

**BAKAD**  
2012  
BATI KARADENİZ  
AKADEMİSYENLER  
DERNEĞİ

# UMÜFED

ULUSLARARASI  
BATI KARADENİZ  
MÜHENDİSLİK  
VE FEN BİLİMLERİ  
DERGİSİ

INTERNATIONAL WEST BLACK SEA  
ENGINEERING AND SCIENCE  
JOURNAL

## EDİTÖR KURULU

### SAHİBİ

Batı Karadeniz Akademisyenler Derneği Adına

Prof. Dr. Mahmut BOZAN

### EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Eyüp Burak CEYHAN

### ALAN EDİTÖRLERİ

Doç. Dr. Bilal TÜTÜNCÜ

Dr. Öğr. Üyesi Fatih İLKBAHAR

### YAYIN KURULU

Prof. Dr. Davut KARAASLAN

Prof. Dr. Hamdi TEMEL

Prof. Dr. Giray TOPAL

Prof. Dr. Deniz AYDEMİR

Doç. Dr. Bilal TÜTÜNCÜ

Doç. Dr. Medeni AYKUT

Doç. Dr. Dahaman ISHAK

Doç. Dr. Şahin PALTA

Doç. Dr. Salih PAŞA

Doç. Dr. Suhaidi SHAFIE

Dr. Öğr. Üyesi Ersin ALAYBEYOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Eyüp Burak CEYHAN

Dr. Öğr. Üyesi Kamil ÇELİK

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÖZTEL

Dr. Öğr. Gör. Fatih İLKBAHAR

Dr. Azizul AZİZAN

Dr. Haslina JAAFAR

Dr. Mohd Nazim MOHTAR

Dr. Mohd Amrallah MUSTAFA

Dr. Fakhrul HAZMAN YUSOFF

Öğr. Gör. M. Semih SARAÖĞLU

Öğr. Gör. Taylan TUĞRUL

## İLETİŞİM

Dr. Öğr. Üyesi Eyüp Burak CEYHAN

Bartın Üniversitesi Kutlubeyyazıcılar Kampüsü

Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Oda:307

MERKEZ/BARTIN

E-posta: ([eyupburak@gmail.com](mailto:eyupburak@gmail.com))

## TEKNİK DESTEK

Dr. Öğr. Üyesi Eyüp Burak CEYHAN

E-posta: [eyupburak@gmail.com](mailto:eyupburak@gmail.com)

## DİZİNLER VE PLATFORMLAR

[DERGİPARK](#)

[ResearchBib](#)

[DRJI](#)

[Index Copernicus](#)

[ASOS Index](#)

E-ISSN: 2687-2927

Yeni dizinlere başvurular yapılmış olup gelecek sayılarda eklenmiş olması planlanmaktadır.

## İÇİNDEKİLER

BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ İLE ÜÇ BOYUTLU (3B) TARAMA  
Araştırma Makalesi

Sayfa: 1-21 / Yazar: Hasan Kemal SÜR MEN

KÖMÜR ÖZELLİKLERİNİN TEMİZ KÖMÜR TEKNOLOJİLERİNE  
(GAZLAŞTIRMA, SIVILAŞTIRMA, KARBON ELYAF VE KOK ÜRETİMİ)  
ETKİSİ: DERLEME  
Derleme Makalesi

Sayfa: 22-56 / Yazarlar: Nazan YALÇIN ERİK

ZEYTİN ÇEKİRDEĞİ TOZU İLAVE EDİLMİŞ POLİPROPİLEN KOMPOZİTİNİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİ  
Araştırma Makalesi

Sayfa: 57-74 / Yazarlar: Ezgi GÜLER, Selen AVCI, Zerrin ALADAĞ

# UMÜFED

ULUSLARARASI  
BATI KARADENİZ  
MÜHENDİSLİK  
VE FEN BİLİMLERİ  
DERGİSİ

Değerli Okurlarımız,

Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi'nin dördüncü cilt ikinci sayısını yayınlamanın mutluluğunu yaşıyoruz.

Gönderilen makaleler arasından üç makale bu sayımızdaki hakemler tarafından yayınlanmaya değer bulunmuştur.

Hasan Kemal SÜRMEYEN tarafından hazırlanan ilk makalede bilgisayarlı tomografinin prensipleri, kullanılan yöntemler, ilgili terimler, parametreler ve birimler, bilgisayarlı tomografi makinelerinin jenerasyonları ve gelişimi, endüstriyel bilgisayarlı tomografi ve son yıllarda yapılan akademik çalışmalara yer verilmiştir.

Nazan YALÇIN ERİK tarafından hazırlanan ikinci makalede gazlaştırma ve sıvılaştırma gibi temiz kömür teknoloji uygulamalarında kullanılacak kömürlerin organik bileşim ve mineral madde içeriği, kömürleşme derecesi, eser elementlerin dağılımı, yapısal bileşim ve gözenek yapısı özelliklerinin bu uygulamalara olan etkisinin açıklanması hedeflenmiştir.

Ezgi GÜLER ve Selen AVCI ve Zerrin ALADAĞ tarafından hazırlanan üçüncü makalede ise depremzedelerin ihtiyaçlarının giderilmesi için belirlenecek geçici barınma alanlarının seçim problemi incelenmiştir. Toprak yapısı, arazi eğimi, bitki örtüsü, merkezlere yakınlık (ulaşılabilirlik), güvenlik ve altyapı koşulları olmak üzere belirlenen kriterler Decision-Making Trail and Evaluation Laboratory (DEMATEL) ve Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) yöntemleriyle değerlendirilmiştir. DEMATEL yöntemi ile değerlendirme kriterlerinin etki yönleri, önem sıralamaları ve ağırlıkları elde edilmiştir. SWARA yöntemi ile oransal değerlendirmeler yapılmış ve yine kriter ağırlıkları elde edilmiştir. DEMATEL yöntemi ile elde edilen ağırlıklara göre kriterler arasındaki öncelik sıralaması "arazi eğimi, merkezlere yakınlık (ulaşılabilirlik), altyapı koşulları, toprak yapısı, bitki örtüsü, güvenlik" olarak belirlenmiştir. SWARA yöntemi ile elde edilen kriter öncelik sıralaması ise "arazi eğimi, merkezlere yakınlık (ulaşılabilirlik), toprak yapısı, altyapı koşulları, bitki örtüsü, güvenlik" şeklindedir. Her iki yöntemde de ilk ve son öncelikteki kriter sırasıyla arazi eğimi ve güvenlik olarak belirlenirken altyapı koşulları ve toprak yapısı kriterlerinin öncelik sıralaması değişmiştir. Yazarlar bu çalışmanın, geçici barınma alanlarının konumları üzerindeki neden sonuç ilişkisini algılamada pratik faydalar sağlaması bakımından ve farklı kriter ağırlıklandırma teknikleri ile elde edilen sonuçların incelenmesi bakımından önemli olduğunu belirtmiştir.

Dergimize çalışmalarını gönderen değerli yazarlarımıza, hazırlanmasında emeği geçen alan editörlerine ve kıymetli vakitlerini ayırarak makaleleri değerlendiren hakemlerimize teşekkür

ediyoruz. Sonraki sayılarda siz değerli okurlarımızın önerileriyle ve gönderecekleri makalelerle desteklerini esirgemeyeceklerinden eminiz. Bu vesileyle gelecek sayımızın Haziran 2023 tarihinde yayınlanması planlandığını hatırlatıyor, gelecek sayıya da çalışmalarınızı bekliyoruz. Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi'nin bu sayısının da ilim dünyasına hayırlı olmasını diliyorum, saygılarımla sunarım.  
31.12.2022

***EDİTÖR***

Dr. Öğr. Üyesi Eyüp Burak CEYHAN

*Bartın Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi*

*Bilgisayar Mühendisliği Bölümü*



## BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ İLE ÜÇ BOYUTLU (3B) TARAMA

**Hasan Kemal SÜRMEN<sup>1,a,\*</sup>**

<sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü  
<sup>a</sup>hksurmen@iuc.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8045-9193

### ÖZET

Bilgisayarlı tomografi, x-ışınlarından faydalanılarak bir yapının iç ve dış geometrik verisinin detaylı bir şekilde elde edilebildiği bir tarama teknolojisidir. Bu teknoloji, tıp alanında hastalıkların teşhisinde görüntüleme aracı olarak kullanıldığı gibi elde edilen kesit görüntüleri çeşitli yazılımlar yardımıyla 3B modellere dönüştürülebilmektedir. Bilgisayarlı tomografinin sağladığı ayrıcalıklar ve yöntemin tıp alanının dışındaki endüstriyel alanlarda tersine mühendislik, tahribatsız muayene gibi uygulamalar için de elverişli olması bu tarama teknolojisine ilgiyi daha da artırmıştır. Bu çalışmada bilgisayarlı tomografinin prensipleri, kullanılan yöntemler, ilgili terimler, parametreler ve birimler, bilgisayarlı tomografi makinelerinin jenerasyonları ve gelişimi, endüstriyel bilgisayarlı tomografi ve son yıllarda yapılan akademik çalışmalara yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilgisayarlı tomografi, 3B tarama, DICOM, artefakt, Hounsfield ölçeği.

### ABSTRACT

Computed tomography is a scanning technology with which it is possible to obtain detailed internal and external geometric data of a structure by using x-rays. This technology is used as an imaging tool in the diagnosis of diseases in the field of medicine, and the obtained cross-section images can be converted into 3D models with the help of various software. The privileges provided by computed tomography and also its convenience for applications such as reverse engineering and non-destructive testing in industrial areas outside the medical field have increased the popularity of this scanning technology. This study includes principles of computed tomography, methods used, related terms, parameters and units, generations and development of computed tomography machines, industrial computed tomography, and recent academic studies.

**Keywords:** Computed tomography, 3D scanning, DICOM, artifact, Hounsfield unit.

**\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)**

**Atıf (Citation):** Sürmen, H.K., "Bilgisayarlı Tomografi İle Üç Boyutlu (3B) Tarama", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4(2): 1-21, 2022.

**Geliş (Received):** 17/07/2022

**Kabul (Accepted):** 12/11/2022

**Yayın (Published):** 31/12/2022

## 1. GİRİŞ

Bilgisayarlı tomografi (BT), x-ışınlarının kullanılarak taranan obje boyunca kesit görüntülerin oluşturulduğu ve böylece bir yapının iç ve dış geometrik verisinin detaylı bir şekilde elde edilebildiği bir tarama teknolojisidir. Bu teknolojiyle taranan yapılar, bir organ, insan vücudunda bir bölge olabileceği gibi endüstriyel bir obje, doğada bulunan jeolojik veya organik bir yapı da olabilir.

Uluslararası literatürde “computed tomography (CT)”[1] olarak bilinen bilgisayarlı tomografi bazı kaynaklarda "computerized tomography" [2] veya "computed axial tomography (CAT)" [3] olarak da geçmektedir. "Tomografi" kelimesi Yunanca dilim anlamına gelen “tomos” ve yazmak anlamına gelen “grafein” kelimelerinden türetilmiştir. Bilgisayarlı tomografi ile yapılan taramalar sonucunda iki boyutlu (2B) dilim şeklinde kesit görüntüler elde edilir ve bu 2B veriler bilgisayar yazılımları aracılığı ile birleştirilerek taranan yapının üç boyutlu (3B) dijital, hacimsel verisi elde edilebilmektedir.

Tarihi 1900’lü yılların başlarına dayanan bilgisayarlı tomografi teknolojisi geliştirilerek 1972’de halka duyurulmuş olup [4, 5] dünya üzerinde hızla yaygınlaşarak başta tıp alanında olmak üzere endüstriyel alanlarda da muayene, ölçüm, 3B modelleme gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Başlangıçta tıbbi görüntüleme aracı olarak kullanılan BT 1980’lerden sonra endüstriyel parçaların analizlerinde, tahribatsız testlerde ve malzeme kusurlarının belirlenmesinde giderek popülerleşmiştir. BT teknolojisi 2000’lerden sonra metroloji alanına girerek 3B optik koordinat ölçümleme sistemlerine [6] alternatif olmuştur.

Yapıların iç kısımlarının da görüntülenmesine olanak veren bilgisayarlı tomografi, optik [7], lazer [8] ve fotogrametri [9] gibi diğer 3B tarama yöntemlerinden farklılık gösterir. BT daha çok manyetik rezonans görüntülemeye (MRG) (magnetic resonance imaging -MRI) [10] benzerdir ancak MRG hidrojen moleküllerinin manyetik rezonansını belirlemek için iyonize olmayan radyo frekanslarını kullanır. BT ise iyonize radyasyon kullanarak x-ışınlarının emilimini ölçer. Bu nedenle MRG ve BT’nin kullanım alanlarında farklılıklar görülebilmektedir.

Bilgisayarlı tomografi yöntemi günümüzde sadece teşhis amaçlı olarak değil, özellikle biyomekanik ve bir çok tıbbi araştırmada uygulama yapılan bölgenin üç boyutlu modelinin elde edilmesinde etkin bir 3B tarama yöntemi olarak kullanılmaktadır. Hem tıbbi bilgisayarlı tomografi hem de endüstriyel bilgisayarlı tomografi ile 3B tarama, başta tıp [11, 12],



biyomekanik [13, 14] dijital otopsi [15], derin öğrenme [16, 17], jeoloji [18] ve çeşitli mühendislik alanları [19, 20] olmak üzere gün geçtikçe daha da yaygınlaşmaktadır. Ayrıca BT'nin daha küçük ölçekli kullanımı için geliştirilen mikro-BT ( $\mu$ CT) ile paleontoloji, entomoloji [21], dişçilik [22] gibi alanlarda yüksek çözünürlüklü tarama özelliği sayesinde küçük parçalar tahribatsız bir şekilde taranabilmektedir. Bu çalışmada bilgisayarlı tomografinin prensipleri, kullanılan yöntemler, ilgili terimler, parametreler ve birimler, bilgisayarlı tomografi makinelerinin jenerasyonları ve gelişimi, endüstriyel bilgisayarlı tomografi, son yıllarda yapılan akademik alandaki tıbbi ve endüstriyel uygulamalara yer verilerek bir derleme yapılmıştır.

## 2. BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ (BT)

Bütün x-ışını görüntüleme sistemleri, x-ışınlarının uygulandığı yapı tarafından absorbe edilmesi ve absorbe edilen miktara bağlı olarak görüntünün oluşturulması prensibine dayanır. Tıbbi alanda kullanılan konvansiyonel x-ışını görüntüleme teknolojileri de bu prensibe dayanarak, akciğer, kalp, kas gibi farklı dokularda emilen ve geçen x-ışını miktarına bağlı olarak hastanın vücudundaki dokuların iki boyutlu bir projeksiyon görüntüsünü sağlar. X-ışını ile üretilen bu fotoğrafa radyografi denir.

Bilgisayarlı tomografi de x-ışını görüntüleme prensibine göre çalışır ve taranan hacim boyunca kesit görüntüleri sunar. BT temel olarak verinin toplanması, rekonstrüksiyonu, görüntülenmesi ve saklanması proseslerini içerir. BT ile elde edilen veride milyonlarca noktasal veri bulunabilir. Bu verilerden bilgisayar yardımıyla bir rekonstrüksiyon algoritması kullanılarak kesit görünüş elde edilir. Taranan bölge için alınan farklı kesit görüntüleri birleştirilir böylece kemik, damar, yumuşak doku gibi farklı yapılardan oluşan bölgenin ayrıntılı bir 3B modeli elde edilmiş olur.

### 2.1. Terimler, Parametreler ve Birimler

Bu bölümde bilgisayarlı tomografi ile tarama uygulamaları yapılırken karşımıza çıkan bazı terim, parametre ve kullanılan birimlere yer verilmiştir.

DICOM, tıpta dijital görüntüleme ve iletişim (Digital Imaging and Communications in Medicine - DICOM) olarak ifade edilen, tıbbi görüntüleme cihazlarından elde edilen verilerin saklanması ve görüntülenmesinde kullanılmak amacıyla geliştirilmiş olan bir dijital veri formatı standardıdır. BT makinesi aracılığıyla elde edilen DICOM verileri yalnızca 2B

görüntüler içerir. Bu verilerin bir biyomodel, implant üretimi veya bilgisayarda mekanik simülasyonlar için kullanılabilmesi için önce bir CAD modeline dönüştürülmesi gerekir. Bu amaçla, çeşitli tescilli (MIMICS, Materialise, Belçika; Geomagic Freeform, 3D Systems, ABD; Simpleware, Synopsys, ABD; 3D Doctor, Able Software Corps, ABD) ve açık kaynak (DeVIDE, Visualization Group; InVesalius, Brezilya; Osirix, İsviçre) yazılımlar mevcuttur.

Segmentasyon, bölgelerin ayrıştırılması olarak bilinir. Segmentasyonda bir bölge ile diğeri arasındaki sınırın doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Bu sınırlar yoğunluk farklılıklarına göre ayırt edilir. Farklı yapıların benzer yoğunluğa sahip olduğu durumlarda, bunları basitçe hacim oluşturma parametrelerini ayarlayarak ayırmak mümkün olmayabilir. Bu tip durumlarda istenmeyen yapıları görüntüden kaldırabilen manuel veya otomatik segmentasyon prosedürleri kullanılır.

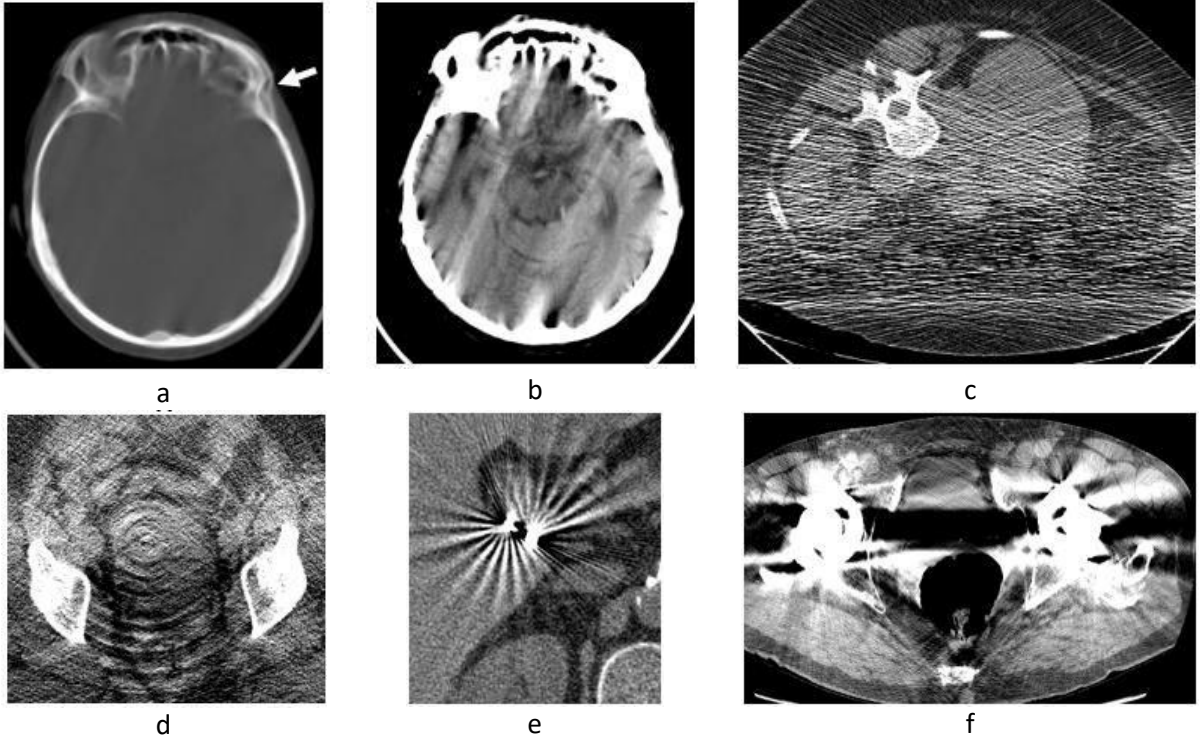
Attenüasyon veya atenuasyon, x-ışını demetinin taranan bölgeden geçerken absorpsiyon veya sapma sonucu şiddetinde meydana gelen azalma olarak tanımlanır.

Artefakt, normalde var olmayan; ancak çeşitli etkenlerden dolayı görüntüye yansıyan şekillerdir. Artefakt cihazdan, taranan objenin veya hastanın hareketinden veya uygulama hatasından kaynaklanabilir. Artefaktlar çeşitli şekillerde kendini belli ederler [23] (Şekil 1).

- Çizgiler (Streaks): Bu artefaktlar keskin köşelerden uzağa yayılan koyu çizgiler şeklinde görünür. Tarayıcının, genellikle metalik olan nesnenin yeterli projeksiyonunu alamamasından kaynaklanır. Ayrıca yetersiz bir mA seçildiğinde ve x-ışınının penetrasyonu yetersiz olduğunda da ortaya çıkabilir. Bu artefaktlar aynı zamanda tarama sırasındaki hareketle de bağlantılıdır.
- Kısmi Hacim Etkisi (Partial Volume Effect) : Bu artefakt keskin kenarlarda 'bulanıklık' olarak kendini gösterir. Nedeni, tarayıcının üst üste gelen yapıları ayırt edememesidir. Bu durum daha ince dilimli taramalarla kısmen aşılabılır.
- Yüzük Artefaktı (Ring Artifact): En yaygın mekanik artefaktlardan biridir. Bir veya daha fazla halka şeklinde yapının bir görüntü içinde belirmesiyle oluşur. Bunun nedeni bir dedektör hatasıdır.
- Gürültü Artefaktı (Noise Artifact): Bu artefakt, genellikle dilim kalınlığının ince seçildiği uygulamalarda daha yaygın olarak ortaya çıkar. Ayrıca kV veya mA çok düşük olduğunda da oluşabilir.

- Hareket Artefaktı (Motion Artifact): Bu artefakt, hasta veya taranan objenin hareketinden kaynaklanan bulanıklık olarak görülür. Bu sorun, çoklu dedektörlü BT (MDCT) cihazlarının kullanılmasıyla daha hızlı tarama süreleri ile aşılabilmektedir.
- Yel değirmeni (Windmill): Dedektörler yeniden yapılandırma düzlemiyle kesiştiğinde çizgili görünüm meydana gelebilir. Bu, filtrelerle veya pitch değerini düşürerek azaltılabilir.
- Işın Sertleştirilmesi (Beam Hardening): Nesnenin merkezinde kenardan daha fazla atenuasyon olduğunda oluşur. Dedektöre ulaşan fotonlar fincan (cupping) ve koyu renkli çizgiler şeklinde artefaktlar oluşturabilir.

BT artefaktlarının MBIR (Model-Based Iterative Reconstruction) [24, 25] ve MDT (Metal Deletion Technique) [26] gibi çeşitli tekniklerle azaltılabildiği görülmüştür. Böylece daha düşük dozda iyi görüntüler elde edebilmek mümkün olmaktadır.



**Şekil 1.** a) Hareketten kaynaklanan bulanıklık, b) hareketten kaynaklanan çizgili görüntü, c) düşük dozlu BT görüntüsünden kaynaklı gürültü, d) yüzük artefaktları, e) dalgali çizgilerden oluşan yel değirmeni artefaktı, f) koyu çizgili ışın sertleşmesi artefaktı [23].

BT taramalarda karşımıza çıkan FOV ifadesi “Field Of View” ‘in baş harflerinden oluşur, görüntü alanını belirtir.

Pixel, "picture" ve “element" kelimelerinden türetilmiş 2B dijital görüntülerde kontrol edilebilir en küçük birimdir.

Voxel, “volume” ve “element” kelimelerinden türetilmiş 3B dijital görüntülerde kontrol edilebilir en küçük üç boyutlu hacimsel birimdir.

Gürültü (noise), bilgisayarlı tomografide görüntü kalitesini azaltan, istenmeyen bir oluşumdur. Gürültüyü optik yoğunlukta dalgalanma olarak da tanımlayabiliriz [27]. Genelde düşük dozlu taramalarda oluşur.

Dansite, bilgisayarlı tomografide x-ışını geçirgenliğini belirtmek için kullanılan yoğunluk anlamına gelen terimdir. Taranan nesne veya doku x-ışınlarını ne kadar az geçirirse, görüntüsü o kadar yoğun olur.

Hiperdens, BT taramada beyaz görünen alanlara denir. Örneğin kemikler x-ışınını daha az geçirdiği için görüntüler yüksek yoğunlukta (hiperdens), beyaz renkli görünür.

Hipodens, BT taramada siyah görünen alanlara denir. Örneğin akciğerler x-ışınını daha çok geçirdiği için görüntüler düşük yoğunlukta (hipodens), siyah renkli görünür.

CTDI yani BT doz indeksi (Computed Tomography Dose Index), bir BT tarayıcısının radyasyon dozu çıktısının standart ölçüsüdür. Ölçü birimi mGy'dir. Kullanıcının farklı BT tarayıcılarının radyasyon çıktısını karşılaştırmasını sağlar. Geçmişte CTDI<sub>100</sub> (100 mm uzunluğunda bir iyonizasyon odası üzerinden ölçülmüştür) ve CTDI<sub>w</sub> (tek bir dilim boyunca ağırlıklı ortalama doz) kullanılmıştır. Mevcut kullanımdaki sarmal tarayıcılar için, CTDI<sub>vol</sub> hacimsel bilgisayarlı tomografi doz indeksi (Volume Computed Tomography Dose Index) daha yaygın olarak kullanılır. Bu endeks BT tarayıcısından çıkan radyasyon çıktısının en önemli ölçülerinden biridir.

DLP, doz-uzunluk çapımı (Dose-Length Product) olarak bilinen değer CTDI<sub>vol</sub> ile tarama uzunluğunun (L) çarpımıdır. DLP birimi mGy-cm'dir.

Tüp gerilimi (kV), x-ışını enerjisini belirtir. Radyasyon dozu, tüp voltajının karesi ile doğru orantılıdır. Klinik uygulamalarda genellikle 70-140 arası kV kullanılır [28].

Tüp akımı (mA), tüpten üretilen x ışını miktarıyla bağlantılıdır. Gantri (gantry) dönme süresi ile çarpımı tüp akımı ışınlama süresini (mAs) verir [28]. Tüp akımı azaltıldığında radyasyon dozu da doğrusal bir şekilde azalır.

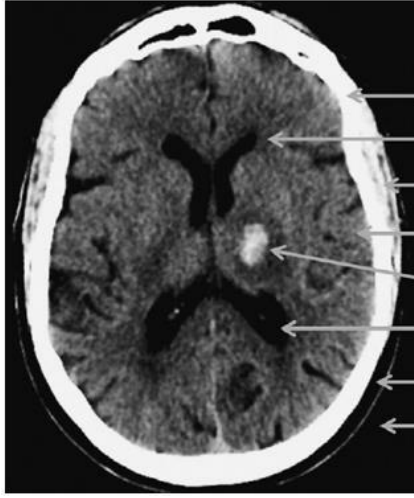
CTA, bilgisayarlı tomografi anjiyografi (Computed Tomography Angiography) olarak bilinen özellikle arterler, damarlar ve kalp odaları için kan damarlarındaki lümen veya kan akışını incelemek için kullanılan özel bir radyografi prosedürüdür. Yöntemde kan damarlarına bir kontrast madde enjeksiyonu gerçekleştirilir. CTA, kan damarı hastalıklarının ve yaralanma, anevrizma, tıkanıklık gibi durumların teşhis edilmesine ve değerlendirilmesine yardımcı olur.

HU yani Hounsfield ölçeği (Hounsfield Unit), BT görüntülerinin yorumlanmasında radyologlar tarafından kullanılan radyo yoğunluğunun nicel bir ölçüsüdür. Örneğin, 120-140 kV rutin BT X-ışını enerjilerinde, havanın HU değeri yaklaşık -1000, suyun 0 ve yoğun kemiğin HU değeri yaklaşık +1000'dir. X-ışını absorpsiyonunun daha fazla olduğu daha yoğun dokular, pozitif değerlere sahiptir ve parlak görünürler; daha az x-ışını absorpsiyonun daha az yoğun olduğu dokular negatif değerlere sahiptir ve koyu görünürler (Şekil 2).



Şekil 2. Doku yoğunluğu haritası.

Suyun üzerinde yüzen yağlar -30 HU ile -70 HU aralığındadırlar. Yağ dokusu ve hava skalanın negatif yönünde, yumuşak dokular, kan ve kemik skalanın pozitif yönünde yer alır [29] (Şekil 3). BT tarama tıp alanının dışında, endüstride de kullanılmaktadır. Biyolojik dokulardan daha yoğun parçalar tarandığında HU değerinin arttığı, genel olarak HU değerinin -1000 ile +4000 arasında değiştiği söylenebilir [19]. Örneğin çelik veya gümüş gibi metaller için HU değeri 3000'den fazla olabilir. Modjtahedi ve ark. [30] yaptıkları bilgisayarlı tomografi taraması çalışmasında pirinç, bakır, gümüş, çelik ve kurşun için HU değerini 3000 ile 3.100 HU arasında ölçmüşlerdir. Alüminyum için ise daha düşük bir değer (714-815 HU) elde etmişlerdir.



- Kemik : +1000 HU
- Beyaz madde : +20 HU ile +30 HU arası
- Kas : +20 HU ile +40 HU arası
- Gri madde : +30 HU ile +40 arası
- Kanama : +65 HU ile +95 HU arası
- CSF (beyin omurilik sıvısı) : 0 HU
- Yağ : -30 HU ile -70 HU arası
- Hava : -1000 HU

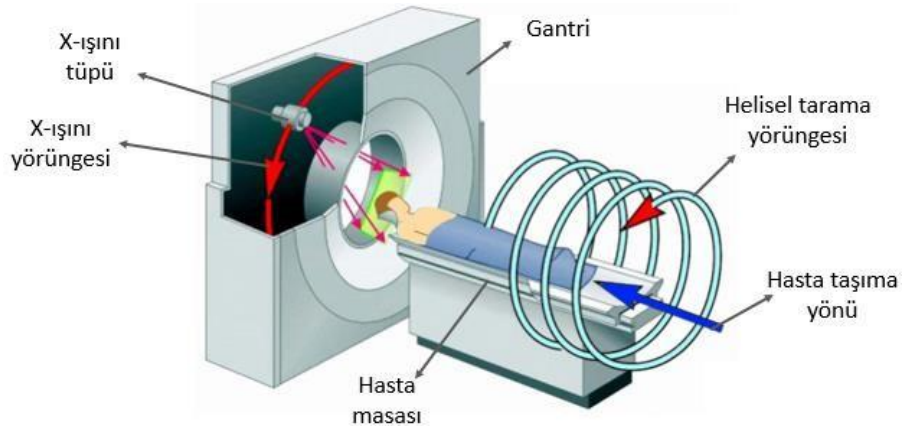
Şekil 3. Çeşitli dokular için HU değerleri.

Gray (Gy), maddenin birim kütlesi başına absorbe edilen iyonlaştırıcı enerjinin ölçüsüdür ve kilogram başına joule olarak ölçülür.

Sievert (Sv), canlı bir dokunun maruz kaldığı radyasyonun etkisini ifade eden dozun SI sistemindeki birimidir. CSG birim sisteminde kullanılan karşılığı ise REM (rontgen equivalent man) olarak bilinir. 1 Sv, 100 REM'e eşittir. Gy ve Sv genellikle miliGray (mGy) ve miliSievert mSv olarak kullanılır.

### 3. BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ MAKİNELERİNİN JENERASYONLARI VE GELİŞİMİ

Gün geçtikçe daha hızlı gantrilerin üretilmesi ve daha yüksek güç uygulanabilmesi üçüncü nesil BT makinelerini tekrar gündeme getirmiştir. Bu makinelerin özellikleri geliştirilerek ve yeni bazı özellikler eklenerek farklı versiyonları günümüzde birçok alanda tercih edilmektedir. Günümüzde yaygın olarak tercih edilen helisel (spiral) BT makinelerinde masa, tüple beraber harekete geçerek gantri içinde ilerlerken kısa sürede birçok BT görüntüsü elde edilebilmektedir (Şekil 4). Bu makineler tek tek dilimlerin bir dizi fotoğrafını çekmek yerine sarmal (veya spiral) biçimde sürekli fotoğraflar çeker. Helisel BT, eski BT tekniklerine göre daha hızlıdır, vücut içindeki alanların daha kaliteli 3B resimlerini üretir ve küçük anomalileri daha iyi tespit edebilir.

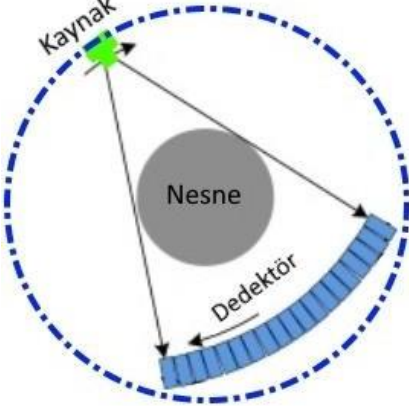
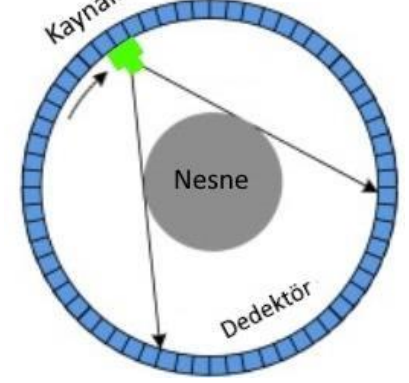
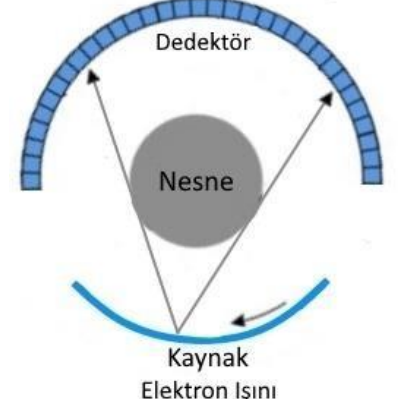


Şekil 4. Helisel (spiral) bilgisayarlı tomografi makinesi

Modern BT makinelerinin gelişimine kadar beş jenerasyon geçmiştir. Her bir jenerasyon ile bir öncekine göre bazı teknolojik yenilikler getirilmiş böylece daha hızlı ve detaylı taramaların yapılması amaçlanmıştır. Tablo 1’de zaman içinde geliştirilmiş olan BT makinelerinin 5 farklı jenerasyonu gösterilmektedir.

Tablo 1. Bilgisayarlı tomografi makinelerinin jenerasyonları.

<b>1. Jenerasyon BT</b>	<p>İlk geliştirilen BT makinesinde obje taranırken kendi eksenini etrafında dönmektedir. Ancak hasta taramaları için bu uygun olmadığından dolayı x-ışını kaynağı ve dedektör hasta etrafında dönecek şekilde bir düzenleme yapılmıştır. X-ışını tüpü kalem şeklinde x-ışını üretmektedir. Birinci nesil BT makinelerinde bir dedektör ve bir x-ışını kaynağı kullanıldığı için ışın bir defa gönderildiğinde bir aksel görüntü elde edilebilmektedir. Her bir kesit görüntüsü için X-ışını kaynağı ve dedektör birçok defa beraber bir yön boyunca hareket edip veriyi topladıktan sonra hastaya göre döndürülmektedir. Bu tarama şekli çok zaman almaktadır. Ortalama bir tarama süresi 25-30 dakika civarındadır.</p>	
<b>2. Jenerasyon BT</b>	<p>İkinci nesil BT makinelerinde yelpaze ışın tipi kullanılmaya başlanılmıştır. Bunun için yelpaze şeklinde gelen ışınlar karşılık daha çok sayıda dedektör kullanılarak tek seferde daha çok veri toplanabiliyordu. Bu makinelerde kullanılan yelpaze ışın kaynağının kapsamı (5-12 derece) çok geniş değildir. Birinci nesil makinelerde olduğu x-ışını kaynağı ve dedektörler doğrusal ve dönme hareketi yapmaktadır. Ancak yine de birinci nesil BT makinelerine göre belirgin bir hız artışı elde edilebilmiştir. İkinci nesil BT makinelerinde ortalama bir tarama süresi yaklaşık 90 saniyedir.</p>	

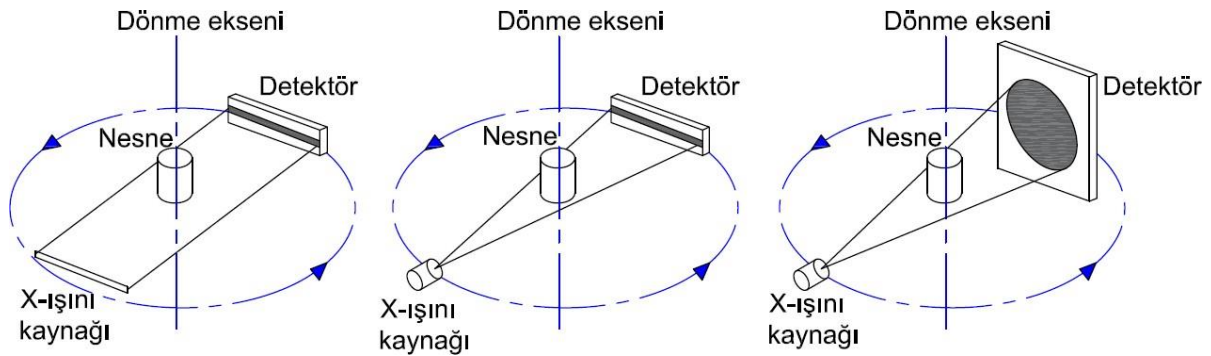
<b>3. Jenerasyon BT</b>	<p>Üçüncü nesil BT makineleri modern BT makinelerinin bazı temel özelliklerine sahiptir. Bunlardan bir tanesi makinenin mekanik olarak basit ve sade bir yapıya sahip olmasıdır. Geniş yelpaze ışın (42 derece) tipine sahip x-ışını kaynağı ve dedektörler, karşılıklı olarak gantriye sabitlenmişlerdir. Böylece bir x-ışını kaynağı ve ona karşılık gelen, dedektörlerden oluşmuş yay şeklindeki bir yapı gantri ile beraber tarama bölgesi etrafında dönerek veri toplamaktadır. Böylece doğrusal hareket olmadan daha sade bir mekanizma geliştirilmiştir. Üçüncü nesil BT makinelerinde ortalama bir tarama süresi yaklaşık 5 saniyedir. Üçüncü nesil BT makinelerinin dedektör sayılarının artırılması gibi bazı özellikleri değiştirilerek farklı versiyonları üretilmiştir. Günümüzde kullanılan birçok modern BT makinesinin temelini oluşturmaktadır.</p>	
<b>4. Jenerasyon BT</b>	<p>Dördüncü nesil bilgisayarlı tomografi makinelerinde dedektörler dairesel olarak sabitlenmişlerdir. Dedektör sayısı üçüncü nesil BT makinelerine göre yaklaşık üç kat daha fazladır. Bu makinelerde sadece x-ışını kaynağı dönerek tarama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Tarama işlemi birkaç saniye sürmektedir.</p>	
<b>5. Jenerasyon BT</b>	<p>Son nesil olan beşinci nesil BT makinelerinde verinin toplanması önceki nesillere göre oldukça farklıdır. Bu makinelerde hem ışın kaynağı hem de dedektör sabittir. Bu tasarımda kaynağın (tüpün) fiziksel olarak hareketi yerine elektronlar manyetik olarak yönlendirilmektedir. Bu nedenle veriler diğer BT makinelerine göre çok daha hızlı elde edilebilmektedir. Kesit elde etme süresi saniyenin altına düşmüştür. Beşinci nesil BT makineleri özellikle kardiyak tarama alanında tercih edilmektedir. Ancak kısıtlı kullanım alanı ve ekipmanlarının çok pahalı oluşu önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.</p>	

### 3.1. Bilgisayarlı tomografi teknolojilerinde kullanılan x-ışını konfigürasyonları

Bilgisayarlı tomografide zaman içerisinde üç farklı ışın konfigürasyonu geliştirilmiştir. Bunlar paralel ışın, fan ışını ve konik ışın konfigürasyonlarıdır (Şekil5). Paralel ışın geometri x-ışın kaynakları birinci nesil BT makinelerinde kullanılmışlardır. Bu ışınlar kalem şeklindedir ve ışın kaynağı ve dedektör aynı doğrultuda beraber hareket etmektedir. Daha



sonra döndürülerek işlem tekrar etmektedir. Bu şekilde ancak tek bir kesit görüntüsü elde edilebilmektedir. Çok yavaş olması ve döndürme hareketine ilaveten doğrusal hareket gerektirmesi bu teknikten vazgeçilmesine neden olmuştur. Daha sonraları yelpaze ışın geometrisi geliştirilmiş ve özellikle üçüncü nesil BT makinelerinde etkili bir şekilde kullanılmışlardır. Her bir dönüş hareketiyle bir kesit taraması yapılabilmektedir. Ancak bir bölgenin taranması için çok sayıda dönüş hareketinin yapılması gerekmektedir. Bunun üzerine daha az dönme hareketine ihtiyaç duyan ve bir seferde daha çok verinin toplanmasına imkân veren konik ışın geometrisi geliştirilmiştir. Konik ışının daha geniş bir alanı kaplaması neticesinde dedektör satır sayısı artırılmıştır. Konik ışın BT'de daha az dönme sayısı ile taramalar yapılabilmektedir ve bir dönüşte bir kesit yerine bir hacim taranabilmektedir.



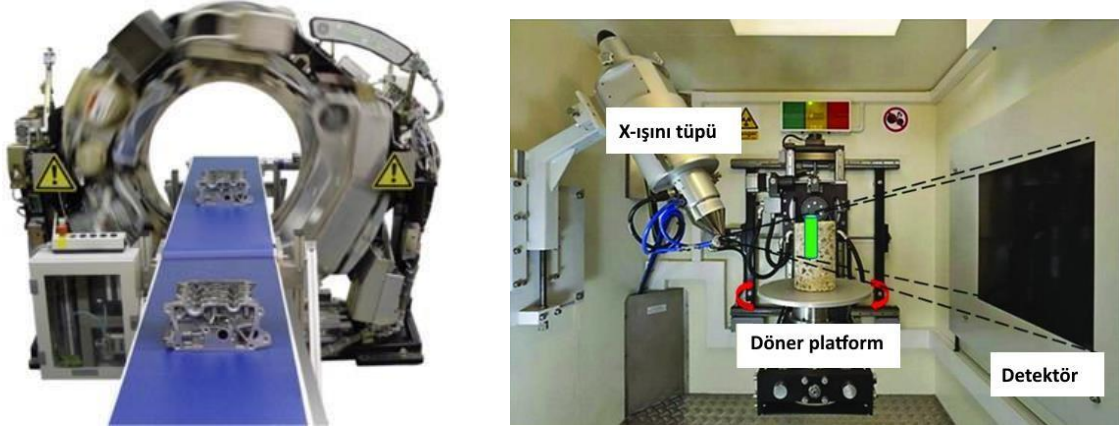
**Şekil 5.** Bilgisayarlı tomografide teknolojilerinde kullanılan paralel, fan ve konik x-ışını konfigürasyonları.

Dedektör satır sayılarının artırılarak üçüncü nesil bilgisayarlı tomografi makinelerinin geliştirilmesiyle çoklu-dedektörlü BT (multi-detector CT - MDCT) [31] olarak da anılan makineler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Zaman içinde geliştirilen ışın konfigürasyonları tarama hızlarını önemli ölçüde artırmıştır. Yelpaze ışın ile paralel ışına göre bir kesit çok daha hızlı taranabiliyorken konik ışın ile bir organ saniyeler içinde taranabilmektedir.

Yelpaze ışınlı bilgisayarlı tomografide x-ışını yelpaze şeklinde ilerler ve dilim şeklinde kesit görünüşler elde edilir. Daha sonra dilimler üst üste bindirilir. Konik ışınlı bilgisayarlı tomografide ise x-ışınları objenin etrafından bir sefer geçirilir ve görüntü elde edilir. Bu farklılık konik ışınlı bilgisayarlı tomografiyi daha az radyasyon oluşturduğu için, özellikle tıbbi uygulamalar düşünüldüğünde daha avantajlı duruma geçirmektedir.

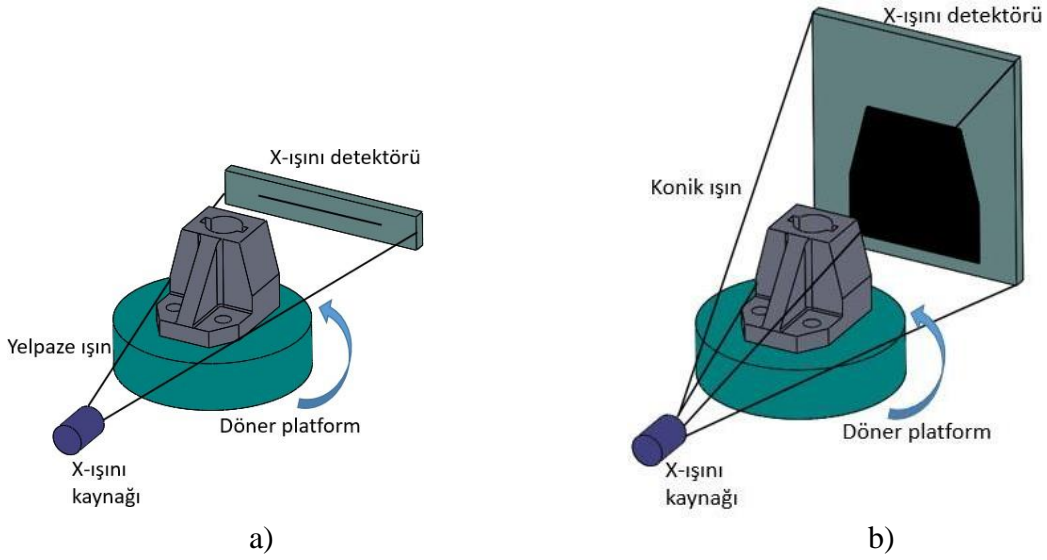
#### 4. ENDÜSTRİYEL BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ (EBT)

Endüstriyel bilgisayarlı tomografi, tıp alanındaki BT tarama cihazları ile benzer teknolojiyi kullanan, endüstriyel parçaların iç ve dış kısımlarının tahribatsız olarak taranmasını mümkün kılan bir 3B tarama teknolojisidir. Genelde tersine mühendislik uygulamalarında kullanılan bu teknoloji endüstriyel alanlarda ölçüm ve üretilen parçaların tahribatsız muayenesi için de tercih edilmektedir. EBT teknolojisi x-ışınının nesnelere nüfuz etme özelliğinden faydalandığı için bu teknoloji ile taranan parçaların iç detayları da hassas bir şekilde elde edilebilmektedir. Bu özellik diğer 3B tarama teknolojilerinde [7-9] bulunmadığından EBT'nin diğer teknolojilerden ayrıldığı en önemli avantajı olarak görülebilir. X-ışını kaynağından çıkan ışınlar objeden geçerek x-ışını dedektörüne ulaşır. Böylece objenin 2D radyografik bir görseli elde edilir. Bu teknolojiye tıp alanındaki BT teknolojisindeki gibi objenin dönmeden sadece ilerlediği sistemler [32] kullanılsa da canlı olmayan, endüstriyel nesnelere taranması esas olduğundan objenin kendi ekseninde döndürüldüğü sistemler [33] daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Endüstriyel bilgisayarlı tomografi makineleri [32, 33]

3B taramanın doğru ve güvenli bir şekilde tamamlanabilmesi için uygulama, x-ışınlarının geçtiği kapalı bir oda içinde gerçekleşir. Obje kendi ekseninde döndürülürken tomografi işlemi devam eder ve objenin farklı pozisyonlarında yüzlerce kesit görüntüsü elde edilir. Tarama sonunda objenin tüm geometrisini ve malzeme bileşimini açıklayan bir hacim modeli elde edilir. Endüstriyel bilgisayarlı tomografide tıp alanında kullanılan BT'de olduğu gibi yelpaze ışın ve konik ışın tomografi yöntemleri mevcuttur. Bu teknolojiye farklı olarak taranan nesnelere döner bir platform üzerine yerleştirilirler (Şekil 7).



**Şekil 7.** Endüstriyel bilgisayarlı tomografi yöntemleri: a) Yelpaze ışınli bilgisayarlı tomografi, b) konik ışınli bilgisayarlı tomografi

Döner platformulu EBT cihazlarında taranan modelin çözünürlüğü dönme açısına göre değişecektir. Tam bir tur (360 derece) tamamlanınca elde edilen 3B model, seçilen tarama aralığına (1 - 0.1 derece) göre farklı çözünürlüklerde elde edilebilir. Çözünürlüğün artırılması için tarama aralığı (derecesi) azaltılır. Böylece taramayı tamamlamak için yaklaşık 360-3600 aralığında x-ışını gönderilmiş olur.

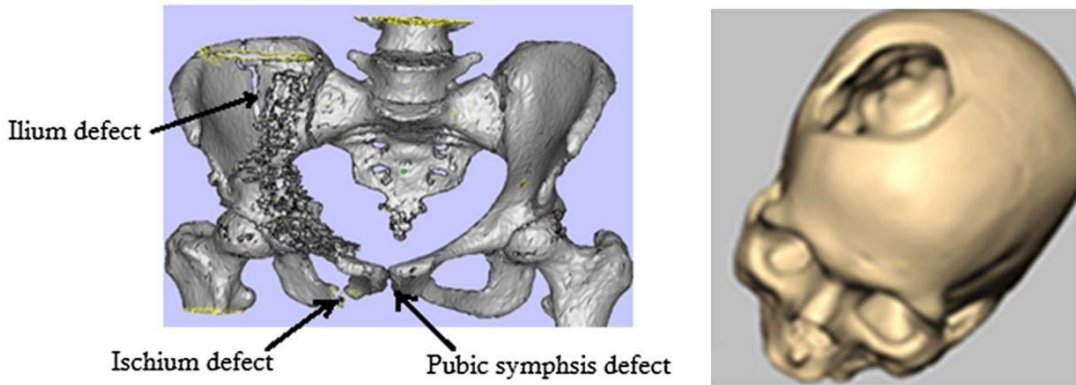
## 5. BT TARAMANIN AKADEMİK UYGULAMALARI

BT tıp alanında çoğunlukla tümörlerin tanımlanmasında; iç kanamaların ve vücut içinde yara veya hasarların araştırılmasında; koroner arter hastalığı, kan damarı anevrizmaları ve kan pıhtıları gibi dolaşım sistemi hastalıklarının ve durumlarının teşhisinde; biyopsi ve ameliyatlardan önce yer tespitinde; omurga durumunun incelenmesinde; böbrek ve mesane taşları, apseler, ülseratif kolit ve sinüzit gibi iltihaplı hastalıkların teşhisinde tercih edilmektedir. Ayrıca BT ile görüntüleme bir cerrahi operasyon sırasında intraoperatif olarak da kullanılmaktadır [34]. Intraoperatif BT'nin kullanımı operasyonların süresini önemli ölçüde artırmadığı gibi implantların daha yüksek doğrulukla yerleştirilmesi gibi avantajlar sağlamaktadır.

BT taramayla vücut içindeki kemik, iç organ, damar gibi çeşitli yapı ve dokuların detaylı görüntüleri elde edilebildiği ve sonrasında bu görüntüler 3B modellere

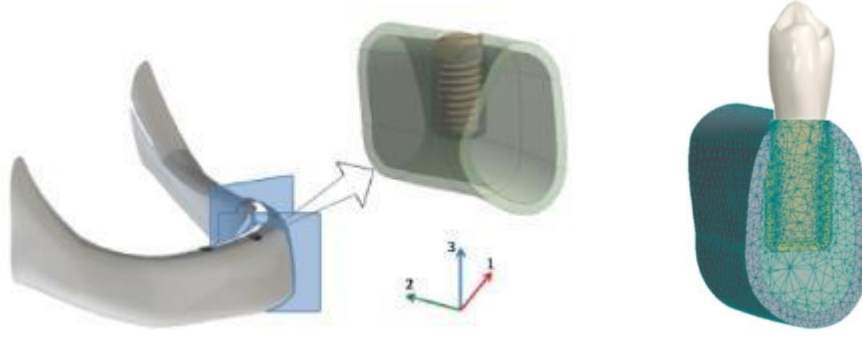
dönüştürülebildiği için BT tarama, birçok tıbbi ve biyomekanik araştırmada da sıklıkla başvurulan bir teknoloji olmuştur. Bu araştırma ve bilimsel çalışmalar günümüzde artarak devam etmekte, yeni tıbbi yöntemlerin ve biyomedikal ürünlerin geliştirilmesinde büyük rol oynamaktadırlar. Aşağıda BT teknolojisinin kullanıldığı, tıp, biyomekanik, mühendislik ve diğer alanlarda yakın zamanda yapılan bilimsel araştırmalardan örneklere yer verilmiştir.

Modi ve Sanadhya yaptıkları çalışmada [35] , BT tarama verilerinden hastaya özel biyomodeller ve implantlar tasarlamak ve üretmek için bir metodolojiyi geliştirmişlerdir. Kısa sürede, düşük maliyetle, hastaya özel olarak tasarım ve üretimin amaçlandığı çalışmada sonlu elemanlar metodu, 3B baskı yanı sıra BT tarama teknolojisinden etkin bir şekilde faydalanılmıştır. Pelvik kemiği ve kafatası için yaptıkları BT taramasında SOMATOM Definition AS 64-slice BT tarayıcı (Siemens Medical Systems, Erlangen, Almanya) ve tüp voltajı 100 kV, tüp akımı 120 mA ve kesit kalınlığı 1.2 mm olarak belirledikleri parametreleri kullanmışlardır. Elde ettikleri DICOM verilerinden dönüştürdükleri CAD modelleri Şekil 8 'de gösterilmektedir.



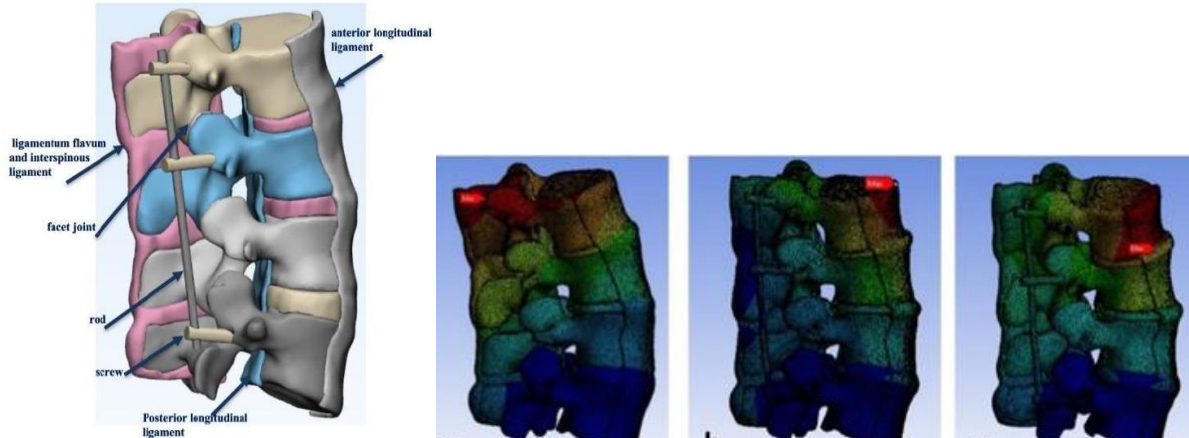
**Şekil 8.** BT teknolojisinden faydalanılarak elde edilen pelvis kemiğinin CAD modeli ve hasarlı kafatası kemiğinin CAD modeli [35].

Zanetti ve ark. dental implant tedavisinde kullanılan implant modellerinin osseointegrasyon sırasında kemik-implant sisteminin doğal frekansındaki değişimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak farklı şekillere ve yiv aralıklarına sahip implantların rezonans frekanslarında önemli ölçüde farklılıklar tespit etmişlerdir [22]. Bu çalışmada sonlu elemanlar metodu kullanılarak modal analiz yapılmıştır. Bu analizin gerçekleştirilebilmesi için gereken mandibular kemik yapısının CAD modeli (Şekil 9) ise görüntü segmentasyonu yoluyla bir BT tarama veri setinden oluşturulmuştur.



**Şekil 9.** BT kullanılarak oluşturulmuş mandibular kemik, implant sistemi ve sonlu elemanlar modeli [22]

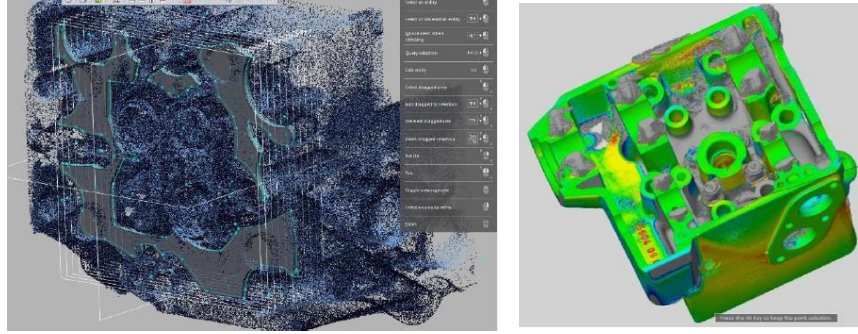
Akıncı ve ark. adolesan idiyopatik bir hastanın BT verilerini kullanarak omur, faset ve ligamentlerden oluşturulan 3B modeli üzerinde sonlu elemanlar yöntemiyle omurga implantı olmadan, titanium implantı kullanarak ve polietereketon (PEEK) implantı kullanarak üç farklı durum için omurga ve implantlar üzerindeki stres dağılımlarını incelemişlerdir [14] (Şekil 10).



**Şekil 10.** BT teknolojisinden faydalanılarak oluşturulan omurga modeli (L2-L5) ve sırasıyla implantsız, titanium rodlu, PEEK rodlu sonlu elemanlar modelleri ve analiz sonuçları [14].

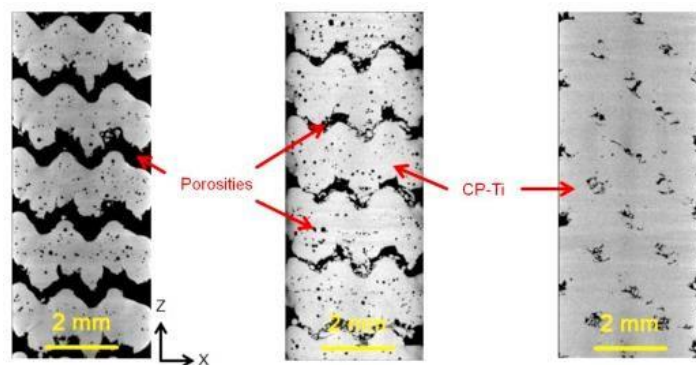
BT tarama, taranan parçaların iç kısımları ile ilgili veri sağladığı için tıp alanının dışında da endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca BT'nin diğer tarama yöntemlerine karşı sağladığı bu üstünlüğü, onu tahribatsız muayene ve bazı tersine mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir araç haline getirmektedir. Cieslik ve ark. değişken valf zamanlaması ile çalışması için bir silindirik test motorunun modernizasyonu üzerinde araştırma yapmışlardır [19]. Motor yapısının çok karmaşık iç kısımlarının modellenmesinde BT tarama teknolojisi kullanılarak tersine mühendislik uygulaması

yapılmıştır (Şekil 11). Çalışmalarında BT taramanın, metodolojinin geliştirilmesinde, geometrik ve yapısal projenin oluşturulmasında ve silindir kafasının tasarımında çok verimli bir şekilde kullanılabildiğini belirtmişlerdir.



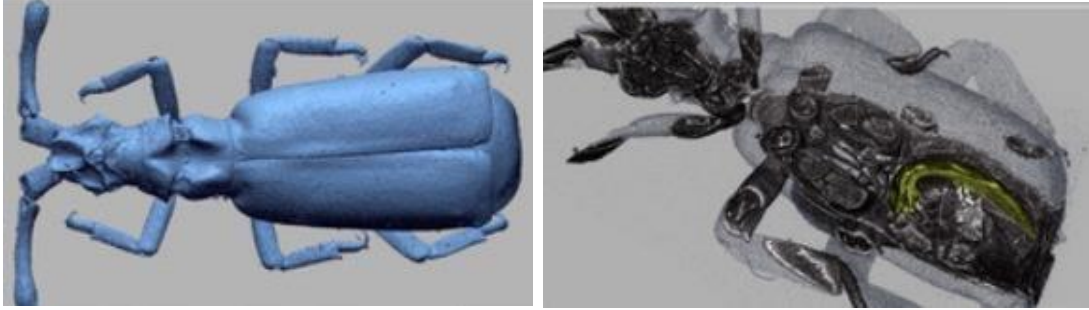
**Şekil 11.** Soğutma sisteminin iç alanlarını da gösteren BT taramadan elde edilen nokta bulutu modeli ve sapma analizi uygulanan 3B model [19].

Khosravan ve Reinicke yaptıkları çalışmada [36] BT taramayı kullanılarak son yılların popüler teknolojilerinden biri olan 3B baskı (eklemeli imalat) ile üretilen ürünlerin analizlerine yer vermişlerdir. Günümüzde artık eklemeli imalat son ürün fabrikasyonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle bu ürünlerin kullanım amacına uygun olup olmadığının detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Khosravan ve Reinicke de hem metalik hem de polimerik 3D baskılı parçaların kusur tespiti, boyutsal değerlendirme, yoğunluk ölçümü ve yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde BT taramanın potansiyellerini ortaya koymuşlardır. Ayrıca Attar ve ark. yaptıkları çalışmada [20] 3B baskı teknolojilerinden biri olan seçmeli lazer eritme (SLM) kullanarak üç farklı gözeneklilik seviyesinde (%10, %17 ve %37) ürettikleri kompozit parçalardaki mekanik davranışları yaptıkları basma testi sonrası BT ile analiz etmişlerdir (Şekil 12).



**Şekil 12.** %37, %17 ve %10 gözeneklilik seviyesine sahip SLM ile işlenmiş CP-Ti parçalarının  $\mu$ -CT görüntüleri [20].

Mensa ve ark. Diptera, Coleoptera ve Hymenoptera türlerinin 3 boyutlu rekonstrüksiyonlarını hazırlamak için mikro-BT teknolojisini kullanmışlardır. Böceklerin hem dış hem de iç yapısının rekonstrüksiyonu gerçeğe uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir [21]. Görüntüler 1 µm çözünürlük elde edebilen bir tungsten hedef ile donatılmış mikro-BT “Nanotom S” (GE Phoenix) makine ile kullanılarak elde edilmiştir. Ortalama enerji 20 keV, hızlanma voltajı 50 kV ve akım 200/250 µA olarak belirlenmiş ve her numune 0,25 derecelik adımlarla 360° döndürülmüştür. Toplamda 1441 projeksiyon (2304 × 2304 piksel) elde edilmiştir. Bu çalışma ile mikro-BT’nin morfolojik analizler için kullanımının mümkün olduğu vurgulanmıştır.



**Şekil 13.** Bir böceğin (paussus batillarius) mikro-BT verilerinden elde edilmiş dış görünümü ve iç organlarının gösterildiği 3B rekonstrüksiyonu [21].

## 6. SONUÇ

Bilgisayarlı tomografi teknolojisinin, tıp alanından çeşitli endüstriyel alanlara kadar gerek görüntüleme gerekse 3B modellerin elde edilmesinde oldukça yüksek bir potansiyele sahip olduğu anlaşılmaktadır. BT ile detaylı görüntülerin elde edilebilmesi teşhis koymayı kolaylaştırmakla beraber 3B görüntüleme ile keşif amaçlı cerrahiye bir alternatif oluşturabilir. BT teknolojisinde iyonize radyasyon kullanıldığı için canlılar üzerinde yapılan taramalarda gerekli prosedürlere dikkat edilmelidir. Tıp alanında, özellikle BT’nin kanser oluşumuna etkileri ve radyasyon dozunu düşürmeye yönelik çalışmalar sürmektedir.

BT ile elde edilen görüntülerin bazı bilgisayar yazılımları yardımıyla 3B modellere dönüştürülebilmesi ve bu modellerin mühendislik alanında mekanik simülasyonlarda kullanılabilmesi, yeni operasyon yöntemleri ve implant teknolojilerinin gelişimine olumlu katkılar sağlamıştır. Bununla birlikte BT taramanın, günümüzde hızla yaygınlaşan, BT tarama gibi katmanların birbirine eklenmesi prensibine dayanan, serbest-formlu objelerin kolaylıkla

imal edilebildiği eklemeli imalat (3B baskı) teknolojileri ile uyumlu bir şekilde kullanılabilceği görülmektedir.

BT taramayla parçaların iç kısmındaki yapıların görüntülenip modellenebilmesi BT'yi tersine mühendislikte kullanılan diğer tarama yöntemlerine göre ayrıcalıklı kılmakta, tıp alanı dışında mühendislik ve diğer alanlarda da önemli bir tarama teknolojisi yapmaktadır. Buna karşın BT tarayıcıları ilk yatırım maliyeti yüksek makinelerdir. Bu yüzden tarama ihtiyacının yoğun olmadığı koşullarda BT taramasını dışardan temin etmek daha uygun olabilir. BT taramayla parçalar hızlı bir şekilde taranabilmektedir, ancak taranan parçanın boyutu makinenin boyutu ile sınırlıdır. Bu nedenle makinenin tarama hacminden daha büyük parçaların tarama işlemi için farklı yöntemler tercih edilebilir.

## KAYNAKÇA

- [1] Withers, P. J., Bouman, C., Carmignato, S., Cnudde, V., Grimaldi, D., Hagen, C. K., Stock, S. R. (2021). X-ray computed tomography. *Nature Reviews Methods Primers*, 1(1), 1-21.
- [2] Yu, Q., Liu, H., Yang, T., Liu, H. (2018). 3D numerical study on fracture process of concrete with different ITZ properties using X-ray computerized tomography. *International Journal of Solids and Structures*, 147, 204-222.
- [3] Marston, V. (2020). *Computed Axial Tomography Basics. Fast Facts for the Radiology Nurse: An Orientation and Nursing Care Guide*, 67.
- [4] Ambrose J, Hounsfield G (1973) Computerized transverse axial tomography. *Br J Radiol* 46:148-149
- [5] Hounsfield GN (1973) Computerized transverse axial scanning (tomography). Part 1. Description of system. *Br J Radiol* 46:1016-1022
- [6] Owczarek, D., Ostrowska, K., Śladek, J. A. (2017). Examination of optical coordinate measurement systems in the conditions of their operation. *Journal of Machine Construction and Maintenance-Problemy Eksploatacji*.
- [7] Bannink, T., Bouman, S., Wolterink, R., van Veen, R., van Alphen, M. (2021). Implementation of 3D technologies in the workflow of auricular prosthetics: A method



- using optical scanning and stereolithography 3D printing. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 125(4), 708-713.
- [8] Yang, S., Shi, X., Zhang, G., Lv, C. (2018). A dual-platform laser scanner for 3D reconstruction of dental pieces. *Engineering*, 4(6), 796-805.
- [9] Puerta, A. P. V., Jimenez-Rodriguez, R. A., Fernandez-Vidal, S., Fernandez-Vidal, S. R. (2020). Photogrammetry as an Engineering Design Tool. In *Product Design*. IntechOpen.
- [10] Jerban, S., Chang, E. Y., Du, J. (2020). Magnetic resonance imaging (MRI) studies of knee joint under mechanical loading. *Magnetic resonance imaging*, 65, 27-36.
- [11] Elad, B., Lessick, J., Adler, Z., Caspi, O. (2022). Three-Dimensional Computed Tomography Reconstruction for Diagnosis of Left Ventricular Assist Device Outflow Graft Twist. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, 15(4), e013714.
- [12] Stier, C., Parmar, C., Koschker, A. C., Bokhari, M., Stier, R., Chiappetta, S. (2020). Computed tomography-3D-volumetry: a valuable adjunctive diagnostic tool after bariatric surgery. *Mini-invasive Surgery*, 4.
- [13] Feng, Y., Shu, J., Liu, Y., Zheng, T., Shao, B., Liu, Z. (2021). Biomechanical analysis of temporomandibular joints during mandibular protrusion and retraction motions: A 3d finite element simulation. *Computer methods and programs in biomedicine*, 208, 106299.
- [14] Akıncı, S. Z., Karabulut, D., Sürmen, H. K., Yaman, O., Arslan, Y. Z. (2022). The Effect of PEEK-Rod Fixation Systems on Finite Element Lumbar Spine Model. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 783-786.
- [15] Islam, M. N., Khan, J., Ikematsu, K., Bagali, P. G., Raman, V. K. (2018). Digital Autopsy: Popular Tools for an Unpopular Procedure. *Arab Journal of Forensic Sciences & Forensic Medicine*, 1(7), 792-799.
- [16] Buchlak, Q. D., Milne, M. R., Seah, J., Johnson, A., Samarasinghe, G., Hachey, B., Brotchie, P. (2022). Charting the potential of brain computed tomography deep learning systems. *Journal of Clinical Neuroscience*, 99, 217-223.

- [17] Kumamaru, K. K., Fujimoto, S., Otsuka, Y., Kawasaki, T., Kawaguchi, Y., Kato, E., Aoki, S. (2020). Diagnostic accuracy of 3D deep-learning-based fully automated estimation of patient-level minimum fractional flow reserve from coronary computed tomography angiography. *European Heart Journal-Cardiovascular Imaging*, 21(4), 437-445.
- [18] Zhang, P., Lee, Y. I., Zhang, J. (2019). A review of high-resolution X-ray computed tomography applied to petroleum geology and a case study. *Micron*, 124, 102702.
- [19] Cieřlik, W., Szwajca, F., Wisłocki, K. (2022). Reverse engineering of research engine cylinder-head. *Combustion Engines*, 61.
- [20] Attar, H., Löber, L., Funk, A., Calin, M., Zhang, L. C., Prashanth, K. G., Eckert, J. (2015). Mechanical behavior of porous commercially pure Ti and Ti–TiB composite materials manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 625, 350-356.
- [21] Mensa, F. S., Muzzi, M., Spani, F., Tromba, G., Dullin, C., Di Giulio, A. (2022). When the Utility of Micro-Computed Tomography Collides with Insect Sample Preparation: An Entomologist User Guide to Solve Post-Processing Issues and Achieve Optimal 3D Models. *Applied Sciences*, 12(2), 769.
- [22] Zanetti, E. M., Ciaramella, S., Cali, M., Pascoletti, G., Martorelli, M., Asero, R., Watts, D. C. (2018). Modal analysis for implant stability assessment: Sensitivity of this methodology for different implant designs. *Dental Materials*, 34(8), 1235-1245.
- [23] Boas, F. E., Fleischmann, D. (2012). CT artifacts: causes and reduction techniques. *Imaging Med*, 4(2), 229-240.
- [24] Yu Z, Thibault JB, Bouman CA, Sauer KD, Hsieh J: Fast model-based X-ray CT reconstruction using spatially nonhomogeneous ICD optimization. *IEEE Trans Image Process* 20(1), 161-175 (2011).
- [25] Thibault JB, Sauer KD, Bouman CA, Hsieh J: A three-dimensional statistical approach to improved image quality for multislice helical CT. *Med Phys* 34(11), 4526-4544 (2007)
- [26] Boas FE, Fleischmann D: Evaluation of two iterative techniques for reducing metal artifacts in computed tomography. *Radiology* 259(3), 894-902 (2011).

- [27] Eckel, S., Zscherpel, U., Huthwaite, P., Paul, N., Schumm, A. (2020). Radiographic film system classification and noise characterisation by a camera-based digitisation procedure. *NDT & E International*, 111, 102241.
- [28] Başekim, C. Ç., Arslanoğlu, A. (2020). Bilgisayarlı Tomografide Radyasyon Doz Kontrolü ve Düşük Doz Çekim Teknikleri.
- [29] Kamalian, S., Lev, M. H., Gupta, R. (2016). Computed tomography imaging and angiography—principles. *Handbook of clinical neurology*, 135, 3-20.
- [30] Modjtahedi, B. S., Rong, A., Bobinski, M., McGahan, J., Morse, L. S. (2015). Imaging characteristics of intraocular foreign bodies: a comparative study of plain film X-ray, computed tomography, ultrasound, and magnetic resonance imaging. *Retina*, 35(1), 95-104.
- [31] Sollmann, N., Mei, K., Hedderich, D. M., Maegerlein, C., Kopp, F. K., Löffler, M. T., Noël, P. B. (2019). Multi-detector CT imaging: impact of virtual tube current reduction and sparse sampling on detection of vertebral fractures. *European radiology*, 29(7), 3606-3616.
- [32] De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J. P., Schmitt, R., Weckenmann, A. (2014). Industrial applications of computed tomography. *CIRP annals*, 63(2), 655-677.
- [33] Wu, Y., Saxena, S., Xing, Y., Wang, Y., Li, C., Yung, W. K., Pecht, M. (2018). Analysis of manufacturing-induced defects and structural deformations in lithium-ion batteries using computed tomography. *Energies*, 11(4), 925.
- [34] Kumar, V., Baburaj, V., Patel, S., Sharma, S., Vaishya, R. (2021). Does the use of intraoperative CT scan improve outcomes in Orthopaedic surgery? A systematic review and meta-analysis of 871 cases. *Journal of clinical orthopaedics and trauma*, 18, 216-223.
- [35] Modi, Y. K., Sanadhya, S. (2018). Design and additive manufacturing of patient-specific cranial and pelvic bone implants from computed tomography data. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(10), 1-11.
- [36] Khosravani, M. R., Reinicke, T. (2020). On the use of X-ray computed tomography in assessment of 3D-printed components. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 39(4), 1-17.

## KÖMÜR ÖZELLİKLERİNİN TEMİZ KÖMÜR TEKNOLOJİLERİNE (GAZLAŞTIRMA, SIVILAŞTIRMA, KARBON ELYAF VE KOK ÜRETİMİ) ETKİSİ: DERLEME

**Nazan YALÇIN ERİK\***

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fak. Jeoloji Müh. Bölümü, Sivas  
[nyalcin@cumhuriyet.edu.tr](mailto:nyalcin@cumhuriyet.edu.tr) <https://orcid.org/0000-0001-7849-8660>

### ÖZET

Kömür, petrol ve doğal gaz gibi diğer fosil yakıtlara göre daha bol, küresel coğrafi yayılım olarak daha homojen, madenciliğinin nispeten kolay ve düşük maliyetli olması nedeniyle geçmişten günümüze değin dünyada en fazla kullanılan ve tercih edilen enerji kaynağıdır. Bununla birlikte son 20 yılda küresel ölçekte etkileri artarak kendini gösteren fosil yakıtlara bağlı sera gazı etkileri ve çevresel felaketler bu kaynak için alternatif yakıtlar bulunması yanı sıra kömürün temiz yakma teknolojileri geliştirilmesini de zorunlu kılmıştır. Temiz kömür teknolojileri, kömür madenciliğinden itibaren tüm kullanımında hem çevresel olarak kabul edilebilirliğini hem de verimliliğini artıran teknolojiler olarak tanımlanabilir. Son yıllarda dikkat çekici boyutta bilimsel araştırmaların ve sektörel uygulamaların yapıldığı birkaç uygulama özellikle dikkat çekicidir. Bahsedilen bu uygulamalardan olan kömürlerin gazlaştırma, sıvılaştırma, kok ve karbon elyaf üretimi için hammadde (kömür) seçiminde petrografik, petro-fiziksel ve mineralojik özellikler olmak üzere birçok bilimsel parametreye dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada gazlaştırma ve sıvılaştırma gibi temiz kömür teknoloji uygulamalarında kullanılacak kömürlerin organik bileşim ve mineral madde içeriği, kömürleşme derecesi, eser elementlerin dağılımı, yapısal bileşim ve gözenek yapısı özelliklerinin bu uygulamalara olan etkisinin açıklanması hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Temiz Kömür Teknolojileri, Sıvılaştırma, Gazlaştırma, Karbon fiber, Linyit

**\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)**

**Atf (Citation):** Erik, N., Y., "Kömür Özelliklerinin Temiz Kömür Teknolojilerine (Gazlaştırma, Sıvılaştırma, Karbon Elyaf ve Kok Üretimi) Etkisi: Derleme", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4(2): 22-56, 2022.

**Geliş (Received):** 18/11/2021

**Kabul (Accepted):** 25/01/2022

**Yayın (Published):** 31/12/2022

## EFFECT OF COAL PROPERTIES ON CLEAN COAL TECHNOLOGIES (GASIFICATION, LIQUIDATION, COAL CARBONIZATION AND CARBON FIBER PRODUCTION): REVIEW

### ABSTRACT

It is the most widely used and preferred energy source in the world from past to present, due to its more abundant global geographical distribution, more homogeneous, relatively easy and low cost mining compared to other fossil fuels such as coal, oil and natural gas. In addition to this, the greenhouse gas effects and environmental disasters due to fossil fuels, whose effects have increased on a global scale in the last 20 years, have necessitated the development of clean burning technologies for coal as well as the discovery of alternative fuels for this resource. Clean coal technologies can be defined as technologies that increase both its environmental acceptability and efficiency in all its use, starting from coal mining. A few applications in which remarkable scientific research and sectoral applications have been made in recent years are particularly noteworthy. It is necessary to pay attention to many scientific parameters, including petrographic, petro-physical and mineralogical properties, in the selection of raw materials (coal) for gasification, liquefaction, coke and carbon fiber production of coals, which are among these applications. In this study, it is aimed to explain the effects of organic composition and mineral matter content, carbonization degree, distribution of trace elements, structural composition and pore structure properties of coals to be used in clean coal technology applications such as gasification and liquefaction.

**Keywords:** Clean Coal Technologies, Liquefaction, Gasification, Carbon fiber, lignite

### 1.GİRİŞ

Enerji, tüm insanlık tarihinde olduğu gibi günümüz modern yaşamının da kaçınılmaz bir parçasıdır ve gelecekte de olmaya devam edecektir. Elektrik, ulaşım, ısınma gibi yaşamın temel ihtiyaçlarının çoğu enerji sektörü ile ilgilidir ve dünyanın enerji ihtiyacı ağırlıklı olarak yenilenemeyen kaynaklardan yani fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynaklarından en önemlisi ise kullanım süresi, yaygınlığı ve uygulama alanları nedeniyle kömürdür. 19. yüzyılda endüstri devrimi ile başlayan enerji sektöründeki hakimiyeti büyük ölçüde petrol, nükleer enerji, doğal gaz nedeniyle azalsa da varlığını ve etkisini hep korumuştur. Özellikle 1990'lı yıllardan sonra daha da belirginleşen ve

kamuoyunun dikkatini çeken çevresel etkileri bile yaygın kullanımını çok fazla etkileyememiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve ABD Enerji Bakanlığı (DOE)'nin enerji senaryolarına göre küresel enerji sektöründe 2035 yılına kadar fosil yakıtların payının %79, kömürün payının ise %29 civarında olacağı belirtilmektedir. Bu nedenle, kömür, çevresel endişeler ne olursa olsun, enerji sektörü için tüm dünyada en önemli ve aslında hep güvenilen stratejik bir enerji kaynağıdır [1].

BP'nin World Energy-2019 İstatistiksel İnceleme raporuna göre, dünyanın kanıtlanmış kömür rezervi miktarı 1.054.782 milyar ton [1], ülkemizin toplam kömür kaynağı (Linyit, asfaltit, taşkömürü) ise toplam 20,66 milyar ton 'dur. Türk linyitlerinin ısı değerleri 1,100 Kcal/kg ile 4,300 kcal/kg arasında değişiklik göstermekle birlikte yaklaşık %90'ının alt ısı değeri 3,000 kcal/kg'ın altındadır [2].

Kömürün coğrafik olarak yaygın, diğer fosil yakıtlara göre kolay ve düşük maliyetli üretimi, daha basit teknoloji ile enerji dönüşümü sağlanabilir bir enerji kaynağı olması gibi avantajları yanısıra, taşınma-depolanma zorlukları ve yüksek karbon emisyon özellikleri gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Küresel ölçekte petrol ve ilişkili yakıtlarda olduğu gibi iklim değişikliği ile ilgili sorun oluşturma potansiyeli oldukça yüksektir. Bu nedenle kömür ve kömür endüstrisi, küresel iklim değişikliği konusunun merkezinde yer almaktadır. Gelişmekte olan ülkeler için enerjide dışa bağımlılıktan kurtulmanın başlıca yolu ise; özellikle kömür gibi yerli kaynakların kullanımınıdır. Ancak, çevresel faktörler bunu sınırlayan en önemli bariyerdir ve kömür endüstrisinin "Temiz Kömür Teknolojileri"ne geçiş serüveni de tam burada başlamaktadır [3]. Aslında bu yeni sürecin temelinde madenden alınan kömürün mümkün olduğunca temizlenerek (yıkama tesislerinde) kullanılması bulunmaktadır. Ancak, gelişen teknoloji ile bu anlayış yanısıra kömürden daha fazla verim elde etmek, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> emisyonlarını ve katı atıkları da azaltmak prensibi de yaygınlaşmıştır. Bu nedenle, "Temiz Kömür Teknolojileri (CCT'ler)"; *kömür çıkarma, hazırlama ve kullanmanın hem verimliliğini hem de çevresel açıdan kabul edilebilirliğini artırmak için tasarlanmış teknolojiler* olarak tanımlanır. Bu teknolojiler emisyonları ve atıkları azaltırken, her bir ton kömürden kazanılan enerji miktarını da artırır [3].

Yeraltı kömür gazlaştırma (UCG) teknolojisi, yüzeyde kömür gazlaştırma, kombine çevrim (IGCC) sistemleri, karbon yakalama ve depolama (CCS) uygulamaları kömürün temiz

yakıt olarak kullanımı amacıyla geliştirilmiştir [4]. Bu süreçte daha verimli ve çevreye daha uygun kömür kullanımı ile katma değeri daha yüksek ürünlerden olan üre, amonyak, metanol, gübre, sentetik doğalgaz (SNG), dizel yakıt, uçak yakıtı ve petrokimyasallar ile kükürt, sülfürik asit gibi yan ürünlerin elde edilebilmektedir ve nedenle kömür gazlaştırma konusu sektörel ilginin en üst sıralarında yer almaktadır [3], [5]. Elbette tüm bu katkılar ülkemiz gibi enerjide dışa bağımlı ülkeler bakımından linyit gibi yerli kaynakların daha verimli kullanılması, enerji çeşitliliğinin artırılması, enerjide kendine yetebilme ve milli gelir artışı açısından da oldukça önemlidir.

Bahsedilen tüm bu teknolojik uygulamalar tüm kömür tipleri için uygun değildir ve kömürlerin özellikle kül, nem, sabit karbon ve uçucu madde içerikleri, elementer bileşimi, tane boyutu, kekleşme özelliği ve külün erime sıcaklığı gibi özellikleri temiz kömür teknolojilerinin uygulanması sırasında önemli parametreleridir [6], [7] (Tablo 1). Ülkemizde, kullanılabilir rezervi kısıtlı olan yüksek kaliteli kömürlerin elektrik üretimi ve diğer uygulamalardaki kullanım payının düşük olması, düşük kaliteli kömür rezervlerinin ülkemiz enerji güvenliği açısından değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu çalışma ile ülkemizde de araştırma ve proje geliştirme faaliyetleri devam eden düşük kaliteli linyitlerin gazlaştırma ve sıvılaştırma dönüşümü için seçimi sırasında dikkat edilmesi gereken kimyasal, petro-fiziksel özellikleri geniş bir literatür taraması neticesinde elde edilen veriler ile sunulmaya çalışılmıştır.

**Tablo 1.** Farklı kömürleşme derecelerindeki kömürlerin kimyasal, elementer bileşim özellikleri ile kalori değerleri (Orem ve Finkelman, 2003; Miller, 2011; Speight, 2015).

Kömürleşme Derecesi	Kimyasal Özellikler				Elementer Bileşim					Atomik Oranlar		Kalori Değeri (MJ/kg)
	Nem	Sabit Karbon	Uçucu Madde	Kül	H	C	N	O	S	H/C	O/C	
Antrasit	3-6	>98	<2	4-15	1.5-3.5	75-85	0.5-1	5.5-9	0.5-2.5	0.25	0.05	30.23-34.89
Metaantrasit		92-98										
Antrasit		86-92										
Semi antrasit												
Bitümlü	2-15	78-86	14-22	4-15	4.5-6	65-80	0.5-2.5	4.5-10	0.5-6	0.5-0.75		>32.56
Düşük Uçuculu											0.05	
Orta Uçuculu		69-78	22-31								-0.1	
		<69	>31							0.6-0.75	0.1	
Yüksek Uçuc. A												
Yüksek Uçuc. B												30.23-32.56
Yüksek Uçuc. C												24.42-30.23
Alt Bitümlü	10-25	30-50	28-45	3-10	5.5-6.5	55-70	0.8-1.5	15-30	0.3-1.5	0.75-1	0.15	24.42-26.74
Alt Bitümlü A												22.09-24.42
Alt Bitümlü B												
Alt Bitümlü C												
Linyit	25-45	25-40	24-32	10-50	6-7.5	35-45	0.6-1.0	38-48	0.3-2.5	0.8-1.2	0.2-0.5	9.3-19.3

## 1.1. Gazlaştırma sürecinin tarihsel gelişimi

İlk olarak 1860 yılında K.W. Siemens tarafından uygulanan kömür gazlaştırma prosesi 1920- 1950 yılları arasında teknolojik olarak önemli gelişmeler göstermiştir. İlk patent 1909 yılında Büyük Britanya’da A.G. Betts tarafından alınırken, 1912’de William Ramsey Durham’da (İngiltere) ilk saha testini gerçekleştirmiştir. Birinci Dünya savaşı nedeniyle askıda kalan proje 1928-1939 yılları arasında Sovyet araştırmacılar tarafından tekrar ele alınmış ve ilk yer altı testi Donets ve Moskow kömür havzalarında gerçekleştirilmiştir [8].

2. Dünya Savaşından sonra başlayan enerji kıtlığı ve Sovyetler birliğinin geliştirdiği yeni teknolojinin başarılı sonuçları 1947-1950 yılları arasında İtalya, İngiltere, Fransa, Belçika ve Amerika’da UCG testlerinin yapılmasını sağlamıştır. Fakat bu testlerin hiçbiri endüstriyel ölçekte ve sürdürülebilir bir gelişim sağlayamamıştır. Buna karşın Sovyetler Birliği’ndeki çalışmalar devam ettirilmiş, Shatsky, Angren ve Yuzhno-Abinsk’de yeraltı gazlaştırma ile şehir elektriği üretilmiştir [8].

1950’li yıllardan itibaren taşkömürünün koklaştırılma sürecinde yan ürün olarak üretilen benzen ve asfalt, başlıca boya ve ilaç sanayiinde hammadde olarak kullanılmıştır. 1973 yılında etkisi görülmeye başlanan 1. petrol krizi nedeniyle kömürün teknolojik olarak dönüştürme süreçlerine (gazlaştırma ve sıvılaştırma) olan ilgi de yeniden artmıştır [8]. 1995 yılından itibaren dünyanın pek çok ülkesinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanan gazlaştırma teknolojisi günümüzde en hızlı gelişen AR-GE ve uygulama konularından birisi haline gelmiştir.

Günümüzde Çin, ABD ve Güney Afrika gibi ülkelerin liderlik yaptığı 28 ülkede aktif haldeki gazlaştırıcı sayısı 863 adettir. Kömür gazlaştırma teknolojisini 1950’lerden sonra en etkin uygulayan ülke ise Güney Afrika’dır [9].

## 1.2. Türkiye’de gazlaştırma sürecinin gelişimi ve güncel durum

Bilindiği üzere ülkemiz özellikle fosil yakıtlar (petrol, kömür ve doğal gaz) açısından sınırlı kaynaklara sahiptir ve enerji ihtiyacının önemli kısmını ithalatla karşılamaktadır. Ülkemizde termik santraller ve evsel yakıt olarak kullanılan kömürler kül, nem ve kükürt oranları yüksek, ısıl değerleri düşük olan linyitlerden oluşmaktadır [10]. Küresel ölçekte hızla artan temiz kömür teknolojileri araştırmalarına ülkemizde de üniversiteler veya araştırma merkezlerinde yapılan çalışmalarla katkı sağlanmaktadır [11].

Gazlaştırmanın Türkiye’deki öyküsü Azot Sanayii T.A.Ş.’nin kurulması ile 1955’te başlamış



olmasına rağmen, 2008 yılına kadar etkin bir araştırma veya uygulama gerçekleştirilmemiştir. TKİ'nin 2008 yılında başlattığı temiz kömür teknolojilerine yönelik Ar-Ge çalışmaları ile bu konu tekrar gündeme alınmıştır. TKİ tarafından, 2009 yılından itibaren Soma, Tunçbilek ve Seyitömer kömürlerinin gazlaştırılması ile ilgili çeşitli test ve analiz çalışmaları yapılmış, Soma ve Tunçbilek kömürlerinin bu tip dönüşümler için uygun özellikte olduğu belirlenmiştir [11], [12]. Tunçbilek kömürlerinde gazlaştırma pilot tesisi inşasına başlanmış ve 2012 yılında devreye alınmıştır. Soma'da ise 2012 yılında ticari amaçlı "Soma Kömür Gazlaştırma Projesi"nin yapılmasına karar verilmekle birlikte, ilk yatırım maliyetinin yüksekliği ve teknoloji transferi gerektirmesi nedeniyle proje rafa kaldırılmıştır. Petrol ve doğal gaz kaynaklı gazlaştırma tesisleri ise; 2018 de açılan Soccar Star (İzmir), Tüpraş (İzmir), Gemlik Gübre (Bursa) ve Kocaeli (İzmit) Rafinerileridir.

## 2. Kömür Gazlaştırma Teknolojisi

### 2.1 Gazlaştırma teknolojisi nedir?

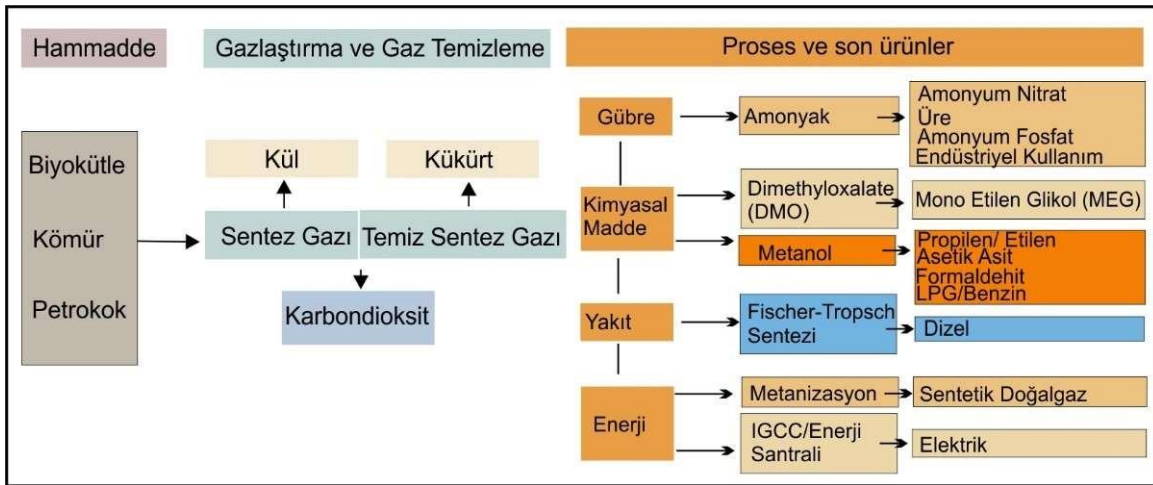
Gazlaştırma, kömür, petro-kok, biyokütle, evsel veya sanayi atıkları gibi karbonca zengin herhangi bir maddenin yüksek ısı ve basınç (>700 °C ve <10 MPa) altında oksijen ve buhar kullanılarak, yanma olmaksızın, kimyasal reaksiyon yoluyla sentez gazına (sentetik gaza) dönüştürülmesidir [13], [14]. Sentez gazı (syngas); genel anlamda %30-60 oranında karbon monoksit, %25-30 hidrojen, %0-5 oranında metan, %5-15 oranında CO<sub>2</sub>, su buharı, kükürt, hidrojen sülfat ve amonyak içermektedir. Bu gaz, sonrasında bir dizi işlemde geçirilerek; gübre (amonyak, üre), boru hattına uygun sentetik doğalgaz (SNG), hidrojen ve ulaşımda kullanılan yakıtlar (dizel ve jet yakıtı), petrokimyasallar, metanol, etanol, polietilen (PE), polipropilen (PP), Dimetil Eter (DME) ve asetik asit gibi yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir. Sentez gazı ayrıca elektrik enerjisi üretiminde Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim Teknolojileri vasıtasıyla (IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle) yüksek verimle ve daha çevreci olarak tüketilmektedir

### 2.2. Gazlaştırma süreci

Yakma işleminden farklı olarak, kömürün gazlaştırılması, sınırlı miktarda oksijenle eksik yanmasını ifade eder. Esas olarak kömürün kül olmayan kısmının orijinal hammadde ile ısı değeri mümkün olduğunca yüksek olan gaza dönüştürülmesini amaçlar [15]. Kömür gazlaştırma işlemi başlıca, dehidrasyon, piroliz, yanma ve gazlaştırma aşamalarından oluşmaktadır (Şekil 1). Gazlaştırma işleminde karbondioksit yakalama ve depolama

amaçlanıyorsa, bahsedilen adımlara ek olarak su-gaz kayması ve metanlaşma reaksiyonları da yer alır. Kömürden gaz üretimi, yer üstü ve yer altı gazlaştırma prosesi olarak iki şekilde yapılmakta, gazlaştırıcı olarak su buharı, hava, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> veya bunların karışımları kullanılmaktadır [16]. En basit ifadeyle bu süreç; öğütülmüş ve kurutulmuş kömür numunelerinin buhar ve hava veya oksijen ile gazlaştırıcıya beslenmesi ile başlar (Şekil 1). Gazlaştırma reaksiyonunun yüksek basınçta (10 MPa'ya kadar) ve daha yüksek sıcaklıklarda, genellikle 800 °C ile 1900 °C arasında olması beklenir.

Gazlaştırma ortamı, reaksiyon ürününü büyük ölçüde etkilemektedir [16]. Yeraltı kömür gazlaştırma (UCG-YKG) prosesi kalorifik değeri düşük olan veya klasik madencilik yöntemleriyle çıkarılmayan kömürlerin, oksijen (oksijen, zenginleştirilmiş hava, hava) ve buhar ile yanabilir bir gaz (yapay gaz) haline dönüştürülmesinde kullanılan bir yöntemdir (Şekil 2). Yapay gaz (syngas, sentez gazı) içeriğinin çoğu karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), hidrojen (H<sub>2</sub>), ve metandan (CH<sub>4</sub>) oluşmaktadır.



**Şekil 1.** Gazlaştırma prosesinin genel süreci ve elde edilen ürünler

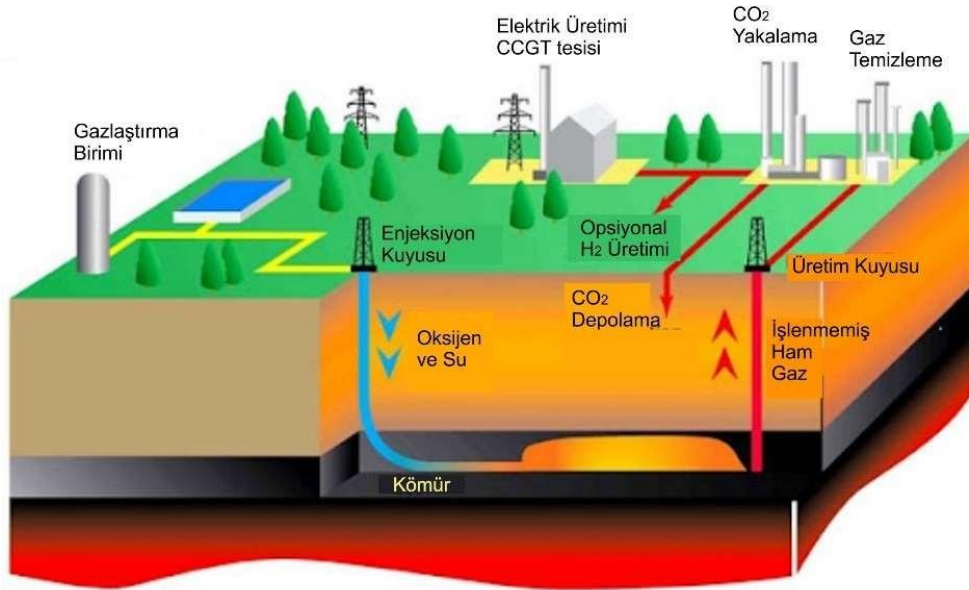
Gazlaştırma için kullanılacak gazlaştırıcı türü, hammadde olarak kullanılacak kömürün cinsi, üretilen gazın özelliği ve kalorisine göre seçilmektedir. Genelde gazlaştırma reaktörleri; Sabit yatak gazlaştırıcı (aşağı akışlı, yukarı akışlı), Akışkan yatak gazlaştırıcı, Sürüklemeli yatak gazlaştırıcı, Eriyik tipi gazlaştırıcı ve Plazma gazlaştırıcıdır.

### 3. Kömür kimyasal özelliklerinin temiz kömür teknolojilerinde oynadığı rol

Kömür, doğası gereği oldukça heterojen bir malzemedir [17]. Özellikle oluşumuna katkıda bulunan bitkisel malzemenin türü, bolluğu, oluşum ortamının fiziko-kimyasal özellikleri,

bataklık paleo-coğrafik özellikleri, kömürleşme süreci bu heterojen yapının daha da karmaşık hale gelmesine neden olurken, ticari ve bilimsel çalışmalarda farklı sınıflamalarla alt gruplara ayrılmaktadır. Tablo 1. Kömürleşme sürecinde geçirdiği tüm jeokimyasal, biyokimyasal süreçler kömürlerin bileşimlerini de doğrudan etkilemektedir. Basit bitkisel yapıların birikimi ile başlayan kömürleşme süreci kimyasal özelliklerine göre kovalent ve kovalent olmayan bağların olduğu heterosiklik monomerlerden oluşan çapraz bağlı bir makromolekül olarak tanımlanmasını sağlar [18].

Kömürün kimyasal yapısı bir ile üç halka arasında değişen ve alifatik zincirlerle bağlanan aromatik halkaların oluşturduğu katmanlardan oluşmaktadır. Kömürleşme sırasında, alifatik zincirde bulunan metil karbonlar aromatik karbonlara dönüşerek aromatik birimler arasındaki mesafeyi azaltır ve kimyasal yapı yavaş yavaş aromatik özelliğe dönüşür, daha fazla dayanıklılık ve sıklık kazanır [19], [20]. Bu süreç tamamlandığında kömür bileşimindeki nem ve uçucu maddeler kaybolurken, karbon ve kömürün birim ağırlığı başına düşen enerji miktarı (kalori) artar.



Şekil 2. Yeraltı gazlaştırma teknolojisi işlem süreci ve sistem unsurları

Kömür kimyasal bileşimi mekanik davranışını da büyük ölçüde etkilemektedir. Organik maddenin bileşimi ve ayrışma derecesi, kimyasal yapıyı değiştirirken, farklı kömür mukavemeti ve elastisite modüllerine de neden olmaktadır [19], [21], [22], [23]. Düşük dereceli kömürler yüksek konsantrasyonda alifatik karbon (Ca1-Ca1), yüksek dereceli

kömürler ise aromatik-alifatik karbon ( $C_{ar}-C_{al}$ ) ve aromatik karbon ( $C_{ar}-C_{ar}$ ) bağlarıyla karakteristiktir. Bu alifatik ve aromatik karbon bağları, maksimum 450 kJ/mol yüksek bağ enerjisine sahip aromatik karbon bağları ile farklı bağ enerjilerine sahip olup, alifatik karbonlarınki 300 kJ/mol'dür [19], [24]. Bağ enerjilerindeki artış, kömür mukavemetini etkiler ve dolayısıyla kömür olgunlaştıkça mukavemeti de artar.

Kömür klit veya kırıklarında dolgu şeklinde bulunan kalsit mineralleri, partiküller arasındaki taneler arası gerilimi azaltır ve bu da kömürün gözenekliliğini ve geçirgenliğini artırarak kömürün sürtünme ve kohezyon mukavemetini etkiler [25]. Ancak nemsiz (kuru) koşullar altında kalsit mineralleri, yüksek direnci nedeniyle kömürün Young Elastisite Modülünün iyileşmesine neden olur [26]. Normalde kamalar, kırıklar veya gözenek boşluklarında bulunan kil mineralleri, mineral veya maseral fazda kırılmaya yol açan su adsorpsiyonu ile şişmeye karşı oldukça hassastır. Kırılma, kömür yapısında depolanan elastik enerjiyi tüketir ve giderek azalması, kömürün mekanik mukavemetinde düşüşe neden olur [25], [27].

### 3.1 Karbonizasyon (Koklaşma)

Kömürün, oksijensiz (veya inert) ortamda ısıtılması ile karbon içeriğinin yükseltilmesi karbonizasyon veya koklaşma olarak tanımlanır. Kömürün, havasız ortamda ısıtılması sonucunda yapısındaki organik grupların parçalanarak gaz ve yoğunlaşabilir katran olarak kömürden ayrılma süreci sonucunda elde edilen karbon yüzdesi çok yüksek, katı maddeye de 'kok' denir. Kömürlerin ısı işleme tabi tutulması esnasında, katran çıkışı (sıvı ürünler) 550- 600 °C arasında son bulurken, gaz çıkışı 900-1000 °C'a kadar devam etmektedir. Eğer karbonizasyonun amacı sıvı ürün eldesi ise, o zaman 600 °C'ye kadar ısıtmak yeterlidir. Ancak hedef metalürjik prosesler için kok üretimi ise, karbonizasyon sıcaklığı yüksek (900-1000 °C) olur. Kok, bir yakıt kaynağı olarak önemli olmakla birlikte, indirgenmiş demiri karbonize etmesi nedeniyle metalürjik işlemler için de oldukça önemlidir [28].

Koklaşma özelliği, her kömürde olmayıp sadece belirli bir grup taşkömüründe vardır. Koklaşma özelliği olan kömürler, 350-500 °C arasında yumuşayarak akışkan (koyu bir hamur şeklinde) hale gelirler ve buna kömürün plastikleşmesi adı verilir. Karbonizasyon kömür özelliklerinden oldukça etkilendiği için, uygun kömür seçimi ile kok kalitesinin kontrol edilmesi de çok önemlidir. Bunlar;

### 3.1.1 Organik bileşim ve kömürleşme derecesi

Kömür oluşumu sırasında maserallerin türü, değişim/dönüşüm derecesi, üretilen kok kömürünün özelliklerini doğrudan etkilemektedir [28], [29]. Bazı maserallerin çeşitli sıcaklık aralıklarında sahte-sıvı (pseudo) bir malzeme olarak hareket etmesi özellikle kok ve koklaştırma işlemlerinin mukavemetini etkilemektedir [30].

Kömürün kalitesi arttıkça alifatik karbon yapısı azalır, aromatik karbon yapısındaki artışla moleküler yapısı düzene girer [28], [31]. Bu yapı, aromatiklerin daha kararlı özelliği ve reaksiyonlar için daha iyi koşullara ihtiyaç duyması nedeniyle, daha fazla reaktif olmayan yapı anlamına gelir. Bu nedenle, yüksek dereceli kömürler daha reaktif malzeme gerektirdiğinden karbonizasyon işlemi için uygun değildir, daha alifatik yapıya sahip düşük dereceli kömürler tercih edilir.

### 3.1.2 Kimyasal bileşim

Kömürlerin sabit karbon ile uçucu madde içeriği katran, petrol ve kok verimini belirlemektedir. Özellikle yüksek uçucu bileşiklere sahip reçinelerin ve sporların varlığı ile gelişen yüksek uçucu içerik, kömürün petrol ve katran verimini artırır. Koklaştırma için genellikle %15-45 aralığında uçucu madde içeren kömürler tercih edilmektedir [28], [29]. Kok üretimi, karbonlaştırılan kömürün türünden bağımsız olarak sabit karbon miktarı ile doğrudan ilişkilidir ve karbon artışı doğrudan kok üretimini artırır. Yüksek kalorifik değer, karbon ve kül içeriği, yüksek füzyon sıcaklıklarına sahip kömür, biraz daha sert ve daha az kırılabilir olan kok üretimine neden olurken [30], aynı miktarda uçucu madde içeren kömürlerdeki daha düşük oksijen oranı katran verimini düşürür.

Yüksek nem, azot, hidrojen ve oksijen içeriğine sahip kömürler, büyük hacimlerde kok gazı üretimini sağlar. Ancak, üretilen kok genleşme eğilimindedir ve fazla genleşen kömürler kok fırınlarına da zarar verebilmektedir [30], [31]. Düşük nem içeriği ise kok kalitesinin artmasını sağlar. Özellikle düşük kömürleşme değerli kömürlerde (linyit gibi) nem oranının azaltılabilmesi için proste kuru kömür şarj aşamaları geliştirilmiştir ve bu, karbonizasyon sırasında daha az ısı kullanılmasını, verimin artmasını ve kok kalitesinin iyileştirilmesini sağlamaktadır [32]. Kömürdeki az miktarda kükürt ve fosfor ise ürünlerin kalitesini etkileyen diğer bileşenlerdir. Fosfor, düşük sıcaklıklarda bir malzemede kırılabilirliği artırırken, kükürt, çeliğin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir [28].

### 3.1.3 İnorganik bileşim

Kömürlerin teknolojik değişim süreci için uygunluğu değerlendirilirken, külün bileşimine, özellikle  $Al_2O_3$ ,  $SiO_3$  ve alkalilerin varlığına çok dikkat edilmelidir. Silika, sıcak metalin silikon içeriğini, alümina ise cürufun akışkanlığını etkilemektedir [25], [28]. Külde alkalilerin varlığı, fırında yüksek sıcaklıklı alanlarda süblimleşmelere yol açmaktadır [33], [34].

### 3.1.4 Mineral madde içeriği

Kömürün karbon içeriği ve kalorifik değeri külün cüruf olarak uzaklaştırılması için gerekli olan ek akı gereksinimi ile ters orantılıdır. Mineral madde, dolayısıyla yanma sonrasında giderek artan kül miktarı fırının ısı dengesini etkileyerek yakıt tüketimini de artırır [28]. Ayrıca, kok reaktivitesi ve alkali minerallerin etkilerini katalize etme özellikleri nedeniyle fırın işleminin kararlılığı üzerinde de olumsuz etkiye sahiptir [35], [36], [37].

### 3.1.5 Kömür öğütülebilirliği ve işlenebilirliği

Kömürün öğütülebilirliği doğrudan maserallerin bileşimi ile ilgili olmakla birlikte, kömürleşme derecesinden ve bileşimdeki mineral madde miktarından da etkilenir. Bitümlü kömür, linyit gibi kömür tiplerinden ziyade öğütülebilirlik indeksi 80 olan düşük uçucu metalürjik kömürler en kolay öğütülen gruptur [38]. Genellikle kömür işlenebilirliğinin zayıf olması, taşıma sistemindeki yoğun faz için transfer hatlarının tıkanmasına [39] ve sistemin tutuşma özelliğinin etkilenmesine neden olur.

## 3.2 Karbon fiber (elyaf) üretimi

Karbon fiber (CF) veya karbon elyaf, teknoloji ürünü ipliksi bir tür maddedir. Başlıca bileşimleri karbonlaşmış akrilik elyafıdır (orlon, katran ve naylon). Bileşimin yapısı çelikten 4,5 kat hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklıdır. Bununla birlikte yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, kolay üretim yöntemi ve korozyon direnci nedeniyle havacılık uygulamaları, uzay uygulamaları, spor araç gereçleri, karayolu taşıtları, askeri amaçlı malzemeler, elektronik malzemelerin yapımı için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Karbon fiber, kömür ve petrol gibi karbonlu doğal kaynakların damıtılması yoluyla üretilmektedir. Metalürjik kok üretimi sırasında karbonizasyon işleminin bir yan ürünü olan kömürden çıkarılan zift, farklı karbon malzemelerinin üretimi için hammadde olarak gerekli olan değerli bir aromatik hidrokarbon kaynağı oluşturur [40], [41], [42], [43], [44].

CF'lerin verimli üretimi için, sırayla kimyasal yapı (kimyasal bileşim), yapısal moleküler ağırlık gibi kömür parametreleri önemlidir.

### 3.2.1 Kimyasal yapı ve bileşim

CF üretiminde kullanılan ziftin bileşimi üzerinde özellikle oksijen bağ yapısı oldukça etkilidir. Yüksek oksijen oranlarına sahip kömür özütlerindeki oksijen atomları, ziftin ana bileşenleri olan aromatik karbonlara doğrudan bağlı değildir. Bunun yerine, mevcut enerji bir reaksiyon için nispeten düşük olduğunda hidrojen atomlarına bağlanırlar. Düşük dereceli kömürlerin kimyasal yapılarında olduğu gibi CH-zincir kuyruğunda konumlanan oksijen atomu, kömürü giderek daha reaktif hale getirir ve bu tip kömürden liflerin eğrilmesini son derece zorlaştıran bu yüksek reaktivitedir [45], [46]. Ayrıca karbon-karbon atomlarının çift bağı da önemlidir. Güçlü bir çift bağ, oldukça kararlı, güçlü bir aromatik yapının da göstergesidir. Ancak, bu aromatik yapı, kömürden döndürülebilir davranışa sahip bir zift elde edilmesi için gereken yapısal zincire ulaşmasını zorlaştırma eğilimindedir [40], [41], [46] [47].

Alifatik, düşük moleküler yapıli bileşenler, yani metil grupları, zift döndürülebilirliği için gereklidir. İki aromatik halkayı bir köprü gibi birbirine bağlayan karbonlar, ham maddenin geliştirilmiş doğrusallığı nedeniyle daha ince çaplı CF'lerin üretilmesini sağlar [40], [41], [47]. Kömür bileşimindeki az miktarda, özellikle, bitümlü kömür gibi yüksek dereceli kömür ve karbonizasyon için uygun olduğu düşünülen, yüksek alifatik karbon içeriği, daha döndürülebilir bir lineer yapı ile sonuçlandığından, onu CF'nin döndürülmesi için bir zorluk haline getirir [40], [41], [46], [47]. Kömür katranı ziftini petrol zifti gibi diğer öncü maddelerle karıştırmak ve kömür katranını çözeltiye veya ısıl işleme tabi tutmak, elde edilen öncül ziftin kalitesini de iyileştirebilmektedir.

### 3.2.2 Moleküler ağırlık dağılımı

Kömürün moleküler ağırlığı CF üretimi için oldukça önemlidir. Yüksek karbon-hidrojen mol oranı, polisiklik yapı nedeniyle büyük moleküler ağırlığa neden olmaktadır. Döndürülebilir ziftlerin verimini artırmak için damıtma sıcaklığının da artırılması gerekir [40], [41], [46], [47]. Öte yandan, yüksek oranda düşük moleküler ağırlıklı bileşikler nedeniyle eğirme işlemi sırasında açığa çıkan uçucu maddeler liflerin kolay kırılmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sabit olmayan bir moleküler ağırlık dağılımı lifin kalınlığının da

tek tip olmamasına neden olmaktadır [46].

### 3.2.3 Akışkanlık

Karbon elyaf üretimi için gerekli öncü ziftin hazırlanması sırasında kömür akışkanlığı önemli bir özelliktir ve mezofaz gelişiminin kontrol edilmesi sırasında hayati önem taşır. Ziftin viskozitesi, damlacığın ilk şeklini, jetin yolunu ve lif çapını olumsuz etkileyebilmektedir. Viskozite arttığında lif çapı artar ve bu da düzlem ve döndürebilirliği olumsuz yönde etkiler [44], [48], [49]. Kömür katran zifti, işlem sırasında açığa çıkan ısıyı artırarak liflerin stabilizasyonu için tüketilen enerjiyi azaltıp, stabilizasyon sürecini kolaylaştırdığı için uygulanabilir bir öncü alternatif sunar, yani yüksek reaksiyon ısısı ile en aza indirilmiş stabilizasyon sıcaklıkları verimli bir ısı işlem stabilizasyon süreci için gereklidir [48]. Ek olarak, yüksek aromatikliği, yüksek yumuşama noktasına sahip ziftin sabit bir şekilde döndürülmesi için gerekli bir kalite olan yüksek termal stabilitenin göstergesidir, çünkü eriyik eğirme normalde yumuşama noktasından 50 °C daha yüksek bir sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir [40], [41], [46], [47].

### 3.3 Kömür gazlaştırma

Kömür gazlaştırma, sentez gazı olarak adlandırılan gaz halinde bir yakıt üretmek için hava, oksijen, buhar veya bunların karışımı ile gerçekleşen bir kömür reaksiyonunu olarak tanımlanabilir. Gazlaştırma işlemi sırasında kömürün başlıca reaktivitesi, kül ve cüruf özellikleri, parçacık boyutu ve kömür topaklanma ve şişme özellikleri önemlidir [50]. Ayrıca, kömürleşme derecesi, nem, organik bileşim (bileşimdeki maseraller), mineral madde içeriği, kömür gözenekliliği ve yüzey alanından etkilenmektedir.

#### 3.3.1. Kömür reaktivitesi

##### *(1) Kömürleşme derecesi*

Kömürleşme derecesi, aslında paleotopografya ve paleoklim ile birlikte kömürleşme sürecine de bağlıdır. Kömürleşme ile kömürün organik ve inorganik bileşimi, kimyasal özelliği, gözenek yapısı değişiklik gösterir [51], [52], [53]. Kömür minerallerinin katalitik etkisinin, düşük dereceli kömürler için reaktivitenin başlıca kontrol faktörü olduğu, yüksek dereceli kömürlerin reaktivitesinin ise esas olarak kömür matrisinde bulunan mevcut aktif alanlar tarafından kontrol edildiği bilinmektedir [54].

Düşük dereceli kömürlerin organik bileşimleri yüksek uçucu madde, bol heteroatom ile az



miktarda aromatik yapıdan oluşur. Yapılarında ayrıca yüksek dereceli kömürlere kıyasla daha açık gözenekler ve artan oksijen-fonksiyonel gruplar bulunur [50]. Yüksek uçucu madde oranları, katalitik mineraller, karboksilik asitler, fenolik-fonksiyonel gruplar, yüksek konsantrasyonlu oksijen-fonksiyonel grupları, artan makro gözenek miktarı ve katalitik inorganik bileşenler düşük dereceli kömürlerin yüksek reaktivitesine katkıda bulunmaktadır [55], [56], [57]. Düşük dereceli kömürlerin yüksek nem içeriği, yanma alanındaki sıcaklığı, dolayısıyla gazlaştırma işleminin termal verimini düşürmektedir. Bunun sonucu olarak, ısı değeri artırarak sentez gazının kalitesini iyileştirmek için düşük dereceli kömürlerin kömür besleme oranlarının yüksek dereceli kömürlerden daha fazla olması gerekmektedir [50], [58], [59], [60].

## (2) Organik bileşim (kömür maseralleri)

Kömürün organik yapısı vitrinit, inertinit ve liptinit/eksinit olarak üç maseral grubundan oluşmaktadır. Dönüşüm sürecinde kömür bileşiminde bulunan her bir maseral farklı tepki verdiği için bu konu oldukça önemlidir [17], [61]. Kömür gazlaştırma işlemi sırasında maserallerin davranışsal özellikleri aşağıdaki gibidir:

**Vitrinit**—odunsu dokulardan oluşan ve kömürlerde en bol bulunan maseral grubudur. Nitelikleri ve reaktivitesi kömürün rankına göre değişir. Vitrinitçe zengin kömürler, yüksek gözenekli yapıya sahip ve katalitik aktivitesini geliştiren kalsiyum ve potasyum başta olmak üzere büyük miktarda mineral madde içeren özelliktedir. Aslında, vitrinitçe zengin kömürler, minerallerin varlığından bağımsız olarak yüksek gazlaştırma reaktivitesine sahiptir [62].

**Liptinit/exinite**—bu maseral grubu, sporlar, yaprak kütükülleri, bitki algleri gibi hidrojen açısından zengin bitkisel kaynaklardan oluşur ve çok reaktiftir. Şişme veya topaklaşma olmamasına rağmen, ısıtma sırasında erime kapasitesine sahiptir ve dolayısıyla kütle oranının büyük bir kısmı piroliz sırasında kaybolur [63], [64].

**İnertinit**—karbonca zengin, biyolojik olarak parçalanmış veya bataklık ortamında oksidasyon ya da yangınlardan etkilenen bitki parçalarından oluşan, reaktivitesi en düşük maseral grubudur. İnertinit, ısıtmaya maruz kaldığında yumuşamaz (erimez) ve piroliz yoluyla kütesinin sadece küçük bir miktarını kaybeder. Sonuç olarak CO<sub>2</sub>'ye karşı tepkisizliği nedeniyle zayıf bir gazlaştırma maddesidir. İnertinit bakımından zengin

kömürler, yüksek derecede kristalli dokuları ile yüksek oranda düzenlenmiş yapıdadır [65]. Ayrıca, çok fazla aromatik ve polikondens içerikli olmaları nedeniyle evsel yakıt olarak yanma ve gazlaştırma teknolojileri için uygundur [65], [66].

Özetle, gazlaştırma sırasında kömürün karbon yapısındaki dönüşümden inertinit ve vitrinit sorumludur, mineral maddedeki değişim ise inertinit varlığına bağlanmıştır [31], [33].

### ***(3) Kömürün gözenekliliği ve yüzey alanı***

Düşük dereceli kömürler, gazlaştırma işlemi sırasında oksijen buharı reaksiyonu için gerekli aktif bölgelere sahip, oldukça açık gözenekli yapıya sahiptir. Kömürün reaktifliği ile mikro gözenekliliği arasında, tüm yüzey alanıyla doğru orantılı, aktif yüzey alanına dayalı bir ilişki bulunmaktadır [50], [57], [67]. Aslında, gazlaştırma reaksiyonları, mikro gözenekler yerine makro gözeneklerin yüzeyinde gerçekleşir [68]. Bununla birlikte, aktif bölgelerin konsantrasyonu veya yüzey alanı reaksiyonu ile gaz halindeki reaktanların aktif bölgelere erişilebilirliği arasında bir ilişki vardır, bu da gözeneklerin yapısının kömür reaktivitesi ile bağlantılı olabileceğini gösterir [69]. Kömür gözenekliliği için kritik bir değere (%70-80) ulaşıldığında, ince öğütülmüş partiküller halinde parçalanma meydana gelir, böylece reaktivite iyileştirilir, dolayısıyla kömür dönüşümü sağlanır [70].

### ***(4) Kömür bileşimindeki mineral madde***

Gazlaştırma için kullanılan kömürlerde en yaygın bulunan mineraller, başlıca kaolinit olmak üzere az miktarda kuvars, illit, dolomit, kalsit, pirit ve eser miktarda rutil ve fosfattır [25], [33]. Kalsit ile dolomit vitrinit maseralleri ile, Ca ve Ti organik madde ile ilişkilendirilen inorganik elementlerdir.

### ***(5) Kömür minerallerinin etkisi***

Kömürdeki mineral maddenin karbon matrisi ile etkileşimi kömür reaktivitesi üzerinde oldukça önemlidir. Mineral madde, yüksek dereceli (ranklı) kömürlerde olduğu gibi karbon matrisinin içine gömülü veya karbon matrisine bağlı ayrı taneler şeklinde olabilir. Gömülü mineral madde yüksek bir özgül ısı kapasitesine sahiptir ve daha fazla ısıyı emerek sıcaklık düşüşüne ve ardından düşük kömür reaktivitesine neden olmaktadır [71]. Gözenekler içinde tutulan ve/veya karboksilik asitlere kimyasal olarak bağlanan çözünmüş tuzlar şeklindeki mineral madde ve değişebilir iyonlar şeklindeki fenolik gruplar ise düşük dereceli kömürlerin reaktivitesi üzerinde yüksek dereceli kömürlerden daha güçlü bir etkiye sahiptir

[72].  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^+$  gibi inorganik metal iyonlarının da  $Mg^+$  ve  $Fe^+$  karboksilik asitleri veya fenolik grupları oluşturan hidrojen iyonları ( $H^+$ ) ile iyon alışverişi yaptıklarında kömür reaktivitesi ve dolayısıyla kömür gazlaştırma hızı üzerinde büyük etkisi vardır.  $Ca_2^+$  Ca ve CaO organik olarak kalsit ayrışması ile bağlanırken, su-gaz kayma reaksiyonunu teşvik ederek sentez gazı bileşimini etkilemektedir [50], [71], [73].

### 3.3.2 Kül ve cürufun özellikleri

#### (1) Mineral maddenin küle dönüştürülmesi

Teknolojik dönüşüm sürecinde işlem gören kömürde mineral maddenin soğuması kristobalit, manyetit, mullit, diyopsit ve anortit oluşumuna neden olmaktadır. Bu yeni oluşan fazlar ve özellikleri (kimyasal bileşim, füzyon sıcaklıkları ve cüruf viskozitesi), klinker, kül tortuları ve aglomerasyon, kirlenme ve korozyon riskini azaltmak için procesten önce dikkate gidilmelidir. Herhangi birinin oluşumu, gazlaştırma işleminin verimini ve kapasitesini düşürecek, bu da güç maliyetinde artışa neden olacaktır [74]. Magnezyumoksit ( $MgO$ ), demir oksit ( $Fe_2O_3$ ), silika ( $SiO_2$ ), kireç ( $CaO$ ), alümina ( $Al_2O_3$ ), titanyum oksit ( $TiO_2$ ), alkali bileşikler ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ), bazı kükürt ve klorür bileşikleri, yüksek gazlaştırma sıcaklıkları altında demir açısından zengin kalsiyum ile birkaç farklı bileşik oluşturarak birbirleriyle reaksiyona girebilmektedir [75], [76], [77], [78], [79], [80].

#### (2) Kül füzyon sıcaklığı

Kül füzyon sıcaklığı, gazlaştırma işlemi sırasında külün erime davranışını tanımlamaktadır. Düşük dereceli kömürleri gazlaştırırken, erimiş kaynaşmış tortuların oluşmasını önlemek için çalışma sıcaklığının külün birleştiği sıcaklıktan daha düşük, yüksek dereceli kömürler için ise yüksek olması gerekir. Bu, erimiş ısıtılmış külün (cüruf) reaktör duvarlarından aşağı akmasına ve reaktörden kolayca boşalmasına izin vererek cüruf oluşumuyla ilgili zorlukları azaltacaktır [81]. Kül füzyon sıcaklığının, kül üzerindeki akış potansiyelini gösteren ağırlıkça %  $SiO_2$ 'nin artmasıyla azaldığı ve  $Al_2O_3$  içeriğinin artmasıyla arttığı bulunmuştur [82].

### (3) Cüruf viskozitesi

Kömürlerin kül füzyon sıcaklığı benzer olsa da cüruf viskoziteleri farklı olabilmektedir. Kül füzyon sıcaklığının kül mineral bileşimine bağlı olması nedeniyle de farklı cüruf davranış özellikleri görülebilmektedir [82], [83], [84]. Cüruf viskozitesi, külün sıcaklığından ve kimyasal bileşiminden büyük ölçüde etkilenmektedir. Sıcaklıklar düşük olduğunda cüruf daha viskozken, yüksek sıcaklıklar ani refrakter aşınmasına yol açar [85]. Cüruf viskozitesi artan alümina ve silika oranı ile artarken, CaO, FeO, MnO<sub>2</sub> ve MgO mineralleri olduğunda azalır [86].

### (4) Kül kirliliği, Kül birikimi ve Aglomerasyon

Külde alkali metaller (alkali toprak metalleri, klorür, silikon, Na) ve kükürtün varlığı, bunların soğuk reaktör yüzeyleri veya boruların üzerinde birikmesine, sentez gazı akışına karışarak korozyona, cüruf oluşumuna ve kirlenmeye neden olabilmektedir [25], [34], [50]. Hatta emisyon kontrol cihazları ve diğer ekipmanlar üzerinde bile olumsuz etkileri söz konusudur [87]. Bu nedenle, inorganik maddelerin birikmesi, reaktör içindeki ısı transferini etkilemesi nedeniyle sistem verimliliğini önemli ölçüde değiştirmektedir. Egemen alkali türleri, klorürlerin yanı sıra sodyum ve potasyum hidroksitlerdir. Gazlaştırma işlemi sırasında kömürlerde bulunan az miktarda klor, sentez gazı soğutucularında biriken metal bileşiklerle etkileşime giren gaz halinde HCl üretir ve bu da FeCl<sub>2</sub>, NaCl ve CaCl gibi klorürlerin birikimini sağlar [76]. Bu gazlar nihai son kullanım ekipmanının korozyona uğramasına neden olmaktadır. Kül aglomerasyonu ise reaktördeki basınç düşüşü ve reaktör performansının kararsız olması ile ilgili zorluklara ve dolayısıyla gazlaştırma için verim kaybına yol açmaktadır [88].

#### 3.3.3 Kömür parça boyutu

Büyük boyutlu partiküller, kömürün reaktivitesini ve dolayısıyla sentez gazı kalitesini düşürme eğilimindedir. Ayrıca, reaktörde taşınma ve prosesi başlatma zorlukları da yaşanmaktadır. Düşük ranklı kömürlerin büyük partikül boyutları kullanılarak gazlaştırılması, klinker oluşumuna ve kanal oluşumuna yol açabilmektedir [89]. Daha ince (küçük tane boyutlu) kömür parçacıkları ise karbon dönüşümünü azaltarak sentez gazı üretimini azaltmaktadır [90].

### 3.3.4 Kömür topaklanması (kekleşme) ve şişmesi

Kömürün topaklanması ve şişmesi özellikle bitümlü kömürlerde görülen bir durumdur ve partiküllerin birbirine yapışarak, kümeler oluşturması metaplast olarak bilinen bir faza neden olur. Oluşan aglomera fazı, gazın akışını kesintiye uğratma ve bu nedenle termal verimliliği düşürme potansiyelindedir. Ancak, uçucu madde içeriği ağırlıkça %20'nin altına düştüğünde kömürün kekleşme potansiyeli de azalmaktadır [59]. Kömürün şişmesi, sistemin reaktivitesine, kömür parçalarının boyutu ve kullanılan kömürün yoğunluğu ile ilgilidir [70]. Ayrıca, kekleşme, hatların, ısı eşanjörlerinin, filtrelerin tıkanmasına ve kirlenmesine, dolayısıyla sistemin verimliliğini bozabilecek yüksek moleküler ağırlığa sahip katran oluşturmaya eğilimlidir [91].

### 3.4 Sıvılaştırma

Kömür sıvılaştırma, en basit ifadeyle kömürün sıvılara dönüştürülmesidir [58]. Kömürü sıvılaştırmanın doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki yöntemi vardır; Hidrojenasyon olarak da bilinen doğrudan sıvılaştırma yöntemi, bir hidrojen verici çözücü kullanılarak doğrudan kömürden sıvı yakıtların üretilmesidir. Dolaylı sıvılaştırma işlemi ise Fischer-Tropsch (FTS) yöntemi uygulanır. FTS prosesi, gazlaştırma prosesinden elde edilen sentez gazını kullanır ve bunu, Grup VIII'den farklı katalizörler ile sıvı hidrokarbonlara ve ilişkili oksijenli bileşiklere dönüştürür. Ürün karışımı, karbon monoksitin hidrojen oranına bağlıdır [37], [92], [93]. Sıvılaştırma sürecine etki eden kömür parametreleri Tablo 2' de özetlenmiştir.

#### 3.4.1 Kömürleşme derecesi

Kömürleşme derecesi, sıvılaştırma için en önemli kömür parametresidir (Tablo 2). Kömürlerin doğal süreç içinde hidrokarbon türüm potansiyellerini tahmin etmek için Tissot ve Welte [94] tarafından geliştirilen modelde, diyajenez evrim evresini (kömürün karbondioksit ve su olarak oksijeni önemli ölçüde kaybettiği bir evre) geçen ve katajenez evresine (organik madde ısıya maruz kaldığında petrol ve gaz oluşumu nedeniyle hidrojen ve karbonun kaybolduğu evre) ulaşan kömürler sedimanter havzalarda gömülme ile sıcaklık arttıkça ayrışma) hidrokarbon üretimi için büyük potansiyele sahiptir [17], [22], [23], [61], [94].

Kahverengi kömürden bitümlü kömüre, yani karbon içeriği %80-85 aralığında olan

kömürlere, geçişin yakınında yüksek bir sıvılaşma verimi elde edilmektedir [92]. Karbon içeriği %87 - 89 (orta uçucu bitümlü kömür) arasında olduğunda, sıvı hidrokarbon verimi keskin bir şekilde düşer. %90'dan fazla karbon içeriğine sahip yüksek dereceli kömürler (düşük uçucu bitümlü kömür ve antrasit) ise çoğunlukla reaktif değildir [92]. Hidrojenasyon sırasında parlak kömürün karbon içeriğindeki azalmayla birlikte petrol verimi azalırken, nem ve karbondioksit verimi artar [95]. Hidrokarbon verimi, ağırlıkça %30 dmf'ye yaklaşan yüksek oksijen içeriği ile sınırlıdır. Ayrıca, hidrojenasyon sırasında istenmeyen bir özellik olan nem içeriğinin de düşük olması gerekir [58], [92].

**Tablo 2** Sıvılaştırma süreci üzerinde önemli etkisi olan kömür parametreleri [91]

Parametre	Değerlendirme Yöntemi	Açıklama	Referans
Boyutu Kömür Rankı (Kömürleşme Derecesi)	1. Petrografik Analiz 2. Kimyasal ve Elementel Analiz	1.Yüksek uçucu madde içeren kömürlerden daha fazla katran ve petrol damıtılabilir 2 Eşit uçucu madde içeriğine sahip ancak daha yüksek oksijen oranı olan kömürlerden daha az katran ve petrol damıtılır. 3 Kömürün sıvı yakıtlara dönüştürülmesi için hidrojen içeriği ve alifatik yapı oranı yüksek, basit aromatik yapılı, düşük oksijen ve azot içeriğine sahip kömürler tercih edilir. 4 Yüksek oksijen içeriği sıvı yakıtların üretimini sınırlar, kömürün hidrojen içeriği sıvı hidrokarbonların oluşumuna maksimum katkıda bulunur. 5 Kömür sıvılaşma potansiyeli, kömürleşmeyle azalır. 6 Düşük dereceli kömürlerden yüksek viskoziteli ürün elde edilir ve bu da pompalama güçlüğüne neden olur. 7 Düşük dereceli kömürler düşük verim verse de, düşük dereceli damıtıkların oranı, azalan kömür derecesi ile artar.	Davis ve diğ. (1976), Durie (1982), Bertrand (1989), Peters ve diğ. (2000), Vasireddy ve diğ. (2011), Singh ve diğ. (2013), Speight (2014), Singh ve Mrityunjay (2018a, b)
Oran	Mikroskopik Tanımlama	Yüksek oranda spor ve reçine içeren maseraller, dolayısıyla yüksek uçucu içerikli maddeler, büyük miktarlarda sıvı hidrokarbon ve katran verir.	Durie (1982), Falcon ve Snyman (1986), Suarez-Ruiz ve Crelling

	Megasko bik Analiz	Parlak kömürler, sıvılaştırma için mat kömürlerinden daha uygundur	(2008), Speight (2014)
	Kalori Analizi	1. Bantlı kömürler yüksek kalorifik değere sahiptir, dolayısıyla yüksek reaktif maseral oranı nedeniyle yüksek sıvılaştırma verimleri bulunur. 2. 0,8-0,9 aralığında yüksek H/C atom oranlarına sahip yüksek reaktif maseral içerikli (vitrit ve liptinit) kömürler sıvılaştırma işlemi için uygundur.	
	Rock-Eval Piroliz Analizi	Tip III kerojen ile ilgili maseraller, gazın yanı sıra petrol üretme kabiliyetine sahiptir, ancak bunların çoğu gaz türümü için daha uygundur.	
<b>Mineral Madde İçeriği</b>		1. Kömürdeki pirit, kömür hidrojenasyonu üzerinde katalitik etkiye maruz kalma eğilimindedir. 2. Alümino-silikat mineralleri, kömürün hidrojenasyonu sırasında yüksek sıcaklıklarda katalizör gibi davranır. 3. Kömürdeki kalsiyum tortu oluşmasına ve dolayısıyla ekipmanda tıkanmaya neden olur.	Durie (1982), Vasireddy ve diğ. (2011), Singh ve diğ. (2013)
<b>Partikül</b>		Parçacık boyutu ile kömürün sıvı ürünlere dönüşümü arasında negatif ilişki bulunur.	Neavel ve diğ. (1981), Giri ve Sharma (2000), McMillen ve Malhotra (2006), Li ve diğ. (2008a, b), Heydari ve diğ. (2016)

## (1) Kimyasal yapı

Farklı kömür tiplerinin sıvılaştırma verimleri de farklıdır. Bu özellik ise kimyasal reaktiviteyi doğrudan etkileme potansiyeli olan kimyasal konfigürasyonla ilişkilidir [95]. Düşük dereceli kömürler daha fazla alifatik karbon ( $C_{al}-C_{al}$ ) bağına sahipken, yüksek dereceli kömürlerde aromatik-alifatik karbon ( $C_{ar}-C_{al}$ ) bağı ve aromatik karbon ( $C_{ar}-C$ ) bağı yapıları görülür. Karbon içeriğindeki artış ise, aromatik karbon bağının artışı ile sonuçlanmaktadır [95]. Yüksek bağ enerjisine sahip aromatik karbonlarla alifatik karbonların ve aromatik karbonların bağ enerjileri farklıdır [19], [24]. Aromatik yapıyı parçalamak için daha fazla enerji gerekeceğinden, kömürün reaktivitesi de azalır, bu nedenle yüksek dereceli kömürlerin düşük senkron verimi oluşur [58].

## (2) Porozite

Farklı kömürleşme derecesindeki kömürler, 50 nm'den büyük makro gözenekler, 2 nm ile 50 nm arasında değişen gözeneklere sahip mezo gözenekler ve 2 nm'den küçük gözeneklere sahip mikro gözenekler olmak üzere değişen gözeneklerden oluşan bir yapıya sahiptir. Kömürleşme süreci ile makro gözenekler azalırken, mezo gözenekler ve mikro gözenekler artar [96]. Kömür gözenekliliği en fazla doğrudan sıvılaştırma prosesini etkilemektedir. Bu nedenle kömürlerde yüzey alanı ve gözenek hacminin belirlenmesi, gazların ve sıvıların kömür parçacıklarının içine erişimi ile ilgili bilgi vermesi, yüzey alanı ile kimyasal reaktivite arasındaki korelasyonun kurulması için gereklidir [92].

### 3.4.2 Organik bileşim

Kömürün organik bileşimi (maseralleri), hidrokarbon üretme potansiyeli ile doğrudan ilişkilidir [97]. Kömürdeki organik bileşenlerin özellikleri, elde edilecek ürünlerin özellikleri ve verimi yanısıra, prosesin işleyişi açısından da büyük farklılık gösterir (Tablo 2). Genellikle sıvılaştırma kapasitesi en yüksek olan maseral türü füsendir. Başlıca kömür maseral gruplarından elde edilebilecek ağırlık bazında tahmini sıvı verimleri liptinit için %78-80, vitrinit için %6-10 iken, inertinit için %0-2'dir. Vitrinit maseralleri kolayca tepkimeye girer ve bu nedenle doğal termoplastik özellikleri sayesinde kömürün sıvı ürünlere dönüştürülmesine yardımcı olur. Liptinitlerin yüksek verimi, alifatik yapıların varlığından kaynaklanırken, inertinitler bir dönüştürme işlemi sırasında etkisiz kalırlar [17], [23], [98], [99]. Vitrinit ve eksinit bakımından zengin kömürlerin yüksek hidrojen içeriğine



sahip olduğu ve bileşimde artan hidrojenin de sıvılaştırma ürünlerini arttırdığı söylenebilir [100], [101].

Genel olarak, kömürün sıvılaştırmaya uygun kabul edilebilmesi için, organik maddesinin %10 - 20 Tip I kerojen veya %20 -30 oranında Tip II kerojen bileşimine sahip olması gerekir [102]. Tip I kerojen, çeşitli tortul ortamlardan gelen yüksek alifatik içerikli farklı bir organik maddeden oluşurken, Tip II, açık denizlerde ve gölssel ortamlarda, tatlı sularda bulunan planktonik organik madde ile ilgilidir [61].

### 3.4.3 Kömür partikül boyutu

Parçacık boyutu, kömür sıvılaştırma işlemi sırasında önemli bir parametredir. Küçük boyutlu partiküllerin ekstraksiyon verimleri artan kömür yüzey alanı ve çözücünün kömür yapısına daha kolay nüfuz etmesi nedeniyle artmaktadır ve bu da sistemin verimliliği için önemli bir parametre olmasını sağlar [93]. Büyük partiküllerde ise, partikülün merkezine yakın bölgelerde gelişen bir reaksiyon nedeniyle serbest radikaller artar ve bu sıvılaştırma sırasında istenmeyen, kararlı, yüksek moleküler ağırlıklı ürünlerin oluşmasına neden olur [103], [104], [105].

### 3.4.4 İnorganik madde

Kömürün yanmayan kısmını oluşturan, çeşitli mineral ve mineral gruplarının oluşturduğu yapı genellikle heterojen özelliktedir. Kömürün sıvılara dönüştürülmesi sırasında kalsiyum karbonat gibi bileşiklerin oluşumu sistem ve ekipmanda tıkanma sorunları oluşturur, bu da doğrudan sistem verimini, sıvı ürünlerin dağılımını ve reaktör kapasitesini olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, pirit ve alümino-silikatlar sıvılaştırma için katalizör olarak etki etmektedir. Bu nedenle, kömürün kül içeriğinin ağırlıkça %10'dan düşük olması tercih edilir [58], [93].

Sonuçta, %0,57-0,62 arasında değişen vitrinit yansıtması (Ro), %72 - 96,8 reaktif maseral içeriği ve %29,4-57.1 aralığında uçucu madde içeriği ile 0,73-0,87 arasında değişen hidrojen/karbon atom oranına sahip kömürler sıvı ürünlere dönüştürmek için uygun özelliklerde kabul edilir [106].

## 4 Tartışma

Kömür kullanım alanlarının belirlenmesinde kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri esastır ve kömürleşme derecesi, diğer tüm kömür parametrelerini etkilediği için birincil faktör olarak kabul edilebilir. Kömür özelliklerinin karbonizasyon, karbon fiber üretimi,

gazlaştırma ve sıvılaştırma üzerindeki nihai etkisi Tablo 3'de özetlenmiştir.

Aynı kömür sahasında bile olsa, genellikle kömür damarlarının kömürleşme dereceleri (rank), maserallerin bileşimi, plastisite, gözeneklilik, reaktivite, kimyasal yapı özelliği ve inorganik bileşikleri farklı olabilir; tüm bunlar, belirli bir kömür için uygulanacak temiz kömür teknolojisinin seçiminde dikkate alınacak temel parametrelerdir. Yanma sırasındaki enerji çıkışı, metalürjik işlemedeki rolü, yerinde metan absorpsiyon kapasitesi ve alternatif bir hidrokarbon kaynağı olma potansiyeli gibi birçok alanda etkin bir unsur olduğu için kömürün organik/maseral bileşimi de bu kapsamda önemlidir [7], [36]. Örneğin, ısıtma işlemi ile liptinitik bileşimden yüksek uçucu madde verimleri elde edilebilir, bu da bitüm ve katran üretimi için ideal olmasını sağlar [107]. Düşük dereceli bitümlü kömürde bulunan vitrinit ise, yüksek hidrojen içeriği, daha fazla alifatik yapı ve düşük aromatiklik oranı nedeniyle sıvılaştırma işlemine uygundur [66], [107]. Diğer maseral gruplarına kıyasla düşük hidrojen ve uçucu madde içeriği, daha yüksek termal kararlılık, yüksek aromatiklik ve yoğunlaşma ile karakterize edilen inertinit moleküler yapısı, onları piroliz sırasında düşük gaz ve katran veren, en az reaktif bileşen haline getirir [108]. Maserallerin bileşimi ve oranları, kömürdeki elementer bileşimi dolayısıyla temiz kömür teknolojileri için kömür reaktivitesini de etkiler [17], [58], [61].

Kömür kimyasal olarak başlıca aromatik ve alifatik karbon yapılarından oluşur ve kömürleşme derecesi arttıkça aromatik yapılar artar. Kömürleşme derecesi ve maseral bileşimi ise, kömürün fiziksel ve kimyasal yapısını değiştirerek mekanik davranışını da etkiler. Aromatik yapılar için yüksek bağ enerjileri, yüksek dereceli kömürlerin düşük reaktivitesinden sorumluyken, alifatik karbon yapıları için düşük bağ enerjileri, düşük dereceli kömürleri yüksek reaktiviteye dönüştürür [21], [24]. Bu nedenle kömür dönüşümünün daha kolay olabilmesi için daha fazla alifatik yapı kömürler tercih edilir. Kömürün yapısını oluşturan fonksiyonel gruplar metilen, metil, fenolik hidroksil ve karboksil gruplarını içerir. Metil grupları kömür yapısında bulunan hidrojenin yaklaşık %20'sinden sorumludur. Organik oksijenin %60-80'i fenolik hidroksil gruplarından, düşük dereceli kömürlerdeki önemli oranlarda oksijen içeriği, karboksil gruplarından kaynaklanmaktadır [58]. Bu fonksiyonel gruplar ise kömür mukavemetini olumsuz yönde etkileme eğilimindedir.

Bir kömürden gaz veya diğer teknolojik ürünlere dönüştürme işlemi sırasında mineral

madde termal ayrışma, parçalanma, füzyon ve aglomerasyon aşamalarından geçer [109]. Mineraller reaksiyona girip dönüşüme uğradıkça, erimiş tortular (kir ve cüruf) oluşur ve bu da sürecin termal performansı yanı sıra verimliliğin de düşmesi gibi büyük operasyonel sorunlara neden olur [33].

Herhangi bir kömürün temiz kömür teknolojisi kapsamında kullanım alanını belirlemek amacıyla rank (kömürleşme derecesi) ve maseral bileşimine (reaktif maseraller) dayanan bir model [107] ile hidrojen ve karbon içeriğine dayanan Seyler diyagramı geliştirilmiştir [109]

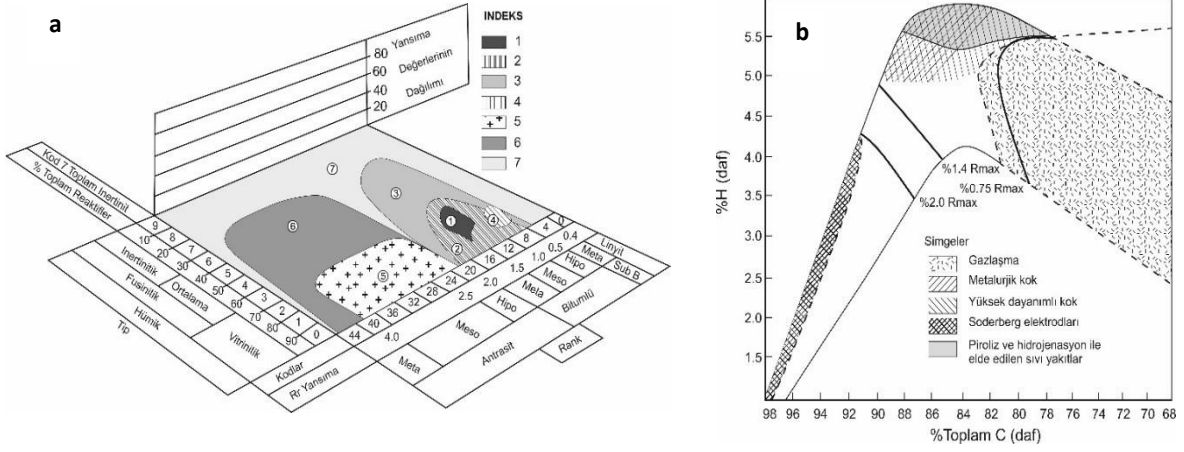
**Tablo 3** Karbonizasyon, gazlaştırma, sıvılaştırma ve karbon fiber üretim prosesleri sırasında kritik olan kömür özellikleri [91]

Özellik	Uygulanan Teknoloji			
	Karbonizasyon	Gazlaştırma	Sıvılaştırma	Karbon Fiber (Elyaf) Üretimi
<b>Organik Madde Bileşimi</b>	Vitrinit, Liptinit	Vitrinit, Liptinit	Liptinit (%78–80), vitrinit (%6–10)	Vitrinit, Liptinit
<b>Kimyasal Yapı</b>	Düşük oranda alifatik yapılar	Yüksek alifatik yapılar, artan heteroatomlar	Basit aromatik bileşenler, artan alifatik karbon	Düşük aromatik, yüksek alifatik bileşen
<b>Elementel Bileşim</b>	Düşük O, C, S, N	Yüksek H <sub>2</sub> O, düşük S	Yüksek C (%80–85), Düşük H ve O içeriği (<30 wt % dmf)	Yüksek O
<b>Kalori Değeri</b>	Düşük	Yüksek	*	*
<b>Kömür Reaktivitesi</b>	*	Yüksek	*	Düşük
<b>Kömür Kimyasal Özellikleri</b>	Yüksek uçucu madde içeriği kok gazı, düşük uçucu madde içeriği-kok düşük nem ve kül içeriği.	Düşük nem ve kül içeriği, yüksek uçucu madde ve sabit karbon içeriği	Düşük nem ve kül içeriği, %29,4 – %57.1 uçucu madde içeriği	*

<b>İnorganik Madde Bileşimi</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>3</sub> ve alkaliler düşük kaliteli kok üretimine neden olur	MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ti O <sub>2</sub> ve alkali bileşenler diğerlerinin reaksiyonunu etkiler	Pirit ve amino-silikatlar katalizör şeklinde rol alır	*
<b>Mineral Madde Bileşimi</b>	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
<b>Kül Özellikleri</b>	Düşük kül füzyon sıcaklıkları	1600 °C'den düşük kül füzyon sıcaklıkları	*	*
<b>Kekleşme Özelliği</b>	Düşük	Düşük	*	*
<b>Oğütülebilirlik</b>	Oğütülebilirlik İndeksi: 80	*	*	*
<b>Kömür Akışkanlığı</b>	*	*	*	Yüksek
<b>Moleküler Ağırlık Dağılımı</b>	*	*	Sıvılaştırma sırasında stabil yüksek moleküler ağırlığa sahip ürünlerin oluşumu istenmeyen bir durumdur.	Düşük moleküler ağırlıklı bileşiklerin düşük oranı, Düzgün moleküler ağırlık dağılımı
<b>Partikül Boyutu</b>	*	Küçük	Küçük	*: Literatürde bu konuyla ilgili bilgi bulunamadı.

(Singh ve diğ., 2015) (Şekil 3 ve Tablo 4). Bahsedilen bu modeller, kömürlerin bu tip teknolojilere uygun olup olmadıklarının belirlenmesi için fikir verse de kömürün heterojen yapısı nedeniyle başarısızlık ve hata oranı da oldukça yüksektir. Bu nedenle uygulanması

planlanan dönüşüm prosesi ve kullanılmak istenilen kömür arasındaki uygunluğun çok detaylı değerlendirilmesi, planlamaların alana özgü yapılması gerekmektedir.



**Şekil 3a.** Vitrinit yansımaya değeri ve reaktif mineral oranlarına göre kömür kullanım alanlarını ifade eden diyagram [23], [109] ve b) Seyler diyagramı [91]

**Tablo 4.** Seyler diyagramına göre hidrojen ve karbon içeriğine göre kömür kullanımı [91]

Uygulama	Karbon İçeriği (%)	Hidrojen İçeriği (%)
Gazlaştırma	68-80	2,5-5,5
Metallurji	82-93	4,9-5,5
Karbon Elektrodu	>93	>4,5
Sıvılaştırma	77-87	>5,0

Kısaca, kömürdeki azot içeriği gibi kükürt içeriği de hava kirliliği ve korozyona neden olmasından dolayı istenmeyen bileşenlerdir. Örneğin elektrik üretimi için kullanılacak kömürlerde havada kuru bazda kükürt içeriğinin %0.8-1.0' ı geçmemesi istenir. Çimento fabrikalarında, fabrika dizaynına bağlı olmakla birlikte, %2 kükürt içeriği kabul edilebilir sınırdır. Ancak, koklaşabilir kömürlerde sıvı ham demir ve çelik kalitesiyle yüksek fırın çalışma koşullarını etkilemesi nedeniyle havada kuru bazda bu miktarın maksimum %0.8 olması beklenir. Ülkemizdeki kömür rezervinin de büyük kısmını oluşturan alt bitümlü kömürler, genellikle elektrik üretimi için termik santrallerde, çimento fabrikalarında ve diğer endüstrilerde kullanım olanağı olabilecek düşük enerjili kömürlerdir. Ancak, mineral madde ve özellikle pirit içeriklerinin yüksekliği nedeniyle endüstriyel olarak yaygın kullanımı kömür zenginleştirme işlemlerinden sonra uygun olmaktadır. Gazlaştırma

sürecinde kül miktarı önemlidir ve yüksek miktarda kül bırakan kömürler gazlaştırma sırasında problem yaratmaktadır. Kül içeriği arttıkça, yanıcı ve gazlaştırılacak madde miktarları azalmakta; buna bağlı olarak, gazlaştırma verimi düşmekte, ayrıca fazla kül, reaktörlerin kapasitesinin düşmesine de neden olmaktadır. Ülkemizde yapılan çalışmalar bu alanda devam etmektedir ve 2018 yılında Türkiye Kömür İşletmesi Tunçbilek Kömür Yıkayıcı'dan elde edilen %3,0 kükürt ve %54,6 kül içeren atıklardan yaklaşık %1.3 kükürt ve %29,9 kül içeriğine sahip temiz kömür üretilmiştir [111].

## 5 Sonuçlar

Enerji ve enerji kaynakları insanlık tarihinde en vazgeçilmez unsurlardır. Odunla başlayan ve kömür, petrol, doğal gaz ve günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları ile devam eden bu kaynak arayışı insanlığın gelişen ve büyüyen toplumsal ihtiyaçlarını gidermek için hızla devam etmektedir. Bu süreçte kömür, yerel bir kaynak olması, madencilik ve enerji dönüşümünün nispeten daha ucuz ve kolaylığı nedeniyle her zaman tercih edilen bir kaynak olmuştur ve enerji uzmanlarının tahminlerine göre gelecekte de enerji sektöründe etkin varlığını korumaya devam edecektir. Bununla birlikte, artan fosil yakıt kullanımı beraberinde çevre kirliliği ve küresel ısınma sürecini de geliştirmiştir. Küresel olarak hem fosil yakıt başta olmak üzere enerji kaynaklarına bağlı gelişimin devam etmesi, hem de küresel iklim değişikliği hakkında önlemler alınabilmesi için kullanılan yakıtların çevreye daha az zarar vereceği temiz yakıt teknolojileri, başlıca temiz kömür teknolojisi, kavramı genel anlamda kabul görmeye başlamıştır. Enerji sektöründe ilgi çeken ve yatırım yapılmaya başlanan bu uygulamaların başında gelen gazlaştırma ve sıvılaştırma işlemleri özellikle fosil yakıt rezervimizin büyük kısmını oluşturan düşük kalorili kömürleri çevreyle dost ve ekonomiye daha fazla katkısı olacak şekilde kullanmak, enerji güvenliğimiz ve ekonomik gelişme açısından önem arz etmektedir.

Temiz Kömür Teknoloji uygulamalarından en ilgi çeken olan gazlaştırma, karbonlu bir hammaddenin, gaz fazında kullanılabilir ve yanıcı ürünlere dönüştürüldüğü termokimyasal bir işlemdir. Gazlaştırma reaksiyonları, yeraltında gazlaştırma teknolojileri kullanılarak kömür havzalarında veya kömürlerin sahadan alınarak bu iş için özel yapılmış tesislerdeki gazlaştırıcılarda gerçekleştirilmektedir. Kömür gazlaştırma ile üretilen sentez gazı, metanol, hidrojen, amonyak, sentetik doğal gaz (SNG) ve sentetik mumlar gibi bazı kimyasalların üretiminde ara işlem olarak birçok uygulamada kullanılabilir. Ayrıca, benzin

ve dizel gibi bazı sıvı yakıtların üretiminde de kullanılabilir.

Kömür sıvılaştırma ise kömürün sıvılara dönüştürülmesi işlemidir. Kömürü sıvılaştırmanın doğrudan ve Fischer-Tropsch (FTS) tekniği ile dolaylı olmak üzere iki yöntemi vardır. Kömürün gazlaştırılması/sıvılaştırılması teknolojisi ile sadece endüstriyel anlamı olan ürünler değil, çevre ve insan sağlığını doğrudan etkileyen CO tutma ve depolama imkânı olması nedeniyle de çok önemlidir. Kömür gazlaştırma işlemi sonucunda geleneksel yanma süreciyle açığa çıkan kükürt ve civa gibi insan sağlığı ve çevre açısından önemli emisyon veya atıkların neredeyse tamamı temizlenmekte, dolayısıyla ekonomik ve çevresel anlamda kazanç sağlanmaktadır.

Türkiye'de henüz ticari amaçlı kömür gazlaştırma projesi bulunmamasına rağmen araştırmalar hızla devam etmekte olup, Dünya genelinde kömür gazlaştırma projeleri ile ilgili mevcut ve planlanan reaktör sayılarının diğer hammadde gruplarına göre son derece yüksektir. Küresel ölçekte fosil yakıtlara devam eden bağımlılığın sonuçlarını hafifletmek için gereken şey temiz kömür teknoloji uygulamaları, karbon yakalama ve depolama kapasitesi projelerinin sürdürülebilir ölçekte hayata geçirilmesi olacaktır.

## Kaynaklar

- [1] Dudley, B., BP Statistical Review of World Energy, Coal, 68th Edition. 02 2020, 02 tarihinde <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-coal.pdf>, 2019.
- [2] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-tabii-kaynaklar-komur>, E.T. 06.11.2021)
- [3] Okutan H. Kömür Gazlaştırma Teknolojisi: Ülkemiz İçin Çözüm Olabilir mi? TÜBA Temiz Kömür Teknol. Çalıştay ve Paneli. Ankara, 2017.
- [4] Pişkin, S. ve Karaosmanoğlu, F. Kömürün Gazlaştırılması. Kömür Özellikleri Teknolojisi ve Çevre İlişkileri, Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş., 59-70, İstanbul, 1998.
- [5] Arslan V., Kömür Temizleme Teknolojileri ve CO2 Tutma Açısından Önemi konulu panel notları. TÜBA Temiz Kömür Teknol. Çalıştay ve Paneli. TÜBA, 2017.
- [6] Taylor GH, Teichmuller M, Davis A, Diessel CFK, Littke R, Robert P. Organic petrology, 3rd edn. Schweizerbart, Stuttgart, 1998.
- [7] Holuszko ME, Mastalerz MD. Coal maceral chemistry and its implications for selectivity in coal flotability. Int J Coal Prep Util 35:99–110, 2015.
- [8] Ziypak, M. Gazlaştırma Teknolojileri. Ankara: TKİ., 2015.
- [9] (<https://www.sasol.com/about-sasol/company-profile/overview>).

- [10] Tuncalı, E., et al. Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri (in Turkish). Ankara, Turkey: General Directorate of Mineral Research and Exploration Publication. Turkey: General Directorate of Mineral Research and Exploration Publication, 2002.
- [11] Bayrak, Ö., & Aktan, M., Türkiye'nin kömür potansiyeli ve hedefler. In TÜBA Temiz Kömür Teknolojileri Çalıştayı ve Paneli. Ankara, 2017.
- [12] Çakal GÖ, Yücel H, Gürüz AG., Physical and chemical properties of selected Turkish lignites and their pyrolysis and gasification rates determined by thermogravimetric analysis. *J Anal Appl Pyrolysis* 80:262–268, 2007.
- [13] Breault, R.W., Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies, *Energies*, 3(2), 216-240, 2010.
- [14] Aktan, M., Kömür gazlaştırma ürünlerinin gerçek opsiyonlar yöntemi ile değerlemesi. Doktora Tezi. Ankara: Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., 2020.
- [15] Higgmann, C., State of the gasification industry: Worldwide gasification and syngas databases 2016 update, Gasification and Syngas Technologies Conference, Vancouver, 2016.
- [16] Mahinpey, N., & Gomez, A. Review of gasification fundamentals and new findings: Reactors, feedstock, and kinetic studies. *Chemical Engineering Science*, 148, 14–31. doi: 10.1016/j.ces.2016.03.037, 2016.
- [17] Suarez-Ruiz I, Crelling JC. The role of petrology in coal utilization. In: Applied coal petrology, 1st edn. Academic Press, New York, 2008.
- [18] Marzec A. Towards an understanding of the coal structure: a review. *Fuel Process Technol* 77:25– 32, 2002.
- [19] Ahamed MAA, Perera MSA, Matthai SK, Ranjith PG, Dong-yinc L., Coal composition and structural variation with rank and its influence on the coal-moisture interactions under coal seam temperature conditions—a review article. *J Pet Sci Eng* 180:901–917, 2019.
- [20] Harris, D. J., & Roberts, D.G. Coal Gasification and Conversion. In *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*, vol. 2, pp. 427– 454, 2013.
- [21] Pan J, Meng Z, Hou Q, Ju Y, Cao Y. Coal strength and Young's modulus related to coal rank, compressional velocity and maceral composition. *J Struct Geol* 54:129–135, 2013.
- [22] Singh AK, Mrityunjay KJ. Hydrocarbon potential of permian coals of south Karanpura coalfield, Jharkhand, India. *Energy Sources Part A Recover Util Environ Effects* 40(2):163–171, 2018a.
- [23] Singh AK, Mrityunjay KJ. Interrelation between mechanical and petrographic characteristics of coals of Argada B seam: implication to comminution and utilization. *Int J Coal Prep Util.* 2018b.
- [24] Li K, Khanna R, Zhang J, Barati M, Xu T, Yang T, Sahajwalla V. Comprehensive



- investigation of various structural features of bituminous coals using advanced analytical techniques. *Energy Fuels* 11(29):7178–7189, 2015.
- [25] Ward CR. Analysis, origin and significance of mineral matter in coal: an updated review. *Int J Coal Geol* 165:1–27, 2016.
- [26] Gao F, Kang H. Experimental study on the residual strength of coal under low confinement. *Rock Mech Rock Eng* 50:285–296, 2017.
- [27] Xue Y, Ranjith PG, Gao F, Zhang D, Cheng H, Chong Z, Hou P. Mechanical behaviour and permeability evolution of gascontaining coal from unloading confining pressure tests. *J Nat Gas Sci Eng* 40:336–346, 2017.
- [28] Devasahayam S, Sahajwalla V. Evaluation of coal for metallurgical applications. In: Osborne D (ed) *The coal handbook: towards cleaner production*, vol 2. Woodhead Publishing Limited, Sawston, pp 352–386, 2013.
- [29] Jasienko S, Kimber GM, Patrick JW. Coal as raw material for carbon production: some new aspects [and discussion]. *Philos Trans R Soc Lond Ser A Math Phys Sci* 300(1453):171–182, 1981.
- [30] Patrick JW. The coking of coal. *Sci Prog* 61(243):375–399, 1974.
- [31] Diez MA, Alvarez RC, Barriocanal R. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *Int J Coal Geol* 50:389–412, 2002.
- [32] Nomura S, Arima T, Kato K. Coal blending theory for dry coal charging process. *Fuel* 83:1771–1776, 2004.
- [33] Matjie RH, French D, Ward CR, Pistorius PC, Li Z. Behaviour of coal mineral matter in sintering and slagging of ash during the gasification process. *Fuel Process Technol* 92(8):1426–1433, 2011.
- [34] Creelman RA, Ward CR, Schumacher G, Juniper L. Relation between coal mineral matter and deposit mineralogy in PF furnances. *Energy Fuel* 27:5714–5724, 2013.
- [35] Gupta S, Sahajwalla V, Chaubal P, Youmans T. Carbon structure of coke at high temperatures and its influence on coke fines in blast furnace dust. *Metall Mater Trans B* 36:385–394, 2005.
- [36] van Krevelen VW. *Typology, physics, chemistry, constitution*, 3rd edn. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1993.
- [37] Miller BG. Introduction to coal utilization technologies. In: *Clean coal engineering technology*, 3rd edn, pp 147–229, 2017.
- [38] Anon 2., Queensland high energy coals for the PCI market— advantages for low volatile coal. Retrieved from [http://mines.industry.qld.gov.au/assets/coal-pdf/hi\\_energy](http://mines.industry.qld.gov.au/assets/coal-pdf/hi_energy), 2001.
- [39] Bennett P, Holcombe D., Commissioned study on PCI research and future directions. *Coal Technology*. <http://coaltech.com.au/CommissionedStudyonPCIResearchandFutureDirections.html>. Accessed 21 March 2019, 1994.

- [40] Kim B, Kotegawa T, Eom Y, An J, Hong I, Kato O, Nakabayashi K, Miyawaki J, Kim BC, Mochida I, Yoon S. Enhancing the tensile strength of isotropic pitch-based carbon fibers by improving the stabilization and carbonization properties of precursor pitch. *Carbon* 99:649–657, 2016a
- [41] Kim J, Im U, Lee B, Peck D, Yoon S, Jung D. Pitch-based carbon fibers from coal tar or petroleum residue under the same processing condition. *Carbon Lett* 19:72–78, 2016b.
- [42] Yang SJ, Nakabayashi K, Miyawaki J, Yoon SH. Preparation of pitch based carbon fibers using hyper-coal as a raw material. *Carbon* 106:28–36, 2016.
- [43] Apicella B, Tregrossi A, Stanzione F, Ciajolo A, Russo C., Analysis of petroleum and coal tar pitches as large PAH. *Chem Eng Trans* 57:1–6, 2017.
- [44] Hiremath N, Mays J, Bhat G. Recent Developments in carbon fibers and carbon nanotube-based fibers: a review. *Polym Rev* 57:339–368, 2017.
- [45] Takanohashi T, Shishido T, Kawashima H, Saito I. Characterisation of hyper coals from coals of various ranks. *Fuel* 87(4–5):592–598, 2008.
- [46] Lee SH, Lee SM, Im U, Kim S, Yoon S, Lee B, Peck D, Shul Y, Jung D. Preparation and characterization of high-spinnability isotropic pitch from 1-methylnaphthalene-extracted low- rank. *Carbon* 155:186–194, 2019.
- [47] Kim BJ, Eom Y, Kato O, Miyawaki J, Kim BC, Mochida I, Yoon SH. Preparation of carbon fibers with excellent mechanical properties from isotropic pitches. *Carbon* 77:747–755, 2014.
- [48] Zabihi O. Modeling of phenomenological mechanisms during thermal formation and degradation of an epoxy- based nanocomposite. *Thermochim Acta* 543:239–245, 2012
- [49] Huson MG. High performance pitch based carbon fibers. In: Bhat G (ed) *Structure and properties of high performance fibers*. Woodhead Publishing, Victoria, pp 31–78, 2017.
- [50] Özer M, Basha OM, Stiegel G, Morsi B. Effect of coal nature on the gasification process. In: *Integrated gasification combined cycle (IGCC) technologies*, pp 257–293, 2017.
- [51] Alonso MJG, Borrego AG, Alvarez D, Parra JB, Mene'ndez R., Influence of pyrolysis temperature on char optical texture and reactivity. *J Anal Appl Pyrolysis* 58–59:887–909, 2001.
- [52] Me'ndez LB, Borrego AG, Martinez-Tarazona MR, Mene'ndez R. Influence of petrographic and mineral matter composition of coal particles on their combustion reactivity. *Fuel* 82:1875–1882, 2003.
- [53] Choudhury N, Biswas S, Sarkar P, Kumar M, Ghosal S, Mitra T. Influence of rank and macerals on the burnout behaviour of pulverized Indian coal. *Int J Coal Geol* 74:145–153, 2008.
- [54] Miura K, Hashimoto K, Silveston PL, Factors affecting the reactivity of coal chars during gasification, and indices representing reactivity. *Fuel* 68:1461–1475, 1989.

- [55] Ye DP, Agnew JB, Zhang DK. Gasification of a South Australian low-rank coal with carbon dioxide and steam: kinetics and reactivity studies. *Fuel* 77:1209–1219, 1998.
- [56] Küçükkbayrak S, Haykiri-Açma H, Ersoy-Meriçboyu A, Yaman S., Effect of lignite properties on reactivity of lignite. *Energy Convers Manag* 42:613–626, 2001.
- [57] Irfan, M. F., Usman, M. R., & Kusakabe, K. Coal gasification in CO<sub>2</sub> atmosphere and its kinetics since 1948: A brief review. *Energy*, 36(1), 12-40, 2011.
- [58] Durie RA., Coal properties and their importance in the production of liquid fuels. *Fuel* 61(10):883– 886, 1982.
- [59] Shadle LJ, Berry DA, Syamlal M. Coal conversion processes, gasification. In: Kirk–Othmer encyclopedia of chemical technology, 2002.
- [60] Fletcher TH. Gasification fundamentals. In: Wang T, Stiegel GJ (eds) Integrated gasification combined cycle (IGCC) technologies. Woodhead Publishing, Sawston, pp 223–256, 2017.
- [61] Suarez-Ruiz I. Organic petrology: an overview. In: Al-Juboury A (ed) Petrology—new perspectives and applications, pp 199–224, 2012.
- [62] Sun Q, Li W, Chen H, Li B. The CO<sub>2</sub>-gasification and kinetics of Shenmu maceral chars with and without catalyst. *Fuel* 83:1787–1793, 2004.
- [63] Zhuo Y, Messenbock R, Peterson N, Dugwell DR, Kandiyoti R. High pressure gasification of coal in bench scale reactors; the effect pressure, gassing medium and maceral content. In: International furnace and boilers, 5th European conference. INFUB, Rio Tonto, Portugal, 629– 638, 2000.
- [64] Mahagaokar U. Coal conversion processes, gasification. In: Kirk–Othmer encyclopedia of chemical technology, 2004.
- [65] van Niekerk D, Pugmire RJ, Solum MS, Painter PC, Mathews JP. Structural characterization of vitrinite-rich and inertinitierich Permian-aged South African bituminous coals. *Int J Coal Geol* 76:290–300, 2008.
- [66] Sun Q, Li W, Chen H, Li B. The variation of structural characteristics of macerals during pyrolysis. *Fuel* 82:669– 676, 2003.
- [67] Arenillas A, Rubiera F, Pevida C, Ania CO, Pis JJ., Relationship between structure and reactivity of carbonaceous materials. *J Therm Anal Calorim* 76:593–602, 2004.
- [68] Hurt R, Sun J-K, Lunden M. A kinetic model of carbon burnout in pulverized coal combustion. *Combust Flame* 113(1–2):181–197, 1998.
- [69] Kajitani S, Suzuki N, Ashizawa M, Hara S. CO<sub>2</sub> gasification rate analysis of coal char in entrained flow coal gasifier. *Fuel* 85:163–169, 2006.
- [70] Jayaraman K, Gokalp I. Effect of char generation method on steam, CO<sub>2</sub> and blended mixture gasification of high ash Turkish coals. *Fuel* 153:320–327, 2015.
- [71] Hattingh BB, Everson RC, Neomagus HWJP, Bunt JR. Assessing the catalytic effect of coal ash constituents on the CO<sub>2</sub> gasification rate of high ash, South African coal. *Fuel Process Technol* 92:2048–2054, 2011.

- [72] Ballantyne TR, Ashman PJ, Mullinger PJ., A new method for determining the conversion of low- ash coals using synthetic ash as a tracer. *Fuel* 84:1980–1985, 2005.
- [73] Radovic LR, Walker PL, Jenkins RG. Importance of catalyst dispersion in the gasification of lignite chars. *J Catal* 82(2):382–394, 1983.
- [74] Zevenhoven-Onderwater M, Backman R, Skrifvars BJ, Hupa M. The ash chemistry in fluidised bed gasification of biomass fuels. Part I: predicting the chemistry of melting ashes and ash–bed material interaction. *Fuel* 80:1489– 1502, 2001.
- [75] Hu G, Dam-Johansen K, Wedel S, Hansen JP. Decomposition and oxidation of pyrite. *Prog Energy Combust Sci* 32(3):295–314, 2006.
- [76] Kosminski A, Ross D, Agnew J. Influence of gas environment on reactions between sodium and silicon minerals during gasification of low-rank coal. *Fuel Process Technol* 87:953–962, 2006a.
- [77] Kosminski A, Ross D, Agnew J. Reactions between sodium and silica during gasification of a low- rank coal. *Fuel Process Technol* 87:1037–1049, 2006b.
- [78] Kosminski A, Ross D, Agnew J., Transformations of sodium during gasification of low-rank coal. *Fuel Process Technol* 87:943–952, 2006c.
- [79] Gupta S, Dubikova M, French D, Sahajwalla V. Effect of CO<sub>2</sub> gasification on the transformations of coke minerals at high temperatures. *Energy Fuels* 21:1052–1061, 2007.
- [80] Bai J, Li W, Li C-Z, Bai Z, Li B., Influences of minerals transformation on the reactivity of high temperature char gasification. *Fuel Process Technol* 91:404–409, 2010.
- [81] Li S., Char–slag transition during pulverized coal gasification. Dissertation. University of Utah, 2010.
- [82] Gupta SK, Wall TF, Creelman RA, Gupta RP., Ash fusion temperatures and the transformations of coal ash particles to slag. *Fuel Process Technol* 56(1–2):33–43, 1998.
- [83] Lolja SA, Haxhi H, Dhimitri R, Drushku S, Malja A. Correlation between ash fusion temperatures and chemical composition in Albanian coal ashes. *Fuel* 81:2257–2261, 2002.
- [84] Liu B, He Q, Jiang Z, Xu R, Hu B. Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures. *Fuel* 105:293–300, 2013.
- [85] Groen J, Brooker D, Welch P, Oh M., Gasification slag rheology and crystallization in titanium- rich, iron–calcium–aluminosilicate glasses. *Fuel Process Technol* 56:103–127, 1998.
- [86] Wang P, Massoudi M. Slag behavior in gasifiers. Part I: influence of coal properties and gasification conditions. *Energies* 6:784–806, 2013.
- [87] Vamvuka D, Zografos D, Alevizos G. Control methods for mitigating biomass ash-related problems in fluidized beds. *Bioresour Technol* 99(9):3534–3544, 2008.

- [88] van Dyk J, Waanders F. Manipulation of gasification coal feed in order to increase the ash fusion temperature of the coal enabling the gasifiers to operate at higher temperatures. *Fuel* 86:2728–2735, 2007.
- [89] Speight JG. Gasification of unconventional feedstocks. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-14152-9>, 2014.
- [90] Dittus M, Johnson D., The hidden value of lignite coal. In: Gasification technologies conference, proceedings, pp 1–8, 2001.
- [91] Keboletse, K.P., Ntuli, F. & Oladijo, O.P. Influence of coal properties on coal conversion processes- coal carbonization, carbon fiber production, gasification and liquefaction technologies: a review. *Int J Coal Sci Technol* 8, 817–843, 2021.
- [92] Vasireddy SB, Morreale A, Cugini C, Song SJ. Clean liquid fuels from direct coal liquefaction: chemistry, catalysis, technological status and challenges. *Energy Environ Sci* 2:311–345, 2011.
- [93] Heydari M, Rahman M, Rajender G., Effect of initial coal particle size on coal liquefaction conversion. *Int J Oil Gas Coal Technol* 12(1):63–80, 2016.
- [94] Tissot BP, Welte D. Petroleum formation and occurrence, 2nd edn. Springer, Berlin, 1984.
- [95] Zhou B, Shi L, Liu Q, Liu Z. Examination of structural models and bonding characteristics of coals. *Fuel* 184:799–807, 2016.
- [96] Zhu J, Liu J, Yang Y, Cheng J, Zhou J, Cen K. Fractal characteristics of pore structures in 13 coal specimens: relationship among fractal dimension, pore structure parameter and slurry ability of coal. *Fuel Process Technol* 149:256–258, 2016.
- [97] Kalkreuth W, Roy C, Hebert M. Vacuum pyrolysis of Canadian Prince Mine coal—chemical and petrological analyses of feed coal and solid residues. *Fuel* 64:213–222, 1986.
- [98] Hunt JM. Generation of gas and oil from coal and other terrestrial organic matter. *Org Geochem* 17(6):673–680, 1991.
- [99] Peters KE, Snedden JW, Sulaeman A, Sarg JF, Enrico RJ. A new geochemical-sequence stratigraphic model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia. *AAPG Bull* 84:12–44, 2000.
- [100] Singh PK, Singh MP, Singh AK, Arora M, Naik AS. The prediction of the liquefaction behavior of the East Kalimantan coals of Indonesia: an appraisal through petrography of selected coal samples. *Energy Sources Part A Recover Util Environ Effects* 35(18):1728–1740, 2013.
- [101] Mishra A, Gautam S, Sharma T. Effect of operating parameters on coal gasification. *Int J Coal Sci Technol* 5(2):113–125, 2018.
- [102] Powell TG, Boreham CJ. Terrestrial sourced oils: Where do they exist and what are our limits of knowledge?—A geochemical perspective. In: Fleet AJ, Scott AC (eds) *Coal and coal bearing strata as oil-prone source rocks*. Geological Society of London, London, pp 11–29, 1994.

- [103] Schlosberg RH. Chemistry of coal conversion. Springer, New York, 1985.
- [104] Li X, Hu H, Jin L, Hu S, Wu B. Approach for promoting liquid yield in direct liquefaction of Shenhua coal. *Fuel Process Technol* 89(11):1090–1095, 2008a.
- [105] Li X, Hu H, Zhu S, Hu S, Wu B, Meng M. Kinetics of coal liquefaction during heating-up and isothermal stages. *Fuel* 87(4–5):508–513, 2008b.
- [106] Davis A, Spackman W, Given PH. The influence of the properties of coals on their conversion into clean fuels. *Energy Sources* 3:55–81, 1976.
- [107] Falcon R, Ham AJ. The characteristics of Southern African coals. *J S Afr Inst Min Metall* 88(5):145–161, 1988.
- [108] Zhao Y, Hu H, Jin L, He X, Wu B. Pyrolysis behaviour of vitrinite and inertinite from Chinese Pingshuo coal by TG-MS and in a fixed bed reactor. *Fuel Process Technol* 92:780–786, 2011.
- [109] Chakravarty S, Mohanty A, Banerjee A, Tripathy R, Mandal GK, Basariya R, Sharma M. Composition, mineral matter characteristics and fusion behavior of some Indian coals. *Fuel* 150:96–101, 2015.
- [110] Singh AK, Singh PK, Singh MP, Banerjee PK. Utilization of the Permian coal deposits of West Bokaro, India: a petrochemical evaluation. *Energy Sources Part A Recover Util Environ Effects* 37:1081–1088, 2015.
- [111] Yaşar Ö, Uslu T, Şahinoğlu E, Fine coal recovery from washery tailings in Turkey by oil agglomeration, *Powder Technol.* 327 (2018) 29–42  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.042>.



## DEMATEL-SWARA YÖNTEMLERİ İLE GEÇİCİ BARINMA ALANLARININ SEÇİMİNE ETKİ EDEN KRİTERLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ezgi GÜLER<sup>1,a,\*</sup>, Selen AVCI<sup>2,b</sup>, Zerrin ALADAĞ<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>Şeyh Edebalı Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bilecik Türkiye

<sup>2</sup>Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Türkiye

<sup>a</sup>ezgi.guler@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8789-8244

<sup>b</sup>selen.avci@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7433-5696

<sup>c</sup>zaladag@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5986-7210

### ÖZET

Afet lojistiği yönetim sistemi kapsamında afetzedelerin barınma sorununu çözmek için geçici barınma alanları belirlenmelidir. Söz konusu karar problemi insani yardım operasyonlarının performansını da doğrudan etkilemektedir. Geçici barınma alanlarının seçimi birden fazla değerlendirme kriteri içerdiği için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerine uygun bir karar problemidir. Bu çalışmada, depremzedelerin ihtiyaçlarının giderilmesi için belirlenecek geçici barınma alanlarının seçim problemi incelenmiştir. Toprak yapısı, arazi eğimi, bitki örtüsü, merkezlere yakınlık (ulaşılabilirlik), güvenlik ve altyapı koşulları olmak üzere belirlenen kriterler Decision-Making Trail and Evaluation Laboratory (DEMATEL) ve Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) yöntemleriyle değerlendirilmiştir. DEMATEL yöntemi ile değerlendirme kriterlerinin etki yönleri, önem sıralamaları ve ağırlıkları elde edilmiştir. SWARA yöntemi ile oransal değerlendirmeler yapılmış ve yine kriter ağırlıkları elde edilmiştir. DEMATEL yöntemi ile elde edilen ağırlıklara göre kriterler arasındaki öncelik sıralaması “arazi eğimi, merkezlere yakınlık (ulaşılabilirlik), altyapı koşulları, toprak yapısı, bitki örtüsü, güvenlik” olarak belirlenmiştir. SWARA yöntemi ile elde edilen kriter öncelik sıralaması ise “arazi eğimi, merkezlere yakınlık (ulaşılabilirlik), toprak yapısı, altyapı koşulları, bitki örtüsü, güvenlik” şeklindedir. Her iki yöntemde de ilk ve son öncelikteki kriter sırasıyla arazi eğimi ve güvenlik olarak belirlenirken altyapı koşulları ve toprak yapısı kriterlerinin öncelik sıralaması değişmiştir. Bu çalışma, geçici barınma alanlarının konumları üzerindeki neden sonuç ilişkisini algılamada pratik faydalar sağlaması bakımından ve farklı kriter ağırlıklandırma teknikleri ile elde edilen sonuçların incelenmesi bakımından önemlidir.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

**Atf (Citation):** Güler, E., Avcı, S., Aladağ, Z., “Dematel-Swara Yöntemleri İle Geçici Barınma Alanlarının Seçimine Etki Eden Kriterlerin Değerlendirilmesi”, UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4(2): 57-74, 2022.

Geliş (Received): 16.03.2022

Kabul (Accepted): 15.09.2022

Yayın (Published): 31.12.2022

**Anahtar Kelimeler:** Afet yönetimi, çok kriterli karar verme (ÇKKV), DEMATEL, SWARA, geçici barınma alanı.

## EVALUATION OF CRITERIA EFFECTING THE SELECTION OF TEMPORARY SHELTER AREAS BY DEMATEL-SWARA METHODS

### ABSTRACT

Within the scope of the disaster logistics management system, temporary shelter areas should be determined to solve the sheltering problem of the disaster victims. The mentioned problem directly affects the performance of humanitarian aid operations. Selection of temporary shelter areas is a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) problem. In this study, the problem of selection of temporary shelter areas has been examined. The criteria have been determined as soil structure, land slope, vegetation, proximity to centers (accessibility), security and, infrastructure conditions and evaluated with the Decision-Making Trail and Evaluation Laboratory (DEMATEL) method and the SWARA method. With DEMATEL, the impact aspects, importance rankings and criterion weights were obtained. Proportional evaluations were made with the SWARA method and criterion weights were obtained again. According to the weights obtained by the DEMATEL method, the rank of priority among the criteria was determined as "land slope, proximity to centers (accessibility), infrastructure conditions, soil structure, vegetation, security". The priority rank of the criteria obtained by the SWARA method is "land slope, proximity to centers (accessibility), soil structure, infrastructure conditions, vegetation, security". In both methods, the first and last priority criteria were determined as "land slope" and "safety", respectively, while the priority rank of the "infrastructure conditions" and "soil structure" criteria were changed. This study is important in terms of providing practical benefits in perceiving the cause-and-effect relationship on the locations of temporary shelters and examining the results of different criterion weighting techniques.

**Keywords:** Disaster management, multi-criteria decision making (MCDM), DEMATEL, SWARA, temporary shelter area.



## 1. GİRİŞ

Afet kavramı Birleşmiş Milletler Örgütü tarafından “insan, malzeme, ekonomik veya çevresel kayıplara neden olan bir felaketten etkilenen toplumun işleyişinin ciddi bir şekilde bozulması” şeklinde tanımlanmıştır [1]. Afet yönetimi, afet etkilerini azaltmak için afet öncesi ve sonrasında uygulanan faaliyetleri içermektedir [2]. Geçici barınma alanlarının belirlenmesi, tesis yerleşim analizinin özel bir durumu olarak ele alınan hazırlık faaliyetlerinden biridir. Belirlenen tesisler, tahliye operasyonları veya yardım dağıtımını için gerekli barınaklar, dağıtım merkezleri ve depolardır [3]. Geçici barınma alanlarının amacı, afet sırasında ve sonrasında afet bölgelerinde mağdurlara ve yaralılara yardım etmektir. Barınma alanlarının belirlenmesi afet yönetimi için kritik bir rol oynamakta ve yardım operasyonlarının performansını doğrudan etkilemektedir [4].

Literatürde afet sonrası geçici barınma alanlarının belirlenmesi için pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardaki temel amaç, tüm afetzedelerin yararlanacağı kapasitedeki geçici barınma alanlarını belirleyebilmektir. Afet yönetiminde geçici barınma alanları için uygun alanların belirlenmesi, çok kriterli bir yaklaşım gerektirmektedir [5, 6]. Bu bağlamda, sistemin geliştirilmesi için dikkate alınacak değerlendirme kriterleri belirlenmelidir. Geçici barınma alanlarının seçimi için ÇKKV yaklaşımlarının kullanıldığı bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Omidvar ve diğ. [7] olası bir depremden önce geçici barınma alan seçimi için Coğrafi Bilgi Sistemi ve ÇKKV yaklaşımlarını entegre eden model önermişlerdir. Toplamda 13 kriter ve 14 alternatif geçici barınma bölgesini içeren bir vaka çalışması sunmuşlardır. Nappi ve Souza [8], geçici barınma yeri için AHP yaklaşımını önermiştir. Ju ve diğ. [9] acil alternatif barınma alanı değerlendirme ve seçim problemini için TOPSIS, ANP, DEMATEL yöntemleri ile çalışmışlardır. Soltani ve diğ. [10], Delphi tekniğini kullanarak geçici barınma için uygun yerlerin seçiminde kullanılabilir kriterlerin bir listesini sunmuşlardır. Hosseini ve diğ. [11], geçici barınma alanları için site konumlarının seçiminde sürdürülebilir değerlendirme yaklaşımları için AHP ve entegre değer modelini uygulamışlardır. AHP kullanılarak kriterlerin önem ağırlıkları belirlenirken, sürdürülebilir değerlendirme için entegre değer modeli ile geçici barınma alanlarının sıralaması elde edilmiştir. Trivedi ve Singh [12] çalışmalarında acil barınma yeri seçimi problemi için hibrit bir grup karar destek yaklaşımı önermişlerdir. Belirlenen kriterlerin ağırlıkları Bulanık AHP kullanılarak elde edilmiş ve alternatif barınma

alanları TOPSIS yöntemi ile sıralanmıştır. Çelik [13] çalışmasında geçici barınma alanlarının seçimi probleminde belirlenen kriterleri bulanık tabanlı DEMATEL yöntemini kullanarak değerlendirmiştir. Jahangiri ve diğ. [14] kırsal bölgelerdeki geçici barınma alanlarının değerlendirilmesi için CBS ve AHP yöntemlerini kullanmışlardır. Ömürgönülşen ve Menten [15] çalışmalarında Bulanık TOPSIS yöntemi kullanarak geçici barınma alanlarını belirlemişlerdir.

Bu çalışmada depremzedelerin ihtiyaçlarının giderilebilmesi için geçici barınma alanlarının seçim probleminde etkili olan kriterlerin etki düzeyleri incelenmiştir. Geçici barınma alanlarının seçimine etki eden kriterler belirlenmiş ve belirlenen kriterler Decision-Making Trail and Evaluation Laboratory (DEMATEL) ve SWARA yöntemleri ile değerlendirilmiştir. DEMATEL yöntemi, değerlendirme kriterlerini etkileyen ve etkilenen gruplar bakımından inceleme olanağı verdiği için tercih edilmiştir. SWARA yöntemi de kriterlerin tercihlere bağlı olarak oransal karşılaştırmalarına olanak sağlayan yeni bir yöntem olduğu için tercih edilmiştir. Kriterlerin etki durumlarını değerlendirmek ve yöntemlerden elde edilen kriter ağırlıklarının karşılaştırmasını yapmak bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan farklılığını ortaya koymaktadır. Çalışmada geçici barınma alanları değerlendirme kriterleri arasındaki nedensel ve oransal etki ilişkilerini ortaya koymak ve kriter ağırlıklarının sayısal değerlerini elde ederek iki yöntemin sonuçlar bakımından uyumunu değerlendirmek amaçlanmıştır.

## 2. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ

### 2.1. DEMATEL Yöntemi

DEMATEL karmaşık değerlendirme kriterleri arasındaki nedensellik ilişkisini analiz eden ÇKKV tekniklerinden biridir [16]. DEMATEL tekniği, uzlaşmacı ve dolaylı ilişkileri kapsamaktadır [17]. Bu yöntemde, karar vericilerin yargı ve düşüncelerinden yararlanılmaktadır. DEMATEL ile değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları hesaplanarak kriterler önem seviyelerine göre sıralanabilmektedir. Bu durum karar sürecinde birbirlerini etkileyen ve birbirlerinden etkilenen değerlendirme kriterlerinin ortak bir uzlaşma halinde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

DEMATEL yönteminin adımları aşağıda verilmiştir [18]:

1. Adım: Uzman grup tarafından ikili karşılaştırma ölçeğindeki sayısal değerler (puanlar) kullanılarak kriterler arası ilişkiler tanımlanır. Karar vericiler puanlamalarını ölçeğe

göre yapabilir. Ölçekte dilsel karşılığı bulunan sayısal değerler bir değerlendirme kriterinin diğer kriteri hangi ölçüde etkilediğini ifade etmektedir.

Tablo 1. İkili karşılaştırma ölçeği

Sayısal Değer	Dilsel İfade
0	Etkisi yok
1	Düşük Etki
2	Orta Dereceli Etki
3	Yüksek Dereceli Etki
4	Çok Yüksek Dereceli Etki

2. Adım: Kriterleri değerlendiren uzman ekipteki karar verici sayısı 1'den fazla olduğunda verilen puanların aritmetik ortalaması alınır ve köşegenleri "0" değerini alan asimetrik bir matris elde edilir. Elde edilen matris, Direkt İlişki Matrisi (X) olarak adlandırılır. "n" toplam kriter sayısı olmak üzere X matrisinin gösterimi Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

3. Adım: X matrisi elde edildikten sonra Eşitlik (2)'de bulunan denklem ile X matrisindeki her bir satır ve sütun toplamının en büyüğü alınır.

$$s = \max (\max \sum_{j=1}^n x_{ij}, \sum_{i=1}^n x_{ij}) \quad (2)$$

4. Adım: X matrisinin her bir elemanının önceki adımda elde edilen "s" değerine bölünmesiyle Normalleştirilmiş Direkt İlişki Matrisi (C) oluşturulur. C matrisi Eşitlik (3)'teki denklem yardımıyla elde edilir.

$$C = \frac{X}{s} \quad (3)$$

5. Adım: C matrisi birim matristen (I) çıkarılır. Elde edilen (C-I) matrisinin tersi alınarak tekrar C matrisi ile çarpılır ve Eşitlik (4)'te verilen Toplam İlişki Matrisi (F) elde edilir.

$$F = C + C^2 + C^3 + \dots + C^H = C(I - C)^{-1} \quad (4)$$

6. Adım: Etkilenen ve etkileyen kriter gruplarını belirlemek ve net etki derecelerini hesaplamak amacıyla her bir kriter için satır ve sütun toplamaları hesaplanır [19].

Elde edilen bu değerler her bir kriter için:

Her bir satır toplamı ( $D_i$ ), kriterin diğer kriterleri doğrudan veya dolaylı etkilemesini,

Her bir sütun toplamı ( $R_i$ ) ise kriterin diğer kriterlerden doğrudan veya dolaylı etkilenme toplamını belirtir.

Her bir kriter için;

$D_i+R_i$  gönderilen ve alınan toplam etki değerini ve ilgili kriterin sistem içindeki önemini,

$D_i-R_i$  ise kriterin sisteme yaptığı toplam etkiyi gösterir.

$D_i-R_i$  değeri pozitif ise  $i$  kriteri etkileyen kriter,  $D_i-R_i$  değeri negatif ise  $i$  kriteri etkilenen kriter olarak değerlendirilir.

**7.Adım:** Kriterler arasındaki ikili ilişkilerin yönünü ve gücünü belirlemek amacıyla bir eşik değer belirlenir [20]. Eşik değer, uzman ekip içindeki karar vericiler tarafından ya da genellikle F (Toplam İlişki Matrisi) matrisindeki değerlerin ortalaması alınarak belirlenir [18, 21, 22]. Belirlenecek eşik değer büyük ya da küçük olması karar sürecindeki kriterlerin birbirleri üzerindeki etkileşimine ve çözüm kolaylığına etki edebilmektedir.

**8. Adım:** Eşik değer belirlendikten sonra etki yönlü dağılım diyagramı çizilir. Etki diyagramı düşey eksenini ( $D_i-R_i$ ) ve yatay eksenini ( $D_i+R_i$ ) olan bir koordinat düzleminde [ $(D_i+R_i)$ ,  $(D_i-R_i)$ ] noktalarının gösterimiyle elde edilir.

**9. Adım:** Kriter ağırlıkları belirlenir. Kriterlerin önem ağırlıkları elde edilirken Eşitlik (5)'teki denklem kullanılır. Nihai kriter ağırlıklarının elde edilmesi amacıyla Eşitlik (6)'da bulunan denklem ile normalize edilmiş nihai kriter ağırlıkları hesaplanır.

$$W_{ia} = \sqrt{(D_i + R_i)^2 + (D_i - R_i)^2} \quad (5)$$

$$W_i = \frac{W_{ia}}{\sum_{i=1}^n W_{ia}} \quad (6)$$

## 2.2.SWARA Yöntemi

SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) 2010 yılında Kersulienne, Zavadskas ve Turskis tarafından geliştirilen ve “adım adım ağırlık değerlendirme oran analizi” olarak bilinen çok kriterli karar verme tekniğidir [23]. Yöntemde uzman görüşleri alınarak basit görel karşılaştırma yapılmaktadır [24]. SWARA yöntemi ile değerlendirme kriterlerinin görel önem ağırlıklarının belirlenmesi için gerekli uygulama adımları aşağıda verilmiştir [25]:

1. Adım: Kriterler, karar verici tarafından önem düzeyine göre sıralanır.

2. Adım: Karar verici ikinci önem düzeyindeki kriterden başlayarak tüm kriterler için görece önem düzeylerini ( $s_j$ : ortalama değerin karşılaştırmalı önemi) belirler.  $j$ . kriter,  $(j+1)$ . kriterle karşılaştırılarak  $j$ . kriterin  $(j+1)$ . kriterden ne kadar önemli olduğu saptanır [26]:

3. Adım:  $k_j$  katsayısı Eşitlik 7'deki gibi belirlenir.

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad (7)$$

4. Adım: Önem vektörü ( $q_j$ ) Eşitlik 8'deki gibi belirlenir.

$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j} & j > 1 \end{cases} \quad (8)$$

5. Adım:  $n$  adet kriterin görece ağırlıkları ( $w_j$ ) Eşitlik 9'daki formül ile hesaplanır.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad (9)$$

### 3. UYGULAMA

Bu çalışmada depremzedeler için geçici barınma alanlarının seçimi konusu ÇKKV yöntemlerinden biri olan DEMATEL ile incelenmiştir. Yöntem, Microsoft Excel kullanılarak uygulanmıştır. Değerlendirme kriterleri (faktörler) literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Uzman ekip üç karar vericiden (KV1, KV2, KV3) oluşmaktadır. Karar vericilerin uzmanlık alanları sırasıyla jeoloji mühendisliği, şehir planlama ve endüstri mühendisliğidir. Karar vericilerin deneyim süreleri ortalama 3-10 yıl arasında değişmektedir. Uzman ekip AFAD bünyesinde aktif olarak görev yapmaktadır. Tablo 2'de belirlenen kriterler ve kriterlere ilişkin kısa açıklamalar yer almaktadır.

Tablo 2. Geçici barınma alanlarının seçimine etki eden kriterler

<b>Kriter No</b>	<b>Kriterler</b>	<b>Açıklama</b>	<b>Kaynak</b>
<b>C1</b>	Toprak Yapısı	Toprak, barınma alanı için inşaatı kolaylaştıracak kadar sert olmalı ve akan sulardan veya şiddetli yağmurlardan daha az etkilenmelidir.	Omidvar ve diğ. [7]; Trivedi ve Singh [12]
<b>C2</b>	Arazi Eğimi	Geçici barınma alanlarında kullanılacak yapılar için arazi eğimi çok büyük olmamalı ve mümkün olduğunca engebeli bölgelerden kaçınılmalıdır. Barınma alanının eğimi, büyük drenaj ve erozyon kontrol önlemleri alınmamışsa, %7'den fazla olamaz.	Dabiri ve diğ. [27]; Geng ve diğ. [28]; The Sphere Project Handbook [29]
<b>C3</b>	Bitki Örtüsü	Geçici barınma alanları çevresinde yeterli bitki örtüsü (çimen ve çalı) ile gölge yapacak ve erozyonu engelleyecek ağaçlar bulunmalıdır.	Trivedi ve Singh [12]; Geng ve diğ. [28]; Şenik ve Uzun, 2021 [30]
<b>C4</b>	Merkezlere Yakınlık (Ulaşılabilirlik)	Geçici barınma alanında doğrudan afet etkisi riski bulunmamalı ve elektrik, su, kanalizasyon ve iletişim gibi temel tesisler insanların günlük yaşamları için kullanılabilir ve ulaşılabilir olmalıdır. İhtiyaç maddelerinin temini için bu alanların marketlere, depolara ve sağlık merkezlerine yakınlığının önceden değerlendirilmesi gerekmektedir.	Şentürk ve Erener [31], Boostani ve diğ., [32]

C5	Güvenlik	Geçici barınma alanlarında insanlar, binalar ve erzakların güvence altına alınmış olması önemlidir. Dağıtım ve nakliye sırasında yardım malzemeleri ve eşyalar güvenli alanlarda depolanmış olmalıdır.	Omidvar ve diğ. [7], Şentürk ve Erener [31], Çelik [13]
C6	Altyapı Koşulları	Depremzedelerin geçici barınma alanları için kalıcı altyapıya sahip mevcut yerler önerilmektedir.	Trivedi ve Singh [12], Boostani ve diğ. [32], Dabiri ve diğ. [27]

Kriterlerin birbirlerine etki düzeylerinin değerlendirilmesi için karar vericilerden oluşan uzman grubun görüşleri alınmıştır. Oluşan ikili karşılaştırma matrisi tek bir matris altında birleştirilerek DEMATEL yöntem adımları uygulanmıştır. Aynı uzman gruptan kriterlerin oransal üstünlüklerini de değerlendirmeleri istenmiş ve SWARA yöntemi uygulanmıştır.

### 3.1. DEMATEL Yöntemi İçin Bulgular

Tablo 2'deki kriterler üç karar vericiden oluşan uzman grup tarafından Tablo 1'de bulunan ikili karşılaştırma ölçeği ile puanlanarak değerlendirilmiştir. Elde edilen X matrisi Tablo 3'te yer almaktadır. Söz konusu birleştirilmiş matris için karar vericilerin verdiği puanların aritmetik ortalaması alınmıştır.

Tablo 3. X: Direkt ilişki matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.000	3.000	1.667	1.000	2.000	1.667
C2	2.000	0.000	1.667	2.333	1.333	2.667
C3	0.000	1.333	0.000	0.667	1.000	2.000
C4	1.333	2.333	1.333	0.000	1.333	1.667
C5	0.000	1.000	1.667	1.333	0.000	1.333
C6	1.333	2.667	1.333	1.667	0.667	0.000

X matrisine ait satır ve sütun toplamalarının en büyüğü belirlenmiştir. “s” değeri Eşitlik (2)’de bulunan denklem ile “10.333” olarak hesaplanmıştır. X matrisinde her bir hücredeki elemanın bu değere bölünmesi ile Tablo 4’te bulunan C matrisi elde edilmiştir.

Tablo 4. C: Normalleştirilmiş direkt ilişki matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.000	0.290	0.161	0.097	0.194	0.161
C2	0.194	0.000	0.161	0.226	0.129	0.258
C3	0.000	0.129	0.000	0.065	0.097	0.194
C4	0.129	0.226	0.129	0.000	0.129	0.161
C5	0.000	0.097	0.161	0.129	0.000	0.129
C6	0.129	0.258	0.129	0.161	0.065	0.000

C Matrisi elde edildikten sonra Eşitlik (4)’te bulunan denklem kullanılarak Tablo 5’teki F matrisi elde edilmiştir.

Tablo 5. F: Toplam ilişki matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.310	0.800	0.580	0.523	0.524	0.682
C2	0.497	0.617	0.605	0.643	0.497	0.782
C3	0.183	0.431	0.244	0.307	0.281	0.467
C4	0.392	0.692	0.502	0.382	0.432	0.618
C5	0.179	0.407	0.388	0.357	0.198	0.421
C6	0.396	0.714	0.498	0.519	0.379	0.477

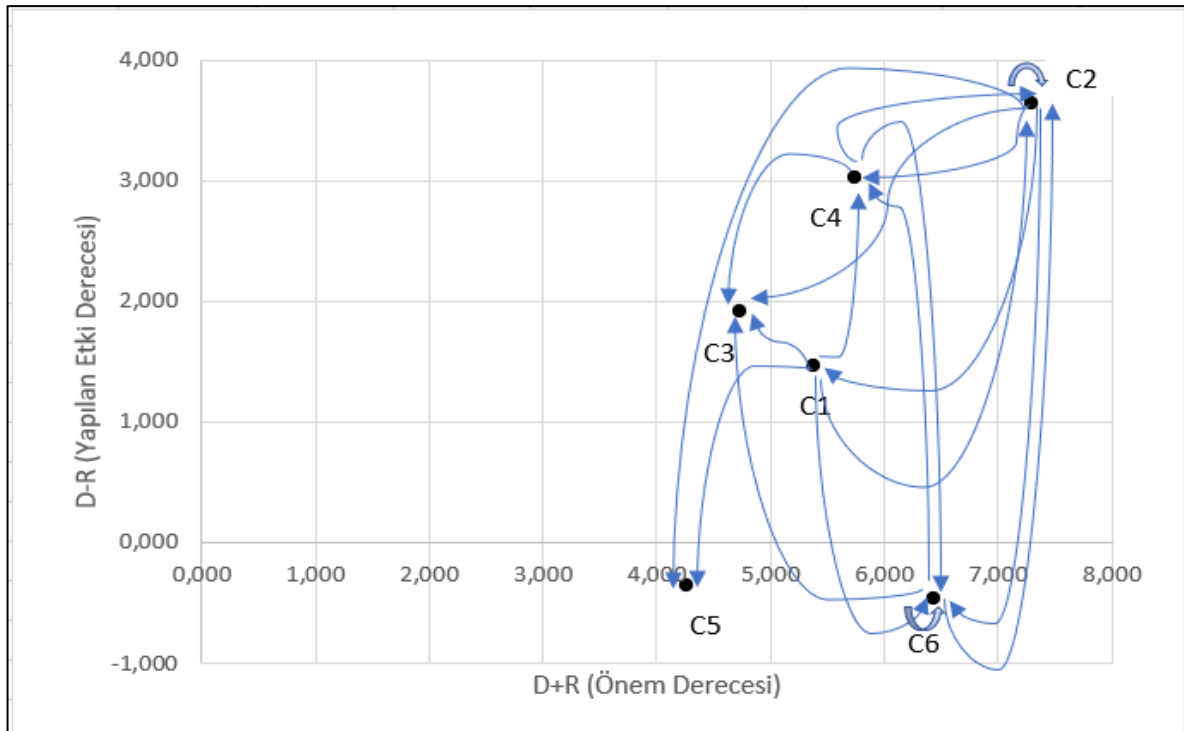
Etkileyen ve etkilenen kriter gruplarını elde etmek için F matrisinde satır ve sütun işlemleri yapılarak  $D_i$ ,  $R_i$ ,  $D_i+R_i$  ve  $D_i-R_i$  değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 6’da bulunmaktadır.  $D_i-R_i$  değeri negatif olarak hesaplanan kriterler “etkilenen”, pozitif olarak hesaplanan kriterler ise “etkileyen” kriterlerdir.



Tablo 6. Kriterler için D+R ve D-R değerleri ve kriter yönleri

Kriter No	D	R	D+R	D-R	Kriter Yönü
C1	3.420	1.958	5.378	1.462	Etkileyen
C2	3.641	3.662	7.303	3.641	Etkileyen
C3	1.915	2.818	4.733	1.915	Etkileyen
C4	3.018	2.730	5.748	3.018	Etkileyen
C5	1.952	2.312	4.263	-0.360	Etkilenen
C6	2.983	3.448	6.431	-0.465	Etkilenen

Etki yönlü dağılım diyagramının çizilebilmesi için “eşik değer” tanımlanır. Bu çalışmadaki eşik değer toplam ilişki matrisindeki elemanların ortalaması alınarak elde edilen “0.470” değeridir. Şekil 1’de bulunan etki yönlü dağılım diyagramı bu eşik değere göre çizilmiştir. Eşik değer üzerindeki kriterler “etkileyen” kriter olarak belirlenir ve diyagramda etki yönü ok ile belirtilir. Herhangi bir kriterin kendisini etkilemesi durumu da diyagramda gösterilmektedir. Diyagram üzerindeki oklar etkileyen kriterden etkilenen kritere yönlenecek şekilde çizilir. Kriterin sistem içindeki önemi de koordinat düzlemindeki alanlardan tanımlanabilmektedir.



Şekil 1. Etki yönlü dağılım grafiği

Etki yönlü dağılım grafiği ile etkileyen ve etkilenen kriterlerin önem dereceleri ve etki dereceleri gösterildikten sonra Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) kullanılarak her bir kriterin ağırlığı hesaplanmış ve kriterler önceliklerine göre sıralanmıştır. Elde edilen kriter ağırlıkları ve kriter öncelikleri Tablo 7’de yer almaktadır.

Tablo 7. DEMATEL yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları ve kriter öncelikleri

Kriter No	Kriter	$W_{ia}$	$W_i$	Sıralama
C1	Toprak Yapısı	5.573	0.155	4
C2	Arazi Eğimi	8.161	0.226	1
C3	Bitki Örtüsü	5.105	0.142	5
C4	Merkezlere Yakınlık (Ulaşılabilirlik)	6.492	0.180	2
C5	Güvenlik	4.279	0.119	6
C6	Altyapı Koşulları	6.448	0.179	3

Tablo 7’ye göre karar süreci için geçici barınma alanlarının seçimine ilk sırada etki eden kriter C2: arazi eğimi olurken son öncelikteki kriter ise C5: güvenlik kriteridir.

### 3.2. SWARA Yöntemi İçin Bulgular

SWARA yöntemi için Tablo 2’deki kriterler oransal olarak değerlendirilmiştir. Uzman grup tarafından önem sırasına göre değerlendirilen kriterler için,  $s_j$ ,  $k_j$  ve  $w_j$  değerleri Tablo 8’de bulunmaktadır.

Tablo 8. SWARA yöntemi için değerlendirme sonuçları

Uzman Grup	KV1	Kriter No	Önem Sırası	Sıralı Kriterler	$s_j$	$k_j$	$q_j$	$w_j$
		C1	4	C2		1	1.000	0.221
		C2	1	C4	0.15	1.15	0.870	0.192
		C3	5	C6	0.05	1.05	0.828	0.183
		C4	2	C1	0.1	1.1	0.753	0.166
		C5	6	C3	0.3	1.3	0.579	0.128
		C6	3	C5	0.15	1.15	0.504	0.111
	KV2	Kriter No	Önem Sırası	Sıralı Kriterler	$s_j$	$k_j$	$q_j$	$w_j$
		C1	3	C2		1	1.000	0.262
		C2	1	C4	0.35	1.35	0.741	0.194
		C3	5	C1	0.15	1.15	0.644	0.169
		C4	2	C6	0.15	1.15	0.560	0.147
		C5	6	C3	0.25	1.25	0.448	0.117
		C6	4	C5	0.05	1.05	0.427	0.112
	KV3	Kriter No	Önem Sırası	Sıralı Kriterler	$s_j$	$k_j$	$q_j$	$w_j$
		C1	3	C4		1	1.000	0.235
		C2	2	C2	0.25	1.25	0.800	0.188
		C3	5	C1	0.15	1.15	0.696	0.163
		C4	1	C6	0.05	1.05	0.663	0.155
		C5	6	C3	0.1	1.1	0.602	0.141
		C6	4	C5	0.2	1.2	0.502	0.118

Uzman grubun değerlendirmelerinin tek bir görüş altında sunulması için elde edilen kriter ağırlıklarının aritmetik ortalaması alınarak nihai kriter ağırlıklarına ulaşılmıştır. Kriterler için nihai kriter ağırlıkları ve kriterlerin önem sıralamaları Tablo 9'da yer almaktadır.

Tablo 9. SWARA yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları ve kriter öncelikleri

Kriter No	Uzman Grup			Kriter Ağırlığı	Sıralama
	KV1	KV2	KV3	$W_i$	
C1	0.166	0.169	0.163	0.166	3
C2	0.221	0.262	0.188	0.223	1
C3	0.128	0.117	0.141	0.129	5
C4	0.192	0.194	0.235	0.207	2
C5	0.111	0.112	0.118	0.113	6
C6	0.183	0.147	0.155	0.162	4

Tablo 9'a göre karar süreci için geçici barınma alanlarının seçimine ilk sırada etki eden kriter C2: arazi eğimi olurken son öncelikteki kriter ise C5: güvenlik kriteridir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada geçici barınma alanlarının seçim problemi için performans kriterleri arasındaki ilişkiler, etki yönleri ve kriter ağırlıkları DEMATEL ve SWARA yöntemleri ile incelenmiştir. DEMATEL yöntemine göre D+R değeri, ilgili kriterin karar sistemi içindeki önem derecesini göstermektedir. Bu bağlamda Tablo 6'daki D+R değerleri ve Şekil 1'deki etki yönlü dağılım grafiği incelendiğinde C2: "Arazi Eğimi" kriterinin en önemli değerlendirme kriteri olduğu, C5: "Güvenlik" kriterinin ise en az öneme sahip kriter olduğu görülmektedir. D-R değerlerine ve etki yönlü dağılım grafiğine göre C1: Toprak Yapısı, C2: Arazi Eğimi, C3:Bitki Örtüsü ve C4: Merkezlere Yakınlık (Ulaşılabilirlik) kriterlerinin "etkileyen kriter grubunu", C5: Güvenlik ve C6: Altyapı Koşulları kriterlerinin ise "etkilenen kriter grubunu" oluşturmaktadır. DEMATEL yönteminin son adımında kriter ağırlıkları ve elde edilen kriter ağırlıklarına göre kriterlerin tam önem sıralamaları elde edilmiştir. Tablo 7 incelendiğinde 0.226 (%22,6) ağırlık değeri ile en önemli kriter C2: "Arazi Eğimi" olmuştur. C4: "Merkezlere Yakınlık (Ulaşılabilirlik)" kriteri 0.180 (%0.18) önem ağırlığı ile ikinci önem sırasındaki kriterdir.

SWARA yöntemi ile kriterler oransal olarak değerlendirilmiştir. SWARA yönteminin son adımında kriter ağırlıkları ve elde edilen kriter ağırlıklarına göre kriterlerin tam önem sıralamaları elde edilmiştir. Tablo 9 incelendiğinde 0.223 (%22,3) ağırlık değeri ile en önemli

kriter C2: “Arazi Eğimi” olmuştur. C4: “Merkezlere Yakınlık (Ulaşılabilirlik)” kriteri 0.113 (%0.11) önem ağırlığı ile ikinci önem sırasındaki kriterdir.

SWARA yöntemi ile elde edilen sonuçlar sadece kriter ağırlıklarıdır. DEMATEL yöntemi ise sistemi etkileyen ve sistemden etkilenen kriter grubu bilgisini de vermektedir. İki yöntem arasındaki yapısal farklılığa rağmen uzman grubun değerlendirmeleri sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları ve önem sıralamaları tutarlı olmuştur. Her iki yöntemde de İlk iki sıradaki kriter (C2: Arazi Eğimi ve C4: Merkezlere Yakınlık (Ulaşılabilirlik)) ve son iki sıradaki kriter (C3: Bitki Örtüsü ve C5: Güvenlik) aynıdır. DEMATEL yönteminde C6: Altyapı Koşulları üçüncü önem sırasında ve C1: Toprak Yapısı dördüncü önem sırasındayken, SWARA yönteminde C1: Toprak Yapısı üçüncü önem sırasında ve C6: Altyapı Koşulları dördüncü önem sırasındadır. Hesaplanan kriter ağırlıkları birbirine yakın seviyededir.

Sonuçlar incelendiğinde geçici barınma alanlarının seçim süreci için arazi eğimi, altyapı ve ulaşılabilirlik gibi fiziksel unsurlar üzerinde yoğunlaşıldığı görülmektedir. İlgili karar vericilerin bu hususları dikkate alarak değerlendirme yapmaları geçici barınma alanlarının tayin edilme sürecinin doğru şekilde ilerlemesi için önemli olacaktır. Çalışmada birden fazla karar vericinin ortak görüşünün bir yöntem algoritması ile sunulması kişisel yargıların nesnelleştirilebilmesi bakımından önemlidir. DEMATEL ve SWARA yöntemlerinin işlem adımlarının AHP gibi diğer ağırlıklandırma yöntemlerine nazaran daha detaylı ve uzun olması sonuçları da detaylandırmıştır. Ayrıca uzman gruptaki karar vericilerin sayısının artırılması ile daha kapsamlı bir çalışma ortaya konabilir. İlerleyen çalışmalarda DEMATEL ve SWARA yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları farklı ÇKKV yöntemler ile entegre edilerek kullanılabilir, geçici barınma alanları değerlendirilebilir ve sonuçlar karşılaştırılabilir. Karar sürecinde kriterlerin etkileyen ve etkilenen gruplar halinde incelenmesiyle CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) tabanlı ÇKKV modelleri ile yapılan çalışmalar kıyaslanabilir ve hibrit modeller önerilebilir.

## KAYNAKÇA

- [1] United Nations/International Strategy for Disaster Reduction. <http://www.unisdr.org>. Erişim tarihi Eylül 18, 2021.
- [2] Gino Galindo, Rajan Batta, “Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management”, Eur. J. Oper. Res, 230(2), ss. 201-211, 2013.

- [3] Aakil M.Caunhye, Xiaofeng Nie, Shaligram Pokharel, “optimization models in emergency logistics: a literature review”, *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), ss. 4-13, 2012.
- [4] Burcu Balcik, Benita M Beamon, “Facility location in humanitarian relief”, *International Journal of Logistics*, 11(2), ss. 101-121, 2008.
- [5] Cihan Çetinkaya, Eren Özceylan, Mehmet Erbaş, Mehmet Kabak, “GIS-based fuzzy MCDA approach for siting refugee camp: a case study for southeastern Turkey”, *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 18, ss. 218-231, 2016.
- [6] Walter J.Gutjahr, Pamela C. Nolz, “Multicriteria optimization in humanitarian aid”, *Eur. J. Oper. Res.*, 252(2), ss. 351-366, 2016.
- [7] Babak Omidvar, Mohammad Baradaran-Shoraka, Mehdi Nojavan, “Temporary site selection and decision-making methods: a case study of Tehran, Iran”, *Disasters*, 37(3), ss. 536-553, 2013.
- [8] Manuela Marques Lalane Nappi, João Carlos Souza, “Disaster management: hierarchical structuring criteria for selection and location of temporary shelters”, *Nat. Hazard.*, 75(3), ss. 2421-2436, 2015.
- [9] Yanbing Ju, Aihua Wang, Tianhui You, “Emergency alternative evaluation and selection based on ANP, DEMATEL, and TL-TOPSIS”, *Nat. Hazard.*, 75(2), ss. 347-379, 2015.
- [10] Ahmad Soltani, Ali Ardalan, Ali Darvishi Boloorani, AliAkbar Haghdoost, Mohammad Javad Hosseinzadeh-Attar, “Criteria for site selection of temporary shelters after earthquakes: A delphi panel”, *PLoS Currents*, 23(7), 2015.
- [11] S. M. Amin Hosseini, Albert de la Fuente, Oriol Pons, “Multicriteria decision-making method for sustainable site location of post-disaster temporary housing in urban areas”, *J. Constr. Eng. Manage.*, 142(9), 2016.
- [12] Ashish Trivedi, Amol Singh, “Prioritizing emergency shelter areas using hybrid multi-criteria decision approach: A case study”, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 24(3-4), ss. 133-145, 2017.

- [13] Erkan Çelik, “A cause and effect relationship model for location of temporary shelters in disaster operations management”, *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 22, ss. 257-268, 2017.
- [14] Katayoun Jahangiri, Hasti Borgheipour, Saeid Bahramzadeh Gendeshmin, Amirhossein Matin, Ghazaleh Monazami Tehrani, “Site selection criteria for temporary sheltering in urban environment”, *International Journal of Disaster Resilience in The Built Environment*, 11(1), ss. 58-70, 2018.
- [15] Mine Ömürgönülşen, Cem Menten, “Bulanık TOPSIS yöntemi ile Ankara ili için olası afet sonrası geçici barınma alanlarının seçimi”, *Journal of Natural Hazards and Environment*, 7(1), ss. 159-175, 2021.
- [16] Wei-Wen Wu, Yu-Ting Lee, “Developing global managers’ competencies using the fuzzy DEMATEL method”, *Expert Syst. Appl.*, 32(2), ss. 499-507, 2007.
- [17] Erdem Aksakal, Metin Dağdeviren, “ANP ve DEMATEL yöntemleri ile personel seçimi problemine bütünlük bir yaklaşım”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4), ss. 905-913, 2010.
- [18] Serhat Karaoğlan, “DEMATEL ve VIKOR yöntemleriyle dış kaynak seçimi: otel işletmesi örneği”, *Akademik Bakış Dergisi*, 55, ss. 9-24, 2016.
- [19] Yetkin Çınar, “Kariyer tercihi probleminin yapısal bir modeli ve riske karşı tutumlar: Olasılıklı DEMATEL yöntemi temelli bütünlük bir yaklaşım”, *Sosyoekonomi*, 19(19), ss. 157-186, 2013.
- [20] Aydın Koçak, Aslı Diyadin, “Sanayi 4.0 geçiş süreçlerinde kritik başarı faktörlerinin DEMATEL yöntemi ile değerlendirilmesi”, *Ege Akademik Bakış*, 18(1), 107-120, 2018.
- [21] Hamit Erdal, Selçuk Korucuk, “İlaç lojistiği kapsamında lojistik kriterlerin DEMATEL yöntemi ile belirlenmesi: Erzurum ili örneği”, *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(1), ss. 155-166, 2019.
- [22] Selçuk Korucuk, Salih Memiş, “Yeşil liman uygulamaları performans kriterlerinin DEMATEL yöntemi ile önceliklendirilmesi: İstanbul örneği”, *AVRASYA Uluslararası Araştırmalar Dergisi*, 7(16), ss. 134-148, 2019.

- [23] Violeta Keršuliene, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Zenonas Turskis, “Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA)”, *Journal Of Business Economics And Management*, 11(2), ss. 243-258, 2010.
- [24] Maryam Alimardani, Sarfaraz Hashemkhani Zolfani, Mohammad Hasan Aghdaie, Jolanta Tamošaitienė, “A novel hybrid SWARA and VIKOR methodology for supplier selection in an agile environment”, *Technological And Economic Development Of Economy*, 19(3), ss. 533-548, 2013.
- [25] Onur Derse, Emel Yontar, “SWARA-TOPSIS yöntemi ile en uygun yenilenebilir enerji kaynağının belirlenmesi”, *Endüstri Mühendisliği*, 31(3), ss. 389-419, 2020.
- [26] Audrius Ruzgys, Robertas Volvačiovas, Česlovas Ignatavičius, Zenonas Turskis, “Integrated evaluation of external wall insulation in residential buildings using SWARATODIM MCDM method”, *J. Civ. Eng. Manage.*, 20(1), ss. 103-110, 2014.
- [27] M Dabiri, M Oghabi, H Sarvari, M S Sabeti, H R Kashefi, “A combination risk-based approach to post-earthquake temporary accommodation site selection: a case study in Iran”, *Iran. J. Fuzzy Syst.*, 17(6), ss. 54-74, 2020.
- [28] Shaoqing Geng, Hanping Hou, Shaoguang Zhang, “Multi-criteria location model of emergency shelters in humanitarian logistics”, *Sustainability*, 12(5), 2020.
- [29] The Sphere Project Handbook. [www.sphereproject.org/handbook](http://www.sphereproject.org/handbook). Yayın tarihi 2011. Erişim tarihi Eylül 22, 2021.
- [30] Berfin Şenik, Osman Uzun, “An assessment on size and site selection of emergency assembly points and temporary shelter areas in Düzce”, *Natural Hazards*, 105(2), ss. 1587-1602, 2021.
- [31] Erman Şentürk, Arzu Erener, “Determination of temporary shelter areas in natural disasters by GIS: A case study, Gölcük/Turkey”, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(3), ss. 84-90, 2017.
- [32] Abtin Boostani, Fariborz Jolai, Ali Bozorgi-Amiri, “Optimal location selection of temporary accommodation sites in Iran via a hybrid fuzzy multiple-criteria decision making approach”, *J. Urban Plann. Dev.*, 144(4), 2018.