

MÜHENDİSLİK

Alanında Uluslararası Çalışmalar

Mart 2025

EDİTÖRLER

PROF. DR. EROL İSKENDER
PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

 SERÜVEN
YAYINEVİ

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Mart 2025

ISBN • 978-625-5552-77-8

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

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

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 42488

MÜHENDİSLİK

ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

EDİTÖRLER

PROF. DR. EROL İSKENDER
PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

OMEGA-3 UZUN ZİNCİRLİ ÇOKLU DOYMAMIS YAĞ ASİTLERİNİN GÜNCEL KAYNAKLARI, ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE GELECEĞE YÖNELİK PERSPEKTİFLER

Ayhan BAŞTÜRK, Seval ANDIÇ—1

Bölüm 2

KÖMÜR SIVILAŞTIRMA İŞLEMİ VE YÖNTEMLERİ

Zehra YILDIZ—39

Bölüm 3

SERAMİK ATIKLARI KULLANILARAK ÜRETİLEN YAPAY MERMERLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Birsen KIRIKTAŞ, Didem EREN SARICI—55

Bölüm 4

REAKTİF SİLİS İÇERİKLİ AGREGALARDA ALKALİ AGREGA REAKSİYONUN OLUŞMASINI SAĞLAYAN FAKTÖRLER VE TESPİT EDİLME YÖNTEMLERİ

Demet DEMİR ŞAHİN, Hasan EKER—73

Bölüm 5

SU KAYNAKLARINDA VE SU HİZMETLERİNDE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUM

Cengiz KOÇ —95

Bölüm 6

CAM SEKTÖRÜNDE İŞ KAZALARI VE MESLEK HASTALIKLARI

Hale YILDIZAY, Remzi BEŞİKTAŞ —123



OMEGA-3 UZUN ZİNCİRLİ ÇOKLU DOYMAMIŞ YAĞ ASİTLERİNİN GÜNCEL KAYNAKLARI, ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE GELECEĞE YÖNELİK PERSPEKTİFLER

Ayhan BAŞTÜRK¹, Seval ANDİÇ²

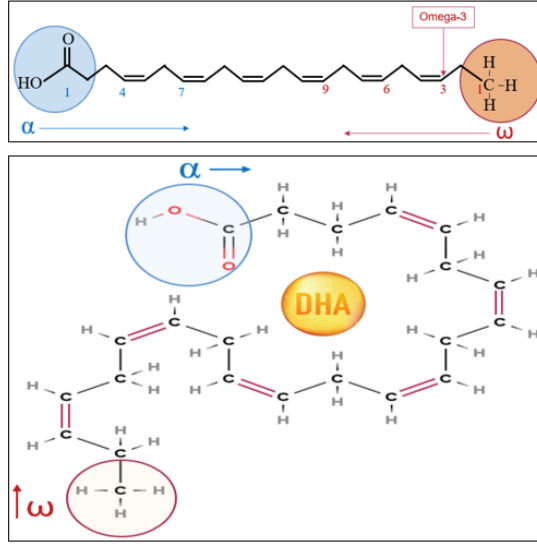
1 Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, ayhanbasturk@yyu.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7701-9306>

2 Prof. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, sevalandic@yyu.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8306-0222>

GİRİŞ

Yağ asitlerinin çoğu insanlar tarafından sentezlenebilir, ancak insan vücudunun üretemediği bir grup çoklu doymamış yağ asidi (PUFA), yani temel yağ asitleri vardır: bunlar omega-3 ve omega-6 yağ asitleridir. Temel omega-6 yağ asidi linoleik asittir (LA, C18:2n-6) ve ana omega-3 yağ asidi α -linolenik asittir (ALA, C18:3n-3). Omega-6 yağ asitleri olan araşidonik asit (AA, C20:4n-6) insanlar tarafından LA'dan, omega-3 yağ asitleri olan eikosapentaenoik asit (EPA, C20:5n-3), dokosapentaenoik asit (DPA, C22:5n-3) ve dokosaheksaenoik asit (DHA, C22:6n-3) ise ALA'dan sentezlenebilir. Ancak, ALA'nın EPA, DPA ve DHA'ya dönüşümü düşüktür ve bu omega-3 yağ asitleri de esansiyel yağ asitleri olarak kabul edilir (Rubio-Rodríguez vd., 2010).

Yağ asitleri bir ucunda metil (omega ucu) diğer ucunda karboksil (alfa ucu) gruplarının yer aldığı zincir şeklide moleküllerdir (Şekil 1). Omega-3 yağ asitleri, yağ asidi zincirinin omega ucundan üçüncü karbondan ilk çift bağları bulunan uzun zincirli çoklu doymamış yağ asitleridir. En önemli omega-3 LC-PUFA'lar arasında ALA, EPA ve DHA yer alır (Şekil 2). Uzun karbon zincirlerinin ve çoklu çift bağların benzersiz kimyasal yapısı, omega-3 LC-PUFA yağ asitlerine, özellikle EPA ve DHA'ya, önemli sağlık yararlarına yol açabilecek ayırt edici özellikler kazandırır (Qin vd., 2023). Esterleşmeden sonra EPA ve DHA, membran fosfolipid çift tabakasına yerleşebilir, çevredeki fosfolipid ile etkileşime girebilir, lipit salını değiştirebilir, oksidasyon oranını ve sinyal iletim yolunu etkileyebilir ve hücre membranındaki kolesterol birikimini azaltabilir. İnsan hücre yapısının temel parçaları olarak, omega-3 LC-PUFA'lar öncelikle merkezi sinir sistemi, testisler, kalp, retina ve bağışıklık sisteminde bulunur (Hachimoto vd., 1999; Mason vd., 2016; Sherratt vd., 2021).



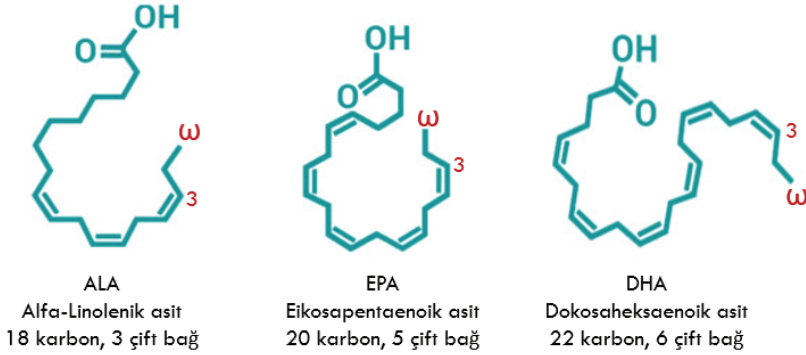
Şekil 1. Dokosahekzaenoik asit (DHA, 22:6Δ 4,7,10,13,16,19), omega (ω) ve alfa (α) uçları.

Son yüzyılda yapılan çok sayıda klinik ve epidemiyolojik çalışma, EPA ve DHA takviyesinin nörodejeneratif ve kardiyovasküler hastalıkların semptomlarını potansiyel olarak önleyebileceğini veya azaltabileceğini göstermiştir (Bernasconi vd., 2021; Khan vd., 2021). DHA'nın erken yaşamda görsel ve bilişsel gelişim için hayati öneme sahip olduğu onlarca yıldır bilinmektedir (Philip C. Calder, 2016; Jasani vd., 2017). Daha yakın zamanda, EPA ve DHA'nın embriyo kalitesini desteklediği (Kermack vd., 2020) ve erken doğum (Simmonds vd., 2022) ve gebelik diyabeti (Zhang vd., 2023) riskini azalttığı ortaya çıkmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi omega-3 LC-PUFA'ların insan sağlığı üzerine birçok olumlu etkilerinin olduğu yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Bunlar Tip-2 diyabet geliştirme riskinin düşürülmesi (Mo vd., 2023), yaşlanma ve hastalıkta kas kütlesinin potansiyel olarak korunması (Engelen vd., 2022), bilişsel gerilemeyi önlemede (Wei vd., 2023) ve zihinsel refahı desteklemede olası rollere sahiptirler (Wolters vd., 2021). Son zamanlarda yapılan bir dizi çalışmada, EPA ve DHA alımı ile SARS-CoV-2 enfeksiyonu riski ve COVID-19 şiddeti arasında ters bir ilişki olduğu bildirilmiştir (Y. Sun vd., 2022; Harris vd., 2023; Ma vd., 2023; Philip C Calder, 2023). Birçok ulusal ve uluslararası kuruluş, günlük EPA ve DHA alımını, tipik olarak 200 ila 1000 mg/gün arasında önermektedir. DHA'nın erken yaşam gelişimi açısından önemi göz önünde bulundurularak, hamile ve emziren kadınlarda DHA alımının daha yüksek olması yönünde bazı önerilerde bulunmaktadır. Amerikan Kalp Derneği, hipertrigliseridemi tedavi etmek için günlük 2 ila 4

g EPA+DHA önermektedir (Skulas-Ray vd., 2019) ve kardiyoproteksiyon için daha düşük bir alım (1 g/gün) kullanımını desteklemektedir (Siscovich vd., 2017). EPA ve DHA'nın ayrıca hastanede yatan hastaların beslenme desteğinde bir rolü olduğu iyi bilinmektedir (Philip C Calder, 2010).

EPA ve DHA'nın uyku düzenlemesi için önemli bir hormon olan melatonin'i etkileyebileceği gösterilmiştir (Yokoi-Shimizu vd., 2022). Bu hormonu üretmekle görevli organ olan pineal bezinin hücre zarı yapısını değiştirerek melatonin üretimini düzenler ve insan uyku kalitesini artırır. Dahası hem EPA hem de DHA'nın yetişkinlerde anksiyete ve depresyonu tedavi edebileceğine ve hatta önleyebileceğine dair kanıtlar mevcuttur. Bu nedenle, kanıtlar EPA ve DHA alımının artırılmasının hem sinir hem de ruh sağlığını iyileştirebileceği fikrini güçlü bir şekilde desteklemektedir (Appleton vd., 2021). Bu yağ asitleri kemik çürümelerini önleyerek ve kemik mineralizasyonunu artırarak kemik kalitesini iyileştirir (Sharma ve Mandal, 2020).

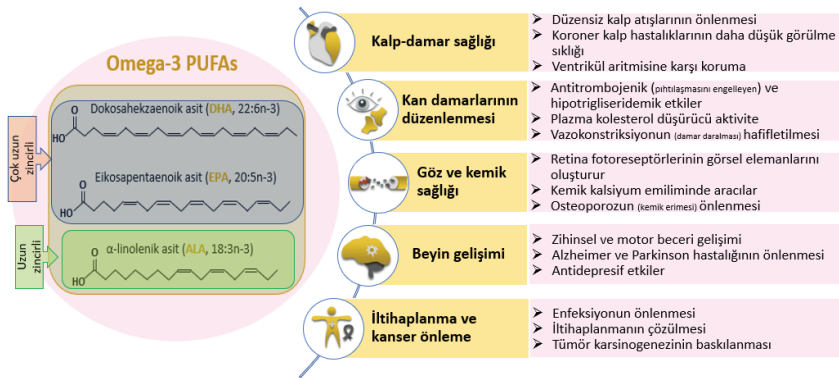
Görsel sistemle ilgili olarak, omega-3 LC-PUFA'ların kuru göz hastalığını tedavi ettiği (Pellegrini vd., 2020) ve miyopiyi etkili bir şekilde yönetmeye yardımcı olduğu (Pan vd., 2021) kanıtlanmıştır. Ayrıca, EPA ve DHA tüketiminin kolon ve meme kanseri dahil olmak üzere çeşitli kanser türü riskini azaltabileceği bildirilmiştir (Fabian vd., 2015; Augimeri ve Bonofiglio, 2023).



Şekil 2. Üç önemli omega-3 LC-PUFA'nın moleküler yapısı: alfa-linolenik asit (ALA, C18:3), eikosapentaenoik asit (EPA, C20:5) ve dokosaheksaenoik asit (DHA, C22:6).

Günümüzde omega-3 LC-PUFA'ların başlıca kaynağı balık yağlarıdır. Omega-3 LC-PUFA'lar için küresel pazarın 2020 yılında 2.10 milyar ABD doları olduğu ve yıllık %7.8 büyüme oranıyla 2028 yılında 3.61 milyara

ulaşacağı tahmin edilmektedir (Benvenge vd., 2022). Balıklar okyanus suyundaki mikroalgleri tüketir, bu da mikroalglerin ürettiği omega-3 LC-PUFA'ların balık vücutlarında birikmesine yol açar (Philip C Calder, 1996). Balık stoklarının azalması, aşırı avlanma, iklim değişikliği ve okyanustaki potansiyel kirlenme nedeniyle balık yağı bazlı omega-3 LC-PUFA'ların sürdürülebilirliği sorgulanmaktadır. Hem çiftlik hem de vahşi balık mevcut stokları insan beslenmesi için ihtiyaçları karşılamaktadır (Salem Jr ve Eggersdorfer, 2015), bu da omega-3 LC-PUFA'ların yeni diyet kaynaklarına olan ihtiyacın zorunlu olduğu anlamına gelmektedir. Balık yağının yalnızca yaklaşık %15'i doğrudan insan tüketimi için kullanılırken; çoğu (%75) su ürünleri yetiştiriciliğinde ve bir kısmı (%10) evcil hayvan mamasında kullanılmaktadır (IFFO, 2023). Tüm ana sektörlerin (su ürünleri yetiştiriciliği, insan kullanımı, evcil hayvan maması) EPA ve DHA talebinin yıldan yıla artacağı tahmin edilmektedir. Bu talep, aşırı avlanma ve iklim değişikliğinden kaynaklanan balık stoklarındaki azalma nedeniyle yetersiz balıkçılık avı nedeniyle karşılanamayabilir. Bu nedenle balıklara alternatif omega-3 LC-PUFA (EPA ve DHA) kaynakları ciddi şekilde ele alınmalı ve potansiyelleri araştırılmalıdır. Bu tür alternatifler, kökenlerine bağlı olarak doğrudan gıda olarak insan tüketimi için veya yağın fonksiyonel gıdalara dahil edilmesi veya takviyelerde kullanılması yoluyla kullanılabilir. Alternatif olarak üretilen zengin EPA ve DHA içeriğine sahip yağlar, su ürünleri yetiştiriciliğinde (Napier ve Betancor, 2023) veya evcil hayvan maması uygulamalarında kullanılabilir. Böylece balık yağları insan kullanımı için saklanabilir.



Şekil 3. Omega-3 LC-PUFA'lar ve insan sağlığı üzerindeki etkileri. ALA, DHA ve EPA en belirgin omega-3 LC-PUFA'lardır. Bunları etkileri kardiyovasküler sağlık (Bernasconi vd., 2021; Khan vd., 2021), kan damarı işlevi ve kontrolü (Adili vd., 2018), göz ve kemik sağlığı (Pellegrini vd., 2020; Sharma ve Mandal, 2020), beyin gelişimi (Harauma vd., 2017), iltihaplanma ve kanser (Fabian vd., 2015; P. C. Calder, 2018; Augimeri ve Bonofiglio, 2023) ile ilgilidir.

OMEGA-3 LC-PUFA KAYNAĞI BALIKLAR

Omega-3 LC-PUFA'ların en önemli doğal kaynakları, trofik zincirdeki omega-3 LC-PUFA'ların birincil üreticisi olan deniz fitoplanktonundan doğrudan veya dolaylı olarak beslenen deniz organizmalarıdır. Balık, alg, kabuklu deniz ürünleri vb. gibi deniz organizmaları genellikle kara hayvanları veya bitkilerden nispeten daha yüksek konsantrasyonlarda omega-3 LC-PUFA içerir. Örneğin, somon 100 g balık yağı başına 35.5 g omega-3 yağ asidi içerir, ancak mısır 100 g mısır yağı başına yalnızca 0.9 g içerir (Rubio-Rodríguez vd., 2010). Balıklar da dahil olmak üzere çoğu deniz hayvanının sınırlı omega-3 LC-PUFA biyosentez yeteneği olmasına rağmen, besin zinciri boyunca mikroalglerden omega-3 LC-PUFA'ları zenginleştirirler (Wen ve Chen, 2003). Bazı balık çeşitlerinin 100 g ağırlık başına içerdikleri EPA ve DHA yağ asidi içerikleri Şekil 4'te verilmiştir. EPA içeriği en yüksek olanlar sırasıyla somon, ringa balığı ve uskumru iken, DHA içeriği yüksek olanlar sırasıyla uskumru, somon ve hamsi balığıdır (Marangoni vd., 2016).

Yüksek trofik seviyedeki balıklar, mikroalgler, kabuklu deniz ürünleri ve kalamar gibi tüm deniz organizmaları arasında vücutlarında nispeten yüksek konsantrasyonlarda omega-3 LC-PUFA'lar içerir. Genel olarak balıklar, insanların şu anda doğadan omega-3 LC-PUFA elde etmesinin önde gelen kaynağıdır. Ancak, balıktan omega-3 LC-PUFA üretmek, birkaç önemli sınırlama nedeniyle mutlaka en iyi seçenek olmayabilir: (1) Balık filetosu veya yağındaki omega-3 LC-PUFA içeriği, balık türü, balığın diyeti, çevre sıcaklığı, balığın yaşı ve cinsel olgunluğu, işlenen balığın bir kısmı, balığın sağlığı, mevsim, geometrik konum ve hava durumu ve çiftlik veya vahşi yakalanmış balık dahil olmak üzere çok çeşitli faktörlerden etkilenir (Strandberg vd., 2020; Alfio vd., 2021). (2) Okyanus ve göl kirliliği balıklardaki omega-3 LC-PUFA'ların güvenliğini etkiler. Yapılan bir çalışmada dört çeşit vahşi yakalanmış veya çiftlikte yetiştirilmiş somonda metilciva ve poliklorlu bifenillerin tespit edildiği ortaya konmuştur (Easton vd., 2002). Balıklardaki cıva, kardiyoprotektif etkileri ortadan kaldırabilir ve diğer organik kirleticilere maruz kalma insan sağlığı için bir endişe kaynağı olmaya devam etmektedir (Domingo vd., 2007). (3) Balık yağından omega-3 LC-PUFA'lar ile ekstrakte edilen A ve D vitaminleri bir diğer endişe kaynağıdır. A ve D vitaminlerinin aşırı alımının, yüksek kolesterol ve diğer doymuş yağ asidi emilimi gibi diğer ilgili hastalıklarla ilişkili olabileceği öne sürülmüştür (Dave ve Routray, 2018). Ek olarak, balıklardaki mutlak omega-3 LC-PUFA'lar içeriği düşüktür ve endüstri ölçeğinde üretim maliyetinin düşürülmesinin önünde bir engeldir.

			
Somon (Salmon) EPA 1.01 DHA 0.94	Ringa balığı (Herring) EPA 0.97 DHA 0.69	Hamsi (Anchovy) EPA 0.54 DHA 0.91	Uskumru (Mackerel) EPA 0.90 DHA 1.40
			
Alabalık (Trout) EPA 0.20 DHA 0.53	Kılıç Balığı (Swordfish) EPA 0.11 DHA 0.65	Levrek (Sea bass) EPA 0.24 DHA 0.36	Kalamar (Squid) EPA 0.15 DHA 0.34
			
Midye (Mussel) EPA 0.19 DHA 0.25	Dil Balığı (Sole) EPA 0.14 DHA 0.11	Morina (Cod) EPA 0.06 DHA 0.12	

Şekil 4. Bazı balık türlerinde EPA ve DHA içerikleri (g/100g balık porsiyon) (Marangoni vd., 2016'dan uyarlanmıştır).

Balıktan omega-3 LC-PUFA çıkarmak için üç ana adım gereklidir: (1) ham maddeyi işleme (balık veya balık atığı), (2) işlenmiş ham maddeden çıkarma ve (3) çıkarılan yağın rafine edilmesi. 200 yılı aşkın teknolojik gelişmeye rağmen, mevcut üretim maliyeti yüksek kalmaya devam etmektedir (Rubio-Rodríguez vd., 2010). Balık bazlı omega-3 yağ asitlerine olan talep sürekli artarken, aşırı avlanma başka bir endişe kaynağı olmakta (Lenihan-Geels vd., 2013), bu da Frank ve arkadaşlarının (2005) Atlantik raf ekosistemi üzerindeki araştırmalarında kanıtlandığı gibi deniz ekosistemlerini bozabilir (Scheffer vd., 2005).

Omega-3 LC-PUFA'ların başlıca doğal kaynakları balık yağları olmasına rağmen, küresel balık stoklarının aşırı avlanma ve yüksek küresel talep nedeniyle yok olma tehlikesi altında olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, düzenleme, sınırlama ve talep ile arz arasındaki dengesizlik, balıktan elde edilen omega-3 üretim maliyetinde daha fazla artışa yol açmaktadır (Oliver vd., 2020). Ek olarak, bazı balıklar baktır veya cıva gibi yüksek seviyelerde toksik ağır metaller ve dioksinler gibi organik kirleticiler içerebilmektedir (Domingo, 2007). Son yıllarda, çok sayıda çalışma, az bilinen yağlı bitki tohumları, genetiği değiştirilmiş bitkiler veya mikroalgler ve siyanobakteriler gibi alternatif Omega-3 LC-PUFA kaynakları aramaya odaklanmıştır.

OMEGA-3 LC-PUFA KAYNAĞI BİTKİLER

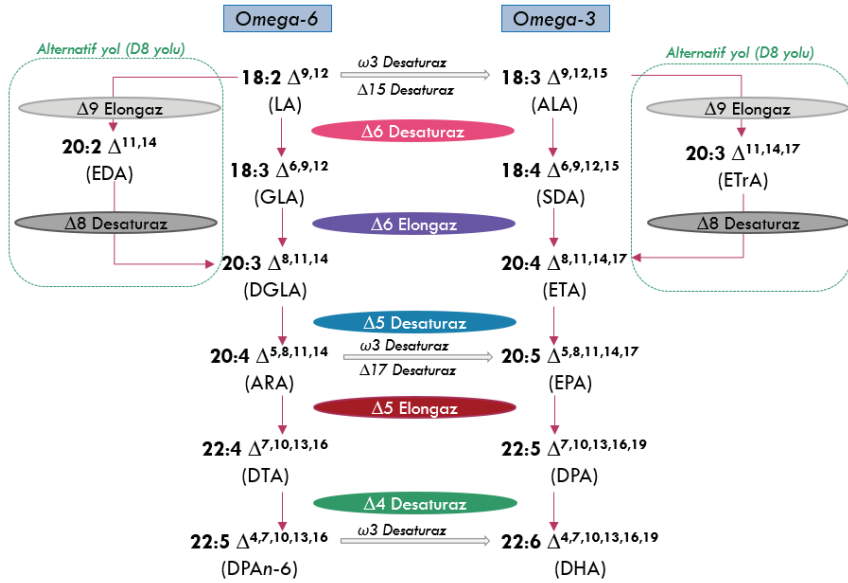
Karasal bitkiler, daha kısa zincirli PUFA'yı uzatmak ve doyumluğunu gidermek için gerekli genlere (enzimlere) sahip olmadıkları için omega-3 LC-PUFA üretemezler. Bu nedenle bazı yağlı tohum bitkilerinde bol miktarda bulunabilen ALA, normal şartlarda EPA ve DHA'ya dönüştürülemez. Bu ancak yağlı tohum bitkilerinde genetik modifikasyon (GM) ile mümkün olmaktadır (Sprague vd., 2017). Bitkiler, EPA ve DHA gibi omega-3 LC-PUFA'ları sentezlemek için sınırlı bir metabolik yola sahip olsa da, moleküler biyoteknolojinin gelişmesiyle, mikroalglerden, mayadan veya bakterilerden gelen hetero omega-3 yağ asitleri sentez yolunun bitkilere entegre edilmesi ve omega-3 üretilmesi daha erişilebilir hale gelmiştir (Adarme-Vega vd., 2012). Deniz mikroalglerinde omega-3 LC-PUFA'ların biyosentezi genellikle bir dizi aerobik uzama ve doymamışlık reaksiyonu yoluyla gerçekleşir. Bu biyosentetik yolların biyokimyasal ve moleküler yapısı daha önce tanımlanmıştır (Sayanova ve Napier, 2004; Venegas-Calderón vd., 2010; Petrie ve Singh, 2011), ancak konunun daha iyi anlaşılması için bitkilere aktarılacak genlerin ve biyosentez reaksiyonlarını kısaca özetleyeceğiz.

EPA ve DHA üretmek için, PUFA sentezleyen ökaryotik organizmaların çoğu, D6 yolu veya 'geleneksel' aerobik yol olarak adlandırılan yolu kullanır. Bu bir dizi ardışık desaturasyon ve uzama reaksiyonu yoluyla gerçekleşir. Bu yoldaki ilk adım, hem LA hem de ALA D6 doyumluğunun giderilmesidir ve sırasıyla γ -linolenik asit (GLA, C18:3n-6) ve stearidonik asit (SDA, C18:4n-3) senteziyle sonuçlanır (Şekil 5). Bu adımı, dihomogamma-linolenik asit (DGLA, C20:3n-6) ve eikosatetraenoik asit (ETA; C20:4n-3) veren D6'ya özgü bir C2 uzaması izler. Son bir D5 doyumluğu daha sonra ARA ve EPA üretir. Yola giren öncüller, çift bağların sayısı ve pozisyonları bakımından değişebilir. Birincil substrata bağlı olarak, ardışık D6-doymamışlık, D6-uzama ve D5-doymamışlık adımları n-6 veya n-3 yağ asitleri üretir. İki yol, n-6 FA'ları n-3 karşılıklarına dönüştüren ω 3 desaturazlar tarafından birbirine bağlanabilir (Ruiz-López vd., 2012).

Uzun zincirli-PUFA'ların biyosentezi için alternatif bir yol (D8 yolu), *protist Tetrahymena pyroformis*, *Acanthamoeba* spp., *Perkinsus marinus* ve *Euglena* (Euglenophyceae) organizmalarında gösterilmiştir; bunların hepsinde D6-desaturaz aktivitesi eksik görünmektedir (Lees ve Korn, 1966; Ulsamer vd., 1969; Wallis ve Browse, 1999). Ayrıca kokolitofor *Emiliania huxleyi*, *Pavlova* spp. ve *Isochrysis* spp. gibi bazı mikroalg türlerinde de bulunmuştur (Qi vd., 2002; Zhou vd., 2007; Sayanova vd., 2011). Bu yolda, LA ve ALA önce spesifik bir D9-elongaz tarafından eikosadienoik aside (EDA; C20:2n-9) ve eikosatrienoik aside (ETra; C20:3n-9) uzatılır. Bu C20 ürünleri daha sonra bir D8-desaturaz tarafından DGLA ve

ETA'ya desatüre edilir. Son olarak, bu PUFA'lar geleneksel yola girer ve bir D5-desaturaz tarafından desatüre edilerek ARA ve EPA elde edilir (Ruiz-López vd., 2012). Bu iki yol Şekil 5'te şematik olarak gösterilmiştir. Tüm bu aktiviteler için birden fazla gen son on yılda çeşitli mikrobiyal kaynaklardan tanımlanmıştır.

Yukarıda belirtildiği gibi, çoğu deniz organizması DHA üretmek için D6 yolu veya 'geleneksel' aerobik yolu (desatürasyon/uzama yolu) kullanır. Bununla birlikte, bazı deniz mikroorganizmaları anaerobik koşullarda EPA, DPA ve DHA üretebilir. Bu organizmalar, çok uzun zincirli-PUFA'ları sentezlemek için bakteriyel poliketid sentazına benzer bir enzimatik kompleks kullanır. Bu yol, malonil-CoA'yı herhangi bir yağ asidi ara maddesi olmaksızın omega-3 LC-PUFA'larına dönüştürmek için ilerleyici bir poliketid sentaz benzeri enzimatik sistem kullanan anaerobik bir yol aracılığıyla EPA veya DHA'nın biyosentezidir. Bu yol için genler de tanımlanmış ve işlevsel olarak karakterize edilmiştir (Metz vd., 2001).



Şekil 5. Omega-3 LC-PUFA'ların biyosentezi için aerobik yolların şematik gösterimi. İlgili desaturaz, elongaz aktiviteleri ve ilişkili substratları, bazı sınırlı örneklerde gözlemlenen alternatif D8 yolu.

Bu yollarda yer alan genlerin hepsi tanımlanmış ve birkaç mikroalg türünde karakterize edilmiş ve karasal yağ tohumu bitki konaklarına

girmeleri sağlanmıştır. Aerobik yağ asidi desatürasyon/uzama yolunun tamamlanmış biyosentez yolunu bazı kara bitkilerine dönüştüren birkaç araştırma grubu, omega-3 LC-PUFA içeriklerini artırmıştır (Qin vd., 2023);

(1) *Arabidopsis* (Fare kulağı teresi), heterogen entegrasyonundan sonra EPA ve DHA içeriği sırasıyla %2.5 ve %0.4'e yükselmiştir (Graham vd., 2007).

(2) *Brassica juncea* (Hint hardalı), modifikasyondan sonra %15 EPA ve %1.5 DHA'ya ulaşılmıştır (Wu vd., 2005).

(3) Transgen soya fasulyesi %19.6 EPA ve %3.3 DHA biriktirmiştir (Kinney vd., 2004; Y. Chen vd., 2014).

(4) *Brassica carinata*, omega-3 LC-PUFA sentezi için üç farklı desaturaz ve iki elongaz ekledikten sonra, %25 EPA bileşimine sahip tohumlar başarıyla üretilmiştir (Tablo1) (Cheng vd., 2010).

(5) *Brassica napus*'ta tohuma özgü promotörler altında bir vektör kontrolünde yedi genin ifade edilmesi, ilk kara tabanlı DHA üretim sistemlerinden birini oluşturmuştur. Bu transgenik DHA kanola tohumu %10 DHA içerir (MacIntosh vd., 2021).

(6) *Camelina sativa*'da gen modifikasyonundan sonra, EPA üretimi için bir yineleme tohumda %24 EPA biriktirmiştir; DHA ve EPA üretimi için başka bir yineleme tohumda %8 DHA ve %11 EPA biriktirmiştir (Tablo 1) (Ruiz-Lopez vd., 2014).

Balık yağına benzer bir tohum yağı bileşimi üretmek için yapılan sistematik çalışmaların çoğunluğu (yani toplam yağ asitlerinde ~%20 EPA ve DHA) model bitki türlerinde, yani arabidopsis ve tütünde yapılmıştır. Ancak, su ürünleri yetiştiriciliğinde gerekli olan omega-3 LC-PUFA hacimlerini üretmek, tarımsal yağ tohumu ürünlerinde EPA ve DHA üretimini gerektirir. Bu tür ürünlerle ilişkili ölçek fırsatları, önemli miktarlarda bir balık yağı ikamesi üretmenin tek şansını sağlar. Taramalar, mevcut yağ tohumu ürünlerinden, Omega-3 LC-PUFA üretimi için uygun iki konakçı belirlemiştir; birincisi, kolza tohumunun bir çeşidi olan kanola (*Brassica napus* L.) ve ikincisi, Camelina (*Camelina sativa* L.)'dır (Usher vd., 2015). Bunlarla ilgili araştırmalar öncelikli olarak Rothamsted Araştırma Tarım Bilimi Araştırma Enstitüsü (Harpenden, İngiltere) ve Avustalya Ulusal Bilim Ajansı, Commonwealth Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Örgütü (CSIRO, Avustralya) tarafından yürütülmektedir (Sprague vd., 2017). Omega-3 LC-PUFA'ların bitki konakçılarında başarılı bir şe-

kilde birikmesi, öncelikli olarak model tür Arabidopsis'te gerçekleştirilen çalışmalara dayanmaktadır (Petrie vd., 2012; Ruiz-Lopez vd., 2013). Ruiz-Lopez vd. (2014) daha sonra bu teknolojiyi, sırasıyla yalnızca EPA veya EPA + DHA yağı mühendisliği amacıyla beş veya yedi deniz mikroalg geninden oluşan yapılara sahip bir konakçı tür olarak Camelina'ya aktarmıştır. Yazarlar, yalnızca EPA içeren yağda toplam yağ asitlerinin %24'ü oranında bir EPA içeriği bildirirken, EPA+DHA yinelemesi sırasıyla %11 ve %8 oranında bir EPA ve DHA içeriği vermiştir (Tablo 1). Benzer şekilde, farklı yapılar kullanan Petrie vd.(2014), transgenik Camelina'dan elde edilen yağda toplam yağ asitlerinin %12.4'üne kadar varan önemli seviyelerde DHA üretimi göstermiştir, ancak EPA içeriği Ruiz-Lopez vd. (2014) tarafından elde edilene kıyasla nispeten düşük çıkmıştır (%0.8-3.3).

Bazı bakteriler ve birkaç deniz ökaryotu tarafından tercih edilen, omega-3 LC-PUFA üretebilen alternatif bir anaerobik yol, ek desaturazlara ihtiyaç duymadan malonil-CoA tarafından sağlanan C2 ünitelerinden omega-3 LC-PUFA dahil olmak üzere doymamış yağ asitlerini doğrudan biyosentezleyebilen poliketid sentazı içerir (Harwood ve Guschina, 2009; Napier vd., 2015). Walsh vd. (2016) bu yolu, Kanola'yı toplam yağ asitlerinin sırasıyla %0.7 ve %3.7'si oranında EPA ve DHA içeriğine sahip bir yağ üretmek için tasarlamakta kullanmışlardır. Aynı yazarlar, aynı PUFA sentaz sisteminin soya fasulyesinde tasarlanmasıyla %2.7 DHA ve %1.5 EPA içeren bir yağ elde edildiğini bildirmişlerdir. Poliketid yaklaşımı kullanılarak üretilen EPA ve DHA düzeyleri, aerobik mikroalg uzama/doymamışlık genleri (elongaz/desaturaz) kullanılarak gösterilen düzeylerden çok daha düşük olsa da (Petrie vd., 2014; Ruiz-Lopez vd., 2014), omega-3 LC-PUFA içeren yeni yağların üretimi için hala daha ileri bir seçenek sunmaktadır.

Bitkilerde kullanılan moleküler biyoloji teknolojisi, bitkilerin omega-3 LC-PUFA'ları başarılı bir şekilde üretmesini sağlar (Qin vd., 2023). Ancak bitkilerin ihmal edilemez bir darboğazı vardır: yağ asidinin uzaması ve doymamışlığı bir substratta paralel bir biçimde gerçekleşir. Desaturaz asil-PC'yi tercih eder ve elongaz asil-CoA'yı tercih eder (Frédéric Domergue vd., 2003). Asil-PC ve asil-CoA'nın her birinin omega-3 yağ asitlerini sentezlemek için kendi havuzları vardır. Desaturaz ve elongaz enzimlerinin farklı tercihleri göz önüne alındığında, asil-PC'den asil-CoA'ya verimli bir transfer için bir gereklilik vardır. Bu transfer, omega-3 yağ asitlerinin sentezinde ek bir adımdır. Bu nedenle, bitkilerin bu özellikleri, omega-3 yağ asitlerini sentezlemedeki verimsizliklerine katkıda bulunur. Bir diğer darboğaz, sentezden sonra omega-3 yağ asitlerinin asil-PC ve asil-CoA formatlarında olmasıdır. Bu iki asil formatı, trigliseritleri sentezlemek için farklı enzimler kullanır. Bir sentez yolu Kennedy yolu üzerinden gerçekleşirken, diğeri lizofosfatidilkolin asiltransferaz (LPCAT)

ve fosfolipid:diasilgliserol asiltransferaz (PDAT) gibi enzimler tarafından katalize edilmeyi içerir. Her iki yolun da etkili olduğundan emin olmak trigliserit sentezi için hayati önem taşır. Ancak bu, sürecin lipit sentezi için öncelikli olarak bir yolu kullanan diğer mikroplardaki kadar etkili olamayabileceği anlamına gelir (Abbadi vd., 2004; Y. Chen vd., 2014).

Yukarıda detaylı olarak açıklandığı gibi genetiği değiştirilmiş bitki tohumlarında omega-3 LC-PUFA'ların başarılı bir şekilde üretilmesi mümkündür. Ancak, EPA ve DHA üretmek üzere tasarlanmış genetiği değiştirilmiş yağ tohumu mahsulleriyle ilişkili birkaç potansiyel risk söz konusudur. Karasal bitkiler tarafından doğal olarak üretilmeyen EPA ve DHA'nın tanıtılması, karasal ekosistem dinamiklerini değiştirebilir. Bu, besin ağı boyunca karasal organizmaların fizyolojisini, hayatta kalmasını ve üreme dinamiklerini etkileyebilir. Besinsel EPA ve DHA, mahsul zararlılarının ve faydalı böceklerin büyümesini, üremesini ve hayatta kalmasını öngörülemeyen şekillerde etkileyebilir. Vahşi akrabalara veya GDO'suz mahsullere istenmeyen gen aktarımı riski vardır ve bu da potansiyel olarak bu yeni genlerin ekili alanların dışında da devam etmesine yol açabilir (Colombo vd., 2018). Bu risklerin, bu GDO'lu ürünlerin ticarileştirilmesinden önce dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi ve daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Tablo 1. Çeşitli bitkilerden omega-3 LC-PUFA'ların biyoyütetimi (Qin vd., 2023).

Bitkiler	Toplam yağ asitlerindeki EPA içeriği (%)	Toplam yağ asitlerindeki DHA içeriği (%);	Gen Modifikasyonu	Referanslar
<i>Brassica napus</i>	0.3-0.5	6.5-10.3	Evet	(MacIntosh vd., 2021)
<i>Camelina sativa</i>	24.0	8.0	Evet	(Ruiz-Lopez vd., 2014)
<i>Arachis hypogaea</i> <i>L.</i>	68.0	-	Evet	(Wang vd., 2019)
<i>Brassica napus</i>	-	9.0-11.0	Evet	(Petrie vd., 2020)
<i>Arabidopsis</i>	2.5	0.5	Evet	(Graham vd., 2007)
<i>Brassica juncea</i>	15.0	1.5	Evet	(Wu vd., 2005)
<i>Glycine max</i>	19.6	3.3	Evet	(Y. Chen vd., 2014)
<i>Brassica carinata</i>	25.0	-	Evet	(Cheng vd., 2010)
<i>Brassica napus</i>	-	10.0	Evet	(MacIntosh vd., 2021)
<i>Camelina sativa</i>	24.0	-	Evet	(Ruiz-Lopez vd., 2014)
<i>Camelina sativa</i>	8.0	11.0	Evet	(Ruiz-Lopez vd., 2014)

OMEGA-3 LC-PUFA KAYNAĞI MİKROALGLER

“Alg” terimi, fotosentez yoluyla hayatta kalabilen ve çoğalabilen çeşitli mikro ve makro su organizmalarını tanımlar. Makroalgler (çok hücreli) ve mikroalgler (tek hücreli) hem tatlı su hem de deniz ortamlarında gelişir (Patras vd., 2019). Mikroalgler, suda yüzen planktonik veya bentik alglerdir, makroalgler ise bentik ve hareketsizdir (Pinckney, 2018; Levring vd., 2019). Bunlar, zarla çevrili bir çekirdekten yoksun olan ve bakteri ile bitki arasında sınıflandırılan ökaryotik türleri veya prokaryotik siyanobakterileri içerir (Patras vd., 2019). Mikroalgler, ökaryotlar ve prokaryotlar içeren tek hücreli türlerdir. En küçük mikroalgler sadece birkaç mikron iken, daha büyük olanlar yüz mikrona ulaşabilir, okyanus ve tatlı suda yaygın olarak dağılım gösterirler (Ryckebosch vd., 2012). Mikroalgler, proteinler, lipitler, karotenoidler, hidrokarbonlar ve vitaminler gibi biyoaktif bileşiklerin güvenilir bir kaynağı olarak kabul edilmişlerdir (Barka ve Blecker, 2016; Pinckney, 2018). Mikroalglerde ilgi çeken bu bileşiklerin seviyeleri bitki ve hayvanlardakine benzer veya daha yüksektir (Chacón-Lee ve González-Mariño, 2010; Barka ve Blecker, 2016). Son yıllarda, türler göre mikroalglerin toplam biyokimyasal içeriğinin %74’üne kadarını temsil edebilen mikroalg lipitlerine özel ilgi gösterilmiştir (Bernaerts vd., 2019). Bu moleküller, 12 ila 24 karbon atomu içeren yağ asitleriyle oluşturulur ve n-3 (omega-3) veya n-6 ailelerinin çoklu doymamış yağ asitlerini içerirler (Patras vd., 2019).

Mikroalglerin büyük miktarlarda PUFA, değişken miktarda tekli doymamış yağ asitleri ve düşük miktarda doymuş yağlar sentezlediği bilinmektedir (Gladyshev vd., 2013). Ortalama lipit içerikleri türlere ve büyüme koşullarına göre %1 ile %40 arasında değişmektedir (Chacón-Lee ve González-Mariño, 2010). Balık yağına alternatif bir biyolojik üretim omega-3 LC-PUFA kaynağı olarak mikroalgler, kirlenmemiş, sürdürülebilir, ekilebilir, arazisiz ve hızlı büyüyen operasyonlarda gelecek vaat eden bir seçenek sunarlar (Couto vd., 2021). Mikroalgler, deniz besin zincirindeki ilk omega-3 LC-PUFA üreticileridir ve farklı trofik yetiştirme koşulları altında daha hızlı büyüyebilirler (Adarme-Vega vd., 2014; W. Chen vd., 2023).

İki kat hızla çıkma süreleri nedeniyle, omega-3 LC-PUFA biyolojik üretimi için mikroalgler her 4-6 günde bir hasat edilirken, kara bitkileri yılda yalnızca 2-3 kez hasat edebilir (Rittmann, 2008). Bu hasat açısından mikroalglerin kara bitkilerine göre iki kat daha hızlı olduğu anlamına gelir. Sonuç olarak, mikroalglerde omega-3 yağ asitlerinin birikmesi ve yüksek devir oranları, onları omega-3 yağ asitleri biyosentezinin son derece verimli ve sürdürülebilir bir kaynağı haline getirir (Barone vd., 2020). Kolay hasat, mikroalglerin bir diğer benzersiz avantajıdır (Abidizadegan

vd., 2021). Tek hücreli canlılar olarak, mikroalgler omega-3 yağ asitlerini tek hücrelerinin her birinde eşit şekilde biriktirebilirler. Bununla birlikte, omega-3 yağ asitleri genellikle hayvanların veya bitkilerin bazı belirli dokularında veya organizmalarında yoğunlaşır. Örneğin, balık karaciğerinde ve bitki tohumlarında yüksek konsantrasyonda omega-3 yağ asitleri bulunabilir. Omega-3 yağ asitleri hasadı için hayvanların veya bitkilerin belirli dokularını ayırmak için ekstra adımlar, üretim maliyetini artırabilir ve gereksiz atık üretebilir. Bu özellik, mikroalgleri bitkilerden veya hayvanlardan daha uygun bir omega-3 yağ asitleri ürün hasadı kaynağı haline getirir. Küresel gıda krizi kritik bir konudur. Kara bitkilerinden omega-3 yağ asitleri üretimi, potansiyel olarak gıda üretimiyle rekabet eden ekilebilir arazilere dayanmaktadır. Bununla birlikte, mikroalg yetiştiriciliği bu zorlukların üstesinden gelmek için umut verici bir alternatif sunmaktadır (Rittmann, 2008).

Mikroalgler, omega-3 LC-PUFA'ların geleneksel kaynakları olarak kabul edilen hayvanlardan ve bitkilerden daha hızlı bir büyüme oranı sergiler (Perdana vd., 2021). Yüksek lipit seviyelerine sahiptirler ve kuru hücre ağırlığı başına toplam lipit içeriği %20-70 arasındadır (Lowrey vd., 2016; D. Sun vd., 2017). DHA üreticilerinin dinofit, haptofit, bazı kriptofit, thraustochytrid veya öglenoitler olduğu bilinmektedir (Fan vd., 2007; Mendes vd., 2009; Taipale vd., 2020). Dinofit, bazı taksonlardaki toplam yağ asitlerinin %40'ına kadar yüksek miktarda DHA üretebilir (Leblond ve Chapman, 2000; Usup vd., 2008; Mendes vd., 2009). Haptofitlerde, DHA üretimi toplam yağ asitlerinin %30'una ulaşabilir (Da Costa vd., 2017). Thraustochytrid, en önemli DHA üreticilerinden olmaya devam etmektedir ve *Aurantiochytrium* ve *Schizochytrium* cinslerinde triasilgiserit formunda toplam yağ asitlerinin yaklaşık %60'ını sentezler (Fan vd., 2007; Lee Chang vd., 2014).

EPA sentezleyen taksonlar, *Phaeodactylum tricornutum* gibi Diyatomlar, *Nannochloropsis* sp. gibi Eustigmatofitler ve bazı Haptofitlerdir (Liang vd., 2014; Yao vd., 2015; Zulu vd., 2018; Taipale vd., 2020). Diatomlar, yaklaşık %20 EPA ve düşük oranda DHA sentezleyebilir (Liang vd., 2014). Eustigmatofit, *Nannochloropsis oculata*, %15 ila %30 arasında EPA üretir (Yao vd., 2015). Siyanobakteriler veya Klorofitler gibi diğer taksonlar için, uzun zincirli n-3 PUFA üretiminin ihmal edilebilir düzeyde olduğu varsayılabilir (Gladyshev ve Sushchik, 2019). *Chlorella vulgaris*'da yalnızca ALA ve SDA gibi belirli PUFA seviyeleri bulunabilir (Taipale vd., 2020). Çeşitli mikroalglerden omega-3 LC-PUFA'ların biyoüretimine ilişkin bazı çalışmalarda elde edilen EPA ve DHA içerikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Mikroalglerden elde edilen omega-3 LC-PUFA'lar kolesterol içermez, kontaminasyon içermez ve balık kokusu içermez (Mendes vd., 2009). Bu özellikler mikroalgleri potansiyel bir alternatif omega-3 LC-PUFA üretim kaynağı haline getirir. Mikroalgler, ışık, inorganik ve organik karbon kaynaklarını kullanarak farklılaşarak fototrofik, heterotrofik ve miksotrofik olarak büyüeyebilen adapte olabilen mikroorganizmalardır (Barta vd., 2021). Fotoototrofik işleme, fotosentez yoluyla enerji kaynağı olarak ışık kullanılarak inorganik karbon kaynaklarından (CO_2) omega-3 LC-PUFA'ların de novo üretimini içerir. Düşük karbon ayak izine sahip bu işlem, omega-3 LC-PUFA üretimi için sürdürülebilir ve uygun maliyetlidir, ancak ışık gereksinimi, fotobiyoreaktör tasarımının yüksek gereksinimine yol açar ve bu da gelişimini sınırlar. Açık havuzlar, fototrofik mikroalgler için ideal ortamlar olarak hizmet edebilir. Ancak, çevresel dalgalanmalara karşı hassastırlar ve başlangıç maliyetleri yüksektir (Russo vd., 2021). Bunun tersine, heterotrofik süreç, omega-3 yağ asitleri üretmek için glikoz, ksiloz, asetat, atık su ve mahsül unu gibi organik karbon kaynaklarını kullanır. Tüm bu ucuz organik karbon kaynakları, ışık olmadan paslanmaz çelik kaplarda yüksek hücre yoğunluklu fermentasyon yoluyla omega-3 yağ asitleri üretmek için kullanılabilir. Yüksek hücre yoğunluğu, omega-3 yağ asitleri üretmenin maliyetini azaltacaktır (Winwood, 2013).

Tablo 2. Çeşitli mikroalglerden omega-3 LC-PUFA'ların biyoyüretimine ilişkin bazı çalışmalarda elde edilen EPA ve DHA içerikleri (Lu vd., 2021; Qin vd., 2023).

Mikroalgler	Toplam yağ asitlerindeki EPA içeriği (%)	Toplam yağ asitlerindeki DHA içeriği (%);	Gen Modifikasyonu	Referanslar
<i>Arcocellulus cornucervis</i>	12.0	2.02	Hayır	(Steinrücken vd., 2017)
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	7.33	0.58	Hayır	(Steinrücken vd., 2017)
<i>Attheya septentrionalis</i>	24.1	3.17	Hayır	(Steinrücken vd., 2017)
<i>Thalassiosira hispida</i>	11.5	1.33	Hayır	(Steinrücken vd., 2017)
<i>Fistulifera sp.</i>	17.1		Hayır	(Liang vd., 2013)
<i>Synedra fragilaroides</i>	11.0	2.1	Hayır	(Ying vd., 2000)
<i>Nitzschia closterium</i>	19.5	1.1	Hayır	(Ying vd., 2000)
<i>Phaeodactylum tricomutum</i>	8.8	0.5	Hayır	(Ying vd., 2000)
<i>Vischeria vischeri</i>	8.24	-	Hayır	(Yakoviiichuk vd., 2023)
<i>Monodus subterraneus</i>	32.9	-	Hayır	(Qiang vd., 1997)
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	61.9	-	Hayır	(Patil vd., 2007)
<i>Nannochloropsis oculata</i>	18.1	-	Hayır	(Aussant vd., 2018)
<i>Stauroneis sp.</i>	27.0	-	Hayır	(Archer vd., 2019)
<i>Chlorella sp.</i>	-	-	Hayır	(Rasheed vd., 2020)
<i>Paragymnodinium shiwahaense</i>	19.0	36.0	Hayır	(Jang vd., 2017)
<i>Gymnodinium smaydae</i>	8.4	43.0	Hayır	(Sivakumar vd., 2022)
<i>Phaeothamnion sp.</i>	12.0	7.0	Hayır	(Archer vd., 2019)
<i>Schizochytrium sp</i>	50.0	-	Hayır	(da Silva vd., 2019)
<i>Nannochloropsis salina</i>	16.3	-	Hayır	(Hoffmann vd., 2010)
<i>Diacronema sp.</i>	2.0	4.0	Hayır	(Archer vd., 2019)

OMEGA-3 LC-PUFA KAYNAĞI MANTARLAR

Çeşitli üretim platformları arasında, maya sistemleri omega-3 LC-PUFA'ların sürdürülebilir, endüstriyel ölçekte üretimi için umut vadeden adaylar olarak ortaya çıkmıştır. Mayalar, kuru hücre ağırlıklarının %90'ına kadarını ağırlıklı olarak linoleik ve oleik asitler dahil olmak üzere doymamış yağ asitlerinden oluşan triasilgliseroller olarak biriktirebilmektedir (Kumari vd., 2025). Maya, hızlı büyüme, genetik işlenebilirlik ve çeşitli hammaddeleri asimile etme yeteneği dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunmaktadır (Garay vd., 2016). Mantarlar genellikle birkaç farklı karbon kaynağında büyüyebilir ve bu da onu omega-3 LC-PUFA üretimi için esnek bir seçenek haline getirir. Bu çok karbonlu kaynak seçeneği asetat, ksiloz ve gliserol gibi uygun maliyetli kaynakların kullanımına olanak tanır. Dahası, mantarlar tek bir biyoreaktörde daha yüksek bir omega-3 yağ asidi titresine sahip olan omega-3 LC-PUFA biyoüretimi için yüksek yoğunluklu hücre fermantasyonuna uğrayabilir. Bu işlem fermantasyon için önemli miktarda alan ve hacim tasarrufu sağlar. Mantarlar ayrıca nispeten yüksek doğal lipit sentez yeteneklerine sahiptir ve bu da onları omega-3 LC-PUFA sentezi için ideal bir aday yapar. Örneğin, DuPont tarafından tasarlanan *Yarrowia lipolytica*, toplam lipitlerin %50'sini oluşturan EPA üretebilmektedir (Xue vd., 2013; Dongming Xie vd., 2015). DHA şu anda DSM (eski adıyla Martek) tarafından *Cryptocodinium cohnii* (Wynn vd., 2010) kullanılarak üretilmekte ve bu bebek mamalarında bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Benzer şekilde, *Schizochytrium* sp. kullanılarak heterotrofik DHA üretimi için yüksek konsantrasyonlar (%22 toplam lipit) bildirilmiştir (Cohen ve Ratledge, 2005). Diğer potansiyel EPA kaynakları arasında mantar türleri de bulunur. Örneğin, *Mortierella* cinsinin türlerinin gram kuru miselyum başına 29-64 mg'a kadar EPA ürettiği bulunmuştur (Shimizu vd., 1988; Jareonkitmongkol vd., 1993), bu da toplam yağ asitlerinin %20'sine tekabül etmektedir.

Yarrowia lipolytica, *Mortierella alpina*, *Schizochytrium limacinum*, *Cryptocodinium cohnii* ve *Ulkenia* sp. gibi bazı ümit verici yağlı mikroorganizmalar halihazırda GRAS statüsüne sahiptir. Bu yağ üreten mikroorganizmalar arasında, *Schizochytrium limacinum* lipit biriktirme kapasitesinin yüksek olması nedeniyle en popüler türlerden biridir (Yokochi vd., 1998; Chi vd., 2009; Huang vd., 2012). Hücrelerinde lipitlerin %20'sinden fazlasını biriktirebilen yağlı mantarlar, omega-3 LC-PUFA sentezi için potansiyel bir hücre fabrikası olarak değerlendirilmek üzere alternatif bir mikroorganizma türü sunar (Patel vd., 2020). Qin vd. (2023) ve Kumari vd. (2025) tarafından yapılan araştırma makalelerinde mantarlar tarafından üretilen omega-3 LC-PUFA (EPA ve DHA) içerikleri Tablo 3'te verilmiştir. Ancak, mantarlar tarafından yapılan mevcut

omega-3 LC-PUFA üretimi hala büyük zorluklar ve sınırlamalarla karşı karşıyadır, bunlardan birkaçı aşağıda listelenmiştir (Qin vd., 2023):

(1) Bakterilerle karşılaştırıldığında ($\alpha_{\max} \sim 2 \text{ h}^{-1}$), mantarlar nispeten düşük bir büyüme oranına sahiptir ($\mu_{\max} \leq 0.2 \sim 0.3 \text{ h}^{-1}$), bu da daha düşük büyüme oranı nedeniyle nispeten daha düşük bir üretkenliğe yol açar (R. J. Allen ve Waclaw, 2018).

(2) Yağlı mantarlardan omega-3 yağ asitlerinin toplanması ve saflaştırılması, bunların gelişimini sınırlayan zorluklar sunar. Omega-6 yağ asitleri gibi hidrofobik yan ürünlerin safsızlığı, saflaştırmanın zorluğunu artırır. Mevcut birincil saflaştırma yöntemi, yağ asitlerinin dondurularak kurutulmuş hücrelerden transesterifikasyonunu içerir, bu enerji açısından verimsiz ve maliyetli bir işlemdir. Dahası, sert koşullar işleme sırasında omega-3 yağ asitlerini bozabilir. Bu yöntemin ürünü yalnızca yağ asidi metil esteri olabilir. Hücre zarlarındaki değişkenlik de bu yöntemin etkinliğini azaltabilir (Gorte vd., 2020).

(3) Tipik bir senaryoda, aerobik fermentasyon yüksek bir oksijen alım oranı (OUR) gerektirir. Eş zamanlı olarak, yüksek hücre yoğunluğu ve aerobik fermentasyon yükseltilmiş bir OUR gerektirir. Ancak, bu gereklilik oksijen transfer oranı veya soğutma kapasitesi açısından çoğu ticari ölçekli fermentasyon tankının kapasitesini aşabilir. İkincisi, aşırı ısı üretimi süreci bozabileceğinden sıcaklığın korunması özellikle önemlidir (D Xie vd., 2017).

(4) Düşük lipit verimi, mantarlardan omega-3 LC-PUFA'ların endüstriyel biyoüretim potansiyelini önemli ölçüde sınırlar. Örneğin, yağlı bir mantar olan *Y. lipolytica*, teorik olarak gram glikoz başına yalnızca 0.271 g SDA üretebilir. Bu sınırlama, öncelikle SDA sentezinin glikozun anabolikinden yeterli miktarda ATP ve NADPH enerji yardımcı faktörü gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. Bir metabolik mühendislik yöntemi tüm NADH'yi NADPH'ye dönüştürebilse bile, teorik verim gram glikoz başına yalnızca 0.351 g'a yükselir (Qiao vd., 2017). Ayrıca, sitrik asit genellikle lipit sentezi sırasında bir yan ürün olarak üretilir ve %35 karbon kaynağı tüketir; bu da ihmal edilemez bir sayıdır (Liu vd., 2021). Dahası, karbonun %50'sinden fazlası ATP üretimi ihtiyacı nedeniyle CO₂ olarak kaybolur.

(5) Birincil karbon kaynağı olarak glikozun kullanılması önemli sınırlamalara sahiptir. Genellikle karasal bitkilerden elde edilen glikozun temini, gıda mahsulü üretimi için ekilebilir araziye olan taleple rekabet edebilir ve potansiyel olarak küresel gıda krizlerini daha da kötüleştirir. Ek olarak, glikozu omega-3 LC-PUFA'lara dönüştürmek uzun ve verimsizdir ve 20'den fazla adım içerir. Toplu veya beslemeli toplu işlem-

le ilişkili düşük dönüşüm verimi, düşük üretkenlik ve yüksek sermaye maliyetleri, mantarlardan biyoüretim omega-3 LC-PUFA'ların ilerlemesini engeller. Maya biyokütlesinden EPA/DHA'nın çıkarılmasını içeren ürün saflaştırma işlemi karmaşık ve maliyetlidir. Santrifüjleme ve filtrasyonla biyokütle hasadı, biyokütle kurutma, ekstrüzyon gibi biyokütle parçalama teknikleri, hekzan çözücüler kullanılarak lipit çıkarma ve çıkarılan lipitlerden DHA/EPA'nın damıtılması dahil olmak üzere bir dizi işlemi gerektirir. Bu karmaşıklıklar ve maliyetler, mantarlardan omega-3 LC-PUFA'ların üretim maliyetini daha da artırarak rekabet gücünü azaltır (Vasconcelos vd., 2018).

Tablo 3. Çeşitli mantarlardan omega-3 LC-PUFA'ların biyoüretimi (Qin vd., 2023; Kumari vd., 2025).

Mantarlar	Toplam yağ asitlerindeki EPA içeriği (%)	Toplam yağ asitlerindeki DHA içeriği (%);	Gen Modifikasyonu	Referanslar
<i>Pythium irregulare</i>	0.3	0.5	Evet	(O'Brien vd., 1993)
<i>Aurantiochytrium sp.</i>	10.4	40.2	Evet	(Li vd., 2015)
<i>Mortierella alpina</i>	26.4	-	Evet	(Okuda vd., 2015)
<i>Mortierella sp.</i>	6.7	4.9	Evet	(Vadivelan ve Venkateswaran, 2014)
<i>Mortierella alpina</i>	31.5	-	Evet,	(Tang vd., 2018)
<i>Aurantiochytrium limacinum</i>	-	15.0	Evet	(Abad ve Turon, 2015)
<i>Schizochytrium limacinum</i>	-	15.8	Evet	(Chi vd., 2009)
<i>Candida guilliermondii</i>	2.8	6.7	Evet	(Guo ve Ota, 2000)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	0.20	-	Evet	(Beaudoin vd., 2000)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	0.23	-	Evet	(Frederic Domergue vd., 2002)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	6.25	-	Evet	(Pereira vd., 2004)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	4.5	-	Evet	(Frédéric Domergue vd., 2005)

<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	0.49	-	Evet	(Tavares vd., 2011)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	-	8.0	Evet	(Metz vd., 2009)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	0.5	-	Evet	(Tavares vd., 2011)
<i>Pichia pastoris</i>	0.05	-	Evet	(Kajikawa vd., 2004)
<i>Pichia pastoris</i>	0.03	-	Evet	(Kajikawa vd., 2004)
<i>Yarrowia lipolytica</i>	18.6	-	Evet	(Damude vd., 2006)
<i>Yarrowia lipolytica</i>	56.6	-	Evet	(Xue vd., 2013), (Dongming Xie vd., 2015)
<i>Yarrowia lipolytica</i>	-	16.8	Evet	(Gemperlein vd., 2019)

OMEGA-3 LC-PUFA KAYNAĞI BAKTERİLER

Bakteriler omega-3 LC-PUFA biyosentezi için uygun bir konakçı sunar. Bakteriler omega-3 LC-PUFA'ları sentezlemek için doğal bir yola sahip olmasalar da, bakteri suşlarını tasarlamak için moleküler biyoloji araçları olgunlaşmıştır ve bu da daha verimli omega-3 LC-PUFA sentez yollarını keşfetmeyi ve geliştirmeyi potansiyel olarak daha kolay hale getirmektedir (Giner-Robles vd., 2018). Bununla birlikte bakteriler hızla büyür ve bu da omega-3 LC-PUFA ürünleri elde etmek için daha kısa bir kültür süresi olasılığını gösterir. Ancak bakteriler hücreleri içinde yeterli lipit biriktirmede zorluk çeker ve bu da omega-3 LC-PUFA üretimde düşük verimliliğe yol açmaktadır (Qin vd., 2023). Mikroalgler ve mantarlarla karşılaştırıldığında, bakteriler etkisiz EPA üreticileri olarak kabul edilir. Genetik modifikasyona tabi tutulmuş bazı bakteriler ve bunlardan biyoyretim yolu ile elde edilen EPA ve DH içerikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Shewanella, *Photobacterium*, *Colwellia*, *Vibrio*, *Moritella* ve *Psychromonas* gibi PUFA üreten bakterilerin çoğu Gammaproteobacteria sınıfına aittir (Tablo 4) (Nogi vd., 2007; Freese vd., 2009). PUFA üreten bir diğer deniz bakteri grubu Flavobacterium grubunda bulunur, örneğin *Flexibacter* ve *Psychroserpens* (Bergé ve Barnathan, 2005; Freese vd., 2009; Nogi, 2011). *Shewanella*'nın EPA üreten türlerinde, toplam yağ asitlerinin %2-36.6'sı kadar EPA içerdiği bulunmuştur (DeLong vd., 1997; Nogi vd., 1998a; Miyazaki vd., 2006; Xiao vd., 2007). *Photobacterium* spp., özellik-

le EPA olmak üzere PUFA'lar üretme kabiliyetleri nedeniyle derin deniz bakterilerinin özel bir sınıfı olarak kabul edilir (E. E. Allen ve Bartlett, 2002). Bu bakteri grupları deniz psikrofilik ve piezofilik olarak karakterize edilir (Fang ve Kato, 2007). Tüm *Photobacterium* türleri arasında, yalnızca üç tür uzun zincirli PUFA'ların üretiminden sorumludur, bunlar *P. profundum*, *Photobacterium frigidophilum* ve *Photobacterium* sp. suşu SAMA2'dir (Moi vd., 2018). *Colwellia* genellikle deniz habitatından izole edilen türlerden oluşmaktadır. *Colwellia demingiae*, *C. psychrerythraea*, *Colwellia psychrotropica*, *C. rossensis* ve *Colwellia hornerae* gibi beş psikrofilik tür DHA içerir (% 0.7-8.0) (Bowman vd., 1998). *Moritella*'nın *M. marina*, *M. yayanosii* ve *M. japonica* olan üç türü zarlarında büyük miktarda DHA içerir (Urakawa vd., 2000). *Psychromonas* cinsin önemli türleri arasında, *Psychromonas antarctica*, *Psychromonas kaikoe* ve *Psychromonas profundum* sayılabilir. Bunlar toplam yağ asitlerinin %1.6-3.0 kadar DHA içerebilirler (Kawasaki vd., 2002; Nogi vd., 2002). *Vibrio*'nun *Vibrio* sp. strain 5710, *Vibrio* sp. strain 5705, ve *Vibrio* sp. strain 5703 suşları DHA üretirken (%18.6-22.7), *Vibrio cyclitrophicus*, *Vibrio* sp. strain A7, *Vibrio pelagius*, *Vibrio* sp. strain 29-1 ve *Vibrio* sp. strain 814-4 suşları da EPA (%8.7-19.7) içermektedir (Ring, Sinclair, vd., 1992; Hamamoto vd., 1995; Abd Elrazak vd., 2013).

Acinetobacter calcoaceticus, *Bacillus acidophilus*, *Arthrobacter* sp. ve *Rhodococcus opacus* PUFA üreten diğer bakterilerdir. BRI 35 (*Coccoid Actinobacteria*, Gram pozitif, Micrococcaceae), Antarktika deniz suyundan izole edilmiştir (Alvarez vd., 2021). Organik substratlar, yani yan ürünler ve atıklar dahil olmak üzere üretim süreci boyunca bir dizi substratı kullanma yetenekleri, mikrobiyal PUFA'ların balık yağlarına göre sağladığı avantajlardan biridir (Fu vd., 2021).

Birkaç deniz bakterisi PUFA üretebilse de, verimleri nispeten düşüktür. Deniz bakterilerinde genetik dönüşüm sisteminin keşfi, metabolik mühendislik yoluyla omega-3 LC-PUFA üretimini artırmak için temel yollar sağlamıştır. Omega-3 LC-PUFA üretimini arttırmaya yönelik metabolik mühendislik çalışmaları *E. coli*, *Synechococcus* sp., *Lactococcus lactis* ve *Pseudomonas putida* gibi bakterilere uygulanmıştır (Moi vd., 2018). Bakteriler tarafından omega-3 LC-PUFA'ların üretimi bazı sınırlamalardan muzdariptir. Hücreler içinde lipit biriktirme yeteneklerinin düşük olması ve lipitleri metabolize etmedeki verimsizlikleri nedeniyle, bakteriler tarafından üretilen omega-3 LC-PUFA'ların verimi ve titresi tatmin edici değildir. Omega-3 LC-PUFA'ların bakteri bazlı üretimine dair raporlar olsa da, ortaya çıkan verim ve konsantrasyon kabul edilebilir standartları karşılamamaktadır (Qin vd., 2023).

Tablo 4. Çeşitli bakterilerden omega-3 LC-PUFA'ların biyosentezi (*Qin vd., 2023*).

Bakteriler	Toplam yağ asitlerindeki EPA içeriği (%)	Toplam yağ asitlerindeki DHA içeriği (%)	Gen Modifikasyonu	Referanslar
<i>Myxobacteria spp.</i>	10.3	11.9	Evet	(Garcia vd., 2016)
<i>Escherichia coli</i>	-	31.7	Evet	(Giner-Robles vd., 2018)
<i>Escherichia coli</i>	0.4	-	Evet	(Thiyagarajan vd., 2021)
<i>Shewanella spp.</i>	2.0-36.0	-	Evet	(Moi vd., 2018)
<i>Photobacterium spp.</i>	6.0-15	-	Evet	(E. E. Allen ve Bartlett, 2002; Fang ve Kato, 2007)
<i>Colwellia spp.</i>	-	0.7-8.0	Evet	(Bowman vd., 1998)
<i>Moritella spp.</i>	-	6.0-12.0	Evet	(Nogi vd., 1998b; Nogi ve Kato, 1999; Kautharapu vd., 2013)
<i>Psychromonas spp.</i>	-	1.6-3.0	Evet	(Kawasaki vd., 2002; Nogi vd., 2002)
<i>Vibrio spp.</i>	8.7-19.7	-	Evet	(Ring, Jøstensen, vd., 1992; Ring, Sinclair, vd., 1992; Hamamoto vd., 1995; Abd Elrazak vd., 2013)
<i>Vibrio spp.</i>	-	18.6-22.7	Evet	(Hamamoto vd., 1995)

SONUÇ

Bu kapsamlı inceleme ile omega-3 LC-PUFA'ların mevcut kaynakları, üretim yöntemleri ve gelecekteki potansiyel alternatifleri değerlendirilmiştir. Çalışmada, özellikle EPA ve DHA'nın insan sağlığı üzerindeki önemli etkilerini vurgulamış ve mevcut ana kaynak olan balık yağlarının sürdürülebilirlik sorunlarını ele almıştır. Araştırmada, bitkiler, mikroalgler, mantarlar ve bakteriler gibi alternatif omega-3 LC-PUFA kaynakları incelenmiştir. Genetik modifikasyon yoluyla bitkilerde EPA ve DHA üretimi mümkün hale gelmiş, ancak üretim verimliliği ve etik kaygılar hala önemli zorluklar olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikroalgler, yüksek üretim potansiyeli ve sürdürülebilirlik açısından umut verici bir kaynak olarak öne çıkmıştır. Mantarlar, endüstriyel ölçekte üretim imkanları sunmakla birlikte, düşük büyüme oranları ve saflaştırma zorlukları gibi sınırlamalarla karşı karşıyadır. Bakteriler ise hızlı büyüme avantajına sahip olmalarına rağmen, düşük lipit biriktirme yetenekleri nedeniyle verim ve konsantrasyon açısından tatmin edici sonuçlar vermemiştir. Gelecekteki araştırmalar, bu alternatif kaynakların potansiyelini optimize etmeye odaklanmalıdır. Özellikle, mikroalg ve mantar türlerinin genetik mühendisliği yoluyla üretim verimliliğinin artırılması, bakterilerde lipit biriktirme kapasitesinin iyileştirilmesi ve bitkilerde omega-3 LC-PUFA sentez yollarının optimizasyonu önem taşımaktadır. Ayrıca, üretim maliyetlerini düşürmek için biyoproses teknolojilerinin geliştirilmesi de kritik bir araştırma alanıdır. Sonuç olarak, bu inceleme omega-3 LC-PUFA'ların sürdürülebilir üretimi için çeşitli alternatif kaynakların potansiyelini ortaya koymuştur. Gelecekteki araştırmalar, bu zorlukların üstesinden gelmek ve omega-3 LC-PUFA'ların daha verimli ve sürdürülebilir üretimini sağlamak için multidisipliner bir yaklaşım benimsemelidir. Bu çabalar, artan küresel talebe cevap verirken aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği de göz önünde bulundurmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abad, S., Turon, X. (2015). Biotechnological production of docosahexaenoic acid using *aurantiochytrium limacinum*: Carbon sources comparison and growth characterization. *Marine Drugs*, 13(12), 7275–7284. doi:10.3390/md13127064
- Abbadi, A., Domergue, F., Bauer, J., Napier, J. A., Welti, R., Zahringer, U., ... Heinz, E. (2004). Biosynthesis of very-long-chain polyunsaturated fatty acids in transgenic oilseeds: constraints on their accumulation. *The Plant Cell*, 16(10), 2734–2748.
- Abd Elrazak, A., Ward, A. C., Glassey, J. (2013). Polyunsaturated fatty acid production by marine bacteria. *Bioprocess and biosystems engineering*, 36, 1641–1652.
- Abidizadegan, M., Peltomaa, E., Blomster, J. (2021). The potential of cryptophyte algae in biomedical and pharmaceutical applications. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 618836.
- Adarme-Vega, T. C., Lim, D. K. Y., Timmins, M., Vernen, F., Li, Y., Schenk, P. M. (2012). Microalgal biofactories: a promising approach towards sustainable omega-3 fatty acid production. *Microbial cell factories*, 11, 1–10.
- Adarme-Vega, T. C., Thomas-Hall, S. R., Schenk, P. M. (2014). Towards sustainable sources for omega-3 fatty acids production. *Current Opinion in Biotechnology*, 26, 14–18. doi:10.1016/j.copbio.2013.08.003
- Adili, R., Hawley, M., Holinstat, M. (2018). Regulation of platelet function and thrombosis by omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids. *Prostaglandins & other lipid mediators*, 139, 10–18.
- Alfio, V. G., Manzo, C., Micillo, R. (2021). From fish waste to value: an overview of the sustainable recovery of omega-3 for food supplements. *Molecules*, 26(4), 1002.
- Allen, E. E., Bartlett, D. H. (2002). Structure and regulation of the omega-3 polyunsaturated fatty acid synthase genes from the deep-sea bacterium *Photobacterium profundum* strain SS9. *Microbiology*, 148(6), 1903–1913.
- Allen, R. J., Waclaw, B. (2018). Bacterial growth: a statistical physicist's guide. *Reports on Progress in Physics*, 82(1), 16601.
- Alvarez, H. M., Hernández, M. A., Lanfranconi, M. P., Silva, R. A., Villalba, M. S. (2021). *Rhodococcus* as biofactories for microbial oil production. *Molecules*, 26(16), 4871.
- Appleton, K. M., Voyias, P. D., Sallis, H. M., Dawson, S., Ness, A. R., Churchill, R., Perry, R. (2021). Omega-3 fatty acids for depression in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (11).
- Archer, L., Mc Gee, D., Paskuliakova, A., McCoy, G. R., Smyth, T., Gillespie, E., Touzet, N. (2019). Fatty acid profiling of new Irish microalgal isolates producing the high-value metabolites EPA and DHA. *Algal Research*, 44(September), 101671. doi:10.1016/j.algal.2019.101671

- Augimeri, G., Bonofiglio, D. (2023). Promising effects of N-Docosahexaenoyl ethanolamine in breast Cancer: molecular and cellular insights. *Molecules*, 28(9), 3694.
- Aussant, J., Guihéneuf, F., Stengel, D. B. (2018). Impact of temperature on fatty acid composition and nutritional value in eight species of microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, 102, 5279–5297.
- Barka, A., Blecker, C. (2016). Microalgae as a potential source of single-cell proteins. A review. *Base*.
- Barone, R., De Napoli, L., Mayol, L., Paolucci, M., Volpe, M. G., D'Elia, L., ... Carraturo, F. (2020). Autotrophic and heterotrophic growth conditions modify biomolecule production in the microalga *Galdieria sulphuraria* (Cyanidiophyceae, Rhodophyta). *Marine drugs*, 18(3), 169.
- Barta, D. G., Coman, V., Vodnar, D. C. (2021). Microalgae as sources of omega-3 polyunsaturated fatty acids: Biotechnological aspects. *Algal Research*, 58(July), 102410. doi:10.1016/j.algal.2021.102410
- Beaudoin, F., Michaelson, L. V., Hey, S. J., Lewis, M. J., Shewry, P. R., Sayanova, O., Napier, J. A. (2000). Heterologous reconstitution in yeast of the polyunsaturated fatty acid biosynthetic pathway. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(12), 6421–6426.
- Benvenega, S., Famà, F., Perdichizzi, L. G., Antonelli, A., Brenta, G., Vermiglio, F., Moleti, M. (2022). Fish and the thyroid: A janus bifrons relationship caused by pollutants and the omega-3 polyunsaturated fatty acids. *Frontiers in Endocrinology*, 13, 891233.
- Bergé, J.-P., Barnathan, G. (2005). Fatty acids from lipids of marine organisms: molecular biodiversity, roles as biomarkers, biologically active compounds, and economical aspects. *Marine biotechnology* 1, 49–125.
- Bernaerts, T. M. M., Gheysen, L., Foubert, I., Hendrickx, M. E., Van Loey, A. M. (2019). The potential of microalgae and their biopolymers as structuring ingredients in food: A review. *Biotechnology advances*, 37(8), 107419.
- Bernasconi, A. A., Wiest, M. M., Lavie, C. J., Milani, R. V., Laukkanen, J. A. (2021). Effect of omega-3 dosage on cardiovascular outcomes: an updated meta-analysis and meta-regression of interventional trials. **Mayo Clinic Proceedings**, Elsevier.
- Bowman, J. P., Gosink, J. J., McCammon, S. A., Lewis, T. E., Nichols, D. S., Nichols, P. D., ... McMeekin, T. A. (1998). *Colwellia demingiae* sp. nov., *Colwellia hornerae* sp. nov., *Colwellia rossensis* sp. nov. and *Colwellia psychrotropica* sp. nov.: psychrophilic Antarctic species with the ability to synthesize docosahexaenoic acid (22: 6 ω 3). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 48(4), 1171–1180.
- Calder, P. C. (2018). Very long-chain n-3 fatty acids and human health: Fact, fiction and the future. *Proceedings of the Nutrition Society*, 77(1), 52–72. doi:10.1017/S0029665117003950
- Calder, Philip C. (2016). Docosahexaenoic acid. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 69(1), 8–21. doi:10.1159/000448262

- Calder, Philip C. (1996). Immunomodulatory and anti-inflammatory effects of n-3 polyunsaturated fatty acids. *Proceedings of the Nutrition Society*, 55(2), 737–774.
- Calder, Philip C. (2010). Rationale and use of n-3 fatty acids in artificial nutrition. *Proceedings of the Nutrition society*, 69(4), 565–573.
- Calder, Philip C. (2023). Bioactive omega-3 fatty acids are associated with reduced risk and severity of SARS-CoV-2 infection. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 117(2), 213–215.
- Chacón-Lee, T. L., González-Mariño, G. E. (2010). Microalgae for “healthy” foods—possibilities and challenges. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 9(6), 655–675.
- Chen, W., Li, T., Du, S., Chen, H., Wang, Q. (2023). Microalgal polyunsaturated fatty acids: Hotspots and production techniques. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11(March), 1–22. doi:10.3389/fbioe.2023.1146881
- Chen, Y., Meesapyodsuk, D., Qiu, X. (2014). Transgenic production of omega-3 very long chain polyunsaturated fatty acids in plants: accomplishment and challenge. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 3(1), 38–43.
- Cheng, B., Wu, G., Vrinten, P., Falk, K., Bauer, J., Qiu, X. (2010). Towards the production of high levels of eicosapentaenoic acid in transgenic plants: the effects of different host species, genes and promoters. *Transgenic Research*, 19, 221–229.
- Chi, Z., Liu, Y., Frear, C., Chen, S. (2009). Study of a two-stage growth of DHA-producing marine algae *Schizochytrium limacinum* SR21 with shifting dissolved oxygen level. *Applied microbiology and biotechnology*, 81, 1141–1148.
- Cohen, Z., Ratledge, C. (2005). **Single cell oils: microbial and algal oils**. AOCS Publishing.
- Colombo, S. M., Campbell, L. G., Murphy, E. J., Martin, S. L., Arts, M. T. (2018). Potential for novel production of omega-3 long-chain fatty acids by genetically engineered oilseed plants to alter terrestrial ecosystem dynamics. *Agricultural Systems*, 164(July 2017), 31–37. doi:10.1016/j.agsy.2018.03.004
- Couto, D., Melo, T., Conde, T. A., Costa, M., Silva, J., Domingues, M. R. M., Domingues, P. (2021). Chemoplasticity of the polar lipid profile of the microalgae *Chlorella vulgaris* grown under heterotrophic and autotrophic conditions. *Algal Research*, 53, 102128.
- Da Costa, F., Le Grand, F., Quéré, C., Bougaran, G., Cadoret, J. P., Robert, R., Soudant, P. (2017). Effects of growth phase and nitrogen limitation on biochemical composition of two strains of *Tisochrysis lutea*. *Algal research*, 27, 177–189.
- da Silva, T. L., Moniz, P., Silva, C., Reis, A. (2019). The dark side of microalgae biotechnology: A heterotrophic biorefinery platform directed to ω -3 rich lipid production. *Microorganisms*, 7(12), 1–21. doi:10.3390/microorganisms7120670

- Damude, H. G., Zhang, H., Farrall, L., Ripp, K. G., Tomb, J.-F., Hollerbach, D., Yadav, N. S. (2006). Identification of bifunctional $\Delta 12/\omega 3$ fatty acid desaturases for improving the ratio of $\omega 3$ to $\omega 6$ fatty acids in microbes and plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(25), 9446–9451.
- Dave, D., Routray, W. (2018). Current scenario of Canadian fishery and corresponding underutilized species and fishery byproducts: A potential source of omega-3 fatty acids. *Journal of Cleaner Production*, 180, 617–641.
- DeLong, E. F., Franks, D. G., Yayanos, A. A. (1997). Evolutionary relationships of cultivated psychrophilic and barophilic deep-sea bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(5), 2105–2108.
- Domergue, Frédéric, Abbadi, A., Ott, C., Zank, T. K., Zähringer, U., Heinz, E. (2003). Acyl carriers used as substrates by the desaturases and elongases involved in very long-chain polyunsaturated fatty acids biosynthesis reconstituted in yeast. *Journal of Biological Chemistry*, 278(37), 35115–35126.
- Domergue, Frédéric, Abbadi, A., Zähringer, U., Moreau, H., Heinz, E. (2005). In vivo characterization of the first acyl-CoA $\Delta 6$ -desaturase from a member of the plant kingdom, the microalga *Ostreococcus tauri*. *Biochemical Journal*, 389(2), 483–490.
- Domergue, Frederic, Lerchl, J., Zähringer, U., Heinz, E. (2002). Cloning and functional characterization of *Phaeodactylum tricornutum* front-end desaturases involved in eicosapentaenoic acid biosynthesis. *European Journal of Biochemistry*, 269(16), 4105–4113.
- Domingo, J. L. (2007). Omega-3 fatty acids and the benefits of fish consumption: Is all that glitters gold?. *Environment International*, 33(7), 993–998. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.05.001>
- Domingo, J. L., Bocio, A., Falcó, G., Llobet, J. M. (2007). Benefits and risks of fish consumption: Part I. A quantitative analysis of the intake of omega-3 fatty acids and chemical contaminants. *Toxicology*, 230(2–3), 219–226.
- Easton, M. D. L., Luszniak, D., Von der Geest, E. (2002). Preliminary examination of contaminant loadings in farmed salmon, wild salmon and commercial salmon feed. *Chemosphere*, 46(7), 1053–1074.
- Engelen, M. P. K. J., Jonker, R., Sulaiman, H., Fisk, H. L., Calder, P. C., Deutz, N. E. P. (2022). ω -3 polyunsaturated fatty acid supplementation improves postabsorptive and prandial protein metabolism in patients with chronic obstructive pulmonary disease: a randomized clinical trial. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 116(3), 686–698.
- Fabian, C. J., Kimler, B. F., Hursting, S. D. (2015). Omega-3 fatty acids for breast cancer prevention and survivorship. *Breast cancer research*, 17, 1–11.
- Fan, K.-W., Jiang, Y., Faan, Y.-W., Chen, F. (2007). Lipid characterization of mangrove thraustochytrid—*Schizochytrium mangrovei*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(8), 2906–2910.

- Fang, J., Kato, C. (2007). FAS or PKS, lipid biosynthesis and stable carbon isotope fractionation in deep-sea piezophilic bacteria. *Commun. Curr. Res. Educ. Top. Trends Appl. Microbiol*, 1, 190–200.
- Frank, K. T., Petrie, B., Choi, J. S., Leggett, W. C. (2005). Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem. *Science*, 308(5728), 1621–1623.
- Freese, E., Rütters, H., Köster, J., Rullkötter, J., Sass, H. (2009). Gammaproteobacteria as a possible source of eicosapentaenoic acid in anoxic intertidal sediments. *Microbial ecology*, 57, 444–454.
- Fu, Y., Wang, Y., Gao, H., Li, D., Jiang, R., Ge, L., ... Xu, K. (2021). Associations among dietary omega-3 polyunsaturated fatty acids, the gut microbiota, and intestinal immunity. *Mediators of inflammation*, 2021(1), 8879227.
- Garay, L. A., Sitepu, I. R., Cajka, T., Chandra, I., Shi, S., Lin, T., ... Boundy-Mills, K. L. (2016). Eighteen new oleaginous yeast species. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 43(7), 887–900.
- Garcia, R., Stadler, M., Gemperlein, K., Müller, R. (2016). *Aetherobacter fasciculatus* gen. nov., sp. nov. and *Aetherobacter rufus* sp. nov., novel myxobacteria with promising biotechnological applications. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66(2), 928–938.
- Gemperlein, K., Dietrich, D., Kohlstedt, M., Zipf, G., Bernauer, H. S., Wittmann, C., ... Müller, R. (2019). Polyunsaturated fatty acid production by *Yarrowia lipolytica* employing designed myxobacterial PUFA synthases. *Nature communications*, 10(1), 4055.
- Giner-Robles, L., Lázaro, B., de la Cruz, F., Moncalián, G. (2018). FabH deletion increases DHA production in *Escherichia coli* expressing Pfa genes. *Microbial Cell Factories*, 17, 1–9.
- Gladyshev, M. I., Sushchik, N. N. (2019). Long-chain omega-3 polyunsaturated fatty acids in natural ecosystems and the human diet: Assumptions and challenges. *Biomolecules*, 9(9). doi:10.3390/biom9090485
- Gladyshev, M. I., Sushchik, N. N., Makhutova, O. N. (2013). Production of EPA and DHA in aquatic ecosystems and their transfer to the land. *Prostaglandins & other lipid mediators*, 107, 117–126.
- Gorte, O., Hollenbach, R., Papachristou, I., Steinweg, C., Silve, A., Frey, W., ... Ochsenreither, K. (2020). Evaluation of downstream processing, extraction, and quantification strategies for single cell oil produced by the oleaginous yeasts *Saitozyma podzolica* DSM 27192 and *Apiotrichum porosum* DSM 27194. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 355.
- Graham, I. A., Larson, T., Napier, J. A. (2007). Rational metabolic engineering of transgenic plants for biosynthesis of omega-3 polyunsaturates. *Current Opinion in Biotechnology*, 18(2), 142–147.
- Guo, X., Ota, Y. (2000). Incorporation of eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids by a yeast (FO726A). *Journal of applied microbiology*, 89(1), 107–115.
- Hamamoto, T., Takata, N., Kudo, T., Horikoshi, K. (1995). Characteristic presence of polyunsaturated fatty acids in marine psychrophilic vibrios. *FEMS microbiology letters*, 129(1), 51–56.

- Harauma, A., Yasuda, H., Hatanaka, E., Nakamura, M. T., Salem, N., Moriguchi, T. (2017). The essentiality of arachidonic acid in addition to docosahexaenoic acid for brain growth and function. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 116, 9–18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plefa.2016.11.002>
- Harris, W. S., Tintle, N. L., Sathyanarayanan, S. P., Westra, J. (2023). Association between blood N-3 fatty acid levels and the risk of coronavirus disease 2019 in the UK Biobank. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 117(2), 357–363.
- Harwood, J. L., Guschina, I. A. (2009). The versatility of algae and their lipid metabolism. *Biochimie*, 91(6), 679–684. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biochi.2008.11.004>
- Hashimoto, M., Hossain, M. S., Yamasaki, H., Yazawa, K., Masumura, S. (1999). Effects of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid on plasma membrane fluidity of aortic endothelial cells. *Lipids*, 34(12), 1297–1304.
- Hoffmann, M., Marxen, K., Schulz, R., Vanselow, K. H. (2010). TFA and EPA productivities of *Nannochloropsis salina* influenced by temperature and nitrate stimuli in turbidostatic controlled experiments. *Marine drugs*, 8(9), 2526–2545.
- Huang, T. Y., Lu, W. C., Chu, I. M. (2012). A fermentation strategy for producing docosahexaenoic acid in *Aurantiochytrium limacinum* SR21 and increasing C22: 6 proportions in total fatty acid. *Bioresource technology*, 123, 8–14.
- IFFO. (2023). The Marine Ingredients Association. **Date Accessed:2024-12-25**. Erişim tarihi: 25 Aralık 2024. Erişim adresi: <https://www.iffco.com/>.
- Jang, S. H., Jeong, H. J., Kwon, J. E. (2017). High contents of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid in the mixotrophic dinoflagellate *Paragymnodinium shiwhaense* and identification of putative omega-3 biosynthetic genes. *Algal Research*, 25(May), 525–537. doi:10.1016/j.algal.2017.06.020
- Jareonkitmongkol, S., Shimizu, S., Yamada, H. (1993). Production of an eicosapentaenoic acid-containing oil by a $\Delta 12$ desaturase-defective mutant of *Mortierella alpina* 1S-4. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 70, 119–123.
- Jasani, B., Simmer, K., Patole, S. K., Rao, S. C. (2017). Long chain polyunsaturated fatty acid supplementation in infants born at term. *Cochrane database of systematic reviews*, (3).
- Kajikawa, M., Yamato, K. T., Kohzu, Y., Nojiri, M., Sakuradani, E., Shimizu, S., ... Ohyama, K. (2004). Isolation and characterization of $\Delta 6$ -desaturase, an ELO-like enzyme and $\Delta 5$ -desaturase from the liverwort *Marchantia polymorpha* and production of arachidonic and eicosapentaenoic acids in the methylotrophic yeast *Pichia pastoris*. *Plant Molecular Biology*, 54, 335–352.

- Kautharapu, K. B., Rathmacher, J., Jarboe, L. R. (2013). Growth condition optimization for docosaehaenoic acid (DHA) production by *Moritella marina* MP-1. *Applied microbiology and biotechnology*, 97, 2859–2866.
- Kawasaki, K., Nogi, Y., Hishinuma, M., Nodasaka, Y., Matsuyama, H., Yumoto, I. (2002). *Psychromonas marina* sp. nov., a novel halophilic, facultatively psychrophilic bacterium isolated from the coast of the Okhotsk Sea. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 52(5), 1455–1459.
- Kermack, A. J., Lowen, P., Wellstead, S. J., Fisk, H. L., Montag, M., Cheong, Y., ... Macklon, N. S. (2020). Effect of a 6-week “Mediterranean” dietary intervention on in vitro human embryo development: the Preconception Dietary Supplements in Assisted Reproduction double-blinded randomized controlled trial. *Fertility and sterility*, 113(2), 260–269.
- Khan, S. U., Lone, A. N., Khan, M. S., Virani, S. S., Blumenthal, R. S., Nasir, K., ... Boden, W. E. (2021). Effect of omega-3 fatty acids on cardiovascular outcomes: A systematic review and meta-analysis. *EClinicalMedicine*, 38.
- Kinney, A., Cahoon, E., Damude, H., Hitz, W., Liu, Z.-B., Kolar, C. (2004, 2 Eylül). Production of very long chain polyunsaturated fatty acids in oilseed plants. Google Patents.
- Kumari, P., Sharma, J., Khare, P. (2025). Recent Advancements and Strategies for Omega-3 Fatty Acid Production in Yeast. *Journal of Basic Microbiology*, 1–12. doi:10.1002/jobm.202400491
- Leblond, J. D., Chapman, P. J. (2000). Lipid class distribution of highly unsaturated long chain fatty acids in marine dinoflagellates. *Journal of Phycology*, 36(6), 1103–1108.
- Lee Chang, K. J., Nichols, C. M., Blackburn, S. I., Dunstan, G. A., Koutoulis, A., Nichols, P. D. (2014). Comparison of *Thraustochytrids* *Aurantiochytrium* sp., *Schizochytrium* sp., *Thraustochytrium* sp., and *Ulkenia* sp. for production of biodiesel, long-chain omega-3 oils, and exopolysaccharide. *Marine biotechnology*, 16, 396–411.
- Lees, A. M., Korn, E. D. (1966). Metabolism of unsaturated fatty acids in protozoa. *Biochemistry*, 5(5), 1475–1481.
- Lenihan-Geels, G., Bishop, K. S., Ferguson, L. R. (2013). Alternative sources of omega-3 fats: Can we find a sustainable substitute for fish?. *Nutrients*, 5(4), 1301–1315. doi:10.3390/nu5041301
- Levring, T., Hoppe, H. A., Schmid, O. J. (2019). Marine algae: A survey of research and utilization.
- Li, J., Liu, R., Chang, G., Li, X., Chang, M., Liu, Y., ... Wang, X. (2015). A strategy for the highly efficient production of docosaehaenoic acid by *Aurantiochytrium limacinum* SR21 using glucose and glycerol as the mixed carbon sources. *Bioresource technology*, 177, 51–57.
- Liang, Y., Maeda, Y., Sunaga, Y., Muto, M., Matsumoto, M., Yoshino, T., Tanaka, T. (2013). Biosynthesis of polyunsaturated fatty acids in the oleaginous marine diatom *Fistulifera* sp. strain JPCC DA0580. *Marine Drugs*, 11(12), 5008–5023.

- Liang, Y., Maeda, Y., Yoshino, T., Matsumoto, M., Tanaka, T. (2014). Profiling of fatty acid methyl esters from the oleaginous diatom *Fistulifera* sp. strain JPCC DA0580 under nutrition-sufficient and-deficient conditions. *Journal of applied phycology*, 26, 2295–2302.
- Liu, N., Soong, Y. V., Mirzaee, I., Olsen, A., Yu, P., Wong, H., Xie, D. (2021). Biomanufacturing of value-added products from oils or fats: A case study on cellular and fermentation engineering of *Yarrowia lipolytica*. *Biotechnology and Bioengineering*, 118(4), 1658–1673.
- Lowrey, J., Armenta, R. E., Brooks, M. S. (2016). Nutrient and media recycling in heterotrophic microalgae cultures. *Applied microbiology and biotechnology*, 100, 1061–1075.
- Lu, Q., Li, H., Xiao, Y., Liu, H. (2021). A state-of-the-art review on the synthetic mechanisms, production technologies, and practical application of polyunsaturated fatty acids from microalgae. *Algal Research*, 55(March), 102281. doi:10.1016/j.algal.2021.102281
- Ma, Y., Zhang, L., Zeng, R., Jiang, R., Luo, D., Wu, H., ... Leung, F. W. (2023). Habitual fish oil use and risk of COVID-19-related outcomes: Evidence from a large scale cohort study and Mendelian randomization analysis. *Clinical Nutrition*, 42(8), 1399–1407.
- MacIntosh, S. C., Shaw, M., Connelly, M., Yao, Z. J. (2021). Food and Feed Safety of NS-B5ØØ27-4 Omega-3 Canola (*Brassica napus*): A New Source of Long-Chain Omega-3 Fatty Acids. *Frontiers in Nutrition*, 8(September), 1–12. doi:10.3389/fnut.2021.716659
- Marangoni, F., Cetin, I., Verduci, E., Canzone, G., Giovannini, M., Scollo, P., ... Poli, A. (2016). Maternal diet and nutrient requirements in pregnancy and breastfeeding. An Italian consensus document. *Nutrients*, 8(10), 1–17. doi:10.3390/nu8100629
- Mason, R. P., Jacob, R. F., Shrivastava, S., Sherratt, S. C. R., Chattopadhyay, A. (2016). Eicosapentaenoic acid reduces membrane fluidity, inhibits cholesterol domain formation, and normalizes bilayer width in atherosclerotic-like model membranes. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1858(12), 3131–3140.
- Mendes, A., Reis, A., Vasconcelos, R., Guerra, P., Lopes da Silva, T. (2009). *Cryptocodinium cohnii* with emphasis on DHA production: a review. *Journal of applied phycology*, 21, 199–214.
- Metz, J. G., Kuner, J., Rosenzweig, B., Lippmeier, J. C., Roessler, P., Zirkle, R. (2009). Biochemical characterization of polyunsaturated fatty acid synthesis in *Schizochytrium*: release of the products as free fatty acids. *Plant Physiology and Biochemistry*, 47(6), 472–478.
- Metz, J. G., Roessler, P., Facciotti, D., Levering, C., Ditttrich, F., Lassner, M., ... Yamada, A. (2001). Production of polyunsaturated fatty acids by polyketide synthases in both prokaryotes and eukaryotes. *Science*, 293(5528), 290–293.
- Miyazaki, M., Nogi, Y., Usami, R., Horikoshi, K. (2006). *Shewanella surugensis* sp. nov., *Shewanella kaireitica* sp. nov. and *Shewanella abyss* sp. nov., isolated

- from deep-sea sediments of Suruga Bay, Japan. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 56(7), 1607–1613.
- Mo, L., Qian, J., Li, Q., Huang, A., Guo, H. (2023). Quality control of camellia oil based on HPLC fingerprinting techniques combined with chemometric methods for triglycerides. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 125(11), 1–9. doi:10.1002/ejlt.202200212
- Moi, I. M., Leow, A. T. C., Ali, M. S. M., Rahman, R. N. Z. R. A., Salleh, A. B., Sabri, S. (2018). Polyunsaturated fatty acids in marine bacteria and strategies to enhance their production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(14), 5811–5826. doi:10.1007/s00253-018-9063-9
- Napier, J. A., Betancor, M. B. (2023). Engineering plant-based feedstocks for sustainable aquaculture. *Current Opinion in Plant Biology*, 71, 102323.
- Napier, J. A., Usher, S., Haslam, R. P., Ruiz-Lopez, N., Sayanova, O. (2015). Transgenic plants as a sustainable, terrestrial source of fish oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(9), 1317–1324. doi:10.1002/ejlt.201400452
- Nogi, Y. (2011). Taxonomy of psychrophiles. *Extremophiles handbook*.
- Nogi, Y., Hosoya, S., Kato, C., Horikoshi, K. (2007). Psychromonas hadalis sp. nov., a novel piezophilic bacterium isolated from the bottom of the Japan Trench. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 57(6), 1360–1364.
- Nogi, Y., Kato, C. (1999). Taxonomic studies of extremely barophilic bacteria isolated from the Mariana Trench and description of Moritella yayanosii sp. nov., a new barophilic bacterial isolate. *Extremophiles*, 3, 71–77.
- Nogi, Y., Kato, C., Horikoshi, K. (1998a). Taxonomic studies of deep-sea barophilic Shewanella strains and description of Shewanella violacea sp. nov. *Archives of microbiology*, 170, 331–338.
- Nogi, Y., Kato, C., Horikoshi, K. (1998b). Moritella japonica sp. nov., a novel barophilic bacterium isolated from a Japan Trench sediment. *The Journal of general and applied microbiology*, 44(4), 289–295.
- Nogi, Y., Kato, C., Horikoshi, K. (2002). Psychromonas kaikoae sp. nov., a novel from the deepest piezophilic bacterium cold-seep sediments in the Japan Trench. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 52(5), 1527–1532.
- O'Brien, D. J., Kurantz, M. J., Kwoczak, R. (1993). Production of eicosapentaenoic acid by the filamentous fungus Pythium irregulare. *Applied microbiology and biotechnology*, 40, 211–214.
- Okuda, T., Ando, A., Negoro, H., Muratsubaki, T., Kikukawa, H., Sakamoto, T., ... Ogawa, J. (2015). Eicosapentaenoic acid (EPA) production by an oleaginous fungus Mortierella alpina expressing heterologous the $\Delta 17$ -desaturase gene under ordinary temperature. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(12), 1919–1927.
- Oliver, L., Dietrich, T., Marañón, I., Villarán, M. C., Barrio, R. J. (2020). Producing omega-3 polyunsaturated fatty acids: A review of sustainable sources

- and future trends for the EPA and DHA market. *Resources*, 9(12), 1–15. doi:10.3390/resources9120148
- Pan, M., Zhao, F., Xie, B., Wu, H., Zhang, S., Ye, C., ... Zhou, X. (2021). Dietary ω -3 polyunsaturated fatty acids are protective for myopia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(43), e2104689118.
- Patel, A., Karageorgou, D., Rova, E., Katapodis, P., Rova, U., Christakopoulos, P., Matsakas, L. (2020). An overview of potential oleaginous microorganisms and their role in biodiesel and omega-3 fatty acid-based industries. *Microorganisms*, 8(3), 434.
- Patil, V., Källqvist, T., Olsen, E., Vogt, G., Gislerød, H. R. (2007). Fatty acid composition of 12 microalgae for possible use in aquaculture feed. *Aquaculture International*, 15(1), 1–9. doi:10.1007/s10499-006-9060-3
- Patras, D., Moraru, C. V., Socaciu, C. (2019). Bioactive ingredients from microalgae: Food and feed applications. *BUASVMCN-FST*, 76, 1–9.
- Pellegrini, M., Senni, C., Bernabei, F., Cicero, A. F. G., Vagge, A., Maestri, A., ... Giannaccare, G. (2020). The role of nutrition and nutritional supplements in ocular surface diseases. *Nutrients*, 12(4), 952.
- Perdana, B. A., Chaidir, Z., Kusnanda, A. J., Dharma, A., Zakaria, I. J., Syafrizayanti, ... Putra, M. Y. (2021). Omega-3 fatty acids of microalgae as a food supplement: A review of exogenous factors for production enhancement. *Algal Research*, 60(October), 102542. doi:10.1016/j.algal.2021.102542
- Pereira, S. L., Huang, Y.-S., Bobik, E. G., Kinney, A. J., Stecca, K. L., Packer, J. C. L., Mukerji, P. (2004). A novel omega3-fatty acid desaturase involved in the biosynthesis of eicosapentaenoic acid. *Biochemical Journal*, 378(2), 665–671.
- Petrie, J. R., Shrestha, P., Belide, S., Kennedy, Y., Lester, G., Liu, Q., ... Nichols, P. D. (2014). Metabolic engineering *Camelina sativa* with fish oil-like levels of DHA. *PLoS one*, 9(1), e85061.
- Petrie, J. R., Shrestha, P., Zhou, X. R., Mansour, M. P., Liu, Q., Belide, S., ... Singh, S. P. (2012). Metabolic Engineering Plant Seeds with Fish Oil-Like Levels of DHA. *PLoS ONE*, 7(11), 2–8. doi:10.1371/journal.pone.0049165
- Petrie, J. R., Singh, S. P. (2011). Expanding the docosahexaenoic acid food web for sustainable production: engineering lower plant pathways into higher plants. *AoB Plants*, 2011, plr011.
- Petrie, J. R., Zhou, X. R., Leonforte, A., McAllister, J., Shrestha, P., Kennedy, Y., ... Singh, S. P. (2020). Development of a *Brassica napus* (Canola) Crop Containing Fish Oil-Like Levels of DHA in the Seed Oil. *Frontiers in Plant Science*, 11(June), 1–15. doi:10.3389/fpls.2020.00727
- Pinckney, J. L. (2018). A mini-review of the contribution of benthic microalgae to the ecology of the continental shelf in the South Atlantic Bight. *Estuaries and Coasts*, 41, 2070–2078.
- Qi, B., Beaudoin, F., Fraser, T., Stobart, A. K., Napier, J. A., Lazarus, C. M. (2002). Identification of a cDNA encoding a novel C18- Δ 9 polyunsaturated fatty

- acid-specific elongating activity from the docosahexaenoic acid (DHA)-producing microalga, *Isochrysis galbana*. *FEBS letters*, 510(3), 159–165.
- Qiang, H. U., Zheungu, H., Cohen, Z., Richond, A. (1997). Enhancement of eicosapentaenoic acid (EPA) and γ -linolenic acid (GLA) production by manipulating algal density of outdoor cultures of *Monodus subterraneus* (Eustigmatophyta) and *Spirulina platensis* (Cyanobacteria). *European Journal of Phycology*, 32(1), 81–86.
- Qiao, K., Wasylenko, T. M., Zhou, K., Xu, P., Stephanopoulos, G. (2017). Lipid production in *Yarrowia lipolytica* is maximized by engineering cytosolic redox metabolism. *Nature biotechnology*, 35(2), 173–177.
- Qin, J., Kurt, E., LBassi, T., Sa, L., Xie, D. (2023). Biotechnological production of omega-3 fatty acids: current status and future perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 14(November). doi:10.3389/fmicb.2023.1280296
- Rasheed, R., Saadaoui, I., Bounnit, T., Cherif, M., Al Ghazal, G., Al Jabri, H. (2020). Sustainable food production and nutraceutical applications from Qatar Desert *Chlorella* sp.(Chlorophyceae). *Animals*, 10(8), 1413.
- Ring, E., Jøstensen, J. P., Olsen, R. E. (1992). Production of eicosapentaenoic acid by freshwater *Vibrio*. *Lipids*, 27(7), 564–566.
- Ring, E., Sinclair, P. D., Birkbeck, H., Barbour, A. (1992). Production of eicosapentaenoic acid (20: 5 n-3) by *Vibrio pelagius* isolated from turbot (*Scophthalmus maximus* (L.)) larvae. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(11), 3777–3778.
- Rittmann, B. E. (2008). Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. *Biotechnology and bioengineering*, 100(2), 203–212.
- Rubio-Rodríguez, N., Beltrán, S., Jaime, I., de Diego, S. M., Sanz, M. T., Carballido, J. R. (2010). Production of omega-3 polyunsaturated fatty acid concentrates: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(1), 1–12.
- Ruiz-Lopez, N., Haslam, R. P., Napier, J. A., Sayanova, O. (2014). Successful high-level accumulation of fish oil omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in a transgenic oilseed crop. *Plant Journal*, 77(2), 198–208. doi:10.1111/tpj.12378
- Ruiz-Lopez, N., Haslam, R. P., Usher, S. L., Napier, J. A., Sayanova, O. (2013). Reconstitution of EPA and DHA biosynthesis in *Arabidopsis*: Iterative metabolic engineering for the synthesis of n-3 LC-PUFAs in transgenic plants. *Metabolic Engineering*, 17(1), 30–41. doi:10.1016/j.ymben.2013.03.001
- Ruiz-López, N., Sayanova, O., Napier, J. A., Haslam, R. P. (2012). Metabolic engineering of the omega-3 long chain polyunsaturated fatty acid biosynthetic pathway into transgenic plants. *Journal of Experimental Botany*, 63(7), 2397–2410. doi:10.1093/jxb/err454
- Ruiz-Lopez, N., Haslam, R. P., Napier, J. A., Sayanova, O. (2014). Successful high-level accumulation of fish oil omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in a transgenic oilseed crop. *The Plant Journal*, 77(2), 198–208.

- Russo, G. L., Langellotti, A. L., Oliviero, M., Sacchi, R., Masi, P. (2021). Sustainable production of food grade omega-3 oil using aquatic protists: Reliability and future horizons. *New Biotechnology*, 62, 32–39.
- Ryckebosch, E., Bruneel, C., Muylaert, K., Foubert, I. (2012). Microalgae as an alternative source of omega-3 long chain polyunsaturated fatty acids. *Lipid Technology*, 24(6), 128–130.
- Salem Jr, N., Eggersdorfer, M. (2015). Is the world supply of omega-3 fatty acids adequate for optimal human nutrition?. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 18(2), 147–154.
- Sayanova, O., Haslam, R. P., Calerón, M. V., López, N. R., Worthy, C., Rooks, P., ... Napier, J. A. (2011). Identification and functional characterisation of genes encoding the omega-3 polyunsaturated fatty acid biosynthetic pathway from the coccolithophore *Emiliania huxleyi*. *Phytochemistry*, 72(7), 594–600.
- Sayanova, O. V, Napier, J. A. (2004). Eicosapentaenoic acid: biosynthetic routes and the potential for synthesis in transgenic plants. *Phytochemistry*, 65(2), 147–158.
- Scheffer, M., Carpenter, S., de Young, B. (2005). Cascading effects of overfishing marine systems. *Trends in ecology & evolution*, 20(11), 579–581.
- Sharma, T., Mandal, C. C. (2020). Omega-3 fatty acids in pathological calcification and bone health. *Journal of food biochemistry*, 44(8), e13333.
- Sherratt, S. C. R., Juliano, R. A., Copland, C., Bhatt, D. L., Libby, P., Mason, R. P. (2021). EPA and DHA containing phospholipids have contrasting effects on membrane structure. *Journal of Lipid Research*, 62.
- Shimizu, S., Kawashima, H., Shinmen, Y., Akimoto, K., Yamada, H. (1988). Production of eicosapentaenoic acid by *Mortierella fungi*. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 65, 1455–1459.
- Simmonds, L. A., Middleton, P. F., Makrides, M. (2022). Recent advances in policy and practice translation of the evidence for additional omega-3 fatty acids and prematurity. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 25(2), 81–85.
- Siscovick, D. S., Barringer, T. A., Fretts, A. M., Wu, J. H. Y., Lichtenstein, A. H., Costello, R. B., ... Alger, H. M. (2017). Omega-3 polyunsaturated fatty acid (fish oil) supplementation and the prevention of clinical cardiovascular disease: a science advisory from the American Heart Association. *Circulation*, 135(15), e867–e884.
- Sivakumar, R., Sachin, S., Priyadarshini, R., Ghosh, S. (2022). Sustainable production of eicosapentaenoic acid-rich oil from microalgae: Towards an algal biorefinery. *Journal of Applied Microbiology*, 132(6), 4170–4185.
- Skulas-Ray, A. C., Wilson, P. W. F., Harris, W. S., Brinton, E. A., Kris-Etherton, P. M., Richter, C. K., ... Robinson, J. G. (2019). Omega-3 fatty acids for the management of hypertriglyceridemia: a science advisory from the American Heart Association. *Circulation*, 140(12), e673–e691.

- Sprague, M., Betancor, M. B., Tocher, D. R. (2017). Microbial and genetically engineered oils as replacements for fish oil in aquaculture feeds. *Biotechnology Letters*, 39(11), 1599–1609. doi:10.1007/s10529-017-2402-6
- Steinrücken, P., Erga, S. R., Mjøs, S. A., Kleivdal, H., Prestegard, S. K. (2017). Bioprospecting North Atlantic microalgae with fast growth and high polyunsaturated fatty acid (PUFA) content for microalgae-based technologies. *Algal research*, 26, 392–401.
- Strandberg, U., Bhavsar, S. P., Arts, M. T. (2020). Interspecific differences in omega-3 PUFA and contaminants explain the most variance in suggested Great Lakes' fish consumption when risks/benefits are considered together. *Journal of Great Lakes Research*, 46(3), 549–559.
- Sun, D., Zhang, Z., Mao, X., Wu, T., Jiang, Y., Liu, J., Chen, F. (2017). Light enhanced the accumulation of total fatty acids (TFA) and docosahexaenoic acid (DHA) in a newly isolated heterotrophic microalga *Cryptocodinium* sp. SUN. *Bioresource technology*, 228, 227–234.
- Sun, Y., Chatterjee, R., Ronanki, A., Ye, K. (2022). Circulating polyunsaturated fatty acids and COVID-19: a prospective cohort study and Mendelian randomization analysis. *Frontiers in Medicine*, 9, 923746.
- Taipale, S., Peltomaa, E., Salmi, P. (2020). Variation in ω -3 and ω -6 polyunsaturated fatty acids produced by different phytoplankton taxa at early and late growth phase. *Biomolecules*, 10(4), 559.
- Tang, X., Chen, H., Mei, T., Ge, C., Gu, Z., Zhang, H., ... Chen, W. (2018). Characterization of an omega-3 desaturase from *Phytophthora parasitica* and application for eicosapentaenoic acid production in *Mortierella alpina*. *Frontiers in Microbiology*, 9(AUG), 1–9. doi:10.3389/fmicb.2018.01878
- Tavares, S., Grothkjær, T., Obsen, T., Haslam, R. P., Napier, J. A., Gunnarsson, N. (2011). Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for production of eicosapentaenoic acid, using a novel Δ 5-desaturase from *Paramecium tetraurelia*. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(5), 1854–1861.
- Thiyagarajan, S., Khandelwal, P., Senthil, N., Vellaikumar, S., Arumugam, M., Dubey, A. A., Kathiresan, S. (2021). Heterologous Production of Polyunsaturated Fatty Acids in *E. coli* Using Δ 5-Desaturase Gene from Microalga *Isochrysis* Sp. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 193(3), 869–883. doi:10.1007/s12010-020-03460-1
- Ulsamer, A. G., Smith, F. R., Korn, E. D. (1969). Lipids of *Acanthamoeba castellanii*: composition and effects of phagocytosis on incorporation of radioactive precursors. *The Journal of Cell Biology*, 43(1), 105–114.
- Urakawa, H., Yoshida, T., Nishimura, M., Ohwada, K. (2000). Characterization of depth-related population variation in microbial communities of a coastal marine sediment using 16S rDNA-based approaches and quinone profiling. *Environmental Microbiology*, 2(5), 542–554.
- Usher, S., Haslam, R., Sayanova, O., Napier, J. A., Betancor, M. B., Tocher, D. R. (2015). The supply of fish oil to aquaculture: a role for transgenic oilseed crops?. *World Agriculture*, 5(1), 15–23.

- Usup, G., Hamid, S. Z., Chiet, P. K., Wah, C. K., Ahmad, A. (2008). Marked differences in fatty acid profiles of some planktonic and benthic marine dinoflagellates from Malaysian waters. *Phycologia*, 47(1), 105–111.
- Vadivelan, G., Venkateswaran, G. (2014). Production and Enhancement of Omega-3 Fatty Acid from *Mortierella alpina* CFR-GV15: Its Food and Therapeutic Application. *BioMed Research International*, 2014(1), 657414.
- Vasconcelos, B., Teixeira, J. C., Dragone, G., Teixeira, J. A. (2018). Optimization of lipid extraction from the oleaginous yeasts *Rhodotorula glutinis* and *Lipomyces kononenkoae*. *AMB Express*, 8(1). doi:10.1186/s13568-018-0658-4
- Venegas-Calcrón, M., Sayanova, O., Napier, J. A. (2010). An alternative to fish oils: metabolic engineering of oil-seed crops to produce omega-3 long chain polyunsaturated fatty acids. *Progress in lipid research*, 49(2), 108–119.
- Wallis, J. G., Browse, J. (1999). The $\Delta 8$ -Desaturase of *Euglena gracilis*: An Alternate Pathway for Synthesis of 20-Carbon Polyunsaturated Fatty Acids. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 365(2), 307–316.
- Walsh, T. A., Bevan, S. A., Gachotte, D. J., Larsen, C. M., Moskal, W. A., Merlo, P. A. O., ... Metz, J. G. (2016). Canola engineered with a microalgal polyketide synthase-like system produces oil enriched in docosahexaenoic acid. *Nature Biotechnology*, 34(8), 881–887. doi:10.1038/nbt.3585
- Wang, C., Qing, X., Yu, M., Sun, Q., Liu, F., Qi, B., Li, X. (2019). Production of eicosapentaenoic acid (EPA, 20:5n-3) in transgenic peanut (*Arachis hypogaea* L.) through the alternative $\Delta 8$ -desaturase pathway. *Molecular Biology Reports*, 46(1), 333–342. doi:10.1007/s11033-018-4476-1
- Wei, B.-Z., Li, L., Dong, C.-W., Tan, C.-C., Xu, W., Initiative, A. D. N. (2023). The relationship of omega-3 fatty acids with dementia and cognitive decline: evidence from prospective cohort studies of supplementation, dietary intake, and blood markers. *The American journal of clinical nutrition*, 117(6), 1096–1109.
- Wen, Z.-Y., Chen, F. (2003). Heterotrophic production of eicosapentaenoic acid by microalgae. *Biotechnology advances*, 21(4), 273–294.
- Winwood, R. J. (2013). Recent developments in the commercial production of DHA and EPA rich oils from micro-algae. *Ocl*, 20(6), D604.
- Wolters, M., von der Haar, A., Baalman, A.-K., Wellbrock, M., Heise, T. L., Rach, S. (2021). Effects of n-3 polyunsaturated fatty acid supplementation in the prevention and treatment of depressive disorders—a systematic review and meta-analysis. *Nutrients*, 13(4), 1070.
- Wu, G., Truksa, M., Datla, N., Vrinten, P., Bauer, J., Zank, T., ... Qiu, X. (2005). Stepwise engineering to produce high yields of very long-chain polyunsaturated fatty acids in plants. *Nature biotechnology*, 23(8), 1013–1017.
- Wynn, J., Behrens, P., Sundararajan, A., Hansen, J., Apt, K. (2010). Production of single cell oils by dinoflagellates. *Single cell oils* (pp. 115–129). Elsevier.

- Xiao, X., Wang, P., Zeng, X., Bartlett, D. H., Wang, F. (2007). *Shewanella psychrophila* sp. nov. and *Shewanella piezotolerans* sp. nov., isolated from west Pacific deep-sea sediment. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 57(1), 60–65.
- Xie, D., Soong, Y., Liu, N., Qin, J., Chen, S. (2017). A new biomanufacturing platform for bioconversion of plant oils into high-value products. *Adv Biochem Biotechnol: ABIO-149*. DOI, 10, 2574–7258.
- Xie, Dongming, Jackson, E. N., Zhu, Q. (2015). Sustainable source of omega-3 eicosapentaenoic acid from metabolically engineered *Yarrowia lipolytica*: from fundamental research to commercial production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(4), 1599–1610. doi:10.1007/s00253-014-6318-y
- Xue, Z., Sharpe, P. L., Hong, S. P., Yadav, N. S., Xie, D., Short, D. R., ... Zhu, Q. (2013). Production of omega-3 eicosapentaenoic acid by metabolic engineering of *Yarrowia lipolytica*. *Nature Biotechnology*, 31(8), 734–740. doi:10.1038/nbt.2622
- Yakoviichuk, A., Krivova, Z., Maltseva, S., Kochubey, A., Kulikovskiy, M., Maltsev, Y. (2023). Antioxidant Status and Biotechnological Potential of New *Vischeria vischeri* (Eustigmatophyceae) Soil Strains in Enrichment Cultures. *Antioxidants*, 12(3). doi:10.3390/antiox12030654
- Yao, L., Gerde, J. A., Lee, S.-L., Wang, T., Harrata, K. A. (2015). Microalgae lipid characterization. *Journal of agricultural and food chemistry*, 63(6), 1773–1787.
- Ying, L., Kang-sen, M., Shi-chun, S. (2000). Total lipid and fatty acid composition of eight strains of marine diatoms. *Chinese journal of oceanology and limnology*, 18(4), 345–349.
- Yokochi, T., Honda, D., Higashihara, T., Nakahara, T. (1998). Optimization of docosahexaenoic acid production by *Schizochytrium limacinum* SR21. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 49, 72–76.
- Yokoi-Shimizu, K., Yanagimoto, K., Hayamizu, K. (2022). Effect of docosahexaenoic acid and eicosapentaenoic acid supplementation on sleep quality in healthy subjects: a randomized, double-blinded, placebo-controlled trial. *Nutrients*, 14(19), 4136.
- Zhang, M., Choe, J., Bu, T., Liu, S., Kim, S. (2023). Comparison of Antioxidant Properties and Metabolite Profiling of *Acer pseudoplatanus* Leaves of Different Colors. *Antioxidants*, 12(1), 1–19. doi:10.3390/antiox12010065
- Zhou, X.-R., Robert, S. S., Petrie, J. R., Frampton, D. M. F., Mansour, M. P., Blackburn, S. I., ... Singh, S. P. (2007). Isolation and characterization of genes from the marine microalga *Pavlova salina* encoding three front-end desaturases involved in docosahexaenoic acid biosynthesis. *Phytochemistry*, 68(6), 785–796.
- Zulu, N. N., Zienkiewicz, K., Vollheyde, K., Feussner, I. (2018). Current trends to comprehend lipid metabolism in diatoms. *Progress in lipid research*, 70, 1–16.



KÖMÜR SIVILAŞTIRMA İŞLEMİ VE YÖNTEMLERİ

Zehra YILDIZ¹

¹ Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri, Mersin, Türkiye zyıldız@tarsus.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1304-4857

1. GİRİŞ

Kömür enerji kaynağı olarak kullanımından önce klasik bir biyokütle olan odun 19.yüzyılın ortalarına dek yaklaşık bir milyon yıl boyunca kullanılmıştır. 1850'lerde fosil biyokütle olarak da kömür enerji piyasasında devreye girmiştir. Uzun zaman kömür sanayileşmiş ülkelerin ekonomilerinin direği olmuşsa da geleneksel petrol ürünlerinin sunduğu taşıma, fiyat ve çevre koruma gibi çeşitli kolaylıklar karşısında direnemeyip, egemenliğini ancak bir yüzyıl sürdürebilmiş ve 1950'lerde enerji sahasında yerini petrole devretmek zorunda kalmıştır. Petrol, sıvı olması, kül ve yanmayan yabancı maddeleri eser miktarda içermesi, ısı değerinin yüksek olması, damıtılmasıyla elde edilen ürünlerin birçok alanda özellikle içten yanmalı motorlarda ve kazanlarda kullanılması gibi önemli teknolojik üstünlüklere sahiptir. Miktarı ve coğrafik dağılımı sınırlı olan bu doğal kaynak, enerji sektöründe ölçsüz tüketimiyle bir yüz yılı doldurduktan sonra yerini kömüründe yer aldığı alternatif yakıtlara bırakacaktır. Çünkü dünyada bilinen fosil yakıt rezervleri kullanım ömürlerini petrol ve doğalgaz yaklaşık olarak 55 yıl, mevcut kömür üretimi dikkate alındığında, küresel kömür rezervlerinin yaklaşık 139 yıl ömrü bulunduğu hesaplanmaktadır. Şu anda enerji ihtiyacının %80'ini karşılayan fosil yakıtlardan kömürün ömrü diğer fosil yakıtlardan daha uzun olmasından dolayı ne kadarda sınırlı ve kirli bir madensel kaynak olsa da temiz kömür teknolojileri ve kömür dönüştürme teknolojileri ile kömüre eski itibarı kazandırılabilir, petrole alternatif olarak enerji piyasasında yeniden yerini alabilir.

Türkiye'nin üretilebilir petrol rezervi 70 milyon ton, üretilebilir doğal gaz rezervi 544 milyar m³ ve kömür kaynağı 22 milyar ton civarındadır. Bu kaynakların ton eşdeğeri petrol (tep) olarak enerji değerleri yaklaşık 5 milyar tep kömür, 450 milyon tep doğal gaz ve 73 milyon tep petroldür. Bu veriler ışığında kömürün Türkiye'nin toplam fosil kaynakları içinde payı %91 seviyesindedir. Ayrıca Türkiye, 11 milyar ton ile dünyadaki en fazla linyit rezervine sahip altıncı ülkedir (Kömürder, 2024).

Kömür teknolojilerindeki gelişmeler alternatif yakıtlar için bilinç miladi olarak değerlendirilen 1973-1974 yılları arasında yaşanan petrol krizi ile beraber hızlanmıştır. Bu krizde, petrol rezervlerinin yarısını elinde bulunduran Ortadoğu ülkelerinin İsrail'i destekleyen başta ABD olmak üzere uyguladığı ambargo sonucu petrol fiyatları varili 2 \$'dan 10 \$'a artmıştır. Petrolde dışa bağlı olan, enerjisi petrole dayalı ülkelerin fiyatta dalgalanmalar olduğunda çok büyük ekonomik zararlar görmesi sebebiyle petrolün dışında başka enerji kaynaklara yönelmiş ve alternatif enerji kaynakları için bu tarih bir milad olmuştur. Dünyanın ilk alternatif yakıtlara yönelmesinin sebebi petrolde dışa bağımlı olunması ve belli

ülkelerin elinde bulunan petrolün fiyatının stabil olmamasıdır. Ancak 1985 den itibaren yeni ve zengin petrol-doğal gaz rezervlerinin bulunması ile petrol fiyatları yarı yarıya düşmesi, taşıtlarda devrim niteliğinde yakıt tasarrufu sağlanması (100 km'de 14 L benzin yerine 5 L tüketen otomobillerin piyasaya sürülmesi) ile petrole alternatif yakıtlar üzerindeki araştırmalar yavaşlamıştır (Acar vd., 2007). 1992 yılında RİO Dünya Zirvesinde yapılan ilk İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ile oluşan çevresel baskılar sebebiyle petrolün başını çektiği fosil yakıtların çevreye zararından dolayı kullanımının sınırlandırılması ve alternatif yakıtların aktif kullanılması yönünde çalışmalar tekrar artarak günümüze kadar devam etmiştir. Gerek ülkemiz de dahil birçok ülkenin petrolde dışa bağımlı olması, gerek çevresel etkilerden dolayı ve gerekse üretim hızının tüketim hızını karşılayamayacak olması sebebiyle yakın gelecekte alternatif yakıtlar ile beraber hibrit yakıtlar şeklinde uzak gelecekte ise sadece alternatif yakıtlar kullanılacağı öngörülmektedir.

1980 itibariyle keşfedildiği yıldan iki kat fazla harcanan petrol, 2030 yılında elektrik, ısıtma gibi enerji kullanım alanlarından çekilip alternatifinin daha az ulaşım ve petrokimya sektöründe bir süre kullanımı devam edecektir. Petrolün bu iki kullanım alanındaki yerini alabilecek en muhtemel kaynak kömürdür. Dolayısıyla tükenene kadar kömürden sıvı ve gaz yakıt üretimi için çalışmalar devam edecektir.

Kömüre yeniden değer kazandırmak için katının molekül yapısını değiştirmek pahasına akışkanlaştırma teknikleri düşünülmüş bu kapsamda beyaz petrol olarak adlandırılan kömür-su karışımları üzerinde çalışmalar yapılmış ancak büyük yatırımlar gerektiğinden ekonomik nedenlerle yürütülememiştir. Diğer taraftan kömürün sıvılaştırılmasından elde edilen sıvı ürünler petrol türevi yakıtlara iki alanda alternatif olabilir. İlk olarak elektrik gücü ve endüstriyel buhar üretimi için kullanılacak kül ve kükürt içeriği düşük kazan yakıtların elde edilmesidir. İkincisi, benzin, metanol, motorin, fuel-oil gibi petrol türevi akaryakıtlar ve çeşitli petrokimyasal hammaddelerin üretimidir (Karaca, 1998).

Sıvılaştırma çalışmalarının uygulanmasına Almanya'da I. Dünya Savaşı öncesinde başlanmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında çekilen petrol sıkıntısını, Almanya, uçak yakıtı gereksiniminin tümünü, toplam sıvı yakıt gereksiniminin ise %75'ini, o yıllarda hızla kurduğu kömür sıvılaştırma tesislerinin üretimi ile karşılayarak aşmıştır. Ancak II. Dünya savaşında bu tesisler ağır hasar aldığı için kapatılmıştır. 1950 yıllarında petrol ambargosu uygulanan ülkelerden biri olan Güney Afrika, Almanya'nın kömür sıvılaştırma teknolojisini petrol ihtiyacını karşılamak için kendi ülkelerinde kurmuşlardır. Kömürü sıvılaştırarak kendi petrol ihtiyacının yaklaşık %40 ını karşılayan şu anda faaliyet gösteren tek ve en büyük te-

sis, zengin kömür yataklarına sahip olan Güney Afrika'da Sasolburg'daki SASOL (South Africa Synthetic Oil)'dur. 1955'te Sasolburg'da işletmeye alınmış olan SASOL l'in başarılı olmasının ardından 1974'te SASOL l'in on kat daha yüksek kapasiteli SASOL 2'nin ve 1979'da da SASOL 3'ün ve daha sonra SASOL 4 kurulmuştur. Sasol'un dört tesisi ile senede 2 milyon ton kömürü 160 milyon galon akaryakıt ve 200'e yakın petrokimyasal madde elde edilmektedir. Önce dışa bağımlılık ve fiyat artışından daha sonra çevresel baskılardan petrolün alternatifi olabilecek, yerini alabilecek bir yakıt ve kimyasal hammadde olabilecek en muhtemel kaynak kömürdür. Enerjisinin %90'nını ve petrol ihtiyacının %40'ını kömürden sağlayan Güney Afrika, alternatif yakıt olarak kömürü 1950'li yıllardan beri başaran günümüzdeki tek ülkedir. Ayrıca Günümüzde doğrudan sıvılaştırma yöntemi kullanılarak Japonya'da 150 ton-yakıt/gün kapasiteli Nedol Prosesi, Çin'de 2740 ton-yakıt/gün kapasiteli Shenhua Prosesi kuruluş çalışmaları devam etmektedir. Aktif olarak çalışan diğer doğrudan kömür sıvılaştırma tesisleri Lawrenceville 4800 L-yakıt/gün ve Catlettsburg 288000 L-yakıt/gün kapasite ile çalışmaktadır (Özuslu, 1975; Kural, 1991; Karta, 2015). ABD, İngiltere, Almanya, Rusya ve Japonya'da da çeşitli sıvılaştırma süreçlerinin ticarileşip yaygınlaşması petrol fiyatlarına bağlıdır.

Ülkemizde, doğal gaz ve petrol rezervleri yok denecek kadar az olmasına rağmen 20,53 milyar ton linyit ve asfaltit 1,51 milyar ton taşkömürü olmak üzere toplamda kömür kaynağı yaklaşık 22,04 milyar ton olup, toplam dünya kömür rezervinin yaklaşık % 2,1'i Türkiye'ye aittir. Özellikle ülkemiz linyit açısından dünyada önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte linyitlerimizin %79'unun ısı değeri 2500 kcal/kg altında olduğu için daha çok termik santrallerde kullanılmaktadır (TKİ, 2024). Ülkemizin tek yerli fosil yakıtı kömürden petrole alternatif yakıt üretmek için pilot ölçekte tesisler kurulmuş ve bu konuda araştırmalara devam etmektedir.

2. KÖMÜR SIVILAŞTIRMA MEKANİZMASI

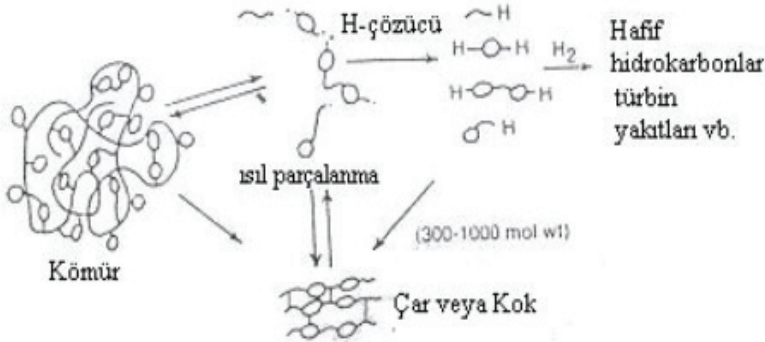
Kömür, sınırlı bir madensel kaynak olmasına karşın kömürden üretilen ikincil enerji kaynakları ve kimyasal maddeler kısa vadede petrole tek alternatiftir. Petrol, sadece yakıt değil aynı zamanda binlerce maddenin üretildiği kimyasal hammadde kaynağıdır. Rüzgar, güneş, hidroelektrik ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından yalnız elektrik ve ısı enerjisi sağlanabilmekle beraber üretilen enerjiler petrolün özellikle ulaşımda sunduğu taşıma, depolama ve fiyat gibi kolaylıklarla henüz yarışacak duruma gelmemiştir. Bununla beraber, petrokimya endüstrisi ilaç, temizlikten kozmetiğe kadar yaklaşık binlerce maddenin üretimine kaynaklık etmektedir. Kömür de petrol gibi sadece bir enerji kaynağı de-

ğil aynı zamanda kimyasal bir hammadde kaynağıdır. Kömür sıvılaştırma teknolojileri ile elde edilen ürünler hem petrol hem de petrokimyasal ürünlerin yerini alabilecek, petrol gibi kolay depolanıp taşınabilecek ve daha temiz sıvı ürünlerdir. Bu ürünler, düşük kül ve kükürt içerikli kazan yakıtı, benzin, metanol, motorin, fuel-oil gibi akaryakıtlar ve çeşitli kimyasal hammaddelerdir.

Kömür doğrudan yakılarak enerji kaynağı olarak kullanılması yanı sıra piroliz, sıvılaştırma ve gazlaştırma gibi ısıl dönüşüm teknolojileri ile de ikincil enerji kaynaklarına dönüştürülebilir (Tanuğur, 2012). Kömürden gaz üretimi 150 yıl, sıvı yakıt üretimi 70 yıllık bir tarihi olmasına rağmen bu kömür dönüştürme teknolojileri halen petrolle ekonomik olarak rekabet edecek durumda olmayıp, kömürden ucuz yakıt üretimi üzerine çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca geleceğin alternatif yakıtı olarak bakılan hidrojen üretimi ise ekonomik olarak kömürden elde edilmektedir (Önal, 2013). Sıvılaştırma proseslerinde uygulanan yüksek ısı etkisi ile kömür yapısal bir parçalanmaya uğrar ve bunun sonucunda serbest radikaller oluşur. Ortamda hidrojen veren bir çözücü veya hidrojen gazı olduğunda bu aktif parçalanma ürünleri hidrojen ile birleşerek hafif kararlı bileşiklere dönüşür. Kömür sıvılaştırma proseslerinin tümünde kömürün termal parçalanması aynı mekanizmaya göre olur. Diğer taraftan sıvılaştırma prosesleri, katalitik olup olmaması ve hidrojenin temin edildiği kaynak yönünden farklılıklar göstermektedir. Bununla beraber işlemin maliyetini artıran en önemli iki faktör hidrojen sarfiyatı ve katalizördür. Ancak kömürün atıklar ile birlikte sıvılaştırması ile hem çevre sorunları yaratan atık plastikler, yağlama yağları ve selülozik maddeler geri dönüştürülerek değerlendirilmekte hem de hidrojen ucuz bir kaynaktan elde edilmektedir.

Sıvılaştırılma işlemi, gazın adyabatik sıkıştırma ile kritik sıcaklığın altına inildikten sonra izotermal sıkıştırmalarla daha az yer kaplayan, kullanım, depolama ve taşımada avantaj sağlayan sıvı faza dönüştürülmesi fiziksel bir sıvılaştırma işlemidir. Ancak kömür sıvılaştırmada katı bir madde olan kömürün kimyasal işlemler sonucu sıvı fazda ürünlere dönüştürülmesidir. Kömürün çeşitli sıvı ürünlere dönüştürülmesinde karşılaşılan en büyük sorun hidrojen/karbon atomik oranını (H/C) ayarlamaktır. Ham petrol, kömüre kıyasla iki misli daha fazla hidrojen içermektedir. Kömürde $H/C < 1$, sıvı yakıtlarda $H/C < 1,5-2$ dir. Bu yüzden kimyasal yapısı bozundurulup kömürdeki hidrojen miktarı arttırılmalı, karbon miktarı azaltılmalıdır. Kömürden sıvı yakıt üretimi için doğrudan veya dolaylı olarak hidrojen ekleyerek ya da karbon uzaklaştırarak ham petrolün H/C oranına yaklaşılr. Kömür sıvılaştırma işlemi, gaz atmosferi ve çözücülü/çözücsüz, yüksek basınç ve sıcaklıkta katalizörlü/katalizörsüz olarak yapılır. Bu işlemlere göre kömür yapısına hidrojen ekle-

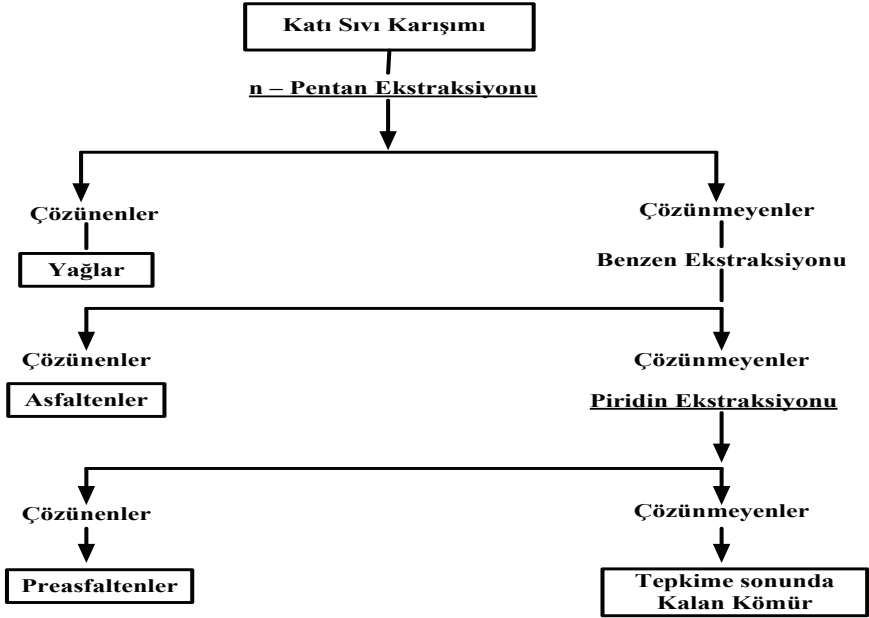
nir, kömürün karbonu düşer ve daha küçük molekül ağırlıklı kısımlara parçalanmasıyla yeni yapılar oluşur (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2010; Karaca, 1998; Kural, 1991; Çalımlı, 1982).



Şekil 1. Kömürün ısı ve çözücü ortamında dönüşümü

250° gibi düşük sıcaklıklarda kömür molekülündeki zayıf bağların kopması için gerekli aktivasyon enerjisi olan 50 kcal/mol karşılandığından kömürden düşük molekül ağırlıklı sıvı ürünler elde edilmeye başlanır. Kömürün 400°C üzerindeki sıcaklıklarda ısı parçalanması ile serbest radikaller oluşur. Serbest radikaller çok reaktif olup, tekrar kendi aralarında birleşerek başka yüksek molekül ağırlıklı bileşikler ve kok oluşturur. Ancak ortamda en hafif element olan hidrojen bulunursa serbest radikaller hidrojenle birleşip, 300-1000 arasında değişen daha küçük molekül ağırlıklı hafif bileşikler elde edilebilir. Hidrojen, ortama gaz halinde ya da bir çözücü ile verilebilir (Karaca, 1998; Kural, 1991; Çalımlı, 1982).

Kömür sıvılaştırılması sonucunda elde edilen kömür sıvılaştırma ürünleri, çalışma koşullarına bağlı olarak değişik yöntemlerle farklı fraksiyonlara ayrılmaktadır. En yaygın kullanılan ayırma işlemi, çözücü ekstraksiyonudur. Ekstraksiyon çözünürlük farkına göre yapılan bir ayırma işlemidir. Bu yöntemde ürünler katıdan gaz fazına doğru Şekil 2. de görüldüğü gibi ardışık ekstraksiyonla ayrılmıştır (Kural, 1991; Çalımlı, 1982). Sıvılaştırma ürünleri öncelikle pentanda çözünürlük farkına göre ayrılır. Pentan da çözülmeyen kısımlar benzen ekstraksiyona tabii tutulur. Benzen de çözünmeyen gruplar ise piridin çözücü ekstraksiyonuna tabii tutulur. Piridin çözünmeyen kısım dönüşmemiş kömür olarak ortamda kalır.



Şekil 2. Kömür Sıvılaştırma Ürünleri

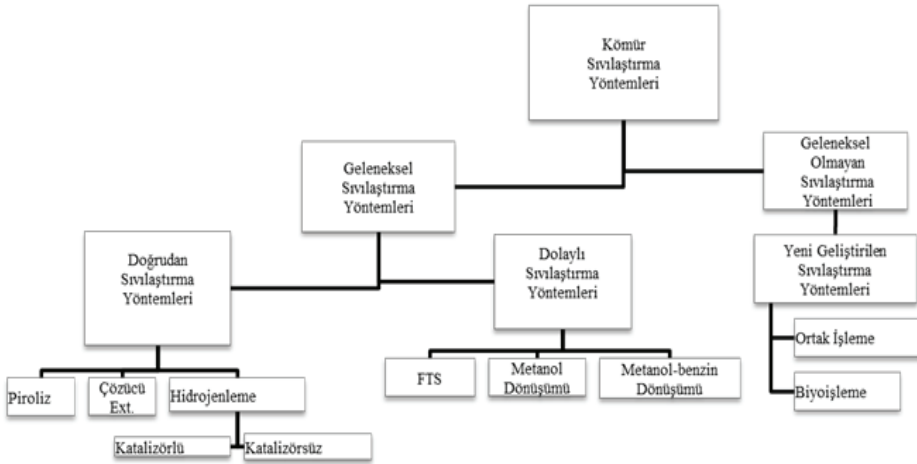
Kömür sıvılaştırma da elde edilen sıvı ürünler vakum altında damıtılarak doğal gaz, LPG, Nafta, Fuel-oil gibi petrol türevlerine benzer hafif ürünler elde edilir. Sıvılaştırma işleminde dönüşmemiş katı kısım temiz kazan yakıtı olarak kullanılabilir. Kömür sıvılaştırma işlemi sonucu elde edilen ürünler ağırdan hafife doğru aşağıdaki gibi beş sınıfta toplanır.

1. Dönüşmemiş kömür (char), yarı kok
2. Ön-asfaltenler (PAS): Piridin de çözünüp, benzen veya toluen de çözünmeyen molekül ağırlığı 400-2000 g/mol aralığında olan çok fonksiyonlu bileşikler.
3. Asfaltenler (AS): Benzen veya toluen de çözünüp, pentan veya heksan da çözünmeyen, molekül ağırlıkları 300-700 g/mol aralığında olan fenoller, eterler ve bazik azot bileşikler.
4. Yağlar: Pentan veya heksan da çözünen, molekül ağırlıkları 200-300 g/mol aralığında olan eterler, tiyoeterler, polinükleer ve bazik olmayan bileşikler.
5. Gazlar: CO, CO₂, CH₄, H₂S, NH₃

Kömür sıvılaştırma ürünlerinden yağlar fraksiyonu istenilen ürünler olup sıvılaştırma veriminin göstergesidir. Yağlar, hafif bileşikler olup, sıvı fazda bulunur ve mevcut yakıt standardını karşılayan petrole alternatif kısımdır. Ayrıca, kömür sıvılaştırma ürünlerinin çevreye zararlı aerosola sebep olan kükürt ve azot içeriği düşüktür (Çalıklı, 1982; Kural, 1991).

3. KÖMÜR SIVILAŞTIRMA YÖNTEMLERİ

Kömür sıvılaştırma yöntemleri doğrudan sıvılaştırma yöntemleri ve dolaylı sıvılaştırma yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğrudan kömür sıvılaştırılmasında, kömür bir çözücü ile yüksek ısı ve basınç altında işlem görmektedir. Daha sonra elde edilen ürünler ardışık ekstraksiyon işlemiyle ayrılmaktadır. Dolaylı kömür sıvılaştırılmasında, ilk olarak kömür yüksek sıcaklık ve basınçta gaz haline getirilerek hidrojen ve karbonmonoksit karışımı olan sentetik gaz üretilir. Bu gaz temizlenir ve katalizörle seçicilik sağlanarak Fischer Tropch Prosesi ile yüksek kalitede temiz dizel, metanol ve dimetileter gibi alternatif sıvı yakıtlar üretilir (Kural, 1991; Çalıklı, 1982).



Şekil 3. Kömür Sıvılaştırma Yöntemleri

3. 1. DOĞRUDAN SIVILAŞTIRMA

Kömürün doğrudan sıvılaştırılmasında çeşitli prosesler geliştirilmiştir. Bu proseslerin tümünde kömürün ısı etkisiyle değişimi aynı mekanizmaya göre olur. Doğrudan sıvılaştırma prosesi ile pulverize kömür, doğrudan bir çözelti içinde yüksek sıcaklık, yüksek basınç gibi ağır koşullar altında sıvı yakıtla dönüştürülerek yüksek enerji yoğunluklu ürünler elde

edilir. Ancak katalizör kullanılıp kullanılmaması ve hidrojenin moleküler hidrojen den ya da hidrojen veren organik bir çözücünden sağlanıp sağlanmaması yönünden farklılıklar gösterir. Proses esnasında eklenen hidrojen gazı H/C oranı artırırken oksijen, kükürt ve azotun uzaklaştırılmasını da sağlar. Ortama katalizör eklenmesi ile tepkime hızı artırılır. Doğrudan sıvılaştırma işlemi dolaylı sıvılaştırma işlemine göre maliyetli olmasına karşın verim modern proseslerle %60-70'e kadar yükselmektedir (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2010).

3.1. 1. Piroliz

İnert atmosferde ve 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ısıtılan kömürden gaz ve sıvı ürünler ayrılır. Kömürden elde edilen gaz ürün doğrudan yakıt olarak kullanılabilirken katran hidrojenlenerek düşük kükürtlü yakıtı dönüştürülerek kullanılabilir. Gazı alınmış kömür, buhar veya buhar hava karışımı, sentez gazı (CO+H₂) elde etmek için gazlaştırılabilir. Sentez gazı H₂S kirleticilerden uzaklaştırılması için işleme tabi tutulur ve metanol veya amonyak eldesinde kullanılır (Kural, 1991; Çalımlı, 1982).

3. 1. 1. Çözücü Ekstraksiyonu

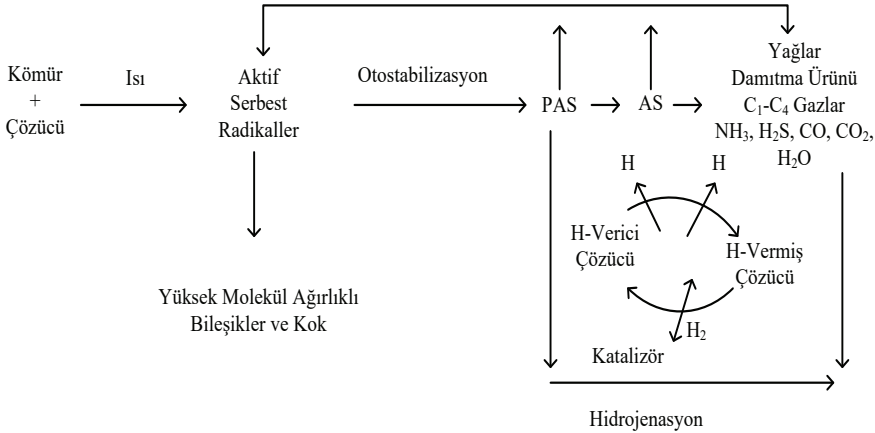
Hafif koşullarda kömürün aromatik yapısının bozundurulması için kullanılan bir ayırma yöntemidir. Bu yöntemde kömür 350-450°C sıcaklıklarda çözücülerle ekstrakte edilir. Ekstraksiyonla çözücü kömürdeki zayıf bağları parçalar. Ekstraksiyonda yağ verimini arttırmak için genellikle hidrojen veren çözücü kullanılır. İşlem katalitik ya da katalitik olmayan ortamda gerçekleştirilebilir. Bünyesinde var olan hidrojenin yanı sıra kömüre çözücü yoluyla hidrojen verilmesiyle organik kısmının hemen hemen tamamı sıvı ve gaz ürünlere dönüştürülebilir (Kural, 1991; Çalımlı, 1982).

3. 1. 2. Hidrojenleme

Kömür sıvılaştırma işlemlerinde ortama iki şekilde ortama hidrojen ya gaz halinde ya da çözücü ile verilir. Ağır koşullarda, yüksek basınç (120-330 atm) ve yüksek sıcaklıkta (350-450°C) ortama hidrojen gazı verilerek kömüre doğrudan hidrojen eklenir. Yüksek basınç ve sıcaklık da, hidrojen gazı atmosferinde kömür türevli bir çözücüde bulamaç halinde hazırlanan kömür reaksiyona tabi tutulur. Bu reaksiyon katalizörlü/katalizörsüz yapılabilir.

Kömür dönüşümünün ilk kademesinde düşük sıcaklıklarda dönüşüm uğrar ve içindeki hidrojenin az bir kısmı açığa çıkar. Bu kademe sonunda oluşan kararlı radikallerin molekül ağırlıkları 10-300 g/mol'dür. Sıcaklık arttıkça kömür içindeki bağ kopmaları ve hidrojen kullanımı ar-

tar. Oluşan radikal reaksiyon şartlarında molekül halindeki hidrojen ile doğrudan etkileşime girmesi ortamdaki hidrojen gazının önemini ortaya çıkarır. Ancak bu kademedeki en önemli reaksiyon hidrojenin çözücünden kömüre aktarımıdır (Kural, 1991; Çalımlı, 1982; Şimşek, 1997).



Şekil 4. Kömürün hidrojen veren çözücü içerisindeki sıvılaştırılma mekanizması

3. 2. DOLAYLI SIVILAŞTIRMA

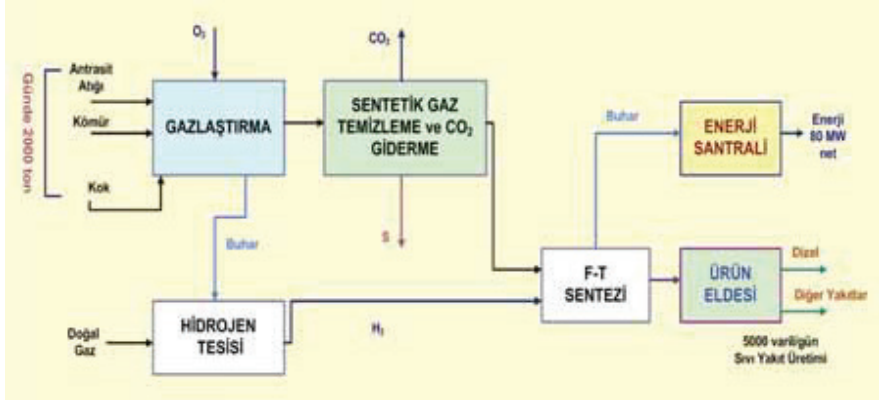
Kömür önce buhar ve hava, ya da oksijen ile gazlaştırılarak sentez gazı (H₂ ve CO) elde edilir ve sonrada oluşan gazlar sıvılaştırılır. Gazlaştırma sıcaklığı 950°C'nin üzerindedir. Proses şartlarından dolayı var olan hemen hemen tüm bağlar kopar. Ortama verilen molekül halindeki oksijen ve buhar varlığında 430°C de reaksiyonu sonucu sıvı hidrokarbonlar elde edilir (Kural, 1991; Çalımlı, 1982). Parçacık madde, özellikle H₂S, CS gibi kükürt bileşikler ve azot gibi istenmeyen safsızlıklar içeren bu gaz karışım, temizlenip Fischer Tropsch veya Metanol prosesinden geçirilerek temiz, yüksek kaliteli metanol, etanol, dizel, sıvı hidrokarbonlar gibi sıvı ürünler üretilmektedir. Temizlenen gazdan CO₂ tutulup ayrıştırılabilmektedir. Ayrıca sentez gazından elektrik ile hidrojen elde edilebilmektedir. Modern tesislerde enerji verimliliği %40'ın üzerindedir (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2010).

3.2.1. Fischer-Tropsch Sentezi (FTS)

Fischer-Tropsch sentezi uzun zamandır bilinen ve uygulanan bir teknolojidir. 1930'larda kömür zengini olan Almanya da geliştirilmiş daha sonraları başta Güney Afrika da olmak üzere çeşitli ülkelerde uygulama alanı bulmuştur. Fischer-Tropsch reaksiyonlarında çeşitli hidrokarbonlar

ve oksijenli bileşikler elde edilir. Elde edilen hidrokarbonlar, parafinler, olefinler ve primer alkollerdir. Parafinler arasında n-parafinler ve atomlarında metil grubuyla dallanmış izo-parafinler baskındır. Olefinlerden en önemli bileşik α -olefinlerdir (Karaca, 1998; Kural, 1991; Çalımlı, 1982).

Fischer-Tropsch sentezi gerçekleştirildiği sıcaklığa göre düşük ve yüksek sıcaklık uygulamaları olmak üzere ikiye ayrılır. Düşük sıcaklıktaki uygulamalar genelde motorin hidrokarbonlarının, yüksek sıcaklıktaki uygulamalar ise daha çok benzin hidrokarbonlarının eldesinde kullanılır. Fischer-Tropsch sentezinde geniş bir aralıktaki ve farklı hidrokarbonların bulunduğu karışımlar üretilir. Bu geniş aralıktaki hidrokarbon karışımından benzin ve motorin hidrokarbonlara geçiş Hidrokraking ile sağlanır. Motorin veya benzinin sentez gazından üretiminde ilave her işlem ek maliyet gerektirmektedir. Bu maliyeti azaltmak için uygulanan yöntemlerden biri Fischer-Tropsch ve Hidrokraking Sentezinin birlikte kullanımıdır. Parafinlerin sentez gazından doğrudan üretiminde Birleşik Fischer-Tropsch ve Hidrokraking işlemi, yatırım ve işletme maliyetlerini önemli oranda düşürür. Fischer-Tropsch ve Hidrokraking proseslerinin birleştirilmesi iki farklı tip katalizörün bir arada kullanılması ile mümkündür (Tanuğur, 2012).



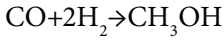
Şekil 5. Kömürden FTS ile Yakıt ve Elektrik Üretimi

3.2.2. Metanol Sentezi

Metanol, etilen, propilen ve amonyakın yanı sıra tüm kimyasal ürünleri üretmek için kullanılan dört kritik temel kimyasaldan biridir. Metanolün yaklaşık üçte ikisi formaldehit, asetik asit ve plastikler gibi diğer kimyasalları üretmek için kullanılır. Metanol'ün yakıt olarak kullanı-

mında göreceli olarak bazı dezavantajlar da vardır. Metanol'ün birim hacimdeki enerji yoğunluğu benzine göre daha düşük olduğu için benzin göre daha fazla metanol kullanılır. 1.7 litre metanol, 1 litre benzinin verdiği enerjiye eşittir. Metanol, doğal gaz ve kömürden elde edilebilmektedir (Şengüler, 2024).

Metanol sentezi için gerekli stokiyometrik H_2/CO oranı 2'dir. Ancak sentez gazında metanol yanında başka pek çok bileşen oluşabileceği için, seçicilik önemlidir. Bunun içinde katalizör kullanılır. Metanolün oluşumu düşük sıcaklık ve yüksek basınç gerektirir. CO_2 'inde metanole dönüşümü katalizörle sağlanır.



Ancak tepkime ısısı CO dönüşümünde olduğundan daha düşüktür, hidrojen tüketimi fazladır (Karaca, 1998; Kural, 1991; Çalımlı, 1982, Şimşek, 1997).

3.2.3. Mobil-Gazolin Sentezi

Mobil-Gazolin sentezinde kömürün gazlaştırılması sonucu elde edilen sentez gazından önce metanol üretilmekte daha sonra ise metanol ZSM-5 gibi bazı özel zeolitler katalizörlüğünde aromatiklerce zengin C_5 - C_{11} hidrokarbonlarına dönüştürülerek gazolin ve LPG üretilmektedir. Sentez gazından metanolün oluşumuna ait tepkime eşitlik 1 ile verilmiştir. Eşitlik 2 ise metanolden hidrokarbonların oluşumuna ait tepkimeyi göstermektedir (Karaca, 1998; Kural, 1991; Çalımlı, 1982; Karta, 2015).



4. YENİ GELİŞTİRİLEN SIVILAŞTIRMA YÖNTEMLERİ

Bu yöntemde ağır petroler ile bunların atmosferik ve vakum altında destilasyon atıkları, atık plastikler, yağlama yağları, selülozik maddeler ve mikroorganizmaların kömür ile birlikte kömür sıvılaştırılır. Böylece maliyetleri yüksek olan ve geri döngü gerektiren kömürden türemiş çözücülerin yerine petrol türevli çözücülerin kullanımı ile maliyet düşmektedir. Ayrıca hem çevre sorunları yaratan atıkların geri kazanımıyla atıklar değerlendirilmekte hem de hidrojen daha ucuz bir kaynaktan elde edilerek sıvılaştırma işlemi daha ekonomik olabilmektedir. Ancak, bu çözücülerin zayıf kömür sıvılaştırma çözücüleridir. Bu yüzden ortak işlemede hidrojen ilavesi gerekmektedir.

Mikroorganizma ve bazı durumlarda, bu organizmalar aracılığıyla türetilmiş enzimler, kömürün kükürt içeriğinin azaltılmasını ve kömürün sıvı-gaz ürünlere dönüştürülmesini sağlar. Kömürün mikroorganizmalarla birlikte sıvılaştırılması yani biyoişleme, termo kimyasal yöntemlere göre verimlerinin daha yüksek olması ve yüksek sıcaklık ve basınç gibi ağır koşullar gerektirmemeleri dolayısıyla ilgi çekmektedir (Karaca, 1998; Kural, 1991; Şimşek, 1997; Demirbaş, 2001).

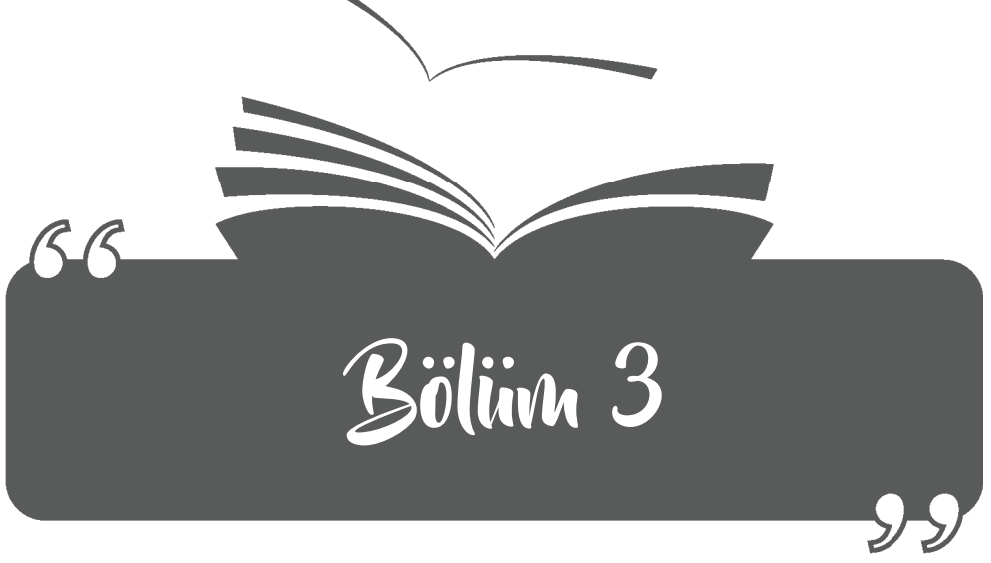
SONUÇ

Kömür, gazlaştırılarak çeşitli gazlar elde etme yanında; sıvılaştırılarak değişik kimyasal ham maddeler ve sıvı yakıtların üretiminde de kullanılabilir. Kömürden üretilecek gaz, doğal gazın ve üretilecek sıvı petrolün yerini alabileceği öngörülmektedir. Petrol ve doğal gaz ihtiyacını dışarıdan ithal eden, kömür rezervleri bulunan ülkeler kömürlerinden en iyi şekilde yararlanabilmek için bugün pilot ölçekte veya endüstriyel çapta uygulanan sıvılaştırma tesisleri kurmuştur. ABD, İngiltere, Almanya, Rusya ve Japonya'da da çeşitli sıvılaştırma süreçleri geliştirilmektedir. Bu süreçlerin pek çoğunun ticarileşmesi artık neredeyse tümüyle petrol fiyatlarına bağlı bulunmaktadır. Kömürün sıvılaştırılması ile elde edilen petrole alternatif ürünün varil fiyatı yaklaşık 60-80\$ civarında olup, petrolün varil fiyatı daha düşük olduğu müddetçe ekonomik olarak kullanımı yaygınlaşamayacaktır.

Türkiye petrol ihtiyacının %90'nından fazlasını dışarıdan satın alarak karşılıyor. Bu ihtiyacın %20'sini kömürden elde edebilir. Özellikle sahip olduğumuz kömür rezervlerinin yaklaşık %90'ını linyittir. Linyitlerimizin ısı değeri düşük, nem ve kül miktarı yüksek olduğundan ısıtma amacıyla değil linyit yataklarının bulunduğu yerde kurulan termik santrallerde yakılıp, elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmaktadır. Bu sebeple, linyitlerin doğrudan kullanımı hem ekolojik hem de ekonomik olarak uygun değildir. Linyit kömürler içerisinde sıvılaştırma potansiyeli en fazla olan kömür cinsidir. Linyitlerimizin ısıtma ve elektrik için kullanımı hem ekolojik hem de ekonomik olarak uygun değildir. Dünya da en fazla linyit rezervlerine sahip olan ülkelere biri olan Türkiye de linyiti sadece elektrik elde etmek değil aynı zamanda tükenmekte olan, fiyatı stabil olmayan ve çevreye kömüre göre da daha fazla karbondioksit veren petrol yerine kullanarak dışa bağımlılığımız azaltılabilir. Bu sebeple, ülkemizdeki linyitlerin diğer ürünlere dönüştürülebilme potansiyellerinin araştırılması, ülke enerji ihtiyacı ve ekonomisi açısından yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Acar Ç., Bülbül S., Gümrah F., Metin Ç., Parlaktuna M. (2007). Petrol ve Doğalgaz, Odtü Yayıncılık.
- Çalımlı, A. (1982). Doçentlik Tezi, Ankara Üniversitesi.
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42, 1357-1378.
- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi (2010). Temiz Kömür Teknolojileri, Yayın No:0015/2010.
- Karaca, H. (1998). Katalizör emdirmeye yöntemi ile bazı Türk linyitlerinin sıvılaştırılması. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı, Ankara.
- Karta, M. (2015). Türkiye’de kömür, TESPAM-Türkiye Enerji Politikaları ve Araştırmaları Merkezi
- Kömürder (2024). Türkiye’de ve Dünyada Kömür
- Kural, O. (1991). Kömür. Kurtiş matbaası.
- Onal, G. (2013). Türkiye Enerjide Dışa Bağımlılıktan Nasıl Kurtulur?, İTÜ Vakfı Dergisi
- Özuslu, T. (1975). Kömürden Petrol: Güney Afrika’deki Sasol Kömür Dönüştürme Tesisi
- Şengüler, İ (2024). Kömür Gazlaştırma Ürünleri; Hidrojen, Metanol ve Amonyak Kömürün Geleceğini Aydınlatıyor. *Enerji ve Maden*. 42-44.
- Şimşek, E.H. (1997). Türk linyitlerinin mikrodalga enerji etkisiyle tetralindeki hidrojenasyonu. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı, Ankara.
- Tanuğur, Y. (2012). Direct synthesis of paraffins from combined Fischer Tropsch and hydrocracking. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilimdalı.
- Türkiye Kömür İşletme Kurumu, TKİ, (2024). Dünya ve Türkiye Kömür Kaynak ve Rezerv Durumu



SERAMİK ATIKLARI KULLANILARAK ÜRETİLEN YAPAY MERMERLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ¹

Birsen KIRIKTAŞ², Didem EREN SARICI³

1 Yüksek Lisans Tez Künyesi: Birsen KIRIKTAŞ, Bazı Endüstriyel Artıklardan Yapay Mermer Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022, Malatya. Danışman: Prof. Dr. Didem EREN SARICI İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Malatya.

2 Prof. Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, didem.sarici@inonu.edu.tr, ORCID:0000-0003-2639-5226

3 Jeofizik Yük. Müh., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, birsenkiriktas02@gmail.com, ORCID:0000-0002-7292-5163

1. GİRİŞ

En geniş tanımıyla kireçtaşları ve dolomitik kireçtaşlarının başkalaşma uğraması ve yeniden kristallenmeleriyle oluşan metamorfik kayalar şeklinde yapılan mermer tanımı, günümüzde içerisinde değişik magmatik ve sedimanter kökenli kayalar da alan önemli bir yapı malzemesi grubunu oluşturmaktadır. Bu grup kayalar doğal taşlar olarak yeniden ve daha kapsayıcı bir grup oluşturmakta ve inşaat ve yapı sektörü için vazgeçilmez bir doğal kaynak olarak kullanılmaktadır. Mermer ve doğal taş olarak nitelendirilecek bir kayaç grubunda önemli olan blok ve levha alım veriminin yüksek olması ayrıca üretimi yapılan taşın alım satımının yapılması yani ticari bir potansiyele sahip olmasıdır. Teknolojik ilerlemelere bağlı olarak sektörel ihtiyaçlar doğrultusunda üretim kapasiteleri artan doğal taş stokları hızla tükenmekte ve üretim süreçleri neticesinde büyük miktarlarda artık malzemeler oluşmaktadır (Demir ve Güngör, 2013).

Hammaddesi polyester reçineler, atık mermer tozları, cam ve diğer endüstriyel artıklar olabilen, renk pigmentleri ile değişik renk ve desen özelliği kazandırılabilen yeni nesil yapı malzemelerinden olan yapay mermerlerin kullanımı gittikçe artan bir trend sergilemektedir. Yapay mermerler istenilen ebat ve boyutlarda yekpare olarak üretimi sağlanarak farklı dolgu malzemeleri ile değişik yöntemler kullanılarak üretildikten sonra kalıplara dökülerek boyutlandırılıp parlatılmakta ve isteğe göre kesilip şekillendirilerek yapılarda değişik alanlarda (mutfak, banyo, iç ve dış mekanlarda zemin kaplama malzemesi) kullanım olanağı bulmaktadır (Yüçetürk; 2010).

Yapay mermerlerin mekanik özellikleri yüksektir ve istenilen özellikte üretilebilmektedirler. Buna ek olarak yapay mermerler asit-baz gibi maddelerin korosif etkilerine karşı da dayanıklı malzemelerdir. Yapay mermerler sağlığı olumsuz yönde etkileyecek dolgu malzemeleri ve reçineler kullanılmadan da üretilebilirler bu özellikler yapay mermerlere önemli avantajlar sunar (Evren; 2018).

Mermer ve Yapay Mermer Arasındaki Farklılıklar;

- Mermerler yapay mermerlere nazaran daha ağırdır.
- Mermerler doğadan blok halinde çıkarıldığı esnada kayıp çok olduğundan atık oranı fazladır, yapay mermerlerde ise atık yoktur.
- Mermerler istenilen boyut ve şekle göre çıkarılmaz, yapay mermerler ise isteğe göre şekillendirilip üretilirler.

- Yapay mermerlerin üretimi doğal mermere göre hızlıdır.
- Yapay mermerler yekpare üretilebilir fakat mermerin parçaları çoktur (Yücetürk, 2010).

Atıkların geri dönüşüm süreçlerine tabii tutularak geri kazanılması doğal kaynaklarımızın korunmasına, enerjiden tasarruf yapılmasına, çevre kirliliğinin olumsuz etkilerinin azaltılmasına katkı sağlayacak önemli bir süreçtir. Cam, kağıt, karton, plastik, metal, organik olarak kategorilenen atıklar çöp döküm sahalarından toplanarak hammadde kaynağı olarak değişik sektörlerde kullanılmaktadırlar. Atıkların geri kazanımı ve yeni mamul maddelere ve ürünlere dönüştürülmesi Avrupa Birliğine üye ülkelerde %80, Türkiye'de ise %20 oranında gerçekleşmektedir. Çalışmaya konu olan seramik atıklarının yapay mermer endüstrisinde kullanılabilirliği üretim süreçlerinde ki kayıpların azaltılması ve çevre üzerindeki olumsuz etkinin bertaraf edilmesinin sağlanması açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada seramik atıklar kullanılarak üretilen yapay mermerlerin fizikomekanik özellikleri belirlenmiş, seramik atık kullanımının yapay mermer üretimi için uygunluğu araştırılmıştır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Yapay Mermer Üretiminde Kullanılan Atık Malzeme

Çalışmada kullanılamaz nitelikte fayans (karo) seramik atığı kullanılmıştır. Atık malzemeler, laboratuvarında çekiç yardımıyla kırılıp ufalanmış sonrasında merdaneli kırıcıdan ve bilyalı değirmenden geçirilerek öğütülmüştür. Şekil 1 a'da parçalanmış Şekil 1 b'de öğütülmüş seramik atıkların genel görünümü verilmiştir.



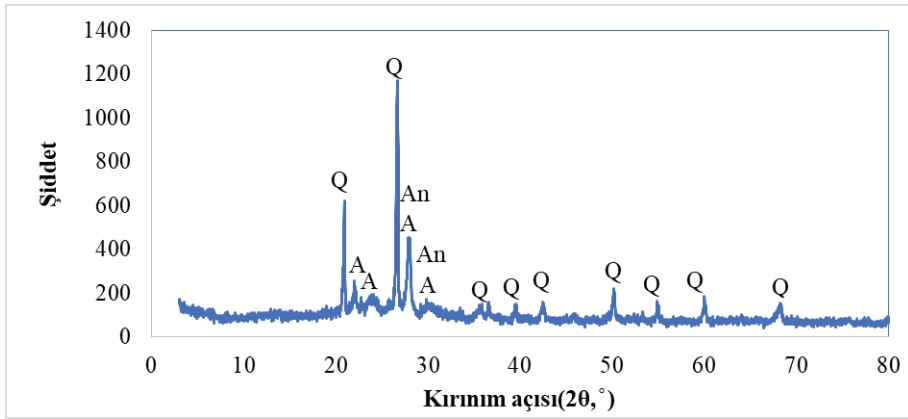
a: Parça atıklar



b: Öğütülerek toz hale getirilmiş atıklar

Şekil 1. Seramik atığı malzemelerinin genel görünümü a: parça atıklar, b: toz atıklar

Seramik atığının kimyasal bileşimini belirlemek için XRF, mineralojik bileşimini belirlemek için XRD analizleri yapılmıştır. Öğütülerek toz haline getirilen ve $-150\ \mu\text{m}$ lik elekten geçirilerek hazırlanan malzemeden konileme-dörtleme yapılarak azaltılan 10 g'lık numune ile İnönü Üniversitesi İBTAM Fizik Bölümü Laboratuvarında, Rigaku RadB-DMAX II marka X-ışını difraktometresi ile $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.5405\ \text{\AA}$) radyasyonu kullanılarak XRD analizi gerçekleştirilmiş sonuç Şekil 2'de verilmiştir. Aynı malzemeden aynı yöntemle alınan 100 g numune ile XRF analizi Afyon Kocatepe Üniversitesi Doğaltaş Analiz Laboratuvarında RIGAKU/ZSX PRIMUS 2 marka cihaz kullanılarak yaptırılmış sonuç Çizelge 1'de verilmiştir.



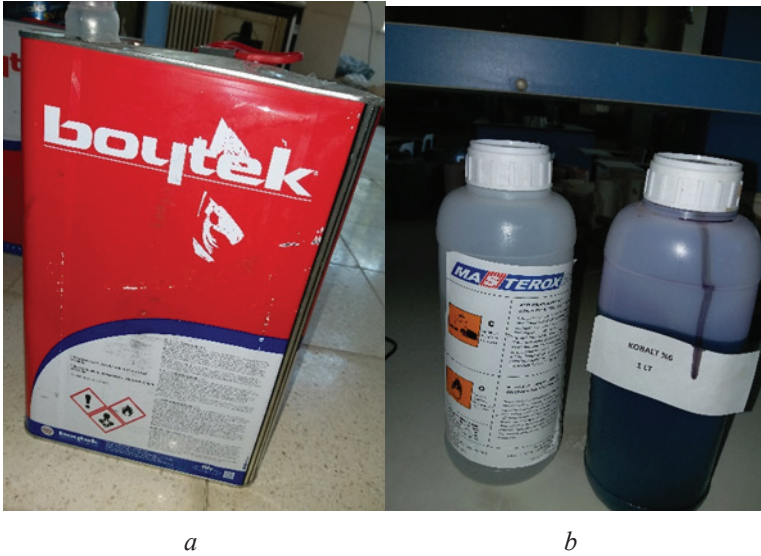
Şekil 2. Seramik atığına ait X- ışınları difraktogramı (An: Anortit, A: Albit, Q: Kuvars).

Çizelge 1. seramik atıklarının XRF analizi sonuçları

Kimyasal Bileşimi	Seramik (%)
Na_2O	2,0103
MgO	1,9901
Al_2O_3	16,0929
SiO_2	59,1969
P_2O_5	0,0900
SO_3	0,1743
Cl	0,0112
K_2O	2,6678
CaO	8,9908
TiO_2	0,5327

V_2O_5	0,0116
Cr_2O_3	0,0230
MnO	0,0632
Fe_2O_3	2,9129
NiO	0,0090
ZnO	0,1484
Rb_2O	0,0215
SrO	0,0209
ZrO_2	0,0945
Nb_2O_5	0,0035
BaO	0,1078
PbO	0,0145
Kızdırma Kaybı	4,8122
Toplam	100

Yapay mermer üretiminde bağlayıcı olarak BOYTEK marka polyester reçine, kobalt (%6) ve MASTEROX marka sertleştirici olan Metil Etil Keton Peroksit kullanılmıştır. Yapay mermer üretiminde kullanılan kimyasallar Şekil 3. de verilmiştir.



Şekil 3. Yapay mermer üretiminde kullanılan kimyasallar (a) polyester reçine, (b) Metil Etil Keton Peroksit ve Kobalt

Çalışmada bağlayıcılık sağlanması amacıyla BRE 329 polyester reçine kullanılmıştır. Hızlandırıcı doymamış polyester reçine türü olan yüksek reaktivite ve orta viskoziteye sahip olan reçine, kimyasal dayanımı yüksek özelliktedir ve alev dayanımının yüksek olması nedeniyle el yatırması ve püskürtme gibi kalıplama tekniğine sahip endüstriyel parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Çizelge 2’de sıvı haldeki reçinenin, Çizelge 3’de sertleşmiş reçinenin mekanik özellikleri verilmiştir (Yüçetürk, 2010).

Çizelge 2. Polyester reçinenin sıvı haldeki özellikleri

Renk	Asit değeri	Viskozitesi	Jel zamanı	Solid içeriği	Pik ekzotermi
Berrak	Max 30 mg KOH/gr	500-700 cp	10-20 dakida	%65-%70	100 °C-120 °C

Çizelge 3. Sertleşmiş polyester reçinenin mekanik özellikleri

Test	Metod	Değer
Çekme dayanımı	ISO 527	45 N/mm ²
Çekme modülü	ISO 527	3800 N/mm ²
Kopma uzaması	ISO 527	% 1,3
Eğilme dayanımı	ISO 178	70 N/mm ²
Eğilme modülü	ISO 178	3900 N/mm ²
Sertlik	934-1	45 Barcol
HDT	ISO 75A	95 °C

Kobalt

Bu çalışmada % 6 ‘lık konsantrasyon değerine sahip olan kobalt kullanılmıştır. Kobaltın konsantrasyon değeri kullanılan reçinenin türü ve uygulanan üretim tekniğine bağlı olarak değişmektedir. Çalışmada ayrıca kullanılan reçinenin kürleşmesini hızlandırıcı olan Metil etil keton peroksitin (MEKP) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Kobaltın ve MEKP nin genel özellikleri Çizelge 4’de verilmiştir (Tok,2018).

Çizelge 4. Kobalt ve MEKP ‘nin genel özellikleri

Özellik	Kobalt	MEKP
Yoğunluk	0,92 gr/cm ₃	1,17 gr/cm ³
Viskozite	300 mPa	25 MPa
Renk	Menekşe-mavi renkli sıvı	renksiz sıvı
Çözücü	Stren, tolüen, TXIB	DMT
pH	Nötr	-
Kobalt içeriği	%6 (isteğe göre %1 - %10)	-
Aktif oksijen içeriği	-	%9,8 - %10
Peroksit içeriği	-	%34-%36

2.2. Yapay Mermer Üretimi

Seramik atıklar, yapay mermer üretmi için kırma, öğütme ve eleme işlemlerine tabii tutulduktan sonra; 150 μm , 300 μm , 600 μm ve bu boyutların tümünün karışımından oluşan hammaddeler hazırlanmıştır.

Yapay mermer örneklerinin hazırlanma aşamasında farklı tane boyutlu hammaddelerden eşit oranlarda malzeme alınmış ve bu toz malzemeler aynı oranlarda polyester reçine ve kimyasallar ile karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. 800 gr toz malzeme ile 400 g polyester reçine 10 dakika süre ile mikserde karıştırılmış süre sonunda karışıma 0,57 g kobalt eklenerek karıştırma işlemine 3 dk daha devam edilmiştir. Süre sonunda 3,17 gr MEKP (Metil Etil Keton Peroksit) karışıma eklenerek 2 dakika daha karıştırılmış ve karıştırma işlemi bittikten sonra homojen karışım 5x5x-5cm³ ebatlarındaki silikon kalıplara dökülmüştür. Kalıplanan malzeme içerisinde hava kabarcığı kalmaması için titreşim sehpasında 5 dk süre ile titreşime tabii tutulmuştur (Şekil 4.a). titreşime tabii tutulan örnekler sertleşmesi ve kuruması amacıyla 10 dk bekletilmiş bu sürenin ilk 5 dakikası sonucunda örnekler yüksek bir sıcaklığa çıkmış sonra soğumaya başlamıştır. Üç farklı tane boyutunun karışımından oluşan malzeme için bütün tane boyutlarından eşit oranda toz malzeme (267'şer gr) ve aynı oranda kimyasallar kullanılmıştır.



a: Titreşime tabii tutulan örnekler



b: Örneklerin genel görünümü

Şekil 4. a:Yapay mermerlerin titreşime tabii tutulma aşaması b:genel görünümeleri

Yapay mermer örneklerinin hazırlanmasında kullanılan hammadde ve kimyasal miktarları Çizelge 5.' de verilmiştir.

Çizelge 5. *Yapay mermer üretiminde kullanılan hammadde ve kimyasal miktarları*

Malzeme	Boyut			
	150 µm	300 µm	600 µm	Karışım
Toz seramik	800 gr	800 gr	800 gr	801gr(267gr+267gr+267gr)
Polyester reçine	400 gr	400 gr	400 gr	400 gr
Kobalt	0,57 gr	0,57 gr	0,57 gr	0,57 gr
MEKP (Metil Etil Keton Peroksit)	3,17 gr	3,17 gr	3,17 gr	3,17 gr

2.3. Yapay Mermer Örneklerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Hazırlanan yapay mermer örneklerinin standart değerleri karşılayıp karşılamadığını belirlemek için örnekler üzerinde TSE, ISRM standartlarında belirtilen yöntem ve esaslara göre çeşitli testler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yine TSE ve ISRM standartlarına göre değerlendirilmiştir. Yapay mermer örneklerinin hazırlandığı seramik tozunun özgül ağırlığının belirlenmesi ile çalışmalara başlanmıştır. TS 699 standardına göre örneklerin birim hacim ağırlığı, ağırlıkça ve hacimce su emme, porozite, ağırlık kaybı, donma-çözünme ve tek eksenli basma dayanımı deneyleri, ISRM 1978’ de esas alınan yöntemlere göre Schmidt çekici sertlik tayini ve ultrasonik dalga hızı deneyi yapılmıştır (TS 699; ISRM 1978; ISRM 1978).

2.4.Fiziksel Özellikleri Belirlemek Amacıyla Gerçekleştirilen Deneyler

Özgül ağırlık tayini

Bir malzemenin bağıl yoğunluğu ile ilişkili olan özgül ağırlık, bir cismin birim hacminin ağırlığının +4 °C’deki suyun birim hacim ağırlığına oranını ifade etmektedir (Köse ve Kahraman, 2009).

Yapay mermer üretiminde kullanılan seramik atıkların özgül ağırlığı (d_o), TS 699 standardında tanımlanan yöntemle belirlenmiştir. Hazırlanan 2 kg kadar parça numune merdaneli kırıcıdan geçirildikten sonra bilyeli değirmende öğütülerek 150 µm’lik elekten elenmiştir. Koni-leme-dörtleme ve karelej işlemlerinin ardından 100’er gr malzeme 105 °C’lık etüvde kurutularak hazırlanmıştır. 50 ml hacimli piknometre kapağı ile beraber tartılarak tartım neticesi (Gp) olarak kaydedilmiştir. Ardından saf su ile doldurulup kapağı kapatılan ve kurulan piknometre tekrar hassas terazide tartılarak tartım neticesi (Gps) olarak kaydedilmiştir. Kuru malzemeden 2-2,5 g kadar alınıp piknometreye konularak tartılmış ağırlığı (Gpn) olarak kaydedilmiştir. Deney örneği üzerine piknometre

hacminin çeyreği kadar su doldurulup hava kabarcıkları kalmaması için iyice çalkalanmış ve piknometre tamamen su ile doldurulup kapağı ile beraber etrafı kurulandıktan sonra tartılmış sonuç (G_{pn}) olarak kaydedilmiştir. Özgül ağırlık değeri Eşitlik 1 kullanılarak belirlenmiştir (TS 699).

$$d_0 = \frac{G_{pn} - G_p}{(G_{pn} - G_p) - (G_{pns} - G_{ps})} \quad (1)$$

Birim hacim ağırlığı deneyi

Birim hacimdeki cismin toplam ağırlığı olarak tanımlanan birim hacim ağırlığı yapay mermerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini de etkilemektedir (Köse ve Kahraman, 2009).

Birim hacim ağırlığı deneyi TS 699 standardı esas alınarak $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ebatlarına sahip kübik şekilli numuneler üzerinde yapılmıştır. Doğal ağırlıkları belirlenen örnekler, oda sıcaklığında uygun boyutlarda bir kabın içinde yarısına kadar suya bırakılıp yaklaşık 1 saat bekletilmiş sonra üzerini geçecek kadar su eklenerek 24 saat suda bekletilmiştir.

Örnekler suya doygun hale geldikten sonra Arşimet terazisinde su içinde 0,1 gr hassasiyetinde tartılıp doygun ağırlıkları belirlenmiş sonrasında üzerindeki su bir bez yardımıyla kurutularak beklemeden tartılmış havadaki doygun ağırlıkları kaydedilmiştir.

Sonrasında örnekler $105 \pm 5^\circ \text{C}$ ' daki etüv içerisinde kurumaya bırakılmıştır. Etüvden çıkarılan deney numuneleri oda sıcaklığına ulaşınca kadar soğutulmuş ve tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

Numunelerin doğal haldeki birim hacim ağırlıkları Eşitlik 2 kullanılarak belirlenmiştir.

$$d_{doğ} = \frac{G_{doğ}}{(G_d - G_{ds})} \quad (2)$$

Numunelerin doygun haldeki birim hacim ağırlıkları Eşitlik 3 kullanılarak belirlenmiştir.

$$d_d = \frac{G_d}{(G_d - G_{ds})} \quad (3)$$

Numunelerin kuru haldeki birim hacim ağırlıkları Eşitlik 4 kullanılarak belirlenmiştir

$$d_k = \frac{G_k}{(G_d - G_{ds})} \quad (4)$$

Burada;

d_{dog} : Doğal birim hacim ağırlığı, (g/cm³)

d_d : Doygun birim hacim ağırlığı, (g/cm³)

d_k : Kuru birim hacim ağırlığı, (g/cm³)

G_{dog} : Örneğin doğal ağırlığı, (g)

G_k : Kuru örneğin ağırlığı, (g)

G_d : Doygun örneğin havadaki ağırlığı, (g)

G_{ds} : Doygun durumdaki örneğin su içindeki ağırlığı, (g) (TS 699).

Su emme deneyi

Su emme değeri, malzemenin bünyesine ağırlıkça ve hacimce ne ölçüde su gireceğinin ifadesidir ve TS 699 standardındaki hususlar dikkate alınarak 5x5x5 cm³ boyutundaki örnekler ile belirlenmiştir (TS 699; Köse ve Kahraman, 2009). İlk olarak kullanılan numunelerin doğal ağırlıkları belirlenmiştir. Sonrasında numuneler oda sıcaklığında kaplara konularak önce çeyreği suda olacak şekilde 1 saat sonra yarısı suda olacak şekilde 1 saat ve sonrasında 4'te 3'ü suda olacak şekilde 1 saat bekletildikten sonra numunelerin üzeri tamamen su ile doldurulmuş ve su içerisinde 24 saat bekletilerek suya doymun duruma getirilmiştir. Örnekler sudan çıkarılıp kurulandıktan hemen sonra hassas terazide tartılarak doymun ağırlıkları belirlenmiş sonrasında Arşimet terazisinde su içindeki ağırlıkları bulunarak ve 105 ± 5 °C de etüvde değişmez kütleyle gelene kadar kurutulmuştur. Etüvden çıkan örnekler oda sıcaklığına ulaşınca hassas terazide tartılıp kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

Ağırlıkça su emme oranı Eşitlik 5 kullanılarak belirlenmiştir.

$$S_k = \frac{G_d - G_k}{G_k} \times 100(\%) \quad (5)$$

Hacimce su emme oranı Eşitlik 6 kullanılarak belirlenmiştir.

$$S_h = \frac{G_d - G_k}{G_d - G_{ds}} \times 100(\%) \quad (6)$$

Burada;

S_k : Numunenin ağırlıkça su emme oranı

S_h : Numunenin hacimce su emme oranı

G_k : Kuru örneğin ağırlığı, (g)

G_d : Doygun örneğin ağırlığı, (g)

G_{ds} : Doygun durumdaki örneğin su içindeki ağırlığı, (g)

Porozite deneyi

Porozite, kayaç kütlesi içindeki boşluk hacminin toplam hacme oranı olarak tanımlanmaktadır. Gözeneklilik olarak da adlandırılan porozite % birimi ile ifade edilmekte ve oransal olarak oldukça az olması istenmektedir. Yapay mermer örnekleri için porozitenin büyük oranlarda olması örneklerin fiziksel ve kimyasal etkilerden daha fazla etkilenmesine neden olacağı için istenmemektedir. Yapay mermer örneklerinin üretim sürecinde titreşime tabii tutulmaları bünyelerinde gözeneklerin oluşmasını engellemek içindir. Yapay mermer örneklerinin gözeneklilik sınıflandırılması Moss – Quervain'den hareketle Tahran'a, (1989) göre yapılmıştır. Örneklerin porozite değerlerine göre sınıflandırılması Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Örneklerin porozite değerlerine göre sınıflandırılması (Tahran, 1989).

Örnek Sınıfı	Porozite (%)
Çok sıkı	<1
Az boşluklu	1-2,5
Orta boşluklu	2,5-5
Oldukça boşluklu	5-10
Çok boşluklu	10-15
Çok fazla boşluklu	>20

Porozite deneyi TS 699 standardının tanımladığı yöntemle yapılmıştır. Deneyde 5x5x5 cm³ boyutundaki örnekler kullanılmış, örnekler ilk olarak 105 ± 5 °C lik etüvde kurutulmuştur ve etüvden çıkarılarak oda sıcaklığına ulaşınca hassas terazide tartılıp kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra oda sıcaklığında su içeren bir kap içerisinde 24 saat bekletilen örnekler suya doygun duruma geldikten sonra sudan çıkarılıp kurulanmış ve sonra hassas terazide tartılarak doygun ağırlıkları belirlenmiştir. Örneklerin porozite değerleri Eşitlik 7 kullanılarak belirlenmiştir (TS 699).

$$N = \frac{G_d - G_k}{G_d - G_{ds}} (\%) \quad (7)$$

Burada;

N: Porozite

G_k : Kuru örneğin ağırlığı, (g)

G_d : Doygun örneğin ağırlığı, (g)

G_{ds} : Doygun durumdaki örneğin su içindeki ağırlığı, (g)

Tek eksenli basma dayanımı deneyi

Yapay mermerlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ve sınıflandırılmasında kullanılan yaygın bir test yöntemi olan tek eksenli basınç dayanımı; örneklerinin birim hacim ağırlığına, boşluk oranına, süreksizliklerinin durumuna, su içeriğine, numunenin boy ve çap oranına, yükleme hızına, bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Köse ve Kahraman, 2009).

(Deer ve Miller, 1966) tarafından yapılan basınç dayanım sınıflaması Çizelge 7’de verilmiştir. Yapay mermer örneklerinin basınç dayanım sınıflaması bu çizelgeye göre yapılmıştır.

Çizelge 7. Örneklerin tek eksenli basınç direncine göre sınıflandırılması (Deer ve Miller, 1966).

Örnek Sınıfı	Tek Eksenli Basınç Direnci (MPa)
Çok düşük dayanımlı	<25
Düşük dayanımlı	25-50
Orta dayanımlı	50-100
Yüksek dayanımlı	100-200
Çok yüksek dayanımlı	>200

Tek eksenli basınç dayanımı deneyi TS 699 standardında tanımlanan yöntemle yapılmıştır. Deney de kullanılan numune ebadları 5x5x5 cm³ olup her seriden 3 adet örnek tek eksenli basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Deneye başlamadan önce örneklerin basınç uygulanacak olan yüzeylerinin boyutları kumpas ile ölçülmüş ve yük uygulanacak yüzey alanları hesaplanmıştır. Örneklerle tek eksenli basınç dayanımı presinde 0,5 kN/s lik yükleme hızı ile sabit yük uygulanmış, örnek kırıldığı andaki yükü kaydedilmiştir. Örneklerin basınç dayanım değerleri için Eşitlik 8 kullanılmıştır (TS 699).

$$f_b = \frac{P_k}{A} \text{ (MPa)} \quad (8)$$

Burada;

f_b : Örneğin tek eksenli basınç dayanımı, (MPa)

P_k : Kırılma anındaki maksimum yük, (kN)

A: Örneğin yük uygulanan yüzey alanı, (cm²)

Schmidt çekici sertlik indeksi tayini

Kayaçlarda ve betonda sertlik tayininde yaygın şekilde kullanılan Schmidt çekici sertliği örneklerin tek eksenli basınç dayanımlarının da dolaylı yoldan tayin edilmesinde başvurulmuş tahribatsız test metodudur. Örneklerin sertlikleri Schmidt çekici kullanılarak belirlenirken yüzey pürüzlülüğü ve nem içeriğine dikkat edilmesi gerekmektedir (Jaeger ve diğ., 2004).

Schmidt çekici deneyi ISRM 1978’de tanımlanan yöntem esas alınarak yapılmıştır. Deneyde 5x5x5cm³ ebatında her birimden 3 adet örnek kullanılmıştır. Deneyin yapıldığı örneğin yüzeyinin düzgün olmasına dikkat edilmiştir. Numunenin yüzeyine dik olacak şekilde çekiç ucu yerleştirilmiştir. Çekiç içinde bulunan yaydan ses geldiğinde sabitleme tuşuna basılıp geri sıçrama değeri bulunmuştur. Numuneler üzerinde 10 farklı noktadan ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler küçükten büyüğe doğru sıralanmış, en küçük 5 değer iptal edilmiş ve kalan en büyük 5 değer aritmetik ortalaması alınarak Schmidt çekici sertliği olarak kaydedilmiştir (ISRM, 1978).

Ultrasonik dalga hızı deneyi

Kaya ve beton gibi malzemelerde düşük maliyeti, hızlı ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle sıklıkla tercih edilen tahribatsız test yöntemlerinden biri olan ultrasonik dalga hızı deneyi, madencilik faaliyetleri, doğalgaz ve petrol arama çalışmalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ultrasonik dalgalar yayılım açısından üç farklı dalga çeşidine sahiptir. En yaygın kullanılan dalga boyları P-dalgası ve S-dalgasıdır (Kesimal ve Yılmaz, 2016).

Yapay mermer örnekleri içerisindeki çatlak, boşluk oranı hakkında fikir vermesi amacıyla uygulanan ultrasonik dalga hızı deneyi; ISRM 1978’de tanımlanan yöntemle göre uygulanmıştır. Deneyde 3 adet örnek ve PROCEQ marka ultrasonik ses hızı tayin cihazı kullanılmıştır. Enine ve boyuna dalga hızlarının belirlenmesi için alıcı ve verici başlıkları ile örnek arasına jel sürülerek numune başlığın yüzeyine tam temas etme-

si sağlanmıştır. Gönderilen P dalgasının örnekten geçiş süresi ölçülerek başlangıç zamanı 0 (sıfır) olarak alınmıştır.

Örnekten geçen P dalgasının örneğin bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçiş zamanı ölçülerek dalga hızı Eşitlik 9 'a göre belirlenmiştir (ISRM, 1978).

$$V_p = \frac{L}{T_p} \quad (9)$$

Burada;

V_p : P dalgasının yayılma hızı, (m/s)

L : Sinyalin katettiği mesafe, (mm)

T_p : P dalgasının etkin ilerleme hızı, (μ s)

Çizelge 8'de P dalga hızına göre malzemelerin sınıflama sistemi verilmiştir

Çizelge 8. P dalga hızına göre malzemelerin sınıflaması (Anonim, 1979).

Örnek Sınıfı	Dalga Hızı (m/s)	Tanımlama
1	<2500	Çok düşük hız
2	2500-3500	Düşük hız
3	3500-4000	Orta hız
4	4000-5000	Yüksek hız
5	>5000	Çok yüksek hız

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Hazırlanan yapay mermer örneklerinin birim hacim ağırlığı (doğal, doygun, kuru), su emme değerleri (ağırlıkça, hacimce), porozite değerleri Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9. *Seramik atığı ile hazırlanan yapay mermer örneklerinin birim hacim ağırlığı (doğal-doygun-kuru), su emme (ağırlıkça ve hacimce) ve porozite değerleri.*

Boyut	Doğal Birim Hacim Ağırlık ($\text{kN}\backslash\text{m}^3$)	Doygun Birim Hacim Ağırlık ($\text{kN}\backslash\text{m}^3$)	Kuru Birim Hacim Ağırlık ($\text{kN}\backslash\text{m}^3$)	Su Emme (Ağırlıkça) (%)	Su Emme (Hacimce) (%)	Porozite (%)
150 μm	17,83 $\pm$ 0,09	17,84 $\pm$ 0,09	17,83 $\pm$ 0,09	0,07 $\pm$ 0,032	0,13 $\pm$ 0,057	0,13 $\pm$ 0,05
300 μm	17,87 $\pm$ 0,02	17,87 $\pm$ 0,02	17,86 $\pm$ 0,03	0,05 $\pm$ 0,007	0,10 $\pm$ 0,012	0,10 $\pm$ 0,01
600 μm	17,53 $\pm$ 0,03	17,55 $\pm$ 0,02	17,53 $\pm$ 0,04	0,12 $\pm$ 0,075	0,22 $\pm$ 0,134	0,22 $\pm$ 0,13
Karışım	18,05 $\pm$ 0,06	18,06 $\pm$ 0,06	18,05 $\pm$ 0,06	0,04 $\pm$ 0,006	0,09 $\pm$ 0,011	0,09 $\pm$ 0,01

Çizelge 9 incelendiğinde örneklerin birim hacim ağırlığı değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Örneklerde en yüksek birim hacim ağırlığı değerleri karışım tane boyutlu örneklerde elde edilmiştir. Yapay mermer örneklerinin su emme değerlerinin oldukça düşük olduğu ve örnek bünyesinde yer alan porozite değerleri ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir.

Yapay mermer örneklerinin porozite değerleri Tarhan’ın (1989) sınıflandırılması olan Çizelge 6’ya göre değerlendirildiğinde örneklerin “Çok kompakt” sınıfında yer aldığı görülmektedir. Karışım numunelerinde ince tane boyutlu malzemenin iri tane boyutlu malzemenin boşluklarını doldurduğu, bu nedenle malzemenin daha kompakt bir yapı kazandığı anlaşılmaktadır. Tane boyutu daha ince olan malzeme polyester reçine ile karıştırıldığında malzemenin vizkozitesi azaldığı için kalıplama işlemi sırasında titreşimle giderilmeyen büyük gözeneklerin oluştuğu düşünülmektedir. Örneklerin Schmidt sertlikleri, Vp dalga hızları ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri Çizelge 10’da verilmiştir.

Çizelge 10. Örneklerin Schmidt çekici sertliği, Ultrasonik Dalga Hızı ve Tek Eksenli Basınç Dayanımı Değerleri

Boyut	Schmidt Çekici Sertliği	Ultrasonik dalga hızı (Vp) değeri (km/s)	Tek eksenli basınç dayanımı değerleri (MPa)
150 µm	39,6	3,33±0,02	50,16±16,70
300 µm	41,6	3,27±0,04	32,01±16,45
600 µm	40,8	3,24±0,01	15,35±0,23
Karışım	40	3,33±0,04	62,95±9,15

Çizelge 10’da verilen örneklerin Schmidt çekici sertlikleri incelendiğinde sertlik değerlerinin genel olarak birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durumda tane boyutu değişimi sertliği çok fazla etkilememiştir sonucu çıkarılabilir.

Çizelge 10 incelendiğinde örneklerin ultrasonik dalga hızı değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu ve Anonim (1979) P dalgası sınıflandırılmasının yapıldığı Çizelge 8’e göre değerlendirildiğinde seramik atık katkılı yapay mermer örneklerinin “düşük hızlı” olduğu görülmektedir. Yapay mermer örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri Deer ve Miller (19669 sınıflandırmasına göre değerlendirildiğinde 150 µm boyutlu ve karışım örneklerinin “orta dirençli”, 300 µm boyutlu örneklerinin “düşük dirençli”, 600 µm boyutlu örneklerinin “çok düşük dirençli” olduğu görülmektedir. Tane boyutu artıkça dayanım genel anlamda düşmüştür çünkü polyester reçine büyük tanelerin arasını dolduramamıştır. Polyester reçine miktarı arttırılırsa dayanımında artacağı düşünülmektedir. Ayrıca yapay mermer örneklerinin üretiminde uygulanan titreşim işlemi boşlukların giderimini tam olarak sağlayamamış olabilmektedir. Titreşim işlemine ek olarak yapılacak presleme işlemi ile daha kompakt yapıların elde edilmesi mümkün olabilecek, neticede numunelerin dayanımı artacaktır.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Seramik atıklarının farklı boyutlara öğütülüp sınıflandırılması ve bağlayıcı olarak polyester reçine ile karıştırılarak kullanılması ile elde edilen yapay mermer örneklerinin temel fiziksel-mekanik özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada şu sonuçlar elde edilmiştir; farklı tane boyutlu atık malzeme ile hazırlanan yapay mermer örneklerinin birim hacim ağırlığı değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur. Porozite değerlerinin de oldukça düşük elde edildiği örnekler “çok kompakt malzeme” grubuna girmektedir. Su emme değerleri de porozite değerlerinin düşük çıkmasına bağlı olarak düşük elde edilmiştir. Örneklerin hazırlandığı malzemenin tane boyutu arttıkça basınç dayanımı değerleri azalmış ama karışım tane boyutundan elde edilen örnekte iri taneler ince tanelerin arasını doldurarak daha sıkı bir yapının oluşmasını sağlamış bu durumda daha yüksek basınç dayanımı değerlerinin elde edilmesine yol açmıştır.

Atıkların yarattığı çevre kirliliği, depolama alanlarının kısıtlı oluşu ve bu durumun yaratmış olduğu problemler global anlamda önemli bir konudur. Söz konusu bu atıkların değerlendirilme olanaklarının araştırılarak yeniden kullanım olanaklarının bulunması; hem doğal hammadde kaynaklarının kullanılarak tükenmesini azaltacak, hem de çevresel kirliliği zaltmış olacaktır. Atıkların geri dönüşüme tabi tutulmasıyla birlikte hammadde temininde iktisadi bir tutum gerçekleşecek, doğanın dengesi- nin bozulması engellenecektir.

Teşekkür

Bu çalışmayı FYL-2021-2464 nolu proje ile maddi açıdan destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- Anonim (1979).** Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1-rock and soil materials. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 19, 364-371
- Deere D.V., & Miller R.L. (1966).** *Engineering classification and index properties of intact rock*. Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana. 90-101.
- Demir, B.G., & Güngör, N. (2013).** Mermer madenciligi ve çevre. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 20, 7-14.
- Evren, Ö. (2018).** Atık mermer parçalarından cam elyaf katkılı yapay mermer bloklarının üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Muğla.
- ISRM (1978).** Suggested methods for determination of schmidt rebound hardness. *International Journal of Rock Mechanic and Mining Science and Geomechanic Abstracts*, 15(3), 101-102.
- ISRM (1978).** Suggested Methods for Determining Sound Velocity, *International Journal Of Rock Mechanic and Mining Science and Geomechanic Abstract*, 15 53-58.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., & Zimmerman, R.W. (2004)** *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4th Edition, London: Chapman and Hall.
- Kesimal, A., & Yılmaz, T. (2016).** *Ultrasonik p- dalga hızı deneyi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü Kayamekaniği Laboratuvarı, Trabzon
- Yüçetürk, G. (2010).** *Göller bölgesindeki kayaların mineralojik petrografik özelliklerinin yapay mermer kalitesine etkileri*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Köse, H., & Kahraman, B. (2009).** *Kaya Mekaniği*(4. Baskı), İzmir.
- Tahran, F. (1989).** *Mühendislik Jeolojisi Prensipleri*. Trabzon: KTÜ Yayınları
- Tok, H. (2018).** *Farklı oranlarda polyester reçine \ mermer tozu karışımıyla elde edilen kompozit malzemenin jeomekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.
- TS 699 (1987).** *Tabii Yapı Taşları - Muayene ve Deney Metotları*. Ankara: TSE.
- Yüçetürk, G. (2010).** *Göller bölgesindeki kayaların mineralojik petrografik özelliklerinin yapay mermer kalitesine etkileri*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.



**REAKTİF SİLİS İÇERİKLİ AGREGALARDA
ALKALİ AGREGA REAKSİYONUN OLUŞMASINI
SAĞLAYAN FAKTÖRLER VE TESPİT EDİLME
YÖNTEMLERİ**

Demet DEMİR ŞAHİN¹, Hasan EKER²

1 Dr. Öğr. Üyesi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Turkey, E-mail: demetsahin@gumushane.edu.tr ORCID: 0000-0003-0338-6562 demetsahin@gumushane.edu.tr

2 Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Turkey E-mail: hasaneker@karabuk.edu.tr ORCID: 0000-0003-2644-4681

Beton, inşaat sektöründe en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olup, dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü ile ön plana çıkmaktadır. Ancak, betonun performansını ve dayanıklılığını olumsuz etkileyen bazı kimyasal reaksiyonlar bulunmaktadır. Bu reaksiyonlardan biri olan alkali-agrega reaksiyonu (AAR), beton içindeki alkaliler ile reaktif agregalar arasında gerçekleşerek genleşme ve çatlaklara yol açmaktadır. Bu durum, betonarme yapıların servis ömrünü kısaltmakta ve ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Farny & Kosmatka, 1997; Ramyar, Topal & Andıç, 2005).

Alkali-agrega reaksiyonlarının anlaşılması ve kontrol altına alınması, inşaat mühendisliği alanında önemli bir araştırma konusu olmuştur. Literatürde, özellikle çimentonun alkali miktarının bu reaksiyonlar üzerindeki etkisi, çeşitli deneysel çalışmalarla ele alınmıştır (Diamond, 1997; Andıç, 2002). Çimento alkali miktarının artırılmasıyla genleşme oranının arttığı, ancak bu artışın agrega türüne bağlı olarak değişkenlik gösterdiği bilinmektedir (Ramyar et al., 2005). Bu çalışma, farklı çimento alkali miktarlarının beton içindeki genleşme üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla tasarlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, alkali-agrega reaksiyonlarının önlenmesine yönelik alınacak önlemlerin belirlenmesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

1. Alkali Agregası Reaksiyonunun Oluşmasını Sağlayan Faktörler

1.1. Agregası Karışım Oranlarının etkisi

Bir betonda karışım oranlarının değiştirilmesi ile ASR oluşturmaları ve reaksiyona bağlı genleşmenin oluşum etkisi değerlendirilmektedir. Reaktif agreganın betonda kullanılması ve karışımında kullanım oranının değiştirilmesi agregayı içerik ve hidroksil iyon bileşimi bakımından değiştirebilir. Betonda karışım oranları, reaktif alkali/silis oranını 3.5 ile 5.5 olduğunda genleşme oluşturma düzeyi maksimum seviyelerdedir. Reaksiyon oluşumunda karışım oranı etkili olmakta ancak farklı faktörlerin etkisi ile bir araya geldiğinde genleşme mekanizmasına ayrı katkısı bulunmaktadır. Numunelerin saklama koşulları su altında olduğu zaman su/çimento oranı genleşme durumunu etkilerken, su altında saklanması mümkün olmayan örneklerde su buharının difüzyon hızına bağlı olarak reaksiyon oluşturmaktadır (Ramyar vd., 2005; Andıç, 2002).

1.2. Alkali İçeriğinin Etkisi

Alkali silika reaksiyonunun oluşumuna neden olan alkali bileşenler sodyum, potasyum ve hidroksil iyonudur. Bu iyonlar betonun boşluk çözeltilisinde olan fazlalığı ve reaktif silikle bir araya gelerek reaksiyonu mey-

dana getirmektedir. İfade edilen alkali bileşenlerin farklı kaynaklardan geldiği bilinmektedir. Bu kaynaklar;

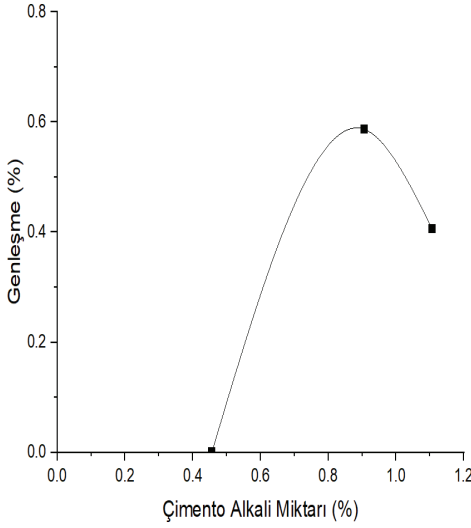
1-Alkali bileşenlerinin ana kaynağı çimento içerisindeki bileşenlerin hidratasyonu sonucu oluşmaktadır. Çimento içerisindeki alkali bileşenlerinin toplam değeri ASTM C 150'e göre % 0.6 olarak belirlenmiştir. Bu kadar düşük bir değerdeki alkali miktarı ile reaktif silisin bir araya gelmesi sonrasında ASR oluşmaktadır.

3-Çimento yerine kullanılan bağlayıcı bileşenler örneğin, uçucu kül gibi malzemelerden gelen yüksek alkali içeriği.

Bazen ASR oluşmasını meydana getiren bileşenler değil de agreganın farklı yapısal özelliklerinden kaynaklı reaksiyon oluşmasına neden olmaktadır. Agregaya kaynaklı faktörler olarak, agregaya kafes yapısı ASR oluşumuna neden olan önemli etkilere biridir (SHRP, 2003.).

Beton oluşturan bileşenlerden gelen alkali miktarı fazla olması ve agregaya özelliklerine göre ASR oluşmaktadır. Bu etkiler reaksiyon oluşumuna neden olan içsel faktörlerdir. Ancak dış faktörler etkisi ile beton bünyesine giren ve reaksiyon oluşumuna neden alkalilerde bulunmaktadır. Bu dış faktörler kışın yoğun kar ile mücadelede kullanılan tuz (NACI), endüstriden kaynaklı atık sular, betonun kürlenmesinde kullanılan kür suyu ve deniz suyu.

Bu faktörler geçirimli özelliğine sahip betonlar ile çatlak oluşumlarının gözlemlendiği yapılarda ASR sonrası genleşme olayını arttıran durumlardır (Bayhan, 2006). Şekil 1'de alkali miktarı çimento içerisinde yaklaşık olarak % 0,5'den % 0,9'a çıkarılması genleşmenin artmasına neden olmaktadır (Woods, 1968).



Şekil 1. Çimento içerisinde bulunan alkali bileşenlerin genleşme üzerine etkisi

ASR için beton bileşiminde yer alan çimento içerisindeki alkali miktarına dikkat edilmektedir. Bazen çimentodan kaynaklı alkali miktarı azaltılsa da ASR oluşmaktadır. Çünkü çimento kaynaklı alkali miktarı azaltılsa da beton bileşiminde bulunan fazla alkali içerisi reaksiyon oluşumuna neden olmaktadır. Bu yüzden betonu oluşturan tüm bileşenlerin tek tek alkali miktarı hesaplanarak reaksiyona girmesi sonucu toplam alkali miktarı hesaplanır. Bu hesaplama Denklem 9'da verilmiştir.

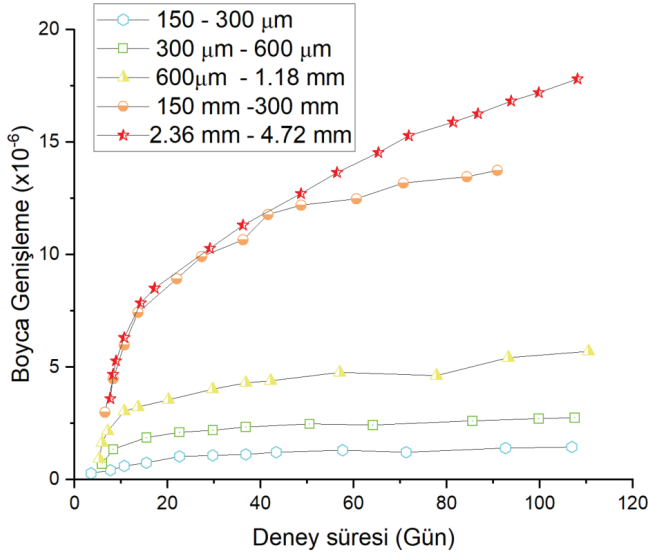
$$[M_{\text{çimento}} (\text{kg/m}^3) \times \text{Çimentonun Na}_2\text{O Eşdeğeri } \% \text{ si}] = 1\text{m}^3 \text{ Betondaki Alkali Miktarı } (\text{kg/m}^3) \quad (2) \quad (\text{Denklem 9})$$

ASTM C 150'de Na_2O eşdeğeri %'si 0.60'dan az olması alkali içerikli düşük çimento olarak kabul edilmektedir. Betonda çimento içerisinde alkali miktarı düşük olması alkali silika getirmeyeceği anlamı taşımaz. Betonda nem ve suyun bulunduğu alanlarda reaksiyon oluştuğu gözlemlenmiştir (Akman, 2002).

1.3. Reaktif Agregası Cinsi ve Tane Büyüklüğünün Etkisi

Alkali silika reaksiyonunun oluşumuna neden olan agregayı oluşturan reaktif silis formudur. Reaktif özelliğe sahip agregaların kristal yapıları ve dokuları birbirinden farklıdır. Bu farklılık reaktivite derecesini etkilemektedir. Oluşum sürecinde reaktif agregası amorf, kristal, kriptokristal, mikrokristal gibi farklı yapıları vardır. Kristal yapı etkisinin yanında kuvars gibi minerallerde içsel gerilmeler etkisi altında reaktif özellik kazanmaktadır.

Agreganın reaktif olması içyapısının yanında, boyutu, fiziksel ve mineralojik özelliği ve gözenek yapısı etkilidir. Agregatane boyutunun reaksiyon üzerinde en önemli etkisi reaktif olan parçacıkların boyutu azaldıkça harç çubuklarında genleşme miktarlarının artmıştır. Ancak 20 μm 'nın altına parçacık boyutunun düşmesi ile genleşmede değerlerinde aynı oranlarda artış olmadığı görülmüştür (Şekil 2). Agregat boyutu büyüdükçe genleşme oluşumu gecikmektedir. İnce agregat beton içerisinde ilk aşamalarda genleşme oluşturduğu ileri zamanda etkilemediği göstermektedir. İri agregat ise genleşmeler yavaş ancak uzun süre etkili olduğu belirlenmiştir. Agregat boyutunun genleşme üzerinde çimento/agregat oranı maksimum genleşme değerini vermektedir. Agregat boyutunu tek boyut olarak kullanmak genleşmeyi azaltmada etkili bir yöntemdir (Andiç, 2007; Katayama, 2000).



Şekil 2. Boyutları farklı reaktif agregaların boyca genleşme üzerine etkisi (Hobbs and Gutteridge, 1979.)

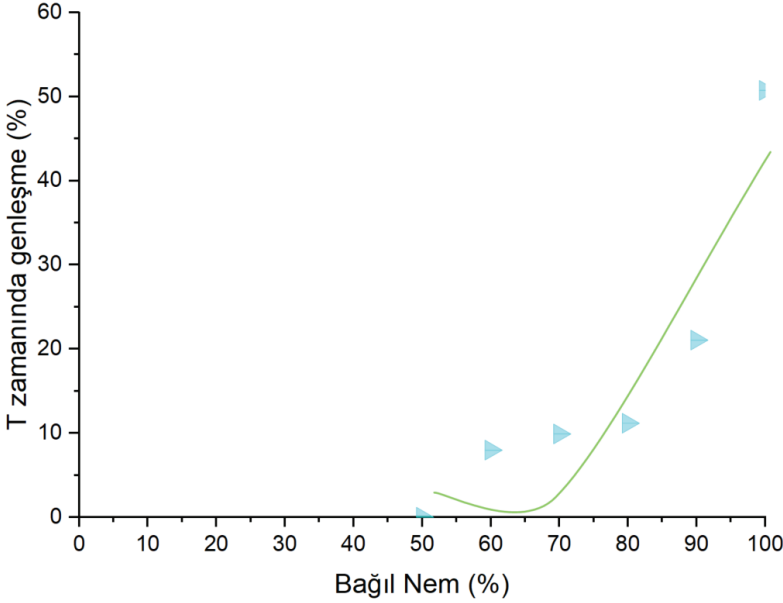
1.4. Dış Faktör Kaynaklı Alkalilerin Etkisi

Beton bileşiminde yer alan alkaliler çimento içerisinde bulunan Na ve K bileşikleridir. Bunun yanında betona çimento yerine kullanılan mineral katkılardan da gelmektedir. Ancak bu alkali bileşenleri iç kaynaklı olup birde beton bileşimine sonradan dahil olan dış kaynaklı alkaliler yer almaktadır. Dış kaynaklı beton bileşimine katılan alkaliler kışın kar

ile mücadele sırasında kullanılan NaCl (tuz), betonun kürlenirken içerisine giren ve endüstriyel alanlarda atık sular, deniz suyu gibi etkililerdir. Genel olarak iç ve dış kaynaklı alkali bileşenlerinin beton içerisinde standartlarda bulunan sınır değer üzerinde değerler alması ASR oluşumuna ve hasarlara neden olmaktadır. Dış kaynaklı alkalilerin varlığı çatlaklı betonlarda betonun içerisine nüfuz ederek genleşmelerin artmasını sağlamaktadır (Arslan, 2001; Bayhan, 2006). Deniz suyu gibi dış alkali kaynağı betonda C_3A ve porlandit bileşiklerinin NaCl ile reaksiyona girmesi sonucunda açığa çıkan OH^- bileşiminin artmasına neden olmaktadır (SHRP, 2003). Dış alkali kaynaklarını azaltmak ya da farklı yöntemler kullanmak bazen etkili olurken bazen etkili olmamaktadır. Etkili olabilmesi için betonun geçirimsiz olması gerek. Geçirimsiz beton üretimi ise ancak çimento yerine çimento ile birlikte mineral katkıların kullanımı ile mümkün olmaktadır. Bu sayede daha geçirimsiz beton oluşmakta ve dış alkalilerin betona girmesini engellemektedir. Beton bileşiminde su/çimento oranının düşürülmeside daha sıkı ve dayanıklı bir beton oluşturmaya ve alkali geçişlerini sınırlandırmaktadır. Betonun dış etkilere daha az etkilenmesi için kaplama yapılması ve sızdırmazlık önlemlerinin alınması, deniz suyunun ve buzu çözen çözeltilerin beton içerisine geçişini engellenmelidir. Beton yapılarında belirtilen yöntemlerin ya da önlemlerin alınması etkili olsa da bu etki köprü, viyadük gibi sanat yapıları ve yürüyüş yollarını oluşturan betonlar için pratikte bir çözüm yolu şeklinde değerlendirilmemektedir (Tordoff, 1990).

1.5. Rutubet Durumunun Etkisi

ASR oluşumunu sağlayan en etkili faktörlerden biri % 80 ve üzeri nemin bulunmasıdır. Beton içerisinde nem reaksiyon oluşturan alkalileri reaksiyon bölgesine taşıması ve ASR sonrasında su emme kabiliyeti ile genleşmenin oluşturduğu hasarlara neden olan basınç ve çekme gerilmelerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Şayet beton boşluk çözeltilerinde nemin yetersiz ya da bulunmaması diğer ASR oluşumuna neden olan bileşiklerin olmasına rağmen oluşmadığı gözlemlenmiştir (Swamy, 1992.) (Şekil 3)



Şekil 3. Nem etkisi ile ASR genleşme değişimi (Poole, 1992)

ASR sonrasında oluşan jel kuru çevresel alanlarda da oluşabilmekte ancak hasar ve genleşme oluşturması için ek suya ihtiyaç duyulmaktadır. Ortamda yağmur, deniz suyu ya da yeraltı suyunun bulunması oluşabilecek hasar düzeyini arttırırken bağıl nem < %75'ten küçük olması hasar oluşturmamaya ve güvenli sınır olarak kabul edilmektedir. Suya maruz kalmış beton yapılarında örneğin, temeller, barajlar ve zemin kaplama alanlarında suya maruz kalmaları ASR oluşturması açısından kaçınılmaz yapılardır (Kalmış vd., 2013)

1.6. Sıcaklık Değişiminin Etkisi

Dış etkiler sonrasında sıcaklık faktörü ASR oluşturmaya neden olmaktadır. Sıcaklık arttıkça özellikle ASR oluşumunu hızlandırmaktadır. Bazı agregalar örneğin flint gibi reaktivite oluşturması normal ortam sıcaklığında mümkün değilken yüksek sıcaklığa maruz kalması sonrasında jel oluşumuna neden olmaktadır. Jelin su emme durumu sıcaklık artışına bağlı olarak değişmekte olup su alarak şişen jel genleşme ve ardından mikro çatlak yapılarını oluşturmaktadır. Bu yapılar betona hasar vermektedir (Swamy, 1992; Diamond vd., 1981). Yüksek sıcaklık reaksiyon oluşumu hızlanırken düşük sıcaklıklarda da reaksiyon hızı düşmekte ve oluşabilecek hasarlar azalmaktadır. Düşük sıcaklığın reaksiyon üzerinde etkisi, alkali bileşenlerin reaksiyon alanına taşınmasını yavaşlat-

maktadır. ASR sonrası oluşan jeli genleşme oluşturmaları için belli bir su içeriğine sahip olması gerekirken düşük sıcaklıkta jel sıvı formda olup oluşturduğu basınç değeri düşüktür. Genleşme meydana getiren basıncın daha uzun sürede oluşmasına neden olmaktadır (Swamy, 1992).

1.7. Sürüklenmiş Havanın Etkisi

Beton içerisinde reaktif özellik gösteren agrega kullanımı ve çaplı ortalama 50 µm, hava kabarcıkları aralığı 200-250 µm olması beton içerisindeki buzun genleşme oluşturmalarını engellemektedir (Arslan, 2001). Jelin hava boşluklarını doldurması ve hava sürükleyici katkı kullanımı ASR sonrasında oluşabilecek hasarların azalmasına katkı sağlamaktadır (Andiç, 2002; SHRP, 2003).

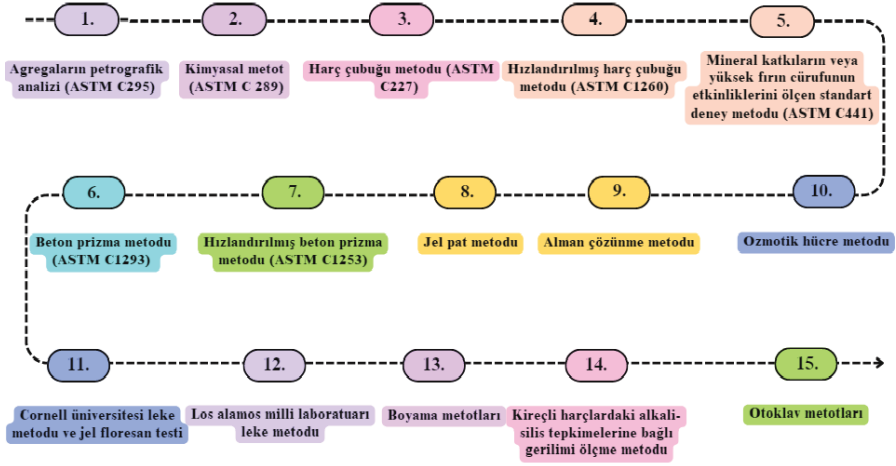
2-Reaktif Silislerden Oluşan Agregaların ASR’u Meydana Geldikten Sonra Tespit Etme Yöntemleri

Agreganın bileşiminde bulunan silis farklı hızlarda reaksiyon oluşturabilir. Reaksiyon sonrasında meydana gelen değişimler farklılık gösterebilir. Farklı ortamlarda ASR’nunu belirleme yöntemleri sonrasında paralel sonuçlar elde edildiği gibi zıt sonuçlarda elde edilebilir. Günümüz koşulları ile ASR belirleme metotları aşağıda belirtildiği gibi (Şekil 4);

1. ASTM C295 Göre Agregaların Petrografik Analizi
2. ASTM C 289 Göre Kimyasal Metot,
3. ASTM C227 Göre Harç Çubuğu Metodu,
4. ASTM C1260vGöre Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu,
5. ASTM C441 Göre Mineral Katkıların veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu,
6. ASTM C1293 Göre Beton Prizma Metodu,
7. ASTM C1253vGöre Hızlandırılmış Beton Prizma Metodu,
8. Jel Pat Metodu,
9. Alman Çözünme Metodu,
10. Ozmotik Hücre Metodu,
11. Cornell Üniversitesi Leke Metodu ve Jel Floresan Testi,
12. Los Alamos Milli Laboratuvarı Leke Metodu,
13. Boyama Metotları,

14. Kireçli Harçlardaki Alkali-Silis Tepkimelerine Bağlı Gerilimi Ölçme Metodu,
15. Otoklav Metotları.

ASR Belirleme Metotları



Şekil 4. ASR belirleme metodu

3. Agrega Üzerine Uygulanan Deneyler

ASR tespitinde agrega bileşiminden yola çıkarak belirlenirken öncelikle, agreganın bileşimi ve reaktif olma durumu, agrega ve çimentonun bir araya geldiğinde reaksiyon oluşturma durumu, oluşabilecek çevresel koşullar sonrasında meydana gelebilecek genleşme dikkate alınmaktadır. Bu deneylerde agreganın boyotunun küçültülmesi, yüksek sıcaklığa maruz bırakılması, basınçlı kür uygulanması çevresel olarak etkilemekte olup ASR oluşumunu hızlandırmaktadır. Reaksiyon sonrasında çimentodan gelen alkali ya da dışardan eklenen alkaliler ile reaksiyon oluşmasına neden olmaktadır (Jones and Tarleton, 1958; Diamond, 1997). Oluşan reaksiyon yavaş ve uzun bir süre sonra meydana gelebileceğinden farklı yöntemlerin etkisi ile hızlandırılmaktadır. Böylece ileride oluşabilecek zararlar ve tedbirler belirlenmektedir. Reaksiyonun oluşum sürecini hızlandırmak için (Thomas and Innğs, 1999).

1. Agregadaki reaktif silis ile reaksiyona girecek alkali miktarını arttırmak,
2. Reaksiyon oluşturabilecek reaktif silis miktarını arttırmak,
3. Normal oda sıcaklıklarından daha yüksek sıcaklık değerleri kullanmak.

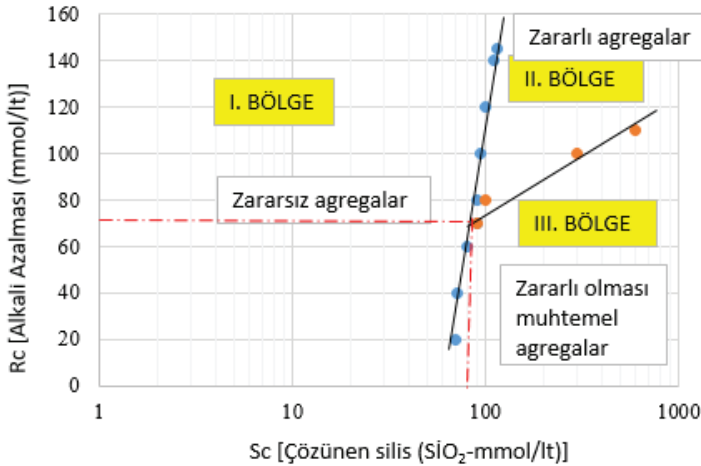
3.1. Petrografik Yöntemle Belirlenme (ASTM C295)

Agreganın petrografik yapısı incelenirken Amerikan standartlarında ASTM C295, “Agregaların Petrografik Analizi için Standart”, İngiliz Standartlarında BS 812-104 ve BS 6100-5.2 yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde agregaların mineral bileşimi belirlenmektedir. Ayrıca agregaların alkali reaktivitesi için RILEM TC-191-ARP yöntemine kullanılmaktadır. Bu yöntemde agregalar ile ince kesit örnekleri hazırlanarak polarize ışık altında petrografik mikroskopla gözlemlenmektedir. Değerlendirmenin uzman petrograflarla yapılması ile ASR sonucunda meydana gelen değişim ya da alterasyonlar tespit edilir (Swamy, 1992). Petrografik mikroskop yanında geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ve tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak agregayı incelemek mümkündür. Mikroskop altında farklı yöntemlerle incelenen agregayı tamamen temsil edilmesi gerekmekte olup küçük örneklerle çalışılmaktadır. Çalışma sonrasında agreganın beton için zarar verici özelliğe sahip olup olmadığı değerlendirilemez (Farny ve Kosmatka, 1997). Petrografik değerlendirme ile agrega mikro ve makro ölçekte değerlendirilebilir. Makro ölçekte yapılan incelemede agregalar benzer kayaç grupları altında gruplandırılır. Mikroskobik inceleme detay ve zaman alıcı olması daha az örneğin incelenmesi ve karar verilmesi ile elde edilmektedir. İngiliz Karayolları Şartnamesinde (Specification for Highway Works) alkali-silis oluşumu istenmeyen fazların belirlenmesi ile reaksiyon oluşumu kontrol altına alınmaktadır. Kaba ve İnce tane yapısına sahip agregalarda % 95 ve üzeri reaktif özellik göstermeyen opal, tridimit ve kristobalit gibi minerallerin miktarı toplamda % 2’den daha fazla çört, flint veya kalsedon bulundurmadığı süreçte zararsız olarak kabul edilmiştir. Pesimum oranı olduğu durumlarda, çört veya flint içeriği kütlece % 60’dan fazla olması ve silis içerikli mineraller bulundurmaması durumunda zararsız olarak değerlendirilmektedir. Kuvars ise kuvarsit gibi minerallerde kütlece %30’dan fazla miktarda metamorfizma geçirmiş kuvars içermemelidir (Swamy, 1992). Petrografik yöntem sayesinde agreganın mineralojik bileşimi ve agrega içinde bulunma oranı tespit edilmektedir.

Agregaların farklı fiziksel özellikleri (reaktif parçacık miktarı, yoğunluk, hacim, porozite, agrega pürüzlülük durumu ve şekil yapısı) gibi çevresel faktörlerden etkilenmesi ASR hasar tespitinde önemli baz alınan özellikler arasında yer almaktadır. Farklı petrografik metotların kullanılması ile agregalar farklı yönleri ile değerlendirilmeye olanak sağlamaktadır. Mesela, AAR-1 ismiyle önerilen “Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates-Petrographic yöntem, sayesinde agregaları; çok uzak-Sınıf I alkali reaktivite göstermekten, Sınıf II alkali reaktivitesi belirsiz, Sınıf III alkali reaktivitesi gösterebilir şekilde bir sınıflandırma yapmıştır. Ancak bu yöntemin tek başına değil destekleyici diğer yöntemlerle beraber kullanılmasını önerilmiştir. (Sims ve Nixon, 2003).

3.2. Kimyasal Analiz Yöntemi ile Belirleme (ASTM C289)

Kimyasal olarak kullanılan yöntem ASTM C 289 standardına göre yapılmaktadır. Standartta silis içerikli agregaların reaktif olup olmama durumu belirlenmektedir. Bu standart dışında farklı ülkelerde Ağırlık kaybı metodu (Almanya), Jel pat metoduda (İngiltere), Ozmotik hücre deneyi (Amerika), Kimyasal büzülme metodu (Danimarka), kimyasal yöntem olarak kullanılmaktadır. ASTM C 289 standardında küçük boyuta düşürülen agregalar elenmesi durumunda 25 g ağırlığında 3 adet örnek oluşturulur. Bu malzeme alkalın çözeltisinde (1N NaOH çözeltisinde) reaksiyona girmesi sağlanır ve 24 saat zaman diliminde agrega içinde bulunan silis ile çözelti içerisindeki alkali değerinin düşürülmesi sağlanır. Şekil 5’de yer alan veriler sütuna işlenerek agrega durumu hakkında bilgi verir.



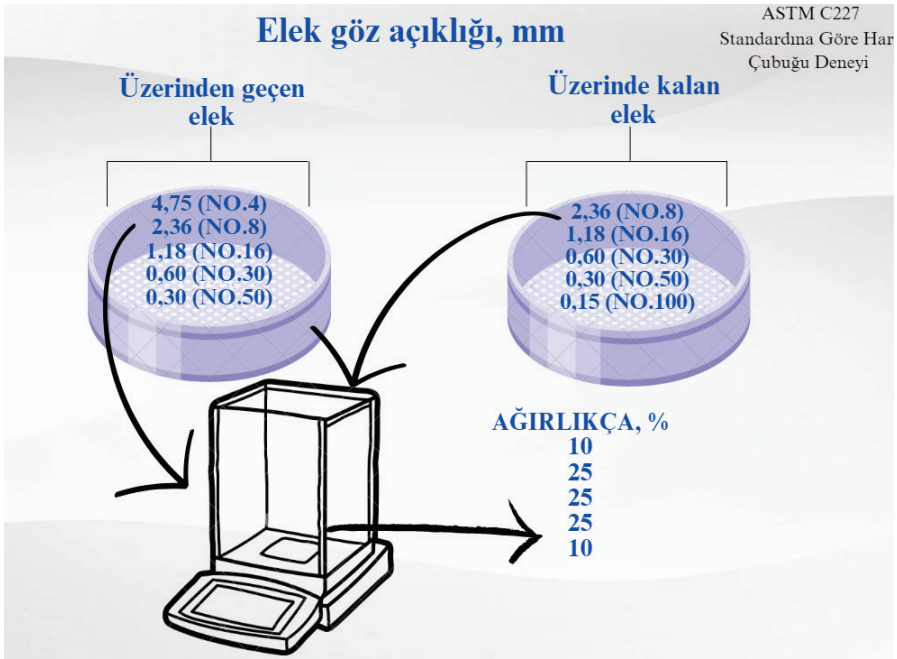
Şekil 5. ASTM C289'a göre Sc (çözünen silis)-Rc (Alkalinite azaltma)

Grafikte yer alan bölgelerin çakıştığı kısma geldiğinde agreganın durumu değerlendirilmektedir. Agreganın reaksiyon hızı bu yöntemin kullanılması için önemli olup hızlı reaktif özellik gösteren agregalarda iyi performanslar verirken yavaş reaktif özellik gösterenler için farklı yöntemlerle birlikte kullanılması önerilmektedir (Farny ve Kosmatka, 1997; Stark, 1993; ACI Committee 221, 1989).

3.3. ASTM C227 ve ASTM C1260 Standartlarına Göre Harç Çubuğu Üzerlerine Yapılan Deneyler

3.3.1. ASTM C227 Standardına Göre Harç Çubuğu Deneyi

ASTM C227 ve ASTM C1260 standartlarına göre her ikisi için kullanılan malzeme miktarları, numune boyutları ve karışım oranları aynı olarak belirtilmektedir. Hazırlanan numuneler için kullanılan agregalar 8-16, 16-30, 30-50 ve 50-100'nolu elek serilerinden elenerek 25x25x285 mm boyutlarında numuneler üretilmektedir (Ramyer vd., 2002) (Şekil 6).



Şekil 6. Agregalar elek boyutları ve oranları

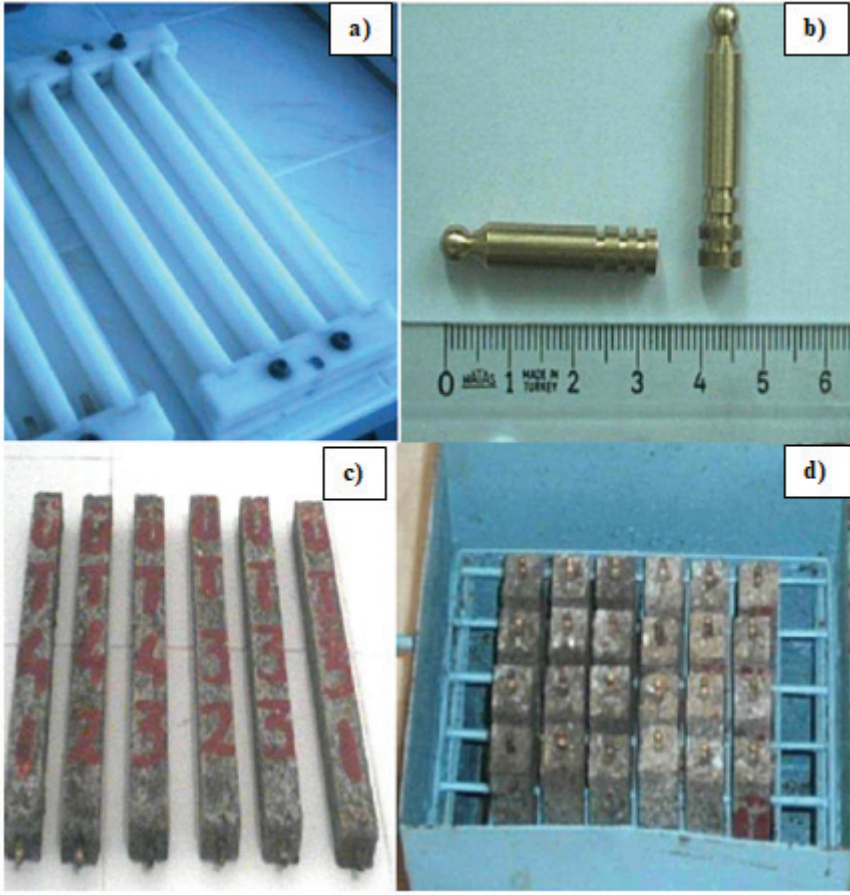
Şekil 3’de verilen elek boyutlarına ve kullanılan ağırlıkça %’lik değerine göre agregaların miktarı Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 4’e göre hazır-

lanan harç karışımına ait su/çimento oranı, çimento miktarı ve agrega farklılığına göre kullanım miktarları verilmiştir.



Şekil 7. Agregalarla hazırlanan karışım miktarı

ASR oluşumu için hazırlanan reçete sonrasında Şekil 8’de deneyin yapılışı ve aşamaları yer almaktadır.



Şekil 8. ASTM C227 Standardına göre harç çubuğu deney düzeneği (a) Numune kalıplarının hazırlanması, b) numune boy ölçümlemeleri için kullanılan pimler, c) numunelerin hazırlanması, d) numunelerin ölçüm gününe kadar hazırlanan sulu çözeltide bekletilmesi)

Şekil 9’da ASTM C227 Standardına göre harç çubuğu ile 3 bölmeli kalıplara yerleştirilen numuneler % 90 nem ve 23 ± 1 °C’e sıcaklıkta 1 gün bekletilmektedir. Boy ölçümü yapılan numuneler içerisinde yarıya kadar su bir kap içerisine yerleştirilir ve örnekler ile temas etmeyecek şekilde nemli kalması sağlanır. Numuneler kap içerisinde $37,8 \pm 1,7$ °C (100 ± 3 °F)’de ısı sabit tutulmak şekliyle etüve içerisine yerleştirilir. 16 saat sonunda etüvden çıkarılarak $23 \pm 1,7$ °C ($73,4 \pm 3$ °F)’de soğuması için kür odasında bekletilir. Numuneler için 14. gün sonunda ilk boy ölçümü, sonraki ölçümler 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12. aylarda ve gerekmesi halinde 6 ayda bir uzunluklarda değişim değerleri ölçülerek bir yere not edilir (Şekil 10).



Şekil 10. ASTM C227 Standardına göre boy ölçüm düzeneği

Şekil 6'da elde edilen veriler ile aşağıda yer alan denklemde hesaplama sonrasında birim boy uzama değerleri belirlenmektedir (Denklem 1).

Eşitlikte;

$$L = \left(\frac{\Delta L}{L} \right) \times 100$$

Denklem 8

%L = Boy değişimin yüzde ifade edilmesi,

ΔL = Örneğe ait boyunda meydana gelen değişimi değeri (mm),

L = Örneğe ait ölçülen ilk uzunluk (mm),

Olarak gösterilen ifadeler.

Yapılan hesaplamalar ASTM C 227'ye göre 12. ay sonunda boy değişimindeki verilerin % 0,1 genleşme sınırını aşması ile kullanılan agrega alkali silika yönünden zararlı olarak kabul edilmektedir. Test süresinin tercih edilmeme nedeni sonuçların uzun süre sonra elde edilmesi ve karbonat bileşimli agrega için genleşme sergilememektedir.

3.3.2. ASTM C1260 Standardına Göre Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi

ASTM C1260 Standardına göre hızlandırılmış harç çubuğu deneyi için gerekli olan malzemeler su/çimento oranı 0.47 olarak belirlenmektedir. Hazırlanan karışımlar ile 25×25×285 mm boyutlarındaki deney numuneleri elde edilmekte olup 1 gün sonrasında numunelerin ilk boyları ölçülebilmektedir. Harç çubukları ASTM C-227’de belirtilen şartlara tabi tutularak oluşturulmaktadır. Kalıptan çıkan numuneler 1 gün 80°C suda saklanması ile boy ölçümü yapılmaktadır. 14 gün boyunca 80°C 1 N NaOH çözeltisine bırakılarak belli aralıklarla ölçüm yapılır. Deneyi sonlandırmak için 16 gün beklenilir ve elde edilen % genleşme değerleri aşağıda standartta belirtilen değerlere göre kıyaslanır.

ASTM C1260 standardı agreganın reaktivitesini belirlemekte olup agrega-çimento arasındaki bağ davranışını dikkate almamaktadır. Bu standardın tercih edilme nedeni agreganın kısa süreli bir zaman diliminde genleşme durumu hakkında bilgi verir. Deney ASTM C 227’ye göre hazırlanan numunelerin yüksek sıcaklık altında boylarında olan değişimleri belirlemek için kullanılır (Farny ve Kosmatka, 1997). 16 gün sonrasında değişen kür şartlarında agreganın reaktivitesi incelenmektedir. Ölçüm sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda yer alan maddelere göre

1. Genleşme değeri % 0.10 değerinin altında ise 16. gün sonundaki agrega zararsız davranış gösteriyor demektir.

2. Genleşme değeri % 0.20 değerinin üstünde ise 16. gün sonundaki agregalar potansiyel olarak zararlı genleşme gösterir.

3. Genleşme değeri % 0.10-% 0.20 değerleri arasında ise 16. gün sonundaki şantiye koşullarında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir.

Deney sonrasında elde edilen değerlerin doğruluğunun kesinleştirilmesi için ek deneyler yapılarak desteklenmesi ve genleşmenin nedenlerini belirlemek için 28 güne kadar deney devam ettirilmelidir. Bu standarda göre yapılan deney sayesinde reaktivitesini belirlenmede zorluk yaşanan agregalarda ya da yavaş genleşme gösteren agregalarda ASR durumunu belirlemede kolaylık sağlamaktadır. Bu durumdan dolayı agregaların reddilmesine karar verildikten sonra oluşan olasılığa dikkat edilmesi önemlidir. Deneyin ASR ölçümü için kullanılma nedeni, sonucun elde edilme süreci kısa ve kullanım pratikliği sağlamasından ötürü tercih edilmektedir (Grattan-Bellew, 1989).

3.4. ASR Belirlemek için Otoklav Metot

Alkali silika reaksiyonunun tespit edilmesi için farklı koşullar ve boyutlar kullanılarak reaktivite durumu değerlendirilmiştir. Örneğin, yüksek sıcaklık ve basınç, alkali ya da su çözeltisine maruz bırakmak, suda kaynatmak gibi farklı koşullar kapsamaktadır. Bu metod hızlı sonuç almak için kullanılmasına rağmen, en güvenilir ASR sonucunu hızlandırılmış harç çubuğu metodundan elde edilmektedir (Ramyar vd., 2005). Otoklav yöntemde su/çimento oranı 0.5 olarak ve alkali miktarı karışım suyuna sodyum hidroksit eklenerek sodyum eşdeğerini % 3.5 arttıran ASTM C227'ye göre hazırlanan harç örnekleri üzerine uygulanmaktadır. Bu yöntemde numuneler iki gün boyunca 23 °C'de, % 100 nemli olan bir ortamda bekletilerek hazırlanmaktadır. 0.17 MPa basınç altında 130 °C'de beş saat tutulmuş ve boy ölçüm değerleri ölçülmektedir (Fournier vd., 1991; Shayan vd.1994).

3.5. Betonda ASR Belirlemede Uygulanan Yöntemler

3.5.1. Beton Prizma Testi (ASTM C 1293)

ASTM C-1293 standardına göre betonda oluşan hasarlar betonun hizmet süresini azaltmaya, durabilitesini düşürmeye ve maliyetinin yükselmesine neden olmaktadır. ASR'nuna bağlı beton kayıplarını engellemek için 75×75×285 mm boyutlarında hazırlanan beton prizmatik çubukların genleşme değeri ölçülmüştür. Bu yöntemin diğer yöntemlerden ayıran fark hazırlanan prizmatik numune boyutu ve sodyum hidroksit miktarıdır. Bu yöntem ince agregalar kullanıldığında doğru sonuçlar vermediğinden hem ince hem de iri agregaya beraber test uygulanmaktadır. Bu iki boyuta sahip agregadan biri reaktif özellik taşıması gerekmektedir. Deneyde kullanılan agrega özellikle yüksek reaktif olma özelliğine sahip olup birde alkali arttırıcı sodyum hidroksit kullanılması sonuçlarda dalgalanmalara neden olmaktadır. Bir yılın sonunda elde edilen değerler % 0,04 veya daha fazla ise agrega zararlı olarak kabul edilmektedir.

3.5.2. ASTM C1253'e Göre Hızlandırılmış Beton Prizma Deneyi

Bu deney yöntemi ASTM C 1253'e göre beton numunelerinin ASR değerlendirmek için yapılmaktadır. 40×40×160 mm boyutunda beton prizmaları oluşturulmaktadır. Hazırlanan numunelerde kullanılan malzemeler 420 kg/m³ çimento, alkalitesi yüksek agrega (% 60 kum) ve alkali bulundurmayan bir nolu micir % 40, S/Ç oranı 0,45 ve 0,65 saf karışım suyu elde edilen numuneler üzerine deneyler yapılmaktadır. Nemi % 100 olan 90 günlük kür süresi sonunda 60 °C sıcaklıkta % 0,04'ü aşmaması durumunda mineral katkıları ASR'nunu önlemektedir (Grosbois ve Fontaine, 2000).

SONUÇLAR

Bu çalışmada, çimento alkali miktarının betonun genleşme özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çimento alkali miktarının artışıyla genleşme oranının belirgin bir şekilde yükseldiğini ortaya koymuştur. Özellikle 0,45% ve 0,90% alkali içeriğine sahip çimentolar arasında genleşme farkı sınırlı kalırken, 1,10% alkali içeriği ile genleşmede önemli bir artış gözlenmiştir. Bu durum, yüksek alkali içeriğinin alkali-agrega reaksiyonlarını tetiklediğini ve genleşmeyi hızlandırdığını göstermektedir.

Sonuçlar, agrega türlerinin ve çimento alkali miktarlarının beton performansı üzerindeki kritik rolünü bir kez daha vurgulamaktadır (Ramyar et al., 2005; Farny & Kosmatka, 1997). Bu bağlamda, düşük alkali içeriğine sahip çimentoların kullanılması, alkali-agrega reaksiyonlarının kontrol altına alınmasında etkili bir strateji olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, genleşme oranlarının azaltılmasına yönelik mineral katkıları ve alternatif agrega türlerinin araştırılması, gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir alan sunmaktadır.

Bu bulgular, betonun uzun ömürlülüğünü artırmaya yönelik tasarım kriterlerinin geliştirilmesi açısından değerli bilgiler sağlamaktadır. İleriye dönük olarak, saha uygulamalarına dayalı geniş çaplı çalışmalar, laboratuvar ortamında elde edilen bulguların doğrulanması ve genelleştirilmesi için gereklidir.

KAYNAKLAR

1. Aggregate React. (n.d.). London: Concrete Society Publications, CS, 782–789.
2. Akman, M. S. (2002). Çimentolar içindeki çözünen alkalilerin miktar ve türlerinin beton ve harç özelliklerine etkileri. *Çimento ve Beton Dünyası*.
3. Andiç, Ö. (2002). Alkali-silis reaksiyonunun mineral ve kimyasal katkılar yardımı ile kontrol altına alınması. *Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir*.
4. Andiç Çakır, Ö. (2007). Alkali-agrega reaktivitesinin tespitinde kullanılan deney metodlarının incelenmesi. *Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 252 sayfa, İzmir*.
5. Arslan, M. (2001). Beton (Dökümü, Kalıpları, Kusurları ve Dayanıklılığı). *Atlas Yayınevi*.
6. ASTM C295. (2003). Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete *ASTM B. Standard, Vol. 04.02*.
7. ASTM C295-98. *Guide for petrographic examination of concrete aggregates*.
8. ASTM C289-02. Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (*chemical method*).
9. ASTM C1293. (1994). Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. *American Society for Testing and Materials*.
10. BS 812-104:1994. *Testing aggregates: Method for qualitative and quantitative petrographic examination of aggregates*.
11. BS 6100-5.2. (1992). *Glossary of building and civil engineering terms: Masonry. Stone*.
12. Bayhan, B. (2006). Deprem hasarlarının bir bileşeni olarak alkali silika reaksiyonları. T.C. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, *Yüksek Lisans Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, İstanbul*.
13. Diamond, S., Barneyback, R. S. Jr. ve Struble, L. J. (1981). On the physics and chemistry of alkali silica reactions. In *Proceedings of the Fifth Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (pp. 1–11).
14. Diamond, S. (1997). Alkali-silica reactions: Some paradoxes. *Cement and Concrete Composites, 19*, 391–401.
15. (Ed.). *Concrete aggregate reaction*. Noyes Publications, New Jersey, 509 p.
16. Eker, H., Demir Şahin, D., Çullu, M. (2023). Effect of reduced fineness of fly ash used on the alkali-silica reaction (ASR) of concrete. *Springer Science and Business*. <https://dx.doi.org/10.1007/s40996-023-01090-1>.
17. Farny, J. A. ve Kosmatka, S. H. (1997). Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete. *Concrete Information*, Portland Cement Association.
18. Fournier, B., Berube, M. A. ve Bergeron, G. (1991). A rapid autoclave mortar bar method to determine the potential alkali silica reactivity of

- St. Lawrence Lowlands carbonate aggregates (Quebec, Canada). *Cement, Concrete and Aggregates*, 13(1).
19. Grattan-Bellew, P. E. (1989). Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregates. In Okada, K., Nishibayashi, S., & Kawamura, M. (Eds.), *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction* (pp. 279–294). Kyoto, Japan.
 20. Grosbois, M. ve Fontaine, E. (2000). Evaluation of the potential alkali-reactivity of concrete aggregates: Performance of testing methods and a producer's point of view. In *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction* (pp. 267–276), Quebec, 1406 p.
 21. Hobbs, D. W. ve Gutteridge, W. A. (1979). Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction. *Magazine of Concrete Research*.
 22. Jones, F. E. Ve Tarleton, R. D. (1958). Reactions between aggregates and cement. *National Building Research Paper*, 25 Pt VI, HMSO, London, 20 p.
 23. Kalmış, M., Güngör, N. ve Eribol, S. (2013). Betonda alkali-agrega reaksiyonunun teşhis ve kontrolü. *T.C. Karayolları Kurs Programı*.
 24. Katayama, T. (2000). Alkali aggregate reaction in the vicinity of İzmir, Western Turkey. In Berube, M. A., Fournier, B. ve Durand, B. (Eds.), *Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Quebec, QC, (pp. 365–374), Canada.
 25. Ramyar, K., Dönmez, H. ve Andiç, Ö. (2002). Alkali silis reaksiyonunun mineral ve kimyasal katkılar yardımı ile kontrol altına alınması. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento ve Beton Araştırma-Geliştirme Enstitüsü*, Ankara.
 26. Ramyar, K., Topal, A., Andiç, Ö. (2005). Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 35, 2165–2169.
 27. Shayan, A., Ivanusec, I. ve Diggins, R. (1994). Suitability of two rapid test methods for determining the alkali reactivity of sands. *Cement and Concrete Composites*, 16, 177–188.
 28. SHRP. (2003). Alkali silica reactivity library handbook for identification ASR. Retrieved from <http://leadstates.tamu.edu/asr/>.
 29. Sims, I. ve Nixon, P. (2003). RILEM recommended test method AAR-1: Detection of potential alkali reactivity of aggregates—Petrographic method. *Materials and Structures*, 36, 480–496.
 30. Stark, D., Morgan, B., Okamoto, P., Diamond, S. (1993). Eliminating or minimizing alkali-silica reactivity. *Strategic Highway Research Program, SHRP-P-343*, Washington, DC.
 31. Swamy, R. N. (Ed.). (1992). The alkali-silica reaction in concrete. *Glasgow/ New York: Blackie/Van Nostrand Reinhold*.
 32. Şahin Demir., D., Çavuşoğlu, İ. ve Yılmaz, A. O. (2023). Evaluation of pozzolanic activity of two different types of C and F fly ashes with fineness factor. *Journal of Mining and Environment*. <https://dx.doi.org/10.22044/jme.2023.12795.2324>.

33. Tordoff, M. A. (1990). Assessment of prestressed concrete bridges suffering from alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites*.
34. Woods, H. (1968). Durability of concrete construction. *Detroit, Michigan: American Concrete Institute*.
35. Thomas, M. D. A. ve Inngs, F. A. (1998). Use of the accelerated mortar bar test for evaluating the efficiency of mineral admixtures for controlling expansion due to alkali-silica reaction. *Cement, Concrete and Aggregates*, 21(2), 157-164.



SU KAYNAKLARINDA VE SU HİZMETLERİNDE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUM

Cengiz KOÇ¹

¹ Prof. Dr., Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü Muğla / Türkiye, cengizko9@gmail.com

1. Giriş

İçilebilir suya, sanıstasyona ve sulama suyuna erişim, özellikle Orta Asya ve Afrika'nın geniş yarı kurak bölgelerinde, gelişmekte olan dünyada ciddi bir sorun olmakla birlikte nüfus artışı ve iklim değışikliğinin mevcut yetersiz dağıtım sistemlerini ve işlevsiz yönetim kurumlarını daha da kötüleştirmesi beklenmektedir. Milenyum Kalkınma Hedefleri (MKH) çok iddialı hedefler belirlemiştir. Çağdaş su yönetiminin ilkeleri ve uygulamaları, iyi bilinen gelişmiş dünyadaki teknolojik ilerlemelere, kurumsal ayrıcalıklara ve kamu tercihlerine yeterince uyum sağlamıştır. Ancak, su kaynaklarının mevcudiyeti ile ihtiyaçlar arasındaki uçurum gelişmekte olan dünyada kaçınılmaz bir şekilde büyümektedir. Bu durum, su yöneticilerinin başarısızlığı mı, yeterli yatırımın olmaması veya yeni teknolojileri benimsemedeki başarısızlık mı, yoksa daha temel düzeyde bir başarısızlık mı; kurumların ve çözümleri uygulamak ve bu yatırımları akıllıca yönetmek için teknik kapasitenin başarısızlığı mı? Sorularını ortaya çıkarmaktadır. Son dönem literatürlerinde, Hükümetler arası İklim Değişikliği Panelinin (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) (Bates vd., 2008) raporları gibi tutarlı bir hikaye örgüsü bulunmaktadır. Mevcut su yönetimi uygulamaları, iklim değışikliğinin su temini güvenilirliği, taşkın riski, sağlık, tarım, enerji ve su sistemleri üzerindeki etkileriyle başa çıkmak için yeterince güçlü olmayabilir. Sorun, yeterince güçlü olmayanın, su yönetimi mi, yoksa su yöneticilerinin faaliyet gösterdiği sosyo-politik kurumlar mı? olduğudur.

Dördüncü IPPC'nin (2007) öngörülerine dayanarak, su kaynaklarının iklimdeki değışikliklerden en çok etkilenen sektörler arasında olacağı mantıklıdır. İklim değışikliği, nüfus artışı ve ciddi ekonomik koşullarla bir araya geldiğinde, gelişmekte olan ülkelerin sürdürülebilir kalkınmasından söz etmeye gerek kalmadan, MKH'ne ulaşmada yaşadıkları zorlukları daha da kötüleştiren oldukça belirsiz ve değışken bir faktörü oluşturmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma yoluna girmek için öncelikle yoksulluktan çıkılmalıdır. Yaygın yoksulluk, belki de sistematik adaptasyonun önündeki en büyük engeldir. Yüksek nüfus artışı ve küresel ekonomik bozulmaların endemik yoksullukla bir araya gelmesi, üstesinden gelinmesi olağanüstü zor bir dizi engel oluşturmaktadır. Su ve sanıstasyon konusunda MKH'ne ulaşmak için 16 Sahra Altı Afrika ülkesinin durumunu ortaya koyan yakın tarihli bir rapor (World Bank, 2006), bu ülkelerin yalnızca mevcut nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için ne kadar ileri gitmeleri gerektiğini açıkça göstermektedir. Küresel ısınmayla ilişkilendirilen iklim değışikliği, bu zorluklara yalnızca eklenmektedir. Uyarlanabilir yönetimin temel prensipleriyle gelişen su kaynakları yönetimi, önemli iklim değışkenliğinin riskine ve belirsizliğine uyum sağlama, kırılganlığı azaltma, sistem dayanıklılığını ve sağlamlığını artırma ve

suyla ilgili hizmetlerin güvenilir bir şekilde sunulmasını sağlamak için farklı birleşimlerden oluşan çeşitli araçlar kullanmaktadır. Bu araçlar, birçok teknolojik yenilik, mühendislik tasarım değişiklikleri, çok amaçlı havza planlaması, kamu katılımı, düzenleyici, finansal ve politika teşviklerinden oluşmaktadır. Ancak, oldukça karmaşık, dağınık ve pahalı yönetim önlemlerinin bu geniş dizisini etkili bir şekilde yönetmek için iyi işleyen kurumlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, merkezi yönetim sorununu ele almak, iklim değişikliğine uyum sağlamayı amaçlayan herhangi bir stratejinin temel unsurudur. Entegre Su Kaynakları Yönetimi (ESKY), sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için yönetim çerçevesidir. Yönetim ve ESKY, sabit su kaynakları temelinde çok sektörlü talepler arasındaki rekabeti çözenin temel araçlarıdır. Her sektör (çevre, su temini, sanitasyon, tarım, hidroelektrik, navigasyon/ulaşım) kendi yönetim ilkeleri, kuralları ve teşvikler setini oluşturur, ancak bunlar genellikle birbirleriyle çelişir (Koç, 2017).

Bu nedenle, temel sorun su kaynakları yönetiminin ayrılmaz bir parçası olan adaptasyonun gerçekleşip gerçekleşmemesi değil, ne zaman ve nasıl daha etkili bir şekilde adapte olmamız gerektiğidir. Bu sorulara yalnızca adaptasyon önlemlerinin masrafları ve faydaları, herhangi bir stratejik planlama girişiminde yer alan riskler ve belirsizlikler ve yakın gelecekte araştırma ve geliştirmeye yapılan yatırımlarla devreye alınabilecek yenilikçi teknolojilerin varlığı dikkate alınarak cevap verilebilir. Günümüzde suyun yanlış tahsis edilmesi, israf edilmesi ve yanlış fiyatlandırılması nedeniyle birçok sorun yaşanmaktadır. Bu sorunlar, su yönetiminin tüm yönlerinde yavaş ama istikrarlı bir şekilde düzeltilmektedir. Mevcut su yönetim sistemlerindeki eksiklikler, değişen koşullara teknik olarak uygulanabilir çözümlerin uyarlanamamasıyla karıştırılmamalıdır. Tüm su yönetim seçeneklerinin mevcudiyeti, göreceli etkinliği ve teknik uygulanabilirliği çok iyi bilinmektedir. Bunun nedeni, su kaynakları yöneticilerinin yaklaşık 50 yıldır projelerinin ve sistemlerinin ekonomik ve finansal analizlerini yürütmeleridir. Sonuç olarak, başarı herhangi bir ülkenin mevcut yönetim kaynaklarının geniş yelpazesini uyarlama kapasitesine bağlıdır.

Çeşitli adaptasyon önlemlerinin teknik olarak uygulanabilirliği ile iyi bilinen, kabul görmüş ve nispeten geleneksel su yönetim uygulamalarını gerçekleştirme kapasitesi arasındaki ayrımı yapamama, toplumların iklim değişikliğinin sosyo-ekonomik sonuçlarına karşı göreceli duyarlılığı hakkındaki tartışmada kafa karışıklığına yol açmaktadır. Diğer yandan, su zengini bölgelerde yer alan gelişmekte olan ülkeler, sürekli kıtlıkla karşı karşıya kalan kurak veya yarı kurak bölgelerdeki ülkelere göre hızlı nüfus artışından kaynaklanan artan su taleplerini karşılamak için geleneksel su temini önlemlerini uygulamada daha fazla zorluk çekmekte-

dir. Sulama için bir su dağıtım sistemine sahip olan çoğu ülkede, tarıma giden suyun yüzde 10'unun azaltılması, 2025 yılına kadar şehirlerin ve endüstrinin artan taleplerini karşılayacaktır. Bu tür su dağıtım sistemlerinin doğal olarak mevcut yüzey suyu arzının bolluğu nedeniyle yeterince geliştirilemediği ülkelerde, su kirliliği, artan talepler ve kötü yönetim uygulamaları nedeniyle duyarlılıkları artabilir.

İklim değişikliği olmasa bile birçok gelişmekte olan ülke, teknik kapasite, ekonomik kaynak ve sosyo-politik istikrar eksikliği nedeniyle artan nüfuslarının su kaynakları ihtiyaçlarını karşılayamamaktadır. Açıkçası, dikkatimizi gelişmekte olan dünyada dört temel kategoriye giren stratejilere odaklanmalıyız. Bunlar; (IPCC, 2007).

1. İklim değişkenliği ve değişiminin isteklerine dayanacak gerekli tamponlama kapasitesini, sağlamlığı ve dayanıklılığı sağlayacak büyük ölçekli su altyapısı geliştirmek;

2. Uygun teknolojileri kullanarak köyler ve uzak kırsal alanlar için 'küçük güzeldir' (ve ucuz) stratejilerine odaklanmak;

3. Her düzeyde teknik ve kurumsal yönetim kapasitelerini artırmaya yoğunlaşmak;

4. Nüfus artışıyla aynı hızda ilerleyecek ve başa çıkma stratejilerine yardımcı olmak için ekstra bir dayanıklılık derecesi sağlayacak teknolojik yenilikleri geliştirmeye ve aktarmaya odaklanmaya devam etmek;

Su ve İklim Diyalogundan (Kabat vd., 2003) ve ardından Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC, 2007) raporundan bu yana, sera gazlarını azaltma çabalarının ne kadar etkili olabileceğinden bağımsız olarak çeşitli su kaynakları yönetim sektörlerinin en azından öngörülen iklim değişikliği etkileriyle ilişkili beklenen olumsuz değişikliklerle başa çıkmak için hazırlık girişimlerinde bulunmaları gerektiği konusunda tavır ve farkındalıkta büyük bir değişiklik oldu. World Bank (Dünya Bankası) (2008) ve U.S. Army Corps of Engineers (Amerika Birleşik Devletleri Kara Kuvvetleri Mühendisler Birliği) (2007) gibi etkili kurumlar, artan iklim değişkenliğine ve potansiyel değişikliklere uyum sağlama açısından mevcut altyapılarını ve bekleyen yatırımlarını gözden geçirmek için önemli programlar başlatmıştır. Bu kurumlar, Hollanda ve Japonya gibi diğer birçok ülke ve UNESCO, FAO ve UNDP gibi Avrupa Birliği (AB) ve Birleşmiş Milletler (BM) kuruluşlarıyla birlikte, kendi kurumları, müşteri kuruluşları ve bakanlıkları için teknik tavsiyelerde bulunmak ve dünyanın geri kalanı için kapasite oluşturma temeli sağlamak için koordineli bir çaba içindedir.

Taşkın, kuraklık ve altyapı arızaları gibi büyük felaketlerin tutum ve performansta politik ve teknik değişiklikleri katalize etmesi ve yeni nesil yaklaşımlar için platform görevi görmesi sıklıkla görülen bir durumdur. İklim değişikliği, kuraklık gibi ‘gizlice ilerleyen’, yavaş yavaş gelişen bir olgu olduğu için eylemleri katalize etmeye hizmet etmeyecektir. Bu nedenle, U.S. Army Corps of Engineers (2007), iklim değişikliğine uyumun birçok savunucusu tarafından benimsenen ‘pişmanlık yok’ felsefesine benzer, faydacı bir ‘proaktif uyarlanabilir yönetim’ yaklaşımı benimsedi ve bu yaklaşım aşağıdaki unsurlardan oluşmakta olup; Bunlar;

- İklim belirsizliklerini hesaba katmak için risk tabanlı planlama ve altyapı tasarımı;
- Altyapı için yeni nesil risk tabanlı tasarım standartlarının geliştirilmesi; aşırı olaylara (taşkınlar ve kuraklıklar) yanıt verme;
- Yaşlanan altyapının yaşam döngüsü yönetimi;
- Su altyapısının kırılganlık değerlendirmesi;
- İşletme ve bakım sırasında altyapının artan denetimleri, gözetimi ve düzenlenmesi;
- İklim değişikliği ve değişkenliğine yönelik artan araştırma ve geliştirme;
- İyileştirilmiş rezervuar ve acil durum işletmeleri için iyileştirilmiş tahmin yöntemleri geliştirme;
- İklim değişikliğine uyum sağlamak için ortak işlemler ve uygulamalı araştırmalar geliştirmek üzere kurumlar arası iş birliğini güçlendirme;
- Tüm Kolordu projeleri için acil durum yönetimi ve hazırlık planlarını güçlendirme ve yerel toplulukların planlarını ve katılımlarını yükseltmelerine yardımcı olma;

World Bank (2008) İklim Değişikliği ve Kalkınma Stratejik Çerçevesi, suyu iklim değişikliğinden en önemli şekilde etkilenen sektör olarak kabul etmektedir. Her Banka bölgesinin; hızlanan buzul erimesi, değişen yağış, akış ve yeniden doldurma kalıpları ve oranları, aşırı taşkınlar ve kuraklıklar, su kalitesindeki değişiklikler, kıyı akiferlerine tuzlu su girişi ve su kullanımlarındaki değişiklikler gibi etkilerden kaynaklanan bir dizi suyla ilgili iklim değişikliği zorluğuyla karşılaşması muhtemeldir. İklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerine yönelik potansiyel uyum stratejileri, müşteri ülkelerle su politikası reformları ve yatırım

programları üzerine diyalogun merkezinde yer almıştır. Mevcut durumda, devam eden bölgesel çabaları tamamlamak ve gelecekteki bölgesel girişimleri desteklemek amacıyla Dünya Bankası, İklim Değişikliği ve Su konusunda çok yıllık bir çaba üstlenmiştir. Ana amaç, bölgeleri iklim değişikliğine adaptasyon çalışma programlarına dâhil etmek için analitik, entelektüel ve stratejik yardım sağlamaktır. Çalışma, diğer sektörlerle ilgili bağlantıları ele alırken su ve suyla ilgili konulara ve yatırımlara odaklanmaktadır.

2. İklim Değişikliğinin Su Kullanılabilirliği Üzerindeki Etkisi

Su kullanılabilirliği, iklim değişikliği de dâhil olmak üzere meteorolojik ve iklimsel olaylara bağlı olan hidrolojik döngüye bağlıdır. Su, enerji, sanayi, tarım, ekonomi, çevre ve toplum genelinde çeşitli sektörler için gerekli olmasına karşın, bu kullanımlar küresel ısınmaya neden olan iklim üzerinde antropolojik etkiler yaratırlar. Bu etkiler, sıcaklık kayıtlarında artan eğilimler yaratmakta, dünyanın birçok yerinde yağış miktarlarında azalan eğilimler meydana getirmekte ve bunun sonucu olarak dünyanın birçok yerinde su kaynakları azalmaktadır. Dünya nüfusunun yarısından fazlası 2010 yılından sonra kasaba ve şehirlerde yaşadığı için arz ve talep miktarları, nüfus artışı ve kentleşmenin artan etkileriyle dengesiz hale gelmektedir (Şen, 2020). Bundan sonra gerekli önlemler alınmazsa, gelecekteki iklim etkileri aşağıdaki noktalar nedeniyle su kaynakları yönetimini daha sorunlu bir duruma getirebilir (Şen, 2020).

1) Özellikle, dünyanın subtropikal iklim kuşağında yağışın şiddeti, sıklık düzeni ve miktarı değişmek zorunda olacağı için modellerin gelecekteki öngörülerine dayanarak bundan sonraki adaptasyon için gerekli önlemler alınmalıdır (DelGenio vd., 1991; Loaciga vd., 1996; Trenberth 1999; Held ve Soden, 2000; Arnell vd., 2001; Huntington, 2006),

2) Önemli su kaynaklarına sahip herhangi bir bölgede, bir dizi senaryo ile birleştirilmiş Genel Atmosferik Okyanus Dolaşım Model'inin sonuçları bölgesel veya yerel ölçek bazında küçültülmelidir (ARCC, 2014). Pratik çalışmalarda bu tür modellerin sonuçları hakkında arka plan bilgisi olmayan su kaynakları uzmanları için temel öneri su yapısı tasarımlarını yaklaşık %15 zamansal yağış azalmasına dayandırmaktır,

3) Mekânsal (bölgesel veya yerel) yağış oluşumları da belirsizlik altında gerçekleşmekte, ancak özellikle kış mevsimlerinde dağlık yüksek rakımlı ve orta enlemli yerlerde artış beklenmektedir. Bu nedenle, yaz mevsimleri için su kaynakları iklim değişikliği ilkeleri uyarınca optimum yönetim uygulamalarını gerektirir,

4) Küresel ısınma etkisi sıcaklık, yağış, buharlaşma ve buharlaşma-terleme artışlarında ortaya çıkar, bu durum, yüzey suyu miktarını ve akışını azaltır ve sonuç olarak yüzey ve yeraltı suyu kaynaklarının yenilenebilirlik oranları belirli bir ölçüde azalabilir. İklim değişikliği etkisi altında su kaynakları yönetimi, çoğu buharlaşma suyu, barajından tercih edilen su teminini ve ayrıca yüzey suyunun mümkün olduğunca yeraltı suyu rezervuarlarına yeniden beslenmesini dikkate almalıdır,

5) İklim değişikliği bol miktarda su ile taşkın ve ani taşkınlara neden olmakta, bu su miktarları yüzey rezervuar barajlarına veya yeraltı suyu yeniden beslenmesine faydalı bir şekilde yönlendirilmelidir. Ayrıca, barajlar, seddeler, kanallar, bentler, hendekler, borular gibi mühendislik yapıları açısından gerekli önlemler alınmalıdır.

6) Küresel ısınmanın tropikal ve subtropikal iklim kuşaklarını Kutup Bölgelerine doğru kaydırması beklenmektedir. Bunun sonucu olarak, kuraklık ve kurak dönemlerin özellikle subtropikal bölgelerde artması kaçınılmazdır (O’Gorman, 2012; Vidal vd., 2012; Taylor vd., 2013). Yağışın azalması ve buharlaşmanın artması, şiddet, sıklık, süre ve mekânsal boyutta kuraklık potansiyelini tetikler. Kuraklıklar meteorolojik olaylar ile (yağış azalması) başlar, ardından hidrolojik ve tarımsal tipler gelir ve bunların hepsi birlikte toplumsal huzursuzluklara neden olur. Su mühendisliği, meteorolojik kuraklığın başlamasıyla harekete geçmeye hazır olmalı, hidrolojik kuraklığın sonuna doğru hidrolojik kuraklık ve tehlike uyarıları yapılmalı ve tarımsal kuraklığın etkileriyle iklim değişikliği bilincinin başlamasından önce yapılmalıdır. Meteorolojik kuraklığa insan müdahalesi olmamasına karşın, hidrolojik kuraklık durumu, tarımsal kuraklığın geciktirilebilmesi veya engellenebilmesi için dikkatli su kaynakları yönetimi ve idaresini gerektirmektedir.

7) İklim değişikliğine bağlı olarak su kaynakları yönetimi uygulamaları kurak ve yarı kurak bölgelerde nemli yerlere göre farklılık gösterir. Kurak ve yarı kurak bölgelerin yakınındaki alanlar çölleşmeye maruz kalır ve bu tür olaylar ağaçlandırma ve yeniden ormanlandırma çalışmaları ve uygulamaları gibi özel işlemlerle ele alınmalıdır,

8) Kar ve erimesi dünyanın birçok yerinde, özellikle yüksek dağlık rakımlarda ve orta enlemlerde su kaynakları için önemlidir (Shrestha ve Aryal, 2011). İklim değişikliği etkisi kar yağışında azalmaya neden olur ve küresel ısınma tarihsel vakalara göre daha erken erimeye neden olur. Bu olaylar, eriyen kar suyunu daha faydalı kullanımlar için tutmak ve yönetmek, bu tür etkilerle başa çıkmak için su kaynakları yönetiminin yeniden düzenlenmesini gerektirir. Özellikle, hidroelektrik üretiminin elverişli olduğu ülkelerde, elektrik üretiminde azalmalar olabilir,

9) Genel olarak küresel ısınma ve özellikle iklim değişikliği etkileri, doğal veya insan faaliyetleri nedeniyle su kalitesindeki değişiklikleri etkiler. Doğal türler hakkında en çok yazılanı deniz suyu seviyesindeki artış ve kıyı akiferlerine tuzlu su girişidir (Werner vd., 2012; Ferguson ve Gleeson, 2012). Yeraltı suyu akiferlerinin aşırı pompalanmasıyla, akiferlerin tabanındaki tuzlu veya tuzlu su, yukarı koni etkisi nedeniyle yükselir ve akiferdeki tatlı su katmanları tuzlu hale gelebilir. Diğer yandan, hava kirliliği nedeniyle asit yağmurları yüzey ve yeraltı suyu kaynaklarının kalitesini değiştirebilir. Bu tür olaylar, ekstra su arıtma tesisi çalışmaları nedeniyle su maliyetinin artmasına neden olur,

10) Su kaynakları etkileri arasında, su talebinin en yüksek olduğu şehirlerdeki sıcak hava dalgaları ve ısı adaları ile kıyı bölgelerinde erozyona ve tortulaşmaya neden olan deniz yüzey dalgaları yer almaktadır.

3. İklim Değişikliğinin Etkileri ve Adaptasyonları ile Karşılıklı İlişkiler

Su stresi çekilen bölgelerde hidroelektrik üretimindeki artış, hidroelektrik için kullanılan suyun mansapta ihtiyaç duyulan diğer su kullanım amaçları için yeniden kullanılmaması durumunda kuraklık riskini artırabilir. Özellikle, gelecekteki iklim koşulları altında membada yer alan hidroelektrik santrali ile akış aşağısındaki su kullanımı arasındaki bu denge, gelecekteki çalışmalarda ele alınması gereken bir konudur. İklim değişikliği nedeniyle artan kuraklık veya taşkın risklerine yönelik adaptasyon önlemlerinin hidroelektrik için rezervuar işletimi üzerindeki potansiyel etkisini açıklığa kavuşturmak önemlidir. Ayrıca, değişen iklim koşulları altında taşkın yönetimi, su temini ve enerji üretimi için optimum bir uzlaşmaya varılmış rezervuar işletim yönteminin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu, hidrolojik sistemlerdeki öngörülen değişiklikler altında yenilenebilir enerji üretiminin kısıtlamaları, uygulanabilirliği ve gerçekçi potansiyeli hakkında bilgi sağlayacaktır. Orta enlemlerde, güneş enerjisi sistemleri kurak yaz mevsimlerinde enerji üretmek için en yüksek potansiyele sahiptir. Potansiyellerini mümkün olduğunca gerçekleştirmek için toplam enerji üretimindeki değişkenliği yumuşatarak güneş enerjisi sistemlerini desteklemek için yeterli hidroelektrik sistemi kapasitesine ihtiyaç vardır. Ancak, hidroelektrik sistemleri güneş enerjisi sistemlerini tamamlayacak yeterli işlevi sağlayamayabilir, bu durumda, iklim değişikliği nedeniyle yazların daha kurak geçeceği tahmin edilen bölgelerde potansiyellerini sınırlayabilir. Hidrolojik değişikliklerin ve enerji karışımı seçeneklerinin etkinliğinin bu tür etkileşiminin ayrıntılı olarak araştırılması gerekir.

3.1 İklim değişikliği etkileri ve rezervuar sedimantasyonu arasındaki ilişki

Gelecekteki hidroelektrik potansiyeli de rezervuar sedimantasyonundan etkilenebilir. Çeşitli çalışmalar, iklim değişikliğinin rezervuar havzalarından gelen sediment verimini artırmada önemli bir faktör olduğunu göstermiştir (Mouris vd., 2023). Bu durum, rezervuarların depolama kapasitesinin azalmasını hızlandırabilir ve hidroelektrik, su temini ve taşkın kontrolü potansiyellerini kısıtlayabilir. Artan rezervuar sedimantasyonu, ayrıca ilave bir sera gazı emisyonu kaynağı haline gelebilir ve bu nedenle iklim değişikliğini azaltma çabalarını engelleyebilir. Barajlardaki sediment birikimi, sera gazı emisyonları için "bilinen bir sıcak noktadır". Barajlı nehir sıcak noktası alanlarından kaynaklanan sedimantasyon kaynaklı metan emisyonları küresel tatlı su emisyonlarını %7'ye kadar artırılabilir (Maeck vd., 2013). Ayrıca, dünya çapında yüksek miktarda organik karbon alan ve tutan ve bu nedenle atmosfere önemli miktarda metan salabilen milyonlarca küçük baraj bulunmaktadır. Su depolama ve dağıtım sistemlerinin iklim değişikliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmasına karşın, bunların etkileri ve mümkün olan en iyi çözümler hakkında kapsamlı küresel verilerin eksikliğinden söz etmek gerekir (Nohara, 2024).

Barajlar sadece nehirlerdeki suyu depolamak ile kalmaz aynı zamanda sedimentin dinamik, mansaba taşınmasını da kesintiye uğratarak rezervuarlarda birikmesine neden olur. Sedimantasyon esas olarak bir barajın coğrafyası ve memba havzasının koşulları ve süreçleri tarafından belirlenir. Sedimantasyon oranları bir barajın ömrü için kritik öneme sahip olup barajların depolama kapasitesi sediment biriktikçe zamanla azalır. Bazı kaynaklar, mevcut rezervuar sedimantasyon oranlarında, mevcut küresel rezervuar depolama kapasitesinin 2100 yılına kadar neredeyse yarıya inebileceğini tahmin etmektedir (Sumi vd., 2004). Sedimantasyon oranları nehir havzasının jeolojik ve fiziksel durumuna göre büyük ölçüde değişmektedir (Kondolf vd., 2014). Sonuç olarak, bazı barajlar yalnızca sedimantasyon nedeniyle diğerlerinden çok daha hızlı "yaşlanmaktadır". Sedimantasyon barajın ömrünün hızla sona ermesine yol açtığı için sedimantasyonla başa çıkmak, yüksek baraj bakım maliyetinin önemli bir bileşenidir. Çin, Avrupa, ABD, Nil Nehri havzası ve Japonya gibi bölgeler/ülkeler sorunun üstesinden gelmek için önemli etkiler yaşamakta ve yüksek maliyetlere katlanmaktadır (Wang ve Hu, 2009; Milligan, 2013; Kondolf vd., 2014; Albayrak vd., 2019; Hydro Review, 2020). Baraj güvenliği ve işlevlerini sürdürmek için bakımları genellikle barajlar yaşlandıkça giderek daha masraflı hale gelir. Barajların bakımı düzenli denetim ve onarım gerektirir. Bu durum hidroelektrik barajlarının işletme maliyetlerini 25-35 yaşına kadar önemli ölçüde artırılabilir (McCully, 1996). Bakım

ve ilişkili maliyetler kamu güvenliği ve uzun ömürlülük için zorunludur. Çoğu baraj arızasının, yeterli şekilde bakımları yapılmış ve düzenli olarak denetlenmişlerse önlenabilir olduğu düşünülmektedir (USSD, 2010). Bazı durumlarda, artan bakım maliyetleri ABD'de özel mülkiyete ait barajların terk edilmesine yol açarak arıza riski yaratmış ve daha da feci bir şekilde uyarı yapılmadan çökmelerine neden olmuştur (Alvi, 2018). Sahiplik baraj bakımı için önemli bir faktördür ve özellikle özel mülkiyete ait barajlar için zordur (Ho vd., 2017). Büyük barajlar ölçek sorunu yaratır, örneğin, içyapısal eksikliklerin belirlenmesi zor olabilir (Wieland, 2010). Bakım ve onarım maliyetleri eskiyen altyapı ile birlikte arttıkça, bu maliyetler baraj kaldırma maliyetinden 10-30 kat daha pahalı olabilir (Headwaters Economics, 2016; Grabowski vd., 2018; Graham, 2019; Massachusetts Government, 2019).

3.2 Hidroelektrik ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla iklim değişikliğinin azaltılması arasındaki ilişkiler

Slatyer (2023), belirttiği gibi, iklim değişikliğinin azaltılması önlemleri genellikle suya bağımlıdır. Güneş ve rüzgâr yaygınlaştıkça sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli yüksek ve en umut verici iki yenilenebilir enerji kaynağı olmasına karşın, faydaları hidroelektrik sistemlerinin güneş ve rüzgâr enerjisi güç üretimindeki dalgalanmaları absorbe etme kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle kısıtlanabilir. Hidroelektrik için kullanılan birçok rezervuar tek bir amaç için değil, taşkın kontrolü, sulama ve kent su temini gibi birden fazla amaç için işletilmektedir. Buna göre, gelecekteki hidroelektrik üretimi, değişen iklimdeki hidrolojik değişiklikler nedeniyle diğer su kullanımlarının ihtiyaçlarındaki değişikliklerden de etkilenmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji üretimiyle iklim değişikliğinin azaltılması önlemlerinin uygulanabilirliğini anlamak için hidroelektrik yerine su sistemleriyle olan bu karşılıklı bağımlılığa odaklanarak enerji üretiminin gelecekteki potansiyelini ayrıntılı olarak değerlendirmek önemlidir.

Yenilenebilir enerjinin artan kullanımı, iklim değişikliğinin azaltılması için antropojenik sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarının kaçınılmaz bir unsurudur. Hidroelektrik, dünyanın birçok yerinde enerji üretimi için yaygın olarak kullanılan geleneksel yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir (Nohara, 2024). Hidroelektrik, yalnızca kendisi yenilenebilir olduğu için değil, aynı zamanda güneş ve rüzgâr gibi iki büyük yenilenebilir enerji kaynağı olan değişken enerji kaynaklarından gelen güç arzındaki dalgalanmaları düzenlemede önemli bir rol oynadığı için de yenilenebilir enerji üretiminin önemli bir bileşenidir. Pompalı Depolama Hidroelektrik (PDH) dâhil olmak üzere rezervuar hidroelektrik sistemleri, diğer enerji kaynaklarından gelen enerji talebindeki veya

arzındaki saatlik değişikliklere yanıt olarak enerji üretim çıktısını esnek bir şekilde kolayca değiştirebilen birkaç güç üretim yönteminden biridir (Bayazıt vd., 2021).

Hidroelektrik, yenilenebilir enerji üretiminin önemli bir bileşeni olarak iklim değişikliğinin azaltılmasında önemli bir rol oynar. Ayrıca, temel olarak değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının neden olduğu güç kaynağı dalgalanmalarını emebilir. Ancak hidroelektrik, küresel ısınmadan kaynaklanan hidrolojik değişikliklerden etkilenir. Hidroelektrik enerji üretimi, diğer su yönetimi hedefleriyle olan karmaşık ilişkisi nedeniyle, bu tür değişiklikler tarafından doğrudan veya dolaylı olarak kısıtlanabilir. Bu karmaşık etkileşimlerin, iklim değişikliğinin azaltılması için yenilenebilir enerji üretiminin dağıtımını nasıl kısıtlayabileceğini anlamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Yoğun kar yağışı olan bölgelerdeki hidroelektrik üretimi, azalan kar yağışı, kar örtüsü ve kar erimesi ve kar erimesinin zamanlamasının değişmesi nedeniyle iklim değişikliğinden büyük ölçüde etkilenebilir (Kopytkovskiy vd., 2013). Kar süreçlerindeki bu değişiklikler, rezervuarlardaki mevsimsel işletme kurallarında da bir değişiklik getirecek ve bu durum rezervuarlar ile hidroelektrik üretiminin mevsimsel planını etkileyecek veya kısıtlayacaktır. Daha sıcak bir iklimde daha erken kar erimesi, yaz aylarında daha düşük bir akış rejimine yol açacak ve yaz aylarında su dengesini bozacak, daha yüksek sıcaklıklar nedeniyle artan buharlaşma ile birleşecektir. Bu ayrıca, özellikle yaz mevsiminde hidroelektrik sistemlerinin istikrarını tehdit edebilir ve düşük akışlı yıllarda yıllık güç üretiminin azalmasına neden olabilir (Nohara vd., 2023; Nohara, 2024).

3.3 Taşkın ve kuraklık yönetimi için iklim değişikliği adaptasyonunun hidroelektrik üzerindeki etkileri

Küresel ısınmayla ilişkili hidrolojik değişiklikler, su temini ve taşkın yönetimi gibi diğer su yönetimi hedefleriyle olan karşılıklı ilişkileri nedeniyle hidroelektrik üretim potansiyelini dolaylı olarak da etkiler. Bölgesel iklim değişikliği etkilerine odaklanan son çalışmalar, iklim değişikliğinin bazı bölgelerde kuraklık riskini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir (Balting vd., 2021). Küresel ısınma ilerlemeye devam ederse, mevcut standartlarda su temini için gereken rezervuar depolama kapasitesi, bazı savunmasız alanlarda toplam depolama kapasitesini çok aşabilir (Nohara vd., 2018; Nohara, 2024). Su kıtlığı koşullarında toplum elektrik üretimi yerine su teminine öncelik verir ve su temini için çok amaçlı rezervuarların sınırlı depolama kapasitesinin kullanılması yönünde kamuoyu baskısı olursa, hidroelektrik üretimi kısıtlanabilir.

Sulama için su talebi genellikle hava ve su sıcaklıkları yükseldikçe artar. Çünkü bitkilerin sıcaklıklarını kontrol etmeleri ve yüksek sıcaklık hasarından kaçınmaları için daha fazla suya ihtiyaçları vardır. Tarım sektöründen gelen su talebindeki artış, hidroelektrikten gelen su talebi gibi diğer su kullanımlarıyla rekabeti artırabilir ve bu şekilde potansiyelini sınırlayabilir (Koç,2015; 2018).

Diğer yandan, küresel ısınma ilerledikçe bazı bölgelerin kuraklık riskinin artmasına ek olarak daha sık ve şiddetli taşkınlar yaşaması öngörülmektedir (Tabari vd., 2021; Bayazıt vd., 2021a). Bu tür bölgelerde, adaptasyon önlemi olarak taşkın kontrolü için rezervuarlarda daha fazla boş hacim sağlamak amacıyla rezervuar depolamasında yeniden tahsis ihtiyacı doğabilir. Bu durumda, bu rezervuarlar aynı zamanda enerji üretimi için de işletiliyorsa, daha az depolama kapasitesinin hidroelektrik üretimi için tahsis edilmesi nedeniyle enerji talebindeki değişikliklere yanıt olarak depolanan suyu enerji üretimi için kullanma konusunda daha az esnekliğin olması hidroelektrik potansiyelini sınırlayabilir.

İklim değişikliğiyle ilişkili Asya musonlarındaki değişiklikler gelecekte Doğu Asya'daki (Japonya) yoğun kar yağışlı bölgelerde yoğun yağış tehlikesini artırabilir (Osakada vd., 2018). Bu bölgelerde bulunan çok amaçlı rezervuarların, depolama suyu seviyesini düşürerek sel kontrolüne daha fazla odaklanılarak işletilmesi gerekebilir, bu da hidroelektrik üretim potansiyelini sınırlayabilir.

3.4 Kent su yönetimi

İklim değişikliğinin artan etkileri, kentsel su talebini önemli ölçüde yeniden şekillendirmekte ve tüm dünyadaki şehirler için önemli zorluklar yaratmaktadır. Yükselen sıcaklıklar ve değişen yağış düzenleri daha sıcak ve kurak koşullara neden oldukça, kent sakinleri, mevcut işletmeleri ve yeşil alanları desteklemek için artan bir su talebiyle karşı karşıya kalmaktadır (Freni ve Sambito, 2024; Koç, 2022). İklim değişkenliği ile su ihtiyaçları arasındaki bu karmaşık etkileşim, güçlü adaptasyon stratejileri geliştirmeyi ve uygulamayı gerekli kılmaktadır. Araştırmalar, iklim değişikliğinin yalnızca mevcut su kıtlığını şiddetlendirmediklerini, aynı zamanda hidrolojik döngüyü zorladığını ve su talebini yönlendiren karmaşık sosyoekonomik faktörleri daha da kötüleştirdiğini göstermektedir. Kentsel nüfus, özellikle yoğun nüfuslu ve gelişmekte olan bölgelerde artmayı sürdürdükçe, tahmini modelleme ve entegre su yönetimine ilişkin içgörüler önemli bir hale gelmektedir. Ayrıca, dayanıklılığı artırmak, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak ve sürdürülebilirliği teşvik etmek için su tedarik sistemlerinde dijital geçişler ve su kaynaklarının çeşitlendirilmesi gibi yenilikçi stratejiler araştırılmaktadır. Bu yaklaşımlar

sürdürülebilir kentsel planlamanın yolunu açmakta ve iklim zorlukları karşısında güvenli bir su geleceği sağlamak için disiplinler arası çabalara olan ihtiyacın altını çizmektedir.

3.5 İklim değişikliğinin kentsel su talebi üzerindeki etkisi

İklim değişikliğinin kentsel su talebi üzerindeki etkileri çok yönlüdür ve çalışmalar iklim değişikliğinin mevcut su kıtlığını daha da kötüleştirildiğini, hidrolojik döngüyü etkilediğini ve sıcaklık değişkenliği ve sosyo-ekonomik faktörler nedeniyle kişi başına düşen su talebini etkilediğini göstermektedir. Kentsel alanlar, kentleşme ve iklim değişikliğinin birlikte etkisi nedeniyle artan su kıtlığı yaşamakta olup, öngörüler 2050 yılına kadar su kıtlığıyla karşı karşıya olacak kentsel nüfusta önemli bir artışın olduğunu göstermektedir (He vd., 2021; Koç, 2022). İklim değişikliği hidrolojik döngüyü etkileyerek bazı bölgelerde su mevcudiyetinin azalmasına ve nehir akışlarının artmasına neden olmakta, bu durum, kentsel su yönetimini etkilemekte ve uyum stratejilerini gerekli kılmaktadır. Kişi başına düşen su talebinin iklim değişkenlerine ve işsizlik oranlarına duyarlılığı kentsel alanlara kıyasla banliyö alanlarında daha yüksektir ve bu da daha az yoğun alanlardaki konut su talebinin iklim değişkenliğine karşı daha savunmasız olduğunu göstermektedir. İklim değişikliği ile nüfus artışı ve arazi kullanımı değişiklikleri gibi insan baskıları arasındaki etkileşimin, kentsel su kaynakları için kıtlık ve kalite risklerini artırması öngörülmektedir (Liu vd., 2024). Ayrıca, iklim değişikliği nedeniyle artan sıcaklıkların daha sık yüksek hacimli su kullanımları üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olması ve dolaylı olarak soğutma için elektrik tüketimini artırması, böylece enerji-su bağlantısı yoluyla su talebini etkilemesi beklenmektedir.

3.6 Kentsel su temininde dijital geçiş iklim değişikliğini nasıl azaltabilir

İklim değişikliğinin su temini üzerindeki etkisini hafifletme ihtiyacının, yetersiz altyapı yatırımı, nüfus artışı ve iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkileri gibi bir dizi faktörün birleşimi tarafından yönlendirildiği belgelenmiştir (Freni ve Sambito, 2024). Su yöneticileri beklenmedik olaylara hazırlıksız yakalandıklarında, aralıklı su temininin benimsenmesi son çözümse, iklimsel sürücü tahmini, sistem verimliliği tahmini ve aktif su dağıtım izleme ve kontrolünün verimli bir işlemini, kaynakları koruyarak ve su talebi dayanıklılığını artırarak fark yaratabilir.

Kentsel nüfus özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde büyümeye devam ettikçe, güvenilir ve sürdürülebilir su teminine olan ihtiyaç giderek daha kritik hale gelmiştir. Bu sorunun ele alınması, herkes için

eşit ve dayanıklı su erişimini sağlamak için altyapı iyileştirmeleri, politika reformları ve toplum katılımını kapsayan çok yönlü bir yaklaşım gerektirmektedir. Genellikle Su 4.0 olarak adlandırılan kentsel su temin sistemlerindeki dijital geçişin, iklim değişikliği karşısında bu sistemlerin sürdürülebilirliğini ve dayanıklılığını artıracak varsayılmaktadır. Dijitalleşme, su kaynaklarının daha verimli yönetilmesini sağlamakta, su kullanımını optimize ederek ve atığı azaltarak iklim değişikliğinin hafifletilmesine katkıda bulunmakta ve dolaylı olarak enerji tüketimini azaltmaktadır. Ancak, dijitalleşme iklim değişikliğinin hafifletilmesi için fırsatlar sunarken, bu tür teknolojilerin uygulanmasının zorluklardan uzak olmadığını belirtmek önemlidir. Literatür, dijitalleşmenin iklim değişikliğine uyum sağlamada kolaylaştırıcı olarak potansiyeline ilişkin kapsamlı değerlendirmelerin az sayıda olduğunu ve dikkate alınması gereken karşılıklı ve geri besleme etkilerinin olabileceğini öne sürmektedir.

Bu bağlamda, dijital çözümleri sürdürülebilir kentsel planlama ve iklim değişikliği stratejilerinin daha geniş bir çerçevesine entegre etmek, faydalarını optimize etmek ve olumsuz etkilerini en aza indirmek için hayati önem taşımaktadır. Giustolisi vd (2024) tarafından vurgulandığı gibi, dijital çözümlerin entegrasyonu, faydalarını en üst düzeye çıkarmak ve olası olumsuz etkileri en aza indirmek için sürdürülebilir kentsel planlama ve iklim değişikliğini azaltma stratejileriyle uyumlu hale getirilmelidir. Araştırmacılar, daha sürdürülebilir bir gelecek elde etmek için kentsel sistemler arasındaki karşılıklı bağımlı ilişkileri dikkate almanın önemini vurgulamaktadır. Sürdürülebilirliği daha da teşvik etmek için yağmur suyu hasadı ve alternatif su kaynaklarının belirlenmesi gibi yenilikçi su yönetimi stratejilerini keşfetmek gereklidir. Bu stratejilerin uygulanması, yalnızca geleneksel su kaynakları üzerindeki zorlanmayı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda alternatif su kaynaklarının kullanımını teşvik ederek ve sınırlı kaynaklara bağımlılığı azaltarak iklim değişikliğinin etkilerinin hafifletilmesine de yardımcı olur. Ayrıca, bu yaklaşımların, şehirlerin iklim değişikliğinin etkilerine dayanma ve bunlardan kurtulma uyum kapasitesini artırarak genel kentsel dayanıklılığı iyileştirdiği gösterilmiştir. Ayrıca, La Loggia vd (2020) kentsel iklim stratejilerine yerli bilgi ve toplum temelli yaklaşımların dâhil edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu tür yaklaşımlar, özellikle iklim değişikliğinden orantısız bir şekilde etkilenen marjinal topluluklar için şehirlerin uyarlanabilir kapasitesini artırmada etkili olmuştur.

3.7 İklim değişikliğine uyumun unsurları

Her bir sektör için (su kaynakları, ormancılık, ekoloji, tarım, kentsel alanlar, vb.) iklim değişikliğine uyum konusunda birçok mükemmel rapor ve çalışma mevcuttur. Su kaynakları sektörlerinde iklim değişikliğine

uyum konusunda mantıklı tavsiyeler sunan en iyiler arasında Dialogue on water and climate (Su ve İklim Diyalogu) (2003) yer almaktadır. Bu raporlarda, küresel ısınmanın öngörülebilir, ancak oldukça belirsiz hidro-klimatik sonuçlar üreteceği ve bunun su mevcudiyeti ve su yönetimi üzerinde etkileri olacağı konusunda bir fikir birliğine varılmıştır. Teknolojik ve mühendislik açısından, su yöneticileri tarihsel iklim değişkenliğinin belirsizlikleri ve istekleriyle rutin olarak oldukça iyi başa çıkmışlar, ancak özellikle gelişmekte olan ülkelerde su yönetiminin kurumsal ve politik yönleri çok daha büyük zorluklar yaşamıştır. Su mevcudiyeti, doğal tehlikelere ve belirsizliklere karşı hassasiyet, mühendislik tasarımı veya hidrolojik belirsizliklerle başa çıkmadan daha çok kurumsal bir başarısızlıktır. Su yöneticileri risklerle, hidrolojik belirsizliklerle ve rekabet eden taleplerle başa çıkmaya alışkındır. Yeni altyapı inşa edebilir, mevcut altyapıyı artırabilir ve onarabilir, kırılganlığı azaltabilir, dayanıklılığı ve sağlamlığı artırabilirler. Ancak, su yöneticileri, farklı su kullanan sektörlerin entegrasyonunun 'iklim geçirmez' topluluklar için ekonomik ve finansal teşviklerle birleştirilebileceği uygun ortamı oluşturmaktan ve kaynakları sağlamaktan sorumlu olan politikacılar değildir. Mevcut birçok akademik literatür, nüfus artışının kafa karıştırıcı ve daha baskın etkisini göz ardı etmekte, iki konuyu rutin olarak karıştırmakta ve dolaylı olarak su yöneticilerinin azalan arz ve artan talep kombinasyonuna ayak uyduramayacağını öne sürmektedir.

Su yöneticileri, kontrolleri altındaki kaynaklar ve seçenekler arasındaki uyumu sağlamak için hazırlık yapmak, yani ortamı hazırlamak için ne yapabilirler? Aslında, tamamen geleneksel yöntemlere ve fikirlere dayalı olarak birçok adım atılabilir. Çeşitli yaklaşımlar, Entegre Su Kaynakları Yönetimi (ESKY) ilkelerine benzer kavramlara ve unsurlara dayansa da, ESKY'ne başvurmak veya ona güvenmek gerekmez. Uzun vadede, ESKY'ni destekleyen kurumsal altyapıya sahip olmak, iklim uyum çabalarının uygulanmasına ve sürdürülebilirliğine açıkça yardımcı olacak ve bunların sürdürülebilir kalkınmanın daha geniş hedefleriyle uyumlu olmasını ve bunları tamamlamasını sağlayacaktır. Her ikisi de gelişmiş ülkeler için bile uygulanması çok karmaşık ve zor olsa bile ESKY ve iklim uyumunun peşine düşmek önemlidir. Mükemmel bir tamamlayıcı sistemin peşinde koşmak, iklim uyumunda bir dizi yararlı hazırlık 'ilk adımının' uygulanmasını engellememelidir.

3.8 Entegre Su Kaynakları Yönetimi

Entegre Su Kaynakları Yönetimi (ESKY), suyla ilgili sektörlerde çok sayıda uyarlanabilir yönetim stratejisinin koordinasyonu yoluyla iklim değişikliğine uyumun sürdürülebileceği uzun vadeli kurumsal bir temel-

dir. İdeal ESKY çerçevesi birkaç temel bileşeni/ön koşulu savunmakta olup, Bunlar;

1. Ulusal su yönetim planı ve/veya nehir havzası yönetim planı;
2. Ulusal su politikası/su yasası;
3. Hükümetin her düzeyinde politikaların, düzenlemelerin ve kararların uyumlaştırılması;
4. Tutarlı kararlar alabilen ve ilerlemeyi sağlayabilen; kaynakları yönetip izleyebilen ve hizmetleri etkili bir şekilde sunabilen kurumsal altyapı;
5. Nehir havzası yönetim otoritelerinin kurulması;

ESKY'nin temel amacı suyu daha verimli (daha az su kullanımı, damla başına daha fazla değer, koruma) ve etkili (güvenilir hizmetlerin sunumu, her sektörde iyileştirilmiş performans) yönetmektir. ESKY, su ve ilgili doğal kaynak yönetiminin bir veya daha fazla yönünden sorumlu çok sayıda kurum ve bölüm politikalarının, kurumlarının, düzenleyici çerçevelerinin (izinler, lisanslar, izleme), planlamasının, işletilmesinin, bakımının ve tasarım standartlarının uyumlu hale getirilmesini gerektirir (Koç, 2015; 2017; 2018). Su yönetimi, yüksek derecede karar alma şeffaflığı, kamu katılımı, planlama ve uygulama için yeterli mali desteğin olduğu parçalanmış kurumsal sistemlerde (örneğin, ABD, Brezilya ve Avustralya'nın federal tabanlı sistemleri gibi) etkili bir şekilde (ancak verimli bir şekilde değil) çalışabilir. Bu ön koşulların mevcut olmadığı diğer birçok durumda iyi çalışmaz. Uygun kurumsal çerçeveyi kurmak, ESKY'ne doğru atılan ilk adımdır.

İklim değişikliğine uzun vadeli, sürdürülebilir uyum, altyapı, politika araçları, ekonomik uyum ve davranış değişikliklerinden oluşan ve kademeli olarak entegre edilmiş bir dizi önlemin uygulanmasını gerektirecektir. Bu önlemler, belirli bir ülkedeki gelişme derecesine göre değişecek, taşkın ve kuraklıkların sıklığı ve büyüklüğündeki değişiklik olarak ifade edilen iklim değişkenliğinin etkilerine karşı beklenen kırılganlığı sunacaktır. ESKY, nüfus, talepler, ekonomik koşullar ve iklim değişikliğindeki değişikliklere uyumun kapsamlı bir şekilde ele alınabileceği organize, düzenli bir süreçtir. ESKY'nin temelleri yalnızca çağdaş sorun çözmeye hizmet etmekle kalmaz, aynı zamanda gelecekteki uyum için bir platform oluşturur. Ancak, yerinde iyi gelişmiş bir ESKY altyapısına sahip olmak, eldeki araçlar ve kaynaklarla bir uyum stratejisi başlatmanın ön koşulu değildir. Herhangi bir insan çabasındaki ilerlemelerin çoğu, büyük olaylara yanıt olarak kademeli olarak yapılır. Uyarlanabilir yönetim, çağdaş

su kaynakları yönetimiyle ilişkili sorunların çoğuna hizmet edecek daha ilgili ve faydalı bir yaklaşımdır.

4. Su Altyapısının İklim Değişikliğine Adaptasyonuna İlişkin Teknik Yönergeler

European Environmental Agency, (EEA) (Avrupa Çevre Ajansı) (2024), yakın zamanda gerçekleştirdiği Avrupa İklim Risk Değerlendirmesinde Avrupa genelinde potansiyel olarak ciddi sonuçları olan 36 büyük iklim riskini belirleyip değerlendirmiş ve bunları beş geniş gruba ayırmıştır. Bunlar; ekosistemler, gıda, sağlık, altyapı, ekonomi ve finans (Anastasios, 2024).

Altyapı, esas olarak değerlendirilmesi ve ele alınması gereken en acil riskler olan yağmur, nehir ve kıyı taşkınları, ısı ve kuraklık nedeniyle İklim Değişikliği (İD) etkilerine karşı oldukça hassas olan gruplardan biridir. Bu riskler, Avrupa'daki binaların ve altyapıların çoğunun eskimiş durumu ve sağladıkları hizmetlere olan artan talep nedeniyle daha da kötüleşmektedir (Gourbesville ve Soo, 2023). Su Altyapısı (SA), su temini, atık su ve yağmur suyu projelerini kapsamakta olup, kritik altyapının en önemli sektörlerinden biridir. Topluluklara temel hizmetler sağlayan su altyapısı, taşkınları önleyerek ve su yollarımızı temiz tutarak sağlığımızı ve güvenliğimizi korumada hayati bir rol oynar. Ancak, SA, işlevselliğini bozabilecek İD etkilerine karşı savunmasızdır. Bu nedenle, su altyapısı iklim değişikliğine uyarlanmalıdır.

Uluslararası Hidro-Çevre Mühendisliği ve Araştırmaları Derneği (IAHR), iklim risklerini azaltmak ve böylece WI iklim dayanıklılığını artırmak için stratejik olarak hayati dört tema (Gourbesville ve Soo, 2023) ile "İD adaptasyonu ve azaltmayı" düşünmektedir.

- Sulama Altyapısının İklim Değişimine uyarlanması genellikle doğa bilimleri alanlarından elde edilen araştırma deneyimiyle edinilen bilgiye dayanan disiplinler arası bir işlemdir;
- Sulama Altyapı projelerinde ve ilgili hidrolojik, hidrodinamik, biyolojik, çevresel ve diğer süreçlerde uzmanlaşmış mühendislik;
- İklim Değişimine odaklanan klimatoloji;
- İklim Değişimi etkilerinin analizinde kullanılan "doğal afetler" gibi uyarılma işlemlerinin çeşitli aşamalarıyla ilgilenen diğer doğa bilimleri alanları;

Dahası, altyapının İklim Değişimine uyarlanması önemli yatırımlar gerektirir; Su Altyapısının tek başına çoğu ülkenin Sürdürülebilir Kal-

kınma Hedefi 6'yı (SKH 6: Temiz su ve sanitasyon) uygulamak için 2015-2030 döneminde ulusal GSYH'nin %1-2'sini yatırmasını gerektireceği tahmin edilmektedir (Gourbesville ve Soo, 2023; United Nations, 2023).

4.1 İklim dayanıklı altyapı için güncel teknik kılavuzlar

Şu anda, Avrupa ülkelerinin çoğunda, SA için tasarım, inşaat, işletme, finansman ilkeleri ve düzenleyici standartlar, İD etkilerini veya son zamanlarda çok önemli olarak vurgulanan bileşik aşırılıkları ve kademeli altyapı arızalarını hesaba katmıyor (EEA, 2024).

İklim dayanıklı altyapının (Stamou, 2022) geliştirilmesini teşvik etmeyi amaçlayan Avrupa Komisyonu (AK), Eylül 2021'de 2021-2027 dönemi için "İklim Geçirmez Altyapı" ile ilgili Teknik Kılavuzları yayınladı EC (2021). Hem İD azaltma hem de uyum stratejilerini içeren AK Teknik Kılavuzları, temel olarak altyapı hazırlığına dâhil olan proje geliştiricileri ve uzmanlar için tasarlanmıştır. Kılavuz, gelecekteki yatırım ve geliştirmede iklim hususlarını ana akıma sokar ve kamu kurumları, uygulama ortakları, yatırımcılar, paydaşlar ve diğerleri için değerli bir kaynak görevi görür. AB Teknik Yönergelerine göre, altyapı geliştirme, neredeyse bir İklim Riski ve Savunmasızlık Değerlendirmesi (İRSD) olan iklim dayanıklılık için bir yöntemi içermelidir. Bir İRSD, şunları yapmak için etkili bir araçtır: 1. savunmasızlık ve risk değerlendirmesi yoluyla altyapı için ilgili iklim tehlikelerini belirlemek ve 2. uyum önlemlerinin uygulanmasını bilgilendirmek.

İD uyumunun önemi, otuz yıl önce IPCC Çalışma Grubu II tarafından İklim Değişikliği Etkilerini ve Uyumlarını Değerlendirme Teknik Yönergelerinde de belirtilmiştir (Carter vd., 1994). Bu yönergeler, olası İD'nin etkilerini ve farklı bölgelerde, ekonomik sektörlerde ve ülkelerdeki uyumları değerlendiren bir çerçeveyi özetlemektedir. Bu çerçeve yedi adımdan oluşmaktadır: Bunlar; 1. Sorunun tanımı, 2. Yöntemlerin seçimi, 3. Yöntemlerin test edilmesi, 4. Senaryoların seçimi, 5. Biyofiziksel ve sosyoekonomik etkilerin değerlendirilmesi, 6. Otonom ayarlamaların değerlendirilmesi, 7. Uyum stratejilerinin değerlendirilmesi (Anastasiou, 2024). Geçtiğimiz Ocak ayında, IPCC İstanbul'daki 60. Oturumunda (IPCC-60), iklim adaptasyonunun bir sonraki değerlendirme döngüsü için bir öncelik olacağını açıkça belirtmiş ve 1994 Teknik Yönergelerini, yayımlandığı tarihten bu yana geçen 30 yıl içinde keşfedilen kritik bilgiyi yansıtabilecek şekilde güncellenmesine karar vermiştir (Ostaneck, 2024). Geçtiğimiz Aralık ayında, Avrupa Bölgelerindeki Projeleri Desteklemek İçin Ortak Yardım, su ve atık su projelerinin iklim dayanıklı hale getirilmesi için AK Teknik Yönergeleri, ilgili AK resmi belgeleri, IPCC raporları ve esas olarak iklim yönleri hakkındaki bilimsel bilgiye dayanan

iki kılavuz sunmuştur (JASPERS, 2023). AK Teknik Yönergeleri ve kılavuzlarında, 1994 IPCC Teknik Yönergeleri'nin içermeyen bir dizi IPCC belgesi referans alınmakta ve kullanılmaktadır (Carter vd., 1994).

4.2 Su araştırması ve altyapı uyarlaması

AK Teknik Yönergeleri ve kılavuzları, iklim adaptasyonu ile ilgili olarak Üniversiteler ve Araştırma Enstitülerinde gerçekleştirilen ilgili su araştırmalarından türetilen SA'nın su mühendisliği yönlerini yeterince dikkate almaksızın, temel olarak iklim tehlikelerine odaklanan akademik bilgiye dayanmaktadır. Su araştırması kapsamlıdır ve İD adaptasyon işleminin tüm aşamaları için Teknik Yönergelerle doğrudan ilişkili olan çeşitli terminolojileri ve yöntemleri içermektedir. Özel eğitim alan ve SA'nın nasıl tasarlanması, inşa edilmesi ve işletilmesi gerektiği konusunda teknolojik deneyim kazanan ve farklı iklim koşulları altındaki davranışını açıklayabilen uzman su araştırmacıları ve deneyimli mühendisler tarafından geliştirilmiştir. SA'nın İD'ne adaptasyon işlemi, ilgili Teknik Yönergeleri geliştiren bilim insanları ve karar vericiler tarafından kullanıldığında önemli ölçüde iyileştirilebilir ve daha da etkili olabilir. Bu nedenle, açık soru şudur: "SA'nın İD'ne adaptasyonu üzerine araştırma, yönergelerin geliştiricileri tarafından kullanımını kolaylaştırmak için nasıl organize edilebilir?"

4.3 Su araştırmalarının tipolojisi

Araştırma kullanımına yönelik olası ilk eylemlerden biri, araştırma tipolojisi yoluyla su araştırmacıları ve kılavuz geliştiricileri arasında bir "ortak dil" oluşturmaktır. (Anastasios, 2024). Örneğin, su araştırmaları, SA (Stamou vd., 2024) göre ayarlanmış AK Teknik Kılavuzlarını (EC, 2021) temel alan aşağıdaki beş kategoride sınıflandırılabilir. Bunlar; SA'nın tanımı, İD değerlendirmesi, Savunmasızlık değerlendirmesi, Risk değerlendirmesi ve Adaptasyon önlemlerinin değerlendirilmesi. Beş su araştırma kategorisi, karşılık gelen araştırma alanlarıyla birlikte Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu alanlar için, materyaller ve yöntemler de tiplendirilebilir.

Tipolojileştirme, su araştırmacıları, özellikle altyapı projelerinde uzmanlaşmış mühendisler, bu Teknik Kılavuzların formülasyonuna dâhil edildiklerinde daha etkili olabilir. Su araştırma tipolojisi, araştırmacıların son teknoloji bilgi yöntemleri ve çözümleri geliştirmekte özgür olmadıkları anlamına gelmez; aksine, bu yenilikçi yaklaşımlar tipolojileştirildiklerinde daha kolay değerlendirilebilir ve Teknik Kılavuzların "materyal ve yöntemlerine" dâhil edilebilir. Su araştırmalarının tipolojisi, muhtemelen kılavuz geliştiricileri tarafından kullanılmasına yönelik araçlardan biridir. Ancak, etkili olması için kritik su araştırmasının kılavuz

vuz geliştiricilerine ve diğer kilit paydaşlara iletişim kanalları, sinerjiler ve çeşitli faaliyetler ile yayılarak birleştirilmesi gerekir.

Tablo 1. *Su araştırmalarının kategorileri ve alanları (Anastasios, 2024)*

Kategoriler	Araştırma Alanları
I Su Altyapısının Tanımı	SA'nın ana bileşenlerinin tanımlanması ve zaman ölçeklerinin seçilmesi, her SA bileşeni için potansiyel tehlikelerin belirlenmesi ve her tehlike için karşılık gelen iklim göstergelerinin seçilmesi.
II İklim Değişikliği Değerlendirmesi	İklim değişikliği senaryolarının seçimi ve gösterge değerlerinin tahmini.
III Güvenlik Açığı Değerlendirmesi	Duyarlılık analizi, maruz kalma analizi, uyum kapasite analizi ve kırılganlık analizi.
IV Risk değerlendirme	Olasılık analizi, etki analizi ve risk analizi.
V Uyum Tedbirlerinin Değerlendirilmesi	Uyum seçeneklerinin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve SA sisteminin tasarımına ve işletimine entegrasyonu; Kentsel Su Altyapısı için gösterge niteliğinde uyum seçenekleri ve taşkın riskinin azaltılması için Doğa Temelli Çözüm örneği.

Yukarıda açıklandığı gibi, küresel ısınmanın ilerlemesinden sonra sadece su temini için gereken rezervuar depolama kapasitesi, bazı nehir havzalarında mevcut toplam depolama kapasitesini büyük ölçüde aşabilir. Bu durum, yalnızca su temini tarafındaki uyum çabalarının artık yeterli veya maliyet etkin olmayabileceğini ve bu tür bölgelerde kuraklık yönetimi üzerindeki iklim değişikliği etkileriyle başa çıkmak için su talebi tarafındaki (veya kullanıcı tarafındaki) uyumun da kaçınılmaz olabileceği anlamına gelmektedir. Sulamanın genellikle birçok nehir havzasında önemli bir su tüketicisi olduğu düşünüldüğünde, su kullanım verimliliğini artırarak tarım sektöründeki su talebinin kontrol edilmesi, iklim değişikliğinden kaynaklanan kuraklık hassasiyetini azaltmaya önemli katkıda bulunma potansiyeline sahiptir (Koç, 2015). Suyun tüketim amaçlı kullanımına yönelik talep hidroelektrik için su mevcudiyetini büyük ölçüde etkilediğinden, tarım sektöründe su verimliliğinin iyileştirilmesi potansiyeli kapsamlı bir şekilde araştırılmalıdır (Koç, 2017; 2018).

Su temini, hidroelektrik ve taşkın yönetimi arasındaki dengeler, gerçek zamanlı hidrolojik tahminleri uyarlanabilir bir şekilde hesaba katarak birden fazla amaç için rezervuarların entegre işletimini geliştirerek iyileştirilebilir. Ancak bu durum, büyük ölçüde gerçek zamanlı hidrolojik

tahminlerin doğruluğuna ve belirsizliğine bağlıdır. Rezervuar depolama kapasitesinin farklı işletim amaçları arasında yeniden tahsisi, rezervuarların her amaç için değişen ihtiyaçlara yanıt verme yeteneğini geliştirmenin bir başka yoludur. Barajları yükseltme ve ek boşaltımlar inşa etmek gibi rezervuar yükseltme çalışmaları, özellikle bu yükseltmeler entegre gerçek zamanlı işletme yöntemiyle birleştirildiğinde, birden fazla rezervuar kullanımı arasındaki gerekli dengeleri ele almak için başka bir seçenektir. Rezervuar kapasitelerini en üst düzeye çıkarmak için bu tür yapısal ve yapısal olmayan önlemlerin etkinliği ve sınırları, bu önlemlerin iklim değişikliğinin hafifletilmesine ve adaptasyonuna ne derece katkıda bulunabileceğini anlamak için incelenmelidir. Rezervuar sedimantasyonunu engellemek için alınan çeşitli önlemler, rezervuarların işletilmesine dünya çapında uygulanmıştır. Bunlar arasında kalıcı sedimantasyon önleme önlemleri olarak sediment yıkama ve sediment baypas tünelleri10 yer almaktadır. Bu yapısal veya yapısal olmayan önlemlerin rezervuar sedimantasyonlarını ne kadar etkili bir şekilde azalttığı ve periyodik sediment tahliyesinin sera gazı emisyonlarını azaltmaya ve hidroelektrik potansiyelini korumaya ne ölçüde katkıda bulunabileceği henüz tam olarak anlaşılmamıştır. Bu nedenle, yakın gelecekte bu konuda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

5. Sonuçlar

İklim değişikliği, hidrolojik döngüyü etkileyerek mevcut su kıtlığını daha da kötüleştirir ve bazı bölgelerde su mevcudiyetinin azalmasına ve özellikle kentsel alanlarda su talebinin artmasına neden olur. Artan talep ve değişen su mevcudiyeti nedeniyle kentsel ve tarım sektörleri arasındaki su kaynakları için artan yarış çatışma potansiyelini vurgular, iyileştirilmiş su kullanım verimliliği ve güncellenmiş yönetim stratejilerini gerektirir. İklim değişikliğinin kentsel su talebi üzerindeki etkilerini azaltmak daha geniş sosyo-politik bağlamların yanı sıra hem arz hem de talebi dikkate alan entegre yönetim yaklaşımlarını gerektirir. Bu durum, kıtlıkların üstesinden gelebilmek için su koruma önlemlerini ve talep yönetimi stratejilerini benimsemeyi içerir.

Su temin sistemlerinde dijital teknolojileri benimsemek (Su 4.0), kentsel su yönetiminin sürdürülebilirliğini ve dayanıklılığını artırabilir. Dijitalleşme, su kullanım verimliliğini artırarak ve enerji tüketimini azaltarak iklim değişikliği etkilerini de azaltabilir, ancak teknolojik, sosyal ve ekolojik engeller gibi zorlukların üstesinden gelinmesi gerekir. Yağmur suyu hasadı ve alternatif su kaynakları gibi yenilikçi stratejileri keşfetmek, geleneksel kaynaklara olan bağımlılığı azaltmak, kentsel dayanıklılığı artırmak ve iklim etkilerini azaltmak için hayati önem taşır. Bu çaba, yerel bilgi ve toplum temelli yaklaşımları dâhil ederek desteklenmelidir.

İklim değişikliği çalışmalarının odak noktası, genel küresel etki değerlendirilmelerinden daha çok adaptasyon ve yanıt mekanizmalarına doğru yönelmeli ve zor kaynak yönetimi uzlaşmalarının sosyoekonomik ve politik boyutlarıyla ilgilenmelidir. Hiçbir bireysel su yönetimi kurumu ve bağlı araştırma enstitüsü, su yöneticilerinin ve tasarım mühendislerinin iklim değişikliğine uyum sağlamak için etkili bir şekilde kullanabilecekleri bir dizi yeni ilke ve araç geliştirme sorunuyla başa çıkamaz. Sorunlar çok karmaşık olup sorunlar tarım mühendisliğinden savak tasarımına kadar çok çeşitlidir. Küresel düzeyde, Dünya Bankası'ndan Küresel Su Ortaklığı'na kadar her kurum, sürdürülebilir kalkınma ve ESKY ile iç içe geçmiş benzer sorunlarla mücadele etmektedir.

Su yönetimi için pratik uygulama konularıyla rutin olarak ilgilenen birkaç seçkin su araştırma merkezi tarafından uluslararası koordineli ve işbirlikçi bir uygulamalı araştırma ve geliştirme çabası yürütülmelidir. Bu çabaya katılan araştırma kurumlarının, buna akademik bir çalışma veya IPCC tipi bir çaba olarak yaklaşmak yerine su yönetim kurumlarının işletme sorunlarıyla ilişkilendirilmesi önemlidir. Su yöneticilerinin ve altyapı tasarımcılarının karşı karşıya olduğu sorunlar, doğası gereği geçmişen olsalar bile oldukça pragmatik yaklaşımlar ve araçlar gerektirir. Geliştirilen yöntemlerin mümkün olduğunca yararlı olması, risk ve belirsizlik analizi için mevcut geleneksel yöntemlerden türetilmesi ve tipik bir kurumdaki orta düzey kariyer uygulayıcıları tarafından kullanılabilmesi önemlidir. Yöntemler tekdüzelik ve tutarlılık için çabalamalıdır.

Yeni su kaynakları yatırımlarını ve projelerini haklı çıkarmak için kullanılan yöntemlerde, çok farklı ekonomik karar kriterleri içeren yeni bir 'paradigma değişimi' gereklidir. Yeni hidrolik altyapının planlanması ve tasarımı, yalnızca durağan olmayan bir iklimle başa çıkmak için yeni hidrolojik araçlar ve çok belirsiz ve nitel iklim değişikliği senaryosu bilgilerini dâhil etmek için mekanizmalar değil, aynı zamanda bu bilgileri çok maliyetli seçenekler arasında karar verme temeli olarak özümseyebilen yeni bir ekonomik, sosyal, çevresel ve eşitlik açısından karar çerçevesi de gerektirir. Mevcut ekonomik kriterler, katı fayda-masraf testlerine veya iç karlılık oranını maksimize etmeye dayanmaktadır. İklim belirsizliğiyle başa çıkmak üzere tasarlanan altyapılar için yeni ekonomik değerlendirme ve karar kurallarının, risk-maliyet etkinliğini en üst düzeye çıkarma veya risk-maliyetini en aza indirme gibi farklı karar kurallarını uygulaması gerekmektedir.

Kaynakça

- Albayrak, I., Müller-Hagmann, M., & Boes, R.M. (2019). Efficiency evaluation of Swiss sediment bypass tunnels. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, pp. 239-245. National Taiwan University, Taiwan.
- Alvi, I.A. (2018) Dam incidents and failures can fundamentally be attributed to human factors. *Lessons Learned ASDSO Lessons Learned*. (n.d.). Damfailures.Org. Retrieved October 24, 2020, from <http://damfailures.org/lessons-learned/dam-incidents-and-failurescan->
- Anastasios I, Stamou. (2024). The typologization of water research as a possible means to improve the technical guidelines on the adaptation of water infrastructure to climate change. *IHAR. Hydrolink Magazine*. Hydrolink 2024/3, 8pp.
- ARCC (2014) African and Latin American resilience to climate change (ARCC).
- Arnell NW, Liu C, Compagnucci R, da Cunha L, Hanaki K, Howe C, Mailu G, Shiklomanov I, Stakhiv E (2001) Hydrology and water resources. In: McCarthy JJ, Canziani OF, Leary N, Dokken DJ, White KS (eds) *IPCC climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, the third assessment report of working group II of the intergovernmental panel on climate change (IPCC)*, 1000. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 133–191 (1000 pages).
- Balting, D.F., Aghakouchak, A., Lohmann, G. and Ionita, M. (2021). Northern Hemisphere drought risk in a warming climate, *npj Climate and Atmospheric Science*, 4:61.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewics, S. Wu, and J.P. Palutikof. (2008). *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 210 pp.
- Bayazıt, Y., Bakış, R., Koç, C. (2021). A study on transformation of multi-purpose dams into pumped storage hydroelectric power plants by using GIS model. *International Journal of Green Energy*. Volume 18, 308-318.
- Bayazıt, Y., Koç, C., Bakış, R. (2021a). Urbanization impacts on flash urban floods in Bodrum Province, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, Volume 66, 118-133.
- Carter, T. R., Parry, M.L., Harasawa, H. and Nishioka, S. (1994). *IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations*. London: Department of Geography, University College London; <https://www.ipcc.ch/report/ipcc-technical-guidelines-for-assessing-climate-change-impacts-and-adaptations-2/>
- Delft, N.L. Dialogue o. (2003). *Dialogue on water and climate*, Delft, The Netherlands: Dialogue on Water and Climate.
- DelGenio AD, Lacis AA, Ruedy RA (1991) Simulations of the effect of a warmer climate on atmospheric

- EEA (European Environmental Agency), (2024). European Climate Risk Assessment. EEA Report No 1/2024. doi:10.2800/204249; <https://www.eea.europa.eu/publications/european-climate-risk-assessment>
- European Commission, EC (2021). Commission notice - technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027; <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/23a24b21-16d0-11ec-b4fe-01aa75ed71a1/language-en>.
- Ferguson G, Gleeson T (2012) Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nat Clim Chang* 2:342–345.
- Freni, G and Sambito, M. (2024). Climate change impact on urban water distribution and urban water demand. The International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). *Hydrolink Magazine*, 24, 5pp.
- Giustolisi, O., Mazzolani, G., Berardi, L., & Laucelli, D. B. (2024). From advanced hydraulic modelling to performance indicator for the efficiency of investments in leakage management of pressurized water systems. *Water Research*, 258, 121765.
- Gourbesville, Ph. and Soo, T. (2023). Water engineering transforming the future with IAHR, *Hydrolink* 4; <https://www.iahr.org/index/detail/1282>.
- Grabowski, Z. J., Chang, H., & Granek, E. F. (2018). Fracturing dams, fractured data: Empirical trends and characteristics of existing and removed dams in the United States. *River Research and Applications*, 34(6), 526–537. <https://doi.org/10.1002/rra.3283>
- Graham, J. (2019). GSS Engineering Consultants Ltd, Cost Comparison of Dam Repair/Rebuild vs Decommissioning + Before & After Pics. <http://www.ontarioriversalliance.ca/wp-content/uploads/2019/06/Summary-of-Dam-Removal-Costs-GSS-Engineering-Consultants-Ltd.-7.pdf>.
- He, C., Bryan, B. A., Li, J., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., & Fang, Z. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12(1).
- Headwater Economics. (2016). Dam Removal: Case Studies on the Fiscal, Economic, Social, and Environmental Benefits of Dam Removal, <http://headwaterseconomics.org/economic-development/local-studies/dam-removal-case-studies>
- Held IM, Soden BJ. (2000) Water vapor feedback and global warming. *Ann Rev Energy Environ* 25:441–475.
- Ho, M., Lall, U., Allaire, M., Devineni, N., Kwon, H. H., Pal, I., Raff, D., & Wegner, D. (2017). The future role of dams in the United States of America. *Water Resources Research*, 53(2), 982–998. <https://doi.org/10.1002/2016wr019905>
- <https://jaspers.eib.org/knowledge/publications/climate-proofing-of-water-and-wastewater-projects>
- humidity. *Nature* 351:382–385.

- Huntington TG (2006) Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *J Hydrol.* 319:83–95.
- Hydro Review, (2020). Your Dedicated Source of Hydropower News. (n.d.). Hydro Review. <https://www.hydroreview.com/2017/02/22/dealing-with-sediment-effects-on-dams-and-hydropower-generation/>
- IPCC (United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). Summary for Policymakers – Impacts, adaptation and vulnerability; in: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikoff, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds) Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 996pp.
- JASPERS Publications Office (2023). Approach to climate proofing for Water and Wastewater Projects. European Investment Bank;
- Kabat, P., Schulze R.E., Hellmuth M.E. and J.A. Veraart (2003). Coping with Impacts of Climate Variability and Climate Change in Water Management: A Scoping Paper. DWC-Report no. DWCSSO-01 International Secretariat of the Dialogue on Water and Climate, Wageningen, Netherlands.
- Koç, C. (2015). A study on the role and importance of irrigation management in integrated river basin management”. *Environmental Monitoring and Assessment.* Volume 187, Issue 8, 488, 1-20
- Koç, C. (2017). A Study on Importance and Role of Irrigation and Hydropower Plant Operation in Integrated River Basin Management. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering.* Volume 6, 1-10
- Koç, C. (2018). A Study on Operation Problems of Hydropower Plants Integrated with Irrigation Schemes Operated in Turkey”. *International Journal of Green Energy.* Volume 15, Issue 2, 129-135.
- Koç, C. (2022). Entegre Kentsel Su Yönetimi, Kentsel Su Güvenliği ve Değerlendirme Yöntemi Üzerine Bir Çalışma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Sayı 38, 282-295.
- Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., Fu, K., Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuil, C., Sumi, T., Wang, H.-W., Wang, Z., Wei, Z., Wu, B., Wu, C., & Yang, C. T. (2014). Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2(5), 256–280.
- Kopytkovskiy, M., Geza, M. and McCray, J.E. (2015): Climate-change impacts on water resources and hydropower potential in the Upper Colorado River Basin, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 473-493.
- La Loggia, G., Puleo, V., & Freni, G. (2020). Floodability: A new paradigm for designing urban drainage and achieving sustainable urban growth. *Water Resources Management*, 34, 3411-3424.
- Liu, Z., Ying, J., He, C., Guan, D., Pan, X., Dai, Y., ... & Bryan, B. A. (2024). Scarcity and quality risks for future global urban water supply. *Landscape Ecology*, 39(2), 10.

- Loaciga HA, Valdes JB, Vogel R, Garvey J, Schwarz H (1996) Global warming and the hydrologic cycle. *J Hydrol* 174:83–127
- Maeck, A., DelSontro, T., McGinnis, D.F., Fischer, H., Flury, S., Schmidt, M., Fietzek, P. and Lorke, A. (2013): Sediment trapping by dams creates methane emission hot spots, *Environ. Sci. Technol.*, 47(15), 8130–8137.
- Massachusetts Government, USA. (2019). Economic Benefits from Aquatic Ecological Restoration Projects in Massachusetts, [https:// www.mass.gov/doc/economic-benefits-from-aquatic-ecological-restoration-projects-in-massachusetts-summary-of/download](https://www.mass.gov/doc/economic-benefits-from-aquatic-ecological-restoration-projects-in-massachusetts-summary-of/download)
- McCully, P. (1996). Getting Old: Dam Aging and Decommissioning. *International Rivers*. Accessed July 8, 2018 at <https://www.internationalrivers.org/getting-old-dam-aging-and-decommissioning>.
- Milligan, B. (2013). Massively Redistributed in Space and Time. *Free Association Design*. <https://freeassociationdesign.wordpress.com/2013/09/02/massively->
- Mouris, K., Schwindt, S., Pesci, M.H., Wieprecht, S. and Haun, S. (2023): An interdisciplinary model chain quantifies the footprint of global change on reservoir sedimentation, *Scientific Reports*, 13, 20160.
- Nohara, D. (2024). Interdependencies between water and climate change mitigation through hydropower energy production by reservoirs. *The International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). Hydrolink Magazine*, 26, 5pp
- Nohara, D., Sato, Y. and Sumi, T. (2023): Impact of Climate Change on Seasonal Operation of Hydropower Dam Reservoir in Heavy Snowfall Area in Japan Using 150-year Continuous Climate Experiment, *Proc. 40th IAHR World Congress, Vienna*, 1009–1105.
- Nohara, D., Suzuki, S. and Sato, Y. (2018): Impact assessment of climate change on operation of reservoir systems for water use in Japan, *Proc. 21st IAHR-APD Congress, Yogyakarta*, 755–764.
- O’Gorman PA (2012) Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change. *Nat Geosci* 5(10):697–700.
- Osakada, Y. and Nakakita, E. (2018): Future change of occurrence frequency of Baiu heavy rainfall and its linked atmospheric patterns by multiscale analysis, *SOLA*, 14, 79–85.
- Ostaneck, K. (2024). Inside the IPCC: What’s next for Climate Science; [https:// unfoundation.org/blog/post/inside-the-ipcc-whats-next-for-climate-science/](https://unfoundation.org/blog/post/inside-the-ipcc-whats-next-for-climate-science/)
- Şen, Z. (2020). Water Structures and Climate Change Impact: a Review. *Water Resources Management* 34:4197–4216.
- Shrestha AB, Aryal R (2011) Climate change in Nepal and its impact on Himalayan glaciers. *Reg Environ Chang* 11:65–77.
- Slatyer, A. (2023): Water-dependency of the Paris Agreement, *Hydrolink*, 3/2023, 6–9.

- Stamou, A., Mitsopoulos, G., and Koutroulis, A. (2024). Proposed Methodology for Climate Change Adaptation of Water Infrastructures in the Mediterranean Region, *Environ. Process.* 11, 12;
- Sumi, T., Okano, M., & Takata, Y. (2004). Reservoir Sediment Management with Bypass Tunnels in Japan [Review of Reservoir Sediment Management with Bypass Tunnels in Japan]. In *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation* (pp. 1036– 1043).
- Tabari, H., Hosseinzadehtalaei, P., Thiery, W. and Willems, P. (2021): Amplified drought and flood risk under future socioeconomic and climate change, *Earth's Future*, 9, e2021EF002295.
- Taylor IH, Burke E, McColl L, Falloon PD, Harris GR, McNeall D (2013) The impact of climate mitigation on projections of future drought. *Hydrol Earth Syst Sci* 17(6):2339–2358.
- Trenberth KE (1999) Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change* 42:327–339.
- U.S. Army Corps of Engineers (2007). Statement of the Honorable J. P. Woodley, Assistant Secretary of the Army (Civil Works), before the Committee on Transportation and Infrastructure, United States House of Representatives on the 'Army Civil Work's Response to Climate Change and Energy Independence'. May 11, 2007.
- UN (United Nations), (2023). Blueprint for Acceleration: Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report on Water and Sanitation, Executive Summary; <https://www.unwater.org/publications/sdg-6-synthesis-report-2023>.
- USSD (United States Society on Dams). (2010). The Aging of Embankment Dams. United States Society on Dams. Accessed June 30, 2018 at <https://www.ussdams.org/wp-content/uploads/2016/05/aging.pdf>
- Vidal JP, Martin E, Kitova N, Najac J, Soubeyroux J-M. (2012). Evolution of spatiotemporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios. *Hydrol Earth Syst Sci* 16(8):2935–2955.
- Wang, Z., & Hu, C. (2009). Strategies for managing reservoir sedimentation. *International Journal of Sediment Research*, 24(4), 369–384.
- Werner AD, Ward JD, Morgan LK, Simmons CT, Robinson NI, Teubner MD. (2012). Vulnerability indicators of sea water intrusion. *Ground Water* 50(1):48–58.
- Wieland, M. (2010). Life-span of storage dams. *International Water Power and Dam Construction International Water Power*. (n.d.). [Www. Waterpowermagazine.Com](http://www.waterpowermagazine.com). <http://www.waterpowermagazine.com>
- World Bank. (2006). Getting Africa on Track to Meet the MDGs on Water and Sanitation: A Status Overview of Sixteen African Countries. *Water and Sanitation Program – Africa Regional Office*, 107 pp.
- World Bank. (2008). *Water and Climate Change: A Review of Investments and Exposure*. Technical Report 3. June, 2008.



CAM SEKTÖRÜNDE İŞ KAZALARI VE MESLEK HASTALIKLARI

Hale YILDIZAY¹, Remzi BEŞİKTAŞ²

1 Doç. Dr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Güzel Sanatlar Meslek Yüksek Okulu, Çini sanatı ve Tasarımı Bölümü, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, hale.yildizay@dpu.edu.tr, Tel:05055276767, Orcid no: 0000-0002-3896-9912

2 Öğr.Gör.Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Kütahya Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Mülkiyet Koruma Ve Güvenlik Bölümü, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, remzi.besiktas@dpu.edu.tr Tel:05054621914, Orcid no: 0000-0002-9638-6256

Türkiye'deki cam üretimi Anadolu'ya yerleşen Selçuklular döneminden başlamaktadır. Osmanlı imparatorluğu döneminde camcılık ve teknikleri oldukça gelişmiştir. Osmanlı döneminde camcılığın geleneksel anlamda yapıldığı uzun yıllar boyunca küçük atölyelerde sürdürüldüğü, merkezinin İstanbul ve çevresi olduğu görülmektedir. Osmanlı imparatorluğunun son dönemlerinde cam üretimi durdurulmuş ve bu küçük işletmeler kapatılmıştır. Cumhuriyetin ilanından sonra, 17 Şubat 1934'te Türkiye Şişe Cam Fabrikaları A.Ş.'nin kurulması ile Türk camcılığı tekrar düzenli üretime başlamıştır. 90 yıllık geçmişe sahip olan Türk Cam Sanayii bu süreçte gelişmiş, büyümesini sürdürmüş ve bu fabrikayı takiben değişik cam üretimi yapan birçok fabrika kurulmuştur (Karasu, B & Ay, N.2000).

Camda kullanılan hammaddelerin tamamına yakını ülkemizde çıkarılmakta olduğundan dışa bağımlılığı az olan bir sektördür. Cam; temel olarak silika kumu, kireçtaşı ve soda gibi inorganik hammaddelerin harmanlanarak karıştırılması ve 1500-1700°C arasındaki yüksek sıcaklıkta eritilmesiyle üretilmektedir. Harmanlama birbiriyle karıştırılmış hammaddeleri cam dönüştürme işleminin ilk basamağıdır. Bu aşamada yapılan hatalar prosesin tüm diğer aşamalarını etkilemektedir. Bunu takiben karıştırılmış hammaddeler cam üretim fırınına beslenir ve dekompozisyon yoluyla oksitlerine dönüşmelerine yetecek sıcaklık derecelerine kadar ısıtılmaktadırlar. Böylece önce dekompozisyon ardından ergime ya da daha önceden ergimiş bir hammaddenin içinde çözünme yoluyla oksitlerine dönüşmektedirler. Meydana gelen kimyasal reaksiyonlarda ortaya çıkan gazlar yüzeye doğru yükselirken ergimiş camı bir miktar karıştırarak ortamı terk ederler. Bütün bu olayların meydana gelmesi yüksek sıcaklık gerektirdiğinden elde edilen camın işlenebilmesi ve nihai ürün olarak şekillendirilebilmesi için soğutulması gerekir (Şişecam, t.y.).

Yüksek sıcaklıklarda erimiş cam, üretilecek ürünün türüne göre farklı şekillendirme yöntemleriyle işlenmektedir.

Düz Cam; float cam yöntemi kullanılarak, eritilmiş cam bir kalay banyosuna dökülür ve yüzey gerilimleriyle düzleştirilir. Cam şişeler ve kaplar; kalıplama ve şişirme teknikleriyle üretilmektedirler. Cam elyaf üretiminde ince cam lifleri çekme işlemiyle elde edilmektedir. Cam levhaların üretimi; Silindirme veya döküm yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Cam üretilirken soğutma işlemi şekillendirilmiş camda, kontrollü bir şekilde yapılarak iç gerilimlerin oluşması önlenir. Bu işlem, tavlama yani camın dayanıklılığını artıran bir işlemdir. Cam ürünleri çeşitli yüzey işlemleri (kaplama, cilalama, lamine etme) ile son haline getirilir (Karasu, B & Ay, N.2000; Şişecam, t.y.).

Camlar sertlik, şeffaflık, kimyasal dayanıklılık, ısıya dayanım, elektriksel ve termal yalıtkanlık gibi birçok özelliği içinde bulunduran bir malzeme türüdür. Bu özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahip, çok yönlü bir malzemedir. Cam sağlık, beyaz eşya, sofa eşyası, ambalaj, inşaat, otomotiv, enerji ve elektronik gibi birçok alanda kullanılan stratejik bir malzeme durumundadır. Türkiye, özellikle son yıllarda cam sanayisinde üretim kapasitesi ve teknolojik yatırımlarla öne çıkmaktadır. Cam sektöründe üretim dünya ekonomisindeki gelişmelerle paralel olarak yıllık olarak ortalama %2 ila 4 arasında artmaktadır. Ülkemizde camın temel gruplarını meydana getiren cam ev eşyası, düzcam (işlenmiş camlarda dahil), cam ambalaj, cam yünü, taş yünü ve cam elyafının üretimi en ileri teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilmektedir (TÜBİTAK, t.y.; Şişecam, t.y.).

Cam endüstrisinde; hammadde hazırlanmasından, üretimine, şekillendirilmesinden sevk edilmesine kadar geçen birçok süreç bulunmaktadır. Bu süreçler kendi içerisinde pek çok tehlike ve riski barındırmaktadır. Bu nedenle, çalışanların sağlığını korumak, iş kazalarını ve meslek hastalıklarını önleyebilmek için iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamaları, kritik bir öneme sahiptir.

Cam sektöründe üretim esnasında fiziksel, kimyasal, ergonomik ve psikososyal riskler, ortaya çıkabilecek riskler içerisinde yer almaktadır.

Cam işletmelerinde; çalışanlar cam kesimi, taşınması veya işlenmesi sırasında oluşan keskin kenarlardan kaynaklanan kesiklere; cam üretimi esnasında yüksek sıcaklıkta çalışılan fırınlardan dolayı termal yanıklara ve işletmelerde kullanılan makinelerden ortaya çıkan yüksek düzeydeki sestten dolayı işitme kayıpları gibi fiziksel risklere maruz kalabilmektedirler. Ayrıca camın montaj işleri sırasında kaygan zeminlerde ve yüksekte yapılan işlerde kayıp düşme gibi fiziksel risk etmenleriyle karşılaşmaktadırlar.

Ayrıca cam üretiminde kullanılan katkı maddeleri, boya ve kaplama işlemleri sırasında kimyasallara; cam kesme, taşlama ve cilalama sırasında ortaya çıkan ince cam tozlarından kaynaklanan solunum problemlerine maruz kalma riskleri ortaya çıkabilmektedir.

Cam malzemelerinin taşınması ve yerleştirilmesi sırasında omurga yaralanmaları; cam işletmelerinde camın şekillendirilip işlenmesi sırasında sürekli aynı bedensel hareketleri yapmak, kas-iskelet sisteminde rahatsızlıklara sebebiyet verip ergonomik riskler oluşturmaktadır.

Cam sektöründe üretim kesintisiz bir şekilde devam etmek üzere tasarlanmış bir modele sahiptir. Bu yüzden çalışanlarda yoğun bir üretim

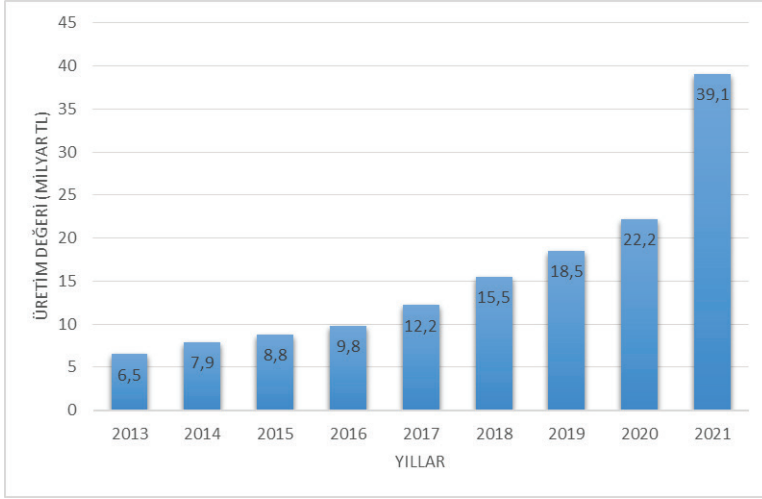
temposunda çalışmaktadır. Üretim esnasında çok fazla dikkat gerektiren kısımlarda stres ve yorgunluk çalışanlarda psikososyal risklere neden olabilmektedir (Abdel-Rasoul, Al-Batanony, Abu-Salem, Taha ve Unis F 2013; Ateş, Salman, ve Bozkurt, 2021; Adel Hasbo Abd El Rahman, Sobhy Abd-Elaziz, ve Atta Mohamed, 2022).

Ülkemizde çalışma hayatında meydana gelen iş kazaları ve meslek hastalıklarıyla ilgili düzenli veriler Sosyal Güvenlik Kurumunca yayınlanan İstatistik Yıllıklarından elde edilebilmektedir. Bu çalışmada iş sağlığı ve güvenliği bağlamında “tehlikeli” veya “çok tehlikeli” sınıfta yer alan cam ve cam ürünlerinin imalatı faaliyet alanında 2013 ve 2023 yılları arasında iş kazası geçiren ve meslek hastalığına tutulan sigortalı sayılarının incelenmesi amaçlanmaktadır.

Cam Sektöründe Üretim ve İstihdam Durumu

2021 yılında küresel boyutta toplam cam üretimi 2020 yılı üretimi ile kıyaslandığında %6,1 oranında artarak 39,12 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Kuzey Amerika ve Çin ile birlikte Avrupa Birliği tüm dünyada en büyük cam üreticisi konumundadır. Türkiye ise düz cam imalinde Avrupa’daki ülkelerde 1. Dünyada ise 5. sırada yer almakta iken diğer cam ürünleri imalatında da hem Avrupa’da hem de dünyada üst sıralarda bulunmaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022).

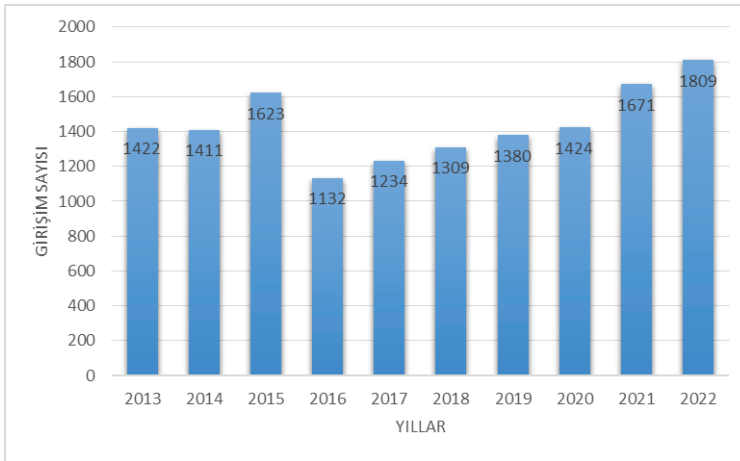
Düz cam üretimi, cam elyaf imalatı, çukur cam imalatı, düz camın şekillendirilmesi ve işlenmesi, ve diğer camların üretimi ve şekillendirilmesini (teknik amaçla üretilen camlar dahil) kapsayan cam sektöründe 2013 – 2021 yılları arasında gerçekleştirilen yıllık üretim değerleri Şekil 1’ de verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 1. Cam sektörü üretim değerleri (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023)

Grafikten de görüleceği üzere 2021 yılında üretim değeri daha önceki yıllara göre önemli ölçüde artmış ve 2020 yılına göre bu artış %76.1 oranında gerçekleşmiştir.

Türkiye’de cam sektöründe faaliyet gösteren girişim sayısı ile ilgili veriler Şekil 2’de gösterilmiştir. 2022 yılı itibari ile sektörde toplam 1809 girişim faaliyet göstermektedir. Şekil 3’te çalışan sayılarına ilişkin verilen grafik incelendiğinde ise söz konusu girişimlerde 2022 yılı itibari ile toplam 41893 çalışanın istihdam edildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2. Cam sektörü girişim sayıları (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023)



Şekil 3. Cam sektörü çalışan sayıları (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023)

Cam Sektöründe İş Kazaları ve Meslek Hastalıkları

Uluslararası Çalışma Örgütü'nün (ILO) tahminlerine göre her sene yaklaşık 3 milyon çalışan iş kazaları ve meslek hastalıkları sonucu yaşamını kaybetmektedir. Bu sayı 2015 ile karşılaştırıldığında %5'ten fazla bir artış göstermiştir. Yine her yıl 395 milyon çalışan ise ölümcül olmayan iş kazaları geçirmektedir. Bu durum küresel ölçekte iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesi konusundaki zorlukların devam ettiğini ve İş Sağlığı ve Güvenliğinin çalışma hayatı açısından sahip olduğu önemi tekrar ortaya koymaktadır (ILO, 2023).

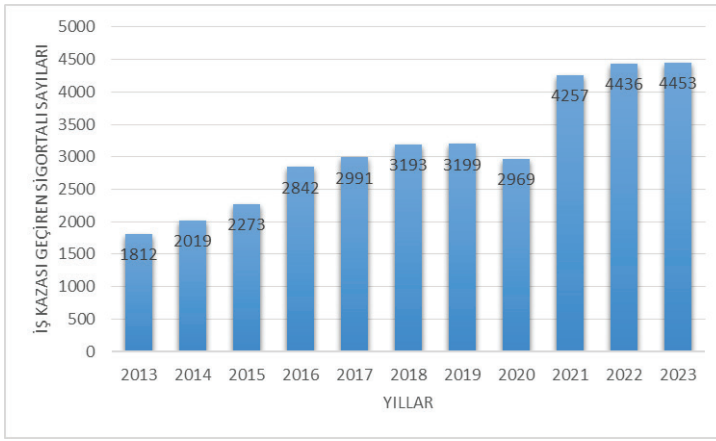
Ülkemizde iş sağlığı ve güvenliği hususunda işverenlerin ve çalışanların görevlerini, sorumluluklarını, yetkilerini, yükümlülüklerini ve haklarını düzenleyen kanun olan 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununda iş kazası “işyerinde veya işin yürütümü nedeniyle meydana gelen, ölüme sebebiyet veren veya vücut bütünlüğünü ruhen ya da bedenen engelli hâle getiren olay” olarak, meslek hastalığı ise “mesleki risklere maruziyet sonucu ortaya çıkan hastalık” olarak tanımlanmaktadır (Mevzuat Bilgi Sistemi, 2012a)

İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliğine göre cam sektörü yani cam ve camdan üretilen ürünlerin imalatı kapsamında yer alan çukur cam imalatı, düz cam imalatı, cam elyafı imalatı, düz camın şekillendirilmesi ve işlenmesi, faaliyet alanlarındaki işyerleri çok tehlikeli sınıfta yer alırken, diğer camların üretimi ve işlenmesi (teknik amaçla üretilen cam eşyalar dahil) faaliyet alanındaki işyerleri ise genellikle tehlikeli sınıfta yer almaktadır.

Bu çalışmada Sosyal Güvenlik Kurumu istatistiklerinden faydalanılarak cam ve cam ürünleri üretimi faaliyet alanında 2013 – 2023 yılları arasında iş kazası geçiren ve meslek hastalığına tutulan Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanununun 4-1/a maddesi kapsamındaki sigortalı sayıları incelenmiştir.

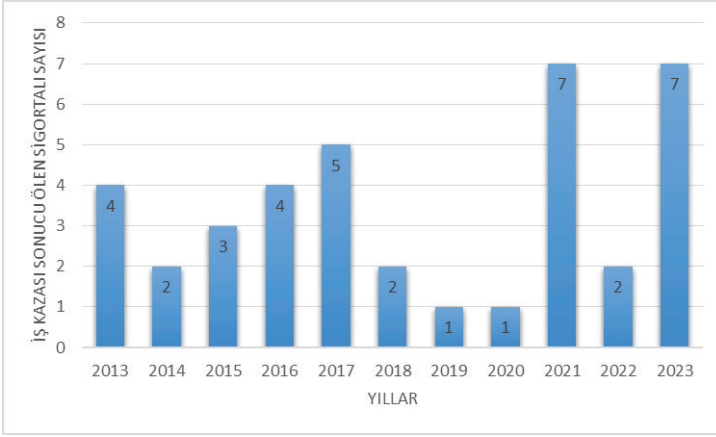
Bulgular

Cam ve cam ürünleri imalatı faaliyet alanında 2013 – 2023 yılları arasında iş kazası geçiren sigortalı sayıları ile ilgili veriler Şekil 4'te gösterilmiştir.



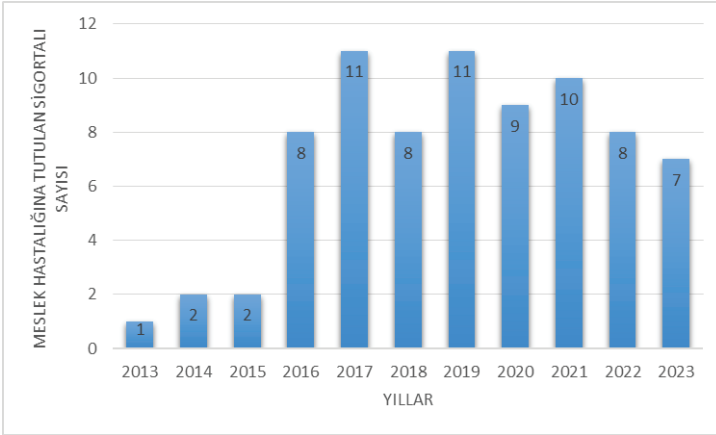
Şekil 4. Cam ve cam ürünleri faaliyet alanında iş kazası maruz kalan sigortalı çalışanların yıllara bağlı dağılımı (Sosyal Güvenlik Kurumu, t.y.)

Şekil 4'te bakıldığında iş kazası yaşayan sigortalı çalışan sayısının 2020 yılı dışında her geçen yıl doğrusal olmayan bir şekilde arttığı ve 2023 yılında bu sayısının, 2013 yılında iş kazası geçiren sigortalı sayısının yaklaşık 2,5 katına ulaştığı görülmektedir. Aynı zaman aralığında iş kazası sonucu hayatını kaybeden sigortalı sayıları ile ilgili veriler Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu süreçte cam ve cam ürünleri imalatı faaliyet alanında toplamda 38 sigortalı hayatını kaybetmiştir.



Şekil 5. Cam ve cam ürünleri faaliyet alanında iş kazası sonucu hayatını kaybeden sigortalıların yıllara bağlı dağılımı (Sosyal Güvenlik Kurumu, t.y.)

Yine 2013 – 2023 yılları arasında cam ve cam ürünleri imalatı faaliyet alanında meslek hastalığına tutulan sigortalı sayıları Şekil 6’ da gösterilmiştir. Söz konusu zaman aralığında 77 sigortalının meslek hastalığına tutulduğu görülmektedir. Bu süreçte meslek hastalığı sonucu hayatını kaybeden sigortalı olmamıştır.



Şekil 6. Cam ve cam ürünleri faaliyet alanında meslek hastalığına tutulan sigortalıların yıllara bağlı dağılımı (Sosyal Güvenlik Kurumu, t.y.)

SONUÇ

Şekil 2 incelendiğinde cam sektöründeki girişim sayısının 2016 yılından sonra sürekli olarak arttığı ve şekil 3 incelendiğinde ise sektörde çalışan sayılarının ise 2019 yılı haricinde 2013 – 2022 yılları arasında yine sürekli olarak arttığı görülmektedir. Benzer bir değişimin 2013 – 2023 yılları arasında (2020 yılı hariç) iş kazası geçiren sigortalı sayıları içinde meydana geldiğini söylemek mümkündür (Şekil 4). 30.06.2012 yılında yayınlanan ve yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu bu konuda önemli bir milattır. Bu kanun ile çalışanları ve işverenlerin görev, sorumluluk, yetki ve yükümlülükleri ile hakları tekrar düzenlenmiş, özellikle işverenler açısından risk değerlendirmesi, acil durum planlarının hazırlanması, işyerlerinin iş güvenliği konusunda örgütlendirilmesi, konu ile ilgili gereken sayıda ve nitelikte personelin görevlendirilmesi, çalışanların bilgilendirilmesi, eğitimi ve sağlık gözetimlerinin sağlanması gibi konularda yükümlülükler tanımlanarak iş sağlığı ve güvenliği koşullarının iyileştirilmesi dolayısıyla da iş kazalarının ve meslek hastalıklarının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Ancak iş kazası geçiren sigortalı sayılarının 2013 yılı ile 2023 yılları arasında artmaya devam etmesi ve bu artışın sektördeki çalışan sayısındaki artıştan daha yüksek bir eğilime sahip olması iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması konusundaki zorlukların devam ettiği, uygulamada hala bazı eksikliklerin ve aksaklıkların sürdüğü şeklinde yorumlanabilir. 2020 yılındaki azalmada pandemi sürecinde uygulanan farklı çalışma yöntemlerinin de katkısı olabilir. Fakat 2021 yılında iş kazası geçiren sigortalı sayısı 2020 yılındaki sayının yaklaşık 1,4 katına çıkmış ve daha sonraki yıllarda da bu düzeyde gerçekleşmiştir.

Meslek hastalıkları, çalışanın hastalığa neden olan etken ile temasından çok uzun süre sonra da ortaya çıkabilmekte ya da çalışanın etkene maruziyetinin bitiminden çok sonra da teşhis edilebilmektedir. Dolayısıyla tespit edilen meslek hastalıklarının yıllara bağlı değişiminin yorumlanması iş kazaları kadar kolay olmamaktadır.

Cam üretimi, modern sanayinin önemli bir parçasını oluşturmakta olup, cam ve cam ürünleri çeşitli alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, bu süreç, yüksek sıcaklıklar, gürültü gibi fiziksel faktörlerin yanında, kimyasal, ergonomik ve psikososyal tehlikelerle dolu bir çalışma ortamı sunarak, çalışanlar için ciddi riskler barındırmaktadır. Camın işlenmesi sırasında yaşanan kazalar ve ortaya çıkan meslek hastalıkları, iş sağlığı ve güvenliği bakımından dikkat edilmesi gereken önemli sorunlardır.

Cam sektöründe yaşanan bu risklerin ortadan kaldırılması için çalışanlara düzenli iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin verilmesi, kesilmeler,

yanıklar ve kimyasallara maruziyete karşı uygun kişisel koruyucu ekipmanların kullanılmasının sağlanması, bedensel hasar ve işitme kayıplarının azaltılabilmesi için makinelerin düzenli olarak bakımının yapılması ve arızaların önlenmesi gibi tedbirler alınması zorunludur. Cam sektöründe çalışan tüm çalışanlara mesleki tehlikeler hakkında periyodik eğitim ve çalıştaylar düzenlenerek, kişisel koruyucu donanımların önemi ve faydası, doğru kullanımı ve ilk yardım konularına vurgu yapılmalıdır.

İşverenler, riskleri minimize etmek ve çalışan sağlığını korumak için gerekli tüm İSG tedbirlerini almalı, bu konuda çalışanlarla sürekli iş birliği yapmalıdır. Çalışanların sağlık durumlarının izlenmesi erken vaka tespiti ve meslek hastalıklarının erken teşhisi amacıyla periyodik sağlık kontrolleri yapılması sağlanmalıdır.

İyi bir İSG yönetimi, hem iş kazalarını önler hem de sektörde verimliliği artırır. İş güvenliğine öncelik vermek; sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamını desteklemek, üretkenliği artırmak ve iş kazalarıyla ilişkili maliyetleri azaltmak hem çalışanlar için hem de işverenler için çok önemlidir.

KAYNAKLAR

1. Abdel-Rasoul GM, Al-Batanony MA, Abu-Salem ME, Taha AA & Unis F (2013) Some Health Disorders among Workers in a Glass Factory. *Occup Med Health Aff* 1:106. doi: 10.4172/2329-6879.1000106
2. Adel Hasbo Abd El Rahman, A., Sobhy Abd-Elaziz, M., & Atta Mohamed, W. (2022). Occupational Health Hazards among Workers in Glass Manufacture Industries. *Journal of Nursing Science Benha University*, 3(2), 652-663. doi: 10.21608/jnsbu.2022.247687
3. Ateş, İ., Salman, S., & Bozkurt, Y. (2021). Assessment of hazards and risks in glass products production and processing business during the pandemic. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 855-865. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.874295>
4. ILO, 26.11.2023, Nearly 3 million people die of work-related accidents and diseases. <https://www.ilo.org/resource/news/nearly-3-million-people-die-work-related-accidents-and-diseases>. (Erişim tarihi: 12.12.2024)
5. Karasu, B & Ay, N., (2000), Kız Meslek Liseleri İçin Cam Teknolojisi, Milli Eğitim
6. Mevzuat Bilgi Sistemi, 2012a, İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.6331.pdf> (Erişim tarihi: 13.12.2024)
7. Mevzuat Bilgi Sistemi, 2012b, İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği. <https://mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=16909&MevzuatTur=9&MevzuatTertip=5> (Erişim tarihi: 13.04.2024)
8. Sosyal Güvenlik Kurumu, t.y., SGK İstatistik Yıllıkları. <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/> (Erişim tarihi: 09.12.2024)
9. Şişecam, t.y. Cam Teknolojisine Giriş.
10. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022, Cam Sektör Raporu 2021. <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sektor-raporlari/mu2812011402> (Erişim tarihi: 12.12.2024)
11. TÜBİTAK, t.y., Cam Sanayii Raporu, https://tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/vizyon2023/mm/Ek2d.pdf?locale=tr (Erişim tarihi: 12.12.2024)
12. Türkiye İstatistik Kurumu, 2023, İstatistik Veri Portalı. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=sanayi-114&dil=1> (Erişim tarihi: 12.12.2024)