılması ve kavratılmasıdır. Çünkü sektörde çok yaygın olarak kullanılan modelleme ve analiz programları da yenilenen deprem

yönetmeliği ile birlikte kullanıcı mühendislerin bile zorlandığı bir yapıya bürünmüştür.

Kullanılan paket programların hangisinin daha doğru sonuçlar verdiği konusuyla ilgili birçok tartışma söz konusudur. Bu tartışmaların temelinde yatan ve paket programların sonuçları arasında farklılıkların en temel nedenleri bina ağırlıklarının farklı hesaplanması, paket programların kolon-kiriş bağlantı bölgelerini farklı rijitlikte ele alması gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır.

## 2. Literatür Özeti

Betonarme yapı tasarımı için Türkiye’de inşaat sektöründe sık olarak kullanılan üç paket program olan İdestatik, Probina ve Sta4Cad yazılımlarını kullanarak tasarlanan 6 farklı basit yapının sonuçlarını karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma ABYYHY 1998 döneminde tamamlanmıştır. Tasarımların tamamında dinamik analiz esas alınmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda bazı basit yapı örnekleri için her üç paket programda da deprem kuvvetleri, kat ötelenmeleri ve donatı metrajı arasında belirgin bir farkın olmadığı belirtilirken, tasarımların çeşitlendirilmesine bağlı olarak sonuçlarda farklılaşmanın olduğu gözlemlenmiştir (Kuyucular ve Kandak, 2008).

Türkiye’de yaygın olarak kullanılan Sta4Cad ve Etabs paket programlarını kullanarak tasarlanan betonarme yapıların analiz sonuçları arasındaki farkları incelemiştir. Çalışma kapsamında öncelikle taşıyıcı sistemi simetrik olan betonarme bir yapı hem Sta4Cad hem de Etabs programları kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçların birbirine yakın olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın devamında taşıyıcı sistemi simetrik olmayan betonarme bir yapı hem Sta4cad hem de Etabs programları kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde sonuçlar arasında belirgin farklılıkların olduğu belirtilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, binada herhangi bir yetersiz kolon ortaya çıkmamıştır; ancak, zarar görmüş diğer yapı elemanlarının yetersiz olduğu ortaya çıkmıştır (Sırlıbaş, 2013).

Diyarbakır ilinin Sır ilçesinde bulunan Dört Ayaklı Minare’nin deprem davranışını belirlemek üzere yapıyı hem Sap2000 hem de Seismostruct paket programlarında modellemiş, statik ve dinamik yükler etkisindeki davranışı analiz edilmiştir. Her iki programdan elde edilen veriler karşılaştırılarak yapının davranışı belirlenmiştir (Uğurlu, Günaslan ve Karaşin, 2017).

Taşıyıcı sistemi simetrik ve simetrik olmayan betonarme çerçeveden oluşan 5, 10 ve 15 katlı yapıya ait örnekleri Sta4cad, İdecad ve Etabs paket programlarında modellemiş ve analiz sonuçlarını birbiri ile karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, deprem yüklerinin sadece çerçeveler ile taşındığı

betonarme binalarda programlar arası farklılıkların olduğu belirlenmiştir. Bu farklılıkların en önemli nedenlerinin her üç paket programın da bina ağırlıklarının birbirinden farklı olarak hesaplaması, kolon-kiriş birleşim bölgelerinin farklı rijitlikte algılanması vb. olduğu belirtilmiştir (Ergül, 2017).

TEC 2007'ye uygun olarak tasarlanan betonarme binaların özellikle son depremlerde neden hasar aldıklarını ortaya koymak amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada öncelikli olarak 23 Ekim 2011 Van Depremi sırasında TEC 2007 ve öncesindeki deprem yönetmeliğine uygun olarak tasarlanan ve hasar gören binalar incelenmiştir. Daha sonra, TEC 2007'ye uygun olarak tasarlanan diğer ciddi hasarlı bir bina da benzer durumlar için olası bir model olarak seçilmiştir. Tasarımın uygulanması, İdeCAD ve Sta4CAD modellemesi ve bunun yanı sıra zayıf yapısal elemanların tespit edildiği Sap2000 kullanılarak analiz edilmiştir (Bikçe ve Çelik, 2016).

Bu çalışmada temel amaç daha karmaşık ve dikkatli bir süreç gerektiren TBDY-2018'de, bir yapının projelendirilmesinde kullanılan parametrelere dikkat çekerek, bodrum ve zemin katlarıyla beraber toplamda 4 katlı, taşıyıcı sistemi betonarme perde-çerçeveden oluşan simetrik bir yapının 2018 Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'ne uygun olarak yeniden güncellenmiş inşaat paket programları Sta4Cad ve İdeCad kullanılarak modellenmesi ve statik analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Her iki paket programdan elde edilen sonuçlar yapı ağırlığı, taban kesme kuvveti, doğal titreşim periyodları, yapı düzensizlikleri, beton kalıp ve donatı metrajları ile kütle katılım oranları açısından karşılaştırılmıştır.

### 3. Materyal ve Metod

Çalışmada öncelikle konut olarak projelendirilmiş ve halihazırda bu amaçla kullanılmakta olan toplamda 4 katlı, taşıyıcı sistemi betonarme perdeli ve çerçeve olarak tasarlanmış yapının inşaat sektöründe çok sık olarak kullanılan iki paket program olan İdeCad ve Sta4Cad paket programları kullanılarak modellenmesi yapılmıştır. Yapının modellenmesinde ve yapısal analizlerinde kullanılan teknikler her iki paket program için belirlenmiş, özellikle son deprem yönetmeliği TBDY-2018'e uyumlu modelleme parametreleri dikkate alınmıştır.

#### 3.1. İdeCAD Statik IDS v10.09 (TBDY 2018 ile Uyumlu Yeni Versiyon)

İdeCAD Statik programı betonarme yapı sistemleri için genel amaçlı analiz, tasarım ve çizim programıdır. Bu program ile katları olan ya da olmayan, katlarda rijit diyaframlı, kısmen rijit diyaframlı veya tamamen rijit diyaframsız yapıların Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre

hesabı yapılabilir. Ayrıca çok katlı yapılar, endüstriyel yapılar ve bina türü olmayan serbest formlu yapılar, deprem yönetmeliğinde belirtilen koşullara uyarak modellenilebilir. Çubuklar ile birlikte, aynı sistem içinde yer alan kabuk elemanlar kullanılabilir. Bu birliktelik sayesinde döşemeler, perdeler, temeller ve çubuk elemanlar aynı sistem içerisinde analiz edilerek tasarımları yapılır (İdeCAD v10.09).

### 3.2. Sta4CAD v14.1 (TBDY 2018 ile uyumlu yeni versiyon)

Sta4CAD programı çok katlı betonarme yapıların statik, deprem, rüzgâr ve betonarme analizini entegre olarak yapan bir paket programdır. Program, statik ve betonarme analizleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018' e göre yapabilmektedir. Program statik analizlerde rijit kat diyaframını dikkate almakta, her noktada 6 serbestli üç boyutlu stiffness matris metodunu kullanmaktadır. Yapının bütün denge denklemleri kat düzleminde  $\delta_x, \delta_y, \theta_z$ , ve eleman uç noktalarında  $\delta_x, \theta_y$  ve  $\theta_z$  deplasmanları kullanılarak yazılır. Program deprem analizlerinde her katta x ve y yönünde iki adet deplasman ve bir adet dönme oluşturmaktadır. Döşeme yüklerinin oluşturulmasında yield line teorisi esas alınmaktadır. Plakların kırılma doğrultuları Equilibrium Metodu'na göre gerçekleşmektedir. Döşeme elemanların kolonlarla birleşen kısmı direkt kolonlara iletilmekte, kolonların dışında kalan kısımları ise kirişlere iletilmektedir (Torkan ve Amasralı, 2014).

### 3.3. Modellenen Yapıya Ait Bilgiler

Taşıyıcı sistemi betonarme perdeli çerçevesi olarak tasarlanan bodrum ve zemin katıyla beraber toplamda 4 katlı simetrik yapı 1.derece deprem bölgesinde yer almakta olup konut olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bina kullanım sınıfı  $BKS = 3$  olarak alınmıştır. Bina toplam yüksekliği  $H_N = 11,6 m$  olduğundan TBDY-2018'e göre bina yükseklik sınıfı  $BYS = 6$  olarak belirlenmiştir. Yapının her bir kat yüksekliği eşit olup 2,80 m olarak projelendirilmiştir. Modellenen yapıya ait zemin parametreleri; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın, Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak yerel zemin sınıfı  $ZD$  ve deprem yer hareketi düzeyi  $DD - 2$  seçilip, yapının bulunduğu yerin enlem ve boylam değerleri girilerek belirlenmiştir. Buna göre kısa periyot harita spektral ivme katsayısı  $S_s = 1,452$  ve uzun periyot harita spektral ivme katsayısı  $S_1 = 0,399$  olarak belirlenmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de belirtilen (1) ve (2) kullanılarak kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı  $S_{DS} = 1,452$  ve uzun periyot tasarım spektral ivme katsayısı  $S_{D1} = 0,758$  olarak hesaplanmıştır. Buradaki  $F_S$  ve

$F_1$  değerleri TBDY-2018'e göre enterpolasyon yöntemiyle belirlenmiştir. Yapının deprem tasarım sınıfı  $DTS = 1$  olarak alınmıştır.

$$S_{DS} = S_S \cdot F_S \quad (1)$$

$$S_{D1} = S_1 \cdot F_1 \quad (2)$$

Modellenen yapıya ait bina genel bilgileri Tablo 1'de, taşıyıcı sistem özellikleri ve zemin parametreleri Tablo 2'de, malzeme özellikleri ve analiz yöntemi Tablo 3'de gösterilmiştir.

*Tablo 1*  
*Modellenen Yapıya Ait Genel Bilgiler*

Bina türü	Konut
Kat sayısı	4
Kat yüksekliği	2,80
Deprem bölgesi	1.derece
Bina Kullanım Sınıfı (BKS)	3
Bina Önem Katsayısı (I)	1
Bina Yükseklik Sınıfı (BYS)	6
Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	1
Hareketli Yük Kütle Katılım Katsayısı	0,3
Eksantrisite Oranı	0,05

*Tablo 2*  
*Modellenen Yapıya Ait Taşıyıcı Sistem Bilgileri ve Zemin Parametreleri*

Taşıyıcı Sistem Türü	Betonarme perde ve çerçevesiz sistem
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı ( $R_x, R_y$ )	$R_x=7$ $R_y=7$
Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D)	2,5
Yerel Zemin Sınıfı	ZD
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2
Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı	1,452
Uzun Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı	0,399
Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (SDS)	1,452
Uzun Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (SD1)	0,758
Spektrum Karakteristik Periyotları ( $T_A, T_B$ )	$T_A=0,104$ sn $T_B=0,522$ sn
Zemin Taşıma Gücü ( $t/m^2$ )	13,5
Yatak Katsayısı ( $t/m^3$ )	2400

*Tablo 3*  
*Modellenen Yapıya Ait Malzeme Özellikleri ve Analiz Yöntemi*

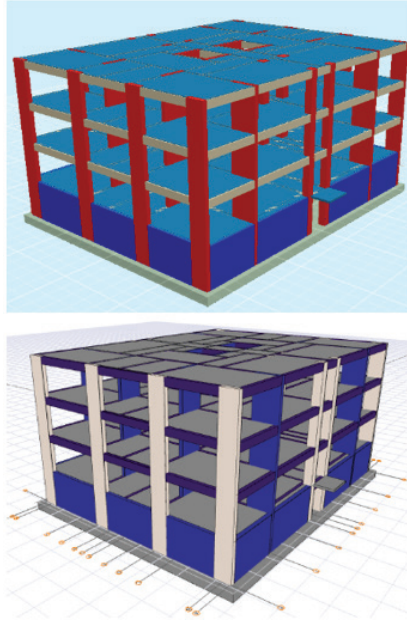


Beton Sınıfı	C30
Çelik Sınıfı	B420Ç
Beton Güvenlik Katsayısı	1,5
Çelik Güvenlik Katsayısı	1,15
Kolon Boyutları (cm)	30/120-30/70-50/50-60/60
Kiriş Boyutları (cm)	25/50
Perde Boyutları (cm)	25/180-25/260-25/300
Döşeme Kalınlığı (cm)	12/15
Analiz Yöntemi	Mod birleştirme

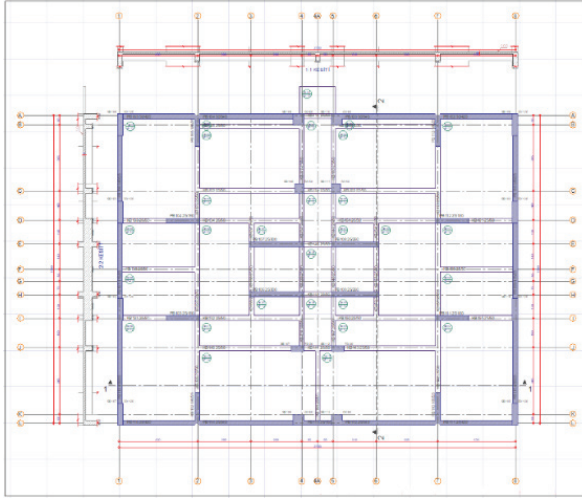
Modellenen yapının spektrum karakteristik periyodları TBDY-2018’de belirtilen (3)’e göre hesaplanmış ve olarak belirlenmiştir.

$$T_A = 0,2 \cdot \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3)$$

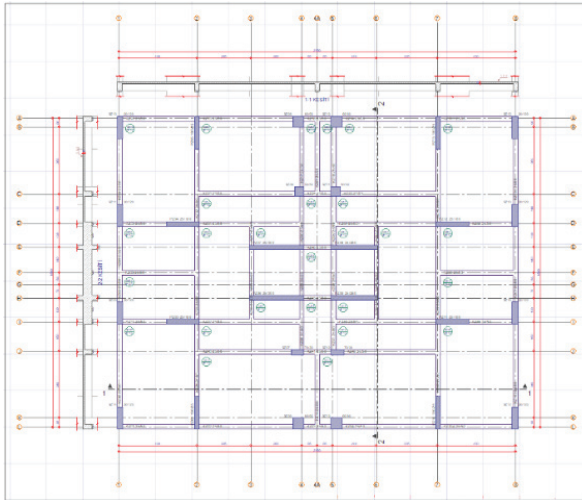
Ayrıca modellenen yapıya ait 3 boyutlu görünüm Şekil 1’de, bodrum kat kalıp planı Şekil 2’de, zemin kat ve normal kat kalıp planı Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 1. Modellenen Yapıya Ait Üç Boyutlu Görünümler



Şekil 2. Modellenen Yapıya Ait Bodrum Kat Planı



Şekil 3. Modellenen Yapıya Ait Zemin Kat ve Normal Kat Planı

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e uygun olarak modellenen 4 katlı taşıyıcı sistemi betonarme perde çerçeveden oluşan yapının İdeCad ve Sta4Cad paket programları kullanılarak yapısal analizleri yapılmış, sırasıyla yapı ağırlıkları, yapı periyod değeri, taban kesme kuvvetleri, kalıp beton ve donatı metrajları, planda ve düşeydeki düzensizlikler ile modal kütle katılım oranlarına ait parametreler grafik, şekil ve tablolar vasıtasıyla değerlendirilmiştir.

#### 4.1. Yapı ağırlıklarının karşılaştırılması

Hareketli yük kütle katılım katsayısı  $\eta = 0,3$  alınarak her iki paket programda modellenen yapının mod birleştirme yöntemine göre yapılan analizleri sonucunda yapının her bir katının ağırlıkları ile yapı toplam ağırlığı Tablo 4’ de gösterilmiştir.

Tablo 4  
Yapı Kat Ağırlıkları (ton)

Kat Adı	İdeCad	Sta4Cad
2.Kat	420,43	428,737
1.Kat	411,76	409,597
Zemin Kat	417,35	415,234
Bodrum Kat	480,95	519,296
Yapı Toplam Ağırlığı	1730,49	1772,863

Tablo 4’ e göre yapının toplam ağırlığı Sta4Cad programında İdeCad programına göre daha fazla olarak elde edilmiştir. Modelleme sırasında elde edilen tecrübeye göre Sta4Cad programının eleman birleşim noktalarında iki kez ağırlık hesabı yaptığı ve bu sebepten dolayı yapı toplam ağırlığının daha fazla olduğu düşünülmektedir. Ayrıca İdeCad programında kiriş üstüne gelecek duvar yükünün belirlenmesinde kiriş net açıklığının dikkate alınması da belirleyici bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

#### 4.2. Yapı periyot değerlerinin karşılaştırılması

Modellenen yapının İdeCad ve Sta4Cad programlarında yapılan analizleri sonucu elde edilen ilk 12 mod ve bu modlara karşılık gelen yapı titreşim periyodları ve yönleri Tablo 5’ de gösterilmiştir. Mod, bir yapının periyodlarının deformasyon şekillerini göstermektedir. Yapının doğal halinin mod şekilleri ne ise yapıya yatay yük (deprem yükü) etki ettiğinde oluşacak titreşim hareketi de aynı olur. Bu nedenle bir yapının mod şekillerinin bilinmesi önemlidir.

Tablo 5  
Yapı Periyot Değerleri (sn)

Mod	İdeCad	Mod Yönü	Sta4Cad	Mod Yönü
1	0,39208	Y	0,3537	Y
2	0,30691	X	0,3159	X
3	0,26106	X	0,2977	B
4	0,08769	Y	0,0822	Y
5	0,07252	X	0,0710	X
6	0,06100	X	0,0678	B
7	0,36490	Y	0,0385	Y
8	0,03187	X	0,0338	X

9	0,02857	X	0,0307	B
10	0,02814	X	0,0278	Y
11	0,02791	X	0,0250	X
12	0,02692	Y	0,0195	B

Tablo 5 incelendiğinde modellenen yapıya ait doğal titreşim periyodunun İdeCad ve Sta4Cad paket programlarında birbirinden farklı olarak elde edildiği görülmektedir. Bu durum temel nedeni her iki paket programın da yapı toplam ağırlığını birbirinden farklı olarak hesaplamasıdır.

### 4.3. Taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

İdeCad ve Sta4Cad paket programları kullanılarak modellenen yapının dinamik analizi sonucu TBDY-2018' e göre Denklem (4)'de belirtilen şekilde hesaplanan taban kesme kuvvetleri x ve y yönleri için Tablo 6'da gösterilmiştir. Buna göre Sta4Cad ile elde edilen taban kesme kuvveti İdeCad' e göre daha yüksektir.

$$V_{ixn,max}^{(X,Y)}(t) = \sum_{i=1}^N f_{ixn,max}^{(X,Y)}(t) = m_{ixn}^X a_{nR}^{(X,Y)}(t) \quad (4)$$

Tablo 6

Taban Kesme Kuvvetleri (ton)

Yön	İdeCad	Sta4Cad
X	294,743	308,521
Y	249,188	290,504

### 4.4. Kalıp beton ve donatı metrajının karşılaştırılması

Modellenen yapıya ait kalıp, beton ve donatı metrajları hem Sta4Cad hem de İdeCad paket programları kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7

Kalıp Beton ve Donatı Metrajı

Kat Adı	Kalıp(m <sup>2</sup> )	Beton(m <sup>3</sup> )	Donatı (kg)	Kalıp (m <sup>2</sup> )	Beton (m <sup>3</sup> )	Donatı (kg)
Temel	49,32	249,8	19542,4	49,32	249,8	21679,5
Bodrum Kat	1050,2	133,5	17685,9	1042	130,9	12718
Zemin Kat	758,1	94,06	10387,9	777,8	93,59	11457
1.Kat	753,9	93,26	10118,1	772,2	92,87	11270
2.Kat	753,9	93,26	9068,8	772,2	92,87	11909
Toplam	3365,42	663,88	66803,1	3413,52	660,03	69033,5

Tablo 7 incelendiğinde modellenen yapının hem İdeCad hem de Sta4Cad kullanılarak elde edilen kalıp, beton ve donatı metrajının toplam değerleri göz önüne alındığında, programların birbirine kıyasla kalıp metrajı için %1,41, beton metrajı için %0,58 ve donatı metrajı için %3,23 'lük farklılık olduğu belirlenmiştir.

#### 4.5. Planda ve Düşeyde Düzensizliklerin Karşılaştırılması

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e uygun iki adet paket program kullanılarak modellenen ve yapısal analizleri yapılan 4 katlı betonarme perde ve çerçeve yapıda planda ve düşeyde TBDY-2018'de belirtilmiş herhangi bir düzensizliğe rastlanmamıştır. Bahsedilen yönetmelikte belirtilen burulma düzensizliği (5), komşu katlar arası dayanım düzensizliği (zayıf kat) (6) ve komşu katlar arası rijitlik düzensizliği (yumuşak kat) (7)'ye göre kontrol edilmiş, İdeCad ve Sta4Cad programlarında hesaplanan düzensizliğe ait katsayılar Tablo 8'de verilmiştir.

$$\eta_{bi} = (\Delta_i^{(X)})_{\max} / (\Delta_i^{(X)})_{ort} > 1.2 \quad (5)$$

$$\eta_{ci} = (\sum A_e)_i / (\sum A_e)_{i+1} < 0.80 \quad (6)$$

$$\eta_{ki} = (\Delta_i^{(X)} / h_i)_{ort} / (\Delta_{i+1}^{(X)} / h_{i+1})_{ort} > 2.0 \quad (7)$$

$$\eta_{ki} = (\Delta_i^{(X)} / h_i)_{ort} / (\Delta_{i-1}^{(X)} / h_{i-1})_{ort} > 2.0$$

Tablo 8  
Düzensizliklere Ait Katsayılar

<b>B2 Düzensizliği (<math>\eta_{ki}</math>)</b>		
Kat Adı	İdeCad	Sta4Cad
2.Kat	1,02	0,00
1.Kat	1,46	1,00
Zemin Kat	0,81	0,75
Bodrum Kat	0,00	0,00
<b>B1 Düzensizliği (<math>\eta_{ci}</math>)</b>		
2.Kat	0,00	1,00
1.Kat	1,00	1,02

Zemin Kat	0,91	1,02
Bodrum Kat	1,50	1,57
<b>A1 Düzensizliği (<math>\eta_{bi}</math>)</b>		
2.Kat	0,00	1,13
1.Kat	1,00	1,13
Zemin Kat	0,91	1,12
Bodrum Kat	1,50	1,06

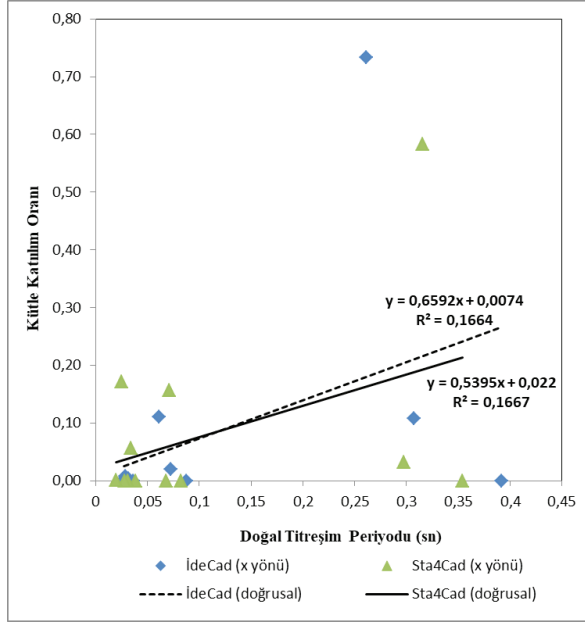
#### 4.6.Modal Kütle Katılım Oranlarının Karşılaştırılması

İdeCad ve Sta4Cad paket programlarında modellenen yapıya ait modal etkin kütle katılım oranları Tablo 9 'da gösterilmiştir. Yapı ne kadar simetrik olursa olsun doğal titreşim halinde ya da deprem etkisi altında tamamiyle x yönünde veya tamamiyle y yönünde titreşim yapmaz. Yapının kütlelerinin belli bir kısmı x yönünde titreşirken, belli bir kısmı da y yönünde titreşim yapar. Yapının kütlelerinin ne kadarının x yönünde ve ne kadarının da y yönünde harekete geçtiğini kütle katılım oranı belirler.

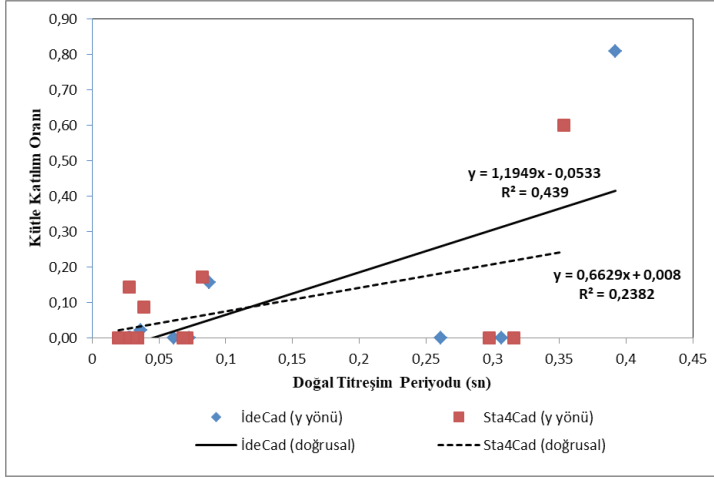
Tablo 9  
Modal Kütle Katılım Oranları

Mod No	İdeCad		Sta4Cad	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
1	0,00	0,80869	0,00	0,59355
2	0,10796	0,00	0,59986	0,00
3	0,73263	0,00	0,01293	0,00001
4	0,00	0,15658	0,00	0,19214
5	0,01992	0,00	0,17149	0,00
6	0,11015	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,02150	0,00	0,13281
8	0,00396	0,00	0,09212	0,00
9	0,00745	0,00	0,00002	0,00
10	0,00028	0,00	0,00	0,08150
11	0,00359	0,00	0,12334	0,00
12	0,00	0,00026	0,00024	0,00

Kütle katılım oranının yapı periyodu ile ilişkisini belirlemek amacıyla hem İdeCad hem de Sta4Cad paket programlarından elde edilen kütle katılım oranı ve yapı titreşim periyodu değerleri x yönü için Şekil 4'de, y yönü için Şekil 5'de gösterilmiş, doğrusal eğilim çizgileri belirlenmiştir.



Şekil 5. Kütile Katılım Oranı Yapı Periyodu İlişkisi (x yönü)



Şekil 6. Kütile Katılım Oranı Yapı Periyodu İlişkisi (y yönü)

Doğrusal eğilim çizgilerine ait denklemler kullanılarak analiz yapılmadan periyodu belli olan yapılara ait diğer özellikler hakkında tahmin yürütülebilir.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada bodrum ve zemin katlarla beraber toplamda dört katlı, taşıyıcı sistemi betonarme perde ve çerçevesi olan ve konut olarak kullanılan binanın TBDY-2018'e göre yeniden düzenlenmiş İdeCad ve Sta4Cad paket

programları kullanılarak modellenmesi ve analizleri yapılmıştır. Modelleme ve analizde özellikle Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018’de belirtilen parametreler üzerinde durulmuştur. Çalışmada TBDY-2018’e uygun hale getirilmiş İdeCad ve Sta4Cad paket programları; yapı toplam ağırlığı, yapı periyod değerleri, taban kesme kuvveti, kalıp beton ve donatı metrajları, planda ve düşeydeki yapı düzensizlikleri ile modal kütle katılım oranları parametreleri açısından tek tip bir yapı için değerlendirilmiştir. Çalışmaya ait sonuçlar ve değerlendirme aşağıda belirtilmiştir:

Yapı toplam ağırlığı bakımından karşılaştırma yapıldığında Sta4Cad programından elde edilen yapı ağırlığının İdeCad programına göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin Sta4Cad paket programının eleman birleşim bölgelerinde iki kez ağırlık hesabı yapması olduğu düşünülmektedir.

Yapı toplam ağırlığındaki farklılıktan dolayı Sta4Cad ve İdeCad paket programlarında yapının doğal titreşim periyodlarının da farklılık göstermesi beklenen bir sonuçtur.

Yapı toplam ağırlığı arasındaki farkın büyümesine paralel olarak yapı doğal titreşim periyodları arasındaki fark da büyümektedir. İdeCad programı yapı toplam kütlelerinin %95’ine 24 modda ulaşırken, Sta4Cad programı yapı toplam kütlelerinin %95’ine 12 modda ulaşmıştır.

Hem Sta4Cad hem de İdeCad programları yapının tüm katlarında kalıp, beton ve donatı miktarları açısından benzer sonuçlar vermiştir. Yapının tümü için İdeCad ve Sta4Cad programlarında hesaplanan toplam donatı miktarı arasındaki fark %3,23 toplam beton miktarı arasındaki fark %0,57 ve toplam kalıp miktarı arasındaki fark %1,41 olarak belirlenmiştir.

Modellenen simetrik yapı sadece TBDY-2018’de belirtilen %5 eksantrisine oranına sahip olup hem İdeCad hem de Sta4Cad programlarında yapılan analizler sonucunda yapıda burulma düzensizliği, komşu katlar arası rijitlik düzensizliği ve komşu katlar arasında dayanım düzensizliğine rastlanmamıştır.

Modal kütle katılım oranlarına bakıldığında hem Sta4Cad hem de İdeCad programlarından elde edilen modal kütle katılım oranları x ve y yönleri için farklılık göstermektedir. X yönü için kütle katılım oranlarının yapı periyodu ile ilişkisi İdeCad ve Sta4Cad programlarında benzerlik gösterirken, y yönü için aynı durum sözkonusu değildir.



## Kaynaklar

- ABYYHY 1998. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik.
- Bikçe, M. ve Çelik, T. (2016). Failure analysis of newly constructed RC buildings designed according to 2007 Turkish Seismic Code during the October 23, 2011 Van earthquake, *Engineering Failure Analysis*, 64, 67-84.
- DBYBHY 2007. *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*.
- Ergül, M. (2017). *Çeşitli tiplereki betonarme yapıların Etabs, Sta4CAD ve İdeCAD programları ile analiz edilerek sonuçların kıyaslanması*. Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi, Ankara, 126.
- IdeCAD v10.09. ideYAPI Ltd. 2019. www.idestatik.com
- Kuyucular, A. ve Kandak, Ö. (2008). Statik-betonarme tasarım için Türkiye’de kullanılan ticari paket yazılımların farklı sonuçları. *Akademik Bilişim Dergisi*, 641-648.
- Sırlıbaş, C. (2013). *Farklı tipteki betonarme yapıların Sta4CAD ve Etabs programları ile çözülmesi ve sonuçların karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 59.
- Sta4-CAD v14.1. STA Ltd. 2019. www.sta4.net.
- TBDY 2018. *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*.
- Torkan, R. ve Amasralı, S. (2014). *Sta4CAD V13.1 Çok Katlı Betonarme Yapıların Statik Analizi ve Tasarımı*. Birsen Yayınevi, 526.
- Uğurlu, M.A., Günaslan, S.E., ve Karşın, A. (2017). Dört ayaklı minare’nin modellenmesi ve yapısal analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt:8 Sayı:2 413-422.



## **BÖLÜM 5**

### **PROTON DEĞİŞİM MEMBRANLI YAKIT HÜCRELERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ VE KİRLİLİK FAKTÖRÜNÜN PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

*Sinan ÜNVAR<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Sinan ÜNVAR, Dr., Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi/Meslek Yüksek Okulu/  
Elektrik ve Enerji Bölümü/İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Pr./(Araştırmacı  
ID: 42860), sunvar[at]agri.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9144-7638

## 1. GİRİŞ

Dünya çapında artan enerji talepleri, tüketim ve artan çevresel kaygılar ile sonuçlanmaktadır. Fosil yakıtların geleneksel tüketiminin yerine temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi hayati bir rol oynamaktadır. Enerji üretimi ve tüketimi büyük ölçüde fosil yakıtların yakılmasına dayanmakta, böylece atmosferdeki CO<sub>2</sub> seviyelerini artırmakta ve küresel ısınma ve iklim değişiklikleri dahil olmak üzere ciddi çevre sorunlarına neden olmaktadır (Ahmad & Zhang, 2020; Kyle, ve diğerleri, 2020; Shahbaz, Raghutla, Chittedi, Zhilun, & Vinh, 2020). Yenilenebilir elektrik ve karbon oksitlerin kimyasallara ve yakıtlara elektrokimyasal katalitik dönüşümü, hidrojen gibi kimyasal yakıtların kullanılabilirdiği kapalı bir teknolojik karbon döngüsünün kullanılması yoluyla dünya çapındaki enerji krizinin hafifletilmesine katkıda bulunabileceğinden dolayı büyük ilgi görmüştür (Schmidt, ve diğerleri, 2019; Odukomaia, ve diğerleri, 2021).

Dünya şu anda enerji ihtiyacı için fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan atmosfere zararlı emisyonlar gibi çevresel kaygılarla karşı karşıyadır. Ayrıca hidrokarbon yakıtlar, yenilenebilir olmadıkları için sonludur. Bu endişeler, alternatif tükenmez enerji kaynaklarının kapsamlı araştırma ve geliştirme ihtiyacını haklı çıkarmaktadır. Yenilenebilir enerji seçenekleri arasında güneş, rüzgar, biyoyakıtlar ve yakıt hücreleri/yakıt pilleri yer almaktadır. Yakıt pilleri, enerji üretiminin sürekli olarak mevcudiyeti gibi sayısız avantajları nedeniyle fosil yakıt bazlı enerji kaynaklarının potansiyel ikamesidir. Bir yakıt pili, bir yakıt (hidrojen) ve bir oksitleyici maddeyi (oksijen) birleştiren ve kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine, suya ve atık ısıya dönüştüren elektrokimyasal bir cihazdır. Genellikle bir sistemin çalışma sıcaklığını belirleyen kullanılan elektrolit tipine göre sınıflandırılırlar (Najmi, Anyanwu, Xie, Liu, & Jiao, 2021).

Yakıt pilleri genel manada anot, katot ve elektrolit işlevi gören geçirgen bir membrandan meydana gelmektedirler. Dışarıdan devamlı olarak tedarik edilen yakıt ve oksitleyici anot ve katotta reaksiyonlara girerken ürünler hücreyi terk etmektedirler. Reaksiyonlar neticesinde meydana gelen iyonlar geçirgen seçici membrandan geçerken anot ve katot arasında elektriksel potansiyel fark oluşmaktadır. Anot ile katot arasına yerleştirilen üreteç üzerinden elektron akımının sağlanması ile elektrik üretilmektedir. Teorik anlamda yakıt pilinde reaktantlar dışarıdan beslendiği, ürünler de hücreden uzaklaştırıldığı müddetçe elektrik üretimi devam etmektedir. Yakıt pillerinde çoğunlukla hidrojen, alkol veya diğer hidrokarbonlar yakıt olarak kullanılmaktadır. Yakıt hücreleri/pilleri tipik pillere benziyor olsa da birçok farklı özelliğe sahiptirler. Öncelikle tipik olan piller enerji depolaması yaparlar ve çekebilecekleri maksimum enerji depolanmış reaktantların kimyasal enerjisi kadardır. Ayrıca şarj edilebilir özellikteki tipik pillere dışarıdan enerji verildiğinde, reaksiyonlar tersine yönlendirilerek

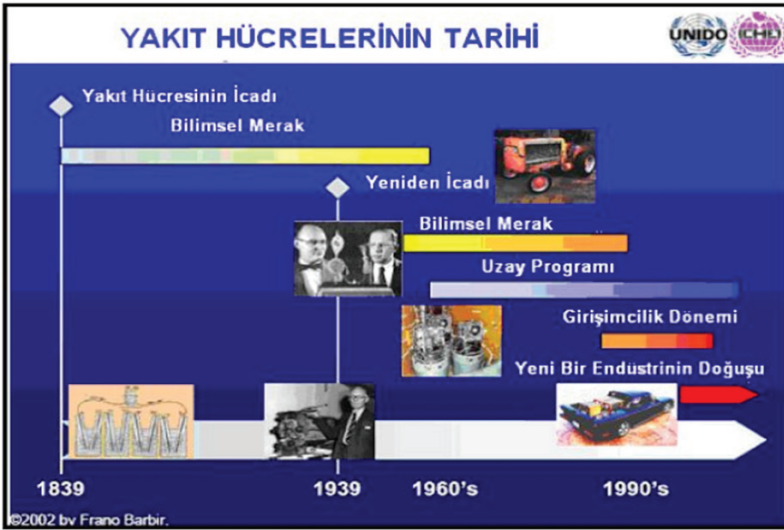
tekrar enerji depolanabilir. Fakat yakıt hücreleri teorik olarak yakıt ve oksitleyici ile sürekli beslendiği sürece sonsuza dek enerji verebilmektedir (Stambouli & Traversa, 2002).

Kavramsal ve terimsel anlamda “yakıt pili” ifadesi ilk defa C. F. Schönbein tarafından 1839 yılında ifade edilmiştir. C. F. Schönbein, su elektrolizi işleminin tersi işlem gerçekleştirildiğinde elektrik ve ısı elde edildiğini belirtmiştir. Yakıt pili manasında gerçekleştirilen ilk laboratuvar çalışması ise yine aynı yıl Sir William Grove tarafından  $H_2-O_2$  pili üzerinde yapılmıştır. Grove bu işlem için sülfürik asit ve iki platin elektrot kullanmıştır. Sülfürik asit içerisine koyduğu platin elektronlarla işlemler gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, su elektrolizinin ters reaksiyonu işleminde sabit akım ve güç üretildiğini gözlemlemiştir. Grove yapmış olduğu çalışmaların sonrasında elde ettiği sistemi “gaz pili” olarak adlandırmış ve sonraki yıllarda birkaç adet gaz pilini birleştirerek daha fazla elektrik üretmeyi başarmıştır (Perry & Fuller, 2002).

1889 yılında ise Ludwing Mond ve Charles Langer, yüksek miktarlarda hidrojen içeren gaz eldesi için endüstriyel kömür gazı ve hava ile hazırlanmış bir yakıt pilini test etmişler ancak yüksek empürite içeriğinden dolayı bu deneylerinde başarısız olmuşlardır. Sonraki yıllarda ise sıvı elektrolitleri taşımak amacıyla “poroz matriks” fikrini literatüre kazandırmışlardır. Friedrich William Ostwald, 1893 yılında, yakıt pili içerisindeki bileşenlerin görevlerini ve etkilerini incelemiş, yakıt pili kimyasının temellerini atmıştır. William W. Jacques ise 1896 yılında kömürde bulunan elektrokimyasal enerjiden doğrudan elektrik üretmeyi hedeflemiştir. 1933 yılında Francis Thomas Bacon ilk defa başarılı bir yakıt pili geliştirmiştir. Bacon, Mond ve Langer’in tasarımı olan yakıt pili üzerinde çalışmış ancak kendi çalışmasında gelişmiş katalizörler (örneğin platin yerine nikel), alkanin elektrolit kullanmış ve hidrojeni yakıttan elde etmek yerine elektroliz işlemiyle elde etmiştir. Hazırladığı bu pile “Bacon Pili” adını veren Thomas Bacon, yüksek verimlerde çalışan ilk alkali yakıt pilini oluşturmuştur. 1959 yılında Bacon ve arkadaşları 5 kW’lık güç üretebilen bir yakıt pili icat etmişlerdir. Yine 1959 yılında Pratt ve Whitney şirketi Bacon tarafından gerçekleştirilen çalışmaları lisanslamış ve yakıt pili sistemini Amerika Birleşik Devletleri Apollo uzay programında kullanılabilir hale getirmiştir (Perry & Fuller, 2002).

Uzay uygulamalarında kullanılan yakıt pilleri birçok ihtiyacı karşılamış ve 1960’lı yıllarda Amerikan Ulusal Uzay Dairesi (NASA) yakıt pili teknolojisine ciddi anlamda yatırımlar yapmaya başlamıştır. General Elektrik firmasında William Grubb tarafından, 1955 yılında üretilen PEM yakıt pili geliştirilerek 1962 yılından itibaren Gemini uzay programında kullanılmaya başlanmıştır (Grubb & Niedrach, 1960; Perry & Fuller, 2002).

1970'li yıllarda petrol ve türevlerine uygulanan yasaklamalar ve kısıtlamalar nedeniyle araştırmacılar yakıt pilleri alanında çalışmalarını artırmışlardır. Çoğu ülke ve girişimci şirket yakıt pillerinin yaygın anlamda ticarileşmesi için yapılan çalışmalara destek vermiş ve bu desteklerin sonucunda yakıt pilleri çalışmaları için özel laboratuvarlar inşa edilmiştir. Bununla birlikte DuPont firması yüksek verimli -Nafyon membran- üretmiş, böylece polimer elektrolit membran hücreleri konusunda önemli gelişimler gerçekleşmiştir. 1980'li yıllarda, kamu kurumları ve otomobil fabrikaları yakıt pili teknolojisini incelemeye ve test etmeye başlamışlardır. 1992 yılında Ballard Firması PEM yakıt pilli bir motor yapmıştır. Bu motorları dizel motorlarla karşılaştırmışlardır. Daha sonra, 200 kW güç üretebilen yüksek yoğunluklu ticari PEM yakıt pili içeren otobüs üretmişler ve böylece yakıt pillerinin başarısını kanıtlamışlardır. Ballard Firması'nın bu çalışmalarının ardından yakıt hücreleri/pilleri ulaşım, havalandırma, ışıklandırma gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Yakıt hücrelerinin genel anlamdaki gelişim süreci tarihi Şekil 1'de gösterilmektedir (Barbir, 2005).



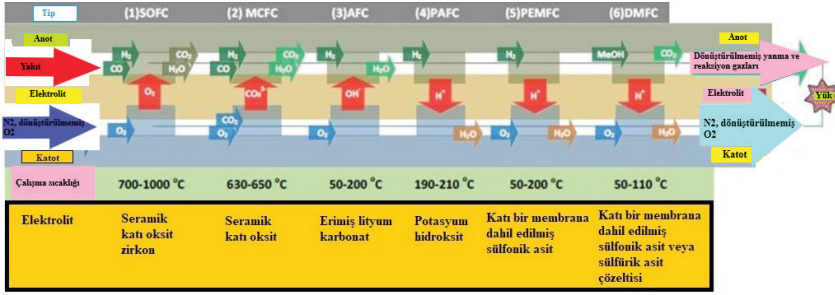
Şekil 1. Yakıt hücresinin gelişim süreci

## 2. YAKIT HÜCRELERİ/PİLLERİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Yakıt hücreleri/pilleri, bir gaz yakıt (hidrojen) ve bir yükseltgen gazın (oksijen) elektrokimyasal reaksiyonu sonucunda elektrik üreten ve bu süreç sonucunda atık olarak yalnızca su ve ısı üreten enerji dönüşüm cihazlarıdır. Yakıt hücreleri klasik pillerin aksine yakıt ve yükseltgen ile besledikleri sürece elektrik üretimine devam eden cihazlardır. Yakıt hücreleri, bütün diğer geleneksel termo-mekanik sistemlerden daha yüksek dönüşüm

verimiyle kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren çevre dostu enerji dönüşüm sistemleridir (Stambouli & Traversa, 2002). Alkalin Yakıt Pili, Fosforik Asit Yakıt Pili, Erimiş Karbonat Yakıt Pili, Katı Oksit Yakıt Pili, Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili ve Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi olmak üzere 6 tip Yakıt Pili vardır (Şekil 2), (Ye, Rick, & Hwang, 2012). Yakıt hücrelerinin/pillerinin özelliklerinin özeti Tablo 1’de sunulmuştur (Pan, Yang, Wang, & Chen, 2020).

Aşağıdaki şekillerde ve tablolarda yakıt pillerinin küresel anlamda kullanılan kısaltmaları aynı şekilde kullanılmış, anlam karmaşasına yol açmaması için bu yolun izlenilmesi öngörülmüştür.



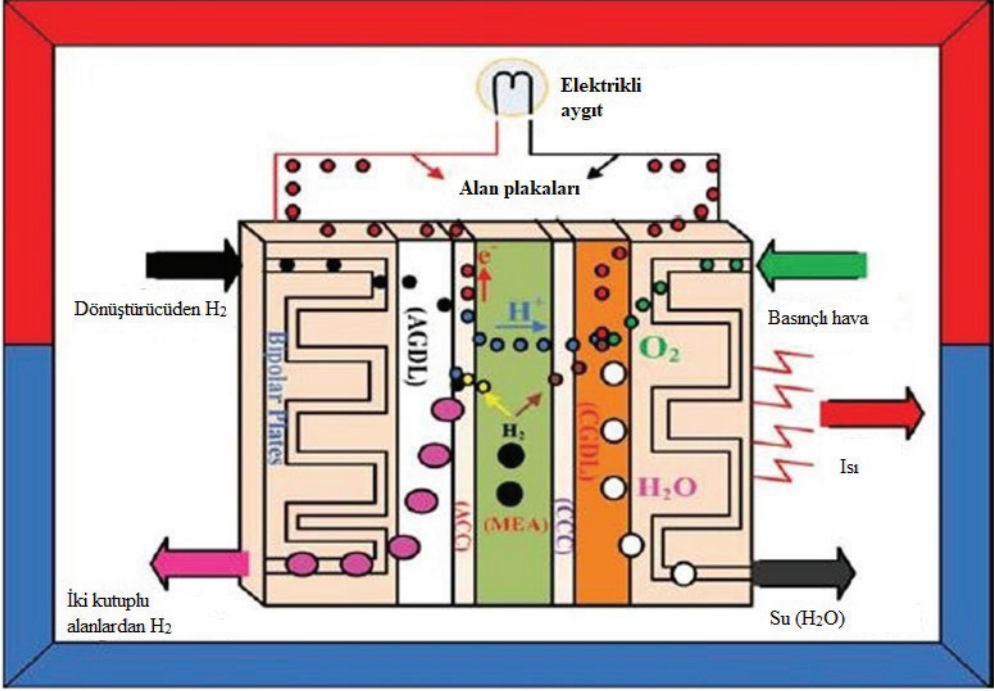
Şekil 2. Altı ana tip yakıt hücresinin/pilin karşılaştırılması

Tablo 1. Yakıt Hücresi/Pili Tiplerinin Genel Özellikleri

Yakıt Pili Tipi	Elektrolit Türü	Çalışma Sıcaklığı	Verimlilik	Yakıt
Alkalin Yakıt Pili (AFC)	Potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi	90 °C'ye kadar oda sıcaklığı	60% - 70%	H <sub>2</sub> - O <sub>2</sub>
Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEMFC)	Proton Değişim Membranı	80 °C'ye kadar oda sıcaklığı	40% - 60%	H <sub>2</sub> - O <sub>2</sub> veya Hava
Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMFC)	Proton Değişim Membranı	130 °C'ye kadar oda sıcaklığı	20% - 30%	CH <sub>2</sub> OH - O <sub>2</sub> veya Hava
Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)	Fosforik asit	160 °C – 220 °C	55%	Doğal Gaz, Biyogaz, H <sub>2</sub> - O <sub>2</sub> veya Hava
Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)	Alkali metal karbonatların erimiş karışımı	620 °C – 660 °C	65%	Doğal Gaz, Biyogaz, Kömür gazı, H <sub>2</sub> - O <sub>2</sub> veya Hava
Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)	Oksit iyonu ileten seramik	800 °C – 1000 °C	60% - 65%	Doğal Gaz, Biyogaz, Kömür gazı, H <sub>2</sub> - O <sub>2</sub> veya Hava

Yakıt hücresi, modern elektrikli araçların ana enerji kaynağıdır ve yakıt hücreli elektrikli araçlar, akıllı sistemlerde gelişmiş dönüştürücü ve pil teknolojileri ile kullanıldığında sıfır emisyonları ve diğer faydalı dağıtım

depolama aygıtı olarak gelecekte çok yaygın hale gelecektir (Smith, Nehrir, Gerez, & Shaw, 2002). Yakıt hücrelerinin ve ilgili elektrik güç dağıtım sistemlerinin verimliliğini artırmak için çok daha geniş araştırmalara ihtiyaç vardır. Temel bir yakıt hücresinin çalışma prensibini gösteren blok diyagram Şekil 3'te verilmektedir.



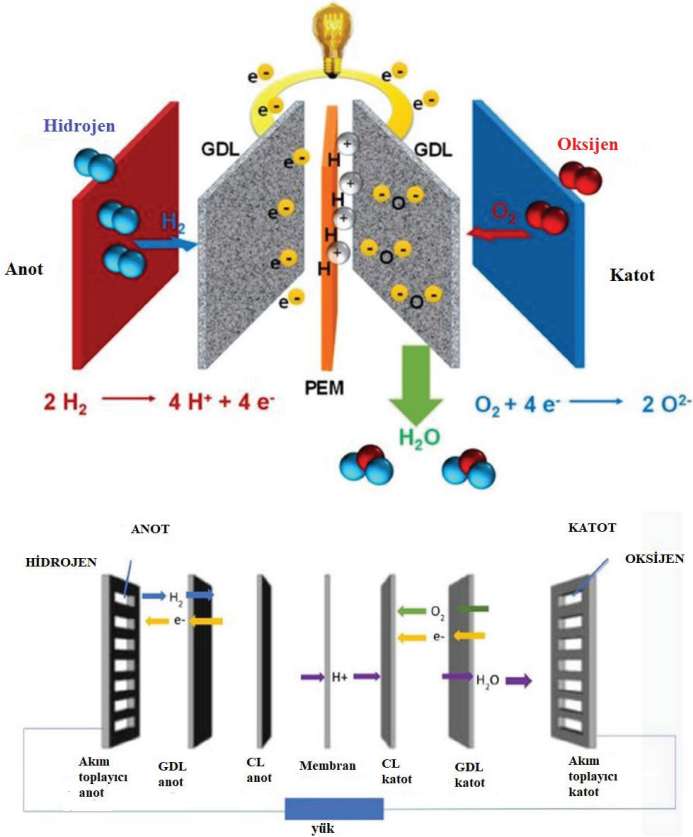
Şekil 3. Yakıt pilinin çalışmasının açıklaması

Yakıt hücreleri, 21. yüzyılda enerji dönüşümü için en etkili cihaz olarak kabul edilmektedirler. Düşük çalışma sıcaklığı, yüksek akım yoğunluğu, oldukça düşük maliyet ve hacim potansiyeli ve sürekli çalışmaya uygunluk avantajlarına sahip Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi, elektrikli araç gücü için çekici bir aday haline gelmiştir. Son on yıllık dilimde yakıt hücresinin verimliliğini artırmak ve maliyetini azaltmak için muazzam çabalar harcanmıştır. Hesaplamalı simülasyon ve modelleme, mühendislik uygulaması için bir prototip oluşturmadan önce temel süreçlerin daha iyi anlaşılmasında ve yakıt hücresi tasarımlarının optimize edilmesindeki araştırmalarda ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Costamagna & Srinivasan, 2001; Mehta & Cooper, 2003; Pan, ve diğerleri, 2005).

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücrelerinin çalışması, kimyasal sensörler, elektrokimyasal cihazlar, piller, süper kapasitörler ve güç üretimindeki geniş ve çeşitli uygulamaları nedeniyle membran elektrot düze-



neklerinin tasarımına yol açarak yoğun ilgi görmüştür (Kreuer, Paddison, Spohr, & Schuster, 2004; Hammes-Schiffer & Soudackov, 2008; Kraytsberg & Ein-Eli, 2014). Proton değişim membranlarına dayalı yakıt hücreleri, yüksek verimlilikleri, yüksek güç yoğunlukları, düşük emisyonları ve enerji kaynakları nedeniyle en umut verici elektrokimyasal üretim cihazları arasındadır (Cleghorn, ve diğerleri, 1997; Li, Shi, & Zhang, 2009). Redox akış pilleri gibi cihazlarla karşılaştırıldığında bile, pratik olarak aynı konfigürasyonu paylaşırlar. Her iki cihaz türü de yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji vektörlerinde bulunan kimyasal enerjinin elektrige dönüştürülmesine izin verse de, Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücrelerinin sıvı bileşenlerinin olmaması (mobil cihazlarda kullanımlarını pratik kılan) gibi redox akış pillerine göre avantajları vardır (Zhang & Sun, 2021). Şekil 4, tek bir Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin bileşenlerini gösteren şematik diyagramları göstermektedir.



Şekil 4. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin bileşenlerini gösteren şematik diyagramlar

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri (PEMFC), çoğunlukla ulaşım, sabit ve taşınabilir uygulamalar için geliştirilmektedir. PEMFC'nin ayırt edici özellikleri, düşük sıcaklıklarda (100°C'den düşük) çalışmayı

içerir, bu da hızlı başlatmalara ve güç talebindeki değişikliklere anında yanıt verilmesine olanak tanır. PEMFC, hidrojeni protonlara ve elektronlara bölmek için anotta platin bazlı katalizörler kullanır. Protonlar membrandan katoda geçer ve su üretmek için oksijenle birleşir. Elektronlar, bir akım akışı oluşturarak dış devreden geçer ve sonunda yan ürün olarak suyu oluşturmak için hidrojen protonları ve oksijeni yeniden birleştirir. Diğer yakıt hücresi türleri ile karşılaştırıldığında, Proton Değişim Membranı (PEM) türleri, nispeten yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimliliği nedeniyle daha umut vericidir. PEMFC'ler, elektrokimyasal reaksiyonlar, termal taşıma, kütle aktarımı, elektron aktarımı ve proton aktarımı gibi süreçlerden oluşan karmaşık sistemlerdir. Elektrokimyasal reaksiyonlara verimli taşıma sağlamak için gaz, elektron ve protonların iletkenliği optimize edilmelidir. Taşıma süreçlerinden biri olarak iyon iletimi, termal olarak aktive edilmiş bir prosedürdür ve büyüklüğü, sıvı ya da katı olabilen elektrolit, malzemenin tipine bağlı olarak önemli ölçüde değişir ve bu nedenle yakıt hücresinin çalıştırıldığı sıcaklığı belirler. Sistemlerin bu süreçleri işlemele-ri ve görevlerini yerine getirmeleri için farklı bileşenler dahil edilir (Haile, 2003).

Tipik bir PEMFC'de, polimer elektrolit membran, protonların anot-tan katoda taşınmasına izin veren proton iletkenliğinden sorumludur ve elektrokimyasal cihazın temel bileşenini oluşturur (Haile, Chisholm, Sasaki, Boysen, & Uda, 2007). Çeşitli yakıt hücresi türleri arasında, Nafion® gibi perflorosülfonik asit polimerlerine dayalı membranlar, yüksek iletkenlikleri ve iyi kimyasal ve mekanik özellikleri nedeniyle başarıyla kullanılmaktadır; bunlar 90 °C'nin altındaki sıcaklıklarda ve yüksek bağıl nem koşullarında kullanılır (Pineri & Eisenberg, 1987; Samms, Wasmus, & Savinell, 1996). Nafion®, 1960'ların sonlarında DuPont tarafından geliştirilmiştir ve halen en son teknoloji ürünü düşük sıcaklık PEM'idir. Nafion membranların düşük sıcaklıklı PEMFC'ler (LT-PEMFC'ler) olarak çalışması için temel dezavantajları, esas olarak pahalı üretim süreçle-ri ve kaybın bir sonucu olarak düşük hidrasyon koşullarına ulaşıldığında 90 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda proton iletkenliğinde güçlü azalmadır. Bu pratik sınırlamalar, su yokluğunda sırasıyla 100–150 °C ve 120–200 °C arasında çalışan orta sıcaklık PEMFC'lerin (IT-PEMFC'ler) ve yüksek sıcaklık PEMFC'lerin (HT-PEMFC'ler) ortaya çıkmasını teşvik etmiştir (Dupis, 2011; Park, Lee, Guiver, & Lee, 2011; Scott, Xu, & Wu, 2014; Lee, ve diğerleri, 2018; Sun, Simonsen, & Norby, 2019).

Nafion bazlı polimerlerin LT-PEMFC'lere kıyasla elektrot kinetiği daha hızlıdır ve daha basit termal ve su işleme, soğutma sistemlerine düşük bağımlılık, yüksek miktarlarda yeniden kullanılabilir ısı enerjisi ve daha düşük membran elektrot düzenekleri (MEA'lar) maliyetine sahiptirler. Anot katalizörlerinin yüksek CO toleransı, bir yakıt pilinin doğrudan basit

bir metanol dönüştürücüden gelen hidrojeni kullanmasını mümkün kılar, böylece membranın seçici oksitleyici ve/veya CO ayırıcısı basitleştirilebilir veya işlem sisteminden çıkarılabilir. Sonuç olarak, bir yakıt hücresinin boyutu ve hacmi, performansını, yanıt verebilirliğini ve güvenilirliğini artırmak için küçültülür ve bu da sonuçta sistem bakım ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına olanak tanır (Lipman, Edwards, & Kammen, 2004). IT-PEM'lerin ve HT-PEM'lerin, özellikle sülfonatlı polieter/eter keton (SPEEK) ve polibenzimidazollere (PBI'ler) dayalı olarak geliştirilmesinde yakıt hücrelerinin performansını optimize etmek için birçok çalışma yapılmıştır (Savinell, ve diğerleri, 1994; Wainright, Wang, Weng, Savinell, & Litt, 1995; Li, He, Jensen, & Bjerrum, 2004; Asensio, Sanchez, & Gomez-Romero, 2010; Araya, ve diğerleri, 2016).

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin (PEMFC) performansının; geometrisinden, malzemesinden ve çalışma parametrelerinden oldukça etkilendiği bilinmektedir. PEMFC'yi çalıştırırken sıcaklık, tasarım, basınç vb. gibi pek çok parametre koşulu kullanılır ve bunlar PEMFC'nin performansını büyük ölçüde etkileyen temel faktörlerdir. Membran, PEMFC'nin en önemli bileşenidir. İki elektrot, anot ve katot arasında bir proton iletkenidir ve aynı zamanda faydalı elektrik üretmek için elektronları harici bir devreden akmaya iter. Aynı zamanda, yakıtın katot tarafından anot tarafına veya tam tersi tarafa geçişini durdurarak anot ve katot arasında fiziksel bir bariyer görevi görür (Rameshkumar, Girimurugan, & Jegan, 2015; Maslan, Gau, Masdar, & Rosli, 2016).

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücrelerinin önemi gün geçtikçe artmakta ve bu yakıt hücrelerinden en etkili şekilde yararlanmanın yolları araştırılmaktadır. Son 10 yıl içerisinde bu amaçla yapılan önemli çalışmalar derlenerek Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 2.** *Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri ile ilgili son 10 yılda yapılan önemli çalışmalar*

Referans	Açıklamalar
(Arvay, Ahmed, Peng, & Kannan, 2012)	Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde için gaz difüzyon katmanları için karakterizasyon teknikleri yönünde genel bir inceleme yapılmıştır.
(Chiu, ve diğerleri, 2012)	Çeşitli akış alanlarına sahip proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin taşınma olaylarının üç boyutlu bir modellemesi konusunda çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar, kanal yüksekliği azaldıkça sıvı su uzaklaştırmasının arttığını, ancak hücre performansının da düştüğünü göstermiştir.
(Lin, Lien, Wang, Shiu, & Lee, 2012)	Proton değişim membranlı yakıt hücresi için sülfonatlı poliimid/Nafion çok katmanlı membranın hazırlanması ve performansı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan membranlar Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), termogravimetrik analiz (TGA) ve proton iletkenliği ile karakterize edilmiştir.
(Liu & Sung, 2012)	Proton değişim membranlı yakıt hücresinde membran elektrot takımlarının performans ve analizinin gözden geçirilmesi çalışmaları yapılmıştır. MEA'ların katalizör kaplı membranlar (CCM'ler) ve gaz difüzyon elektrotları (GDE'ler) ile üretildiği belirlenmiş ve iki yöntem ve farklı membran kalınlıkları arasındaki performans karşılaştırılmıştır.
(Yang, Hu, Wang, & Cao, 2012)	Proton değişim membranları için durmadan sonra soğutma tekniği ile bağlantılı olarak üç aşamalı bir yöntem kullanan gelişmiş bir aktivasyon süreci önerilmiştir.
(Huang, Su, & Liu, 2013)	Anodik katalizör tabakası üzerine higroskopik çinko oksit kaplayarak proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin performansının iyileştirilmesi çalışması yapılmıştır. Anot katalizör tabakasında çeşitli miktarlarda ZnO nanoparçacıkları ile tek hücre performansı, 25 °C, 45 °C ve 65 °C anot nemlendirici sıcaklıklarında araştırılmıştır. Sonuçlar, uygun higroskopik ZnO nanoparçacıklarına sahip anot katalizörlerinin PEMFC uygulamaları için ideal olduğunu göstermiştir.
(Saadi, Becherif, Aboubou, & Ayad, 2013)	Bu araştırma, deneysel çalışma sonuçlarını kullanarak, Proton Değişim Membran Yakıt Pili Yığını (PEMFC) modellemek için kullanılan farklı analitik modelleri değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu nedenle, iki nominal güç (400 W ve 700 W) için yakıt hücresi test düzeneğinin deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca simülasyon sonuçları, bu statik modellerin doğruluğunu ve verimliliğini açıkça doğrulamıştır.
(Abderezzak, Khelidj, & Abbes, 2014)	Proton değişim membranlı yakıt hücreleri için performans tahmini çalışması yapılmıştır. Bu araştırma çalışması, PEM yakıt hücresi statik modellemesinin doğru ve ayrıntılı bir özetini sağlamıştır.

(Barron, Su, Linkov, Pollet, & Pasupathi, 2015)	Katalizör tabakasına zirkonyum hidrojen fosfat ekleyerek yüksek sıcaklık proton değişim membranlı yakıt hücresinin gelişmiş performansı ve kararlılığı çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuç, CL'deki ağırlıkça %30'luk bir ZHP/PTFE içeriğinin yakıt hücresi performansını iyileştirmek için optimum olduğunu göstermiş, sonuçta ortaya çıkan MEA, 380 mV hücre voltajında 592 mW cm <sup>2</sup> 'lik bir tepe gücü sağlamıştır.
(Vazifshenas, Sedighi, & Shakeri, 2015)	Proton değişim membranlı yakıt hücresinin performans iyileştirmesi için yeni bir bileşik akış alanının sayısal olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Sayısal yöntemlerin ve simülasyon aracının, PEM yakıt hücresi araştırmaları için umut verici teknikler olabileceği belirlenmiştir.
(Han, Park, & Chung, 2016)	Maksimum verimlilik için bir proton değişim membranlı yakıt hücresi sisteminin modellenmesi ve işletim optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonuçları, sistemin en kötü ve en iyi çalışma koşulları arasındaki verimlilik boşluklarının güç çıkış aralığına bağlı olarak %1,2-5,5'e ulaşabileceğini ortaya koymuştur.
(Laoun, Naceur, Khellaf, & Kannan, 2016)	Proton değişim membranlı yakıt hücresi modelinin global duyarlılık analizi çalışması yapılmıştır. Sonuçlar, akım yoğunluğu, sıcaklık, membran kalınlığı, gaz difüzyon tabakası kalınlığı ve gözenekliliğinin, akım yoğunluğu ve membran kalınlığından baskın etkiye sahip hassas parametreler olduğunu göstermiştir. Ayrıca hidrojen basıncı, oksijen basıncı ve membran kesitinin nispeten daha az hassas parametreler olduğu bulunmuştur.
(Suleiman, ve diğerleri, 2016)	Metanol ve metan yakıtlı proton değişim membranlı yakıt hücresinin termo-ekonomik analizi konusunda çalışma yapılmıştır. Ekonomik analiz, sermaye ve yıllık toplam kullanım maliyeti sırasıyla 683.919 \$ ve 10.073 \$ olan metanol sistemine kıyasla metan sisteminin 476.396,2 \$ daha düşük bir sermaye maliyetine ve 10.334,2 \$ ile biraz daha yüksek yıllık kullanım maliyetine sahip olduğunu göstermiştir.
(Özgür & Yakaryılmaz, 2018)	Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. 1 kW Horizon H-1000 XP Proton Değişim Membran (PEM) Yakıt Pilinin enerji ve ekserji analizleri incelenmiştir. Sonuçlar, tam yükte PEM yakıt pilinin enerji verimliliğinin deneysel çalışma için %45.58 ve parametrik çalışma için %41.27 olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çalışma sıcaklığı oranı (T/T0) 1'den 1,2'ye ve çalışma basıncı oranı (P/P0) 1'den 2'ye değiştirilerek sırasıyla %2,25 ve %4,2 performans iyileştirmeleri elde edilmiştir.

**Tablo 2.** *Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri ile ilgili son 10 yılda yapılan önemli çalışmalar (devamı)*

(Parniana, Rowshanzamira, Prasad, & Advanic, 2018)	Proton değişim membranlı yakıt hücresi uygulamaları için yüksek dayanıklılıkta sülfonatlı poli (eter-eter keton)-ceria nanokompozit membranların durumu incelenmiştir. Membran özelliklerini iyileştirmek için katkı maddesi olarak yüksek kristallığe sahip serya nanoparçacıklarını sentezlemek için mikrodalga destekli jel yakma yöntemi kullanılmıştır.
(Toghiani, ve diğerleri, 2018)	Gaz difüzyon tabakası üzerinde montaj basıncı altında bir proton değişim membranlı yakıt hücresinin termal ve elektrokimyasal performans analizi gerçekleştirilmiştir. En iyi performansa sahip geometri için sıcaklık dağılımı, akım yoğunluğu ve oksijenin mol fraksiyonu incelenmiştir. Sonuçlar, kanal genişliğini azaltarak, akış hızının artması nedeniyle PEMFC'nin performansının arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, montaj basıncı nedeniyle gaz akış kanalına GDL'nin girmesinin PEMFC performansını bozduğu, GDL kalınlığının ve GDL gözenekliliğinin azalmasının ise daha küçük etkileri olduğu bulunmuştur.
(Nalbant, Colpan, & Devrim, 2020)	Yüksek sıcaklık-proton değişim membranlı yakıt hücresi tabanlı entegre kojenerasyon sisteminin enerji ve ekserji performans değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, entegre sistemin performansını etkileyen en etkili parametrenin anot stokiyometrik oranı olduğunu göstermiştir. Temel koşullar için, anot stokiyometrik oranı 1,2'den 2'ye yükseldiğinde, elektrik, kojenerasyon ve ekserjetik verimlilik sırasıyla %42,04, %33,15 ve %37,39 azalmıştır.
(Pan, Yang, Wang, & Chen, 2020)	Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde membranların gözden geçirilmesi, taşıma olgusu, performans ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Membranların performansını ve arıza modlarını etkileyen taşıma olgusu ile ilgili temel/önemli faktörler de bu çalışmada gözden geçirilmiştir ve bu da membranların işletim sırasında performansını ve dayanıklılığını iyileştirmede stratejiler geliştirmeye yardımcı olmuştur.
(Paul, Saha, Qi, Stumper, & Gates, 2020)	Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde taşıma dirençlerini geliştirmek için mikro yapıli membranların durumları incelenmiştir. Bu çalışmada, bir dizi en-boy oranı üzerinde ayarlanmış düzenli, mikro yapıli özelliklere sahip bir proton değişim membranı (PEM) hazırlanmıştır. Bu mikro yapıli membranlar, MEA'lara dahil edilmiş ve membran, proton ve oksijen taşıma dirençleri açısından analiz edilmiştir.
(Khoo, ve diğerleri, 2021)	İyonik sıvı teknolojisi ile proton değişim membranlı yakıt hücresinin geliştirilmesi konusunda çalışılmıştır.
(Kim, ve diğerleri, 2021)	Yüksek sıcaklıklı proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin modellenmesinden parametre analizi gerçekleştirilmiştir.

(Najmi, Anyanwu, Xie, & Liu, 2021)	Farklı akış alanları kullanılarak proton değişim membranlı yakıt pilinin deneysel incelenmesi ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, dalgalı akış alanı tasarımlarının davranışını serpantin, iç içe ve düz paralel akış alanı tasarımları ile deneysel olarak analiz etmiş ve karşılaştırmıştır. Bulgular, dalgalı akış alanı konfigürasyonunun, diğer geleneksel akış alanı tasarımlarına kıyasla daha iyi nem toleransı, gelişmiş kütle aktarımı ve gelişmiş performans ile daha az parazitik yük kullandığını göstermiştir.
(Omran, ve diğerleri, 2021)	Bir proton değişim membranı (PEM) yakıt hücresinin matematiksel modeli geliştirilmiştir. Model, aşağıdaki ana bileşenlere sahip bir Horizon H-500xp model yakıt hücresi yığın sistemi kullanılarak doğrulanmıştır: 500 W PEM yakıt hücresi, başlatma için 12 V'luk 12 V pil, tepe yükleri beslemek için bir süper kapasitör bankası ve 48 V DC-DC yükseltici dönüştürücü. Hem model hem de deneyler, yaklaşık %48'lik bir genel PEMFC sistemi maksimum verimi göstermiştir.
(Pahon, Hua, Zheng, & Gao, 2021)	Otomotiv uygulamalarında proton değişim membranlı yakıt pilinin performans analizi çalışması gerçekleştirilmiştir.
(Wang, ve diğerleri, 2021)	Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin içindeki ısı transferinin araştırması çalışması yapılmıştır. Yüksek performanslı proton değişim membranlı yakıt hücreleri için nanofiber kompozit elektrolit membranların tasarımında ve uyarlanmasında son gelişmeler incelenmiştir.
(Wilberforce & Olabi, 2021)	Yapay sinir ağı kullanılarak proton değişim membran yakıt hücresinin performans tahmini yapılmıştır. Araştırma, basınç ve akış hızı gibi operasyonel parametrelerin serpantin PEMFC'nin özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır.
(Xing, ve diğerleri, 2021)	Otomotiv araçları için proton değişim membranlı yakıt hücresi yığınlarının termal analizi ve yönetimi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma, otomotiv araçları ve soğutma sistemleri için su soğutmalı PEMFC yığınları için yeni bir simülasyon modeli sunmuştur. Soğutma sistemi için ısı yayılım gereksinimlerini hesaplamak için teorik analiz yapılmıştır. Vaka çalışması sonuçları, ısı dağılımı gereksiniminin %99,0'ından fazlasının PEMFC yığınının termal yönetimi için olduğunu göstermiştir.

### 3. PROTON DEĞİŞİM MEMBRANLI YAKIT HÜCRELERİNDE KİRLİLİK KAVRAMI

Hidrojen ve yakıt hücreleri, enerji ağında önemli bir rol oynama ve daha sürdürülebilir bir gelecek sağlama potansiyeline sahiptir. Hidrojen nispeten düşük bir sermaye maliyeti gerektirir, diğer yakıtlara kıyasla benzersiz bir şekilde yüksek gravimetrik enerji yoğunluğu sunar ve mevcut enerji ağına iyi uyum sağlar. Ek olarak, hidrojen güvenlik sorunu mitine

karşı, güvenlik konusu ve güvenlik önlemleri dikkate alınarak ele alınır- sa kolayca yönetilebilir. Polimer değişim membranlı (PEM) yakıt hücreleri, otomotiv ve endüstriyel uygulamalardan kaynaklanan çevre kirliliği sorununu ele alan yeşil güç jeneratörleridir. Ayrıca yakıt hücreleri, diğer geleneksel güç jeneratörlerine kıyasla daha yüksek güç yoğunluğuna ve verimliliğine sahiptirler. Ancak kirleticilerin varlığı yakıt hücrelerinin performansını önemli ölçüde etkiler. Anot, katot ve membrandaki kirleticilerin varlığında hücrelerin performansı açısından olumsuz etkileri, mekanizmaları ve kirliliği azaltma yaklaşımlarını araştırmak için kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Kirleticiler, hava (azot, nitrojen ve kükürt oksitler, amonyak ve ozon), reformat (karbon monoksit, karbon dioksit ve metan), bipolar plakalar (demir, nikel ve bakır iyonları), membranlar (sodyum ve kalsiyum iyonları), sızdırmazlık malzemeleri (silikon) ve soğutma sistemi dahil olmak üzere farklı kaynaklardan üretilir ve hücreye verilir. Bipolar plakaların korozyonu, membranın iletkenliğini bozan katyonlar üretir. Bipolar plakaların korozyonundan üretilen katyonların yanı sıra, çoklu metalik elektrokatalizörler de Pt ile alaşımlı geçiş metallerinin çözünmesi başka bir kontaminasyon kaynağı olabilir. Bu elektrokatalizörlerin uygulanmasında katyonların hücreyi kirlitememesine dikkat edilmelidir (Li, ve diğerleri, 2010; Jayasayee, Veen, Hensen, & Bruijijn, 2011; Lædre, Kongstein, Oedegaard, Seland, & Karoliussen, 2012).

PEM yakıt hücrelerinin ana bozunma modları, bir yakıt hücresi çalışma ortamında Pt bazlı katalizörler ve proton değişim membranları dahil olmak üzere temel malzemelerin düşük stabiliteyle bağlantılıdır. Başlıca katalizör bozunma modları, Pt aglomerasyonu ve çözünmesi, katalizör desteği (karbon) korozyonu veya oksidasyonu ve katalizör kontaminasyonu olarak kabul edilir. Katalizör kirliliği ile ilgili olarak, besleme akışlarından (hem hava hem de yakıt) ve yakıt hücresi bileşenlerinden gelen kirleticiler, birincil katalizör kirleticileridir (Cheng, ve diğerleri, 2007; Li, Song, & Zhang, 2008; Li, ve diğerleri, 2010).

Proton değişim membranı (PEM) yakıt hücrelerinin teknik olgunluğu ilerledikçe, yetersiz dayanıklılık, ticarileşmelerini engelleyen ana engellerden biri olmaya devam etmektedir. Performans düşüşü olarak ortaya çıkan bu problem, Pt katalizör aglomerasyonu ve çözünmesinin, katalizör karbon desteği korozyonunun, membran bozulmasının ve besleme akımı ve bileşen safsızlıklarının neden olduğu yakıt hücresi kontaminasyonunun sonucu olabilir. Bu kirleticiler yakıtta (örn. CO, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> ve hidrokarbonlar) ve/veya havada (örn. NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub> ve bazı uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve yakıt hücresi bileşenleri ve sisteminden (örn. Fe<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup> ve Cr<sup>3+</sup>) veya alaşım katalizörlerinden (örn. Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> ve Fe<sup>3+</sup>) kaynaklanabilir. Özetle, yukarıda bahsedilen kirleticiler, esas olarak üç etkiden: (1) reaksiyon alanlarının zehirlenmesinden kaynaklananlar gibi reaksiyon kinetiğinin bozulma-



sı, (2) membranın ve/veya iyonomerin iyonik iletkenliğinde azalma ve (3) katalizör tabakasının ve GDL'nin yapısındaki değişikliklerden veya yetersiz hidrofilitik/hidrofobiklik oranından kaynaklanan kütle taşıma sorunlarından dolayı yakıt pilinin bozulmasına veya arızalanmasına yol açabilir. Bu etkilerin nispi katkısı kirleticinin doğasına bağlıdır. Örneğin, iki yaygın yakıt kirleticisi olan CO ve H<sub>2</sub>S, esas olarak Pt yüzeyinde güçlü adsorpsiyon yoluyla yakıt hücresi performansını düşürür, aksi takdirde hidrojen oksidasyon reaksiyonu (HOR) için kullanılacak olan aktif bölgeleri işgal eder ve böylece anot reaksiyonunu yavaşlatır. İkinci bir örnek, yakıt akışında NH<sub>3</sub>'ün neden olduğu kirliliktir. NH<sub>3</sub>'ün varlığı, membran ve iyonomerdeki protonların yerini alan ve proton iletkenliğini azaltan NH<sup>4+</sup> oluşumuna yol açabilir. Üçüncü bir örnek, hava akımında toluenin neden olduğu katot kontaminasyonudur. Kapalı ortamlarda bulunan bir VOC olan toluen, katot oksijen indirgeme reaksiyonunun (ORR) hem kinetiğini hem de kütle transferini bozarak hücre performansını azaltabilir (Zamel & Li, 2011; Lædre, Kongstein, Oedegaard, Seland, & Karoliussen, 2012).

Karbon monoksit, hücre performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan kirliliklerden biridir. Çok düşük konsantrasyonlarda bile CO kirliliklerinin varlığı hücre performansını engelleyebilir. Aslında CO anot gaz kanalına verildiğinde katalizör yüzeylerinde emilir. CO ile katalizör yüzeyindeki platin bölgeleri arasındaki bağ çok güçlüdür ve hidrojenin katalizör bölgelerine ulaşmasını engeller ve bu nedenle hidrojen oksidasyon reaksiyonunun etkinliği azalır.

Yakıt hücreleri için en önemli zehirlenmelerden olan CO zehirlenmesi ve yakıt hücresi performansı üzerindeki etkileri, literatürde daha önce yapılan birkaç araştırmanın odak noktası olmuştur. Oetjen ve diğerleri (Oetjen, Schmidt, Stimming, & Trila, 1996), CO zehirlenmesinin etkilerini üç farklı anot katalizörü üzerinde karşılaştırmak için deneysel bir ölçüm gerçekleştirmişlerdir. Hücre performansının büyük ölçüde CO konsantrasyonuna ve kullanılan anot katalizörüne bağlı olduğunu göstermişlerdir. Springer ve diğerleri (Springer, Zawodzinski, & Gottesfeld, 1997), CO zehirlenmesi için (CO'nun yakıt hücresi performansı üzerindeki olumsuz etkisini hesaba katan ilk modellerden biridir) iki boyutlu bir kararlı durum kinetik modeli geliştirmişlerdir. Anot yakıt akışında eser miktarda CO bulunmasının hücre performansında önemli bir düşüşe neden olduğu bildirilmiştir. Zhang ve diğerleri (Zhang, Thampan, & Datta, 2002), anot akış hızı ve katot oksijen kısmi basıncının hidrojen ve CO içeren yakıt altında çalışan bir yakıt hücresinin hücre performansı üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Anot akış hızının yakıt hücresi performansını güçlü bir şekilde etkilediğini tespit etmişlerdir. Sabit bir akım yoğunluğunda anot akış hızının artmasıyla hücre voltajının önemli ölçüde azaldığı rapor edilmiştir. Zhou ve Liu (Zhou & Liu, 2004), inert gazlardan kaynaklanan

hidrojen seyreltmesinin etkisinin yanı sıra CO zehirlenmesi etkisini incelemek için kararlı bir 3-D matematiksel model sunmuşlardır. Çeşitli çalışma ve tasarım koşulları altında hücre performansını araştırmışlardır. Bhatia ve Wang (Bhatia & Wang, 2005), Springer ve diğerleri tarafından önerilen kinetiği basitleştirerek, taşıma olgusunu ihmal ederek ve dikkatlerini anot katalizör tabakasına (ACL) sınırlayarak geçici CO zehirlenmesini incelemiştirlerdir. Chu ve diğerleri (Chu, Wang, Liao, & Yan, 2006), Springer ve diğerleri tarafından CO zehirlenmesinin bir PEMFC'nin performansını nasıl etkilediğini analiz etmek için geliştirilen CO kinetik modeline dayanan tek boyutlu bir geçici model sunmuşlardır. Katalizör yüzeylerinde CO adsorpsiyonundan dolayı zaman geçtikçe hidrojen kaplamasının azaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca, daha yüksek bir CO konsantrasyonunun, hidrojen elektro-oksidasyonu için daha az mevcut katalizör bölgesi ile sonuçlandığını ve kararlı duruma ulaşmak için tepki süresinde önemli bir azalma olduğunu belirtmişlerdir. Wang ve Chu (Wang & Chu, 2006), bir PEM yakıt hücresinin performansı üzerindeki karbon monoksit zehirlenmesinin etkisini göstermek için tek boyutlu, iki fazlı, geçici bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Hücre içinde hem buhar hem de sıvı su taşınmasını araştırmışlardır. Teorik sonuçları, daha yüksek bir CO konsantrasyonunun daha az hidrojen kapsamı ve sabit duruma ulaşma zamanında büyük bir düşüşle sonuçlandığını ortaya koymuştur.

Yıkıcı CO zehirlenmesi etkilerini azaltmak için çeşitli yöntemler vardır. En yaygın olarak kullanılan azaltma tekniklerinden bazıları, oksijen sızması, hücre çalışma sıcaklığının arttırılması ve alternatif katalizörlerin veya CO-toleranslı katalizörlerin kullanımını içerir. Oksijen sızması yöntemi ilk olarak Gottesfeld ve Pafford (Gottesfeld & Pafford, 1988) tarafından PEMFC uygulaması için tanıtılmıştır. Baschuk ve Li (Baschuk & Li, 2003), CO zehirlenmesini ve oksijen sızmasını simüle etmek için tek boyutlu bir kararlı durum kinetik modeli sunmuşlardır. Çalışmalarında, karbon monoksit ve hidrojenin adsorpsiyonu, desorpsiyonu ve elektro-oksidasyonu sırasıyla reaktan çifti ve Tafel-Volmer mekanizmaları ile modellenmiştir. Ayrıca oksijen sızıntısı, bir Langmuir-Hinshelwood mekanizması yoluyla karbon monoksit ve hidrojenin heterojen oksidasyonu ile modellenmiştir. Zamel ve Li (Zamel & Li, 2008), CO zehirlenmesi ve oksijen sızma etkilerini hücre performansı üzerinde araştırmak için geçici bir model sunmuşlardır. Baschuk ve Li tarafından önerilen modele benzer bir model kullanmışlardır. Oksijen sızıntısının ve çalışma sıcaklığının ve basıncının kayıp yakıt hücresi performansının geri kazanılması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

CO zehirlenmesinin hücre performansı üzerindeki yıkıcı etkilerini azaltmanın bir başka yolu da CO toleranslı katalizörler kullanmaktır. En yaygın olarak araştırılan CO toleranslı katalizörlerden biri platin/rutenyum

katalizörleridir. PtRu elektrotları üzerindeki araştırmalar, 1960'ların başlarından itibaren kapsamlı bir şekilde yürütülmüştür. Lee ve diğerleri (Lee, Mukerjee, Ticianelli, & McBreen, 1999), PEMFC'deki Pt/C, PtSn/C ve PtRu/C elektrokatalizörleri için hidrojen oksidasyon reaksiyonunda CO toleransının elektro-katalizini araştırmışlardır. Hem yarım hem de tek hücre polarizasyon özellikleri, çeşitli sıcaklıklarda ve CO konsantrasyonlarında incelenmiştir. CO adsorpsiyon adımının ağırlıklı olarak PtSn/C için bir yer değiştirme yolu ve hem Pt/C hem de PtRu/C üzerinde CO için serbest alan giriş yolu aracılığıyla gerçekleştiği öne sürülmüştür. Veriler, Pt/C ve PtRu/C üzerinde lineer ve köprülü bağlı adsorbe edilmiş CO'nun katılımıyla daha tutarlı olduğunu göstermiştir. CO'nun alaşım katalizörleri tarafından oksidasyonunun, CO toleransına tek katkıda bulunan şey olmadığını göstermişlerdir. Alaşım katalizörleri tarafından indüklenen CO adsorpsiyon işleminin termodinamiği ve kinetiğindeki değişikliklerin de CO toleransına katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Shah ve diğerleri (Shah, Sui, Kim, & Ye, 2007), bir PEMFC'nin MEA'sında CO zehirlenmesi ve oksijen sızıntısının geçici, tamamen iki fazlı, izotermal olmayan bir modelini sunmuşlardır. Ayrıca, çalışma sıcaklığının yanı sıra CO toleranslı bir katalizör olarak PtRu katalizörünün hücre performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. PtRu katalizörleri üzerinde karbon monoksit oksidasyonu için iki işlevli bir mekanizma dahil etmişlerdir. Sung ve diğerleri (Sung, Hwang, Hsueh, & Tsau, 2010), CO zehirlenmesi altında bir PEMFC'nin dinamik davranışını ve hava sızıntısının PtRu katalizör alanlarındaki geri kazanım oranı üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Deneysel sonuçları, CO toleranslı bir katalizör kullanılsa bile, çalışmalarındaki çalışma koşullarında CO zehirlenmesinin önlenemediğini göstermiştir (20 dakika içinde çıkış akımının yaklaşık %80'i kaybolmuştur). Ayrıca, kirlenmiş yakıtta %5'ten daha az hava enjekte edilmesinin, kayıp akım yoğunluğunun geri kazanılmasında önemli bir iyileşme sağladığı bildirilmiştir.

Yakıt veya hava akımındaki veya yakıt hücresi sistemi bileşenlerindeki eser miktardaki yabancı maddelerin bile, özellikle düşük sıcaklıkta çalıştırmada anot, membran ve katodu ciddi şekilde zehirleyebileceği gösterilmiştir. Kirleticiler, katalizör yüzeyinde güçlü veya geri döndürülemez şekilde adsorbe edilerek reaksiyon alanlarını bloke edebilir; membrana girerek proton iletkenliğini azaltır ve kütle hareketini etkileyen katalizör tabakası ara yüzünün hidrofobikliğini/hidrofilikliğini değiştirebilir. Sonuç olarak, kirleticiler performansın düşmesine ve bazen membran elektrot düzeneklerinde (MEA) kalıcı hasara neden olur (Hayter, Mitchell, Dams, Dudfield, & Gladding, 1997; Cheng, ve diğerleri, 2007).

Yakıt hücrelerinde performansa etki eden kirlilik durumu son 10 yılda ciddi bir araştırma konusu haline gelmiştir. Birçok araştırmacı çeşitli kirle-

ticilerin yakıt pili ve sistem performansı üzerindeki etkilerini inceleyerek bu olumsuz durumdan kurtulmak için çareler aramışlardır. Son 10 yılda yapılan bazı önemli çalışmalar Tablo 3'te gösterilmektedir.

**Tablo 3.** *Son 10 yılda yakıt pillerindeki kirlilik durumunun araştırılması hakkında yapılan bazı önemli çalışmalar*

Referans	Açıklamalar
(Pierre, Zhai, & Angelo, 2012)	PEMFC kirleticileri için iki adet 2. kademe nicel sıralama kriteri önerilmiş ve bunların kullanılabilirliği, SO <sub>2</sub> içeren bir hava akımı ile elde edilen performans verileri kullanılarak tartışılmıştır.
(Yuan, Yu, & Jiang, 2012)	Bir proton elektrolit membranlı yakıt pilinde katotta amonyak tarafından ortaya çıkan kontaminasyonun teşhisi çalışması yapılmıştır. Sonuçlar, amonyak kontaminasyonunun neden olduğu olumsuz etkinin şiddetinin, artan amonyak konsantrasyonu, azalan çalışma sıcaklığı ve azalan bağıl nem ile arttığını göstermiştir. Amonyak tarafından indüklenen performans düşüşü, azaltılmış membran/iyonomer iletkenliğine ve aktif bölgeleri bloke eden ve kütle transferini engelleyen katalizör yüzeyinde amonyak adsorpsiyonuna bağlanmıştır.
(Bender, Angelo, Bethune, & Rocheleau, 2013)	Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde düşük seviyeli karbon monoksit maruziyetinin performans etkisinin nicel analizi konulu çalışma gerçekleştirilmiştir. Performans kaybı, çeşitli sıcaklıklar, anot bağıl nemleri ve akım yoğunlukları dahil olmak üzere farklı çalışma koşulları için araştırılmıştır.

**Tablo 3.** *Son 10 yılda yakıt pillerindeki kirlilik durumunun araştırılması hakkında yapılan bazı önemli çalışmalar (devamı)*

(Qi, ve diğerleri, 2015)	Katyonik kirleticilerin proton elektrolit membranlı yakıt hücresi performansına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada yaygınlıkları ve kimyasal yapıları nedeniyle kirleticiler olarak dört yabancı katyon (K <sup>+</sup> , Ba <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup> ) seçilmiştir, ancak sodyum ve demir gibi literatürde halihazırda geniş yer alan kirleticiler hariç tutulmuştur. SEM/EDX sonuçları, K <sup>+</sup> 'nin CCM'de en yüksek alan çapına sahip olduğunu göstermiş; bu, hücrenin KClO <sub>4</sub> enjeksiyonlu performans düşüşünün bu çalışmada neden en kötü olduğunu açıklayabilmiştir.
(Zhai & Pierre, 2015)	Asetilen'in proton değişim membranlı yakıt hücresi katot kirliliği konusu araştırılmıştır. Hücre voltajı yanıtı, 300 ppm asetilenin, yaklaşık olarak %88'lik bir hücre performans kaybıyla sonuçlandığını göstermiştir.
(Ehteshami, Taheri, & Chan, 2016)	Proton elektrolit membran yakıt hücrelerinin iyon kaynaklı kontaminasyonu, zehirlenme mekanizmaları ve azaltma yaklaşımları üzerine bir inceleme gerçekleştirilmiştir.

(Zhai, ve diğerleri, 2016)	Proton Değişim Membranlı Yakıt Pillerinin katodunda <i>bromometan kirliliği</i> konusunda çalışmalar yapılmıştır. Havadaki bromometanın bir PEMFC'yi klorobenzenden farklı bir şekilde zehirlediği sonucuna varılmıştır çünkü büyük ölçüde bromür Br <sup>-</sup> 'ye hidrolize olmuş ve bu daha sonra negatif yüklü Nafion iyonomeri tarafından Pt katalizöründen hariç tutulmuştur.
(Bilondi, Abdollahzaded, Kermani, Heidarya, & Havaej, 2018)	Anot tarafı CO kontaminasyonunun PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkilerinin sayısal çalışması ve azaltma yöntemleri konusunda çalışmalar yapılmıştır. Çok düşük karbon monoksit seviyelerinin mevcudiyetinin, hücre performansı üzerinde önemli bir zararlı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (hidrojen yakıt olarak 15 ppm CO ile önceden karıştırıldığında, çıkış akımının yaklaşık %30'u 30 dakika içinde kaybolmuştur).
(Gomez, Oyarce, Lindbergh, & Lagergren, 2018)	Proton Değişim Membranlı Yakıt Piliin Amonyak Kirliliği konusu incelenmiştir. 200 ppm amonyak eklendiğinde performansta önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. Sonuçlar, amonyağın sadece polimer elektrolit membranını değil, aynı zamanda oksijen indirgeme reaksiyonunu (ORR) ve her iki elektrotta da katalizör iyonomerini etkilediğini, hidrojen oksidasyon reaksiyonunun (HOR) ise en kötü etkilenen olduğunu göstermiştir.
(Qi, Ge, Uddin, Zhai, & Pasaogullari, 2018)	Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde Ca <sup>2+</sup> ile katot kontaminasyonunun değerlendirilmesi çalışması yapılmıştır.
(Zhai & Pierre, 2018)	Asetilen kontaminasyonuna maruz kalan proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin tolerans ve azaltma stratejileri konusu çalışılmıştır. Tolerans değerinin üzerindeki konsantrasyonda asetilen ile zehirlenen bir hücre için, ohmik kompanzasyonlu hücre voltajı asetilen oksidasyonu (hücre voltajı artışı) veya hidrojenasyon (hücre voltajı düşüşü) bölgelerine getirilerek performans kayıpları ortadan kaldırılmıştır.
(Zhai & Pierre, 2019)	Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin katodunda asetinitril kontaminasyonu ve hücre performansının geri kazanılması konusunda çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar, düşük ve yüksek potansiyellerin orta potansiyelden daha büyük bir proton iletkenlik etkisine neden olduğunu göstermiştir. N <sub>2</sub> 'de farklı potansiyellerde kontaminasyondan sonra hücre performansını eski haline getirmek için iki geri kazanım yöntemi gerçekleştirilmiştir. Katalizör katmanlarında üretilen sıvı suyun, bir proton değişim membranlı yakıt hücresinde asetinitril kontaminasyonundan geri kazanım sırasında önemli bir rol oynayabildiği belirlenmiştir.

**Tablo 3.** *Son 10 yılda yakıt pillerindeki kirlilik durumunun araştırılması hakkında yapılan bazı önemli çalışmalar (devamı)*

(Zhu, Tan, Pan, Liu, & Hou, 2019)	Mg <sup>2+</sup> kontaminasyonunun proton değişim membranlı yakıt pilinin performansı üzerindeki etkileri konusu incelenmiştir. Bu çalışmada beş seviye Mg <sup>2+</sup> konsantrasyonu kullanılmıştır. Elektrokimyasal performans testleri, PEM yakıt hücresinin anot H <sub>2</sub> yakıt akışına çeşitli Mg <sup>2+</sup> konsantrasyon çözeltileri eklenerek gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, hem Mg <sup>2+</sup> konsantrasyonunun hem de kontaminasyon süresinin PEM yakıt hücresi performansı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. PEM yakıt hücresinin voltajı ve maksimum güç yoğunluğu, Mg <sup>2+</sup> konsantrasyonunun ve kontaminasyon süresinin artmasıyla azalmıştır.
(Gomez, Lindbergh, & Lagergren, 2020)	Bir PEM Yakıt Hücresinde Azotdioksit ile Kirlenmeden Sonra Performans İyileşmesi çalışması yapılmıştır. Farklı geri kazanım yöntemlerini araştırmak için bu çalışmada, bir PEM yakıt hücresi katot tarafında 100 ppm NO <sub>2</sub> ile kirlenmiştir. Hücre performansını geri kazanma olasılığı, farklı hava akış hızları, farklı akım yoğunlukları kullanılarak ve hücrenin ardışık polarizasyon eğrilerine tabi tutulmasıyla incelenmiştir.
(Schonvogel, Büsselmann, Wagner, & Dyck, 2021)	Kükürtdioksit tarafından hava kirliliğinin yüksek sıcaklık PEM yakıt hücresi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, 500 saatlik çalışma sırasında SO <sub>2</sub> ile kirlenmiş havanın sonuçları sistematik olarak araştırılmıştır. 10 ppm SO <sub>2</sub> sağladıktan sonra katodun daha güçlü bir asidik ortama maruz kaldığı kanıtlanmıştır. Bipolar plaka, gaz çıkış bölgesinde, kirlenmemiş bir hücrenin içindekinden 8 kat daha yüksek bir asit alımı göstermiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Dünyanın sürekli artan enerji talebini çevreye zarar vermeden ve daimi olarak sağlayabilecek en ileri teknolojinin hidrojen enerji sistemi olduğu çoğu araştırmacı ve bilim insanı tarafından kabul edilmiştir. Hidrojen enerjisini en ekonomik ve en verimli şekilde kullanan teknolojilerden biri ise yakıt pili teknolojisidir.

Yakıt pilleri, kesintisiz olarak dışarıdan anot kısmına tedarik edilen yakıtta ait enerji ile reaksiyonların gerçekleşmesi amacıyla yine dışarıdan devamlı olarak katot tarafına beslenen oksitleyiciye (hava veya oksijen) ait enerjiyi elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu dönüşüm sonucunda yanma ürünü olarak sadece su ve ısı açığa çıkmaktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanımı halinde reaksiyon sonrası emisyon olarak sadece su oluşması da çevre dostu bir enerji kaynağı olduğunu, yakıt sağlandığı sürece çalışarak elektrik üretebilmesi de sürekli bir enerji kaynağı olduğunu göstermektedir.

Diğer yakıt hücresi türleri ile karşılaştırıldığında, Proton Değişim Membranı (PEM) türleri, nispeten yüksek güç yoğunluğu ve yüksek ve-

rimliliği nedeniyle daha umut vericidir. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri; elektrokimyasal reaksiyonlar, termal taşıma, kütle aktarımı, elektron aktarımı ve proton aktarımı gibi süreçlerden oluşan karmaşık sistemlerdir. Elektrokimyasal reaksiyonlara verimli taşıma sağlamak için gaz, elektron ve protonların iletkenliği optimize edilmelidir. Taşıma süreçlerinden biri olarak iyon iletimi, termal olarak aktive edilmiş bir prosedürdür ve büyüklüğü, sıvı ya da katı olabilen elektrolit, malzemenin tipine bağlı olarak önemli ölçüde değişir ve bu nedenle yakıt hücresinin çalıştırıldığı sıcaklığı belirler. Sistemlerin bu süreçleri işlemesi ve gerçekleştirilmesi için, görevleri yerine getirmek için farklı bileşenler dahil edilir.

Yüksek güç, güvenli yapı, basit ve hızlı başlatma gibi birçok avantajı vardır ve bu da bu sistemleri özellikle ev aletleri, araçlar ve nakliye araçları için uygun hale getirir. Birkaç yıl içinde, tasarım, malzeme, üretim ve uygulamalar açısından PEMFC'ler için çok fazla ilerleme kaydedilmiştir. Bu ana kadar, performansı, dayanıklılığı ve hidrojen depolamasına ek olarak, Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücrelerinin ticarileştirilmesinin arkasındaki en büyük sorunlardan birinin maliyetinin olduğu düşünülmektedir.

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinde kirleticilerin neden olduğu kontaminasyon, yakıt hücresi işletimi ve uygulamalarında önemli bir konudur. Kirleticiler, kaynağa göre dış (harici) ve iç (dahili) kirleticiler olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Dış kirleticiler yakıt hücresine esas olarak yakıt veya hava besleme akımı yoluyla girerler. Yeniden biçimlendirmeden üretilen hidrojen yakıtındaki başlıca safsızlıklar arasında CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, organik kükürt-karbon ve karbon hidrojen bileşikler bulunur ve havadakiler NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, O<sub>3</sub> ve küçük organik bileşikler gibi kirleticileri içerir. Donanım kaynaklarından gelen safsızlıklar, gaz difüzyon katmanlarından, bipolar plakalardan ve sistem bileşenlerinden Fe<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> ve Cr<sup>3+</sup> gibi metal iyonları, membranlardan Na, Ca ve S ve contalardan ve soğutma sıvısından Si içerir. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücrelerine dahil olan bu kirleticiler sistemin performansını ve kalitesini düşürerek olumsuz durumlara yol açmaktadır. Bu kirlilik türleri arasında en önemlisi CO kirliliğidir. Sisteme dahil olduğunda zehirlenmelere yol açmaktadır. CO zehirlenmesinin yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisi ve azaltma yöntemleri hakkında bazı araştırmalar olmasına rağmen, CO zehirlenmesi sürecini ve zehirlilik etkisini azaltma tekniklerini simüle etmek için kapsamlı, doğrulanmış bir dinamik model eksikliği vardır.

Yakıt hücreleri konusunda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmakta, bu sistemlerden en etkili şekilde yararlanmanın yolları aranmaktadır. Özellikle otomobil endüstrisinin ilgi odağında olan yakıt hücreleri konusunda bilim insanları teknoloji ilerledikçe yeni ilerlemeler kaydetmektedir. Çevreye olan olumlu etkileri de göz önüne alındığında bu sistemlerin en ileri seviyeye ulaşmaları önem arz etmektedir.

## KAYNAKÇA

- Abderezzak, B., Khelidj, B., & Abbes, M. T. (2014). Performances prediction study for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15206-15214.
- Ahmad, T., & Zhang, D. (2020). A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*, 1973-1991.
- Araya, S., Zhou, F., Liso, V., Sahlin, S., Vang, J., Thomas, S., . . . Kaer, S. (2016). A comprehensive review of PBI-based high temperature PEM fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, 15206-15214.
- Arvay, A., Ahmed, A., Peng, X., & Kannan, A. (2012). Convergence criteria establishment for 3D simulation of proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2482-2489.
- Asensio, J., Sanchez, E., & Gomez-Romero, P. (2010). Proton-conducting membranes based on benzimidazole polymers for hightemperature PEM fuel cells. A chemical quest. *Chem. Soc. Rev.*, 3210-3239.
- Barbir, F. (2005). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. University of Split, Croatia: Elsevier.
- Barron, O., Su, H., Linkov, V., Pollet, B., & Pasupathi, S. (2015). Enhanced performance and stability of high temperature proton exchange membrane fuel cell by incorporating zirconium hydrogen phosphate in catalyst layer. *Journal of Power Sources*, 718-724.
- Baschuk, J., & Li, X. (2003). Modelling CO poisoning and O<sub>2</sub> bleeding in a PEM fuel cell anode. *Int J Energy Res*, 1095-1116.
- Bender, G., Angelo, M., Bethune, K., & Rocheleau, R. (2013). Quantitative analysis of the performance impact of low-level carbon monoxide exposure in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 159-169.
- Bhatia, K., & Wang, C. (2005). Transient carbon monoxide poisoning of a polymer electrolyte fuel cell operating on diluted hydrogen feed. *Electrochim Acta*, 2333-2341.
- Bilondi, A., Abdollahzayed, M., Kermani, M., Heidarya, H., & Havaej, P. (2018). Numerical study of anode side CO contamination effects on PEM fuel cell performance; and mitigation methods. *Energy Conversion and Management*, 519-534.
- Cheng, X., Shi, Z., Glass, N., Zhang, L., Song, D., Liu, Z., . . . Shen, J. (2007). A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: Impacts, mechanisms, and mitigation. *Power Sources*, 739-742.
- Chiu, H., Chiu, H., Jang, J., Jang, J., Yan, W., Yan, W., . . . Liao, C. (2012). A three-dimensional modeling of transport phenomena of proton exchange membrane fuel cells with various flow fields. *Applied Energy*, 359-370.
- Chu, H., Wang, C., Liao, W., & Yan, W. (2006). Transient behavior of CO poisoning of the anode catalyst layer of a PEM fuel cell. *J Power Sources*, 1071-1077.



- Cleghorn, S., Springer, T., Wilson, M., Zawodzinski, C., Zawodzinski, T., & Gottesfeld, S. (1997). PEM fuel cells for transportation and stationary power generation applications. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1137-1144.
- Costamagna, P., & Srinivasan, S. (2001). Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000: Part I. Fundamental scientific aspects. *J Power Sources*, 242-252.
- Dupis, A. (2011). Proton exchange membranes for fuel cells operated at medium temperatures: Materials and experimental techniques. *Prog. Mater. Sci.*, 289-327.
- Ehteshami, S., Taheri, A., & Chan, S. (2016). A review on ions induced contamination of polymer electrolyte membrane fuel cells, poisoning mechanisms and mitigation approaches. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 1-8.
- Gomez, Y., Lindbergh, G., & Lagergren, C. (2020). Performance Recovery after Contamination with Nitrogen Dioxide in a PEM Fuel Cell. *Molecules*, 11-15.
- Gomez, Y., Oyarce, A., Lindbergh, G., & Lagergren, C. (2018). Ammonia Contamination of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 189-197.
- Gottesfeld, S., & Pafford, J. (1988). A new approach to the problem of carbon monoxide poisoning in fuel cells operating at low temperatures. *J Electrochem Soc*, 2651-2652.
- Grubb, W., & Niedrach, L. (1960). Polymer Electrolyte Membranes. *Electrochem. Soc.*, 107-131.
- Haile, S. (2003). Fuel cell materials and components. *Acta Materialia*, 5981-6000.
- Haile, S., Chisholm, C., Sasaki, K., Boysen, D., & Uda, T. (2007). Solid acid proton conductors: From laboratory curiosities to fuel cell electrolytes. *Faraday Discuss*, 134-142.
- Hammes-Schiffer, S., & Soudackov, A. (2008). Proton-coupled electron transfer in solution, proteins, and electrochemistry. *J. Phys. Chem. B.*, 14108-14123.
- Han, I., Park, S., & Chung, C. (2016). ). Modeling and operation optimization of a proton exchange membrane fuel cell system for maximum efficiency. *Energy Conversion and Management*, 52-65.
- Hayter, P., Mitchell, P., Dams, R., Dudfield, C., & Gladding, N. (1997). The effect of contaminants in the fuel and air streams on the performance of a solid polymer fuel cell. *Contract Report*, 142-154.
- Huang, Z., Su, A., & Liu, Y. (2013). Hydrogen generator system using Ru catalyst for PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) applications. *Energy*, 230-236.
- Jayasayee, K., Veen, J. V., Hensen, E., & Bruijijn, F. D. (2011). Influence of chloride ions on the stability of Pt-Ni alloys for PEMFC cathode. *Electrochim. Acta*, 56-72.
- Khoo, K., Chia, W., Wang, K., Chang, C., Leong, H., Maaris, M., & Show, P. (2021). Development of proton-exchange membrane fuel cell with ionic

- liquid technology. *Sci. Total Environ. Nov*, 48-70.
- Kim, E., Song, S., Choi, S., Park, J., Kim, J., & Kwon, K. (2021). Parameter analysis from the modeling of high temperature proton exchange membrane fuel cells. *Applied Energy*, 74-88.
- Kraytsberg, A., & Ein-Eli, Y. (2014). Review of advanced materials for proton exchange membrane fuel cells. *Energy Fuels*, 7303-7330.
- Kreuer, K., Paddison, S., Spohr, E., & Schuster, M. (2004). Transport in proton conductors for fuel-cell applications: Simulations, elementary reactions, and phenomenology. *Chem. Rev.*, 4637-4678.
- Kyle, P., Hejazi, M., Kim, S., Patel, P., Graham, N., & Liu, Y. (2020). Assessing the future of global energy-for-water. *Environmental Research Letters*, 31-40.
- Lædre, S., Kongstein, O., Oedegaard, A., Seland, F., & Karoliussen, H. (2012). The effect of pH and halides on the corrosion process of stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18537-18546.
- Laoun, B., Naceur, M., Khellaf, A., & Kannan, A. (2016). Global sensitivity analysis of proton exchange membrane fuel cell model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 9521-9528.
- Lee, K., Maurya, S., Kim, Y., Kreller, C., Wilson, M., Larsen, D., . . . Mukundan, R. (2018). Intermediate temperature fuel cells via an ion-pair coordinated polymer electrolyte. *Energy Environ. Sci.*, 979-987.
- Lee, S., Mukerjee, S., Ticianelli, E., & McBreen, J. (1999). Electrocatalysis of CO tolerance in hydrogen oxidation reaction in PEM fuel cells. *Electrochim Acta*, 3283-3293.
- Li, H., Gazzarri, J., Tsay, K., Wu, S., Wang, H., Zhang, J., . . . Schrooten, J. (2010). PEM fuel cell cathode contamination in the presence of cobalt ion (Co<sup>2+</sup>). *Electrochim. Acta*, 55-58.
- Li, H., Shi, Z., & Zhang, J. (2009). *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. Oxford, UK: Elsevier.
- Li, H., Song, C., & Zhang, J. (2008). *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications*. London: Springer-Verlag.
- Li, Q., He, R., Jensen, J., & Bjerrum, N. (2004). PBI-based polymer membranes for high temperature fuel cells—preparation, characterization and fuel cell demonstration. *Fuel Cells*, 147-159.
- Lin, C., Lien, W., Wang, Y., Shiu, H., & Lee, C. (2012). Preparation and performance of sulfonated polyimide/Nafion multilayer membrane for proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 1-7.
- Lipman, T., Edwards, J., & Kammen, D. (2004). Fuel cell system economics: Comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems. *Energy Policy*, 101-125.
- Liu, C., & Sung, C. (2012). A review of the performance and analysis of proton exchange membrane fuel cell membrane electrode assemblies. *Journal of Power Sources*, 348-353.

- Maslan, N., Gau, M., Masdar, M., & Rosli, M. (2016). Simulation of porosity and PTFE content in gas diffusion layer on proton exchange membrane fuel cell performance. *Journal of Engineering Science and Technology*, 85-95.
- Mehta, V., & Cooper, J. (2003). Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *J Power Sources*, 32-53.
- Najmi, A., Anyanwu, I., Xie, X., & Liu, Z. (2021). Experimental investigation and optimization of proton exchange membrane fuel cell using different flow fields. *Proceedings of the ICE - Energy*, 19-31.
- Najmi, A., Anyanwu, I., Xie, X., Liu, Z., & Jiao, K. (2021). Experimental investigation and optimization of proton exchange membrane fuel cell using different flow fields. *Energy Volume*, 19-31.
- Nalbant, Y., Colpan, C., & Devrim, Y. (2020). Energy and exergy performance assessments of a high temperature-proton exchange membrane fuel cell based integrated cogeneration system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3584-3594.
- Odukamaiya, A., Woods, J., James, N., Kaur, S., Gluesenkamp, K., Kumar, N., . . . Prasher, R. (2021). Addressing energy storage needs at lower cost via on-site thermal energy storage in buildings†. *Energy Environ. Sci.*, 5315-5329.
- Oetjen, H., Schmidt, V., Stimming, U., & Trila, F. (1996). Performance data of a proton exchange membrane fuel cell using H<sub>2</sub>/CO as fuel gas. *J. Electrochem Soc*, 3838-3842.
- Omran, A., Lucchesi, A., Smith, D., Alaswad, A., Amiri, A., & Wilberforce, T. (2021). Mathematical model of a proton-exchange membrane (PEM) fuel cell. *International Journal of Thermofluids*, 100-110.
- Özgür, T., & Yakaryilmaz, A. (2018). Thermodynamic analysis of a Proton Exchange Membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18007-18013.
- Pahon, E., Hua, Z., Zheng, Z., & Gao, F. (2021). Remaining useful life prediction of PEMFC systems under dynamic operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 25-38.
- Pan, C., He, R., Li, Q., Jensen, J., Bjerrum, N., & Hjulmand, H. (2005). Integration of high temperature PEM fuel cells with a methanol reformer. *J Power Sources*, 392-398.
- Pan, R., Yang, D., Wang, Y., & Chen, Z. (2020). Performance degradation prediction of proton exchange membrane fuel cell using a hybrid prognostic approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30994-31008.
- Park, C., Lee, C., Guiver, M., & Lee, Y. (2011). Sulfonated hydrocarbon membranes for medium-temperature and low-humidity proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). *Prog. Polym. Sci*, 1443-1498.
- Parniana, M., Rowshanzamira, S., Prasadc, A., & Advanic, S. (2018). High durability sulfonated poly (ether ether ketone)-ceria nanocomposite membranes for proton exchange membrane fuel cell applications. *Journal of Membrane Science*, 12-22.

- Paul, M., Saha, M., Qi, W., Stumper, J., & Gates, B. (2020). Microstructured membranes for improving transport resistances in proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3584-3594.
- Perry, M., & Fuller, T. (2002). A historical perspective of fuel cell technology in the 20th century. *Journal of The Electrochemical Society*, 59-67.
- Pierre, J. S., Zhai, Y., & Angelo, M. (2012). Quantitative ranking criteria for PEMFC contaminants. *International Journal of Hydrogen Energy*, 6784-6789.
- Pineri, M., & Eisenberg, A. (1987). *Structure and Properties of Ionomers*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Qi, J., Ge, J., Uddin, M., Zhai, Y., & Pasaogullari, U. (2018). Evaluation of cathode contamination with Ca<sup>2+</sup> in proton exchange membrane fuel cells. *Electrochimica Acta*, 510-516.
- Qi, J., Wang, X., Ozdemir, M., Bonville, L., Pasaogullari, U., & Molter, T. (2015). Effect of Cationic Contaminants on Polymer Electrolyte Fuel Cell Performance. *Clean Energy Engineering*, 44-52.
- Rameshkumar, K., Girimurugan, R., & Jegan, M. (2015). Numerical Investigation of Reactant Gases Pressure Distribution at Gas Diffusion Layer in High Temperature PEM Fuel Cell with Single Flow Channel Configuration. *International Journal of Research*, 303-308.
- Saadi, A., Becherif, M., Aboubou, A., & Ayad, M. (2013). Comparison of proton exchange membrane fuel cell static models. *Renewable Energy*, 64-71.
- Samms, S., Wasmus, S., & Savinell, R. (1996). Thermal stability of nafion® in simulated fuel cell environments. *J. Electrochem. Soc.*, 143-149.
- Savinell, R., Yeager, E., Tryk, D., Landau, U., Wainright, J., Weng, D., . . . Roger, C. (1994). A polymer electrolyte for operation at temperatures up to 200 C. *J. Electrochem. Soc.*, 46-48.
- Schmidt, J., Gruber, K., Klingler, M., Klöckl, C., Camargo, L., Regner, P., . . . Wetterlund, E. (2019). A new perspective on global renewable energy systems: why trade in energy carriers matters. *Energy Environ. Sci.*, 2022-2029.
- Schonvogel, D., Büsselmann, J., Wagner, P., & Dyck, A. (2021). NO/NO<sub>2</sub> Contamination of HT-PEM Fuel Cells – A Degradation Study with Evaluation of Regeneration Strategies. *The Electrochemical Society*, 267-276.
- Scott, K., Xu, C., & Wu, X. (2014). Intermediate temperature proton-conducting membrane electrolytes for fuel cells. *Energy Environ*, 24-41.
- Shah, A., Sui, P., Kim, G., & Ye, S. (2007). A transient PEMFC model with CO poisoning and mitigation by O<sub>2</sub> bleeding and Ru-containing catalyst. *J Power Sources*, 1-21.
- Shahbaz, M., Raghutla, C., Chittedi, K., Zhilun, J., & Vinh, V. X. (2020). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from the renewable energy country attractive index. *Energy*, 207-213.
- Smith, J. A., Nehrir, M. H., Gerez, V., & Shaw, S. R. (2002). A broad look at the workings, types, and applications of fuel cells. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 70-75.

- Springer, T., Zawodzinski, T., & Gottesfeld, S. (1997). Modeling of polymer electrolyte fuel cell performance with reformat feed streams: effects of low levels of CO in hydrogen. *Electrochem Soc Proc Ser*, 97-113.
- Stambouli, A. B., & Traversa, E. (2002). Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 295-304.
- Stambouli, A., & Traversa, E. (2002). Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 297-306.
- Suleiman, B., Abdulkareem, A., Musa, U., Mohammad, I., Olutoye, M., & Abdul-lahi, Y. (2016). Thermo-economic analysis of proton exchange membrane fuel cell fuelled with methanol and methane. *Energy Conversion and Management*, 228-240.
- Sun, X., Simonsen, S., & Norby, T. (2019). Composite membranes for high temperature PEM fuel cells and electrolyzers: A critical review. *Membranes*, 83-89.
- Sung, L., Hwang, B., Hsueh, K., & Tsau, F. (2010). Effects of anode air bleeding on the performance of CO-poisoned proton-exchange membrane fuel cells. *J Power Sources*, 1630-1639.
- Toghyani, S., Nafchi, F., Asfhari, E., Hasanpour, K., Baniasadi, E., & Atyabi, S. (2018). Thermal and electrochemical performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell under assembly pressure on gas diffusion layer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4534-4545.
- Vazifeshenas, Y., Sedighi, K., & Shakeri, M. (2015). Numerical investigation of a novel compound flow-field for PEMFC performance improvement. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15032-15039.
- Wainright, J., Wang, J., Weng, D., Savinell, R., & Litt, M. (1995). Acid-doped polybenzimidazoles: A new polymer electrolyte. *J. Electrochem. Soc.*, 121-123.
- Wang, C., & Chu, H. (2006). Transient analysis of multicomponent transport with carbon monoxide poisoning effect of a PEM fuel cell. *J Power Sources*, 1025-1033.
- Wang, H., Zhang, J., Ning, X., Tian, M., Long, Y., & Ramasrishna, S. (2021). Recent advances in designing and tailoring nanofiber composite electrolyte membranes for high-performance proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25225-25251.
- Wilberforce, T., & Olabi, A. (2021). Proton exchange membrane fuel cell performance prediction using artificial neural network. *International Journal of Hydrogen Energy*, 6037-6050.
- Xing, L., Chang, H., Zhu, R., Wang, T., Zou, Q., Xiang, W., & Tu, Z. (2021). Thermal analysis and management of proton exchange membrane fuel cell stacks for automotive vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32665-32675.
- Yang, C., Hu, M., Wang, C., & Cao, G. (2012). A three-step activation method for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 180-185.
- Ye, Y., Rick, J., & Hwang, B. (2012). Water Soluble Polymers as Proton Exchange

Membranes for Fuel Cells. *Polymers*, 913-963.

- Yuan, X., Yu, Y., & Jiang, M. (2012). Diagnosis of Contamination Introduced by Ammonia at the Cathode in a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 12464-12473.
- Zamel, N., & Li, X. (2008). Transient analysis of carbon monoxide poisoning and oxygen bleeding in a PEM fuel cell anode catalyst layer. *Int J Hydrogen Energy*, 1335-1344.
- Zamel, N., & Li, X. (2011). Effect of contaminants on polymer electrolyte membrane fuel cells. *Prog Energy Combust Sci*, 292-329.
- Zhai, Y., & Pierre, J. S. (2015). Proton exchange membrane fuel cell cathode contamination – Acetylene. *Journal of Power Sources*, 165-171.
- Zhai, Y., & Pierre, J. S. (2018). Tolerance and mitigation strategies of proton exchange membrane fuel cells subject to acetylene contamination. *International Journal of Hydrogen Energy*, 17475-17479.
- Zhai, Y., & Pierre, J. S. (2019). Acetonitrile contamination in the cathode of proton exchange membrane fuel cells and cell performance recovery. *Applied Energy*, 239-247.
- Zhai, Y., Baturina, O., Ramaker, D., Farquhar, E., Pierre, J. S., & Swider, K. (2016). Bromomethane Contamination in the Cathode of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Electrochimica*, 482-489.
- Zhang, H., & Sun, C. (2021). Cost-effective iron-based aqueous redox flow batteries for large-scale energy storage application: A review. *J. Power Sources*, 229-445.
- Zhang, J., Thampan, T., & Datta, R. (2002). Influence of anode flow rate and cathode oxygen pressure on CO poisoning of proton exchange membrane fuel cells. *J Electrochem Soc*, 765-772.
- Zhou, T., & Liu, H. (2004). A 3D model for PEM fuel cells operated on reformat. *J Power Sources*, 101-110.
- Zhu, J., Tan, J., Pan, Q., Liu, Z., & Hou, Q. (2019). Effects of Mg<sup>2+</sup> contamination on the performance of proton exchange membrane fuel cell. *Energy*, 116-135.

## **BÖLÜM 5**

### **GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN GENEL YAPISI VE NANOAKIŞKAN KULLANIMININ PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

*Sinan ÜNVAR<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Sinan ÜNVAR, Dr., Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi/Meslek Yüksek Okulu/  
Elektrik ve Enerji Bölümü/İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Pr./(Araştırmacı  
ID: 42860), sunvar[at]agri.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9144-7638

## 1. GİRİŞ

Enerji, herhangi bir ülkenin ekonomik kalkınmasında önemli ve vazgeçilemez bir faktördür. Herhangi bir ülkenin ekonomik kalkınmasının artmasıyla birlikte enerji tüketimi de artar. Fosil yakıtların çevresel etkileri iyi bilindiğinden ham petrol talebindeki artış kirliliğin ana nedeni olmaktadır. Güneş enerjisi birincil enerji kaynağı olmakla birlikte, çevreyi kirliletme, kolay ulaşılabilirliği ve çevre dostu olma avantajlarına sahiptir. Güneş enerjisi, dünya yüzeyindeki en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir ve dünyanın ihtiyaç duyduğu bir enerji türüdür. Güneş enerjisi uygulamaları, Solar Termal Sistem (T) ve Solar Fotovoltaik Sistem (PV) olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Güneş fotovoltaik sistemi (PV) ve güneş termal sistemi (T) tek bir sistemde birleştirdiğimizde, güneş enerjisini aynı anda elektriğe ve ısıya dönüştüren hibrit bir sistem olan güneş fotovoltaik termal sistem (PV/T) oluşur. Güneş fotovoltaik termal (PV/T) sistem tasarımının farklı yaklaşımları vardır. Tasarım parametreleri; güneş radyasyonu, termal çıkış, elektrik çıkışı, güneş fraksiyonu ve sistemin çalıştığı sıcaklığı toplamak için kullanılan kolektör tipine dayanmaktadır. Geleneksel fotovoltaik sistemde, (PV) panel üzerine gelen yüksek güneş radyasyonu, yüksek elektriksel verim sağlamalıdır. Ancak yüksek ısı, güneş pillerinin sıcaklığını artıracak ve bu da panelin verimini düşürecektir. Bir güneş fotovoltaik hücresi, standart sıcaklık ve basınçta güneş pili tipine bağlı olarak %6-15 aralığında en yüksek fotoelektrik dönüşüm verimliliği ile güneş ışımamını elektrik enerjisine dönüştürür. Geleneksel fotovoltaik sistemde, güneş fotovoltaik paneline daha yüksek gelen güneş radyasyonu, yüksek elektrik çıkışı vermelidir. Bununla birlikte, gelen yüksek radyasyon, güneş pilinin yüzey sıcaklığını da artıracak ve bu, güneş pilinin fotoelektrik dönüşüm verimliliğini azaltacaktır. PV modülünün çalışma sıcaklığında 1 °C artış olduğu için fotoelektrik dönüşüm veriminde %0,5 azalma olur. Hibrit sistem tasarımı, fotovoltaik modülün sıcaklığındaki azalmaya ve performans verimliliğindeki artışa ek olarak, daha düşük termal stresler ve dolayısıyla fotovoltaik modülün ömrünün artması, optimum performans ve güvenilirlik, daha az bakım gibi başka avantajlar da sağlar (Rawat & Kumar, 2013).

Günümüzde güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının birçok uygulamada kullanılması giderek daha popüler hale gelmektedir. Güneş sonsuz enerji kaynaklarından biridir; dünyaya gelen güneş enerjisinin yaklaşık %51'i yeryüzüne ulaşır ve geri kalanı atmosfer tarafından emilir ve yansıtılır (Tian & Zhao, 2013). Güneş enerjisi belirli bir yer ve zamanda yoğunlaşmaz; bu nedenle verimli bir şekilde toplamının bir yolunu bulmak gerekir. Güneş enerjisinin kirlilik ve küresel ısınma gibi fosil yakıtların sahip olduğu dezavantajları yoktur (Sardaradi, Passandideh-Fard, & Heris, 2014). Yaygın olan güneş enerjisi sistemleri; güneş kolektörleri,

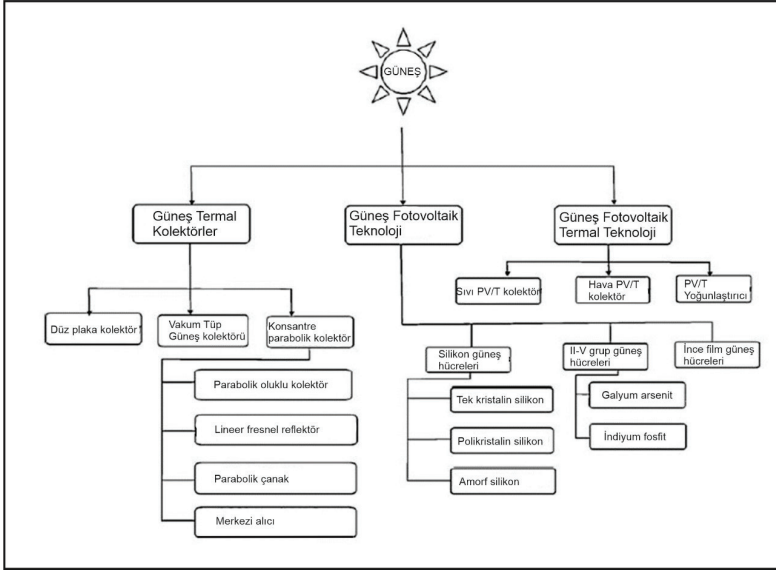


fotovoltaik hücreler ve elektrik ve termal enerji üretmek için yaygın olarak kullanılan fotovoltaik/termal (PV/T) üniteleri içerir. Bir fotovoltaik termal birim, radyan enerjisi aynı anda elektriğe ve ısıya dönüştüren hibrit bir sistem olarak kabul edilebilir. Kristal silisyum hücrelerde, amorf silikon hücrelerde ve c-Si hücrelerde PV hücre sıcaklığının 1 derece artırılmasının elektriksel verimi sırasıyla %0.5, %0.25 ve %0.45 oranında azaltacağı belirlenmiştir (Kalogirou & Tripanagnostopoulos, 2006; Skoplaki & Palyvos, 2009; Luque & Hegedus, 2011). Ayrıca PV hücreler üzerindeki termal stres uzun süre kalırsa modüle zarar verebilir (Chow, 2010). Bir PV/T sisteminin teknik performansı genellikle enerji ve ekserji verimliliği ile değerlendirilir. PV/T sisteminin ikili işlevleri, bir PV ünitesine kıyasla daha yüksek performans sağlar (Zhang, Zhao, Smith, Xu, & Yu, 2012).

Güneş enerjisi, enerji taleplerimizi karşılamak için fosil yakıtların kullanılmasıyla kaynaklanan iklim değişikliğinin etkilerinden gezegenimizi kurtarmada hayati bir rol oynayabilir. Bu nedenle güneş enerjisi teknolojilerinin performansının artırılması büyük önem taşımaktadır. Güneş PV, günümüzde fosil yakıtlarla yan yana rekabet ettiğini kanıtlamaktadır. Ancak önemli bir zorluk, güneş pillerinin elektriksel verimliliklerini etkileyen sıcaklığındaki artıştır. Sonuç olarak araştırmacılar, elektriksel verimliliğin yükseltilebilmesi ve bu sistemlerden fazla ısının uzaklaştırılması için nanoteknoloji adında yeni bir strateji geliştirmişlerdir (Ju, Xu, & Liao, 2017; Sathe & Dhoble, 2017). Nanoteknolojinin yer alabileceği çok çeşitli uygulamalar vardır, örneğin malzeme bilimi, biyoloji ve mühendislik alanlarında oldukça etkilidir. Güneş enerjisi alanında nanoteknoloji, çalışma ortamını nanoakışkanlarla değiştirerek var olan ortama olumlu/faydalı bir şekilde katılabilir. Nanoakışkan, güneş sisteminden daha fazla ısının çıkarılmasını sağlayan yeni bir tür ısı transfer sıvısıdır. Nanopartiküllerin baz akışkanlarla birlikte kullanılması konsepti daha yüksek ısı transfer katsayısına ve daha yüksek termal verimliliğe neden olabilecek termal iletkenliği artırmaktır (Initiative, 2019)

## 2. GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİ

Güneş termal enerji kolektörleri, güneş ışınımını bir taşıma ortamı ve/veya hareketli akışkan aracılığıyla termal enerjiye dönüştüren özel türdeki ısı eşanjörleridir. Çeşitli güneş kolektörlerinin sınıflandırılması Şekil 1'de gösterilmektedir. Herhangi bir güneş sisteminin ana bileşeni güneş kolektörüdür. Bu, gelen güneş ışınımını emen, ısı enerjisine dönüştüren ve faydalı amaç/uygulamalar için bir sıvı (genellikle hava, su veya yağ) aracılığıyla aktaran bir cihazdır. Genellikle tarımsal ürünlerin kurutulması için hava kurutucu/ısıtıcı olarak ve/veya ısıtma/soğutma uygulamalarında binaların iklimlendirilmesinde yardımcı ısıtıcılar ile birlikte kullanılırlar (Tyagia, Kaushika, & Tyagib, 2012).



Şekil 1. Çeşitli güneş kolektörlerinin sınıflandırılması

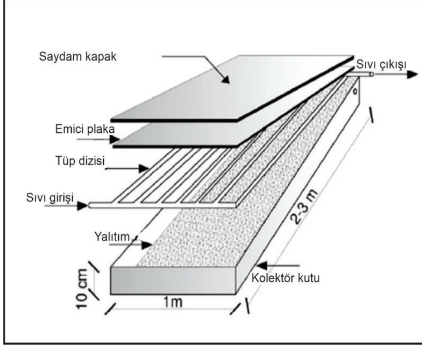
Güneş enerjisi kolektörleri, güneş radyasyon enerjisini taşıma ortamının iç enerjisine dönüştüren özel türde ısı eşanjörleridir. Temel olarak, konsantre olmayan ve sabit/konsantre güneş kolektörleri şeklinde iki tip güneş kolektörü vardır. Konsantre olmayan bir kolektör, güneş radyasyonunu yakalamak ve emmek için aynı alana sahipken, güneşi takip eden bir konsantre güneş kolektörü, genellikle güneş ışını radyasyonunu daha küçük bir alıcı alana odaklamak ve böylece radyasyon akışını arttırmak için içbükey yansıtıcı yüzeylere sahiptir.

Piyasada çok sayıda güneş kolektörü bulunmaktadır. Kapsamlı bir listede Tablo 1’de gösterilmektedir (Kalogirou, 2004). Devam eden kısımlarda ise, şu anda mevcut olan çeşitli kolektör türlerinin bir incelemesi sunulacaktır. Bunlara düz plaka kolektör, vakum tüp kolektör ve konsantre kolektörler dahildir.

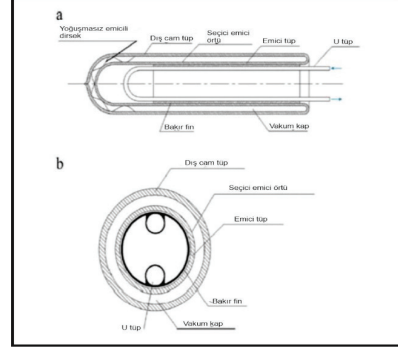
Tablo 1. Güneş termal kolektör tipleri

Devinim	Kolektör tipi	Emici tipi	Konsantrasyon oranı	Gösterge sıcaklık aralığı (°C)
Sabit	Düz plaka kolektör	Düz	1	30–80
	Vakum tüp kolektör	Düz	1	50–200
	Bileşik parabolik kolektör	Borulu	1-5	60–240
Tek eksenli izleme	Lineer Fresnel reflektör	Borulu	10-40	60–250
	Parabolik oluk kolektör	Borulu	15-45	60–300
	Silindirik geçişli kolektör	Borulu	10-50	60–300
İki eksenli izleme	Parabolik çanak reflektör	Nokta	100–1000	100–500
	Heliostat alan kolektör	Nokta	100–1500	150–2000

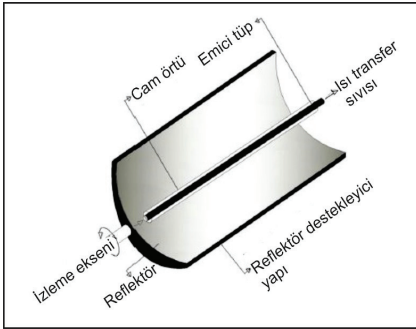
Dünya ve ülkemiz genelinde çoğunluklu olarak kullanılan çeşitli kolektör tipleri de Şekil 2’de gösterilmektedir. Bunlar içerisinde en fazla kullanılan kolektör tipi düz plaka güneş kolektörleridir. Gelişen teknolojiyle birlikte vakum tüplü ve parabolik oluklu kolektörlerin kullanımları da artmıştır (Tyagia, Kaushika, & Tyagib, 2012).



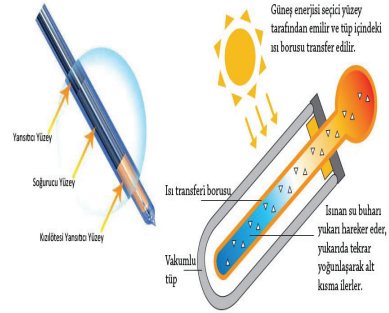
a. Düz plaka kolektörün kesit ve izometrik görünümü.



b. U-tüplü cam vakum tüplü güneş kolektörü. (a) Camı boşaltılmış tüpün çizimi ve (b) enine kesiti.



c. Parabolik oluklu kolektör



d. Isı borulu güneş kolektörü

### Şekil 2. Önem arz eden kolektör tiplerinin şematik gösterimi

Güneş kolektörleri piyasada ve araştırmalarda kullanıldığı şekliyle temel olarak düz plaka, vakum tüplü ve ısı borusu güneş kolektörleri olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Düz Plakalı Güneş Kolektörleri maliyet bakımından ucuzdur, kolayca üretilebilme özelliğine sahiptir ve çeşitli şekillerde uygulanabilmesi için esnek özellikleri mevcuttur. Bununla birlikte, özellikle soğuk iklim koşullarında ve yüksek sıcaklık uygulamalarında teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliklerini etkileyen dezavantajları da mevcuttur (Rassamakin, Khairnasov, Zaripov, Rassamakin, & Alforova, 2013). İkinci tip güneş kolektörü grubu, düz plakalı güneş kolektörlerinin dezavantajlarına karşı icat edilen Vakum Tüplü Güneş Kolektörleri'dir. Kolektörü yüksek sıcaklıktaki uygulamalar için uygun hale getirmek amacıyla tüplerin iki cam tabakası arasında bulunan hava, termal kayıpları

azaltmak için termal yalıtım görevi gören bir vakum boşluğu oluşturmak üzere çıkarılır (Ong & Tong, 2012). Seçilen bu strateji, seçici emici malzeme ve vericilerin kullanımı ile birlikte düşük güneş radyasyonu bulunan soğuk iklim koşullarında dahi güneş kolektörünün termal verimliliğini artırır (Speyer, 1965; Brunold, Vogelsanger, & Marty, 2007). Isı borulu güneş kolektörleri ise, hem ısı borusu hem de Vakum Tüp Güneş Kolektörlerinin teknolojilerinden faydalanarak ilk iki güneş kolektörü grubunun sınırlamalarının üstesinden gelmek için üretilmiştir. Düşük termal direnç, emici yüzeyden yüksek ısı giderme ve düşük hidrolik dirençler bu tip güneş kolektörlerinin avantajlarından bazılarıdır (Azad, 2008).

### 3. NANOAKIŞKANLAR

Nanoakışkan terimi literatürde farklı şekillerde tanımlanmıştır, ancak birçok araştırmacı bunun bir baz akışkan içinde verimli bir şekilde dağılmış 1-100 nm arasında değişen çapa sahip nanoparçacıkların bir karışımı olduğu konusunda hemfikirdir (Das, Choi, & Patel, 2006; Wong & Leon, 2010; Yazdanifard, Ameri, & Bajestan, 2017; Abdelrazik, Al-Sulaiman, Saidur, & Ben-Mansour, 2018; Bellos, Said, & Tzivanidis, 2018; Khanafer & Vafai, 2018). Nanoakışkan kullanılarak, tüm sistemin ısıl performansının yanı sıra akışkan içindeki ısı transferi de artırılabilir (Mahbubul, 2019).

Maxwell ilk olarak geleneksel ısı transfer akışkanlarına katı parçacıkların eklenmesinin termal iletkenliklerini artırdığını belirtmiştir (Simpson, 2010). Bununla birlikte, sıvılardaki katı parçacıklar için dağılma, biriktikçe sorun haline gelmekte ve çökelmelerine neden olmaktadır. Bu, akış yollarının tıkanmasına, akış borularının duvarlarının aşınmasına ve basınç düşüşünün artmasına neden olur. 1993 yılında Masuda ve diğerleri (Masuda, Ebata, Teramae, & Hishinuma, 1993) mikrometre boyutunda katı partiküllerin ve geleneksel ısı transfer akışkanlarının bir kombinasyonunun termal iletkenliği artırabileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, araştırmacılar, termal iletkenliğin faydasını azaltan, sıvı kabının tabanında parçacıkların birikmesi sorunuyla karşılaşmışlardır. Daha sonraki bir çalışmada Choi (Choi, 1995) nanometre boyutunda malzemeler içeren sıvılar hazırlamayı başarmıştır. Ortaya çıkan sıvının termal iletkenliğinde önemli bir gelişme gözlemlenmiştir. Ayrıca, nanometre boyutundaki parçacıkların geleneksel sıvılar içinde dağılmasının yeterli olduğunu belirlemiş ve deneyin çökelmesiz bir süspansiyon ile sonuçlandığını tespit etmiştir. Nanomalzemelerin akışkanlarda kullanılmasının faydaları, geleneksel akışkanlardan daha yüksek bir yüzey alanı sağlamalarından kaynaklanmaktaydı. Birçok araştırmacı, bu nanomalzemeleri sıvılara eklemenin faydaları konusunda ve özellikle güneş kolektörleri olmak üzere ısı transferindeki iyileştirmeden yararlanabilecek uygulamalar üzerinde çalışmıştır. Tablo 2 bu çalışmalardan bazılarını listelemektedir.

**Tablo 2.** Baz akışkanın (su) termal iletkenliğini artırmak için nanomalzemelerin kullanımı üzerine yapılan bazı çalışmalar

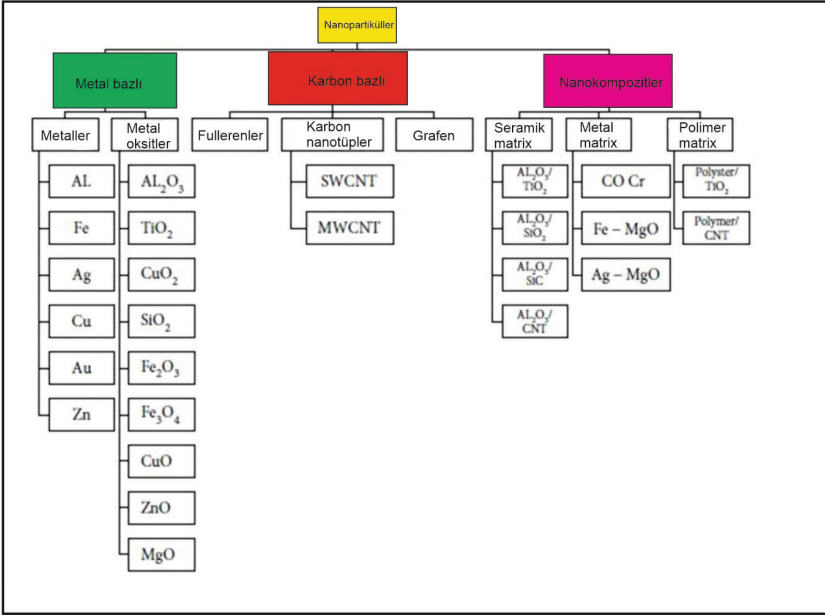
Referans	Kullanılan nanomalzeme	Baz akışkan	Termal iletkenlik geliştirme oranı (%)	Açıklamalar
(Li & Xuan, 2002)	Cu	Su	60	Çalışma, Cu-su nanoakışkanı kullanıldığında konvektif ısı transferinin iyileştirilmesi konusuna odaklanmıştır.
(Wen & Ding, 2004)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	30	Bakır borularda Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su nanoakışkanı kullanılarak yapılan deneysel çalışmadır. Özellikle tüp girişinde nanoakışkan kullanımı ile önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir.
(He, ve diğerleri, 2007)	TiO <sub>2</sub>	Su	26	Çalışmada birkaç TiO <sub>2</sub> nanoparçacığı kullanılmıştır. Elde edilen çözeltinin stabil olduğu ve daha yüksek termal iletkenliğe sahip olduğu bulunmuştur.
(Hwang, Jang, & Choi, 2009)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanoparçacıkları, eşit şekilde ısıtılan dairesel bir tüp sisteminin akışında ısıyı aktarmak için suya eklenmiştir. Laminer akış durumunda sistem çalışması sırasında konveksiyon ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşü ölçülmüştür. Konveksiyon ısı transfer katsayısı %0,3 nano konsantrasyon ile %8'e yükseltilmiştir.
(Chandrasekar & Suresh, 2011)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	60	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su nanoakışkanının ısı transfer özelliklerini gözlemlemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Sonuçlar, nano-yapıların fiziksel termal özelliklerinden dolayı Nusselt No.'da bir gelişme olduğunu göstermiştir.
(Yousefi, Veysi, Shojaeizadeh, & Zinadini, 2012)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	28.3	Düz plaka güneş kolektörü kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır.

**Tablo 2.** Baz akışkanın (su) termal iletkenliğini artırmak için nanomalzemelerin kullanımı üzerine yapılan bazı çalışmalar (devamı)

(Rayatzadeh, Saffar-Avval, Mansourkiaei, & Abbasi, 2013)	TiO <sub>2</sub>	Su	65	Sürekli ısı akışı altında nanoakışkan oluşumunda sürekli uyarılmış ultrason kullanımının etkisini değerlendirmek için deneysel araştırma yapılmıştır. Çalışma, suya TiO <sub>2</sub> nanoparçacıklarının eklenmesinin Nusselt No.'yu artırdığını ve nanoparçacık konsantrasyonunun artırılmasının bu sayıda daha fazla iyileştirmeye yol açtığını göstermiştir.
(Nimmagadda & Venkatasubbaiah, 2015)	TiO <sub>2</sub> -Ag	Su	43	Bu çalışma, nano (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Ag ve hibrit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Ag) ile çalışan bir mikro kanal sistemi olduğunda ısı transfer akışının özelliklerini araştırmıştır. Çalışma, bu nanomalzemeler kullanıldığında ısı transfer özelliklerinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir.
(Bajestan, Moghadam, Niazmand, Daungthongsuk, & Wongwises, 2016)	TiO <sub>2</sub>	Su	21	Eşit olarak ısıtılan bir tüpten akan suya titanyum dioksit nanotüpler eklendiğinde laminar akışın ısı transfer katsayısındaki iyileşmeyi değerlendirmek için pratik deneyler ve sayısal modelleme çalışması yapılmıştır.
(Adriana, 2017)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> ve SiO <sub>2</sub>	Su	12	Nanomalzemelerin termodinamik özellikleri, ısı transferinin davranışını belirlemek ve önerilen üç nano oksidin sayısal olarak değerlendirilmesi için çalışılmıştır.

### 3.1. Nanoparçacık Sınıflandırması

Nanopartiküller, Şekil 3'te (Das, Choi, & Patel, 2006; Nagarajan, Subramani, Suyambazhahan, & Sathyamurthy, 2014; Bellos, Said, & Tzivani-dis, 2018) gösterildiği gibi metal bazlı, karbon bazlı ve nanokompozitler olarak sınıflandırılabilir. Metal bazlı nanopartiküller, metaller (Al, Fe, Cu, vb.) ve metal ve oksijen TiO<sub>2</sub>, Cu<sub>2</sub>O, ZnO, vb.'nin kimyasal bir bileşimi olan metal oksitler olmak üzere ayrıca iki gruba ayrılabilir.



Şekil 3. Nanoparçacık sınıflandırması ve türleri

Karbon bazlı nanoparçacıklar, fullerenler ( $n > 20$  olduğu yerde karbon  $C_n$ 'nin moleküler bir formu) (Zaytseva & Neumann, 2016), silindirik nano yapılı karbon allotropları olan karbon nanotüpler ve iki boyutlu allotropik bir karbon olan grafen form olmak üzere üç tipte kategorize edilebilirler. Son grup, özellikle ayırt edici bir nanoparçacık türü olan nanokompozitlerdir. Bu kategori, 100 nm'den daha küçük çaplara sahip iki farklı tipte parçacıktan oluşur (Oh, Lee, Sekino, & Niihara, 2001). Bu nanokompozitler seramik matris, metal matris ve polimer matris olarak sınıflandırılabilir.

Bu tür nanopartiküller, yüksek termal iletkenliğe sahip oldukları için baz akışkanın termal özelliklerini artırabilirler. Bu termal iletkenlik, işletim maliyetinde bir azalmaya yol açan sistemin genel performansını artırabilir (Kasaeian, Daviran, Azarian, & Rashidi, 2015; Abdelrazik, Al-Sulaiman, Saidur, & Ben-Mansour, 2018). Ayrıca nanoakışkanlar, fotovoltaiik hücreler için optik filtreler olarak çalışabilirler, çünkü PV çalışma aralığı için yararlı olmayan tüm fazla güneş enerjisini yakalayabilir ve hücrelerin sıcaklığını azaltabilirler (Hijerrild, ve diğerleri, 2016; Abdelrazik, Al-Sulaiman, Saidur, & Ben-Mansour, 2018).

### 3.2. Nanoakışkanların Olumlu-Olumsuz Özellikleri ve Hazırlama Yöntemleri

Nanoakışkanların aşağıdaki gibi bazı avantajları ve dezavantajları mevcuttur.

(a) *Avantajlar;*

(i) Isıl iletkenliğini yükselterek çalışma akışkanının ısı transfer katsayısını iyileştirmek,

(ii) Yoğunluğu ve özgül ısı ürününü yükselterek akışkanın yüksek miktarda termal enerji taşımaya izin vermek,

(iii) Akışkan ile alıcı arasındaki ısı transferinin artırılması,

(iv) PV sisteminin hem termal hem de elektriksel verimlerinin artırılması,

(v) Soğurucu sıcaklığının düşürülmesi, dolayısıyla malzemenin korunması (Saidur, Leong, & Mohammad, 2018; Bellos, Said, & Tzivanidis, 2018).

(b) *Zorluklar;*

Nanoakışkanlar ısı transferi olayını artırmasına rağmen, bunların uygulanmasında aşağıdakiler gibi çeşitli zorluklar vardır.

(i) Yüksek hazırlık maliyeti (Lee & Mudawar, 2007; Saidur, Leong, & Mohammad, 2018),

(ii) Nanoakışkanların kullanılması, pompa işindeki artış nedeniyle yüksek işletme maliyetine neden olabilir (Razi, Akhavan-Behabadi, & Saeedinia, 2011; Routbort, Singh, Timofeeva, Yu, & France, 2011; Bellos, Said, & Tzivanidis, 2018; Khanafer & Vafai, 2018),

(iii) Bazen sistemin çalışma koşulları doğal konveksiyonla ve yüksek sıcaklığa maruz kaldığında, nanopartiküller topaklaşabilir ve kararsız bir davranış gösterebilir (Taylor, Phelan, Adrian, Gunawan, & Otanicar, 2012),

(iv) Nanopartiküller, sistemin metalik bileşenlerinde erozyona ve korozyona neden olabilir ve hatta akış geçitlerini tıkayabilir (Lee & Mudawar, 2007),

(v) Birçok araştırmacı, nanoparçacıkların çevre ve insan sağlığı üzerinde bazı toksik etkileri olabileceğini belirtmektedir.

Önemli oranda performans verimi sağlamak için, nanoakışkanlar, baz akışkan içindeki asılı parçacıkların stabilitesinin yanı sıra homojenliklerini sağlamak için de başarılı bir hazırlık aşamasına ihtiyaç duyarlar (Ally, 2014; Ilyas, Pendyala, & Marneni, 2014). Nanoakışkan hazırlamanın iki yolu vardır.

**(a) Tek Adım Yöntemi.** Bu süreçte nanoparçacıkların dispersiyonu ve üretimi aynı aşamada gerçekleşir. Bu yöntem, fiziksel veya kimyasal yollarla gerçekleştirilebilir (Mohammed, Al-Aswadi, Shuaib, & Saidur,



2011). Fiziksel yöntemde nanoparçacıkların sentezlenmesi için ultrasonik destekli tozaltı kaynağı sistemi kullanılmaktadır. Dielektrik sıvı içinde birleştirilen titanyum elektrotlardan üretilen elektrik enerjisi, nanoparçacıkları eritmek için kullanılır ve deiyonize suyu buharlaştırır. Daha sonra vakum odasında erimiş nanopartiküller ile deiyonize suyun karışımı olan nanoakışkan oluşur Öte yandan, kimyasal yöntem, nanopartiküller ve baz akışkan karışımına bir indirgeyici maddenin eklenmesine ve ardından karıştırılmasına ve ısıtılmasına bağlıdır (Chang, Jwo, Fan, & Pai, 2007; Mahbubul, 2019).

**(b) İki Adımlı Yöntem.** Bu yöntemde nanopartiküller ilk aşama olarak hazırlanır ve daha sonra yüksek kesme veya ultrason yöntemleri kullanılarak baz akışkan ile karıştırılır. Tablo 3, hem tek hem de iki aşamalı yöntemlerin avantajlarını ve dezavantajlarını göstermektedir (Mohammed, Al-Aswadi, Shuaib, & Saidur, 2011; Ilyas, Pendyala, & Marneni, 2014). Nanopartiküllerin baz akışkan içinde stabil olmasını sağlamak için farklı teknikler kullanılmıştır. İlk olarak, ultrasonikasyon işlemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım 0,2 ila 2000 mL arasındaki nanoakışkan hacimleri için uygundur ve yüksek stabiliteye sahip bir nanoakışkan üretir ve hazırlama için en popüler yöntem olarak kabul edilir (Mahbubul, 2019). Bu işlem, doğrudan veya dolaylı ultrasonikasyon olarak sınıflandırılabilir.

**Tablo 3.** Tek ve iki aşamalı yöntemin avantajları ve dezavantajları

Özellik	Tek adım yöntemi	İki adımlı yöntem
Kararlılık	(yüksek seviye)	reaktanlar ve sürfaktanlar eklenerek elde edilir.
Çökeltmenin Önlenmesi	✓ (düşük seviye)	✓
Depolama ve ulaşımdan kaçınma	✓	-
Yalınlık	-	✓
Üretilen büyük miktar	-	✓
Parçacık tekdüzeligi	-	✓
Hızlı süreç	-	✓
Dağılım	✓ (tamamen)	✓ (kısmen)

#### 4. FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLER

Fotovoltaik hücreler (PV), elektronları uyaran güneş ışığı radyasyonunu dönüştürerek elektrik üreten yarı iletken malzemelerden yapılmıştır. Elektron deliği çiftleri oluşturmak ve elektronları uyarmak için bu süreçte güneş spektrumunun yalnızca bir kısmı kullanıldığından, fotovoltaik hücreler sınırlı elektriksel verimliliğe sahiptir. Fotovoltaik hücreler esas olarak 700 nm ile 1100 nm arasındaki güneş spektrumunu emer. Daha kısa veya daha uzun dalga boyları toplanmaz (Mojiri, Stanley, Taylor, Kalantarza-

deh, & Rosengarten, 2015; Chaichan & Kazem, 2016) ancak hücre verimliliğini azaltabilecek veya bir dereceye kadar hasara neden olabilecek ısıya dönüştürülür (Al-Waeli, Sopian, Kazem, & Chaichan, 2017).

Fotovoltaik (PV) sistemler, elektrik üretmek için kullanılan düşük karbonlu, fosil olmayan yakıt sorununa çözüm sunarlar. Yarı iletken cihazlar (güneş pilleri) tarafından emilen ve dönüştürülen güneş radyasyonu, enerji ihtiyaçlarını karşılamak için bir elektrik kaynağı sağlayabilir. Daha az karbon emisyonu olan, fosil yakıtlara bağımlı olmayan, gelişmekte olan ülkeler için büyük potansiyele sahip ve dağıtılmaya çok uygun bir enerji kaynağı olan PV, Firth (Firth, 2006) tarafından sunulduğu üzere orta ve uzun vadeli bir enerji beklentisi olarak kabul edilmektedir. Fotovoltaik sistem; düşük bakım, gözetimsiz çalışma, 20 ila 30 yıl arasında güvenilir uzun ömür, yakıt ve duman olmaması, kurulumunun kolay olması ve Oi (Oi, 2005) tarafından sunulan düşük tekrarlama maliyetleri gibi avantajlara sahiptir.

Fotovoltaik (PV), güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürerek kullanmanın en kullanışlı yoludur. Fotoelektrik etki kullanılarak güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için kullanılan enerji dönüştürme cihazlarına güneş pilleri denir. Bir fotovoltaik sistem, güneş pilleri ve yardımcı bileşenlerden oluşur. Güneş radyasyonunu doğrudan elektriğe dönüştürür. 1954 yılında Bell Telefon Laboratuvarlarındaki araştırmacılar, %6 verimliliğe sahip bir p-n bağlantı tipi güneş pili kullanarak güneş radyasyonunun elektrik enerjisine ilk pratik dönüşümünü göstermişlerdir (Zondag, Bakker, & Helden, 2006). Uzay programının ortaya çıkmasıyla birlikte, yarı iletken dereceli silikondan yapılan fotovoltaik hücreler, uydularda kullanım için hızla tercih edilen güç kaynağı haline gelmiştir. Ortak güneş enerjisi dönüşüm verimleri %15 ile %20 arasındadır (Chapin, Fuller, & Pearson, 1954).

Ancak günümüzde foto termo-dönüşüm olarak adlandırılabilir her iki enerji dönüşüm yöntemini de içeren yeni bir alan ortaya çıkmıştır. Hibrit fotovoltaik termal kolektör (PVT) adı verilen tek bir cihazla güneş enerjisi elektrik ve ısıya dönüştürülmektedir. Bu sayede ısı ve güç aynı anda üretilmekte ve her iki talebe de cevap verebilecek bir cihaz geliştirilmesi önem arz etmektedir.

## 5. GÜNEŞ PV/TERMAL HİBRİT SİSTEMLERİ

PV/T, fotovoltaik hücreleri ve güneş kolektörünü birleştiren hibrit bir sistemdir. Bu sistem aynı anda/zamanda yenilenebilir elektrik ve ısı üretebilir. Bir PV-termal (PV/T) kolektör, PV'nin yalnızca elektrik üretmediği aynı zamanda bir termal soğurucu görevi gördüğü bir modüldür. Bu şekilde hem ısı hem de güç aynı anda üretilir. Güneş ısı ve güneş enerjisi tale-

bi genellikle tamamlayıcı olduğundan, her iki talebi de karşılayabilecek bir cihaz geliştirmek önemlidir. Fotovoltaik (PV) hücreler, elektrik üretmek için gelen güneş radyasyonunun bir kısmını kullanır ve kalan radyasyon esas olarak hücrelerde ve substratta atık ısıya dönüştürülür ve bunun sonucunda PV'nin sıcaklığı yükselir, modülün verimliliği düşer. Fotovoltaik/termal (PV/T) teknolojisi bu ısının bir kısmını geri kazanır ve pratik uygulamalar için kullanır. PV modülünün aynı anda soğutulması, elektrik verimliliğini tatmin edici seviyede tutar ve böylece PV/T kolektör, daha yüksek toplam verimlilikle güneş enerjisini kullanmanın daha iyi bir yolunu sunar. PV/T sisteminin cezbedici ve önemli özellikleri şunlardır (Hasan & Sumathy, 2010).

- *çift amaçlıdır*: aynı sistem elektrik ve ısı çıkışı üretmek için kullanılabilir;

- *verimli ve esnek*: birleşik verimlilik her zaman iki bağımsız sistem kullanmaktan daha yüksektir ve özellikle çatı paneli aralığı sınırlı olduğunda entegre PV yapımında caziptir;

- *Geniş bir uygulama alanına sahiptir*: ısı çıkışı mevsime bağlı olarak hem ısıtma hem de soğutma (kurutucu soğutma) uygulamaları için kullanılabilir ve pratik olarak ev içi uygulamalara uygundur;

- *ucuz ve pratiktir*: herhangi bir büyük değişiklik yapılmadan binaya kolayca uyarlanabilir/entegre edilebilir ve çatı kaplama malzemesinin PV/T sistemi ile değiştirilmesi, geri ödeme süresini azaltabilir.

Günümüzde, PVT/hava, PVT/su ve PVT konsantre kolektör gibi farklı PV/termal kolektör türleri kullanılmaktadır (Teo, Lee, & Hawlader, 2012).

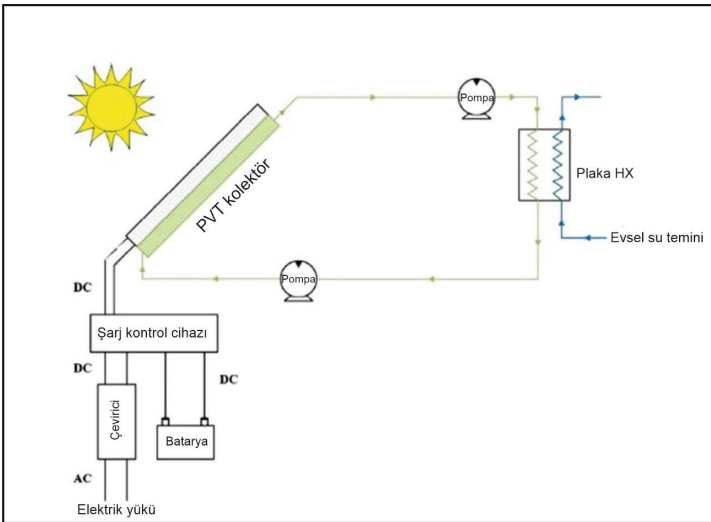
Birçok çalışma, hibrit PV/T'nin, gelen güneş enerjisinin çoğundan yararlandığı için bireysel fotovoltaik veya termal sistemlerden daha verimli olduğunu göstermiştir (Teo, Lee, & Hawlader, 2012; Otanicar, Taylor, & Telang, 2013). Fotovoltaik hücrenin düşük sıcaklığı, çıkış kapasitesini artırır ve güneş kolektörü tarafından emilen ısı diğer uygulamalarda kullanılabilir. Tablo 4, bu alandaki bazı son çalışmaları özetlemektedir. Tablo 4'ün gösterdiği gibi, PV/T sistemlerini soğutmak için nanoparçacıkların kullanılması alanında büyük başarılar vardır, ancak birçok araştırmacının işaret ettiği gibi, ısıl soğurucu tasarımı, kullanılan malzemeler, kaplama, maliyet, minimizasyon, enerjinin korunumu, performans testi ve kontrolü gibi hala tartışılan birçok konu mevcuttur. PV/T sistemlerinde nanoakışkanların kullanımıyla ilgili zorlukların üstesinden gelmek için araştırmalar devam etmektedir.

**Tablo 4.** PV/T sistemlerini soğutan nanoakışkanlarla ilgili yapılan önemli çalışmalar

Referans	Nano malzeme tipi	Baz akışkan	Nanopartikül konsantrasyonu ağırlıkça %	Elektrik gücü geliştirme	Kazanılan termal enerji	Açıklamalar
(Ghadiri, Sardarabadi, Fard, & Moghadam, 2015)	Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Su	1–3%	17%	33%	Çalışma, bir Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -su nanoakışkanının bir PV/T sisteminin elektriksel ve termal verimlilikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışma, güneş simülatörü kullanılarak kapalı alanda yapılmıştır.
(An, Wu, Zhu, & Zhu, 2016)	Cu <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Su	0.23–0.92%	21%	40%	Bu çalışmada, konsantre bir PV/T kolektöre sıvı bazlı bir spektral ayırma filtresi eklenmiştir. Bu durumda maksimum toplam verimlilik, %17,9 olan filtresiz duruma kıyasla %34,2'ye yükseltilmiştir.
(Hijerrild, ve diğerleri, 2016)	Ag–SiO <sub>2</sub> + CNT	Su	0.026%	19%	60%	Araştırmacılar suda Ag-SiO <sub>2</sub> ve CNT kullanmışlardır. Bu malzemeler güneş ışığını emme özelliklerinden dolayı kullanılmıştır.
(Khanjari, Pourfayaz, & Kasacian, 2016)	Ag Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	3.4% 3%	3.9% 1.83%	12.4% 4.45%	Bir PV/T sistemi üzerinde çalışılan iki nanoakışkanın soğutma etkisini değerlendirmek için yürütülen bir CFD çalışmasıdır.
(Manikandan & Rajan, 2016)	Kum	propilen glikol-su	0.5–2%	-	16.5%	Çalışma, güneş enerjisi toplama için hazırlanan yüzey aktif madde içermeyen, kum-propilen glikol-su nanoakışkanlarının termo-fiziksel özelliklerini araştırmak amacıyla yapılmıştır. 28°C'de hacimce %2 kum-PG su nanoakışkanı kullanıldığında termal iletkenlik %16.3 artmış ve viskozite %47 azalmıştır.
(Radwan, Ahmed, & Ookawara, 2016)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiC	Su	4% 4%	19%	62%	Bir PV/T sistemini soğutmak için bir nanoakışkanın uygulandığı yeni tasarlanmış teknikte bir mikro kanallı termal emici kullanılmıştır.
(Sundar, Ramana, Graca, Singh, & Sousa, 2016)	SiO <sub>2</sub>	Su	0.02%	-	9.7%	Nanomalzeme boyutlarını değiştirmeye odaklanan bir CFD çalışmasıdır. Termal iletkenlik %20 artış göstermiştir. Sistemin maksimum ekserjetik verimliliği, belirli bir nanoakışkan akış hızında ve nano-SiO <sub>2</sub> konsantrasyonunda tanımlanmıştır.

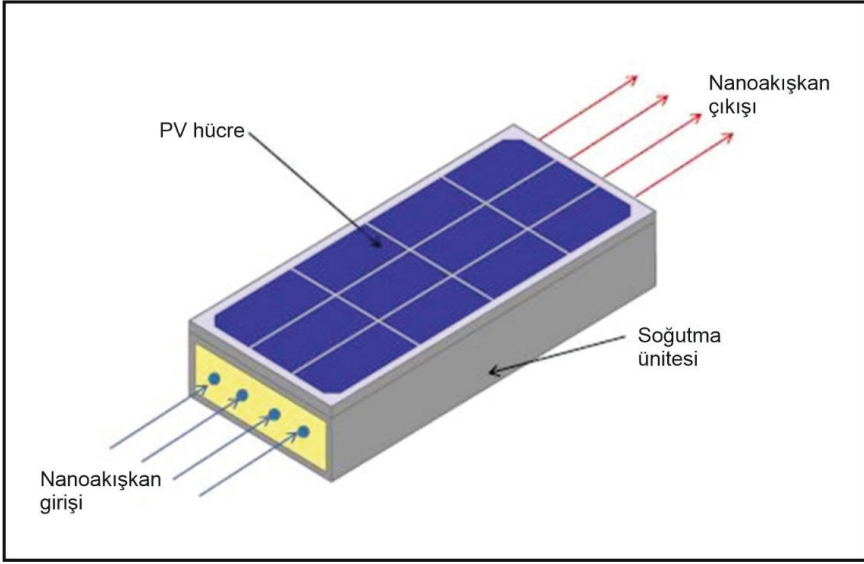
Yazarlar	Nanoakışkan	Sıvı	Yanma oranı (%)	Verim (%)	Verim artışı (%)	Notlar
(Al-Waeli, Chaichan, Kazem, & Sopian, 2017)	$Al_2O_3$ , $CuO$ , and $SiC$	Su	0.5, 1, 2, 3, 4%	-	1.96 3.42 4.8%	$SiC$ nanoakışkan, incelenen diğer nanoakışkanlara kıyasla daha yüksek bir kararlılık göstermiştir. Nanoakışkanların sıcaklıkları, daha iyi ısı transfer yetenekleri nedeniyle suyunkinden daha düşüktü.
(Sardarabadi, Fard, Maghrebi, & Ghazikhani, 2017)	$ZnO$	Su	0.2%	9.5%	42%	Araştırmacılar iki vakayı incelemişlerdir: PV/T sistemini soğutmak için nanoakışkan ve PCM kullanmak ve sonuçları sadece su ile karşılaştırmak.

PV hücrelerini soğutmak için kullanılan sıvı, PV/T sisteminin genel performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. PV/T sisteminin önceki tasarımları, soğutucu olarak hava veya su kullanıyordu. Su veya etilen glikol gibi güneş enerjisi sistemlerinde düşük ısıl iletkenliğe sahip sıvıların kullanılması, bu tür sistemlerin ısıl verimini sınırlar. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için kullanılan tekniklerden biri, güneş kolektörlerinde ısı transfer akışkanları olarak nanoakışkanların kullanılmasıdır. Nanoakışkanlar, su veya yağ gibi baz akışkanlarda asılı duran nano boyutlu parçacıklardan oluşur. Küçük boyutları nedeniyle nanopartiküller her zaman süspansiyon halinde kalır ve hatta küçük bir nanopartikül fraksiyonunun eklenmesi bile baz akışkanların termal özelliklerini büyük ölçüde geliştirir. Bununla birlikte, nanoakışkanın devreye girmesi, sistemin maliyetini ve karmaşıklığını artırmaktadır. Nanoakışkan soğutmalı PVT sisteminin şeması Şekil 4'te verilmiştir (Lari & Sahin, 2017).



**Şekil 4.** Nanoakışkan soğutmalı PVT sisteminin şeması

Bugüne kadar, fotovoltaik termal sistemlerin performansı üzerinde nanoparçacık kullanmanın sadece sınırlı sayıda etkisi incelenmiştir. Şekil 5, güneş radyasyonuna maruz kalan bir güneş pilini soğutmak için bir nanoakışkan kullanma fikrini özetlemektedir (Ahmed, Baig, Sundaram, & Mallick, 2019). PV sistemleri ile bu tip soğutma ortamının kullanılması, diğer termal uygulamalarda kullanılmak üzere ısının çıkarılmasına izin verir. Ayrıca, PV hücresinin sıcaklığının düşürülmesi, daha yüksek elektrik üretimine yol açar.



**Şekil 5.** Soğutma ortamı olarak nanoakışkanlı Fotovoltaik Güneş Termal Sisteminin (PV/T) şematik diyagramı

Bazı araştırmacılar da doğrudan PV/T sistemleri geliştirmiş ve çalışmalar yapmışlardır. Wei He ve diğerleri (He, ve diğerleri, 2006) termal emici olarak su ve alüminyum alaşımının doğal dolaşımı için hibrit bir fotovoltaik/termal sistem tasarlamışlardır. Termal verimliliğin %40 civarında, elektriksel verimliliğin ise %9,87 civarında olduğunu bulmuşlardır. Boddaert ve Caccavelli (Boddaert & Caccavelli, 2006) polikristal silikon hücreler ve ısı eşanjöründen oluşan hibrit güneş panelleri tasarlamış ve geliştirmişlerdir. Alüminyum kullanan ucuz roll-bond teknolojisi, ortasında PV modülünün altında ısı eşanjör sistemi görevi gören içi boş bir boru ile özel olarak tasarlanmıştır. Tiwari ve Sodha (Tiwari & Sodha, 2006), su ve hava tipi PV/T kollektör sisteminin bir kombinasyonu olan entegre bir fotovoltaik ve termal güneş sistemi (IPV-TS) geliştirmiştir. Dört sistem kurmuşlar ve yapılandırmışlardır. Veriler, yaz ve kış koşullarında sistemin genel termal verimliliğinin yaklaşık %65 ve %77 olduğunu göstermiştir. Zondag ve diğerleri (Zondag, Vries, Helden, Zolingen, & Steenhoven, 2007) karşılaştırmalı bir çalışma yapmış ve kanalın daha iyi ısı transfer

özelliklerinden dolayı tüm kanal konseptlerinin levha ve boruya kıyasla biraz daha yüksek verimliliğe sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Fraisse ve diğerleri (Fraisse, Menezo, & Johannes, 2007), kombine sistemlere uygulanan su hibrit PV/T kolektörlerinin enerji performansını incelemiştir. Fransa'nın Macon bölgesinde PV cam kapaksız olarak kurulan kombi sistem, standart bir modülden %6 daha iyi olan %10 verimlilik üretmiştir. Sandnes ve Rekstad (Sandnes & Rekstad, 2007), PV/T kolektörü için deneysel ve analitik modeli gerçekleştirmiştir. Bu deneyde, bir polimer soğurucu kolektör, tek kristalli silikon PV hücresi ile birleştirilmiş ve bu yapıyı bir hibrit enerji üreten sistem olarak birleştirmişlerdir. Ji ve diğerleri (Ji, Chow, & He, 2008) tHong Kong'da konut inşaatı için cepheye entegre bir PV/T kolektörü üzerinde çalışmışlardır. Yıllık termal verimlerin ince film silikon için sırasıyla %48 ve kristal silikon kılıf için %43 civarında olduğu bulunmuştur.

## 6. SONUÇLAR

Dünyada artan enerji talebi araştırmacıları var olan kaynakları en iyi şekilde kullanma çalışmalarına zorlamıştır. Fosil kaynakların yenilenebilir olması ve çevreye olan olumsuz etkileri göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarının incelenmesi ve değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında olan güneş enerjisi çevreye olan zararsız etkisi, sonsuz bir kaynak olması ve bedava olması nedeniyle yıllar bazında daha da önemli bir hale gelmiştir. Geliştirilen güneş enerjisi sistemleriyle bu enerjiden en faydalı şekilde yararlanma yolları aranır olmuştur.

Üretilen çeşitli güneş kolektörleriyle başlangıçta su ısıtması gerçekleştirilmiş ve daha sonra da teknolojinin ilerlemesiyle bu kolektörler birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Güneş kolektörlerinin verimliliğinin artırılması konusunda yapılan çalışmalar hız kazanmış ve nanoakışkanların da keşfiyle birlikte bu sistemlerin maksimum seviyede kullanılması için araştırmalar başlamıştır. Birçok nanoakışkan sentezlenerek kolektör verimliliği artırılmıştır. Halen farklı nanoakışkan tipleri araştırılmakta ve en etkili verimi elde etmek için çalışmalar yapılmaktadır.

Bu aşamalardan sonra fotovoltaik ve termal sistemlerin birleştirilmesi konusu gündeme gelmiştir. Bu sayede aynı anda hem elektrik hem de ısı enerjisi elde etme başarısı sağlanmıştır. PV/T sistemlerinin ısınma problemlerini çözmek için bu defa nanoakışkanlar soğutucu olarak kullanılmıştır.

Gerek dünyada gerek ülkemizde tüm bu sistemler hakkında çalışmalar devam etmekte ve özellikle nanoakışkanların maliyetini düşürme konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Bu problem de ortadan kalkarsa güneş

enerjisinden en iyi derecede faydalanma konusunda büyük bir adım atılmış olacaktır. Bedava bir kaynak olan güneş enerjisi bu tür çalışmalar sayesinde artan enerji talebini çözmeye büyük önem kazanacaktır.



## KAYNAKÇA

- Abdelrazik, A., Al-Sulaiman, F., Saidur, R., & Ben-Mansour, R. (2018). A review on recent development for the design and packaging of hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110-129.
- Adriana, M. (2017). Hybrid nanofluids based on  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  and  $SiO_2$ : numerical evaluation of different approaches. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 852-860.
- Ahmed, A., Baig, H., Sundaram, S., & Mallick, T. (2019). Use of Nanofluids in Solar PV/Thermal Systems. *International Journal of Photoenergy*, 1-17.
- Ally, I. (2014). Numerical study on turbulent heat transfer and pressure drop of nanofluid in coiled tube-in-tube heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 304-316.
- Al-Waeli, A., Chaichan, M., Kazem, H., & Sopian, K. (2017). Comparative study to use nano-( $Al_2O_3$ , CuO, and SiC) with water to enhance photovoltaic thermal PV/T collectors. *Energy Conversion and Management*, 963-973.
- Al-Waeli, H., Sopian, K., Kazem, H., & Chaichan, M. (2017). Photovoltaic/thermal (PV/T) systems: status and future prospects. *Renew Sustain Energy*, 109-130.
- An, W., Wu, J., Zhu, T., & Zhu, Q. (2016). Experimental investigation of a concentrating PV/T collector with Cu9S5 nanofluid spectral splitting filter. *Applied Energy*, 197-206.
- Azad, E. (2008). Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1666-1672.
- Bajestan, E., Moghadam, M., Niazmand, H., Daungthongsuk, W., & Wongwises, S. (2016). Experimental and numerical investigation of nanofluids heat transfer characteristics for application in solar heat exchangers. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1041-1052.
- Bellos, E., Said, Z., & Tzivanidis, C. (2018). The use of nanofluids in solar concentrating technologies: a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 84-99.
- Boddaert, S., & Caccavelli, D. (2006). ). Hybrid PV/T Panel optimisation using a Femlab/ Matlab/Simulink approach. Environment Identities and Mediterranean Area. *First International Symposium*, 121-126.
- Brunold, S., Vogelsanger, P., & Marty, H. (2007). Beurteilung der Möglichkeiten von thermochromen Schichten als potenzielle Überhitzungsschutzmaßnahmen für solarthermische Kollektoren. *Institut für Solar Technik SPF*, 145-179.
- Chaichan, M., & Kazem, H. (2016). Experimental analysis of solar intensity on photovoltaic in hot and humid weather conditions. *Int J Sci Eng Res*, 91-96.
- Chandrasekar, M., & Suresh, S. (2011). Experiments to explore the mechanisms

of heat transfer in nano-crystalline alumina/water nanofluid under laminar and turbulent flow conditions. *Exp. Heat Transfer*, 234-256.

- Chang, H., Jwo, C., Fan, P., & Pai, S. (2007). Process optimization and material properties for nanofluid manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 300-306.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (1954). A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*, 676-677.
- Choi, S. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, developments and applications of non-newtonian flows. *New York: ASME*, 99-105.
- Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Appl. Energy*, 365-379.
- Das, S., Choi, S., & Patel, H. (2006). Heat transfer in nanofluids—a review. *Heat Transfer Engineering*, 3-19.
- Firth, S. (2006). *Raising efficiency in photovoltaic systems: high resolution monitoring and performance analysis*. UK: De Montfort University.
- Fraisse, G., Menezo, C., & Johannes, K. (2007). Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type. *Solar Energy*, 1426-1438.
- Ghadiri, M., Sardarabadi, M., Fard, M., & Moghadam, A. (2015). Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids. *Energy Conver Management*, 468-476.
- H. Wei, K. Z. (2006). Hybrid photovoltaic and thermal solar collector designed for natural circulation of water. *Applied Energy*, 199-210.
- Hasan, M. A., & Sumathy, K. (2010). Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1845-1859.
- He, W., Chow, T.-T., Ji, J., Lu, J., Pei, G., & Chan, L. (2006). Hybrid photovoltaic and thermal solar collector designed for natural circulation of water. *Applied Energy*, 199-210.
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., & Lu, H. (2007). Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2272-2281.
- Hijerrild, N., Mesgari, S., Crisostomo, F., Scott, J., Amal, R., & Taylor, R. (2016). Hybrid PV/T enhancement using selectively absorbing Ag-SiO<sub>2</sub>/carbon nanofluids. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 281-287.
- Hwang, K., Jang, S., & Choi, S. (2009). Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in fully developed laminar flow regime. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 193-199.

- Ilyas, S., Pendyala, R., & Marneni, N. (2014). Preparation, sedimentation, and agglomeration of nanofluids. *Chemical Engineering and Technology*, 2011-2021.
- Initiative, N. N. (2019, January). *Official website of the United States National Nanotechnology Initiative*. <https://www.nano.gov.tr> adresinden alındı
- Ji, J., Chow, T., & He, W. (2008). Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong. *Build Environment*, 1327-1334.
- Ju, X., Xu, C., & Liao, Z. (2017). A review of concentrated photovoltaic-thermal (CPVT) hybrid solar systems with waste heat recovery (WHR). *Scientific Bulletin*, 1388-1426.
- Kalogirou, S. (2004). ). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 231-295.
- Kalogirou, S., & Tripanagnostopoulos, Y. (2006). Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Convers Manage*, 3368-3382.
- Kasaeian, A., Daviran, S., Azarian, R., & Rashidi, A. (2015). Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management*, 368-375.
- Khanafer, K., & Vafai, K. (2018). A review on the applications of nanofluids in solar energy field. *Renewable Energy*, 398-406.
- Khanjari, Y., Pourfayaz, F., & Kasaeian, A. (2016). Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system. *Energy Convers Management*, 263-278.
- Lari, M., & Sahin, A. (2017). Design, performance and economic analysis of a nanofluid-based photovoltaic/thermal system for residential applications. *Energy Conversion and Management*, 467-484.
- Lee, J., & Mudawar, I. (2007). Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 452-463.
- Li, Q., & Xuan, Y. (2002). Convective heat transfer and flow characteristics of Cu–water nanofluid. *Sci China Ser E: Technology Sciences*, 408-416.
- Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley % Sons Ltd.
- Mahbulbul, I. (2019). *Preparation of nanofluid,*” in *Preparation, Characterization, Properties and Application of Nanofluid*. W. Andrew Edition.
- Manikandan, S., & Rajan, K. (2016). Sand-propylene glycol-water nanofluids for improved solar energy collection. *Energy*, 917-929.
- Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., & Hishinuma, N. (1993). Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultrafine particles (dispersion of gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles. *Netsu*

*Bussei*, 227-233.

- Mohammed, H., Al-Aswadi, A., Shuaib, N., & Saidur, R. (2011). Convective heat transfer and fluid flow study over a step using nanofluids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2921-2939.
- Mojiri, A., Stanley, C., Taylor, R., Kalantarzadeh, K., & Rosengarten, G. (2015). A spectrally splitting photovoltaic-thermal hybrid receiver utilising direct absorption and wave interference light filtering. *Solar Energy Material & Solar Cells*, 71-80.
- Nagarajan, P., Subramani, J., Suyambazhahan, S., & Sathyamurthy, R. (2014). Nanofluids for solar collector applications: a review. *Energy Procedia*, 2416-2434.
- Nimmagadda, A., & Venkatasubbaiah, K. (2015). Conjugate heat transfer analysis of microchannel using novel hybrid nanofluids (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Ag/water). *Eur. J. Mech B. Fluids*, 19-27.
- Oh, S., Lee, J., Sekino, T., & Niihara, K. (2001). Fabrication of Cu dispersed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CuO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu-nitrate mixtures. *Scripta Materialia*, 2117-2120.
- Oi, A. (2005). *Design and simulation of photovoltaic water pumping system*. San Luis Obispo, California: California Polytechnic State University.
- Ong, K., & Tong, W. (2012). System performance of U tube and heat pipe solar water heaters. *Journal of Applied Science and Engineering*, 105-110.
- Otanicar, T., Taylor, R., & Telang, C. (2013). Photovoltaic/thermal system performance utilizing thin film and nanoparticle dispersion based optical filters. *J. Renew Sustain Energy*, 24-31.
- Radwan, A., Ahmed, M., & Ookawara, S. (2016). Performance enhancement of concentrated photovoltaic systems using a microchannel heat sink with nanofluids. *Energy Convers Management*, 289-303.
- Rassamakin, B., Khairnasov, S., Zariipov, V., Rassamakin, A., & Alforova, O. (2013). Aluminum heat pipes applied in solar collectors. *Solar Energy*, 145-154.
- Rawat, P., & Kumar, P. (2013). Performance Evaluation of Solar Photovoltaic / Thermal (PV/T) System. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 1466-1472.
- Rayatzadeh, H., Saffar-Avval, M., Mansourkiaei, M., & Abbassi, A. (2013). Effects of continuous sonication on laminar convective heat transfer inside a tube using water-TiO<sub>2</sub> nanofluid. *Exp. Thermal Fluid Science*, 8-14.
- Razi, P., Akhavan-Behabadi, M., & Saedinia, M. (2011). Pressure drop and thermal characteristics of CuO-base oil nanofluid laminar flow in flattened tubes under constant heat flux. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 964-971.
- Routbort, J., Singh, D., Timofeeva, E., Yu, W., & France, D. (2011). Pumping

- power of nanofluids in a flowing system. *Journal of Nanoparticle Research*, 931-937.
- Saidur, R., Leong, K., & Mohammad, H. (2018). A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1646-1668.
- Sandnes, B., & Rekstad, J. (2007). A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. *Solar Energy*, 63-73.
- Sardabaradi, M., Passandideh-Fard, M., & Heris, S. Z. (2014). Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units). *Energy*, 264-272.
- Sardarabadi, M., & Fard, M. (2016). Experimental and numerical study of metal-oxides/ water nanofluids as coolant in photovoltaic thermal systems (PVT). *Solar Energy Mater Solar Cells*, 533-542.
- Sardarabadi, M., Fard, M., Maghrebi, M., & Ghazikhani, M. (2017). Experimental study of using both ZnO/water nanofluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 62-69.
- Sathe, T., & Dhoble, A. S. (2017). A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 645-672.
- Simpson, T. (2010). *Maxwell's mathematical rhetoric: rethinking the treatise on electricity and magnetism*. Santa Fe (New Mexico): Green Lion Press.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlation. *Solar Energy*, 614-624.
- Speyer, E. (1965). Solar Energy Collection With Evacuated Tubes. *Journal of Engineering Power*, 270-276.
- Sundar, L., Ramana, E., Graca, M., Singh, M., & Sousa, A. (2016). Nanodiamond-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids: preparation and measurement of viscosity, electrical and thermal conductivities. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 62-74.
- Taylor, R., Phelan, P., Adrian, R., Gunawan, A., & Otanicar, T. (2012). Characterization of light-induced, volumetric steam generation in nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 1-11.
- Teo, H., Lee, P., & Hawlader, M. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Appl. Energy*, 309-315.
- Tian, Y., & Zhao, C. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Appl. Energy*, 538-553.
- Tiwari, C., & Sodha, M. (2006). Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/air heating system: a parametric study. *Renewable Energy*, 2460-2474.

- Tyagia, V., Kaushika, S., & Tyagib, S. (2012). Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1383-1398.
- Wen, D., & Ding, Y. (2004). ). Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 5181-5188.
- Wong, K., & Leon, O. D. (2010). Applications of nanofluids: current and future. *Advances in Mechanical Engineering*, 28-45.
- Yazdanifard, F., Ameri, M., & Bajestan, E. E. (2017). Performance of nanofluid-based photovoltaic/thermal systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 323-352.
- Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E., & Zinadini, S. (2012). An experimental investigation on the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. *Renew Energy*, 293-298.
- Zaytseva, O., & Neumann, G. (2016). Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 17-28.
- Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J., & Yu, X. (2012). Review of R & D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies. *Renew Sustain Energy Rev.*, 599-617.
- Zondag, H., Bakker, M., & Helden, W. V. (2006). *PVT Roadmap/An European Guide for the Development and Market Production of PV-Thermal Technology*, PV Catapult- Contract No. 502775 (SES6). ECN: Energy Research Centre of the Netherlands.
- Zondag, H., Vries, D. d., Helden, W. v., Zolingen, R. v., & Steenhoven, A. v. (2007). The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 253-269.



## **BÖLÜM 7**

### **BİLİŞSEL VE YAZILIM TABANLI RADYO YAPILARI**

*Fatih Yavuz ILGIN<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğretim Üyesi, Erzincan Binali YILDIRIM Üni. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Haberleşme Anabilim Dalı, [fyilgin@erzincan.edu.tr](mailto:fyilgin@erzincan.edu.tr)

## GİRİŞ

Günümüzde haberleşme alanında iletilen veri boyutlarının çok yüksek miktarlarda olduğu ve ilerleyen yıllarda bu boyutların daha da artacağı bilinen bir gerçektir. Haberleşme teknolojisindeki yenilikler ve hızlı gelişim sonucunda haberleşme sistemlerimizin birçoğu kablosuz ortamda gerçekleşmektedir (Hossain, 2013). Nesnelere interneti, 5G, WiMAX gibi güncel teknolojilerin birçoğu güçlü bir internet bağlantısı eksikliğinde hedeflenen görevlerini yerine getirememektedirler. Kablosuz ortamda gerçekleşen bu yeni nesil haberleşme teknolojilerinin bütünü radyo frekans spektrumunda geniş bir frekans bölgesi talep etmesine rağmen mevcut radyo frekans spektrumu bu talebe cevap verme noktasında eksik kaldığı bilinmektedir (Rossini, 1985). Mevcut spektrumun talebe cevap vermemesi ile güncel haberleşme teknolojileri kendine spektrumda boş veya yeterli düzeyde yer bulamaması ise bu teknolojilerden mahrum kalmamız gerçeğini karşımıza çıkarmaktadır (Calabrese, 2009).

Radyo spektrumunun talebe karşılık verememesi spektrum kıtlığı problemi olarak tanımlanmakta ve çözümü için güncel çalışmalar giderek hız kazanmaktadır. Bu çalışmaların genel olarak Yazılım Tabanlı Radyo (YTR) ve Bilişsel Radyo (BR) başlıkları altında toplandığını söylenebilir (Mitola, 2000). Bu teknolojiler mevcut ve kıt kaynak olan radyo frekans spektrumunu verimli kullanmayı amaçlayan çalışmalar yapmaktadır (Ulverson, 2010). Bu bağlamda BR sistemleri YTR teknolojisini de içinde barındıran daha geniş bir olguyu karşılamaktadır. Bu çalışmanın amacı YTR ve BR arasındaki ilişkiyi ortaya koymak ve YTR yapıları hakkında bilgiler sunmaktır. Ayrıca çalışmanın sonunda YTR teknolojisi için güncel uygulama platformu örnekleri verilmektedir (Tuttlebee, 2003).

## BİLİŞSEL RADYOLARDA YAZILIM TABANLI RADYO MİMARİSİ

Kablosuz iletişim aygıtlarının işaret işleme ve işaret işlemeyi gerçekleştirecek olan fiziksel donanım gibi iki ana bölümden oluştuğu söylenebilir. Önceki yıllarda kullanıma sunulan iletişim aygıtları çok basit sinyal işleme donanımlarına ve sınırlı işlevselliğe sahipken günümüzde bu aygıtların her biri önemli ölçüde gelişim göstermiştir (Fines, 1995). Bu gelişim, işaret işleme teknolojisinde meydana gelen teorik yenilikleri gerçekleştirmek için bir zorunluluk haline gelmiştir. Dünya literatüründe işaret işleme alanında son yıllarda çok gelişme kaydedilmiş ve bu gelişimlerin her biri uygulama alanında kullanılmıştır (Steiglitz, 2020). Bu hızlı gelişime dayalı çok sayıda kablosuz iletişim sistemleri ve standartları dünya çapında herhangi bir küresel plan olmaksızın geliştirilmiştir. Son zamanlarda, kablosuz sistemlerdeki ve standartlardaki çeşitlilik veya belirli bir standarda bağlı kalmaksızın geliştirilen aygıtlar, birlikte çalışabilirlik ve küresel



kesintisiz bağlantı gibi bazı sorunları yüzeye çıkardığı da bilinmektedir(-Landry & Subotnik 2011). Paralel olarak, donanım teknolojisi de önemli ölçüde gelişmekte ve bu ilerlemedeki önemli kilometre taşlarından birisinin de analog donanımdan dijital donanıma geçiş ve ardından gelişmiş işlemcilerin tanıtımı olduğu söylenebilir. Bütün bu gelişimlerin sonucu olarak ortaya çıkan yansımalarından biri de YTR teknolojisidir. YTR, iletişim aygıtının özelliklerini yazılımsal olarak değiştirebilen yeni nesil bir radyo türü olarak tanımlanabilir. Şu anda geliştirilmekte olan YTR teknolojisi ve sanal donanımlar birlikte çalışabilirlik, küresel kesintisiz iletişim, çok kullanıcıli iletişim, spektrum verimliliği gibi problemler için çözüm olması öngörülmektedir. Fakat bu teknolojilerde kablosuz cihazların işlevselliği artarken sistem de giderek karmaşık hale geldiği unutulmamalıdır. Örneğin, hücreli iletişim teknolojisi başlangıçta mobil kullanıcılar için sesli iletişim sağlamak için geliştirilmiştir (Dunny & Leonard, 1997). Ancak, mevcut cep telefonları internet erişimi, dijital kamera, Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS), oyunlar, kişisel yardım ve müzik çalar gibi çok işlevli özelliklere evrilmiştir. Kullanıcılardan ve hizmet sağlayıcılardan sürekli artan talepler sürekli artan Hizmet Kalitesi (QoS) gereksinimleriyle sonuçlanmaktadır. Bu eğilim, kablosuz cihazlara akıllı işlevler eklemeyi gerektirmektedir. Günümüzde bu üç akım BR teknolojisi çatısı altında birleşmeye doğru eğilim göstermektedir (Abdel-Hamid, 2004).

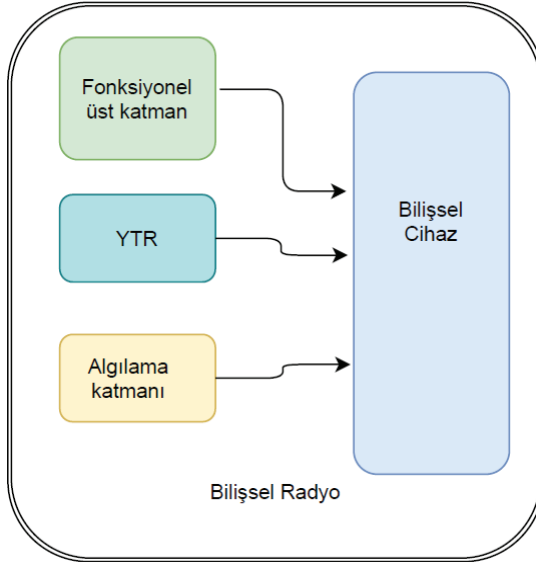
BR teknolojisini daha detaylandırmak gerekirse, öğrenme, algılama, farkındalık ve akıl yürütme gibi biliş yeteneklerini içinde barındıran bir teknolojidir. Ayrıca, küresel kesintisiz iletişim birlikte çalışabilirlik (kooperatif) sorununu çözme yeteneğine sahiptir. Bu yeteneklerin içinde en önde gelen özelliğin içinde bulunan ortamın algılanması olduğunu söylemek doğru olacaktır. Çünkü YTR teknolojisi öncelikle spektrum kıtlığı probleminin çözümü için ön plana çıkmaktadır (Panait & Luke, 2005). Bilişsel Radyo (BR) teknolojisinin gelişmesine kadar, YTR'nin esas olarak çok modlu ve çok standartlı kablosuz cihazları gerçekleştirme önerildi. Fakat ilerleyen yıllarda spektrum kıtlığı probleminin baş göstermesi ve bu problemin yeni teknolojiler önünde büyük bir engel oluşturması, YTR'nin daha çok bu amaca hizmet etmesini ön plana çıkarmaktadır. Çünkü YTR teknolojisinden beklenen içinde bulunduğu spektrumu değerlendirmek ve boş spektrum bölgelerini farklı kullanıcılara tahsis etmektir (Jondral, 2005).

## **YAZILIM TABANLI RADYO VE BİLİŞSEL RADYO İLİŞKİSİ**

Önceki bölümde tartışıldığı gibi YTR'nin özelliklerinden biri, radyo parametrelerinin (frekans, güç, modülasyon, bant genişliği vb.) radyo ortamına, kullanıcının durumuna, ağa bağlı olarak değiştirilebildiği uyarlanabilirliktir. Unutulmamalıdır ki istenilen bu özellikler radyo frekans ortamı,

coğrafi konum vb. olgulardan dolayı donanımsal olarak uygulanması veya değiştirilmesi oldukça zordur. Bu derece esnek işlevsellik ancak uygulamaya özel sabit analog devrelerin ve bileşenlerin kullanımından kaçınılarak çok esnek bir radyo işlevselliği ile sağlanabilir. Bu nedenle bilişsel radyonun YTR etrafında tasarlanması gerekmektedir. Başka bir deyişle YTR, Bilişsel Radyo için temel uygulama teknolojisidir. Bilişsel Radyonun en popüler tanımlarından biri aslında yukarıdaki argümanı açıkça desteklemektedir: “Bir bilişsel radyo, çevresinin, iç durumunun ve konumunun farkında olan ve belirlenen hedeflere ulaşmak için operasyonlarını özerk olarak ayarlayan bir YTR’dir.”

Pek çok farklı model mümkün olsa da bilişsel radyo ve YTR arasındaki ilişkiyi tanımlayan en basit kavramsal modellerden biri Şekil 1’de gösterildiği gibi tanımlanabilir (Arslan, 2007). Bu basit modelde BR, YTR’nin etrafına sarılır. Bu model, bilişsel motor, YTR ve diğer destekleyici işlevlerin (örn. bilişsel motor, radyo ortamından, kullanıcının bağlamından ve ağ koşulundan algılanan veya öğrenilen bazı giriş parametrelerine dayalı olarak YTR’yi optimize etmek veya kontrol etmekten sorumludur. Bilişsel motor, telsizin donanım kaynaklarının ve yeteneklerinin yanı sıra yukarıda bahsedilen diğer giriş parametrelerinin farkındadır.



Şekil 1. Bilişsel Radyo ve YTR mimarisi

Burada fonksiyonel üst katman Bilişsel Cihaz ile YTR arasındaki ilişkiyi kuracak olan veri yolları veya bazı haberleşme protokollerini içermektedir. Algılama katmanı genellikle BR’nin içinde bulunduğu ortamı algılamakla sorumlu olan ve genellikle Çok Giriş Çok Çıkışlı (MIMO) anten yapılarını içinde barındıran bölümdür (Scutari & Palomar, 2009).

Başka bir tanımla, algılama katmanı ortamı algılar ve spektrum boşluklarını belirler. Bilişsel Cihaz ise algılama katmanından alınan veriler doğrultusunda gerek gördüğü cihazlarla iletişim kurmaktadır. Şekil 1’de verilen uygulama geleneksel bir telsiz karşılaştırıldığında YTR, yazılımla ayarlanabilen Radyo Frekansı (RF) bileşenleriyle birlikte yazılım tabanlı dijital sinyal işleme etrafında oluşturulmuştur. Bu nedenle YTR, geniş bir frekans aralığında birçok farklı bant genişliği ile çalışabilen ve birçok farklı modülasyon ve dalga biçimi formatı kullanan çok esnek ve genel bir radyo platformunu temsil etmektedir. Sonuç olarak, YTR birden fazla haberleşme standardını (Global System for Mobile Communications-GSM, Enhanced Data Rates for GSM Evolution-EDGE, Wideband Code Division Multiple Access -WCDMA, Code Division Multiple Access -CDMA, Wireless Fidelity-Wi-Fi, Worldwide Interoperability for Microwave Access -WiMAX, Zaman Bölmeli Çoklu Erişim -TDMA, Kod Bölmeli Çoklu Erişim-CDMA ve Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM) gibi çoklu erişim teknolojilerini destekleyebilir.

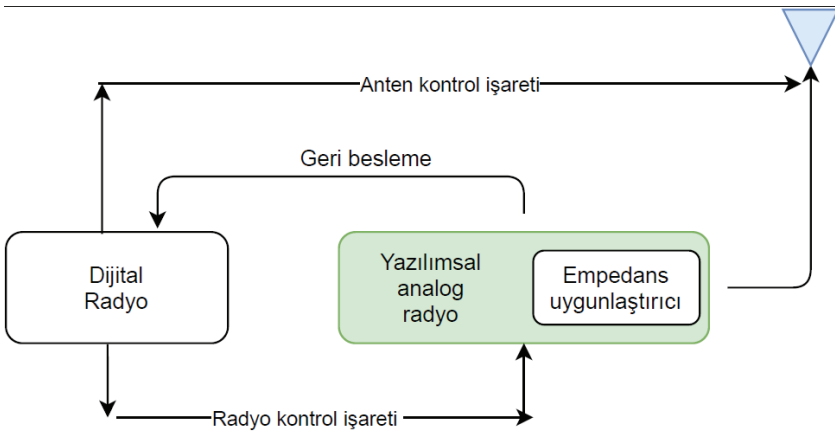
Özellikle son yıllarda haberleşme istemlerinin birçoğunun kablosuz ortamda yapıldığı bilinmektedir. Farklı haberleşme sistemlerinin radyo frekans spektrumunda bir frekans bölgesi işgal ettiği düşünülürse frekans spektrumunda olası bir kıtlık kaçınılmazdır. Spektrum kıtlığının en temel sebebi sabit spektrum erişimi yöntemleridir. Sabit spektrum erişimi yöntemlerinde belirli bir spektrum bölgesi ihtiyaçlar doğrultusunda bir haberleşme servisine atanmaktadır. Fakat bazı haberleşme servisleri günün tümünde aktif olmayabilirler. O zaman bu spektrum bölgesi atıl durumda kalmaktadır. Farklı kullanıcıların bu spektrum bölgesini kullanma ihtimali olmayacaktır. Bazı ülkelerde radyo frekans spektrumunun günün sadece %10’luk diliminde kullanıldığı yapılan çalışmalarla ölçülmüştür. Yapılan bu ölçümler göstermiştir ki, radyo frekans spektrumunun verimli kullanımı için sabit spektrum erişimi yöntemlerinin kullanımını azaltmak gereklidir. Bu bağlamda BR sistemleri radyo iletim ortamını sürekli denetleyen ve haberleşme bölgelerini spektrumda bulunduğu boşluklara kanalize eden akıllı radyo sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. SDR, bu tür sorunları ele almak için doğal bir çözüm olarak kabul edilmiştir. YTR sistemleri çoklu kullanıcı ve standartları destekleyebilen telsizlerin uygulanması ihtiyacı nedeniyle doğal olarak evrimleşmiş olsa da, YTR’nin bilişsel bir radyoda kullanımı yukarıda belirtilen işlevlerle sınırlı değildir. YTR, bilişsel radyolara biliş yeteneklerini tanıtmak için umut verici bir teknolojidir. Örneğin, bilişsel radyoların en önemli biliş yeteneklerinden biri dinamik spektrum yönetim sistemidir. Spektrum algılama, spektrumun belirli bir bölümünü kullanmak için optimizasyon mekanizması ve spektrum şekillendirme, dinamik spektrum yönetim sistemlerinin ana adımlarıdır. Spektrum durumunda, YTR’ye dahili olarak gömülebilen veya harici olarak YTR’ye

dahil edilebilen spektrumu algılamak için algılama cihazları gerekir. Örneğin, anten dâhili bir sensör veya anten olarak kabul edilebilirken, video kamera YTR yapıları için harici bir sensör olarak düşünülebilir. Başka bir deyişle YTR, spektrum bilgisini bilişsel motora sağlamak için minyatür spektrum analizörü gibi bir yapıya sahip olabilir.

## YAZILIM TABANLI RADYO MİMARİSİ

### İdeal YTR Yapıları

İdeal YTR mimarisi, yeniden yapılandırılabilir dijital radyo, gömülü empedans sentezleyici ile birlikte yazılımla ayarlanabilen radyo ve yazılımla ayarlanabilen anten sistemleri olmak üzere üç ana birimden oluşmaktadır. Bu yapı Şekil 2’de gösterilmektedir. Yeniden yapılandırılabilir dijital radyonun temel görevleri, farklı dalga biçimi üretimi, yazılımla ayarlanabilen telsiz ve anten birimleri için optimizasyon algoritmaları gibi dijital telsiz işlevlerinin gerçekleştirilmesi ve bu birimlerin kontrol edilmesidir. Yeniden yapılandırılabilir dijital radyonun uygulanması için çeşitli farklı etkinleştirme teknolojileri vardır. Yazılımla ayarlanabilen analog radyo sistemi, RF filtreleri, birleştiriciler/bölücüler, Güç Amplifier (GA), Low Noise Amplifiers (LNA) ve veri dönüştürücüler gibi dijital olarak gerçekleştirilemeyen bileşenlerle sınırlıdır (Das, 2013). Ayrıca, bu birim, yazılımla ayarlanabilen analog radyo sistemlerinin performansını optimize etmek için “empedans sentezleyici” ile birlikte, bilişsel motor tarafından belirtilen rastgele bir frekans planı için yazılımla ayarlanabilen anten sistemlerinin performansını optimize etmek için kullanılmaktadır.

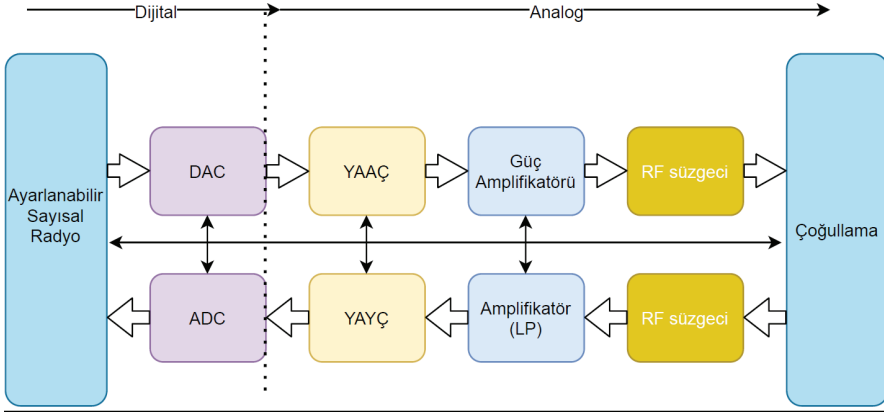


Şekil 2. İdeal YTR Yapısı

Yeniden yapılandırılabilir dijital radyo sistemi, yazılımla ayarlanabilen telsiz sistemini sistem özelliklerine bağlı olarak periyodik bir şekilde izlemekte ve kontrol etmektedir (Grayver, 2012). YTR'nin ana birimleri arasındaki temel ilişki Şekil 2'den anlaşılabilir. Bilişsel motor, tüm radyoyu parametrelere göre yeniden yapılandırabilmesi için yeniden yapılandırılabilir dijital radyoya radyo yapılandırma parametreleri gönderir. Bu parametreler, üretilmesi gereken dalga biçimi tipi (örn. OFDM, CDMA, UWB), frekans planı (örn. bant genişliği, işletim merkezi frekansı) ve güç spektrumu özellikleri olabilir. Ayrıca, bilişsel motor, belirli bir kullanıcının konum bilgisi gibi ortamlardan bazı parametreleri ölçmek veya hesaplamak için yeniden yapılandırılabilir dijital radyodan talep edebilir. Yeniden yapılandırılabilir dijital radyo, yazılımla ayarlanabilen radyo bileşenleri ve anten sistemleriyle birlikte kendini yapılandırır. Bu iki ünitenin performansını optimize etmek için, yeniden yapılandırılabilir dijital radyo, yazılımla ayarlanabilen radyodan, özellikle empedans sentezleyiciden gelen geri besleme bilgisini kullanır. Bu bilgilere dayanarak, yazılımla ayarlanabilen radyo ve anten birimlerinin parametrelerini sırasıyla radyo ve anten kontrol sinyalleri aracılığıyla ayarlar. Son olarak, yeniden yapılandırılabilir dijital radyo, belirtilen yapılandırmanın gerçekleştirildiğini bilişsel motora bildirir.

### **Uygulanabilir YTR Yapıları**

Mevcut bazı sınırlamalar (ürün boyutu, üretim maliyeti, güç, performans vb) nedeniyle ideal YTR mimarileri oldukça maliyetlidir. Literatürde çeşitli pratik YTR platformları mevcuttur. İdeal YTR platformuna yönelik sınırlamalar kaldırılırsa veya ihmal edilirse, bu platformların gelecekte önemli ölçüde gelişmesi beklenmektedir. Bu nedenle, yeniden yapılandırılabilir donanım ve yazılım teknolojisi ilerledikçe, yazılımla ayarlanabilen analog radyo işlevleri, yeniden yapılandırılabilir dijital radyo platformlarında uygulanacaktır. Aşağıda, bazı güncel ve pratik YTR mimarileri sunacağız. Şekil 3, Dünya literatüründe kabul görmüş Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) ağları için pratik bir YTR mimarisi örneğini göstermektedir (Kadhim & Ismail, 2010).



Şekil 3. Uygulanabilir bir YTR örneği

Yeniden yapılandırılabilir sayısal radyo, Seri çevre birimi arayüzlerinden olan Serial Peripheral Interface (SPI), Inter-Integrated Circuit (I2C) ve bağımsız veri yolları aracılığıyla dijital radyoyu yeniden yapılandırabilir. SPI/I2C bağımsız yapılandırma sinyallerini kullanarak, yeniden yapılandırılabilir dijital radyo, yapılandırma parametrelerini yazılımla ayarlanabilen radyo bileşenlerine gömülü kayıtlara yazar (Leens, 2009). Ayrıca, yazılımla ayarlanabilen radyo bileşenleri, güçten tasarruf etmek için dijital radyo tarafından pasif duruma getirilebilir. Örneğin, güncel telsizler sinyal aldığı anda güç kapatma moduna geçirilebilir ve bunun tersi de geçerlidir.

Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı tarafından geliştirilen SPEAKeasy yazılımı uygulanabilir gerçekçi bir YTR mimarisi için bir model olarak gösterilebilecek iyi bir örnektir (Lackey & Upmal, 1995). SPEAKeasy programının amacı, 2 MHz'den 2 GHz'e kadar çalışan 10'dan fazla mevcut askeri telsizi taklit edebilen, taşınabilir, yazılımla programlanabilir bir telsiz oluşturmaktır. Bu radyo sistemleri, geleneksel donanım yerine yazılım ile uygulanabilecek ve sistem belleğinde saklanabilecek veya bulut teknolojisi ile indirilebilir bir sistemdir. SPEAKeasy, geleneksel donanım kullanma yöntemi yerine haberleşme işlemleri gerçekleştirmek için oluşturmak için Sayısal İşaret İşleyicileri (Digital Signal Processor- DSP) kullanılmaktadır. Bu proje 1990-1995 arası Faz I çalışmalarını tamamlayarak bazı analog ve sayısal modülasyon türlerini kullanarak başarılı işlemler gerçekleştirmiştir. Faz I'ın tamamlanmasıyla Faz II'ye geçilmiştir. Bu aşama taşınabilir bir telsiz sağlamakla birlikte genel YTR konseptinin uygulanabilir olduğunu da kanıtlamıştır. Ayrıca bu proje ile iletişim sistemlerinin köprülenmesi sağlanmıştır ki bu bütün haberleşme ağının birbiri ile iletişim kurması anlamına gelmektedir. SPEAKeasy, bugüne kadarki en büyük YTR tabanlı program olan Müşterek Taktik Telsiz Sistemi yolunda önemli bir adım olmuştur. Daha sonraları bu sistem Joint Tactical Radio System (JTRS) adı ile bir kimliğe bürünmüştür (Feickert, 2005). JTRS ayrıca, or-

dunun çeşitli iletişim ihtiyaçlarını karşılamak için esnek bir yazılım programlanabilir radyo teknolojisi geliştirmeye yönelik bir savunma bakanlığı girişimidir. Bu, ABD askeri şubeleri ile koalisyon güçleri ve müttefikleri arasında gerçek zamanlı ses, veri ve video iletimlerini içermektedir. JTRS radyo teknolojisi, minimum dalga biçimine özgü donanım kullanılarak yazılımda tanımlanan dalga biçimlerini kullanarak 2 MHz'den 2 GHz'e kadar uzanan bir frekans aralığı içermektedir. Bu dalga biçimlerinin geliştirilmesi, radyolar arasında birlikte çalışabilirliğe, birçok farklı radyoda ortak yazılımın yeniden kullanılmasına olanak sağlar.

YTR alanındaki bu gelişmeler Japonya, Kanada, İngiltere ve İsveç'in ortak çalışmaları ile uluslararası ticari standart olmak için Software Communications Architecture (SCA)'yı benimsemiştir. Bu mimariyi modüler bir tasarım yaklaşımıyla kullanmak, JTRS'ye mevcut sistemlerin bolluğu ile karşılaştırıldığında birçok avantaj sağlamaktadır. JTRS, birden fazla sistemi ortadan kaldırarak toplam iletişim ekipmanı ağırlığını ve kapladığı alanı azaltmaktadır. Bu aynı zamanda ekipmanların ortadan kaldırılması ve bakımı gereken daha az sistem nedeniyle bakım maliyetlerini ve karmaşıklığını da azaltacaktır. JTRS'ye yapılan yükseltmeler, sistem yazılımda tanımlandığından, havadan ve sahada kolayca uygulanabilen, bakım ve tamir süresini azaltan ve verimliliği artıran yeni dalga biçimlerinin tanıtılması dahil olmak üzere minimum destek gerektirmelidir.

Airnet, YTR teknolojisini uygulamak için şu anda gerekli altyapı hazırlıklarını neredeyse tamamlayan bu şirketlerden biridir. Airnet'in AdaptaCell'i, DSP'lerin ve hava arabirim kartlarının sayısını azaltan bir düzine ayrı kanalı işleyen 90 işlem birimiyle donanımı azaltır. Ayrıca uyarlanabilir akıllı anten kontrolleriyle GSM, GPRS ve EDGE'yi de destekler (AdaptaCell, 2006).

Günümüzde çok farklı özellikte YTR'lar kullanıcıların hizmetine sunulmuş olsa da Realtek® firması tarafından üretilen RTL2832U tümdevre tabanlı YTR 'ler seri olarak üretilen USB alıcı olarak fazlaca kullanılmaktadırlar. Realtek® tarafından üretilen RTL2832U tüm devreleri her ne kadar başka maça üretilmiş olsa da bazı yazılım ve ek donanımlarla YTR olarak kullanıma oldukça uygun hale getirilmiştir. RTL2832U tabanlı Üretilen YTR için bir örnek Şekil 4 ile verilmektedir.

## RTL-SDR Blog V3 Datasheet



Şekil 4. RTL2832U yazılım tabanlı radyo uygulaması

Şekil 4 ile verilen bu dongle RTL-SDR Blog V3 olarak bilinmekte, geliştirilmiş bir YTR olarak kullanılabilir. Bu sürücü uygun bir yazılım ve anten yardımı ile 500 kHz – 1766 MHz arasında radyo yayınlarını algılayabilmektedir. Verilen bu YTR için çok farklı yazılım bulunmasına ve açık erişimli kullanılmasına rağmen yüksek frekanslardaki sinyallerin algılanması için özel antenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu YTR platformunun bazı teknik özellikleri aşağıda verilmektedir (Shevgunov & Efimov, 2019).

Tablo 1. RTL2832U yazılım tabanlı radyo uygulaması için teknik özellikler

Band Genişliği	24 MHz (Direk örnekleme modunda)
ADC	RTL2832U 8-bits
Frekans çalışma aralığı	500 kHz – 1766 MHz
Giriş Empedansı	50 $\Omega$
Çalışma Akımı	270 mA

RTL2832U, 8-bitlik veri işleme kapasitesine sahip olmakla birlikte teorik olarak mümkün olan en yüksek örnekleme hızı  $3,2 \times 10^6$  örnek/sn'dir. Bu teknik detaylar üretici tarafından verilmesine rağmen normal USB arayüzü ile (USB 2.0) ile test edilen en yüksek örnekleme hızı  $2,4 \times 10^6$  örnek/sn'dir. Üretici tarafından açıklanan  $3,2 \times 10^6$  örnek/s değeri Etron EJ168/EJ188/EJ198 USB sürücüleri ile ve günümüz şartlarında ortalama bir bilgisayar ile mümkün olmaktadır.

## SONUÇ

Bu çalışmada yazılım tabanlı radyo ve bilişsel radyo arasındaki ilişki açıklanmış ve günümüzde yazılım tabanlı radyo olarak yaygın şekilde kullanılmakta olan bir platform tanıtılmıştır. Bu bağlamda YTR mimarisi ve donanım özellikleri şekilsel olarak verilmiş olup, BR uygulamaları için kullanım şekli açıklanmıştır.



## Kaynakça:

- “AdaptaCell,” 2006 [Online]. Available: <http://www.airnetcom.com/>
- Arslan, H. (Ed.). (2007). Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems. Springer Science & Business Media.
- Abdel-Hamid, W. (2004). Accuracy enhancement of integrated MEMS-IMU/GPS systems for land vehicular navigation applications. University of Calgary, Department of Geomatics Engineering.
- Calabrese, M. (2009). The End of Spectrum ‘Scarcity’: Building on the TV Bands Database to Access Unused Public Airwaves. New America Foundation June.
- Das, T. (2013). Practical considerations for low noise amplifier design. Freescale Semiconductor, 10.
- Dunny, G. M., & Leonard, B. A. (1997). Cell-cell communication in gram-positive bacteria. *Annual review of microbiology*, 51(1), 527-564.
- Feickert, A. (2005, November). The joint tactical radio system (JTRS) and the army’s future combat system (FCS): Issues for congress. LIBRARY OF CONGRESS WASHINGTON DC CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE.
- Fines, P. (1995). Radio architectures employing DSP techniques.
- Grayver, E. (2012). Implementing software defined radio. Springer Science & Business Media.
- Hossain, S. (2013). 5G wireless communication systems. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2(10), 344-353.
- Jondral, F. K. (2005). Software-defined radio—basics and evolution to cognitive radio. *EURASIP journal on wireless communications and networking*, 2005(3), 1-9.
- Kadhim, M. A., & Ismail, W. I. D. A. D. (2010). Implementation of WIMAX IEEE802. 16d baseband transceiver on multi-core software-defined radio platform. *WSEAS Transactions on Communications*, 9(5), 301-311.
- Landry, B. R., & Subotnik, J. E. (2011). Communication: Standard surface hopping predicts incorrect scaling for Marcus’ golden-rule rate: The decoherence problem cannot be ignored. *The Journal of chemical physics*, 135(19), 191101.
- Lackey, R. I., & Upmal, D. W. (1995). Speakeasy: the military software radio. *IEEE Communications Magazine*, 33(5), 56-61.
- Leens, F. (2009). An introduction to I2C and SPI protocols. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 12(1), 8-13.
- Mitola, J. (2000). Cognitive radio (Doctoral dissertation, Institutionen för teleinformatik).

- Panait, L., & Luke, S. (2005). Cooperative multi-agent learning: The state of the art. *Autonomous agents and multi-agent systems*, 11(3), 387-434.
- Rossini, M. J. (1985). The Spectrum Scarcity Doctrine: A Constitutional Anachronism. *Sw. LJ*, 39, 827.
- Steiglitz, K. (2020). *Digital Signal Processing Primer*. Courier Dover Publications.
- Scutari, G., & Palomar, D. P. (2009). MIMO cognitive radio: A game theoretical approach. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58(2), 761-780.
- Shevgunov, T., & Efimov, E. (2019, April). Software implementation of spectral correlation density analyzer with RTL2832U SDR and Qt framework. In *Computer Science On-line Conference* (pp. 164-173). Springer, Cham.
- Tuttlebee, W. H. (Ed.). (2003). *Software defined radio: enabling technologies*. John Wiley & Sons.
- Ulversoy, T. (2010). Software defined radio: Challenges and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(4), 531-550.

## **BÖLÜM 8**

### **ENDOKRİN HASTALIKLARININ TEŞHİSİNDE KLİNİK KARAR DESTEK SİSTEMLERİN ETKİSİ**

*İnci ZAIM GÖKBAY<sup>1</sup>  
Seval BÜLBÜL GÖKÇEK<sup>2</sup>*

1 İstanbul Üniversitesi Enformatik Bölümü, Dr. Öğretim Üyesi, E-mail: incigokbay@istanbul.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4488-1642>

2 İstanbul Arel Üniversitesi, Öğretim Görevlisi, E-mail: sevalbulbulgokcek@arel.edu.tr <https://orcid.org/0000-0001-8182-229X>

## 1. Giriş

Sağlık, bireylerin hastalık veya sakatlığının olmaması ile birlikte bendenel, ruhsal ve toplumsal açıdan tam bir bütünlük olarak tanımlamıştır [1]. Bireylerin, sağlık ve kaliteli bir hayat yaşama arzusu en temel insan hakkıdır. Bu nedenle hastalığın tedavisi, rehabilitasyonu kamu hizmeti olarak devletler tarafından üstlenilmekte ve devletler bireylere karşılaşılabilecekleri olası sağlık risklerine karşı kamu sağlık sistemiyle güvence sağlanmaktadır[2].

Endokrin sistem hastalıkları da toplumda sık görülmesi, kronik olması, hastalığın teşhis ve tedavi süresinin zaman alması, yanlış teşhis sonucu hastanın maddi ve manevi kayıp yaşaması açısından araştırılması, tedavi ve rehabilite edilmesi gerekli hastalıkların başında gelmektedir[3]. Tüm kronik hastalıklar gibi endokrin hastalıklarının da uzun sürece yayılan teşhis ve tedavisi sağlık harcamalarında ülkelere büyük yükümlülükler getirmektedir. 2007 yılında Amerikan Diyabet Derneği'nin yayınladığı, "Diyabetin Ekonomik Maliyetleri" başlıklı makalesinde; diyabeti olan hastaların sağlık harcamalarının, diyabeti olmayan hastaların sağlık harcamalardan iki kat daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır [4].

Endokrin hastalıklarının toplumda sık görülmesi, birçok fiziksel semptom ve ruhsal belirti ile kolayca karıştırabilmesi nedeniyle teşhis ve tedavi sürecinde hasta ya da hekim tarafından hatalı uygulamalar yapılabilmektedir [5]. 1998 yılında Sanino ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada, addison hastalığının, yüksek psikiyatrik morbiditesi ile ilişkisi değerlendirilmiş [5]. 2001'de yapılan çalışma ile de; sıklıkla psikolojik belirtilerin hastalığı gizleyerek erken aşamalarda tanı konulmasını engellediği ve addison hastalığının, hayatı tehdit edici krizler ortaya çıkardığı ile desteklenmiştir[6]. Benzer çalışmalarda, addison hastalığının depresyon, hastalık hastalığı ya da kronik aksiyete bozukluğu gibi psikiyatrik hastalıklarla çok sık karıştırıldığı ve hastanın yanlış tanı sonrası, yanlış tedavi uygulamalarına maruz kaldığı savunulmuştur[7]. Belirtilerinin gastrointestinal sistem rahatsızlığı ya da psikiyatrik bir hastalığı özellikle depresyonu taklit edebileceği aynı zamanda addison hastalığı olan kişinin kas güçsüzlüğü semptomu hekimi kas hastalıkları ile ilgili gereksiz tetkiklere yönlendirmesine neden olabileceği konusunda olgu vakaları ile karşılaşılmıştır [8]. Benzer şekilde, Cushing'in sendromu ile ilgili yapılan araştırmada, hastalığın; nöropsikiyatrik hastalıklar, alkol bağımlılığından kaynaklanan dejenerasyonlar, yeme bozukluğu, diyabet, multiple (çoklu) skleroz ve kadınlarda gebelik belirtileri ile karıştırılabildiği ve hastalığın tanısının gecikmesi ile gerekli tedaviye ulaşamayan hastaların psikiyatri polikliniklerindeki tedavilere cevap alamadıkları tartışılmıştır[9].

Benzer çalışmalarla halsizlik, yorgunluk, hayattan zevk alamama,

kin nefret, depresyon hatta intihar girişimine meyilli olan endokrin hastalarının yıllarca psikiyatri polikliniklerinde hastalıklarına çare aramaları ancak tedaviye cevap vermemeleri erken teşhisin öneminin aşikâr göstergesidir [10][11]. Endokrin hastalığının psikolojik yönleri hakkında yapılan 1998'deki çalışmayla hangi psikiyatrik bozukluğun, hangi endokrin hastalığın habercisi olduğuna dair kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Bulgulara göre; Cushing'in sendromunda majör depresyon, hastaların %50-60'ını etkileyen ve hayati tehlike oluşturan bir komplikasyon olduğu, antidepresanların genellikle etkisiz kaldığı ve anksiyete ve sinirlilik sıklıkla mevcut olduğu görüşü ile tedaviye yanıt alama hipotezi desteklenmiştir. Geç ya da hatalı tanı konulan ilerlemiş durumlarda mania, depresyona kadar uzanabilmekte, hastanın toplumdaki kendini soyutlamasına ve üretkenlik kaybına neden olmaktadır. Hipertiroidizm; major depresyon hastalığının en yaygın komplikasyondur (genel olarak endişe ve sinirlilik ile ilişkili). Endokrin tedavisine genellikle cevap verir; bazen, antidepresan ilaç kullanımını gerektirmektedir. Hipotiroidizmde depresyon, paranoid bozukluk ve ciddi bilişsel bozukluklar ortaya çıkma ihtimali bulunmaktadır. Bazı durumlarda depresyon, uygun tedaviden sonra bile devam etmektedir. Hiperprolaktinemi hastalarında; sıklıkla kadın hastalarda düşmanlık ve sinirlilik görülmektedir. Hastalık major depresyon ilişkili olabilmektedir. Tedavide, antidepresan ilaçlar etkisiz kalabilmektedir. Hiperparatiroidizm; özellikle kadınlarda, çeşitli psikiyatrik değişiklikler ile ilişkili olabilmektedir[5].

Endokrin hastalıklarının geç ya da hatalı tespit edilmesi hakkında yapılan bir örnek çalışma ile Saklamaz, A. ve arkadaşları tarafından yapılan bir olgu araştırmasında; tesadüfen papiller tiroid kanseri tanısı konulan Graves hastası değerlendirilmiştir. 44 yaşında erkek hastada; graves teşhisi konulmadan önce, yapılan kontrollerinde kalp ritimlerinde bozulmalar saptanmış ve klinik araştırmalar sonucu hipertiroidi tanısı konulmuştur. Hastada tiroid oftalmopati bulgusuna ilaveten kan tahlilleri sonucunda, hastanın tedaviye cevap vermeyen Graves hastası olduğu düşünülmüş ve hastaya total tiroidektomi yapılmıştır. Gözlemlenen hastada, farklı merkezlerde tiroid görüntüleme işlemleri yapılmasına rağmen bölgede gerçek nodül saptanamamış ve Graves'li hastalarda anemnez ve tiroid ultrasonunun nodül belirlenmesinde önemine dikkat çekilmiştir [12].

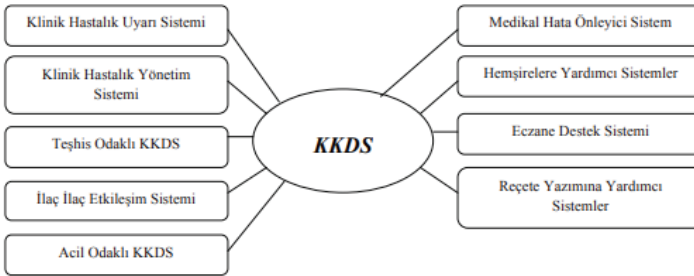
## **2. Teşhise Destek Niteliğinde Tasarlanan Klinik Karar Destek Sistemlerinin Gelişimsel Süreçleri**

Klinik karar destek sistemleri (KKDS); hekimin hastalığa ait doğru teşhisi koyabilmek amacıyla rutin muayeneler sonrası hastanın semptom ve klinik bulguları değerlendirilerek, hekimin doğru karar vermesini sağlayan akıllı yazılım sistemleridir [13]. Bu sistemler ihtiyaçlara göre sadece arşiv, görüntüleme amaçlı ya da daha ileri düzeyde matematik model alt yapılarıyla hastalığın öngörülmesi, erken teşhisi ve tedavisine destek

verme amacıyla yapılandırılabilir. Matematik modellerin gelişimi, entegre sistemlerdeki teknolojik gelişmeler ve verilerin elde edilme, sınıflandırılma, analiz edilme biçimlerinde yaşanan gelişmelerle ihtiyacı karşılamaya yönelik öğrenme alt yapılarına kavuşmuştur. Makinaların insanlar gibi düşünmesine yönelik ilk fikir 1980li yıllarda ortaya atılmıştır. 1990'lı yıllarda gelişim yapay sinir ağlarıyla hızlanarak günümüzde yapay zeka ve derin öğrenmenin gelişimine zemin oluşturmuştur.

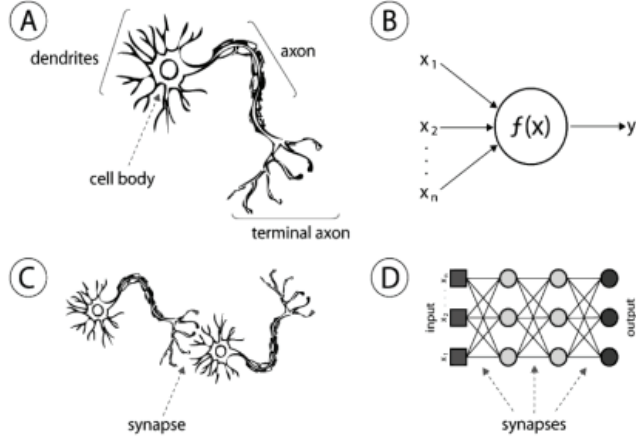


Şekil 2.1.KKDS [14].



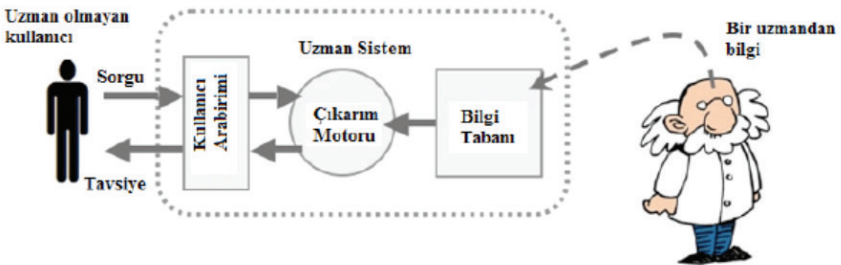
Şekil.2.2. KKDS Uygulama Alanları [14].

Yapay sinir ağları (YSA), insana özgü davranışların yapısından esinlenerek önceden öğrenilmiş ya da sınıflandırma yapılmış veriler ile yeni bilgiler üretebilmektedir. YSA'ların görevi kendisine girdi olarak verilen bilgilere karşılık bir çıktı üretmektir. Meme kanseri ve birçok hastalığın erken teşhis ve tedavisinde YSA'lar başarılı sonuçların elde edilmesine destek vermektedir. Klinik karar verme sistemleri, 1990'lı yıllardan itibaren ağırlıklı olarak yapay sinir ağları uygulamalarını kullanmaya başlamıştır [15].



Şekil 2.3. Biyolojik ve Yapay Sinir Ağları [16].

Dünya genelinde ve ülkemizde artan nüfus, sağlık kuruluşları, sağlık personelleri ve doktorların iş yükünü doğru orantılı olarak artırmaktadır. Hastalara ait verilerin düzenli arşivlenememesi, kontrol edilememesi, tıbbi verileri ve bu verileri yönetme konusunda giderek artan bir sorun haline gelmektedir. Hastanın tıbbi geçmişinin, (laboratuvar, görüntüleme, tedavi) net bir veri kaynağı tarafından sağlanamaması, teşhis ve tedavi planlarının düzenli takip edilememesi tıp alanını zorunlu olarak bilişim bilimi haline getirmektedir [17]. Klinik karar verme sistemleri, hastalığın teşhis ve tedavisi yönünden olumlu katkılarının olmasının yanı sıra hekim becerisini artırarak verimliliği yükseltmek amacı ile de kullanılmaktadır [17][18]. KK-DS'ler hasta verileri ile beraber klinik bulguları da kullanarak “Öyleyse –sonuç böyledir.” biçiminde değerlendirmeler yaparak en uygun sonuca ulaşmayı sağlamaktadır [17].



Şekil 2.4. Klinik Karar Destek Sistemleri [17].

### 3. Endokrin Hastalıklarına Yönelik Klinik Karar Destek Sistem Örnekleri

Endokrin hastalıklarına ilişkin makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları (YSA) üzerine yapılan çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

2009 yılında Temurtaş tarafından yapılan tiroid hastalığının tanısında kullanılan sinir ağları üzerine bir karşılaştırma çalışması yapılmıştır. UCI'den alınan veri setleri ile 3 farklı türde sinir ağının karşılaştırması yapılarak tiroid hastalığı veri kümesi için sınıflandırma doğrulukları ölçülmüştür. Yapılan çalışmada, tiroid hastalığının tanısına ve sınıflandırılmasına yardımcı olabilecek bir karar destek sistemi oluşturulmuş ve algoritmanın daha önce tiroid hastalık teşhisi amacı ile kullanılan yöntemlere olan başarısı ispatlanmıştır [19].

2013'te Bozkurt ve arkadaşları tarafından diyabet hastalığının erken teşhisinde farklı yöntemlerin karşılaştırılması yapılmıştır. The Pima Indians diyabet data setlerinden alınan verilerle 6 farklı sinir ağı yöntemleri kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışmada, aynı veri tabanı kullanılarak uygulanan diğer yöntemlerle karşılaştırılması yapılmış ve uygulanan yöntemin başarı oranının diğer çalışmaların gerisinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla beraber, yapılan diğer çalışmaların algoritmanın özgüllük ve duyarlılık değerlerini hesaplamadıkları ancak bir sınıflandırıcının başarısını değerlendirmek için duyarlılık ve özgüllük değerlerinin de çok önemli olduğunu savunmuşlardır [20].

2017 yılında Kavakiotis ve arkadaşlarının "Diyabet Araştırmalarında Makine Öğrenmesi ve Veri Madenciliği Yöntemleri" adlı çalışmada; DM araştırmalarına uygulanan makine öğrenme ve veri madenciliği yaklaşımlarını belirlemek ve gözden geçirmek amaçlanmıştır. Diyabet hastalığının biyoteknolojik yöntemlerle tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada, veri madenciliği ve makine öğreniminin klinik alanda kullanılmasının diyabet hastalığının erken teşhis edilebilirliğine dikkat çekmişlerdir. Ayrıca; klinik ve biyolojik bilgileri içeren veri kümeleri sayesinde tekniklerin zenginleştirilerek daha yüksek performanslı karar verme sistemleri geliştirilebilirliği sonucuna ulaşılmıştır [21].

2005 yılında Hoshi ve arkadaşları tarafından tiroid fonksiyonları teşhisi için bayesian ve SOM yapay sinir ağları kullanarak iki uygulamanın birbirine olan üstünlükleri ve sınıflandırma başarıları değerlendirilmiştir. Çok değişkenli insan tiroid verilerinin iki önemli sinir ağı tarafından yeniden analizini yapılmıştır. Birincisi, hastaları kümeleyen ve görsel olarak laboratuvar testlerine göre dağılımın bir özelliğini gösteren ve kendi kendini düzenleyen harita yaklaşımıdır. Kendi kendini düzenleyen haritanın (SOM); hipertiroit, hipotiroit ve normale karşılık gelen üç iyi ayrılmış kümeden oluştuğu görülmüştür. Bayesian sinir ağı (BRNN) kullanarak,



tiroid hastalığının sınıflandırma oranlarını tahmin edilmiş ve tahmin doğruluğunun çok değişkenli analizden daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. ARD yönteminin kullanılması durumunda yüksek sınıflandırma oranlarına ulaşılırken, SOM veri görselleştirmesi sayesinde iyi kümelenmiş tiroid hastalarının haritasından tiroid fonksiyonunun karakteristik özelliklerini daha net ayırabildiği sonucuna ulaşılmıştır [22].

Farhad Soleimanian Gharehchopogh ve arkadaşları, tiroid hastalığının teşhisinde yapay sinir ağları kullanarak bir vakanın araştırmasını yapmıştır. Hastalığın teşhisi amacıyla oluşturulan model 3 temel aşama sırasıyla; veri toplama ve sınıflandırma, modelleme ve yapay sinir ağı seçimi son olarak ağ performansını değerlendirerek en iyi sonuca ulaşmadan oluşmaktadır. Tiroid hastalığını sınıflandırmak için (hipertiroid, hipotiroid ve normal), yapay sinir ağlarında çok katmanlı (MLP) geri yayımlı öğrenme algoritması kullanılmıştır. Yöntemin tiroid hastalıklarının sınıflandırmadaki başarısının %98,6 olduğu sonucuna varılmış, diğer hastalıkların tahmini ve sınıflandırılmasında kullanılabilecek bir model olabileceğini savunulmuştur [23].

Rastogi ve Bhalla, tiroid hastalığı teşhisi için benzer bir uygulama yaparak YSA kullanmıştır. İleri beslemeli sinir ağları ve geri yayımlı öğrenme algoritması kullanılarak tiroid hastalığının sınıflandırılması üzerine çalışılmıştır. Çapraz doğrulama kullanılarak makine öğrenme modelinin başarısı değerlendirilmiştir. Kullandıkları matematiksel modelin, karmaşık fonksiyonların sınıflandırılmasındaki başarısı yüksek olmasına rağmen Tiroid hastalığıyla karıştırılabilecek fazlaca hastalık olması ve tiroid hastalıklarının kendi içinde sınıflandırılmasından kaynaklı geleneksel modellerin yetersiz kaldığı sonucuna varılmıştır [24].

2015 yılında Pandey ve arkadaşları tiroid hastalıklarının sınıflandırılmasına yönelik farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen mevcut sınıflandırma algoritmalarını inceleyerek daha üstün bir sınıflama algoritması geliştirmeye çalışmışlardır. Çalışmalarında, mevcut tekniklerin yanı sıra bireysel modellere göre modelin sınıflandırma doğruluğunu artıran C4.5 karar ağacı ve Random Forest Random Forest uygulamalarını kullanmışlardır. UCI veri tabanından almış oldukları verilerden tiroid hastalığına ait 30 özellik seçilmiş ve bunlardan 29'u girdi 30. özellik çıktı olarak belirlenerek hastanın hipotroidi ya da hipertroidi olarak sınıflandırılması amaçlanmıştır. Yapmış oldukları çalışmada geliştirdikleri c4.5 karar ağacı ve random forrest modeli ile tiroid hastalığı sınıflandırmadaki ve daha önce kullanılan yöntemlere göre hastalığa ait daha az veri kullanılarak dahi yüksek sınıflandırma başarısına dikkat çekmişlerdir [25].

2016 yılında Rasitha, lineer diskriminant analizi (LDA) kullanarak tiroid hastalığı tahmin etmeye yönelik bir çalışma yapmıştır. Hipotiroidi

araştırmasında UCI veri tabanından indirilen 29 özellikli bir veri setini kullanmıştır. LDA analizi sayesinde hastalığın tahminin %99.62 oranında başarılı olduğu sonucuna ulaşmıştır. Gelecekte diyabet, kalp ve diğer hastalıkların veri madenciliği ve makine öğrenmesi ile tahmin edilebileceği yönünde yapılan bir deneysel çalışma olarak literatürde yer almıştır [26].

Al-muwaffaq ve Bozkus 2016 yılında yaptıkları çalışmada, birçok hastalığın tahmin edilebilmesi amacıyla sınıflama algoritmaları ve makine öğrenme yöntemlerinin önemini vurgulamışlardır. Tiroid bezi bozukluklarının teşhisi amacıyla bir karar algoritması oluşturmuşlardır. Çalışma için kullanılan veriler UCI veri tabanından alınmış ve hastalık tahmini için bir karar ağacı algoritması genel tahmin doğruluğunda eğitim için % 100 ve test için % 98,7 ile % 99,8 arasında yüksek bir başarı oranı elde edilmiştir. Normal, hipotiroidi ve hipertiroidi olarak sınıflandırılan 3 durum değerlendirilmiştir Tiroid hastalığının semptomlarının diğer hastalıklarla sıklıkla karıştırıldığı ancak doğru ve güvenilir bir tahmin algoritması ile erken teşhis edilebilmesi durumunda etkili bir tedavi planlaması yapılabilirliğine dikkat çekmişlerdir. Kullanmış oldukları MLTDD yönteminin hastalığı tahmin etme başarısının %99.7 olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bununla birlikte, endokrinoloji alanında uzmanlaşan tıp öğrencileri için de MLTDD ile kendi tahminlerini karşılaştırarak bilgilerini test etmek aracı olarak kullanabileceklerini önermişlerdir [27].

Turanoğlu- Bekar, 2016 yılında yapmış olduğu bir çalışmada tiroid hastalığı türlerini sınıflandırmak için yaygın olarak kullanılan karar ağacı algoritmalarını karşılaştırmayı ve performanslarını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. ACC (%), MAE, PRE, REC, FME ve Kappa İstatistiği yöntemleri kullanarak karar ağacı algoritmalarının veri madenciliği teknolojisinin bir aracı olarak nasıl uygulanabileceğine dikkat çekmeye çalışmışlardır. Tiroid hastalığının en iyi sınıflandırıcısına karar vermek, mevcut karar ağacı algoritmaları ortalama sınıflandırma doğruluğunu, hassasiyet değeri, hatırlama değeri, F ölçümü ve ortalama mutlak hata açısından değerlendirmeyi amaçlamışlardır ve doktor değerlendirmesi ile matematiksel modelin başarıları kıyaslandığında hastalığı %75 başarı ile en yüksek tahmin etme oranının Naive Bayes karar ağacı algoritması olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca çalışmalarında, algoritmaların çalışma süreleri karşılaştırıldığında J48'in Naive Bayese göre daha hızlı ve yorumlanabilir olduğu sonucuna ulaşmışlar, karar ağaçlarının birbirine göre üstün ve zayıf oldukları noktalar üzerine dikkat çekmişlerdir [28].

2018 yılında Sangeetha ve K.Palanivel; tiroid hastalığını önceden tahmin etmenin medikal araştırmadaki güncel çalışmalardan biri olduğuna dikkat çekmişlerdir. Veri madenciliğinin; hastalık tahmini, hastalığın erken teşhisi, uygun ve doğru tedavi edilebilmesi için önemini vurgulayarak, tiroid hastalığının tahmin edilmesi için, native bayes, random tree, random

forest, D tree yöntemleri WEKA ile ayrı ayrı değerlendirilerek incelenmiştir. D tree algoritması ile hastalığın tahmin edilme yüzdesi 99.80 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile kronik hastalıklar, diyabet ve diğer hastalıkların gerekli veri kümeleri oluşturulduktan sonra tahmin edilebileceğine yönelik öneride bulunmuşlardır [29].

Sajadi ve arkadaşları bulanık mantık algoritmasından yararlanarak tiroid hastalıkları arasında en sık görülen hipertiroidiyi teşhis etmeyi amaçlamışlardır. Çalışma için gerekli olan verileri İran İmam Humeyni Kliniği ve Shahid Beheshti Hastanesine ait 305 hastadan elde etmişlerdir. Hastalardan alınan demografik bilgiler, laboratuvar testleri ve hasta anamnezleri alınarak çalışmanın güvenilirliğini kuvvetlendirmişlerdir. Bulanık mantık algoritması kullanılarak hazırlanan modelin yordama yeteneği multinomial lojistik regresyon modeli ile karşılaştırarak, ROC eğrisi ile modelin hassasiyet ve özgünlüğünü sınımlamışlardır. Hatalığın teşhisi için tasarlanan modelin %97 oranında başarılı olduğu ayrıca bulanık mantık algoritmasının tiroid hastalıklarını sınıflandırma başarısının, lojistik regresyon modeline göre daha iyi performansa sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca çalışmalarında, daha az gelişmiş ülkelerde uzmanlık ve ekipman eksikliği nedeniyle kişi başına düşen doktor sayısının çok düşük olduğu ve tasarlanan tahmin modelinin makine öğrenme teknikleri sayesinde hastalığın teşhisinde doktorlara yardımcı olabileceği, iş yüklerini azaltabileceğini ve savunmuşlardır. Çalışmanın sayısal verilere ek olarak, tıbbi görüntüleme cihazları ile elde edilen radyolojik görüntülerinde modele aktarılarak insani faktörlerden kaynaklanan hatalı teşhislerin ya da tedavi planlamalarının önüne geçebileceğinin üzerinde durmuşlardır [30].

Kumari ve arkadaşları 2013 yılında diyabet hastalığının önemine ve insidansındaki artışa dikkat çekmişlerdir. Öneminden ötürü, diyabet hastalığının doğru teşhis edilmesi için optimal maliyetle ve iyi performans cevap verebilecek bir sınıflandırma ve tahmin programına olan ihtiyacı dile getirmişlerdir. UCI veri tabanından almış oldukları diyabet verilerini destek vektör mekanizmasını (SVM) kullanarak bir makine öğrenme algoritması oluşturmuşlardır. Diyabet veri setinin eğitim seti doğruluğu 65,8 ve test doğruluğu SVM sınıflandırıcısı için 78,2 olarak elde etmişlerdir, ağı eğitmek için kullanacakları örnekler ya da veri seti artırıldığında doğruluğun artacağını savunmuşlardır. Elde edilen deneysel sonuçlar ile destek vektörünün diyabet hastalığının teşhisinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. SVM yaklaşımı, basit klinik ölçümlerle sık rastlanan bir hastalığı tespit etmek için laboratuvar testleri olmadan başarıyla kullanılabilceğini öne sürmüşlerdir. SVM ve radyal temelli fonksiyon'un ( RBF) sınıflandırma doğruluğu, duyarlılığı ve özgüllüğü gibi performans parametreleri yüksek olduğu için sınıflandırma için en uygun yöntem olduğunu belirtmişlerdir [31].

Kavakiois ve arkadaşları, diyabetin daha önce tüm yönlerinde yapılan kapsamlı araştırmaların (tanı, etiopatofizyoloji, terapi vb.) büyük miktarda veri üretimine imkan sağladığını ileri sürmüşlerdir. Çalışmalarında, % 85'i denetimli, % 15'i denetimsiz öğrenme yaklaşımları olarak çeşitli makine öğrenme algoritmaları kullanmışlardır. Kullanılan algoritmalar arasında, destek vektör makinelerinin (DVM) en başarılı ve en yaygın kullanılan algoritma olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Detaylı bir literatür taraması yapmışlar ve diyabet üzerine yaptıkları klinik karar destek araştırmalarında biyoenformatik, biyomedikal mühendisliği gibi bilim dallarının, diyabet hakkındaki çalışmalarına dikkat çekmişlerdir[21].

Karhikeyani ve diğerleri diyabet hastalığı tahmininde algoritmalarının (CPDMA) performansının karşılaştırılması amacıyla yapmış oldukları çalışmada hastalığın tanı ve tahminine yardımcı olmak amacıyla 5 farklı kriter kullanarak, 10 farklı matematiksel öğrenme modeli performansını karşılaştırmışlardır. C4.5 ağacı, Destek Vektör Mekanizması, K-En yakın Komşu Algoritması, Olasılıksal Sinir Ağları, BLR, Çoklu Doğrusal Regresyon, Sınıflama ve Regresyon Analizi, CS-CRT, Kısmi En Küçük Kareler ve PLS-LDAthen arasında performansları, cevap süreleri gibi faktörleri karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışma sonrası Kısmi En Küçük Kareler algoritmasının bu karar destek algoritmaları arasında diyabet hastalığı tahmin ve sınıflandırmasında %74 ile en başarılı algoritma olduğu sonucuna ulaşmışlardır [32].

Zaim ve arkadaşları, 2015 yılında yayınlamış oldukları çalışmada hipofiz adenomlarının erken teşhis edilebilmesi amacıyla web tabanlı bir klinik karar destek sistemi (KKDS) geliştirmişlerdir. KKDS' de seçilen hormon hastalıklarının (Akromegali, Cushing Sendromu, Prolaktinoma) iyi bir şekilde sınıflandırmak için tipik işaretler ve hormon bozukluk belirtilerinden bazı özellikler belirlenerek bir küme tanımlanmıştır. Çalışmada, Lineer Skolastik Model ile seçilen hormon hastalıklarında% 99'dan fazla doğru karar verdiği sonucuna ulaşmışlardır. Araştırmacılar, önerilen MDSS aracının etkin bir şekilde kullanılmasının, endokrin uzmanının kayda değer miktarda zamanından tasarruf sağlamasını ve tanı maliyetini düşürmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca ileride oluşturdukları karar destek modeli ile ülkelerde sağlık alanında mobil platformda uygulanmasını amaçlamışlardır[33].

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, toplumda sıklıkla görülen; teşhis ve tedavi süresi uzun zaman alan hatta bazı kronik hastalıklar kategorisinde yer alan endokrin hastalıkları ve klinik karar destek sistemleri ile bu hastalıkların erken teşhis ve sınıflandırma başarısının önemine dikkat çekilmiştir.

Dünya nüfusundaki artış göz önüne alındığında ülkelerin sağlık sistemlerinin daha hızlı ve doğru karar verme sürecinde teknolojiye uyumunu zorunlu hale getirmiştir. Klinik karar destek sistemleri hekim ve hasta arasındaki ilişkiyi bir uzman sistem aracılığı ile sağlamaktadır. KKDS'ler hekimlerin yerini almak amacıyla tasarlanan sistemler olmamakla birlikte hekimin; doğru, hızlı ve daha az iş uğraş ile kaliteli bir tedavi planı uygulamasını sağlamaktadır.

KKDS'ler, hastaya ait eski bilgilere daha hızlı ulaşarak; hatalı ilaç kullanımı, yanlış tedavi planlaması, hekimin iş yoğunluğuna bağlı olarak gözden kaçabilecek hataları minimuma indirilerek maddi ve manevi kazanç sağlamaktadır.

Aynı zamanda; kanser, diyabet, tüberküloz gibi hastalıkların erken teşhisindeki başarıları KKDS'lerin önemine ve başarısına dikkat çekmektedir [34].

Endokrin hastalıklarının semptomatik benzerlik göstermesi nedeniyle karıştırıldığı diğer hastalıklara yönelik ve klinik karar destek sistemlerinin avantajlarına yönelik kapsamlı literatür araştırması yaptığımız bu çalışmada Karar Destek Sistemlerinin klinik anlamdaki önemi görülmüştür. Sağlık merkezlerinde bilgi yönetimine ve hastalık teşhisine yardımcı olduğu, erken teşhisle zamandan tasarruf, hastalığı tahmin ve sınıflandırmadaki başarıları gibi birçok olumlu katkısından dolayı, karar destek sistemleri oluşturmanın birçok açıdan önemli ve geliştirilmesinin gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Hatalı teşhis riski olan ve diğer hastalıklarla karıştırılma potansiyelindeki endokrin hastalıkları için yapay zeka sistemlerinin oldukça önemli olduğu görülmektedir.

Gelişmiş ülkelerin çoğunda KKDS'lerin kullanımı ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar ve akademik araştırmalar devam etmektedir. Bu sistemlerin ülkemizde de yaygınlaştırılması sağlık hizmetlerinde yaşanan ya da yaşanması muhtemel birçok sorunun önüne geçeceği düşünülmektedir.

#### 4. KAYNAKÇA

- [1] M. Yalçinkaya et al., “Sağlık Çalışanlarında Sağlıklı Yaşam Biçimi Davranışlarının Değerlendirilmesi,” TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni, no. 6 (6). 2007.
- [2] A. Erol, H., & Özdemir, “Türkiye’de Sağlık Reformları ve Sağlık Harcamalarının Değerlendirilmesi,” SGD-Sosyal Güvenlik Derg., vol. 4, no. 1, pp. 9–34, 2014.
- [3] S. Ertek, “Endokrinolojide Tele-Sağlık ve Tele-Tıp Uygulamaları,” Acıbadem Üniversitesi Sağlık Bilim. Derg., vol. 3, no. 2, 2011.
- [4] Y. Dall, T., Mann, S. E., Zhang, Y., Martin, J., & Chen, “Economic costs of diabetes in the US in 2007.,” Diabetes Care, vol. 31, no. 3, pp. 596–615, 2008.
- [5] G. A. Sonino, N., Navarrini, C., Ruini, C., Ottolini, F., Paoletta, A., Fallo, F., ... & Fava, “Persistent psychological distress in patients treated for endocrine disease.,” Psychother. Psychosom., vol. 73, no. 2, pp. 78–83, 2004.
- [6] S. Ten, M. New, and N. Maclaren, “Addison’s Disease 2001,” J. Clin. Endocrinol. Metab., vol. 86, no. 7, pp. 2909–2922, Jul. 2001, doi: 10.1210/JCEM.86.7.7636.
- [7] E. Tiryaki, A., & Özkorumak, “Tıbbi Tedavilerin Yetersiz Kaldığı Bir Endokrin Bozukluk Olgusu.,” Klin. Psikiyat. Derg., vol. 10, no. 1, pp. 46–52, 2007.
- [8] Z. Kendereški, A., Micić, D., Šumarac, M., Zorić, S., Macut, D., Čolić, M., ... & Bogdanović, “White Addison’s disease: what is the possible cause?,” J. Endocrinol. Invest., vol. 22, no. 5, pp. 395–400, 1999.
- [9] T.H.Ç GRUBU, “Hipofiz Hastalıkları Tanı, Tedavi ve İzlem Klavuzu,” in Türkiye Endokrinoloji ve Metabolizma Derneği, 2009.
- [10] Y. Uysal and E. Akpınar, “Tip 2 Diyabetli Hastalarda Hastalık Algısı ve Depresyon,” Cukurova Med. J., vol. 38, no. 1, 2014.
- [11] İ. Eren, E. Cüre, İ. Çivi İnanlı, A. Kutlucan, B. Kale Köroğlu, and M. Numan Tamer, “Klinik ve Subklinik Hipotiroidide Psikiyatrik Belirti Düzeyi ve Psikiyatrik Belirtilerin Tiroid Hormon Düzeyleri İle İlişkisi,” Klin. Psikiyat., vol. 9, 2006.
- [12] O. Nermin Sivrikoz, “Papillary Carcinoma Incidentally Found in Graves’ Disease: A Case Report,” Artic. Turkish J. Endocrinol. Metab., 2012, doi: 10.4274/Tjem.2036.
- [13] S. C. Yücebaş, “Hipokrat-I: Bayes ağı tabanlı tıbbi teşhis destek sistemi (Master’s thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).,” 2006.
- [14] E. Koç, “Yöntem ve uygulama açısından klinik karar destek sistemleri (Master’s thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).,” 2013.
- [15] N. Z. Yurtay, Y., Ak, G., & Bacınoğlu, “Tıbbi Karar Destek Sistemlerinin

- Yöntemsel Olarak Değerlendirilmesi Üzerine Bir Çalışma.,” in In International Symposium On Innovate Technologies In Engineering Science (ISITES)., 2013, pp. 901–908.
- [16] A. B. F. Maltarollo, V. G., Honório, K. M., & Da Silva, “Applications of Artificial Neural Networks in Chemical Problems. London: Intechopen,” in Artificial Neural Networks: Architectures and Applications, 2013, p. 205.
- [17] Ö. Deperlioğlu et al., “Web tabanlı klinik karar destek sistemleri: yapıları ve özellikleri,” *ab.org.tr*, Accessed: Feb. 22, 2022. [Online]. Available: <https://ab.org.tr/ab16/bildiri/25.pdf>.
- [18] K. Kawamoto, C. A. Houlihan, A. Balas, and D. F. Lobach, “Improving clinical practice using clinical decision support systems: a systematic review of trials to identify features critical to success,” doi: 10.1136/bmj.38398.500764.8F.
- [19] F. Temurtas, “A comparative study on thyroid disease diagnosis using neural networks,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 944–949, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.ESWA.2007.10.010.
- [20] C. Sci, M. Recep Bozkurt, N. Yurtay, Z. Yilmaz, and C. Sertkaya, “Turk J Elec Eng & Comparison of different methods for determining diabetes,” 2014, doi: 10.3906/elk-1209-82.
- [21] I. Kavakiotis, O. Tsave, A. Salifoglou, N. Maglaveras, I. Vlahavas, and I. Chouvarda, “Machine Learning and Data Mining Methods in Diabetes Research,” *Comput. Struct. Biotechnol. J.*, vol. 15, pp. 104–116, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.CSBJ.2016.12.005.
- [22] K. Hoshi, K., Kawakami, J., Kumagai, M., Kasahara, S., Nishimura, N., Nakamura, H., & Sato, “An analysis of thyroid function diagnosis using Bayesian-type and SOM-type neural networks.,” *Chem. Pharm. Bull.*, vol. 53, no. 12, pp. 1570–1574, 2005.
- [23] F. Soleimani Gharehchopogh, M. Molany, and F. Dabaghchi Mokri, “USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK IN DIAGNOSIS OF THYROID DISEASE : A CASE STUDY,” *Int. J. Comput. Sci. Appl.*, vol. 3, no. 4, 2013, doi: 10.5121/ijcsa.2013.3405.
- [24] A. Rastogi, A. B., & Monika, “Study of neural network in diagnosis of thyroid.,” *Int. J. Comput. Technol. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 13–16, 2014.
- [25] D. K. Gour, V. Sharma, S. Pandey, and D. Kumar Gour, “Comparative Study on Classification of Thyroid Diseases String Matching View project Data Mining View project Comparative Study on Classification of Thyroid Diseases,” *Artic. Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 28, no. 9, 2015, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V28P286.
- [26] G. B.-C. A. Electron.(CAE) and undefined 2016, “Predicting thyroid disease using linear discriminant analysis (LDA) data mining technique,”

- Citeseer, vol. 4, no. 12, 2016, Accessed: Feb. 22, 2022. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.740.6120&rep=rep1&type=pdf>.
- [27] I. Al-muwaffaq, Z. B.-C. S. I. Technol, and undefined 2016, “MLTDD: use of machine learning techniques for diagnosis of thyroid gland disorder,” academia.edu, Accessed: Feb. 22, 2022. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/download/45123542/csit65207.pdf>.
- [28] E. T. Bekar, S. Kantarci, E. Turanoglu-Bekar, G. Ulutagay, and S. Kantarcı-Savas, “Classification of thyroid disease by using data mining models: a comparison of decision tree algorithms,” researchgate.net, 2016, doi: 10.5899/2016/ojids-00002.
- [29] K. Sangeetha, S., & Palanivel, “Anticipating Thyroid Disorders Using Data Mining Techniques.,” *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, vol. 7, 2018.
- [30] N. Sajadi, S. Borzouei, ... H. M.-C. E. and, and undefined 2019, “Diagnosis of hypothyroidism using a fuzzy rule-based expert system,” Elsevier, Accessed: Feb. 22, 2022. [Online]. Available: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213398418302574?casa\\_token=uXVc6600Z0IAAA-AA:gE3tFuNpTDIDJWF8gStCHXEj9nZkWCiHtQkXONvXBOfpR37D-ggOjL2LvmkMS1jnfF-QP8nQ](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213398418302574?casa_token=uXVc6600Z0IAAA-AA:gE3tFuNpTDIDJWF8gStCHXEj9nZkWCiHtQkXONvXBOfpR37D-ggOjL2LvmkMS1jnfF-QP8nQ).
- [31] V. Anuja Kumari and R. Chitra, “Classification Of Diabetes Disease Using Support Vector Machine,” *Int. J. Eng. Res. Appl.* www.ijera.com, vol. 3, pp. 1797–1801, Accessed: Feb. 22, 2022. [Online]. Available: www.ijera.com.
- [32] V. Karthikeyani and I. Parvin Begum, “Comparison a Performance of Data Mining Algorithms (CPDMA) in Prediction Of Diabetes Disease.”
- [33] B. S. Gökbay, I. Z., Karaman, S. L., Yarman, S., & Yarman, “An intelligent decision support tool for early diagnosis of functional pituitary adenomas.,” *TWMS J. Appl. Eng. Math.*, vol. 5, no. 2, pp. 169–187, 2015.
- [34] Ş. Özata, M., & Aslan, “Klinik karar destek sistemleri ve örnek uygulamalar.,” *Kocatepe Tıp Derg.*, vol. 5, no. 1, 2004.





## **BÖLÜM 9**

# **DOĞAL ATIKLARIN KOMPOZİT MALZEME OLARAK KULLANIM OLANAKLARI**

*Gülşah ÖNER<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr.Öğr.Üyesi, Atatürk Üniversitesi TBMYO, Otomotiv Teknolojisi Programı  
galar@atauni.edu.tr

## Giriş

Son yıllarda plastik malzemelerin zararlı etkilerinin çok artması, atık malzemelerin depolama alanlarının giderek azalması ve özellikle çevre kirliliği bilincinin çok yaygınlaşması ile birlikte küresel ısınma ve dünyamızın yaşanabilir bir yer olması amacıyla biyobozunur malzemelerin üretilmesi çalışmaları hız kazanmıştır. Doğal lif takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler çevre dostu malzemelerdir. Son yıllarda özellikle sürdürülebilir çevre dostu ve biyobozunur bir malzeme üretmek için bitki liflerinin kullanımında dünya çapında önemli bir artış olmuştur. Kenevir, jüt, muz, ananas, pamuk, rami, sisal, bambu vb. bitkilerden elde edilen lifler ile yumurta kabuğu, ceviz kabuğu, fındık kabuğu, ahşap ve keten tohumları vb. gibi doğal malzemeler, polimer matrisli kompozitlerde kullanılmaya başlanmıştır. Bu gibi doğal malzemelerin geri dönüşümü ile hem ülke ekonomisine katkı sağlanmış olup, hem de düşük zehirli sera gazı salınımları ve çöp depolama alanlarının azaltılması ile çevre dostu malzemelerin üretilmesi sağlanmıştır (Ali, EKER, & BODUR, 2021).

Günümüzde, tüm teknolojik gelişmelerin ve farklı ihtiyaçların ortaya çıkmasıyla birlikte geleneksel malzemelere ilaveten, daha üstün özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi ihtiyacı her geçen gün artmıştır. Bu amaçla bilim insanları tarafından üretilen kompozitler, iki veya daha fazla farklı malzemelerin üstün olan özelliklerinin yeni ve tek bir malzemede toplanması amacıyla bu malzemelerin makro düzeyde birleştirilmesi ile üretilen malzemelerdir (Moghadam, Omrani, Menezes, & Rohatgi, 2015; Russell & Lee, 2005). Kompozitler yüksek rijitlik/yoğunluk ve mukavemet/yoğunluk oranlarına sahip üstün özellikli malzemelerin dizaynı ve üretimi açısından modern endüstride önemli bir yere sahiptir. Sahip oldukları avantajlar sayesinde ağırlık ve mukavemetin çok önemli olduğu uzay ve havacılık gibi endüstrilerde bu malzemeler geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu malzemeler kullanıldıkları yapıların etkinliğini ve performansını önemli ölçüde artırmıştır (Taqieddin, 2005).

Kompozit malzemeler; makro yapıdaki tamamen birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Kompozit malzemelerde ana malzemeyi oluşturan kısma matris, takviye elemanı olarak görev yapan ve asıl yükü taşıyan kısma ise fiber adı verilmektedir. Bir malzemenin kompozit olabilmesi için; kompoziti oluşturan bileşenlerin farklı kimyasal yapıya sahip olmaları ve bu bileşenlerin birbiri içerisinde çözünmemeleri gerekmektedir. Matris fazı ana fazdır. Takviye aşaması, matris aşaması sayesinde bir arada tutulmaktadır. Temel görevi takviye bileşeninin etrafını sararak bir arada ve istenilen formda durmasını sağlamaktır. Matris malzeme, kompozit malzemeye yüklenen yükü fiberlere transfer etmektedir. Kompozit malzemenin yapısını oluşturan malzemelerden en az biri doğal malzeme temelli ise bu malzemelere biyokompozit malzemeler

denir. Biyokompozit malzemelerin en önemli özelliği biyobozunurluluğu, geri dönüştürülebilir olması, üstün mekanik özelliklere sahip olması ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasıdır (Peças, Carvalho, Salman, & Leite, 2018). Matris malzemesi olarak biyo bazlı polimerlerin doğal liflerle takviye edildiği biyokompozitlere “yeşil kompozit” de denilmektedir. Yeşil kompozit malzemeler, fiber ve matris malzemelerin kullanımı açısından uygunluk, rijitlik, yüksek mukavemet ve boşluklu yapılarından dolayı iyi ses yalıtım özelliğine sahip, kolayca şekil alabilen ve yeni üretim tekniklerine ihtiyaç olmaksızın, mikro veya nano seviyede çalışabilen, geri dönüştürülebilir, yenilenebilir, sürdürülebilir çevre dostu malzemelerdir (Özmen, 2015; M. Ramesh, Palanikumar, & Reddy, 2017)

Biyoplastik malzemeler, ilk olarak 2003 yılında *TOYOTA* marka bir otomobilin yedek lastik örtüsünde PLA Eco-Plastik kenaf fitiller ile takviye edilerek kullanılmıştır. Otomotiv uygulamaları doğal elyaf takviyeli plastikler için en iyi fırsata sahip alanı temsil etmektedir. Bu malzemelerin daha iyi sönümleme ve yüksek akustik izolasyon, yalıtım ve düşük yoğunluğa sahip olmaları, otomotiv sektöründe yakıt ve maliyet tasarrufu avantajı ile hafif malzemeler üretmeye olanak tanımıştır. Otomotiv sektörü açısından büyük önem arz eden bu özellikler yine otomobillerin iç dizaynında yer alan kısımlarda (koltuk sırtlığı astarı, paket raflar, koltuk altları, koltuk sırtlığı minderleri, baş destekleri, alt gövde panelleri, kapı paneli ara parçaları, kol dayanakları vb.) kullanılmaktadır. Yine benzer şekilde biyokompozitler, oyuncak sektöründe, ambalaj, müzik aletleri, cep telefonlarının üretimlerinde kullanılmaktadır (Değirmenci, 2020).

## 1. Kompozit Malzemeler tanıtımı, kullanım alanları

### 1.1. Kompozit Malzemelerin özellikleri

Malzemeler genellikle metaller, seramikler ve organik malzemeler olarak üç ana gruba ayrılırlar. Bu üç grubun birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri vardır.

*Tablo 1. Metal, seramik ve plastik malzemelerin bazı özelliklerinin karşılaştırılması(Alar)*

Malzeme Grubu	Yoğunluk	Dayanım	Tokluk	Isıl Kararlılık	Biçimlendirme	Birleştirme
METALLER	Orta Yüksek	Orta	İyi	Orta	Orta	Orta
SERAMİKLER	Düşük Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek	Kötü
PLASTİKLER	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	İyi	İyi

Kompozit malzeme terimi, bu üç ana grubun yanında aynı ya da farklı gruplardan iki veya daha fazla malzemenin makroskobik ölçüde birleşerek kullanılabilir yeni bir malzeme meydana getirmesi anlamına gelir. İyi tasarlanmış kompozit bir malzeme kendini meydana getiren malzemelerin en iyi özelliklerini göstermektedir. Gelişen malzeme özellikleri;(Alar)

Dayanım

Elastiklik

Korozyon Direnci

Aşınma

Ağırlık

Yorulma Ömrü

Sıcaklığa Bağlı Davranış

Termal İzolasyon

Termal İletkenlik

Akustik İzolasyon

Kırılma Tokluğu

Elektrik İletkenliği

Rijitlik

Estetik Görünüm ve Fiyat

## 1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler genel olarak dört farklı gruba ayrılır (Alar).

- 1.Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemeler
- 2.Çeşitli malzeme tabakalarından oluşan tabakalı kompozit malzemeler
- 3.Sürekli tane (partikül) takviyeli kompozit malzemeler
- 4.Yukardaki üç değişik tipin çeşitli kombinasyonları

## 1.3. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

### 1.3.1. Askeri Havacılık Alanındaki Uygulamaları

1. General Dynamics mF-111 savaş uçaklarının kanat-merkez uyum sistemlerinde,
- 2.Vaught A-7 bombardıman uçaklarının frenleme sistemlerinde,
3. Northrop F5'lerin gövdelerinde,

4. Grumman F-14 ve McDonnell Douglas F-15'lerde kullanılan bor-epoksi, General Dynamics'e ait YF-16'larda kullanılan karbon-epoksi esaslı kompozitler, örnek olarak verilmektedir(Alar).

### **1.3.2. Sivil Havacılık Alanındaki Uygulamaları**

1. Rutan Voyager uçaklarının tüm yapısında
2. Boeing 777 yolcu uçaklarında
3. İngiliz-Fransız Concorde ve Sovyet Tupelov uçaklarının yapısında.

### **1.3.3. Uzay Uygulamaları**

Hubble Uzay Teleskobunu stabilize etmek ve desteklemek için kullanılmıştır(Alar).

### **1.3.4. Otomotiv Alanındaki Uygulamaları**

Hafif olmaları sebebiyle otomotiv sanayiinde (yaylar, miller, fren ve debriyaj balataları) yaygın olarak kullanılmaktadırlar(Alar).

### **1.3.5. Elektronik Alanındaki Uygulamaları**

Yüksek ısı iletkenlikleri, iyi aşınma dirençleri, yüksek kimyasal direnç ve yüksek sıcaklıklara dayanımları sebebiyle lazerler, rüzgar türbinleri, güneş panelleri, kablo taşıyıcılar vb.'de kullanılmaktadır(Alar).

### **1.3.6. Ticari Uygulamaları**

Kompozitler, balık oltaları, tenis raketleri, sörf tahtaları ve kayakların üretiminde, darbe dayanımının yüksek olması sebebiyle tank ve panzerlerin gövdelerinin yapımında hafif olması nedeniyle kurşun geçirmez yeleklerin üretiminde ve yine savunma alanında silah gövdelerinin tasarımında kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarına ilave olarak insansız hava, kara ve deniz taşıtlarının dizaynında da yararlanılmaktadır (Alar; ERYILDIZ & Eker, 2015).

## **1.2.Biokompozitler**

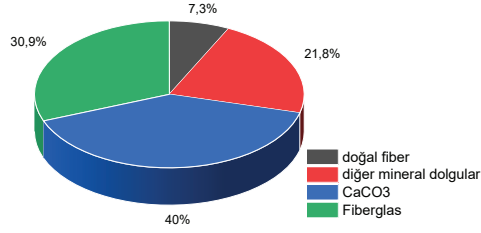
Günümüzde küresel çevre sorunlarının artışı, bilim insanlarını, biyolojik bazlı kompozit malzeme tasarımı ve üretimine yöneltmiştir. Son yıllarda pek çok araştırma, doğal lif takviyeli termoplastik kompozitlere odaklanmıştır. Doğal elyaf kompozitler, nispeten düşük maliyetle kullanılabilir yapısal özelliklere sahip, çoğunlukla fiyat odaklı ticari kompozitlerdir. Doğal elyafların cam ve karbon gibi geleneksel takviye edici elyaflara göre avantajları şunlardır: Düşük maliyet, düşük yoğunluk, yüksek tokluk, kabul edilebilir özel mukavemet özellikleri, ayırma kolaylığı, artırılmış enerji geri kazanımı, emisyonların uzaklaştırılması ve biyolojik olarak parçalanabilirliktir (Hong et al., 2008).

Termoplastik polimerleri doldurmak ve güçlendirmek için kullanılan doğal elyaflar, günümüzde en hızlı gelişen takviyelerden birini temsil etmektedir. Çevre bilincinin artması ve yasal gereklilikler, genellikle karbon, cam veya aramid elyaftan yapılmış geleneksel kompozit yapıların kullanımını gerekli kılmaktadır. Bununla birlikte, bu biyokompozitler ekonomi ve çevre arasında bir denge sağlayarak otomotiv, inşaat, mobilya ve ambalaj endüstrilerindeki uygulamalar için dikkate alınmaktadır. Son zamanlarda, otomobil üreticileri doğal elyaf kompozitlerin kullanımını önemli bir kaynak olarak görmektedir. Özellikle, iç ve kaput altı motor bileşenlerinde ağırlığı ve maliyetleri azaltmak için doğal elyafla güçlendirilmiş termoplastiklere yer verilmeye başlanmıştır. Avrupa'da Daimler Chrysler, otomotiv uygulamaları için doğal elyaf kompozitleri (Keten elyaf takviyeli kompozitler cam elyafı muadilleri kadar güçlü mukavemet özellikleri ile üretilmiş) üzerinde önemli çalışmalar yapmıştır. Bu teknoloji, günümüzde Almanya'da Daimler Benz ve İtalya'daki Fiat tarafından da kullanılmaktadır (Mohanty, Misra, & Drzal, 2001).

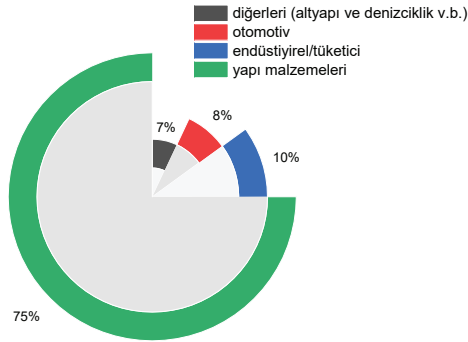
Biyokompozitler (biyolojik olarak bozunabilir), matris malzemeleri olarak biyobozunur polimerlerden ve takviye elemanları olarak biyo-berlerden oluşmaktadır. Son zamanlarda, yeni teknolojiler sayesinde biyolojik olarak parçalanabilen plastiklere olan ilgi yeniden canlanmıştır.

Plastik malzemelerin zararlı etkileri, özellikle düşük maliyetli ve parçalanabilir daha zararsız biyobozunur malzemelere doğru yönelmeyi gerektirmiştir. Örneğin, Kuzey Amerikadaki doğal kompozit talep miktarı 400 milyon libre (%7,3) olarak belirlemiştir (Şekil 1). Şu anda, doğal elyaflar için ana pazar (Şekil 2) bina uygulamaları olup, otomotiv sektörü ve diğer uygulamalar da artan bir oranda uygulama alanı bulmuştur (Mohanty et al., 2001).

Suni veya sentetik olmayan liflere doğal lifler denilmektedir. Doğal liflerin yenilenebilir ve çevre dostu olmalarının yanı sıra; sentetik liflere göre işleme yöntemleri maliyeti açısından avantajlar ve faydalar sağlamaktadır (Hong et al., 2008). Ancak, doğal liflerden yapılan ürünlerin nispeten düşük mekanik özellikler sağlaması nedeniyle bunların altyapı uygulamalarında ki kullanımını sınırlandırmıştır. Matrisin, lifin ya da her iki bileşenin birlikte kimyasal ya da fiziksel olarak değiştirilmesi şeklinde, farklı çalışmalar yapılarak; doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır (Zhang, Li, Ma, & Yu, 2013).



Şekil 1. Kuzey Amerikadaki doğal kompozit talep miktarları (Hong et al., 2008).



Şekil 2. Kuzey Amerika piyasasındaki doğal fiber kompozit talep miktarları (Hong et al., 2008).

Orman endüstrisinde hammadde talebinin artması, nüfus artışının ve doğal kaynakların tükenmesi, araştırmacıları kompozit üretimi için odun dışı biyo-tabanlı alternatiflere yönlendirmiştir (Guler, Copur, & Tascioglu, 2008; Guntekin & Karakus, 2008). Tarıma dayalı atıkların biyokompozit malzemelerde uygunluğunun araştırıldığı çalışmalarda ceviz kabuğunun (Gürü, Atar, & Yıldırım, 2008), kanola samanının (Yousefi, 2009), buğday samanının (Tabarsa, Jahanshahi, & Ashori, 2011), badem kabuğunun (Pirayesh & Khazaeian, 2012), ve küspenin polimer esaslı kompozitlerin üretimine uygun olacağı bildirilmiştir (Tabarsa, Ashori, & Gholamzadeh, 2011).

Doğal lifler hayvanlardan veya bitkilerden elde edilebilmektedir. Sisal, bambu ve muz, Hindistan'da bol miktarda bulunan doğal lifler arasındadır. Jüt, sisal, hindistan cevizi ve muz vb. gibi atık ürünler düşük fiyatı, boyutu, yüksek özgül değeri, geri dönüştürülebilirlik ve biyoyoumluluk özellikleri ile dikkat çekicidirler. Bu malzemelerle üretilen kompozitler öncelikle yapı ve inşaat endüstrilerinde kullanılmaktadır (Mohan Kumar et al., 2021; Nandhakumar, Kanna, Riyas, & Bharath, 2021).

Bitkisel liflere (jüt, kenevir, keten, sisal, ve posidonia) ilaveten ligno-selülozik partiküller olarak adlandırılan (talaş, fıstık kabuğu, badem kabuğu, pirinç kabuğu, kahve vb.) selülozik parçacıklarla da yüksek çevre dostu kompozitler elde etmek için çalışmalar yapılmaktadır. Jüt, keten ve sisalden doğal liflerin üretimi son yıllarda oldukça ilgi görmektedir. Jüt çevre dostudur ve en önemli doğal, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilen ve aşındırıcı olmayan lifler gurubunda yer almaktadır (Ashik & Sharma, 2015). Ayrıca yüksek mukavemet, ısı iletkenlik, ucuz maliyet ve düşük yoğunluk gibi özelliklere sahiptir. İyi çevre dostu olma özelliği ile Jüt-polyester kompozitler konut uygulamalarında popülerlik kazanmıştır ve otomotiv uygulamaları gibi mühendislik uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. (Kalia, Kaith, & Kaur, 2009).

Kenevir, doğal lifler arasında ekolojiyi koruma ve çevre dostu olması bakımından iyi bir alternatiftir. *Cannabis sativa*, yıllık olarak tüketilen kenevirin botanik adıdır. Asya'ya özgü ve yaygın olarak Avrupa'da yetiştirilen otsu bir bitkidir. Kenevir lifi binlerce yıldır çeşitli malzemelerin (tekstiller, kağıtlar, halatlar ve yelkenler vb. gibi) üretiminde kullanılmıştır. En çok Hindistan ve İran'da kenevir yetişirken diğer tropik ve ılıman ülkelerde de yetiştirilebilmektedir (Salentijn, Zhang, Amaducci, Yang, & Trindade, 2015).

*Posidonia oceanica*, deniz çayıruları suda yaşayan Akdenize özgü çiçekli bitkilerdir. *Posidonia oceanica* lifleri son on yılda yeni çevresel ve sürdürülebilir malzemelere yönelik talepler için çok uygun bitkilerdir. Bu lifler, farklı fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı çeşitli uygulamalar için oldukça elverişli olup, polimer biyo-kompozitlerin üretiminde değerlendirilmektedirler (Garcia-Garcia, Quiles-Carrillo, Montanes, Fombuena, & Balart, 2018; Khiari & Belgacem, 2017; Seggiani et al., 2017).

Ceviz (*Juglans regia* L.) tarımı yapılan önemli bir üründür (Potter, Gao, Baggett, McKenna, & McGranahan, 2002). Dünya çapında ceviz üretimi yaklaşık 834 bin hektardan 2.2 milyon tondur. Her yıl yaklaşık 1.5 milyon ton ceviz kabuğu atığı oluşmaktadır. Ceviz kabuğu, bir yıllık tarımsal atık, oluşturan ligno-selülozik malzeme olup, ceviz ağacı meyvesinden elde edilmektedir. Bu atıkların (kabuk, kabuk, sapları vb.), endüstriyel alanlarda yeniden değerlendirilmesi ülke ekonomileri açısından önemli



katkılar sağlamaktadır (Çöpür, Güler, Akgül, & Taşçıoğlu, 2007; Li, Cai, Winandy, & Basta, 2010). Ayrıca ceviz (*Juglans regia* L.) kabuğu ekstraktı kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , NiO,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  ve SrO NPs'ler ile nanopartiküller elde edilip epoksi ve sertleştirici ile karıştırılarak kompozit üretimi sağlanmıştır (H. N. Gülşah Öner, Volkan Acar, Soner Gök, 2021; V. A. Gülşah Öner, Hayrunisa Nadaroğlu, Soner Gök, 2021).

Ayrıca, fındık kabuğu (*Corylus avellana*) önemli bir endüstriyel atık olup, bu malzemeden dolgu amaçlı ve ahşap görünümlü kompozitler üretilmektedir (Balart, Fombuena, Fenollar, Boronat, & Sánchez-Nacher, 2016). Fındık kabuğu sert bir malzemedir ve yapısında % 25-30 selüloz ve hemiselüloz, ayrıca %30-40 lignin içermektedir. Selülozik özelliğinden dolayı plastik matrisli kompozitlerde dolgu malzemesi olarak da kullanılmaktadır (Boran, 2016; Çöpür et al., 2007; Idi & Mohamad, 2011).

Kompozit üretimlerinde özellikle son beş yılda yumurta kabuklarının değerlendirilmesi üzerine, atıklara katma değer kazandırılarak, yeni ürünlere özellikle yapısal ve teknolojik malzemelere dönüştürülmesi hususunda çalışmalar yapılmaktadır. Böylece, atıkların geri dönüşümü sağlanmış olup, daha üstün özellikli kompozitlerin üretimi de mümkün olabilmektedir. Yumurta kabuğunun kullanılmasıyla, kompozit malzemelerdeki dolgu maddesinin hacim artışı oranları ile eğilme dayanımı, elastisite modülü ve sertlik değerlerinde de artış görülmüştür. Ayrıca, bu tür ürünlerin değerlendirilmesi ile birlikte çevre bilincinin geliştirilmesi ve sağlıklı malzeme üretimi mümkün olmuştur. Atık yumurta kabuğundan hazırlanan katkı maddeleri ile güçlendirilmiş polyester esaslı kompozit malzeme üretimi, ülke ekonomisine de katkıda bulunulması hedeflenmiştir (BORAZAN, Duygu, & Süleyman, 2019).

Yapılan bir çalışmada, tavuk yumurtası kabuğu (ES) ve matris malzemesi olarak polipropilen (PP) kullanılarak farklı boyut ve oranlarda kompozitler üretilmiş ve mekanik özellikler açısından incelendiğinde ise ES/PP kompozitlerinin mekanik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir (Toro, Quijada, Yazdani-Pedram, & Arias, 2007).

Poliamit/yumurta kabuğu kompozitlerinin üretimi ile ilgili yapılan bir çalışmada, araştırmacılar elde ettikleri kompozit malzemeyi mekanik testler açısından incelemişler ve yumurta kabuğu tozunun miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerin artış gösterdiğini rapor etmişlerdir (C. Ramesh, Krishna, & Bezawada, 2014). Başka bir çalışmada ise, yumurta kabuğu parçacıklarının yüzde miktarının artışı ile polyester kompozitlerin sertlik değerlerinde artış olduğu ve polyester matrisli yapıda daha iyi bir ara yüzey bağı ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Hassan, Aigbodion, & Patrick, 2012).

## SONUÇ

Atıkların nasıl değerlendirileceği, gelişmiş ve gelişmekte olan ölkele-  
rin en büyük sorunlarından biridir. Özellikle birçok plastik, pil veya diğer  
atıkların insan ve doğaya verdiği zararlar düşünöldüğünde, bu atıkların  
verdiği zararları minimum seviyeye indirmek öncelikli amaç olmuştur. Söz  
konusu olan bu atıkları yeniden kullanılabilir hale dönüştürmek, bundan  
kar sağlayarak yeni kullanım alanlarını ortaya koyarak milli ekonomiye  
katkı sağlamak, çevreci bir ürün üretmek, ekolojik dengenin tahribini ön-  
lemek, ölkemizin ve dünyanın da sorunlarına ışık tutmak açısından büyük  
önem arz etmektedir. Tamamen doğal atıklardan üretilecek üstün özellik-  
lere sahip biyokompozit malzemelerin termal, fiziksel ve mekanik özel-  
likleri incelenerek günümüzde ve gelecekteki teknolojik uygulamalara ve  
kullanımlara katkı sağlayacağı düşünölmektedir.

## Kaynaklar

- Alar, G. 'Tabakalı Kompozit Plaklarda sonlu elemanlar yöntemiyle elastik-plastik gerilme analizi. (Yüksek Lisans). Atatürk Üniversitesi, 2002.
- Ali, A., EKER, A. A., & BODUR, M. S. (2021). Yeşil Kompozit Malzemelerin Performans Özellikleri ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(4), 3035-3054.
- Ashik, K., & Sharma, R. S. (2015). A review on mechanical properties of natural fiber reinforced hybrid polymer composites. *Journal of minerals and materials characterization and engineering*, 3(05), 420.
- Balart, J., Fombuena, V., Fenollar, O., Boronat, T., & Sánchez-Nacher, L. (2016). Processing and characterization of high environmental efficiency composites based on PLA and hazelnut shell flour (HSF) with biobased plasticizers derived from epoxidized linseed oil (ELO). *Composites Part B: Engineering*, 86, 168-177.
- Boran, S. (2016). Mechanical, morphological, and thermal properties of nutshell and microcrystalline cellulose filled high-density polyethylene composites. *BioResources*, 11(1), 1741-1752.
- BORAZAN, A. A., Duygu, K., & Süleyman, S. (2019). Atık Yumurta Kabuğu Katkısının Polyester Kompozit Malzeme Üretimine Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6, 135-145.
- Çöpür, Y., Güler, C., Akgül, M., & Taşçıoğlu, C. (2007). Some chemical properties of hazelnut husk and its suitability for particleboard production. *Building and Environment*, 42(7), 2568-2572.
- Değirmenci, N. (2020). *Kağıt Hamuru ve Sisal Elyaf Takviyeli PLA Biyokompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans). Bursa Teknik Üniversitesi,
- ERYILDIZ, E., & Eker, A. A. (2015). Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları. *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(4), 8-12.
- Garcia-Garcia, D., Quiles-Carrillo, L., Montanes, N., Fombuena, V., & Balart, R. (2018). Manufacturing and characterization of composite fibreboards with *Posidonia oceanica* wastes with an environmentally-friendly binder from epoxy resin. *Materials*, 11(1), 35.
- Guler, C., Copur, Y., & Tascioglu, C. (2008). The manufacture of particleboards using mixture of peanut hull (*Arachis hypoqaea* L.) and European Black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood chips. *Bioresource Technology*, 99(8), 2893-2897.
- Guntekin, E., & Karakus, B. (2008). Feasibility of using eggplant (*Solanum melongena*) stalks in the production of experimental particleboard. *Industrial Crops and Products*, 27(3), 354-358.
- Gülşah Öner, H. N., Volkan Acar, Soner Gök. (2021). *Preparation of Ce2O3 NPs*

*and SrO NPs nanoparticle doped epoxy nanocomposites synthesized by green synthesis method and investigation of their bending strength.* Paper presented at the World Congress on Applied Nanotechnology (W-CAN 2021), Erzurum / TÜRKİYE.

- Gülşah Öner, V. A., Hayrunisa Nadaroğlu, Soner Gök. (2021). *Preparation of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs and NiO NPs nanoparticle doped epoxy nanocomposites synthesized by green synthesis method and investigation of their bending strength.* Paper presented at the World Congress on Applied Nanotechnology (W-CAN 2021), Erzurum / TÜRKİYE.
- Gürü, M., Atar, M., & Yıldırım, R. (2008). Production of polymer matrix composite particleboard from walnut shell and improvement of its requirements. *Materials & Design*, 29(1), 284-287.
- Hassan, S., Aigbodion, V., & Patrick, S. (2012). Development of polyester/eggshell particulate composites. *Tribology in industry*, 34(4), 217.
- Hong, C., Hwang, I., Kim, N., Park, D., Hwang, B., & Nah, C. (2008). Mechanical properties of silanized jute–polypropylene composites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14(1), 71-76.
- Idi, A., & Mohamad, S. (2011). Bioethanol from second generation feedstock (lignocellulose biomass). *Interdisciplinary journal of contemporary research in business*, 3(8), 919-935.
- Kalia, S., Kaith, B., & Kaur, I. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—a review. *Polymer Engineering & Science*, 49(7), 1253-1272.
- Khiari, R., & Belgacem, M. (2017). Potential for using multiscale Posidonia oceanica waste: Current status and prospects in material science. In *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials* (pp. 447-471): Elsevier.
- Li, X., Cai, Z., Winandy, J. E., & Basta, A. H. (2010). Selected properties of particleboard panels manufactured from rice straws of different geometries. *Bioresource Technology*, 101(12), 4662-4666.
- Moghadam, A. D., Omrani, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2015). Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—a review. *Composites Part B: Engineering*, 77, 402-420.
- Mohan Kumar, A., Rajasekar, R., Manoj Kumar, P., Parameshwaran, R., Karthick, A., & Muhibullah, M. (2021). Comparative analysis of drilling behaviour of synthetic and natural fiber-based composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021.
- Mohanty, A., Misra, M., & Drzal, L. T. (2001). Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview. *Composite interfaces*, 8(5), 313-343.

- Nandhakumar, S., Kanna, K. M., Riyas, A. M., & Bharath, M. N. (2021). Experimental investigations on natural fiber reinforced composites. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2905-2908.
- Özmen, U. (2015). *Doğal fiber takviyeli kompozitlerin üretimi, mekanik ve termal özelliklerinin tespiti*. (Yüksek Lisans). Celal Bayar Üniversitesi,
- Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., & Leite, M. (2018). Natural fibre composites and their applications: a review. *Journal of composites science*, 2(4), 66.
- Pirayesh, H., & Khazaeian, A. (2012). Using almond (*Prunus amygdalus L.*) shell as a bio-waste resource in wood based composite. *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1475-1479.
- Potter, D., Gao, F., Baggett, S., McKenna, J. R., & McGranahan, G. H. (2002). Defining the sources of Paradox: DNA sequence markers for North American walnut (*Juglans L.*) species and hybrids. *Scientia Horticulturae*, 94(1-2), 157-170.
- Ramesh, C., Krishna, M. V., & Bezawada, S. (2014). Evaluation of Mechanical Properties of Polyamide-Egg Shell Powder Composite Materials. *The International Journal of Science and Technoledge*, 2(11), 90.
- Ramesh, M., Palanikumar, K., & Reddy, K. H. (2017). Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 558-584.
- Russell, A. M., & Lee, K. L. (2005). *Structure-property relations in nonferrous metals* (Vol. 302): Wiley Online Library.
- Salentijn, E. M., Zhang, Q., Amaducci, S., Yang, M., & Trindade, L. M. (2015). New developments in fiber hemp (*Cannabis sativa L.*) breeding. *Industrial Crops and Products*, 68, 32-41.
- Seggiani, M., Cinelli, P., Mallegni, N., Balestri, E., Puccini, M., Vitolo, S., . . . Lazzeri, A. (2017). New bio-composites based on polyhydroxyalkanoates and *posidonia oceanica* fibres for applications in a marine environment. *Materials*, 10(4), 326.
- Tabarsa, T., Ashori, A., & Gholamzadeh, M. (2011). Evaluation of surface roughness and mechanical properties of particleboard panels made from bagasse. *Composites Part B: Engineering*, 42(5), 1330-1335.
- Tabarsa, T., Jahanshahi, S., & Ashori, A. (2011). Mechanical and physical properties of wheat straw boards bonded with a tannin modified phenol-formaldehyde adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 42(2), 176-180.
- Taqieddin, Z. N. (2005). Damage mechanics of composite materials using Fabric Tensors.
- Toro, P., Quijada, R., Yazdani-Pedram, M., & Arias, J. L. (2007). Eggshell, a new bio-filler for polypropylene composites. *Materials letters*, 61(22), 4347-4350.
- Yousefi, H. (2009). Canola straw as a bio-waste resource for medium density fi-

berboard (MDF) manufacture. *Waste management*, 29(10), 2644-2648.

Zhang, Y., Li, Y., Ma, H., & Yu, T. (2013). Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 88, 172-177.

## **BÖLÜM 10**

### **SIVI TONERLİ ELEKTROFOTOGRAFİK DİJİTAL BASKI SİSTEMLERİNDE BLANKET SICAKLIĞI DEĞİŞİMİNİN BASKI KALİTESİNE ETKİSİ<sup>1</sup>**

*Serra ARSLAN<sup>2</sup>, Türkün ŞAHİNBAŞKAN<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Bu çalışma, yazılmakta olan ‘Sıvı Tonerli Elektrofotografik Dijital Baskı Sistemlerinde Makine Parametrelerinin Baskı Sonuçlarına Etkisi’ isimli yüksek lisans tezinden çıkmış bir yayındır.

<sup>2</sup> Marmara Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Basım Teknolojileri Bölümü Yüksek Lisans Öğrencisi, Göztepe-34722, İstanbul, Türkiye ORCID: 0000-0001-8032-028X

<sup>3</sup> Marmara Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Basım Teknolojileri Bölümü, Öğretim Üyesi, Göztepe-34722, İstanbul, Türkiye ORCID: 0000-0002-1834-2717

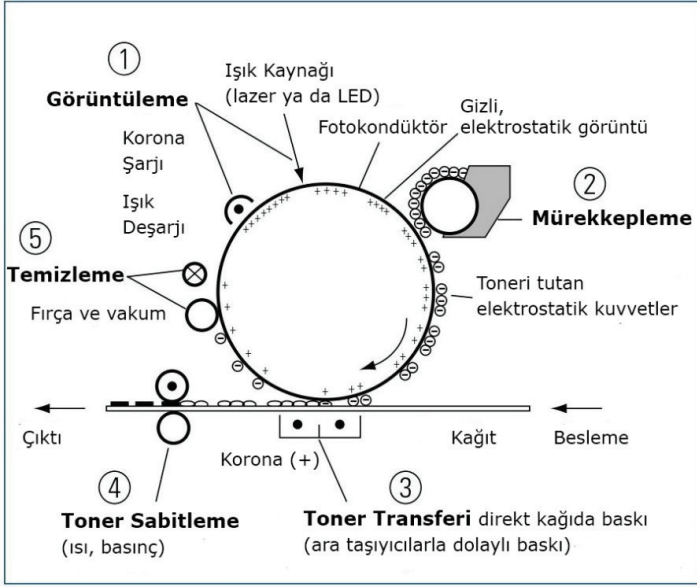
## 1.GİRİŞ

Baskı sektöründe gelişen teknolojiler ile birlikte dijital baskı sistemlerinin kendilerine oldukça geniş ve vazgeçilemez bir yer edinmiş olması yadsınamaz bir gerçektir. Her geçen gün ilerleyen teknoloji ışığında, daha kaliteli ve tutarlı baskı sonuçları elde etmek, zaman ve maliyet tasarrufunda bulunmak, eski sistemlere göre çok daha ulaşılabilir ve kolaydır. Son dönemlerde kuru tonerli elektrofotografik dijital baskı sistemlerinin yanı sıra, sıvı tonerli baskı sistemleri de oldukça revaçta ve sık kullanılan sistemler haline gelmişlerdir.

1990'lı yıllardan itibaren isminden sıkça bahsettiren dijital baskı sistemleri, geleneksel baskının oluşturduğu pek çok problemi kolaylıkla çözebilen ya da ortadan kaldıran teknolojik bir gelişme olarak karşımıza çıkmaktadır(Erdem,2017). Baskı yapabilmek için kalıp, klişe ya da filme ihtiyaç duymayan bu teknoloji, basılacak işi bilgisayardan direkt baskı cihazına ileterek, tek bir görüntünün baskısında kullanılabilen ve tekrar kullanılmayan görüntü kalıbını aradan çıkarmaktadır. Geleneksel baskıda kullanılan görüntü kalıbı ya da klişe, tek bir görselin baskısı için kullanılır, değişiklik durumunda kullanılamaz hale gelir ve bu da maliyetleri artırır. Dijital baskı teknolojilerinde ise herhangi bir görüntü kalıbına ihtiyaç yoktur ve her yeni görselde görüntü yeniden işlenerek makineye iletilir. Ayrıca kalıp hazırlık aşaması da ortadan kalktığından zaman, işgücü ve maliyet tasarrufu da sağlar. Küçük hacimli işler ya da prova baskılar daha avantajlı şekilde basılır, kişiye özel ya da değişken baskılar daha kolay elde edilir. Yüksek baskı kalitesine sahip dijital baskı sistemlerinde tekrar baskı almak ya da basılan işler için arşiv oluşturmak çok daha kolaydır.

Günümüzde dijital baskı sistemleri geleneksel baskı sistemlerine karşı gelişmesini sürdürmekte ve her geçen gün yaşanan teknolojik ilerlemeler ışığında ayrı bir baskı sistemi olarak kendine yer edinmektedir. Özellikle tabaka beslemeli baskı tarafında ofset baskı sistemine rakip olan ve onun yerini alacak bir sistem olarak geliştirilen dijital baskı sistemleri, ambalaj ve etiket baskısı da dahil bütün baskı sistemlerinin karşısında kuvvetli bir rakip olarak görülmektedir. Hızlı üretim ile zamandan tasarruf sağlayan dijital baskı, fire düşüklüğü ve işçiliğe olan bağımlılığın azalması ile de yüksek maliyet avantajına sahiptir. Ancak bu sistem, tüm baskı altı malzemelerine sağlıklı ve kaliteli baskı yapamamaktadır. Bazı malzemelere baskı yapıldığında tonerin yüzeyde yeterince tutunamaması, baskı ton stabilitesinin sağlanamaması, baskı sonrası lak, selofan gibi uygulamalarda yüzeye tutunma problemleri gibi sıkıntılar yaşanmaktadır. Bunun gibi bir takım problemler, dijital baskı sistemlerinin dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır(Şahinbaşkan,2019).





Şekil 1: Elektrofotografik Dijital Baskı Sistemi (Kipphan,2001)

Matbaacılığın sahip olduğu geniş uygulama alanı ve ürün yelpaze-si sebebiyle tek bir dijital baskı sistemi yeterli olmamaktadır. Çoğunlukla inkjet ve elektrofotografik dijital baskı sistemleri sektörde aktif olarak kullanılmaktadır. Elektrofotografik dijital baskı sistemleri kuru toner kullanan sistemler ve sıvı toner kullanan sistemler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kuru tonerli elektrofotografik dijital baskı sistemleri özellikle tabaka ofsete rakip olarak geliştirilmiş, katalog, broşür gibi kağıt türevi baskı altı malzemelerine baskı yapmak amacıyla kullanılan sistemlerdir. Ancak bu sistemde, parlak yüzeyli kağıtlar ile plastik malzemelere baskı yaparken, yukarıda sayılan problemlerle sıkça karşılaşılır. Sıvı tonerli sistemlerde ise toner daha homojen dağılmakta, bu sayede görüntü ve renk-ton geçişlerinin daha doğru algılanabilmesi sağlanmaktadır. Bununla birlikte baskı altı malzeme seçimi, yüzey tutunma problemleri ile baskı sonrası işlemlere uygunluk hala üzerinde çalışılması gereken konular olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sıvı tonerli baskı sistemleri ile kullanılan ilk cihaz 1993 yılında Indigo firması tarafından, Eprint 1000 adıyla piyasaya sürülmüştür. Elektroink kullanan bu cihazın yüksek baskı kalitesi sebebiyle, Indigo firması bu teknolojiyi dijital ofset olarak adlandırmıştır. Daha sonra Hewlett-Packard firmasının Indigo'yu devir almasıyla, bu cihazlar HP Indigo press adı ile sektörde var olmaya devam etmiştir(Goldman,2004). Elektroink adı verilen sıvı toner sistemini kullanan bu cihazlar, yüksek baskı kalitesi ve çok çeşitli baskı altı malzemelerine baskı yapabilmesi sayesinde günümüzde sıklıkla kullanılır hale gelmiştir. Sıvı toner, pigmentin uçucu bir sıvı içeri-

sindeki süspansiyondur. Toner pigmentlerinin büyüklüğü, makinenin modeline göre 2 µm ile 7,5 µm arasında değişmektedir(Eldred,2012).

Sıvı tonerli elektrofotografik dijital baskı teknolojilerinde sistem, kuru toner kullanan elektrofotografik baskı sistemi ile hemen hemen aynıdır. İki sistem arasındaki en önemli fark kullanılan tonerin özellikleridir. Kuru tonerler, polimer boncuklar içinde bulunan pigmentlerden oluşur ve bu boncuklar sistemin kaynaştırma (fırınlama) aşamasında erir, sıcaklık ve basınç yardımı ile görüntü olan yerlerde baskı altı malzemesi üzerinde sabitle-nir. Sıvı tonerli sistemlerde ise, blanketten baskı altı malzemesine görüntü transferi yapılırken, blanketin sıcaklığı ile sıvı tonerin içinde bulunduğu taşıyıcı yağ buharlaşır, görüntü plastik bir film şeklini alır ve baskı altı malzemesine bu şekilde transfer edilir.

Sıvı tonerli dijital baskı sistemi teknolojisinde, öncelikle fotoiletken drum üzerine elektrik yüklemesi yapılır ve lazer pozlandırma ile şarj edilmiş drum üzerinde gizli görüntü oluşturulur. Daha sonra makine tarafından önceden hazırlanmış olan toner, mürekkep besleme üniteleri aracılığıyla drum üzerine iletilir. Drum üzerinde görüntünün olmadığı alanlar toner ile aynı elektrik yüküne sahip olduğundan birbirlerini iter, gizli görüntünün olduğu alanlar ise karşıt kutupla yüklü olduğundan toneri çeker ve toner bu alanlarda tutunur. Drum üzerindeki bu tonerle kaplanmış olan görüntü, yine karşıt yük ile yüklenmiş olan blankete transfer edilir. Blanket sıcaklığı 120°C ile 180°C arasında değişebilir. Bu sıcaklık sayesinde sıvı halindeki toner erir, taşıyıcı görevi gören özel yağ buharlaşarak geri dönüşüme gider ve görüntü neredeyse kuru ve yapışkan bir plastik film şeklini alır. Bu film baskı altı malzemesine transfer edilir ve bu sırada sıcaklık da toner erime sıcaklığının altına düşmüş olduğu için görüntü katılaşır ve blanketten tamamen ayrılarak baskı altı malzemesi üzerine aktarılır. Son olarak temizleme aşamasında drum, üzerinde kalan artık tonerden ve elektrik yükünden arındırılır. Görüntü transferi sırasındaki temas sebebiyle daha da ısınan blanket soğutulur ve makine yeni bir baskı için hazır hale gelmiş olur.

Bu çalışmada sıvı tonerli elektrofotografik dijital baskı makinesinde blanket sıcaklıkları değiştirilerek baskı altı malzemesine test baskısı yapılmış ve bu baskılardan ölçümler alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre blanket parametreleri saptanmıştır. Elektrofotografik dijital baskı sistemlerinde blanket, görüntünün baskı altı malzemesine aktarımı için kullanılır ve blanket sıcaklığının değişimi baskı kalitesini etkiler. Yapılan çalışmada blanket sıcaklıklarının tram nokta yapısı, tram nokta yoğunluğu ve densite değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kuru tonerli elektrofotografik dijital sistemler üzerine benzer bazı çalışmalar bulunsa da sıvı tonerli sistemler için çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma sayesinde bu açığın kapatılması, hammadde, zaman, işçilik kayıplarının engellenmesi, üretim süreçlerinin geliştirilmesi, maliyetlerin düşürülmesi hedeflenmektedir.

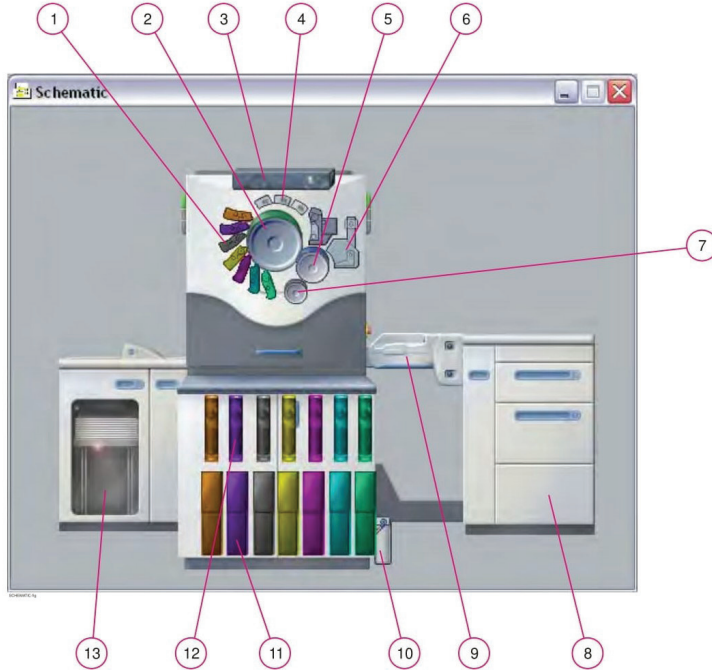
## 2.MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 Materyal

Bu çalışmada HP Indigo press 3500 dijital baskı cihazı kullanılmıştır. Baskı makinesi bileşenlerini oluşturan beş temel unsur; baskı motoru, mürekkep kabini, yardımcı kabin, besleyici ve istifleyicidir. Bu cihaz, elektro-ink adı verilen sıvı mürekkep teknolojisi kullanarak baskı yapar[6].

Saatte 4000 tabaka tek yüz tek renk ve 1000 tabaka çift yüz 4 renk baskı yapabilen cihazın desteklediği renk sayısı yedidir. CMYK+3 spot renk ya da HP Indigochrome process (6 renk)+1 spot renk şeklinde iki çeşit kullanım opsiyonu vardır. Kaplamalı kağıtlarda 80-350 g/m<sup>2</sup>, kaplamasız kağıtlarda ise 65-300 g/m<sup>2</sup>'yi destekler. Kullanılabilen minimum ebat A4, maksimum ebat ise 320x475 cm'dir.

Makinede kullanılan ana aksamlar, BID (Binary Ink Developer – Mürekkep Besleme Merdaneleri) üniteleri, PIP (Printing Imaging Plate – Dijital Görüntü Kalıbı) tamburu, yazdırma kafası, scorotronlar, ITM tamburu (Intermediate Transfer Member Roller-blanket), baskı kazanı, temizlik istasyonu, besleyici, istifleyici, mürekkep tankları ve mürekkep kutuları, hizalama köprüsü ve görüntüleme yağı filtresidir.



**Şekil 2:** HP Indigo press 3500 Dijital Baskı Makinesi İç Aksamı (HP Userguide,2010) 1. BID Üniteleri 2. PIP drum 3. Yazıcı Kafası 4. Scorotronlar 5. ITM Drum 6. Temizleme Ünitesi 7. Baskı Kazanı 8. Besleyici 9. Hizalama Köprüsü 10. Görüntüleme Yağı Filtresi 11. Mürekkep Tankları 12. Mürekkep Kutuları 13. İstifleyici

Baskı makinesinin kullandığı mürekkep olan HP elektroink, üç bileşenden oluşur: Görüntüleme yağı, görüntüleme ajanı ve mürekkep konsantresi. Görüntüleme yağı, imaging oil denilen, mürekkep konsantresinin çözünmesini sağlayan, petrol hidrokarbon içerikli özel bir sıvıdır. Görüntüleme ajanı ise iletkenliği sağlar. Tutarlı baskı kalitesi sağlamak için baskı makinesi, yoğunluk, iletkenlik, sıcaklık ve mürekkep seviyesini baz alır. Baskıda kullanılan mürekkepler, temizlik için kullanılan ve iletkenlik ile elektriksel parametreleri değiştirebilen izopropil alkole (IPA) karşı oldukça hassastır.

Imaging oil ya da görüntüleme yağı, pasta şeklinde olan mürekkebin homojen olarak dağılmasını sağlayarak sıvı hale getirir. Ayrıca imaging agent yani görüntüleme ajanı kullanılarak iletken hale getirilir. Yağ sistemi, mürekkep tanklarına ve temizleme istasyonuna temiz görüntüleme yağı tedarik eder. Yağ filtresi tertibatında yağın saflığını kontrol eden bir sensör bulunur. Sistem, yağ kirlendiğinde ya da seviyesi azaldığında bilgi verir. Ayrıca filtrelerin kirlendiği bilgisi de sistem tarafından verilir. Makinede 2 adet filtre bulunur(HP Userguide,2010).

Yapılan çalışmada resim ve video çekebilen, 500x büyütme özelliğine sahip, 1600x1200 çözünürlükte Digital Microscope marka elektronik büyüteç kullanılmıştır.

Baskı altı malzemesi olarak SRA3 (32x45 cm) ebadında, yüksek okunabilirlik sağlayan, çift taraflı woodfree (odunsuz) yumuşak kaplamaya sahip, FSC (Forest Stewardship Council) sertifikalı, 170 g parlak kuşe UPM marka, Digi Finesse Gloss isimli dijital baskı kağıdı kullanılmıştır. Bu dijital kağıt, kuru tonerli siyah beyaz ve renkli lazer baskı ile Indigo (sıvı toner) sistemlerinde kullanılabilir. Kitap, broşür, kartvizit, katalog, dergi, poster gibi ürünler için yüksek kalitede baskılar yapılabilir(Upm paper,2022).

Nokta kazancı ve densite değerleri için Xrite Exact spektrofotometre kullanılmış olup, nokta kazancı %50 tram yoğunluğunda, densite (mürekkep yoğunluğu) %100 (zemin) tram yoğunluğunda ölçülmüştür.

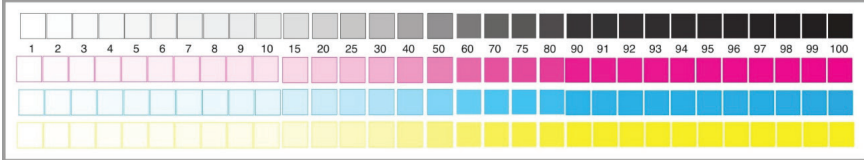
## 2.2 Yöntem

Baskı sistemlerinde renk tonlarının elde edilebilmesi için, çok tonlu görsellerin tek tona indirilmesine yardımcı olan noktalar tram olarak adlandırılır(Yanık,2004). Tramlama işlemi, görüntüdeki ton farklılıklarının nokta büyüklük farkına dönüştürülmesidir. Görüntülerdeki koyu tonlar büyük noktalar, açık tonlar küçük noktalar oluşturur. Bir inç veya 1 cm uzunluğundaki çizgi üzerinde bulunan tram nokta sayısı ise tram sıklığı, noktaların birim alan içerisinde kapladıkları alan da tram ton değeri ya da tram yoğunluğu olarak anılır ve % ile ifade edilir. Hiç tram noktasının ol-

madığı alanlar %0 iken, %0-25'lik bölgeler açık ton, %25-75'lik bölgeler orta ton, %75-100'lik bölgeler koyu ton ve %100'lük bölgeler ise zemin olarak adlandırılır.

Tram noktalarında nokta kazancı ise, basılan tram noktasının kalıptan baskı altı malzemesine geçerken baskı basıncı, baskı altı malzemesinin yüzey özellikleri, mürekkep emilimi, aynı zamanda optik sapmalar gibi sebeplerden dolayı büyümesi ve daha şişkin hale gelmesidir. Nokta kazancı baskı sürecinde öngörülebilir, ölçülebilir ve kontrol edilebilir bir sonuçtur(Lawler,1997). Bu sonuç bir baskı hatası değil, fiziksel bir olaydır(Gençoğlu, Şimşeker ve Özdemir,2009).

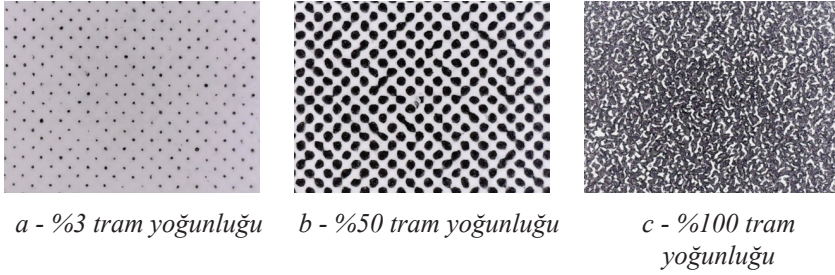
Bu çalışmada 170 g parlak kuşe kağıt üzerine farklı blanket sıcaklıkları ile baskılar yapılmış olup sonuçlar incelenmiştir. Kullanılan baskı cihazının temel kalibrasyonunda blanket sıcaklığı 145°C'dir. Yapılan çalışmada sıcaklıklar 120°C, 130°C, 140°C, 150°C, 160°C ve 170°C olarak ayarlanmıştır. %3, %50 ve %100 tram yoğunlukları ile nokta kazancı ve densite (mürekkep yoğunluğu) değerleri inceleme konusudur. Yapılan çalışmada kullanılan test skalasında Şekil 1'de görülen tram yoğunlukları bölümü elektronik büyüteçle fotoğraflanarak baskı kaliteleri ile ilgili bulgular elde edilmiş ve yorumlanmıştır.



Şekil 3: ECI 2002 CMYK Test Skalası

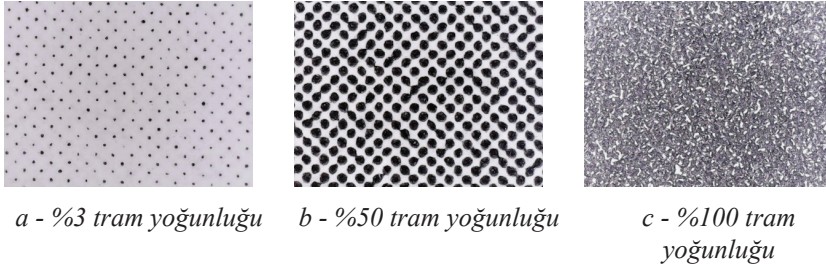
### 3.BULGULAR

120°C blanket sıcaklığında %3 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde tram noktaları oldukça belirgin olmasına rağmen nokta yapılarında bozulmalar gözlemlenmiştir. %50 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde tram noktası yapılarının ve dağılımının homojen şekilde olduğu fakat netliğin az olduğu görülmüş ve tram nokta yoğunluğu %39 olarak ölçülmüştür. %100 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde yetersiz zemin yoğunluğu ve 1,37 ile en düşük densite elde edilmiştir.

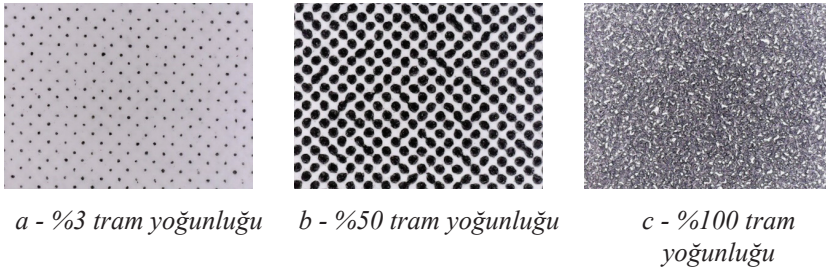


**Şekil 4:** 170 g PK 120°C ile %3 (a) , %50 (b) ve %100 (zemin) (c) tram yoğunluğu

130°C ve 140°C blanket sıcaklıklarında %3 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde nokta yapılarının daha net, keskin ve düzgün dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. %50 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde tram noktaları yine net ve keskin, ayrıca daha doygundur. Tram nokta yoğunluğu 130°C'de %39,4, 140°C'de %39,9 olarak ölçülmüştür. %100 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde zemin yoğunluğu artmış, densite 130°C'de 1,78, 140°C'de 1,87 olarak ölçülmüştür.



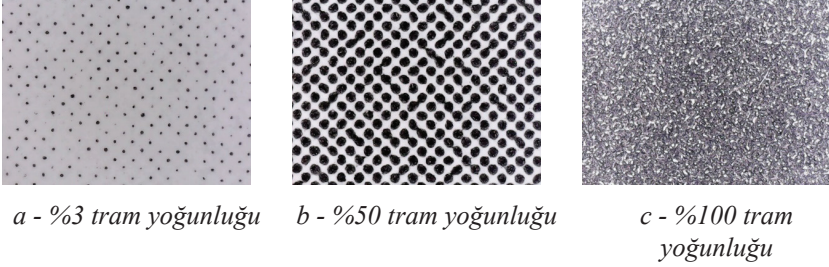
**Şekil 5:** 170 g PK 130°C ile %3 (a) , %50 (b) ve %100 (zemin) (c) tram yoğunluğu



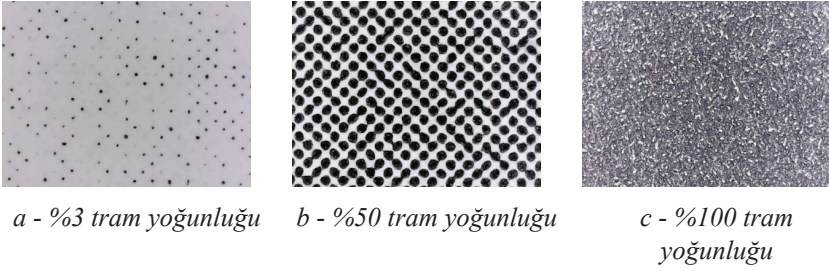
**Şekil 6:** 170 g PK 140°C ile %3 (a) , %50 (b) ve %100 (zemin) (c) tram yoğunluğu

150°C ve 160°C blanket sıcaklıklarında %3 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde nokta yapılarının net ve düzgün olmadığı, homojen dağılım göstermediği görülmektedir. %50 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde 150°C blanket sıcaklığında tram noktalarının daha net,

keskin ve doygun olduğu, 160°C'de ise şişme ve yapıların daireselden eliptiğe doğru dönmeye başladığı gözlemlenmiştir. Tram nokta yoğunluğu 150°C'de %40,4, 160°C'de %41,2 olarak ölçülmüştür. %100 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde zemin yoğunluğunun oldukça doygun ve örtücü olduğu gözlemlenmiştir. Densite 150°C'de 1,93, 160°C'de 2,02'dir.

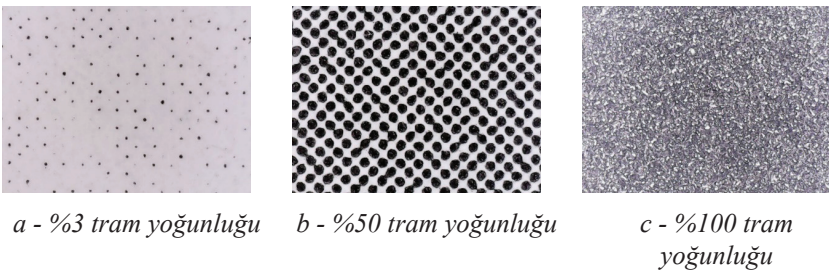


**Şekil 7:** 170 g PK 150°C ile %3 (a) , %50 (b) ve %100 (zemin) (c) tram yoğunluğu



**Şekil 8:** 170 g PK 160°C ile %3 (a) , %50 (b) ve %100 (zemin) (c) tram yoğunluğu

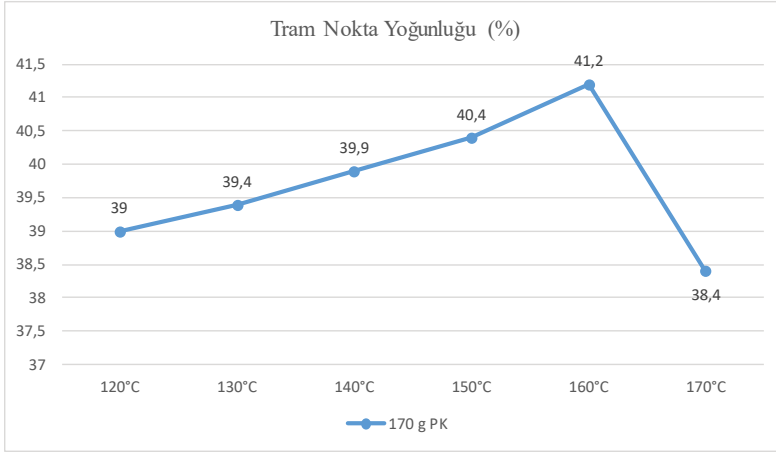
170°C blanket sıcaklığında %3 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde nokta dağılımı homojenliğinin bozulmuş olduğu ve nokta büyüklüklerinin dengesiz olduğu gözlemlenmiştir. %50 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde tram noktalarında nokta şişmesinin azaldığı ve nokta yapılarının dengesini yitirdiği gözlemlenmiştir. Tram nokta yoğunluğu %38,4 olarak ölçülmüştür. %100 tram yoğunluğu ile alınan baskı örneklerinde zemin yoğunluğunun oldukça doygun ve örtücü olduğu gözlemlenmiştir. Densite 2,08 olarak ölçülmüştür.



**Şekil 9:** 170 g PK 170°C ile %3 (a) , %50 (b) ve %100 (zemin) (c) tram yoğunluğu

## 4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

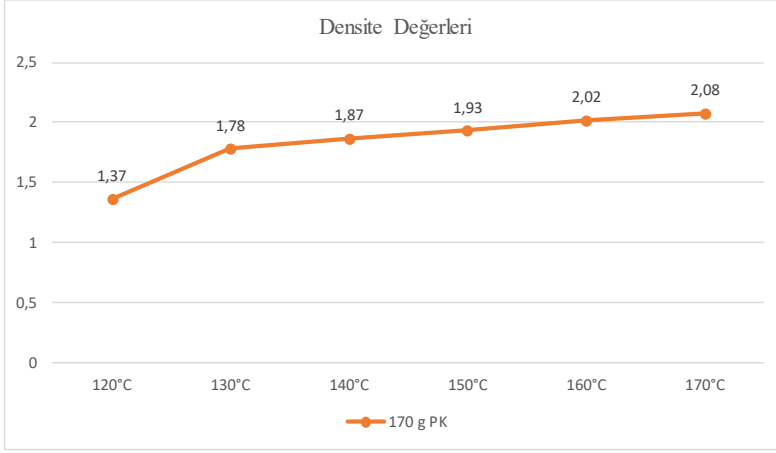
**Tablo 1:** Farklı Blanket Sıcaklıklarına Göre Tram Nokta Yoğunluğu



%3 tram yoğunluğu örneklerinde sıcaklık arttıkça nokta şeklinin daireselden eliptiğe doğru değiştiği görülmüştür. %50 tram yoğunluğu örneklerinde 160°C’de nokta şeklinin daireselden eliptiğe doğru değiştiği, 170°C’de nokta yapılarının zayıfladığı ve düzensiz hale geldiği görülmüştür. 160°C’de %41,2 ile en yüksek tram nokta yoğunluğu elde edilmiştir. Bu dereceye kadar lineer şekilde artan tram nokta yoğunluğu oranı, 170°C’de %38,4 ile en düşük seviyededir. Sıcaklık arttıkça artan tram nokta yoğunluğu değeri, en yüksek sıcaklıkta en düşük seviyeye düşmüştür.

%100 tram yoğunluğu yani zemin baskı örneklerinde 120°C’de 1,37 ile en düşük densite okunmuş, yetersiz zemin yoğunluğu olduğu görülmüştür. 150°C’den itibaren zemin densiteleri oldukça doygun ve örtücüdür. %100 tram yoğunluğu yani zemin örneklerinde sıcaklığın artması ile birlikte zemin densitelerinde lineer bir artış olduğu görülmüştür. En yüksek densite değeri 2,08 ile 170°C’dedir.





**Tablo 2:** Farklı Blanket Sıcaklıklarına Göre Densite Değerleri

Blanket ısısının tram nokta kazancını çok fazla etkilemediği görülmele birlikte tram nokta yapısını ciddi bir şekilde etkilediği belirlenmiştir. Bu durum, özellikle açık tonların sağlıklı bir şekilde basılıp basılmamasına sebep olmaktadır.

Bütün bu bulgular ışığında, hassas ton geçişlerinin olduğu baskılarda doğru tram noktalarının, dolayısıyla da sağlıklı ton ve renk geçişlerinin elde edilebilmesi için dijital baskı makinasının blanket ısısının 130°C-140°C derece arasına ayarlanması tavsiye edilmektedir.

Eğer basılacak görüntü çok tonlu bir görüntüden, yani tram noktasının çok olduğu bir baskıdan ziyade zemin ağırlıklı bir görüntü ise yüksek bir zemin densitesi ve renk doygunluğu için 150°C-160°C derecelerde bir blanket ısı seçilmesi yerinde olacaktır. Bu yüksek ısı aynı zamanda sıvı tonerin baskı altı malzemesine daha iyi yerleşmesini sağlayacağından selofan, folyo gibi baskı sonrası işlemlere de daha uygun olacaktır.

## KAYNAKÇA

- Eldred, N.R. (2012). *Matbaacının mürekkep hakkında bilmesi gerekenler*. İstanbul: Basım Sanayi Eğitim Vakfı.
- Erdem, B. (2017). *Matbaacılık ve basım süreci*. İstanbul: Cinius Yayınları.
- Gençoğlu, E.N., Şimşeker, O., Özdemir L. (2009). *Flekso baskı sistemi*, İstanbul: DuPont Türkiye.
- Goldman, G. (2004). *The world of printers*. Germany: Oce Printing Systems GmbH.
- Kiphann, H. (2001). *Handbook of print media*. Germany: Heidelberger Druckmaschinen AG.
- Lawler, B.P. (1997). *Know thy enemy: Understanding dot gain and its effects, 1-2*. <https://www.imaging-resource.com/TIPS/LAWLER/DOTGAIN.PDF>, Şubat 2022.
- Şahinbaşkan, T. (2019). *Dijital baskı teknolojisi ders notları*. İstanbul: Marmara Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu Basım Teknolojileri Bölümü.
- Yanık, H. (2004). *Masaüstü yayıncılık*. İstanbul: Dönence Basım ve Yayın Hizmetleri.
- (2010). *HP Indigo press 3500 User Guide*. USA: Hewlett-Packard Development Company.
- <https://www.upmpaper.com/products/paper-catalogue/categories/digital-printing-papers/upm-digi-finesse-gloss>, Şubat 2022.



## **BÖLÜM 11**

### **YENİLİKÇİ NÜKLEER TEKNOLOJİ OLAN KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER VE KULLANIM ALANLARI**

*Gizem BAKIR <sup>1</sup>*

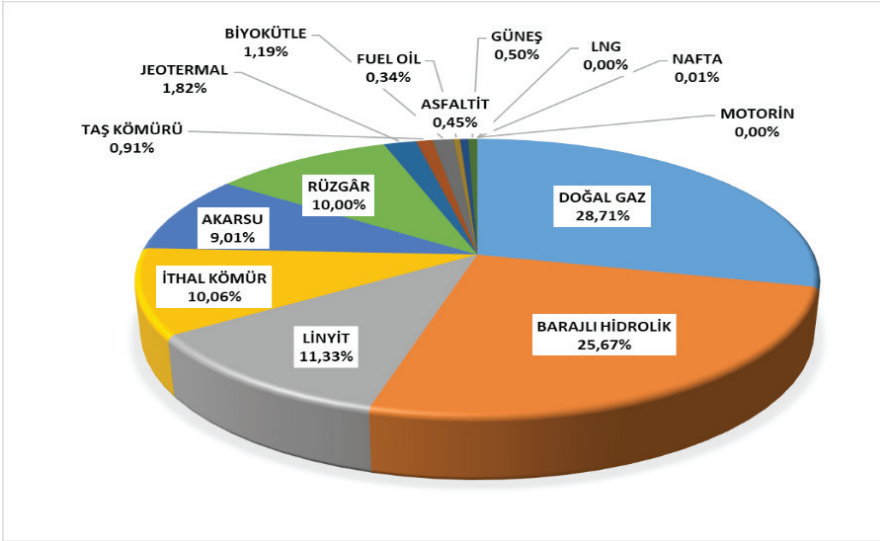
---

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye, gbakir@cumhuriyet.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-2406-6376>

## 1-GİRİŞ

Daha temiz, müreffeh bir ekonomiye geçiş, hem acil bir öncelik hem de önümüzdeki yıllar boyunca sürekli bir çaba olmalıdır. Türkiye, bu uzun vadeli hedefe ulaşmak için yenilik yapmaya devam etmeli, iklim değişikliğiyle mücadele eden ve ekonomiyi dönüştüren mevcut önlemleri güçlendirmeli ve geliştirmelidir. Türkiye ve 120’den fazla ülke 2050 yılına kadar karbon emisyonlarını azaltmaya taahhüt eden Paris anlaşmasına katılmıştır. Bu kapsamda enerji politikaları geliştirmeleri gerekmektedir.

Türkiye’de Elektrik Piyasası Sektör Raporu 2021 Ocak raporuna göre elektrik üretimimizin, %28,71’i doğal gazdan, %25,67’si barajlı hidrolikten, %11,33’ü linyitten, %10,06’sı ithal kömür, %9,01’i akarsulardan, %10’u rüzgar enerjisinden ve %0,45’i diğer kaynaklardan elde edilmiştir. 2021 Yılı Ocak Ayı Sonu İtibariyle Lisanslı Elektrik Kurulu Gücünün Kaynak Bazında Dağılımı Şekil 1’de görülmektedir (Elektrik Piyasası Sektör Raporu, 2021).



Şekil 1. 2021 yılı ocak ayı sonu itibariyle lisanslı elektrik kurulu gücünün kaynak bazında dağılımı (%) (Elektrik Piyasası Sektör Raporu, 2021)

Sera gazı emisyonlarını azaltmak için, özellikle doğalgaz, kömür ve linyitin kullanımını yerini alabilecek temiz enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır ve bu enerji kaynaklarından biri de nükleer enerjidir. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli de karbondan arındırma hedeflerini karşılamak için nükleer enerjinin kullanımının artırılması gerektiğini doğrulamıştır (IPCC, 2018). Geleneksel geniş nükleer reaktörler hem kurulumu daha yavaş hem de oldukça maliyetli olduğu için enerji ihtiyacını daha düşük maliyetlerle karşılayabilecek küçük modüler reaktörler (KMR) son zamanlarda oldukça popüler olmaya başlamıştır. Bu derlemede yenilikçi küçük modüler reaktörler ve bu reaktörlerin ısı uygulama alanları anlatılacaktır.

## 2- KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER

Uluslararası Atom Enerji Ajansına tanımına göre KMR'ler 10 ile 300 MWe arasında bir elektrik güç çıkışına sahip, tesisin ihtiyacına bağlı olarak fabrikada üretilebilen ve taşınabilen (monte edilebilen) gelişmiş nükleer reaktörler olarak tanımlanmaktadır (Subki, 2016 ve International Atomic Energy Agency. 2004). Böylece inşaat sürelerinde öngörülebilirlik ve tasarruf sağlanır. Geleneksel geniş reaktörlere nazaran oldukça küçük olan bu reaktörlerde enerji üretimi, geleneksel geniş reaktördeki gibi fisyon reaksiyonu ile gerçekleşir. Ayrıca düşük karbon emisyonuna ve pasif güvenlik sistemine sahiptirler. Bu reaktörler, gelişmiş reaktör teknolojilerini ve gelişmiş modüler reaktörleri içerir. KMR'ler, maliyet ve güvenliği iyileştirmeye çalışılan gelişmekte olan bir teknolojidir.

Birçok KMR'nin, fosil yakıtların kullanıldığı yerlerde fosil yakıtların yerine geçmesi düşünülmektedir. Büyük nükleer santrallerin uygulanabilir olmadığı elektrik veya enerji piyasalarında da (su arındırma ve hidrojen üretimi gibi endüstriyel proses ısı uygulamaları dahil olmak üzere) kullanılması öngörülmektedir (International Atomic Energy Agency. 2004 ve Subki, 2015).

Küçük modüler reaktörün açıklımı şu şekildedir; *Küçük* - fiziksel olarak geleneksel bir nükleer güç reaktörünün boyutunun bir kısmıdır, *Modüler* – sistemlerin ve bileşenlerin fabrikada üretilip monte edilmesini ve bir ünite olarak kurulum için bir yere taşınmasını mümkün kılar ve *Reaktörler* - enerji üretmek için nükleer fisyonun yararlanılması (Nuclear Energy Agency, 2011)

### 2.1. Küçük Modüler Reaktör Dizaynları

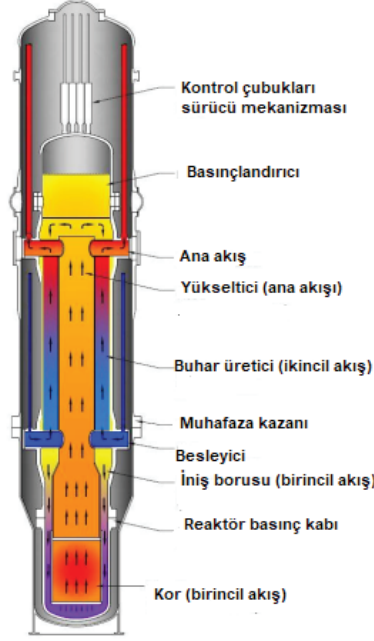
KMR'lerin ölçüleri, dizaynları ve suğutucuları değişmektedir. Farklı KMR'lere örnek olarak;

- Basınçlı su reaktörleri
- Eriyik-tuz reaktörleri
- Yüksek sıcaklıklı gaz reaktörleri
- Hızlı nötron spektrumlu reaktörler
- Mikro reaktörler

#### 2.1.1. Entegre-Basınçlı Su Reaktörleri

IRIS (Uluslararası Reaktör Yenilikçi ve Güvenli) kavramsal dizayn aşamasındadır ve 335 MWe'dir. Bu dizayn %5 zenginlikte 17 X 17 yakıt çubuklu basınçlı su reaktörüdür. Sistem tasarımı hafif su reaktörü dizaynına dayanmasına rağmen, bu konsept entegre reaktör tankına sahiptir (ve

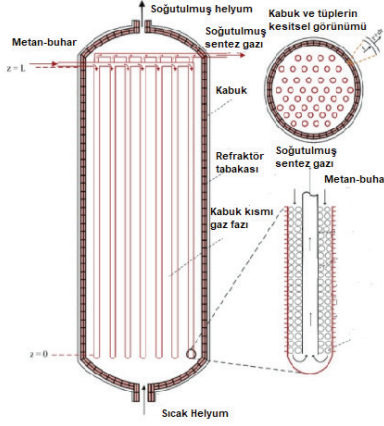
bunun anlamı buhar üreticiler reaktör tankı içinde olacaktır) ve böylelikle temel çevrim boru hattı elimine olacaktır (IAEA, 2022). Bazı küçük dizaynları, basınçlı su reaktörlerindeki konveksiyon ile aktif sirkülasyona karşı doğal bir sirkülasyon sağlar. Buhar jeneratörü, reaktör tankı ile aynı tasarım basıncı ve sıcaklıkta çalıştırılarak, buhar hattı çatlama ve buhar jeneratörü arıza kazalarını en aza indirilir (NRC, 2010). Şekil 2’de entegre basınçlı su reaktörü olan Nuscale sistem görülmektedir.



Şekil 2. Nuscale güç modülünün şeması (Moe, 2019)

### 2.1.2. Entegre-Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutuculu KMR'ler

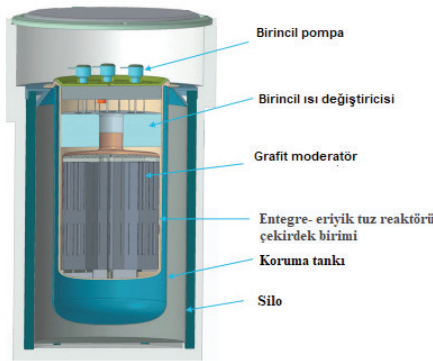
Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutuculu KMR'ler, nötronik olarak şeffaf, kimyasal olarak etkisiz, düşük ısı kapasiteli ve tek fazlı olan helyum soğutucu kullanan sistemlerdir. Seramik kaplı (TRISO) partikül yakıtı kullanılır ve bu yakıt yüksek sıcaklık kapasitesi, yüksek radyonüklid tutma gibi özelliklere sahiptir. Moderatör olarak ise yüksek sıcaklık kararlılığı, büyük ısı kapasitesi, uzun termal tepki süreleri özelliği olan grafit malzeme kullanılır. Doğal ve pasif güvenlik özelliklerine sahip basit reaktör tasarımı vardır. Yalıtılmış reaktör tankı kullanarak reaktörden pasif ısı çıkarımı sağlanır. Reaktörde helyum basınç sınırındaki ihlal nedeniyle sistem basıncı düşürülse bile, sistemden yine de ısı uzaklaştırılır (Ingersoll, D. T., 2014). Şekil 3'te : Entegre Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutuculu KMR şeması görülmektedir.



Şekil 3. Entegre KMR-HTGR şeması (Hoseinzade, L., ve Adams, T.A., 2017)

### 2.1.3. Entegre- Eriyik tuz reaktörü

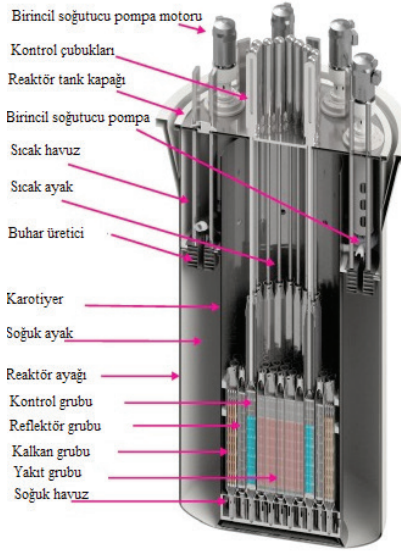
Yüzde 44'ün üzerinde termal verimlilikle çalışan bir Entegre- Eriyik tuz reaktörü, termal spektrumlu, grafit kontrollü, erimiş florür-tuz reaktör sistemi ile 195 megavat elektrik üretir. Yakıt olarak, düşük zenginlikteki uranyumu (yüzde 5'ten az  $^{235}\text{U}$ ) yani günümüzün standart nükleer yakıtını kullanır. Şekil 4'te entegre eriyik tuz reaktörü görülmektedir. Entegre- Eriyik tuz reaktörü tasarımı, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'ndaki test reaktörleri tarafından araştırılmış ve kanıtlanmış Erimiş Tuz Reaktörü operasyonunun birçok yönünü içermektedir. Tasarımda, değiştirilebilir bir çekirdek birimi kullanır. Bu sistem; pompaları, pompa motorlarını, kapama çubuklarını, ısı eşanjörlerini ve grafit moderatörünü içerir (Terrestrial Energy, 2022).



Şekil 4. Entegre Eriyik tuz reaktörü (LeBlanc, D., ve Rodenburg, C., 2017)

### 2.1.4. Entegre- Hızlı nötron spektrumlu reaktörler

Nesil IV reaktör sistemleri üç tip hızlı reaktör içerirler ve sert nötron spektrumu ile çalışır. Hızlı reaktörler için nötron moderatörü gerekli olmayıp, moderatör malzemelerin ışınlama kararlılığı ile ilgili endişeleri ortadan kaldırır. Hızlı reaktörlerin en önemli özelliği, kullanılmış yakıt olan transuranyumları dönüştürme yeteneğinin olmasıdır ve böylelikle daha fazla fisil yakıt elde edilebilir. Fakat, yapısal malzemelere yüksek enerjili nötronlardan gelen radyasyon nedeniyle, daha fazla radyasyon hasarı endişesi oluşturur (Buksha, Yu.K., ve diğerleri 1997). Şekil 5.'te SEALER reaktörü görülmektedir.

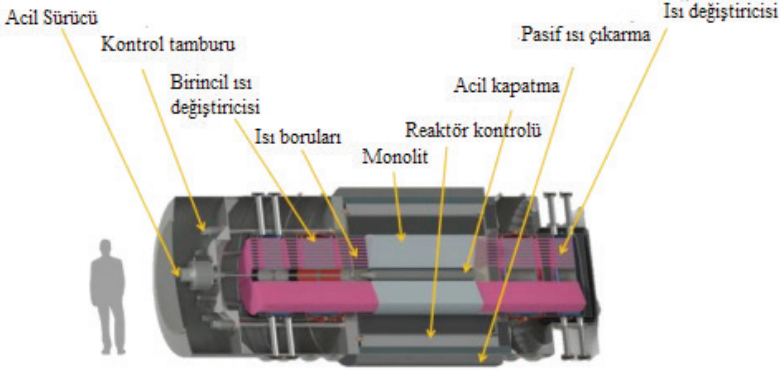


Şekil 5. SEALER reaktörü (Wallenius, J., ve diğerleri., 2018)

### 2.1.5. Mikro reaktörler:

Bu tip reaktörler çok küçük reaktörlerdir. Mikro reaktör tasarımlar 1-20 MW termal enerji üretebilecek kapasitede tasarlanmaktadır. 10 yıla kadar yakıt tazelemeden çalışabilirler. Tasarımların çoğu, zenginleştirilmiş yakıt kullanımını gerektirir. %20'ye kadar zenginleştirilmiş U-235 (yüksek ayarlı- düşük zenginleştirilmiş uranyum veya HALEU) yakıt olarak kullanılır (GAO, 2022). Soğutma sistemi olarak ısı borusu kullanılan sistemlerdir. Şekil 6.'te eVinci reaktörü görülmektedir.

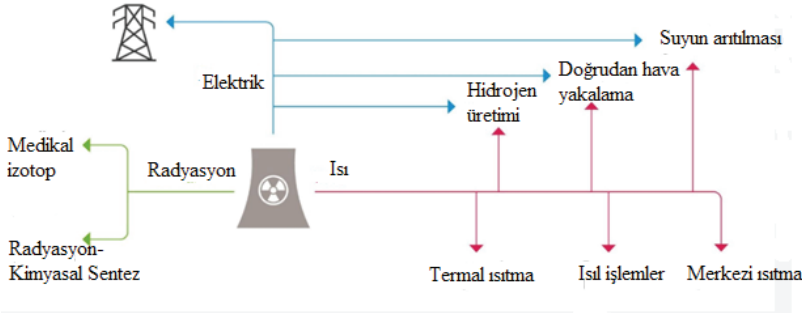




Şekil 6. eVinci reaktörü (Westinghouse,2022)

### 3.KMR'LERİN ISIL UYGULAMALARI:

KMR'ler ısı ve elektrik üretmek için kullanılabilir. Özellikle hidrojen üretimi, deniz suyunun tuzdan arındırılması, sanayi için proses ısısı gibi alanlarda kullanılabilir. KMR'lerin ısıl uygulamalarının şeması şekil 7'de ve hedeflenen uygulamaları ise tablo 1'de görülmektedir.



Şekil 7. KMR'lerin ısıl uygulamalarının şeması (Royal Society, 2022)

Tablo 1. KMR'lerin hedeflenen uygulamaları (International Atomic Energy Agency,2014)

Uygulama	KMR dizayn sayısı
Lokal elektrik	12
Arıtılma	15
Merkezi ısıtma	10
Endüstriyel ısıl işlem	6
Buhar üretme	5
Petrollü kum uygulamaları (petrol çıkarma)	1
Denizdeki petrol çıkarma	2
Deniz işletmesinde	2

KMR'lerin ısı uygulaması genellikle iki şekildedir. Şebekeden elektrik üretimi ve şebeke dışı elektrik üretimidir.

### 3.1. Şebekeden elektrik üretimi

Özellikle yakın gelecekte kömürün aşamalı olarak kaldırılması planlanmaktadır. Gelecekte, ömürlerini tamamlamış kömür yakıtlı enerji santralleri benzer büyüklükteki emisyonlu baz yük santralleriyle değiştirmek istendiği için KMR'lerin bu uygulamaya uyması muhtemeldir.

### 3.2. Şebeke dışı KMR uygulamaları

Uzak topluluklarda şebekeden bağımsız güç, bölgesel ısıtma ve tuzdan arındırma gibi uygulamalardır. Günümüzde, bu uygulamaların çoğu için çeşitli sınırlamaları (örneğin maliyet, emisyonlar) olan dizel reaktörler kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ve piller, konut gücü için gerekli enerjiyi bir dereceye kadar sağlayabilir, ancak ekonomik kalkınmayı başlatmak için güvenilir toplu enerji sunmaları olası değildir. Çok küçük KMR'ler (mikro reaktörler) bu ihtiyaçları karşılayabilir.

#### 3.2.1. Suyun arındırılması

Yakın gelecekte dünyanın birçok bölgesinde yerel talep için doğal taze su temini yetersiz olacaktır. Yerel doğal su kaynağı talepleri için bir çözümde, deniz kıyısındaki bu bölgelerde deniz suyunu tuzdan arındırmaktır. Şebeke dışı bazı KMR'lerden suyun arındırılması için kullanılabilir.

#### 3.2.2. Endüstriyel ısı işlemler

Birçok farklı endüstriyel proseste, istenilen ürünleri üretmek için ısı kullanılır. Isı aktarımı sırasında meydana gelen önemli kayıplar nedeniyle, ısı üreticisinin talebe yakın olması tavsiye edilir, aksi takdirde kayıpları telafi etmek için bir iyileştirme tesisi gerekir. Bu, çoğu endüstriyel tesis için gerekli olan proses ısıyı bitişik enerji santrallerinden elde etmesine neden olmuştur. Bunların çoğu kojenerasyon tesisleridir. Yani aynı zamanda işletme tesisi ve satış için de elektrik üretirler. KMR'ler tarafından üretilen ısı için potansiyel talep olarak hedeflenen süreçler arasında petrol kumu çıkarma, hidrojen üretimi, açık deniz petrol üretimi, çelik üretimi, kimyasal üretim yer almaktadır (International Atomic Energy Agency, 2014 ve Konefal, J., 2008).

KMR'nin sıcaklığına göre, KMR uygulamaları 3 sıcaklık aralığına bölünmüştür: 250–500 °C, 500–700 °C ve 700–950 °C. En fazla sayıda uygulama en düşük sıcaklık aralığında olup, yerinde bitüm ekstraksiyonu ve çeşitli kimyasal prosesleri (örneğin damıtma, hidrokraking ve polimerizasyon) içerir. Orta aralıkta sıcaklıklar daha az sayıda uygulamaya sahip olup, petrol rafine etme ve kimyasal üretim proseslerini (örn. koklaştırma, katalitik parçalama, katalitik reforming ve bitüm iyileştirme) içerir. En

yüksek sıcaklık aralığı, en az sayıda uygulama için gereklidir. Bu yüksek sıcaklık prosesleri, buharla parçalama yoluyla kimyasal üretimi, hidrojen üretim proseslerini (örneğin, buhar metan reformasyonu ve yüksek sıcaklıkta buhar elektrolizi) ve metal üretim proseslerini içerir. Belirli bir KMR tasarımının çıkış sıcaklığı belirli bir işlem için yeterince yüksek değilse, işlem sıcaklık gereksinimini yerine getirmek için yardımcı bir güç kaynağının kullanılması gerekir.

### 3.2.3. Merkezi Isıtma

Isıtma, soğutma, sıcak su ve elektrik gibi uygulamaların biri veya daha fazlası için birden fazla binaya termal güç sağlar. Isıl işlemlerde olduğu gibi, merkezi ısıtmada da, santralin talebe yakın bir yerde bulunmasını gerektirir. Şebekeden bağımsız topluluklarda, merkezi ısıtma için atık ısı kullanılabilir. Merkezi ısıtma sistemleri, dünyanın birçok ülkesinde on yıllardır mevcuttur.

## 4. SONUÇLAR:

Fosil yakıtların yerine, KMR teknolojileri geçmesiyle sera gazı emisyonları azalacaktır. Geleneksel geniş reaktörlere göre daha küçük alanlara inşa edilebilir ve daha düşük maliyetli olmaları oldukça avantajlıdır. KMR'lerin şebeke içi ve şebekeden bağımsız kullanımı da geleneksel geniş reaktörlerin kullanılamayacağı yerlerde kullanım avantajı sunmaktadır. Böylelikle üretilen enerji direk şebekede kullanılabileceği gibi suyun arıtılması, hidrojen üretimi, maden çıkarılması ve petrol çıkarılması gibi birçok uygulamada kullanılabilir. Bütün bu avantajlar düşünüldüğünde, fosil yakıtların yerine KMR'lerin kullanımı, karbon emisyonu sorununa çözüm getirebilir.

## 5. KAYNAKÇA

- Elektrik Piyasası Sektör Raporu- Ocak 2021, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Ice-rik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar> adresinden alındı.
- IPCC (2018), Special Report: Global Warming of 1.5°C, October 2018, IPCC, Geneva, [www.ipcc.ch/sr15](http://www.ipcc.ch/sr15).
- Subki, M.H., 2016. Advances in Development and Deployment of Small Modular Reactor Design and Technology; Presentation at ANNR-IAEA-USNRC Workshop on SMRs Safety and Licensing: Vienna, Austria.
- International Atomic Energy Agency. 2004. Innovative Small and Medium Sized Reactors: Design features, Safety Approaches and R&D Trends; TECDOC-1451; IAEA: Vienna, Austria.
- Subki, M.H. 2015. Update on International SMR Development and Deployment Activities. Presented at the IAEA Technical Meeting on Roadmap for SMR Deployment, Vienna, Austria.
- Nuclear Energy Agency. 2011. Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors; Organisation of Economic Cooperation and Development: Paris, France.
- IAEA, 2022, 20.02.2022 tarihinde <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> adresinden alındı.
- NRC, 2010. Potential Policy. Licensing, and key technical issues for small modular nuclear reactor designs.
- Moe.,L.,W, 2019, Modular HTGR Safety Design Approach, Idaho National Laboratory Idaho Falls, Idaho 83415.
- Ingersoll, D. T., 2014. NuScale Energy Supply for Oil Recovery and Refining Applications, Proceedings of ICAPP 2014, Charlotte, USA. (Paper 14337).
- Hoseinzade, L., Adams, T.A., 2017, Modeling and simulation of an integrated steam reforming and nuclear heat system, International Journal of Hydrogen Energy (42),39 s .
- Terrestrial Energy,2022, 22.02.2022 tarihinde <https://www.terrestrialenergy.com/technology/molten-salt-reactor/> adresinden alındı.
- LeBlanc, D., Rodenburg, C., 2017, Integral molten salt reactor, Molten Salt Reactors and Thorium Energy, Chapter 18, Pages 541-556.
- Buksha, Yu.K., Bagdassarov, Yu.E., Kiryushin, A.I., Kuzavkov, N.G., Kamanin, Yu.L., Oshkanov, N.N., Vylomov, V.V., 1997. Operation experience of the BN-600 fast reactor. Nucl. Eng. Design 173, 67–79.
- Wallenius, J., Qvist,S., Mickus, I.,Bortot, S., Szakalos, P., Ejenstam, J., 2018. Design of SEALER, a very small lead-cooled reactor for commercial power production in off-grid applications, Vol (338), 23-33 p.

GAO, 2022, 27.02.2022 tarihinde <https://www.gao.gov/assets/gao-20-380sp.pdf> adresinden alındı.

Westinghouse,2022,27.022022,tarihinde,<https://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/new%20plants/evincitm/GTO0001%20eVinci%20fls-sheet.pdf> adresinden alındı.

Royal Society, 2022, 28.02.2022 tarihinde <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/nuclear-cogeneration/> adresinden alındı.

International Atomic Energy Agency,2014, Advanced in Small Modular Reactor Technology Developments, International Atomic Energy Agency,Vien-na,Austria.

Konefal, J., 2008, Survey of HTGR Process Energy Applications, NGNP Project—Battelle Energy Alliance, Alexandria, VA, USA.





## **BÖLÜM 12**

### **KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLERİN UYGULAMAYA GEÇİRİLMESİ VE BU REAKTÖRLERİN UYGULANMAYA GEÇİRİLMESİNDE KARŞILAŞILAN SORUNLAR**

*Gizem BAKIR <sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Sivas cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye, gbakir@cumhuriyet.edu.tr , <https://orcid.org/0000-0002-2406-6376>

## 1-GİRİŞ

Paris Anlaşması hedefi olan ülkelerde sera gazı emisyonunu azaltmak için nükleer enerji, genel enerji karışımına önemli ve vazgeçilmez bir katkı getirecektir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosuna göre, bu tür hedeflere ulaşmak için yeni nükleer kapasite artırımı ve mevcut nükleer santraller için iddialı ömür uzatma programlarına ihtiyaç duyulacaktır. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli dekarbonizasyon hedeflerini karşılamak için nükleer gücün artırılması gerektiğini doğrulamıştır (IPCC, 2018).

Gelişmiş reaktörler arasında, küçük modüler reaktörlerin (KMR'ler), tasarım özellikleri nedeniyle (küçük üretim kapasitesi, modüler yapı teknolojisi, güvenli ve düşük radyasyona maruz kalma riski, vb.) geleneksel büyük ölçekli reaktörler tarafından karşılanmayan çeşitli talepleri karşılaması beklenmektedir (World Nuclear Association, 2021). Bu avantajlarından dolayı ABD, İngiltere, Kanada vb. önde gelen bazı ülkelerde KMR geliştirme projeleri yürütülmektedir. Aynı zamanda, nükleer enerjiyi kullanmayan bazı yeni ülkeler, KMR'lerin uygulamaya geçirilmesini düşünmeye başlamışlardır.

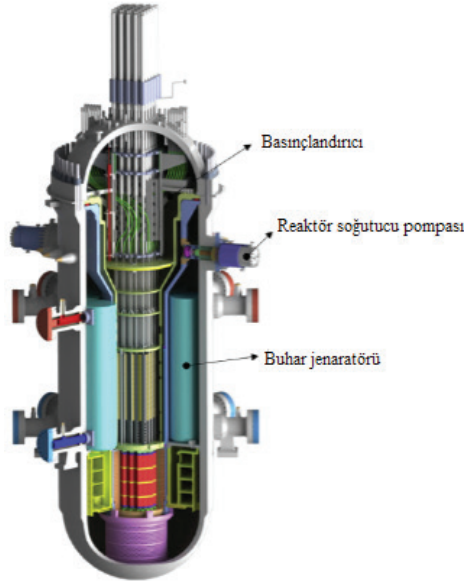
Nükleer santrallerin kurulmasının önünde bazı engeller olmasına rağmen, tüm ülkeler enerji ve çevre politikası taleplerini karşılamak için çeşitli seçenekler aramaktadır ve KMR'ler önemli bir seçenek haline gelebilir. Bu derlemede KMR teknolojisinin dünyadaki gelişmeleri, uygulamaya geçirilmesindeki sorunlar ve bu teknolojinin uygulanabilirliği için yol haritası gibi konular ele alınacaktır.

## 2- KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLERE GENEL BAKIŞ

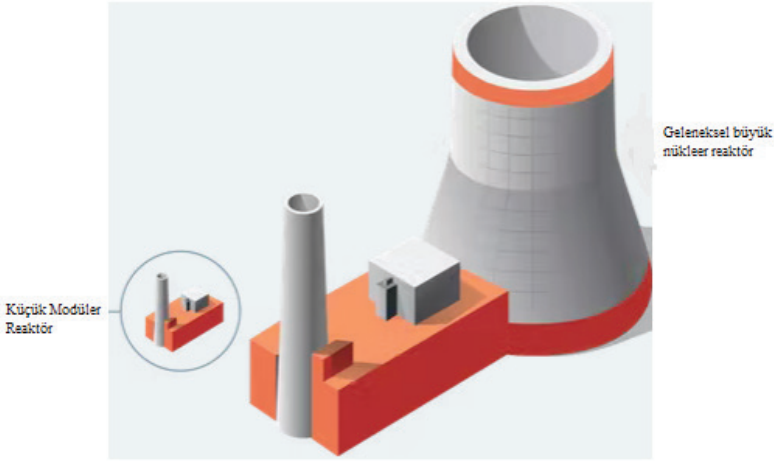
Küçük boyutlu nükleer reaktörler bugün geniş çapta devrim niteliğinde bir nükleer enerji teknolojisi olarak kabul edilmelerine rağmen, küresel nükleer endüstride yeni bir gelişme değildir. Aslında, 1950'lerin sonlarında ve 1960'larda geliştirilen hafif su reaktörü teknolojisine dayalı olarak geliştirilmiştir. Mevcut küçük reaktörleri önemli kılan şey, boyutlarının yansıra tasarımlarındaki güvenlik özellikleridir. KMR'lerin genel şeması Şekil 1'de ve KMR'nin geleneksel reaktöre kıyaslandığındaki boyutu Şekil 2'de verilmiştir.

KMR'ler bugün 10 megawatt elektrik (MWe) ile 300 MWe arasında bir güç çıkışına sahip nükleer reaktörler olarak tanımlanmaktadır. Seri ekonomilerini en üst düzeye çıkarmak için daha yüksek modülerleştirme, standardizasyon ve fabrika tabanlı yapıyı tasarlayarak entegre ederler. Farklı modüller yapı yerlerine taşınabilir ve monte edilebilirler. Böylece inşaat sürelerinde öngörülebilirlik ve tasarruf sağlanabilmektedir.





Şekil 1. KMR genel şeması (Ahn, K., ve diğerleri., 2020)



Şekil 2. KMR'lerin geleneksel reaktöre kıyaslandığındaki boyutu (INL, 2022)

## 2.1. Reaktör tipleri ve dünyada gelişmekte olan projeler

KMR tasarımları çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir (NEA, 2011). Geliştirilmekte olan KMR tasarımlarında çeşitli soğutma sıvıları ve yakıt formları kullanılır. Ayrıca farklı teknoloji hazırlık seviyelerine (THS) ve li-

sanslama hazırlık seviyelerine (LHS) sahiptirler (NEA, 2018). Çoğu KMR kavramı beş geniş kategoride gruplandırılabilir. Bunlar:

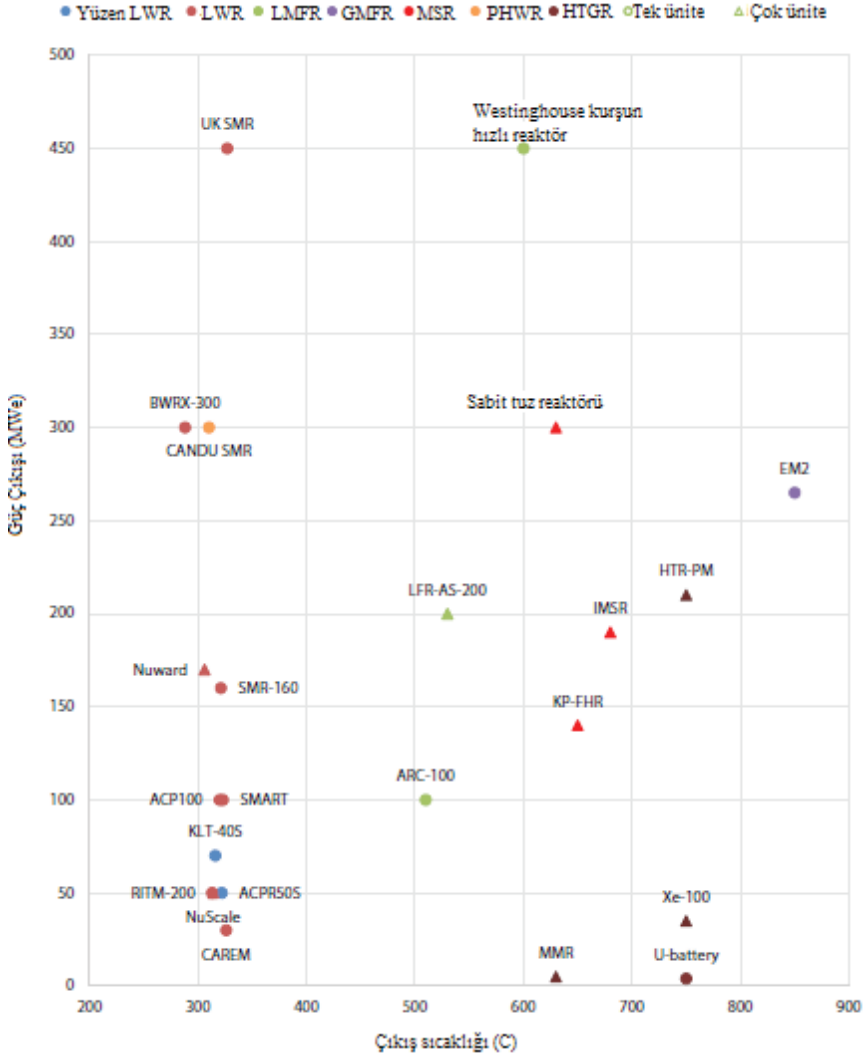
- Tek üniteli hafif su reaktörü (LWR)-KMR'ler
- Çok modüllü LWR-KMR'ler
- Mobil/taşınabilir KMR'ler
- IV. Nesil (Gen IV) KMR'ler
- Mikro modüler reaktörler

Her bir tasarım kendi teknolojik ve lisanslama zorluklarını ve ayrıca potansiyel faydalarını beraberinde getirirken, özellikle düzenleyicilerin bu tür teknolojilerin kullanımını onaylamak için, KMR'leri gelecekteki analizlerinde bu beş kategoriye değerlendirmeleri daha pratik olacaktır.

Genel olarak, LWR tabanlı KMR kavramları, en yüksek THS'leri ve LHS'leri ile en olgun olanlardır ve muhtemel olarak en erken zamanda ticari olarak hayata geçirilecek olanlardır. Çeşitli konseptler yapım (örneğin Arjantin'de CAREM, Çin'de ACPR50S) veya ticari işletme aşamasındadır (örneğin Rusya'da KLT-40S 3).

Diğer tasarımlar ise lisanslama konusunda önemli ilerlemeler kaydediyor ve 2030 yılına kadar ilk prototipler olarak inşa edilebilirler. Bu teknolojiler için dünya çapındaki onlarca yıllık işletme ve düzenleyici deneyimlerinden yararlanılmaktadır. Ayrıca bu teknolojiler Nesil II. Ve Nesil III/III+ reaktörlerinin küçük ve evrimsel varyantlarıdır.

IV. Nesil teknolojilerinde, alternatif soğutucular (yani sıvı metal, erimiş tuz veya gaz) ve hafif su reaktörlere kıyasla farklı sistem konfigürasyonları kullanılır. IV. Nesil tabanlı tasarımlar, hafif su reaktörleriyle aynı düzeyde işletim ve düzenleyici deneyime sahip değil ve bazı alanlarda hala ek araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Yine de bu tasarımlar, geliştiricilerin ve düzenleyicilerin yararlanabileceği geniş bir araştırma ve geliştirme deneyimlerinden yararlanır. En olgun IV. Nesil tasarımları, bazı ünitelerin halen faaliyette veya yapım aşamasında olduğu metal soğutmalı ve gaz soğutmalı sistemlerdir. Bu tasarımlar ayrıca daha yüksek çıkış sıcaklıkları ve gelişmiş nükleer yakıt çevrimleri sayesinde daha geniş çaplı ısı uygulamalarda kullanılabilirler. Şu anda en az 72 KMR konsepti çeşitli geliştirme aşamalarında (IAEA, 2020). 2018'den itibaren bu konseptlerde %40'lık bir artış olmuştur (IAEA, 2018). Şekil 3'te dünyadaki KMR'ler görülmektedir.



Şekil 3. Çıkış gücü, kor çıkış sıcaklığı ve işleme konfigürasyonlarının fonksiyonu olarak seçilen reaktörler (IAEA, 2020 ve NEA, 2021)

### 3- KMR İÇİN BEKLENTİLER, ENGELLER

#### 3.1.KMR için Beklentiler

AEA, KMR teknolojisine ilişkin beklentilerin umut verici olduğunu ve bu teknolojiye, özellikle daha küçük şebeke kapasitelerine sahip gelişmekte olan ülkelerden büyük ilgi olduğunu belirtmiştir. KMR'ler için beklentiyi arttıran faktörler aşağıda verilmiştir.

- Gelişmiş güvenlik sistemlerinin olması
- Daha küçük şebekelerde, uzak konumlarda hizmet verilebilirlik
- Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyon özelliği
- Yerleştirmesi daha kolay olması ve daha küçük acil durum planlama bölgelerine sahip olması
- Üretim kapasitelerinin arttırılabilir olması
- Ekonomik olması

### 3.2. KMR için Sorunlar ve engeller

KMR teknolojisi ile ilgili bir takım avantajlar olsa da, ileri teknolojiler için ekonomi, lisanslama, kullanım, kamu kabulü ve Ar-Ge ile ilgili önemli engeller de vardır. Bu engeller aşağıda verilmiştir.

- Ekonomik belirsizlik ve türünün ilk örneği teknolojiye sahip olması
- Lisans sorunları ve uyumlaştırma ihtiyacı
- Yakıt yanması sorunu
- Halkın kabulü sorunu
- Yeni teknolojinin işletilmesi ve bakımı sorunları

## 4. KMR'LERİN TEKNO-EKONOMİK ÖZELLİKLERİ

Bazı hafif su-küçük modüler reaktör tasarımları için termal verim kayıpları olmasına rağmen geleneksel büyük nükleer reaktörlerine göre, KMR teknolojisinin küçültülmüş boyutu sayesinde birkaç avantajlı özellik getiriyor. Bunlar;

*Entegre tasarımlar:* Daha küçük korlarda, entegre tasarımların kullanımına olanak tanır. Entegre bir sistem, nükleer buhar tedarik sisteminin tüm bileşenlerini tek bir tankta birleştirir. Böyle bir sistem, sağlam bir doğal güvenlik ve bakım ile sonuçlanır.

*Doğal güvenlik:* Daha düşük güç çıkışı ve daha küçük korlar tarafından sunulan daha yüksek yüzey-hacim oranı, hem normal hem de normal olmayan çalışma koşulları için pasif güvenlik sistemlerinin verimliliğini arttıracaktır. Pasif soğutma sistemlerine daha fazla güvenmek, daha basitleştirilmiş işletme ve bakıma olanak tanır.

*Daha küçük kor envanterler:* Daha küçük bir kor envanterin hem saha hem de saha dışında uygulamalarda faydası vardır. Böylelikle, saha uygulamalarında daha az koruma gereklidir ve işçiler için radyasyona maruz kalma dozları azdır. Saha dışı uygulamalarda ise, kullanılan daha küçük

envanter, bir kazanın meydana gelme olasılığının azalması ve acil durum planlama bölgelerine olan ihtiyacı azaltabilir.

*Geliştirilmiş modülerleştirme ve üretilebilirlik:* KMR tasarımlarının daha küçük boyutu, daha iddialı modülerleştirme şemalarının yanı sıra yeni üretim tekniklerinin daha kolay benimsenmesini sağlar (NEA, 2020).

*Gelişmiş esneklik:* KMR'lerin esnekliği, dağıtım yeteneklerini (örneğin daha düşük yerleşim kısıtlamaları) ve ürün çeşitliliğini (birleşik ısı ve elektrik üretimi) kapsar.

## **5- KMR'LER İÇİN DEĞER ÖNERİLERİ:**

KMR tasarımlarının değer önerileri ile nükleer enerjinin ticari durumu değişebilir. Değer önerilerinin başlıca olanları finansman faydaları, teslimat modeli ve pazara sunma süresi ve sistem maliyeti avantajlarıdır.

### **5.1. Finansman faydaları**

- Mali açıdan bakıldığında, KMR'ler, özellikle serbestleştirilmiş elektrik piyasalarında, büyük hafif su reaktörlere kıyasla çekici bir yatırım seçeneği sunabilir:

- Daha uygun fiyatlı olması sebebiyle kolay ulaşılabilirlik,
- KMR geliştiricileri tarafından teşvik edilen daha kısa inşaat süresi, finansman maliyetini daha da azaltacaktır.
- Çok üniteli KMR'ler için modül ekleme ve elektrik üretmeye başlama yeteneği, hem ön yatırımı hem de sermaye riskini kademeli olarak azaltır, bu da daha düşük finansal maliyetlere sebep olur.
- Çok birimli KMR'ler için portföy stratejisi ile, modüller aşamalı olarak eklenebileceği için, yatırımcılar elektrik talebindeki ve nakit akışı/ finansman mevcudiyetindeki değişikliklere daha kolay uyum sağlarlar ve böylece finansal risklerin yönetimi iyileştirilmiş olur.

### **5.2. Teslimat modeli ve pazara sunma süresi**

Pazar yeterli bir olgunluk düzeyine ulaştığında, pazara sunma süresinde (yani projenin geliştirilmesi ile reaktörün devreye alınması arasında gereken süre) azalma olacaktır.

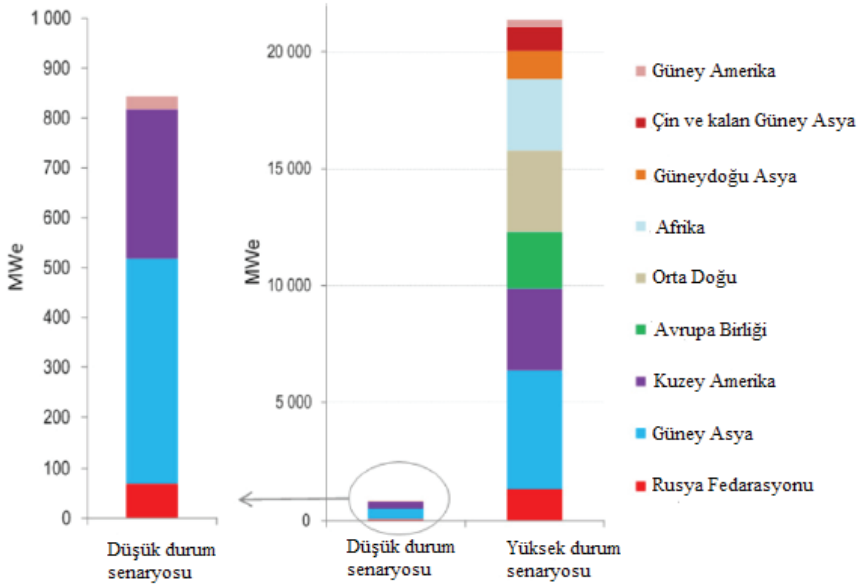
### **5.3.Sistem maliyeti avantajları**

KMR'lerin esneklik yetenekleri ve ayrıca şebekeye yardımcı hizmetler sağlama yetenekleri, sistem maliyet optimizasyonu açısından faydalar sağlayabilir. Bu faydalar daha pahalı ve karbon yoğunluklu kaynak (örneğin kömür, petrol ve gaz yakıtlı tesisler) ihtiyacını azaltacaktır.

## 6- KMR'LER İÇİN PİYASA FIRSATLARI

KMR'ler için piyasa görünümü açısından, hem teknoloji gelişme hem de lisanslamaya hazır olma konusunda belirsizlikler devam etmektedir. KMR'lerin maliyet rekabet gücü, küresel pazarın sağlamlığı ve yüzdesine direk olarak bağlıdır ve ayrıca bu gelişmekte olan pazara hizmet etmek için gereken düzenleyici seviyesi ve politika desteği de piyasada hizmet vermesini etkilemektedir.

Yine de dünyada geliştirilen birçok KMR vardır ve 2035'e kadar bölgelere göre tahmini KMR kapasitesi Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. 2035'e kadar bölgelere göre tahmini KMR kapasitesi (NEA, 2016)

KMR'ler kısmen nükleer enerji uygulamaları pazarını, merkezi bir elektrik sistemindeki geleneksel elektrik tedarikinin ötesinde geliştirmektedir. Stratejik düzeyde bu, birbiriyle örtüşen üç pazar fırsatı anlamına gelir;

- Dekarbonize enerji sistemleri;
- Değişken yenilenebilir enerjinin dağıtımını tamamlamak;
- Nükleer enerjinin yeni sektörlere ve/veya bölgelere erişimini kolaylaştırmak.

## 7- LİSANSLAMA VE DÜZENLEME

Nükleer lisanslama, nükleer santrallere ve diğer nükleer tesislere izin vermek için kullanılan yasal süreçtir. Her ülkenin, genellikle diğer ülkeler-

den önemli farklılıklar gösteren kendi düzenleyici sistemi vardır.

### 7.1. Güvenlik hususları

KMR'lerin genel güvenlik durumunu iyileştiren güvenlik özellikleri:

- Pasif güvenlik özelliklerinin verimliliği: Pasif güvenlik mekanizmalarına daha fazla güvenilmesi, aktif sistemlere olan ihtiyacı azaltır. Pasif güvenlik potansiyel olarak güvenlik değerlendirmelerini basitleştirir ve arıza modlarını azaltır. Ek olarak, küçük reaktör çekirdeklerinin daha yüksek yüzey-hacim oranı sayesinde bozunma ısısı giderme modları da artmaya elverişlidir.
- Daha az arıza modları: Daha yüksek düzeyde tasarım basitleştirme ve entegrasyon kombinasyonları olması sebebiyle daha az arıza modları vardır.
- Azaltılmış saha dışı acil durum planlama bölgesi: Çok yüksek pasif güvenlik özellikleriyle birlikte daha küçük envanterlerin kullanılmasının faydası, daha az koruma gereksinimine ve saha dışı acil durum planlama bölgelerinin azalmasına yol açabilir. Birkaç KMR tasarımının olgunluğa ulaşmasıyla, acil durum planlama bölgelerinin daha da azaltılması fırsatları ortaya çıkabilir.

Yukarıdaki tüm güvenlik özellikleri hem hafif su reaktörü hem de IV. Nesil KMR tasarımları için geçerlidir. Daha sonraki tasarımlar, güvenlik açısından ek geliştirmeler gerektirebilir.

### 7.2. Lisanslama ve düzenlemeyi kolaylaştırma:

Düzenleyici rejimler, farklı ülkeler arasında önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Her ülke, güvenlik gereksinimlerinin ulusal çıkarlar ve mevcut düzenleyici uygulamalarla uyumlu olmasını sağlarken, düzenleyici kurumun kararları ile halkın güvenliğini korur. Bununla birlikte, dünya çapındaki düzenleyici kuruluşların belirli bir tasarımın lisanslanması konusunda işbirliği yapması da mümkündür.

Daha yüksek düzeyde bir uyum sağlamak için bazı uygulamalar mevcuttur. Özellikle düzenleyici uyumlaştırmasında üç konu önemlidir (NEA, 2020);

- Yasal çerçeve (hükümetler)
- Lisanslama ve düzenleyici kılavuzlar (nükleer düzenleyiciler)
- Uygulama kuralları ve standartları (endüstri)

Her düzeyde çeşitli zorluklar ortaya çıkacaktır ve tam uyumlaştırma olasılığı düşük olsa bile (özellikle hükümet düzeyinde), düzenlemenin gerçekleştirilebileceği belirli alanları belirlemek genellikle mümkündür. Bu-

nun için uluslararası işbirliği gereklidir.

## 8- KMR'LERİN BÜYÜK ÖLÇEKLİ DAĞITIMINI SAĞLAMAK İÇİN TEMEL ZORLUKLAR

KMR'lerin ekonomik rekabet gücü, yeterince büyük bir pazarın varlığına bağlıdır. KMR dağıtımını etkinleştirmek için ele alınması gereken zorlukları şunlardır (NEA, 2021);

- Teknoloji seçimi sorunu
- Lisanslama çerçevelerini ve diğer yasal zorlukları yeniden gözden geçirmek ve uyumlu hale getirmedeki sorunlar
- KMR türünün ilk örneği olması
- Tedarik zinciri ve yakıt döngüsü sorunları
- Kamu algısı ve katılımıdır.

## 9- KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLERİN YAKIN VADEDE HAYATA GEÇİRİLMESİ İÇİN YOL HARİTASI

Bir KMR projesinin geliştirilmesi ve uygulanması için üç farklı paydaş (sahip veya işletme kuruluşu, KMR teknolojisinin tasarımcısı/satıcısı ve düzenleyici kurumlar) bir zaman çizelgesine bağlayan üç farklı durum ele alınması gerekir. Bunlar;

*Sahip veya işletme kuruluşu:* Bu paydaş, aşağıdakileri ele alması gerekir.

- Düzenleyici gereksinimleri de kapsayan ve ele alan kullanıcı gereksinimleri belirlemek,
- Dağıtım için zaman çizelgeleri belirlemek,
- Uzun vadeli ürün desteği ihtiyaçları belirlemek.

Bu paydaş, KMR teknolojisini kullanarak yürüteceği faaliyetler için hem ekonomik hem de güvenlik performansından nihai olarak sorumludur. Bu paydaş, özel veya devlet destekli bir ticari kuruluş olabilir.

*KMR teknolojisinin tasarımcısı/satıcısı:* Bu paydaş, kullanıcının gereksinimlerini karşılayan teknolojik çözümler geliştirmek için mal sahibi veya gelecekteki lisans sahibi ile birlikte çalışır. Bu geliştiricinin, gereksinimlerin ne anlama geldiğini ve kullanıcının gerekli zaman çizelgelerini nasıl ele alındığını anlamak için kullanıcı ve düzenleyici kurumlarla iletişime geçmesi gerekir.

*Düzenleyici kurumlar:* Bu paydaş, net bir düzenleyici gereksinimlerini belirler ve faaliyet gösteren bir kuruluş (lisans sahibi olacak) tarafından



ortaya konan tekliflerin bu gereksinimleri sağlayarak lisanslı faaliyetlerini güvenli bir şekilde yürütmesini sağlar. Düzenleyici ayrıca, lisans sahiplerinin lisanslarına uygun faaliyetler gerçekleştirmesini sağlar ve böylece kaza risklerini makul ölçüde azaltmasına yardımcı olur. Paydaşın, bir lisans sahibinin başvurusunda, düzenleyici gereksinimlerini nasıl uyguladığını anlaması gerekir. Düzenleyici kurumun, gereksinimlerin yorumlanması ve uygulanmasıyla ilgili tüm sorunları anlamak için mal sahibi/lisans sahibi ve muhtemelen teknolojinin geliştiricisi ile mümkün olduğunca erken etkileşime geçmesi gerekir (IAEA, 2021).

## 10. SONUÇLAR

Dünyada gelişmekte olan birçok KMR teknolojisi vardır fakat bunların uygulamaya geçirilmesinde çeşitli problemler bulunmaktadır. Bu sorunlar giderilirse, KMR'ler gelecekte enerji sektöründe önemli bir rol alabilir. KMR'lerin değer önerileri üzerinde durulup iyi bir yol haritası çizilirse KMR'ler yakın gelecekte uygulamaya geçirilebilir. Ayrıca fosil yakıtların kullanıldığı ısı uygulamalarda kullanılabileceği için KMR'ler karbon emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynayabilirler.

## 11.KAYNAKÇA

- IPCC (2018), Special Report: Global Warming of 1.5°C, October 2018, IPCC, Geneva, [www.ipcc.ch/sr15](http://www.ipcc.ch/sr15) adresinden alındı.
- World Nuclear Association (2021), Small Nuclear Power Reactors (Updated April 2021)'. World Nuclear Association. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> adresinden alındı.
- Ahn, K., Lee, K.H., Lee, J.S., Won, C., Yoon, J., 2020. Analytic springback prediction in cylindrical tube bending for helical tube steam generator, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 52, Issue 9, Pages 2100-2106..
- INL (2022), 02.02.2022 tarihinde <https://inl.gov/trending-topic/small-modular-reactors/> adresinden alındı.
- NEA (2011), Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, OECD Publishing, Paris, [www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf](http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf) adresinden alındı.
- NEA (2018), Nuclear Innovation 2050: An NEA initiative to accelerate R&D and market deployment of innovative nuclear fission technologies to contribute to a sustainable energy future, OECD Publishing, Paris, [www.oecd-nea.org/ndd/ni2050/ni2050\\_%20brochure.pdf](http://www.oecd-nea.org/ndd/ni2050/ni2050_%20brochure.pdf) adresinden alındı.
- IAEA (2020), Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A supplement to: IAEA Advances Reactors Information System (ARIS), 2020 Edition, IAEA, Vienna [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf) adresinden alındı.
- IAEA (2018), Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A supplement to: IAEA Advances Reactors Information System (ARIS), 2018 Edition, IAEA, Vienna, [https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book\\_2018.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf).
- NEA (2021), Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, OECD 2021, NEA No. 7560.
- NEA (2020), Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders, OECD Publishing, Paris, [www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_30653](http://www.oecd-nea.org/jcms/pl_30653) adresinden alındı.
- NEA (2016), Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment, OECD Publishing, Paris, [www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf](http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf) adresinden alındı.
- IAEA (2021), Technology roadmap for small modular reactor deployment, IAEA Nuclear Energy Series, No. NR-T-1.18.