



# MÜHENDİSLİKTE ÇAĞDAŞ VE YENİLİKÇİ ARAŞTIRMALAR



All Sciences Academy



*MÜHENDİSLİKTE  
ÇAĞDAŞ VE  
YENİLİKÇİ  
ARAŞTIRMALAR*

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA





*Mühendislikte Çağdaş ve Yenilikçi Araştırmalar*  
*Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA*

**Dizayn:** All Sciences Academy Design

**Basım Tarihi:** Mart 2026

**Yayıncı Sertifika Numarası:** 72273

**ISBN:** 978-625-8676-90-7

© All Sciences Academy

[www.allsciencesacademy.com](http://www.allsciencesacademy.com)

[allsciencesacademy@gmail.com](mailto:allsciencesacademy@gmail.com)

## İÇERİK

<b>1. Bölüm</b>	<b>5</b>
Doğal Perlit ve Genleştirilmiş Perlitin Farklı Analiz Teknikleri Kullanılarak Enstrümantal Karakterizasyonu <i>Ceyda BİLGİÇ, Şafak BİLGİÇ</i>	
<b>2. Bölüm</b>	<b>25</b>
Nadir toprak elementleri (NTE), uygulama alanları ve sürdürülebilirlik <i>Fehim FİNDİK</i>	
<b>3. Bölüm</b>	<b>43</b>
Filament Sarma Yöntemi ile Kompozit Üretimi; Proses Parametreleri ve Uygulamaları <i>Hüseyin ÜNAL, Cihat ARDA</i>	
<b>4. Bölüm</b>	<b>58</b>
Çimentolu Harç ve Betonlarda Polipropilen Liflerin Performansı <i>Ömer Faruk PORTAKAL, Özlem ÇALIŞKAN, Ahmet Ferdi ŞENOL</i>	
<b>5. Bölüm</b>	<b>72</b>
Endüstriyel İşletmelerde Enerji Yönetimi ve Verimliliği <i>Şengül GÜVEN</i>	



# **Doğal Perlit ve Genleştirilmiş Perlitin Farklı Analiz Teknikleri Kullanılarak Enstrümantal Karakterizasyonu**

**Ceyda BİLGİÇ<sup>1</sup>**

**şafak BİLGİÇ<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup> Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü ceydabilgic@gmail.com  
Orcid No: 0000-0002-9572-3863

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü safakbilgic@gmail.com  
Orcid No: 0000-0002-9336-7762

## ÖZET

Perlit, genellikle açık gri renkli, riyolitik bileşime sahip ve %2 ila %5 oranında su içeren camsı bir volkanik kayadır. Genleştirilmiş perlit, çeşitli diğer endüstriyel minerallerle rekabet halindedir. Perlit, inşaat malzemeleri, tarım, tıp ve kimya endüstrisi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca, genleştirilmiş perlit agregası (EPA), tuğla, sıva, boru, duvar ve zemin bloğu gibi yapı elemanlarında kullanılmaktadır; ancak henüz betonda endüstriyel olarak kullanılmamaktadır. Bu çalışmada, doğal perlit ve genişmiş perlitin mikroyapısı, morfolojisi, kimyasal, yapısal ve termal özellikleri, X-Işını Floresan Analizi (XRF), X-ışını difraksiyon analizi (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX), Geçiş elektron mikroskobu (TEM) ve termal analiz (TGA/DTA) teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Endüstriyel kullanımını göstermek amacıyla volkanik camın (perlit) fiziko-mekanik, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile mineralojik değişiklikleri incelenmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Perlit, Karakterizasyon, XRF, XRD, FTIR, SEM, TEM, TGA.*

---

## GİRİŞ

Perlit, genellikle açık gri renkli, riyolitik bileşime sahip ve %2 ila %5 oranında su içeren camsı bir volkanik kayadır. Genleştirilmiş perlit, çeşitli diğer endüstriyel minerallerle rekabet halindedir (Kongkachuichay ve Lohsoontorn, 2006). Ticari olarak, perlit terimi, hızlı bir şekilde ısıtıldığında genleşen veya "patlayan" ve hafif, köpüklü bir malzeme oluşturan herhangi bir volkanik camı içerir. Genleşmenin gerçekleştiği sıcaklık 760 ila 1100 °C arasında değişir; hacimde 10 ila 20 kat artış yaygındır (Harben ve Kuzvart, 1997). Bununla birlikte, düşük yığın yoğunluğuna sahip bu çok yönlü, hafif malzeme, hiçbir şekilde en ucuz malzeme olmamasına rağmen popülerliğini arttırmaya devam etmektedir. Türkiye, Ege kıyıları boyunca dünyadaki bilinen perlit rezervlerinin yaklaşık %70'ine sahiptir (Uluatam, 1991). Genleştirilmiş perlitin kullanım alanları çok ve çeşitlidir ve esas olarak fiziksel ve kimyasal özelliklerine dayanır. Düşük ısı iletkenliği, yüksek ses emilimi, düşük yığın yoğunluğu ve yangına dayanıklılığı nedeniyle, perlit agregalı sıvalar geleneksel sıvalara göre birçok avantaja sahiptir. Üretilen perlitin yarısından fazlası inşaat sektörüne, özellikle yalıtım levhaları, sıva ve betondaki agrega olarak girer. Kriyojenik (aşırı düşük sıcaklık) uygulamalarda perlit, sıvılaştırılmış gaz depolama tanklarını yalıtım için kullanılır. Genleştirilmiş perlit, köklenme ortamı ve toprak düzenleyici olarak ve herbisitler, böcek ilaçları ve kimyasal gübreler için taşıyıcı olarak kullanılır. Doğru boyutlarda perlit, su ve diğer sıvıların filtrelenmesinde, gıda işleme ve ilaç üretiminde yardımcı madde olarak kullanılır. Çoğu perlitin silika içeriği genellikle %70'in üzerinde olup adsorptif olduğundan, birçok ortamda kimyasal olarak

inerttirler ve bu nedenle çeşitli süreç ve malzemelerde mükemmel filtre yardımcıları ve dolgu maddeleridir. Genleştirilmiş perlitin çeşitli kullanım alanları arasında boya, emaye, sır, plastik, reçine ve kauçuktaki dolgu maddeleri veya uzatıcılar, kimyasal reaksiyonlarda katalizör, aşındırıcı ve petrol kuyusu çimentolama karışımlarındaki ajanlar sayılabilir (Koukouzas vd., 2006).

Genleşme işlemi sırasında taneler yüzeysel olarak yumuşamaya başlar. Pirolitik aşamada, tanelerin iç katmanlarında hapsolmuş su buharlaşmaya başlar ve dışarı doğru itilir, bu da tanelerin genleşmesine neden olur. Su, buharlaşma sırasında taneleri genişletmekle kalmayıp, yumuşamış tanenin viskozitesini de düşürerek genişletme sürecinde en önemli rolü oynar (Hui ve Zhang, 2007). Genleştirilmiş perlit, artan gözeneklilik ve azalan yoğunluk gösterir. Genleştirilmiş perlit çok yönlüdür ve yüzer, düşük ısı iletkenliği, yüksek ses emilimi ve yangına dayanıklılık gösterir. Çoğunlukla inşaat sektöründe, tarımda, filtreleme yardımı olarak, adsorban malzeme olarak ve petrol sızıntılarıyla mücadele gibi çevresel amaçlar için kullanılır.

Perlit, inşaat malzemeleri, tarım, tıp ve kimya endüstrisi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca, genleşmiş perlit agregası (EPA), tuğla, sıva, boru, duvar ve zemin blokları gibi yapı elemanlarında kullanılmaktadır; ancak henüz betonda endüstriyel olarak kullanılmamaktadır. EPA, ısı ve ses yalıtkanıdır ve inşaatlarda ekonomik faydalar sağlayan hafif bir malzemedir (Topçu ve Isıkdağ, 2007). Birçok araştırmacı, perlitlerin karakteristik özelliklerini ve inşaat malzemesi olarak kullanımlarını incelemiştir (Singh ve Garg, 1991; Demirboğa vd., 2001; Demirboğa ve Gül, 2003; Lanzon ve Garcia-Ruiz, 2008; Sarı vd., 2009; Sengül vd., 2011; Celik vd., 2013; Reka vd., 2019). Bu çalışmalarda, esas olarak hafif beton ve tuğla üretiminde perlitin ısı yalıtkanı olarak kullanımı incelenmiştir.

Endüstride perlit, yatay döner veya sabit fırınlarda ya da esas olarak dikey genleşme fırınlarında genişletilir. Dikey fırınlar için genleşme sürecine ilişkin sayısal simülasyonlar (Zähringer vd., 2001; Singh ve Garg, 1991; Çelik vd., 2013) ve teorik analizler (Doğan vd., 1997) bildirilmiştir. Perlitin yüksek sıcaklıklı fırına konulmasından sonra genleşmenin 3 saniyeden daha kısa bir sürede gerçekleştiği öne sürülmüştür (Zähringer vd., 2001). Genleşme, perlitin en önemli işleme aşaması olmasına rağmen, perlit üzerine yapılan araştırma çalışmaları esas olarak özelliklere (Doğan vd., 1997; Alkan 1998; Roulia vd., 2003; Tsikouras vd., 2016) ve bu malzemenin potansiyel kullanım alanlarına (Koumanova ve Peeva-Antova, 2002; Doğan vd., 2000; Alkan ve Doğan, 2001) odaklanmaktadır. Bununla birlikte, moleküler düzeyde genleşme mekanizmasını destekleyebilecek termal işleme indüklenen yapısal değişikliklere ilişkin sorular hâlâ cevaplanmamıştır.

Endüstriyel kullanımını göstermek amacıyla volkanik camın (perlit) fiziko-mekanik, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile mineralojik değişiklikleri incelenmiştir. Doğal perlit ve genleştirilmiş perlit, kimyasal analiz (XRF), X-ışını difraksiyonu (XRD), kızılötesi (FTIR) spektroskopisi,

termal analiz (TGA/DTA), taramalı elektron mikroskobu (SEM ve SEM-EDX) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile karakterize edilmiştir. Kimyasal inceleme, perlitin yüksek oranda SiO<sub>2</sub>(%72,45) içeren asidik bir volkanik kayaç olduğunu, alkali metal oksitler açısından zengin (ağırlıkça %4,21 K<sub>2</sub>O, %3,56 Na<sub>2</sub>O) olduğunu ve yanma kaybının %3,54 olduğunu göstermektedir. XRD sonuçları, az miktarda feldspat, kuvars ve kristobalit ile birlikte belirgin bir amorf davranışa işaret etmiştir. SEM incelemeleri, belirli gözeneklerin (boyutları 50–100 µm arasında değişen) varlığıyla birlikte camsı bir yapı ortaya koymuştur. Belirlenen genleşme katsayısı, orijinal hacminin 20 katıydı. Doğal perlit ile karşılaştırıldığında, genleşmiş perlitin XRD'si, kristobalitin yeni yoğun piklerini gösterdi. SEM ve TEM, kırık veya pürüzlü kenarlara sahip düzensiz bir morfoloji ortaya çıkardı. Kimyasal ve mineralojik bileşimi temelinde, perlit, sinterleme sıcaklığını düşürmek için seramik akışkan olarak uygun bir malzeme olarak sınıflandırılır.

### X-IŞINI FLORESANS ANALİZİ (XRF)

Pumisten (sünger taşı) elde edilen perlit, %2–5 su içerir ve riyolitik veya dakitik magmanın camsı bir formuna sahiptir. Genellikle genleştirilmiş perlit olarak adlandırılan ticari ürün, malzemenin 760–1100 °C'ye ısıtılmasıyla üretilir; bu işlem, malzemenin içindeki suyu buhara dönüştürür ve malzemenin orijinal hacminin 4 ila 20 katına genleşmesine neden olurken, hafif ve yüksek gözenekli agregalar oluşturur (Dogan ve Alkan, 2004; Harben ve Kuzvart, 1997). Isıtma işlemi perlit yoğunluğunu değiştirmez (2,2–2,3 kg/dm<sup>3</sup>) ancak yığın yoğunluğu 60–80 g/dm<sup>3</sup>'e düşer. Termal işlemler sırasında, kırık kenarların çoğalması sonucu katyon değişim kapasitesinin (CEC) 20–30'dan 35–50 meq/100g'a yükselmesine ve özgül yüzey alanının 1,2'den 2,3 m<sup>2</sup>/g'a artmasına eşlik eden, amorf yapıdan kristal yapıya bir geçiş meydana gelir (Uluatam, 1991; Doğan ve Alkan, 2003).

Perlit, renk ve kimyasal bileşim açısından çoğunlukla pomza taşına benzer. Perlit diyatomit, pomza ve diğer volkanik kökenli kayaçlardan ayırmanın en etkili yolu, bunların mineralojik ve petrografik analizleridir. Volkanik kayaçların kimyasal bileşimi, klasik kimyasal silikat analizi ile belirlenmiştir. Perlit 1000 °C'de 1 saat süreyle ısıtarak yanma kaybı (LOI) belirlenmiştir; LOI %3,54 olup, perlitler için tipik aralıkta (%3-5) yer almaktadır. Doğal perlit için perlit özellikleri belirlenmiştir: beyaz ila açık gri renkli, kokusuz, açıkça görülebilen siyah cam parçacıkları içerir.

Çelik ve arkadaşları tarafından incelenen dört ham perlit kaynağına ait XRF kimyasal bileşim sonuçları ve perlitin tipik kimyasal bileşimi (Çelik vd., 2013). Sonuçlar, bileşimin büyük kısmının (ağırlıkça %90'ın üzerinde) SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CaO'dan oluştuğunu göstermektedir. Bileşim analizi, hepsi %1'in altında olan ve MgO, TiO<sub>2</sub>, MnO, BaO, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ve CuO karışımından oluşan az miktarda elementlerin varlığını göstermektedir.

Perlitin kimyasal bileşiminden elde edilen sonuçlar, analiz edilen perlitin yüksek oranda SiO<sub>2</sub> (%72,48) ve önemli miktarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13,15) içeren asidik bir volkanik kayalık olduğunu göstermektedir. Alkali metal oksitler (K<sub>2</sub>O ve Na<sub>2</sub>O) sırasıyla %4,21 ve %3,56 oranında mevcuttur (yüksek oranları temsil eder); bu, analiz edilen hammaddenin kap camı için uygun olduğunu göstermektedir (Roulia vd., 2006). Perlitin ana bileşenleri, SiO<sub>2</sub> (ağırlıkça %70–75), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ağırlıkça %12–18) gibi oksitlerin yanı sıra alkali oksitlerdir (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O). Perlit ayrıca Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO ve TiO<sub>2</sub> gibi diğer oksitleri de az miktarda içerir (Roulia vd., 2006; Kaufhold vd., 2014; Varga vd., 2015). Kimyasal analiz sonuçlarına göre, perlitin ortalama SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarlarının sırasıyla %70,68 ve %13,04 olduğu gözlemlenmiştir; bu değerler literatürle uyumludur (Topçu ve Işıkdag, 2007; Tekin vd., 2010).

Perlit, viskoz lav veya magmanın hızlı soğumasıyla oluşan doğal volkanik alüminosilikat camlardan (riolitik kayalar) biridir. Bunlar arasında obsidiyen, perlit, katrantası (pitchstone) ve hidratlanmış volkanik kül veya “pumisit” bulunur (Kogel vd., 2006; Koukouzas, 2006; Kongkachuichay ve Lohsoontorn, 2006). Perlitin temel özelliği, kimyasal olarak bağlanmış su içeriğidir. Perlitler, su içeriğine göre obsidiyen (su içeriği %2'den az), perlit (%2–5) ve katrantası (pitchstone) (su içeriği %5'ten fazla) olmak üzere üç türe ayrılır. Isıtıldığında (760–900 °C), perlit piroplastik hale gelir, genişler ve hacmi 20 kat artar. Bağlı su buharlaşır ve perlitin olağanüstü özelliklerini sağlayan çok sayıda kabarcık oluşturur: gözenekli bir yapı (artmış gözeneklilik) ve düşük ağırlık (azalmış yoğunluk). Bu tür malzeme, genişletilmiş perlit olarak bilinir; ayrıca, düşük ısı iletkenliği ve önemli ölçüde ısı direnci gösterir ve çok iyi bir ses emici görevi görür (Roulia vd., 2006; Kaufhold vd., 2014; Varga vd., 2015).

Genleştirilmiş perlit üzerine yapılan petrografik inceleme literatürde yer almaktadır. Mikrofotografiden de görüldüğü gibi, perlit camı ve gözenekli bir yapıya sahiptir. Her biri farklı mikron boyutlarına sahip sayısız gözenek bulunmaktadır. Perlitin bu yapısı onu daha hafif hale getirirken, ısı ve ses iletimi açısından büyük bir avantaj sağlar. Analizde, perlit yapısı içinde opal-CT, feldspat, mika, illit ve kuvars minerallerinin varlığı tespit edilmiştir.

Bu nedenle, XRF sonuçları ve XRD bulguları, ham perlit numunelerinin ağırlıklı olarak camdan oluştuğunu ve bu camın alkali-alkali toprak-alümino-silikat bazlı bir kimyasal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Kristal bileşikler de XRF analiz sonuçlarında bulunan bileşenlerle iyi bir uyum göstermektedir.

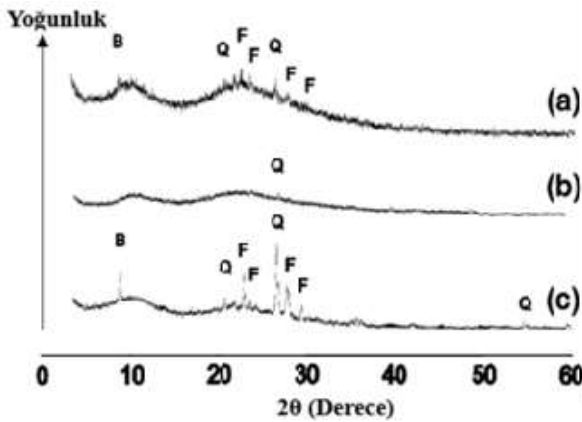
## X-IŞINI DİFRAKSİYON ANALİZİ (XRD)

Farklı kökenlere sahip ham perlit numuneleri, mevcut ana elementlerin oksitleri açısından analiz edilmiştir. Ayrıca, her bir oksidin mol yüzdesi cinsinden ifade edilen tipik bir perlit bileşimi de belirlenmiştir. Bu kimyasal analiz, perlitin çeşitli metal katyonları ile dengelenmiş negatif yüklü bir

alüminosilikat ağı olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Perlitik ağıın amorf/kristal yapısı hakkındaki bilgiler, X-ışını difraksiyon (XRD) desenlerinden elde edilebilir. Genleşme sürecinin, perlitin bir kısmının genleşmemiş halde kalmasına yol açtığı belirtilmektedir. Flotasyon yoluyla ayrıştırma işleminden sonra, daha hafif olan genleşmiş perlit ayrılabilir ve geriye kalan genleşmemiş perlit süzülerek çıkarılabilir. Ham perlit ile ısı işlem görmüş malzemenin genleşmiş ve genleşmemiş fraksiyonları üzerinde yapılan XRD ölçümlerinin sonuçları. Ham maddenin çoğunlukla amorf yapıda olduğunu ve az miktarda feldspat (F), kuvars (Q) ve biyotit (B) kristalitleri içerdiğini göstermektedir. Ham perlit içindeki kristalitlerin varlığı, perlitin kökeni ile ilişkilidir; lavın yavaş donması durumunda daha fazla kristalit oluşur. Genleştirilmiş perlit fraksiyonu açıkça amorf iken, genleştirilmemiş perlit, hammadde içinde bulunan kristalitleri ve amorf fazın bir kısmını içerir. Genleştirilmiş perlit numunelerinin, mevcut ana elementlerin oksitleri açısından kimyasal bileşimi sunulmuştur. Ayrıca, genleştirilmemiş fraksiyon, muhtemelen biyotit feldspat ve kuvarsin varlığı nedeniyle, genleştirilmiş perlit ile karşılaştırıldığında biraz daha fazla Fe, Al, Ca ve Si içerir. Bu nedenle, hem XRD hem de kimyasal bileşim sonuçları, genleşmenin yalnızca ham perlitin amorf fazında gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, tek bir tanenin genleşmesi sırasında sıklıkla iki veya daha fazla parçacığın oluştuğu gözlemlenmiştir. Görünüşe göre, amorf alanın içinde bulunan küçük kristalitler, tanenin bir bütün olarak genleşmesini engelleyerek bölünmeye neden olmaktadır.

Ayrıca XRD analizinin bir sonucu olarak (Şekil 1), perlit numunelerinin amorf silika ve opal-CT (%98) ile eser miktarda feldspat ve kuvars içerdiği bulunmuştur. Benzer bir XRD modeli Sodeyama vd. (1999) tarafından da bulunmuştur.



Şekil 1: Trachilas (Yunanistan) bölgesinden alınan perlit numunelerinin XRD desenleri (a) işlenmemiş perlit içindeki orta taneli, (b) genleşmiş perlit ve (c) genleşmemiş halleri ile B (biyotit), F (feldspat) ve Q (kuvars) (Rouliya vd., 2006).

Perlitin XRD analiz sonuçları (Şekil 1), az miktarda kristal fazlarla ilişkili yüksek oranda alüminosilikat cam fazının bir sonucu olarak, 15 ile 30° (2θ) arasında geniş bir aralıkta görülen ve en yüksek değerleri 22–26,7° aralığında gösteren tek bir karmaşık “tümsek” ile ortaya çıkan numunenin amorf davranışını göstermektedir. Az miktardaki kristal fazlar, esas olarak feldspatlar, kuvars ve kristobalit ile temsil edilmektedir. Feldspatlar, plajiyoklazlar (13,50°, 25,76°, 29,98°, 33,64°, 35,40°, 42,66°, 49,74°), K, Na-feldspatlar (23,70°, 27,40°, 27,66°) ve mikroklin (27,66, 29,49, 50,58) olarak temsil edilir. SiO<sub>2</sub> polimorflarının daha az belirgin varlığı, α-kuvars (26,67°) ve kristobalit (21,94°) ile temsil edilmektedir. Volkanik kayadaki kristal modifikasyonların varlığı, perlitin kökeni ile ilişkilidir; lavın yavaş soğuması sırasında daha fazla kristalite oluşur.

Genleştirilmiş perlitin XRD analizi sonuçları, numunenin amorf davranışını bir kez daha ortaya koymuştur; bu, yüksek oranda alüminosilikat camının bir sonucu olarak 15 ile 30° (2θ) arasında uzanan ve en yüksek değerlerin 22–26,7° aralığında görüldüğü karmaşık bir “pik”in ortaya çıkmasıyla kendini göstermiştir. Doğal perlit ile karşılaştırıldığında, genleştirilmiş perlit, mevcut kristobalit miktarında (21,94°, 28,44°, 31,40°, 36,00°) belirgin bir artış göstermektedir (Reka vd., 2019).

Bu nedenle, XRF sonuçları ve XRD bulguları, ham perlit numunelerinin ağırlıklı olarak camdan oluştuğunu ve bu camın alkali-alkali toprak-alüminosilikat bazlı bir kimyasal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Kristal bileşikler de XRF analiz sonuçlarında bulunan bileşenlerle iyi bir uyum göstermektedir.

## FOURIER DÖNÜŞÜMLÜ KIZİLÖTESİ SPEKTROSKOPİ (FTIR)

Doğal perlitin IR spektrumunda, Si-O-Si iskeletinin bükülme titreşimlerine atfedilen 786 cm<sup>-1</sup>'de bir emilim bandı görülürken, 1078 cm<sup>-1</sup>'deki bant ise Si-O-Al birimlerinin gerilme titreşimlerinin bir sonucudur (Sodeyama vd., 1999; Makreski vd., 2009). 1644 cm<sup>-1</sup>'deki bant, emilen suyun bükülme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır (Roulia vd., 2006; Varuzhanyan vd., 2006; Makreski vd., 2009), oysa 3650 cm<sup>-1</sup>'deki bant, emilen su moleküllerinin gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır (Sodeyama vd., 1999; L<sub>1</sub> ve Tomozawa, 1994).

Perlitin genleşmesi sırasında ısıl işlem ve su kaybının bir sonucu olarak, daha önce doğal perlit üzerinde tartışılan 1644 cm<sup>-1</sup> ve 3650 cm<sup>-1</sup> bantları, yani emilen suyun bükülme titreşimlerinden ve emilen su moleküllerinin gerilme titreşimlerinden kaynaklanan bantlar (Roulia vd., 2006; Varuzhanyan vd., 2006; Makreski vd., 2009), beklendiği gibi, Genleştirilmiş perlitin IR spektrumunda bulunmamaktadır. 785 cm<sup>-1</sup> ve 1047 cm<sup>-1</sup> 'deki bantlar, sırasıyla Si-O-Si ve Si-O-Al'nin Si-O gerilme titreşimlerine atfedilir (Sodeyama vd., 1999).

Perlitin FT-IR spektrumlarında, 3375 cm<sup>-1</sup> 'deki tepe noktası,

yoğunlaşmamış -OH gruplarının varlığından kaynaklanıyor olabilir.  $930\text{ cm}^{-1}$  'deki tepe noktası, Si-OH bağındaki Si-O gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Si-O-Si köprülerinin asimetrik gerilme titreşimleri  $1109\text{ cm}^{-1}$  'de gözlemlenmiştir.  $900\text{ cm}^{-1}$  'deki tepe noktası, Si-O-Al bağlarının varlığını göstermektedir (Roulia vd., 2006).  $3375\text{ cm}^{-1}$  ve  $930\text{ cm}^{-1}$  'deki tepe noktalarında hafif azalmalar görülmüştür, ancak tepe noktalarının konumları değişmemiştir. Bu, boyanın kimyasal birleşme yerine fiziksel kuvvetler yoluyla adsorban üzerinde adsorbe olduğunu açıkça göstermektedir.

Moleküler suyun deformasyon modu  $1630\text{ cm}^{-1}$  'de iyi tanımlanmış bir tepe noktası verirken,  $2800$  ile  $3800\text{ cm}^{-1}$  arasında değişen geniş ve asimetrik absorpsiyon zarfı, çeşitli ortamlardaki O-H gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır (Bertoluzza vd., 1982; Yoshino vd., 1990). Özellikle, serbest silanol gruplarının (Si-OH) O-H gerilimi, daha yüksek frekanslarda ( $3605\text{ cm}^{-1}$ ) nispeten daha keskin özelliğin sorumlusudur; oysa hidrojen bağı, O-H bağının zayıflamasına ve gerilme frekansının daha düşük değerlere kaymasına neden olur. Bu nedenle, hidrojen bağına sahip O-H grupları,  $3430$  ve  $3270\text{ cm}^{-1}$  değerlerindeki omuzlardan sorumlu olmalıdır. Bu tür hidrojen bağları, komşu silanoller veya adsorbe su molekülleri arasında ya da komşu silanol ve adsorbe su molekülleri arasında olabilir. Ayrıca, moleküler suyun  $1630\text{ cm}^{-1}$  bandı spektrumunda neredeyse kaybolmuş olsa da, aynı numunenin O-H gerilme zarfı önemli ölçüde yoğunluğunu korumaktadır. Bu durum, burada kullanılan perlitin ısıtma işlemi altında, moleküler suyun Si-OH bağlarındaki hidroksil grupları formunda bulunan suya kıyasla daha hızlı salındığını göstermektedir.

Tüm spektrumlarda  $470$  ve  $785\text{ cm}^{-1}$  frekanslarında tepe noktası gösteren ek bantlar görülmektedir. Camsı silika ve modifiye silikat camlarda benzer frekanslardaki bantlar, silikat ağının karakteristik titreşimlerine atfedilmiştir (Kamitsos vd., 1993; Ingram vd., 2000). Özellikle,  $470\text{ cm}^{-1}$  'deki bant, Si-O-Si düzlemine dik olan köprü oksijen atomunun sallanma hareketine atfedilmiştir;  $785\text{ cm}^{-1}$  'deki zayıf bant, Si-O-Si köprüsünün açığortayı boyunca oksijen atomunun bükülme hareketine atfedilirken,  $1090\text{ cm}^{-1}$  'deki yoğun bant ( $1175\text{ cm}^{-1}$  'de bir omuzla birlikte) Si-O-Si köprülerinin asimetrik gerilme titreşimlerine atfedilmiştir.

Ham perlit spektrumundaki  $930\text{ cm}^{-1}$  'deki omuz, Si-OH bağlarındaki Si-O gerilme titreşiminin tipik bir örneğidir (Kamitsos et al., 1993). Bu özellik, genişletilmiş perlit spektrumunda da bastırılmıştır; bu durum, su eliminasyonu üzerine Si-OH bağlarının Si-O-Si bağlantılarına yoğunlaştığını ve dolayısıyla daha iyi çapraz bağlı bir silikat ağının geliştiğini göstermektedir. Silikat yapısının artan çapraz bağlanması, genişlemeden sonra ham perlitin  $900$ – $1300\text{ cm}^{-1}$  aralığının yaklaşık  $20\text{ cm}^{-1}$  kaymasıyla da tutarlıdır.

Alüminosilikat bağları, yani Si-O-Al, ham perlitin FTIR spektrumları ile doğrulanmıştır. Yaklaşık  $1065\text{ cm}^{-1}$  'de titreşim, Si-O ve Al-O bağlarının kanıtıdır. Benzer şekilde,  $465$ ,  $609$ ,  $797\text{ cm}^{-1}$  dalga boyları

sırasıyla Al–O ve Si–O, Si–O–Si ve Si–O–Si bağlarıyla ilgilidir; ayrıca, 1424  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu O–C–O/CO<sub>3</sub> yani CaCO<sub>3</sub> bağı ile ilişkilidir (Cătănescu et al., 2012).

Spektrumda bulunan ana pikler arasında, SiOH grubundaki OH gerilmesine bağılı olarak 3750 ile 3300  $\text{cm}^{-1}$  arasında geniş bir bant (3600  $\text{cm}^{-1}$ ) ve H–O–H moleküler suyun asimetric ve simetric gerilme titreşimleri (3650 ile 3300  $\text{cm}^{-1}$  arasında) ile geniş bir bant ve genişletilmiş perlitin FTIR spektrumunda tipik olarak kafes ve gözenek suyunun H–O–H bükülmesine ait 1635  $\text{cm}^{-1}$  'de keskin bir tepe gözlemlenmiştir (Abalos ve Erdmann, 2003). Asimetric çapraz bağılı Si–O–Si, Al–O–Si ve çapraz bağılı olmayan Si–O gerilme titreşimlerini yansıtan ana bant, 1350 ile 850  $\text{cm}^{-1}$  arasındadır (Lee ve Van Deventer, 2003). Bant, numunelerin amorf yapısı nedeniyle geniştir ve 1050-1010  $\text{cm}^{-1}$  aralığındaki bir ana bant ile aynı alüminosilikat yapısı içindeki farklı yapısal birimlerin asimetric gerilmesine atfedilen üç uydu banttandır oluşur (SiO<sub>4</sub> tetrahedralarının yoğunlaşma derecesi) (Lee ve Van Deventer, 2003; Zhang vd., 2008). Bantın genişlemesi, 4 köprü oksijenle çevrili tetrahedral Si ile ilgili sinyalin katkısının artmasından kaynaklanmaktadır (1200  $\text{cm}^{-1}$  ), çünkü daha yüksek bağlantı değerlerine sahip türler daha yüksek enerjilerde emilim gösterir (Lee ve Van Deventer, 2003).

## **TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM-EDX) VE TRANSMİSYON ELEKTRON MİKROSKOBU (TEM)**

Işık mikroskobu sonuçları, camsı-izotropik ince taneli parçacıklar/mikrolitlerin (0,03–0,1 mm) varlığıyla izotropik camsı bir kütleli numune bileşimini göstermiştir. Hammaddede ince taneli kütlede, mikrolitlerin yanı sıra, boyutları 2 ila 3 mm arasında değişen ve kütleli içinde aşınmış kuvars fenokristalleri gözlemlenmiştir (Alkan vd., 2005). Ham perlit numunelerinin tane morfolojisini ve genişlemeyle ortaya çıkan değişiklikleri incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Hammadde, büyük kabarcıklar içeren pomza benzeri bir yapıya sahiptir. Isıl işlemin ilk aşamasında tane yüzeysel olarak yumuşamaya başlar ve dış kabuğu pürüzsüzleşirken, iç katmanlarda hapsolmuş su dışarı çıkmaya çalışır ve yüzeyde oluşan çatlaklardan da anlaşıldığı üzere tanenin hafifçe şişmesine neden olur. Daha sonraki bir aşamada, tane önemli ölçüde şişerek yapının açılmasına neden olur ve yüzeyde suyun kaçış yolu görevi gören kabarcıklar oluşmaya başlar.

Hemen ardından, çok sayıda kabarcık oluşur ve küçük delikler de ortaya çıkar. Bu küçük delikler, suyun kaçış noktalarıdır. Son olarak, perlit genişler; bu aşamada taneler şiddetli bir şekilde patlar ve morfoloji önemli ölçüde değişir. Bazı durumlarda, suyun kaçış yolları genişmeden sonra bozulmadan kalabilir ve bu nedenle genişmiş perlit içinde bütün kabarcıklar görülür.

Daha önce belirtildiği gibi, perlitin aşırı ısınması, yani maksimum

genleşmeye yol açan optimum zaman aralığının ötesine geçilmesi, tanelerin büzülmesine neden olur. Aşağıda, aşırı ısınmanın neden olduğu doku değişiklikleri gösterilmekte ve yüzeysel erimenin genleşme oranındaki düşüşten sorumlu olduğu doğrulanmaktadır.

Perlitin morfolojisi göz önüne alındığında, tüm Yunan örneklerinin veziküler/pumiceous olduğu tespit edilmiştir. En düşük genleşme oranını gösteren perlitik örnekler (yani İtalyan, Çin ve Macar örnekleri) çoğunlukla granüler olarak nitelendirilirken, maksimum genleşme oranını sergileyen Türk perlitli soğan kabuğu tipi bir morfoloji sergilemektedir. Bu nedenle, tanelerin genleşme kabiliyetini etkileyen önemli bir faktörün, perlit oluşum koşullarındaki farklılıkları (örneğin lavın sıcaklığı ve viskozitesi ile soğuma hızı) ortaya koyan ve hızlı ısı işlem sırasında salınan su gazı için kaçış yollarının oluşumundaki kolaylığı veya zorluğu yansıtabilecek olan tane morfolojisi olduğu öne sürülmektedir. Küçük ve iyi dağılmış boşluklara sahip granüler tanelerden salınan su kolayca kaçabilir ve bu nedenle bu, perlitin az bir oranda genleşmesini gerektirir. Öte yandan, soğan kabuğu benzeri perlit içinde oluşan su buharı, birbirini izleyen soğan kabuğu benzeri katmanlardan kolayca kaçamaz ve bu nedenle ani buharlaşma, basıncı artırarak tanenin sonunda patlayana kadar şişmesine neden olur (tane genleşmesi). Bu, nispeten daha yüksek zorluk derecesine sahip bir süreçtir ve bu nedenle, bu sürecin kolaylaştırılması, perlit yapısının daha fazla genleşmesini gerektirecektir (Roulia vd., 2006).

EPA'nın SEM görüntüleri de kristal benzeri gözenekli ve camsı bir yapıya sahiptir. SEM görüntüleri, Sarı vd. (2009) tarafından verilen görüntüye benzetilmektedir. EDS analizi ile belirlenen elementlerin oransal dağılımı, Genleştirilmiş perlit numunelerinde silikon (%45,13), oksijen (%38,91), alüminyum (%8), potasyum (%5,58) ve sodyum (%2,37) bulunduğunu göstermiştir (Vijayakumar vd., 2012).

Ham perlitin SEM sonuçları, optik mikroskopi bulgularını doğrulamaktadır. Açık gözeneklerin varlığı ve perlitin camsı faz kompakt cam kütesinin akışkan karakteri, minik kristallerin varlığı ile kanıtlanmaktadır.

EDX analizinin alan spektrumuna göre, doğal perlit yapısında O, Na, Al, Si ve K elementlerinin varlığı nicel olarak belirlenmiştir. Yani, perlit içindeki elementlerin kimyasal bileşimi ve ağırlık yüzdeleri (O: %51,40, Na: %2,00, Al: %6,72, Si: %35,03 ve K: %4,84), perlit içindeki baskın camsı faza karşılık gelmektedir. Öte yandan, boyutları 1–5 µm'den küçük olan özenle seçilmiş kürelerden elde edilen kimyasal bileşim (O: %63,19, Al: %7,04 ve Si: %29,76), perlit içinde kristal alüminosilikatların varlığının kanıtı olarak hizmet etmiştir.

Ham perlitin transmisyon elektron mikroskobu sonuçları, perlit kütesinin büyük kısmının volkanik camdan oluştuğunu göstermektedir. TEM ayrıca, doğal perlitin camsı kütesinde boyutları 10–50 nm arasında değişen çok ince kristal fazların bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, amorf fazın hakim olduğu ve nispeten düşük kristal fazın (küçük kristaller)

gözlemlendiği XRD gözlemleriyle örtüşmektedir. Bu sonuçlar, EDX ölçümüyle gözlemlenen volkanik camın bileşimi ile de uyumludur (Vijayakumar et al., 2012).

## TERMAL ANALİZLER

TG, numune belirli bir hızda ısıtılırken ağırlık değişiminin miktarını ve hızını ölçerken, Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ise numune ısıtılırken numune ile termal olarak inert bir referans malzeme arasındaki sıcaklık farkını ölçer. Ham öğütülmüş perlitin kütle kayıpları, her sıcaklık için birbirinden farklıydı. Genleştirilmiş perlitin termal davranışı, statik havada sıcaklığa kadar dilatometrik analiz (ve türevi) ile izlendi.

DTG/TGA eğrileri, perlitin ekzotermik bir reaksiyon verdiğini ve faz değişiminin 500 ile 600 °C arasında başladığını göstermektedir. TGA eğrilerinde, 100 ile 450 °C arasındaki sıcaklık aralığında perlitin ağırlık kaybı görülmektedir. Bu durum, perlit içindeki uçucu maddelerin (nem ve organik maddeler gibi) kaybına atfedilebilir. Bu aralığın ardından, perlitin izotermik olmayan bozunma davranışı gözlemlenmiştir.

Termogravimetrik-diferansiyel termal analizde (TG-DTA), kontrollü bir sıcaklık artışı sırasında kil numunelerinde meydana gelen değişiklikler gözlemlenebilir (Drebushchak vd., 2005). DTA eğrileri endotermik ve ekzotermik etkileri gösterirken (sıcaklık artışına bağlı olarak seramiklerdeki entalpi değişiminin bir sonucu olarak meydana gelir), TG eğrileri (bu tür endotermik-ekzotermik reaksiyonlar nedeniyle ortaya çıkar) numunelerdeki ağırlık kayıplarını gösterir (Palanivel ve Kumar, 2011). Analizlerden elde edilen veriler sayesinde, higroskopik su, kimyasal su, demir hidroksit/oksidhidroksit, karbonatlar (kalsit, dolomit vb.), organik maddelerin ayrışması, katı faz dönüşümü ve polimorfik değişiklikler gibi birçok bileşen, farklı sıcaklık aralıklarındaki karakteristik endotermik veya ekzotermik tepkileriyle tanımlanabilir (Drebushchak vd., 2005; Palanivel ve Kumar, 2011; Moropoulou vd., 1995; Velraj vd., 2010; Franquelo vd., 2008; Maritan vd., 2006; De Nobili ve Maggioni, 1993).

Karbonatların ağırlık kayıpları ve ayrışmasının gözlemlendiği sıcaklık aralıklarında görülen afinite, seramiklerin çoğunlukla kireçli kil yatakları kullanılarak üretilmiş olabileceğini göstermiştir (Meyvel vd., 2012). Bu bağlamda, kilin DTA eğrileri incelendiğinde; 700-750 °C civarında gözlemlenen önemsiz endotermik etki, numunelerde ikincil kalsit varlığını düşündürmüştür (Fabbri vd., 2014). Endotermik etki, ortalama olarak 800-850 °C civarında belirgin bir şekilde tespit edilmiştir (Fabbri vd., 2014; Krapukaitytė vd., 2008).

Çeşitli sıcaklıklarda 3,5 ve 15 saatlik ısıtma işlemiyle perlitin salınan su miktarı, Roulia vd. tarafından ham ve genleştirilmiş perlitin farklı numuneleri için sunulmuştur (Roulia vd., 2006). Nispeten gevşek bağlı suyun daha düşük sıcaklıklarda salındığını varsaymak mantıklıdır. Serbest kalan su miktarı,

toplam suyun yüzdesi olarak ifade edilmiştir. Her bir perlit numunesi için, 950 °C'de 3,5 saatlik ısıtma işlemiyle serbest kalan su miktarının, aynı sıcaklıkta uzatılmış işlemle (15 saat) serbest kalan su miktarına eşit olduğu bulunmuştur ve bu nedenle bu su içeriği, perlitin "toplam suyu" olarak tanımlanmıştır.

Genleştirilmiş perlitin, bu çalışmada incelenen tüm sıcaklıklarda ham perlit (ağırlıkça %2,0–5,0) içindekinden daha az olmakla birlikte, hala bir miktar su (ağırlıkça %1,6–1,9) tuttuğuna dikkat etmek önemlidir. Ham perlit için toplam su içeriği tane boyutu azaldıkça azalma eğilimindedir; Genleştirilmiş perlit için ise tersi bir eğilim gözlemlenmektedir. Burada incelenen ham ince taneli perlit numuneleri için su içeriği, perlitin menşesine göre şu sırayla değişmektedir: Çin > Türkiye > İtalya > Macaristan > Yunanistan.

Sonuç olarak, gözlemlenen farklılıklar numunenin kaynağına, tane boyutuna, sıcaklığa ve ısıtma süresine bağlıdır. Özellikle aynı kaynaktan alınan numuneler için, sonuçlardan tane boyutunun seçilen tüm sıcaklık ve sürelerde su salınımında belirleyici bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. Genel olarak, işlenmemiş perlitin ince taneleri, sadece öğütme işlemi nedeniyle fiziksel olarak tutulan su miktarını daha az içerir. Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda ham perlitin ince taneleri için daha az miktarda su salınımı beklenir. Buna karşılık, kalan su daha güçlü bir şekilde bağlanmıştır ve sıcaklık yükseldikçe tane boyutunun etkisi ihmal edilebilir hale gelir. Genleştirilmiş perlit için ise tam tersi geçerlidir; genişlemenin etkisi, iri tanelere kıyasla ince tanelerde daha belirgindir. Bu nedenle, ince tanelerde tutulan su, düşük sıcaklıklarda daha kolay salınabilir.

Suyun salınım sıcaklığına göre yukarıdaki kategorilere ayrılması, perlitik ağda bağlı olan su türlerini yansıtır. Bu nedenle, perlitteki su, yüzeysel olarak gevşek bir şekilde bağlı olan veya gözeneklerde adsorbe olan moleküler suyu temsil eder (Ahmadi et al., 2018). Her sıcaklık aralığı, benzer belirgin özelliklere sahip, deneysel olarak gözlemlenen bir dizi su salınım sürecini içerir.

Ham perlitin tüm örneklerinde, toplam suyun %80–95'i 550 °C 'nin altında salınmıştır. Perlit numunelerindeki toplam suyun yukarıdaki şekilde ayrıştırılması, perlitin ısıtma işlemine tabi tutulması üzerine toplam suyun %20–30'unun farklı bir sıcaklık aralığında salınabileceğini ve bu miktarın ısıtma işleminin süresine ve sıcaklığına bağlı olduğunu, yani sıcaklık ne kadar yüksekse sürenin o kadar kısa olduğunu gösterdiği için yararlıdır.

Ham perlitin iç gözeneklerinde hapsolmuş moleküler suyun genişleme süreci sırasında dışarı çıkabildiği, geri kalanının ise genişmiş perlit içinde kaldığı öne sürülebilir. Genleşmiş perlit, hammaddeye kıyasla önemli ölçüde daha açık bir yapıya sahip olduğundan, kalan suyun çoğu artık daha düşük sıcaklıklarda ısıtma işlemi altında salınabilir hale gelir. Bu nedenle, ham perlit içinde başlangıçta bulunan belirli su türleri, genişmiş perlit içinde görünür su olarak işlev görebilir. Bu durum, genişmiş perlitin hala bir miktar gevşek bağlı su tuttuğunu da açıklayabilir.

İncelenen işlenmemiş ve geliştirilmiş perlit numunelerinin TGA-DTA eğrileri. Termogravimetrik analiz sonuçları, numunelerin laboratuvar fırınında ısıtılmasıyla elde edilen sonuçlarla tam olarak uyumludur; geliştirilmiş perlitlerde 250 ila 550 °C arasında salınan su miktarı, işlenmemiş perlitlerdekinden önemli ölçüde daha azdır. Bu sıcaklık aralığında, geliştirilmiş perlitlerden salınan su miktarındaki azalma, genişleme işlemi sırasında meydana gelen su kayıplarına atfedilebilir. Bu durum, 250 ile 550 °C arasında açığa çıkan suyun uzaklaştırılmasının perlitin genişmesini bozduğunu tespit eden Varga ve arkadaşlarının sonuçlarıyla uyumludur. Ayrıca, Varga ve arkadaşları, suyun 600 °C'nin üzerinde uçucu hale geldiği norit ve obsidiyenin genişleme göstermediğini gözlemlemiştir (Varga vd., 2015).

Malzemenin karmaşıklığı ve su/-OH grupları ile matris arasındaki etkileşimlerin çeşitliliği nedeniyle sıcaklık aralığı sınırları kesin olarak belirlenmemektedir. Geliştirilmiş perlitin TGA analizinden, perlit numunesinin 200 °C'ye kadar tüm nemini kaybettiği ve 450 °C'de %1,4 ağırlık kaybı yaşadığı tespit edilmiştir. 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kayda değer bir ağırlık kaybı (%0,3) gözlemlenmemiştir. 1000 °C'de perlit %1,8 toplam ağırlık kaybı göstermiştir; bu da perlitin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir. Roulia vd. (2006) ayrıca, Geliştirilmiş perlitin incelenen tüm sıcaklıklarda (950 °C'ye kadar) %1,6–1,9 ağırlıkça su tuttuğunu bulmuştur. Roulia vd. tarafından perlitlerdeki dehidrasyon üç sıcaklık aralığına ayrılmıştır: 0–250°C, 250–550°C ve 550–950°C (Roulia vd., 2006). İlk sıcaklık aralığında, yüzeysel olarak gevşek bir şekilde bağlanmış veya gözeneklerde adsorbe olmuş moleküler su salınır. İkinci sıcaklık aralığında, malzemenin iç gözeneklerinde hapsolmuş moleküler su salınır. Son sıcaklık aralığında ise, güçlü hidrojen bağları yoluyla oksijen atomlarına bağlı olan -OH grupları salınır.

Ayrıca, DTA eğrisi 250 °C'de bir ekzotermik tepe noktası vermiştir. Bu geniş tepe noktası, gevşek bir şekilde bağlanmış veya Geliştirilmiş perlitin iç gözeneklerinde hapsolmuş suyun salınmasına karşılık gelir. Ekzotermik tepe noktası, cam sıkışması ve iç yüzey alanının azalmasına da atfedilebilir. Roulia vd. (2006) da Geliştirilmiş perlit için DTA eğrisinde yaklaşık 250 °C'de bir ekzotermik tepe noktası bulmuştur. Faz değişimi 500-600 °C sıcaklık aralığında başlamış ve 1000 °C'de tamamlanmıştır.

Ham perlitin TGA ve DTG analizi; reaksiyon ürünlerindeki fiziksel olarak bağlı su içeriği, kütle oranından bağımsız görünmektedir. 105 ile 180 °C arasında ihmal edilebilir düzeyde bir kütle kaybının ardından, tüm numuneler yaklaşık 600 °C'ye ısıtılana kadar kütlede kademeli bir azalma gösterir; bunu, 600 ile 700 °C arasında oldukça düşük kütle kaybı ile istikrarlı bir eğri izler.

Perlit ve geliştirilmiş perlit numuneleri, literatürde bildirilenlere benzer desenler sergilemiştir (Duxson vd., 2007; Bell vd., 2009). Sıcaklığın artmasıyla dilatometrik profil, meydana gelen fenomenlerin bir fonksiyonu

olarak ayrıştırılabilir. 100-200°C sıcaklık aralığında hızlı bir büzülme meydana gelmiştir (türevde negatif tepe noktası) ve bu, dehidrasyonla, yani kalıntı suyun buharlaşması ve gözeneklerde hapsolmuş suyun desorpsiyonu ile ilişkilendirilmiştir. Daha sonra, T-OH grubunun (T = Si, Al) dehidroksilasyonuna bağlı olarak termal büzülme yavaşlamış ve 600 °C'de %1,2'lik bir değere ulaşmıştır. Genleştirilmiş perlit granülü, yaklaşık 580 °C'de bir camsı geçiş geçirmiş ve ardından alkali bağlayıcıya bağlı viskoz akış sonucu büzülme yaşamıştır (Papa vd., 2014).

## SONUÇLAR

Genleştirilmemiş ve genleştirilmiş perlitin tam karakterizasyonu, aşağıdaki sonuçların çıkarılmasını sağlar:

i) Volkanik kayanın kimyasal analizi, hammaddenin yüksek bir SiO<sub>2</sub> yüzdesine (%72,48) sahip asidik volkanik kaya olduğunu gösterirken, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> varlığı %13,52'dir. Alkali metal oksitlerin, K<sub>2</sub>O ve Na<sub>2</sub>O'nun yüzdesi sırasıyla %4,21 ve %3,56'dır.

ii) XRD incelemesinin sonuçları, kristal formların varlığının minimum düzeyde olduğu, yüksek oranda amorf faz olduğunu göstermektedir. Kristal faz, esas olarak feldspatlardan ve SiO<sub>2</sub> polimorflarından (kuvars ve kristobalit) oluşmaktadır.

iii) SEM ve TEM analiz sonuçları, XRD analiz sonuçlarını doğrulamaktadır; volkanik kaya, ince taneli parçacıklar-mikrolit içeren izotropik amorf camsı bir kütleden oluşmaktadır.

iv) SEM sonuçları, FTIR spektrumlarından elde edilen bulgularla uyumludur. SEM mikroskopik görüntüleri, camsı kütlenin akışkan yapısını ve küçük kristaller ile gözeneklerin varlığıyla birlikte perlitin sıkı cam kütesini açıkça ortaya koymaktadır. Öte yandan, genişmiş perlitin SEM sonuçları, mikro yapısında açık gözeneklerin (yoğun bir ağ oluşturan küçük kanallar) ve bazı izole deliklerin ve hücrelerin varlığını ortaya çıkarmıştır. Bu açık gözeneklerin ve izole deliklerin eşzamanlı varlığı, sırasıyla son derece yüksek terleme gücü (suyu emip daha sonra buhar şeklinde salma) ve yüksek mukavemet sağlar. Aradaki fark, terleme özelliğinin malzemenin ısı yalıtım özelliğinde hayati bir rol oynarken, yapısal hafif beton için yüksek mukavemetin gerekli olması gerçeğiyle belirgindir.

v) TG işlemi sırasında gözlemlenen %3,80 ağırlıkça toplam kütle kaybı, volkanik kayadan kaçan hapsolmuş su ile ilişkilendirilmiştir.

vi) IR spektrumu, genişleme süreci sırasında esasen dışarı atılan (karşılık gelen bantlar kayboldu) perlit içindeki emilmiş suyun varlığı hakkında değerli bilgiler sağlar (1644 cm<sup>-1</sup> ve 3650 cm<sup>-1</sup> bantları). Yukarıda belirtilen sonuçlarla desteklenen kristal fazın düşük oranı nedeniyle, analiz edilen volkanik kayaç (perlit)ın, yüksek kaliteli genişmiş perlit üretimi için değerli bir hammadde olduğu sonucuna varılabilir. Alkali metal oksitlerin yüksek yüzdesi ve SiO<sub>2</sub>'nin yüksek yüzdesi nedeniyle, volkanik cam (perlit)

kap camı üretimi için hammadde olarak kullanılabilir. Camı fazın yüksek yüzdesi, SiO<sub>2</sub>'nin yüksek yüzdesi ve alkali metal oksitler, Mariovo'dan elde edilen perlit'i asit dirençli cam malzemeleri üretimi için cazip bir malzeme haline getirir.

Ham perlit, lavın yavaş donması sırasında oluşan kristalit inklüzyonları içeren bir amorf fazdan oluşur. Hızlı ısıl işlemle gerçekleştirilen perlit genişmesi, amorf fazıyla yakından ilişkililikten, kristalitler genişmez ve genişmemiş perlit olarak ayrılır.

Hem genişleme süreci hem de yavaş ısıl işlem (10 °C/dk) perlitin camı yapısının yoğunlaşmasına neden olur. Ortaya çıkan etkiler benzer olsa da, genişleme sırasında meydana gelen silikat yoğunlaşması daha yoğundur. Silikat ağının gelişimi, esas olarak Si-OH gruplarının dehidroksilasyonuna atfedilmiştir ve herhangi bir ısıl işlem sırasında (genleşmeye yol açmayan ısıl işlemler dahil) meydana gelir. Bu, hidrotermal koşullar altında silikat camda meydana gelen hidrasyon prosedürünün tersi bir reaksiyondur ve doğal riyolitik camlardan perlit oluşumu ile ilişkilendirilmiştir.

Genleşme süreci sırasında, perlitin iç katmanlarından başlayarak, silikat mikro yapısında herhangi bir değişiklik meydana gelmeden önce moleküler su salınır. Sıcaklık arttıkça ve taneler yumuşamaya başladıkça, çoğunlukla perlit numunelerindeki su (250–550 °C) buharlaşmaya başlar ve dışarı doğru itilir. İlk başta su, tanenin içinden kaçış yolları oluşturarak onu şişirir ve sonunda tanenin patlamasına/genleşmesine neden olur. Ayrıca, terminal Si-OH grupları, eşzamanlı su giderimi ile dehidroksillenir. Bu, geri kalan "etkili su" ile birlikte taneciklerin genişlemesine de katkıda bulunabilecek yeni bir su kategorisi olarak tanımlanmıştır. Genleşme sonrasında perlit açık bir yapıya sahip olur ve bu nedenle, kalan suyu daha düşük sıcaklıklarda daha kolay salınabilir hale gelir.

Ayrıca, her sıcaklıkta maksimum genişleme oranını elde etmek için optimum bir ısıl işlem zaman aralığı olduğu gösterilmiş, aşırı ısınmanın ise tanelerin büzülmesine yol açtığı bulunmuştur. Çeşitli sıcaklıklarda belirlenen genişleme oranının, perlitin tane boyutu ve kaynağına bağlı olduğu bulunmuştur. Toplam su içeriği ve silikat mikro yapısının öneminin yanı sıra, genişleme oranının ham perlitin tane morfolojisine bağlı olduğu da saptanmıştır. Mikro boşlukların iyi dağılmış olduğu granüler morfoloji türü, suyun kolayca kaçmasına izin verir ve bu nedenle, buna karşılık gelen genişleme oranı, veziküler/pomza ve soğan kabuğu tipi morfolojiye sahip perlitinkine kıyasla oldukça daha küçüktür.

EPA'nın karakteristik özelliklerini araştırmak ve inşaat hammaddesi olarak uygunluğunu belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar sırasında, bu maddenin birçok özelliği tespit edildi. Genleştirilmiş perlitin kimyasal bileşiminin %70,68 SiO<sub>2</sub> ve %13,04 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ten oluştuğu saptandı. Petrografik gözlemler, perlit yapısında opal-CT, feldspat, mika, illit ve kuvarsın bulunduğunu gösterdi. SEM görüntüleri, kristal benzeri gözenekli ve camı bir yapı göstermiştir. EDS analizi, EPA yapısı içinde %45,13 silikon ve

%38,91 oksijen bulunduğunu göstermiştir. TG-DTA analizinden 1000 °C'de %1,8'lik bir ağırlık kaybı saptanmış olup, bu da Genleştirilmiş perlitin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Özgül ağırlık, yığın yoğunluğu, gözeneklilik, su emme ve sıklık oranları farklı sıcaklıklarda farklılık gösterse de, bunlar arasında yüksek istatistiksel bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yüzey alanı da sıcaklıktan etkilenmiştir. EPA'nın inşaat hammaddesi olarak kullanılıp kullanılmayacağını belirlenmesi amacıyla elek analizi, ince madde içeriği ve ateşleme sırasında kütle kaybı analizi ile organik madde içeriği analizleri yapılmış ve EPA'nın hafif inşaat hammaddesi olarak kullanılmaya uygun olduğu tespit edilmiştir.

## REFERANSLAR

- Abalos, R., Erdmann, E., ve Destefanis, H.A. (2003) Surface modifications of volcanic glasses (perlites) by water vapor. *Latin American Applied Research*, 33, 59-62.
- Ahmadi, P.F., Ardeshir, A., Ramezani-pour, A.M., ve Bayat, H. (2018). Characteristics of heat insulating clay bricks made from zeolite, waste steel slag and expanded perlite. *Ceramics International*, 44(7), 7588-7598.
- Alkan, M. (1998). Surface titrations of perlite suspensions. *Journal of colloid and interface science*, 207(1), 90-96
- Alkan, M., Kalay, B., Doğan, M., Demirbaş, O. (2008) Removal of copper ions from aqueous solutions by kaolinite and batch design. *Journal of Hazardous Materilas*, 153(1-2), 867-876.
- Alkan, M., ve Doğan, M. (2001). Adsorption of copper (II) onto perlite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 243(2), 280-291.
- Alkan, M., Tekin, G., ve Namli, H. (2005). FTIR and zeta potential measurements of sepiolite treated with some organosilanes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 84(1-3), 75-83.
- Bell, J.L., Driemeyer, P.E., Kriven, W.M. (2009) Formation of ceramics from metakaolinbased geopolymers. Part II: K-based geopolymer. *Journal of the American Ceramic Society*, 92, 607-615.
- Bertoluzza, A., Fagnano, C., Morelli, M. A., Gottardi, V., ve Guglielmi, M. (1982). Raman and infrared spectra on silica gel evolving toward glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 48(1), 117-128.
- Bolen P.W. (2011) USGS Mineral Commodity Summaries 2011 U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia-USA.
- Cătănescu, I., Georgescu, M. ve Melinescu, A. (2012), Synthesis and characterization of geopolymer binders from Fly ash. *University POLITEHNICA of Bucharest The Scientific Bulletin Series B: Chemistry and Materials Science*, 74(1), 3-14.
- Çelik, A.G., Kılıç, A.M., ve Çakal, G.O. (2013). Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(2), 689-700.
- Demirboğa, R., Örüng, İ., ve Gül, R. (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1627-1632.

- Demirboğa, R., ve Gül, R. (2003). The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and concrete research*, 33(5), 723-727.
- De Nobili, M. ve Maggioni, A., (1993). Influenza della sostanza organica sulle proprietà fisiche del suolo. In: Nannipieri, P. (Ed.), *Ciclo della Sostanza Organica nel Suolo*, 4354.
- Drebushchak, V.A., Mylnikova, L.N., Drebushchak, T.N. ve Boldyrev, V.V., (2005). The investigations of ancient pottery. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 82, 617-626.
- Doğan, M., Alkan, M., ve Çakir, Ü. (1997). Electrokinetic properties of perlite. *Journal of colloid and interface science*, 192(1), 114-118.
- Doğan, M., Alkan, M., ve Onganer, Y. (2000). Adsorption of methylene blue from aqueous solution onto perlite. *Water, Air, and Soil Pollution*, 120, 229-248.
- Doğan, M., ve Alkan, M. (2003). Adsorption kinetics of methyl violet onto perlite. *Chemosphere*, 50(4), 517-528.
- Duxson, P., Lukey, G.C., ve Van Deventer, J.S.J. (2007) Physical evolution of Na-gelopolymer derived from metakaolin up to 1000 C. *Journal of Materials Science*, 42, 3044-3054.
- Fabbri, B., Gualtieri, S. ve Shoal, S., (2014). The presence of calcite in archeological ceramics. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 34, 1899-1911.
- Franquelo. M.L., Robador. M.D., Ramirez-Valle. V, Duran. A, Jimenez de Haro. M.C., ve Perez- Rodriguez. J.L., (2008). Roman ceramic of hydraulic mortars used to build the mithraeum house of merida (Spain). *J. Thermal Anal. Calorimetry*, 92, 331-335.
- Franquelo. M.L., Robador. M.D., Ramirez-Valle. V, Duran. A, Jimenez de Haro. M.C., ve Perez- Rodriguez. J.L., (2008). Roman ceramic of hydraulic mortars used to build the mithraeum house of merida (Spain). *J. Thermal Anal. Calorimetry*, 92, 331-335.
- Harben, P.W., ve Kuzvart, M. (1997): *Industrial Minerals – A global geology.– Industrial Minerals Information*, London, Metals Bulletin, 280-288.
- Hui, H., ve Zhang, Y. (2007). Toward a general viscosity equation for natural anhydrous and hydrous silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(2), 403-416.
- Ingram, M. D., Davidson, J.E., Coats, A.M., Kamitsos, E.I., ve Kapoutsis, J.A. (2000). Origins of anomalous mixed-alkali effects in ion-exchanged glasses. *Glass Science and Technology-Glastechnische Berichte*, 73(4), 89-104.
- Kamitsos, E.I., Patsis, A.P., ve Kordas, G. (1993). Infrared-reflectance spectra of heat-treated sol-gel-derived silica. *Physical Review B*, 48(17), 12499.
- Kaufhold, S., Reese, A., Schwiebacher, W., Dohrmann, R., Grathoff, G. H., Warr, L. N., ... ve Ufer, K. (2014). Porosity and distribution of water in perlite from the island of Milos, Greece. *SpringerPlus*, 3, 1-10.
- Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., ve Krukowski, S.T. (2006). *Industrial minerals and rocks. Commodities, Markets, and Uses*, Colorado: Society for mining, Metallurgy and Exploration.
- Kongkachuichay, P., ve Lohsoontorn, P. (2006). Phase diagram of zeolite synthesized from perlite and rice husk ash. *ScienceAsia*, 32(1), 013.
- Koukouzas, N. K., Zeng, R., Perdikatsis, V., Xu, W., ve Kakaras, E. K. (2006). Mineralogy and geochemistry of Greek and Chinese coal fly ash. *Fuel*, 85(16), 2301-2309.

- Koumanova, B., ve Peeva-Antova, P. (2002). Adsorption of p-chlorophenol from aqueous solutions on bentonite and perlite. *Journal of hazardous materials*, 90(3), 229-234.
- Krapukaitytė, A., Tautkus, S., Kareiva, A. ve Zalieckienė, E., (2008). Thermal analysis—a powerful tool for the characterization of pottery. *Chemija*, 19, 4-8.
- Lanzón, M., ve García-Ruiz, P. A. (2008). Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1798-1806.
- Lee, W.K.W., ve Van Deventer, J.S.J. (2003). Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates. *Langmuir*, 19, 8726-8734.
- Lützow, M.V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., ve Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *European journal of soil science*, 57(4), 426-445.
- Makreski, P., Jovanovski, G., ve Kaitner, B. (2009). Minerals from Macedonia. XXIV. Spectra-structure characterization of tectosilicates. *Journal of Molecular Structure*, 924, 413-419.
- Maritan, L., Nodari, L., Mazzoli, C., Milano, A. ve Russo, U., (2006). Influence of firing conditions on ceramic products: Experimental study on clay rich in organic matter. *Applied Clay Science*, 31, 1-15.
- Meyvel, S., Sathya, P. ve Velraj, G., (2012). Thermal characterization of archaeological pot sherds recently excavated in Nedunkur, Tamilnadu, India. *Cerâmica*, 58, 338-341.
- Moropoulou, A., Bakolas, A. ve Bisbikou, K., (1995). Thermal analysis as a method of characterizing ancient ceramic Technologies. *Thermochimica Acta*, 2570, 743-753.
- Papa, E., Medri, V., Landi, E., Ballarin, B., ve Miccio, F. (2014). Production and characterization of geopolymers based on mixed compositions of metakaolin and coal ashes. *Materials Design*, 56, 409-415.
- Palanivel, R., ve Kumar, U. R. (2011). Thermal and spectroscopic analysis of ancient potteries. *Romanian Journal of Physics*, 56(1-2), 195-208.
- Reka, A.A., Pavlovski, B., Lisichkov, K., Jashari, A., Boev, B., Boev, I., ... ve Makreski, P. (2019). Chemical, mineralogical and structural features of native and expanded perlite from Macedonia. *Geologia croatica*, 72(3), 215-221.
- Roulia, M., Chassapis, K., Fotinopoulos, C., Savvidis, T., ve Katakis, D. (2003). Dispersion and sorption of oil spills by emulsifier-modified expanded perlite. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(5-6), 425-431.
- Roulia, M., Chassapis, K., Kapoutsis, J.A., Kamitsos, E.I., ve Savvidis, T. (2006). Influence of thermal treatment on the water release and the glassy structure of perlite. *Journal of materials science*, 41, 5870-5881.
- Şengül, O., Azizi, S., Karaosmanoğlu, F., ve Taşdemir, M. A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 671-676.
- Sarı, A., Karaipekli, A., ve Alkan, C. (2009). Preparation, characterization and thermal properties of lauric acid/expanded perlite as novel form-stable composite phase change material. *Chemical Engineering Journal*, 155(3), 899-904.

- Singh, M., ve Garg, M. (1991). Perlite-based building materials—a review of current applications. *Construction and Building Materials*, 5(2), 75-81.
- Sodeyama, K., Sakka, Y., Kamino, Y., ve Seki, H. (1999). Preparation of fine expanded perlite. *Journal of Materials Science*, 34, 2461-2468.
- Tekin, N., Dinçer, A., Demirbaş, Ö., ve Alkan, M. (2010). Adsorption of cationic polyacrylamide (C-PAM) on expanded perlite. *Applied Clay Science*, 50(1), 125-129.
- Topçu, İ. B., ve Işıklıdağ, B. (2007). Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite. *Building and Environment*, 42(10), 3540-3546.
- Tsikouras, B., Passa, K.S., Iliopoulos, ve I., Katagas, C. (2016). Microstructural control on Perlite expansibility and geochemical balance with a novel application of Isocon analysis: an example from Milos Island Perlite (Greece). *Minerals*, 6,1-14.
- Uluatam, S.S., (1991). Assessing perlite as a sand substitute in filtration. *Journal of American Water Works Association*, 83, 6, 70-71.
- Varga, P., Lexa, J., Uhlík, P., ve Rajnoha, M. (2015). Characterization of perlites from Jastrabá and Lehôtka pod Brehmi deposits. *Geology, Geophysics and Environment*, 41(1), 146-146.
- Varuzhanyan, A. A., Varuzhanyan, A. A., ve Varuzhanyan, H. A. (2006). A mechanism of perlite expansion. *Inorganic Materials*, 42, 1039-1045.
- Velraj, G., Sudha, R. and Hemamalini, R., (2010). X-Ray Diffraction and Tg-Dta studies of archaeological artifacts recently excavated in Salamankuppam Tamilnadu. *Recent Research in Science and Technology*, 2(10), 89-93.
- Vijayakumar, G., Tamilarasan, R., ve Dharmendirakumar, M. (2012). Adsorption, Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic studies on the removal of basic dye Rhodamine-B from aqueous solution by the use of natural adsorbent perlite. *J. Mater. Environ. Sci*, 3(1), 157-170.
- Yoshino, H., Kamiya, K., ve Nasu, H. (1990). IR study on the structural evolution of sol-gel derived SiO<sub>2</sub> gels in the early stage of conversion to glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 126(1-2), 68-78.
- Zähringer, K., Martin, J. P., ve Petit, J. P. (2001). Numerical simulation of bubble growth in expanding perlite. *Journal of materials science*, 36, 2691-2705.
- Zhang, Y., Sun, W., ve Li, Z. (2008). Infrared spectroscopy study of structural nature of geopolymeric products. *Journal o Wuhan University of Technology Materials Science Edition*, 23(4), 522-527.



# **Nadir toprak elementleri (NTE), uygulama alanları ve sürdürülebilirlik**

**Fehim FINDIK<sup>1,2,c</sup>**

- 1- Prof. Dr. Metallurgy and Materials Engineering Department, Faculty of Technology, Sakarya Applied Sciences University, Sakarya, Turkey. ORCID No: 0000-0003-2537-1951
  - 2- Prof. Dr. Istanbul Aydın University, Mechanical Eng Dept, Engineering Faculty, Florya Halit Aydın Campus, Istanbul, Turkey
- C: Corresponding author; e-mail: [findik@subu.edu.tr](mailto:findik@subu.edu.tr)

## ÖZET

Nadir toprak elementleri (NTE), skandiyum, itriyum ve lantanitler olarak bilinen 17 elementten oluşan bir gruba verilen isimdir. İsimlerindeki "nadir" ifadesine rağmen yer kabuğunda nispeten bol miktarda bulunurlar; ancak ekonomik olarak işletilebilecek yoğunlukta ve birlikte bulunmaları oldukça az rastlanan bir durumdur. Bu elementler, sahip oldukları eşsiz manyetik, ışıltama ve elektrokimyasal özellikler sayesinde modern teknolojinin vazgeçilmez yapı taşları haline gelmiştir. NTE'lerin uygulama alanları son derece geniştir. Yüksek performanslı mıknatısları (neodimyum, samaryum) sayesinde rüzgâr türbinleri, elektrikli araç motorları ve sabit disk sürücülerinde kullanılırlar. Lityum iyon bataryalarda (lantan), aydınlatma ve ekran teknolojilerinde (avrupyum, terbiyum ile fosforlar), lazerlerde, fiber optik kablolar ve petrol rafinasyonunda katalizör olarak görev alırlar. Ayrıca savunma sanayii için hassas güdüm sistemleri ve gece görüş ekipmanlarında da kritik öneme sahiptirler. Bu stratejik önemleri, NTE'lerin sürdürülebilirliğini küresel bir mesele haline getirmiştir. Mevcut üretimin büyük kısmının tek bir ülkede (Çin) yoğunlaşması, tedarik zinciri risklerini artırmaktadır. Çevresel açıdan ise, NTE madenciliği ve işlenmesi, radyoaktif elementler içeren atıklar ve toksik kimyasallar nedeniyle ciddi ekolojik tehditler oluşturabilmektedir. Sürdürülebilirlik için atılması gereken adımlar; kentsel madencilik (elektronik atıklardan geri dönüşüm), daha çevreci üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, alternatif malzeme araştırmaları ve tedarik kaynaklarının coğrafi olarak çeşitlendirilmesidir. Bu çabalar hem çevresel etkiyi azaltmak hem de teknolojik bağımsızlığı sağlamak için kritik rol oynamaktadır. Bu çalışmada nadir toprak elementlerinin sınıflandırılması, fiziksel ve kimyasal özellikleri, endüstriyel üretim süreçleri, kullanım alanları ve çevresel/stratejik etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Element bazlı karşılaştırmalar yapılmış; özellikle neodimyum, disprosyum ve terbiyum gibi kritik elementlerin üretim zorlukları ve teknolojik önemi değerlendirilmiştir. Ayrıca solvent ekstraksiyonu gibi ayırma tekniklerinin kimyasal mekanizmaları açıklanmış ve sürdürülebilir üretim yaklaşımları tartışılmıştır. Ayrıca, nadir toprak elementlerinin sürdürülebilirlik ve gelecek perspektifleri de kritik edilmiştir.

*Anahtar Kelimeler – Nadir toprak elementleri; üretim; kullanım alanları; sürdürülebilirlik; gelecek*

---

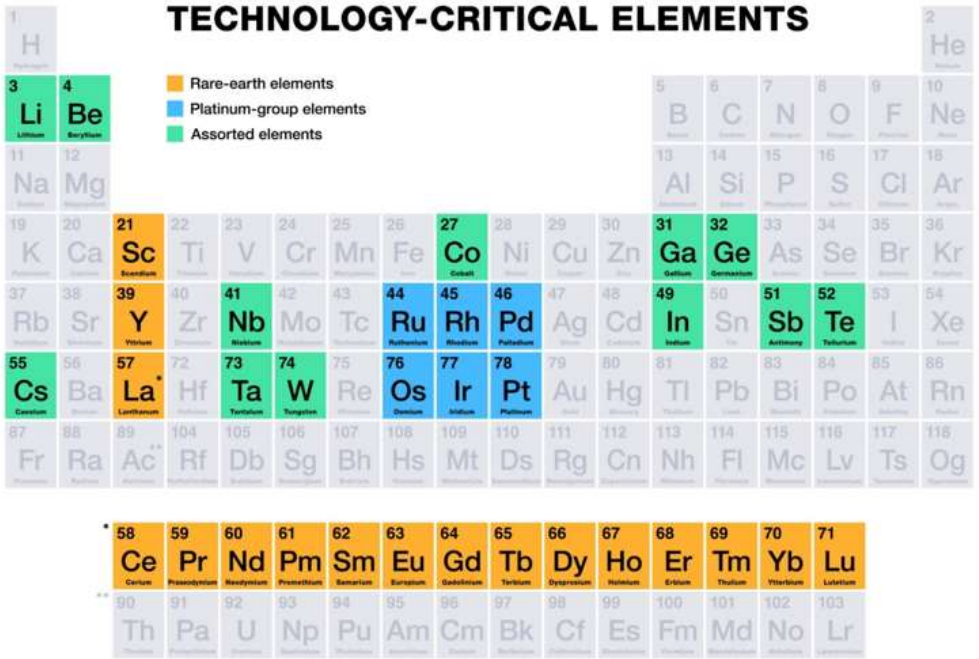
### 1. TANIM VE SINIFLANDIRMA

NTE'ler, periyodik tabloda genellikle lantanitler serisi (atom numarası 57-71) ve skandiyum, itriyum olarak kabul edilen 17 elementtir.

Hafif (LREE) ve ağır (HREE) olarak sınıflandırılırlar. Adları "nadir" olmasına rağmen, aslında yer kabuğunda nispeten yaygındırlar, ancak ekonomik olarak çıkarılabilir konsantrasyonlarda bulunmaları zordur (Balaram, 2023: 133). Tablo 1'de NTE sınıflandırması, hafif ve ağır elementler gösterilmiştir. Şekil 1'de tabloda NTE elementleri periyodik tabloda gösterilmiştir.

Tablo 1. NTE sınıflandırması, hafif ve ağır elementler

Sınıf	Elementler
Hafif NTE	Sc, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm
Ağır NTE	Y, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu



Şekil 1. Periyodik tabloda NTE elementleri.

## 2. TEMEL ÖZELLİKLER

NTE'lerin fiziksel, kimyasal, manyetik ve optik özellikleri, Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca Tablo 3'te NTE'lerin sınıflandırması ve temel özellikleri gösterilmiştir. Tablo 3'ten görüldüğü gibi, NTE'ler hafif, ağır ve skandiyum grubu olmak üzere üçe ayrılmıştır. Ardından, bu gruplarda yer

alana NTE elementleri atom numaraları, yoğunlukları, yerkabuğunda bulunma durumları ve karakteristik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. NTE özellikleri

Özellik	Açıklama
<b>Fiziksel</b>	Genelde gri renkli metalik elementler
<b>Kimyasal</b>	Benzer elektron dizilimleri nedeniyle benzer kimyasal davranışlar
<b>Manyetik/Optik</b>	Güçlü manyetik ve optik özellikler (özellikle neodimyum mıknatısları, fosforlar vb.)
<b>Dağılım</b>	Dünya kabuğunda nispeten bol; fakat aynı yerde yüksek yoğunlukta bulunmazlar, bu da ekonomik çıkarımı zorlaştırır.

Tablo 3. NTE'lerin sınıflandırması ve temel özellikleri tablosu (Haxel et al, 2023:1)

Grup	Element	Atom No	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Ortalama Bolluk (ppm)	Karakteristik Özellikler
<b>Hafif NTE (LREE)</b>	Lantan, Seryum, Neodim, Prometyum, Samaryum	57-62	6.1-7.0	20-66	Daha yaygın, daha düşük özgül ağırlık, manyetik özellikler
<b>Ağır NTE (HREE)</b>	Evropiyum, Gadolinyum,	63-71	8.2-9.8	0.5-6.2	Daha nadir, yüksek sıcaklık direnci,

<b>Grup</b>	<b>Element</b>	<b>Atom No</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ortalama Bollük (ppm)</b>	<b>Karakteristik Özellikler</b>
	Terbiyum, Disprozyum, Holmiyum, Erbiyum, Tulyum, İtterbiyum, Lutesyum				floresan özellikler
<b>Skandiyum Grubu</b>	Skandiyum, İtriyum	21, 39	2.9-4.5	5-33	Hafif, yüksek ergime noktası, alaşım sertleştirici

### 3. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

NTE'lerin üretimini birincil üretim ve ikincil üretim olarak ikiye ayırabiliriz.

Birincil üretimde, NTE'ler genellikle bastnazit ve monazit gibi minerallerden çıkarılır. Üretim zincirinde madencilik, konsantrasyon, saflaştırma ve metal haline dönüştürme diye dörde ayırabiliriz: Madencilik safhasına, cevher çıkarılır. Ardından konsantrasyon safhasında ise, çıkarılan cevher zenginleştirilir. Üçüncü safha olan saflaştırma/rölatif ayırma safhasında ise, zenginleştirilen cevher, kimyasal proseslerle oksitlere ayrıştırılır. Son safha olan metal haline dönüştürme safhasında ise, cevher metal haline dönüştürülür.

İkincil üretimde ise, gelişen yöntemlerle atıklardan (ör. fosfogyps, elektronik atık, mıknatıs hurdaları vb.) NTE geri kazanımı üzerinde araştırmalar vardır. Üretim süreçleri çevresel açıdan zordur; yüksek su/kimyasal kullanımı ve toksik atık problemleri vardır. Tablo 4'te NTE üretim yöntemleri gösterilmiştir. Bu tablodan da görüldüğü gibi, açık ocak madenciliğinde verimlilik yüksek olmasına rağmen maliyet düşüktür. Geri dönüşüm metodunda ise, maliyet çok yüksektir (Jowitt et al, 2020:100358). Açık ocak madenciliği metodu ile üretim yapan ana üretici ülkelerin Çin, ABD ve Avustralya olduğu görülüyor.

Tablo 4. Üretim yöntemleri karşılaştırması (Chakhmouradian and Wall, 2019: 1)

<b>Yöntem</b>	<b>Süreç Açıklaması</b>	<b>Verimlilik</b>	<b>Çevresel Etki</b>	<b>Maliyet</b>	<b>Ana Üretici Ülkeler</b>
<b>Açık Ocak Madenciliği</b>				Düşük	Çin, ABD, Avustralya
<b>Yerinde Liç (ISL)</b>	Yeraltı suyu ile çözüldürme	Orta	Orta (yeraltı suyu kirlenme)	Orta	Çin (Güney illeri)

Yöntem	Süreç Açıklaması	Verimlilik	Çevresel Etki	Maliyet	Ana Üretici Ülkeler
İyon Adsorpsiyonlu Killer	Yüzey madencil iği + liç	Düşük-Orta	Düşük (asit kullanımı)	Yüksek	Çin (Güney), Myanmar
Derin Deniz Madenciliği	Pasifik nodülleri	Bilinmiyor	Potansiyel olarak yüksek (ekosistem bozulması)	Çok Yüksek	Araştırma aşamasında
Geri Dönüşüm	Elektronik geri kazanım	Çok Düşük (%1-2)	Çok Düşük	Çok Yüksek	Japonya, AB, ABD

#### 4. KULLANIM ALANLARI

NTE'ler, yüksek teknoloji ve temiz enerji uygulamalarında kritik rol oynar. Bu elementler akıllı telefonlardan elektrikli araçlara, MR makinelerinden rüzgâr türbinlerine kadar çok geniş bir uygulama alanına

sahiptir. Tablo 5’te NTE’lerin çeşitli sektörlerdeki kullanım alanlarını göstermektedir. Tablo 6’te ise, önem dereceleri ve kullanım alanları gösterilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi, Pazar payının %25’i kalıcı mıknatıs ve EV motorlarında kullanılan Neodime ait, katalizör ve LED’lerde kullanılan Sermiyum ise pazarın % 20 sini, ve hibrit araç pillerinde kullanılan Lantan ise pazarın %15’ini alarak üçüncü sırada yer almaktadır. Şekil 2’de NTE elementlerinin çıkarıldığı bir maden ve uygulama alanlarından stator sargı uygulaması ve oluklardan bir görüntü verilmiştir.

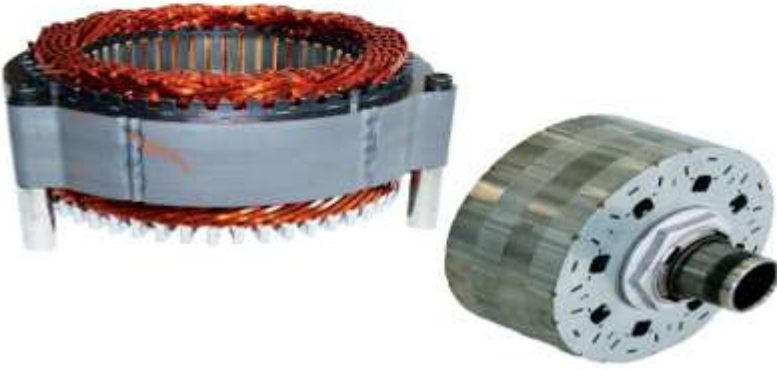
Tablo 5. NTE’lerin sektörlere göre kullanım alanları.

Sektör	Örnek Elemanlar	Kullanım Alanı
<b>Elektronik</b>	Eu, Y, Tb	Ekran fosforları, LED/LCD
<b>Mıknatıslar</b>	Nd, Pr, Dy, Tb	Elektrikli motorlar, EV’ler, rüzgâr türbinleri
<b>Katalizörler</b>	Ce, La	Petrol rafinasyonu
<b>Medikal</b>	Gd	MR kontrast maddeleri
<b>Askeri</b>	Nd, Dy, Tb	Radar, güdümlü mühimmat, yüksek performanslı mıknatıslar
<b>Optik/Telekom</b>	Er, Y	Fiber optik cihazlar

Tablo 6. Kullanım Alanları ve Önem Dereceleri (Grohol and Veeh, 2023: 1)

Element	Önemli Kullanımları	Kritiklik Derecesi	Alternatif Var mı?	Pazar Payı 2023
<b>Neodim (Nd)</b>	Kalıcı Mıknatıslar (NdFeB), EV motorları, rüzgar türbinleri	Çok Yüksek	Sınırlı (Sm-Co mıknatıslar)	%25

<b>Element</b>	<b>Önemli Kullanımları</b>	<b>Kritiklik Derecesi</b>	<b>Alternatif Var mı?</b>	<b>Pazar Payı 2023</b>
<b>Disprozyum (Dy)</b>	Yüksek sıcaklık mıknatısları, nükleer reaktör	Çok Yüksek	Çok sınırlı	%8
<b>Terbiyum (Tb)</b>	Yeşil fosforlar, katı hal cihazları	Yüksek	Yok	%4
<b>Seryum (Ce)</b>	Katalizörler, cam parlatma, LED'ler	Orta	Kısmen	%20
<b>Lantan (La)</b>	Hibrit araç pilleri, katalitik konvertörler	Orta	Var	%15
<b>İtriyum (Y)</b>	Süperiletken, kanser, LED	Yüksek	Sınırlı	%10



Şekil 2. NTE elementlerinin çıkarıldığı bir maden (üstte) ve uygulama alanlarından stator sargı uygulaması (altta) ve oluklardan bir görüntü.

## 5. NTE AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARIN KARŞILAŞTIRMASI

Bu 17 element (skandiyum, itriyum ve lantanitler), benzersiz manyetik, lüminesans (ışık yayma) ve elektrokimyasal özelliklere sahiptir. Onlar olmadan bugün kullandığımız pek çok teknoloji ya çok daha büyük ve verimsiz olurdu ya da hiç var olamazdı.

- Yeşil Enerji: Rüzgâr türbinlerinin jeneratörlerinde ve elektrikli araç motorlarında kullanılan güçlü mıknatısların temelidir.
- Tüketici Elektronik: Akıllı telefonların hoparlörleri, ekran renkleri ve titreşim motorları bu elementlere dayanır.
- Savunma Sanayii: Gündümlü füzeler, lazerler, radar sistemleri ve gece görüş dürbünleri için kritiktir.

Tablo 7’de NTE’lerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Bu tablodan görüldüğü gibi, NTE’lerin avantaj ve dezavantajları teknolojik, ekonomik, çevresel ve jeopolitik açıdan değerlendirilebilir. NTE’lerin üstün manyetik ve optik özellikleri, yüksek katma değerli ürünler olmaları, stratejik önemleri, yeşil teknolojileri mümkün kılmaları ve kaynak ülkeler için gelir ve teknolojik bağımsızlık potansiyeli gibi avantajları vardır. Öte yandan NTE’leri ikame edilmelerinin zorluğu, karmaşık arıtma süreçleri, tedarik riskleri, yüksek yatırım maliyetleri, radyoaktif atıklar, su kirliliği ve tedarik edilmesinin %90’ının Çin’den yapılması gibi bazı dezavantajları da vardır.

Eskişehir’in Beylikova ilçesindeki saha, Çin’deki meşhur Bayan Obo sahasından sonra dünyanın tek yataкта en büyük ikinci rezervi olarak kabul ediliyor. Buradaki rezerv miktarı, 694 milyon tondur. Burada sadece NTE değil; aynı zamanda florid, barit ve toryum da vardır. Sahada özellikle Lantan, Seryum, Neodimyum ve Praseodimyum gibi yüksek talep gören elementler yoğunluktadır.

Türkiye'nin NTE potansiyeli sadece Eskişehir ile sınırlı değil. Yapılan araştırmalar Malatya, Sivas, Burdur ve Isparta bölgelerinde de önemli bulgulara işaret ediyor: Malatya (Kuluncak), lantan ve seryum açısından zengin bir bölgedir. Sivas ve Burdur’da ise, Yeni keşiflerin yapıldığı bölgeler vardır. Isparta (Aksu-Sütçüler yöresinde ise, yakın zamanda farklı NTE mineralizasyonları tespit edilmiştir. Tablo 8’de Türkiye özelinde NTE’lerin avantaj ve zorluk analizi verilmiştir.

Tablo 7. NTE’lerin avantaj ve dezavantajları

<b>Aspect</b>	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
<b>Teknolojik</b>	- Benzersiz manyetik özellikler	- İkame edilmeleri zor
	- Mükemmel katalitik aktivite	- Arıtma süreci karmaşık
	- Üstün optik özellikler	- Yüksek saflık gereksinimi
	- Kompakt cihazlar mümkün	

<b>Aspect</b>	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
<b>Ekonomik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Yüksek katma değerli ürünler</li> <li>- Stratejik önem</li> <li>- İstihdam yaratma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tedarik riskleri</li> <li>- Fiyat volatilitesi</li> <li>- Yüksek yatırım maliyeti</li> </ul>
<b>Çevresel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Yeşil teknolojileri mümkün kılar</li> <li>- Enerji verimliliği sağlar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Madencilik atıkları radyoaktif</li> <li>- Su kirliliği riski</li> <li>- Yüksek karbon ayak izi</li> </ul>
<b>Jeopolitik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kaynak ülkeler için gelir</li> <li>- Teknolojik bağımsızlık potansiyeli</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tedarik konsantrasyonu (Çin %85-90)</li> <li>- Ticaret kısıtlamaları riski</li> </ul>

Tablo 8. Avantaj ve zorluk analizi (Türkiye özelinde)

<b>Fırsatlar</b>	<b>Zorluklar</b>
<b>Lojistik:</b> Avrupa pazarına olan yakınlık büyük bir avantaj.	<b>Teknoloji:</b> Elementleri birbirinden ayırmak çok karmaşık bir kimyasal süreç gerektiriyor.
<b>Enerji Bağımsızlığı:</b> Kendi rüzgâr türbinlerimizi ve elektrikli araç motorlarımızı üretme şansı.	<b>Çevre Yönetimi:</b> Atık yönetimi ve radyoaktif elementlerin (toryum) güvenli depolanması maliyetli.

Türkiye'nin bu cevheri işleme teknolojisine (know-how) sahip olması, ülkemizi sadece bir maden ihracatçısı değil, yüksek teknoloji üretim merkezi haline getirebilir.

## 6. SÜRDÜREBİLİRLİK

NTE elementlerinin sürdürülebilirlik açısından toprak ve su kirliliği, sera gazı emisyonu ve atık problemleri vardır. Şöyle ki; geleneksel madencilik ciddi toprak ve su kirliliğine yol açıyor. Bu da “çevresel ayak izi” olarak ifade edilebilir (Krishnamuthy and Gupta, 2016:1). İkinci olarak, NTE üretimi, diğer metallere kıyasla 2-3 kat daha fazla sera gazı emisyonuna neden oluyor. Bu problem de “karbon ayak izi” şeklinde ifade edilebilir. Üçüncü olarak ise, radyoaktif toryum ve uranyum yan ürünlerinin güvenli depolanması sorunu vardır (USGS, 2012:1). Bu problem de sürdürülebilirlik açısından “atık yönetimi” sorunu olarak ifade edilebilir (EC, 2023:1).

Yukarıda ifade edilen sorunların çözümü için ise aşağıda belirtilen döngüsel ekonomi, alternatif madencilik, malzeme inovasyonu, tedarik zinciri ve üretimde verimlilik gibi çözüm önerileri düşünülebilir (OECD, 2021:1).

Hali hazırda NTE'lerin sadece %1'i geri dönüştürülmektedir. Bundan dolayı, sürdürülebilirlik açısından geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi döngüsel ekonomiye katkı yapacaktır (Binnemans et al, 2013:1). Yine, Fitos madenciliği (bitkilerle metal biriktirme) ve derin deniz madenciliğinin çevresel etkilerinin dikkatlice değerlendirilmesi yapılarak alternatif madencilik geliştirilmelidir. İlâveten, nadir elementlere bağımlılığı azaltan alternatif malzemelerin geliştirilmesi ile malzeme biliminde inovasyon ve malzeme seçimi yapılmalıdır. Ayrıca, çevresel ve sosyal standartların iyileştirilmesi ile sorumlu tedarik zinciri kurulması sağlanabilir (UNEP, 2020:1). Son olarak, NTE elementlerinin sürdürülebilirliği açısından, iyonik sıvılar, biyobenzer sorbentler gibi daha temiz ayırma teknolojileri üretimde verimlilik açısından bir katma değer elde edilmesine sebep olabilir (CREIA, 2020:1). Tablo 9'da sürdürülebilirlik önlemleri ve etkinlikleri farklı çözüm ve uygulamalar için verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi, daha temiz üretim yapılarak uygulanabilirliği yüksek, orta maliyette, çevresel faydası orta-yüksek arasında ve kısa vadeli bir çözüm yaklaşımıdır. Tablo 10'da ise, küresel üretim tahmini verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi, Çin %70 lik üretim payı ile birinci, ardından ABD %15 lik üretim payı ile ikinci sırada yer almaktadır.

Tablo 9. Sürdürülebilirlik önlemleri ve etkinlikleri

<b>Çözüm Yaklaşımı</b>	<b>Uygulanabilirlik</b>	<b>Maliyet Etkinliği</b>	<b>Çevresel Fayda</b>	<b>Zaman Çerçevesi</b>
<b>Gelişmiş Geri Dönüşüm</b>	Orta	Şu anda yüksek, gelecekte azalacak	Yüksek	Orta vadeli (5-10 yıl)
<b>Alternatif Malzemeler</b>	Düşük (araştırma aşamasında)	Bilinmiyor	Potansiyel yüksek	Uzun vadeli (10+ yıl)
<b>Daha Temiz Üretim</b>	Yüksek	Orta	Orta-Yüksek	Kısa vadeli (2-5 yıl)
<b>Döngüsel Ekonomi</b>	Orta-Yüksek	Uzun vadede yüksek	Çok Yüksek	Orta-Uzun vadeli
<b>Biyomadencilik</b>	Düşük (deneysel)	Yüksek (potansiyel)	Çok Yüksek	Uzun vadeli

Tablo 10. Küresel üretim dağılımı (2023 tahmini) (USGS, 2024: 1)

Ülke	Üretim Payı (%)	Rezerv Payı (%)	Ana Madenler	İşleme Kapasitesi
Çin	70%	35%	Obo, Güney İyon killer	Tam entegre
ABD	15%	2%	Mountain Pass	Kısmi (ham konsantre ihracatı)
Myanmar	8%	Bilinmiyor	İyon killer	Minimal
Avustralya	4%	3%	Mount Weld	Kısmi
Diğer	3%	60%	Brezilya, Vietnam, Rusya	Sınırlı

## 7. GELECEK PERSPEKTİF

NTE'ler, yeşil enerji geçişinde hayati öneme sahip olmasına rağmen, mevcut üretim yöntemleri sürdürülebilir değildir. Çözüm, "yeşil teknolojilerin üretiminin de yeşil olması" paradigmasında yatıyor. Bu da madencilik mühendisliği, malzeme bilimi, çevre bilimi gibi disiplinler arası bir yaklaşım ve uluslararası iş birliği gerektiriyor (Massari and Ruberti, 2013:36). Sonuç olarak, NTE'ler sürdürülebilir kalkınma için bir ikilem sunuyor. Temiz enerji teknolojilerinin gelişimi için kritikler, ancak kendi üretim süreçleri çevresel sorunlar yaratıyor (Kim and Gould, 2022:1). Dengenin sağlanması, teknolojik yenilik, düzenleyici çerçevelerin

iyileştirilmesi ve tüketim kalıplarımızın gözden geçirilmesiyle mümkün olacaktır.

## 8. SONUÇLAR

NTE'ler modern teknolojinin temelini oluştururken, sürdürülebilirlik açısından önemli zorluklar sunmaktadır. Çözüm, tek bir yaklaşıma değil, döngüsel ekonomi, teknolojik yenilik, uluslararası iş birliği ve sorumlu üretim standartlarının kombinasyonuna bağlıdır. En kritik ihtiyaç, geri dönüşüm oranlarını artırmak (şu anda <math>< 5\%</math>) ve alternatif malzeme araştırmalarını hızlandırmaktır.

Özetle, nadir toprak elementleri, karbonsuz bir gelecek ve dijital dönüşüm için vazgeçilmezdir. Ancak, bu elementlere olan bağımlılığımız bizi hem çevresel bir ikileme hem de ciddi bir tedarik güvenliği sorunuyla karşı karşıya bırakıyor. Günümüzde bilim insanları, bu elementlere olan ihtiyacı azaltacak alternatif materyaller ve daha temiz ayrıştırma yöntemleri üzerinde yoğun bir mesai harcıyor.

## REFERANSLAR

- Balaram, V. (2023). Rare earth elements: A review of applications. *Science of The Total Environment*, pp. 133-145.
- Haxel, G. B., Hedrick, J. B., Orris, G. J., Stauffer, P. H., Hendley, J. W., U.S. Geological Survey (2023), "Rare Earth Elements - Critical Resources for High Technology".
- Jowitt, S. M., et al. (2020). Recycling of the rare earth elements. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 100358.
- Chakhmouradian, A. R. and F. Wall, F. (2012), "Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets", *Elements*. Vol. 8, no. 5, pp. 333-340.
- Grohol, M. and Veeh. C. European Commission (2023), "Critical Raw Materials Assessment", (Avrupa Komisyonu, DG GROW.)
- Krishnamurthy, N and Gupta, C. K. (2016). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*, CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, Florida, ABD.
- U.S. Geological Survey (2024). *Mineral commodity summaries 2024*: U.S. Geological Survey, p. 212.
- European Commission (2023). *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*.
- OECD (İktisadi İşbirliği ve Gelişme Teşkilatı). (2021). *OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas (Çatışma Bölgelerinden ve Yüksek Riskli Alanlardan Yapılan Mineral Tedarik Zincirleri için Sorumluluk Rehberi)*. Paris: OECD Yayınları.
- K. Binnemans, P. T. Jones, B. Blanpain, T. V. Gerven, Y. Yang, A. Walton, M. Buchert. (2013), "Recycling of rare earths: a critical review", *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 1-22, Elsevier.
- UNEP (Birleşmiş Milletler Çevre Programı). (2020). *Rare Earth Elements and the UN Sustainable Development Goals*. Nairobi, Kenya: UNEP.

- China Rare Earth Industry Association (CREIA). (2020).
- USGS – Rare Earth Elements Flow Sheets. Scientific Investigations Report. Byproduct Metals and Rare-Earth Elements Used in the Production of Light-Emitting Diodes, 2012.
- S. Massari and M. Ruberti, “Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies”, 2013, Resources Policy, vol. 38, no. 1, pp. 36-43, Elsevier.
- T. Y. Kim and T. Gould, International Energy Agency (2022). "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions"



# **Filament Sarma Yöntemi ile Kompozit Üretimi; Proses Parametreleri ve Uygulamaları**

**Hüseyin ÜNAL<sup>1</sup>  
Cihat ARDA<sup>2</sup>**

- 1- Prof. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. [unal@subu.edu.tr](mailto:unal@subu.edu.tr) ORCID No: 0000-0003-0521-6647
- 2- Makina Müh.; Subor Boru San ve Tic. AŞ.. [cihat.arda@subor.com.tr](mailto:cihat.arda@subor.com.tr) ORCID No: 0000-0002-0677-2568

## GİRİŞ

Kompozit malzemeler, yüksek özgül dayanım, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi avantajları nedeniyle modern mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde tercih edilen yöntemlerden biri olan filament sarma, özellikle aksel simetriye sahip yapıların üretiminde yüksek tekrarlanabilirlik ve mekanik performans sunmaktadır (Peters et al., 2019). Filament sarma, sürekli elyaf takviyeli kompozit yapıların üretiminde kullanılan en olgun ve endüstriyel olarak en yaygın otomatik üretim tekniklerinden biridir. Bu yöntem, özellikle aksel simetriye sahip bileşenlerin yüksek elyaf hacim oranı ve kontrollü elyaf yerleşimiyle üretilmesine olanak sağlamaktadır (Campbell, 2010). Filament sarma yöntemi, başta basınçlı kaplar, borular ve depolama tankları olmak üzere birçok kritik endüstriyel uygulamada etkin biçimde kullanılmaktadır.

Doymamış polyester reçineler, düşük maliyetleri, iyi kimyasal dayanımları ve oda sıcaklığında kürlenebilme yetenekleri sayesinde filament sarma prosesinde uzun yıllardır tercih edilen termoset matris sistemleri arasında yer almaktadır (Mallick, 2007).. Epoksi reçinelere kıyasla daha ekonomik olmaları, özellikle büyük hacimli ve seri üretime uygun parçalar için doymamış polyester esaslı filament sarma kompozitlerini cazip hale getirmektedir (Strong, 2008). Bu bölümde, UP esaslı filament sarma prosesinin temel prensipleri, kullanılan malzemeler, proses parametreleri ve ortaya çıkan mekanik davranışlar detaylı olarak ele alınmaktadır.

### FİLAMENT SARMA YÖNTEMİ İÇİN DOYMAMIŞ POLYESTER REÇİNE ÖZELLİKLERİ

#### Kimyasal Yapı ve Kür Mekanizması

Doymamış polyester reçineler, doymamış dikarboksilik asitler veya anhidritler ile dioller arasındaki polikondenzasyon reaksiyonu sonucu elde edilmektedir. Zincir yapısında bulunan çift bağlar, çapraz bağlanma için aktif bölgeler oluşturarak reçinenin termoset karakter kazanmasını sağlamaktadır (Hull and Clyne, 1996). Filament sarma uygulamalarında yaygın olarak tereftalik ve izofitalik tip UP reçineler tercih edilmektedir. Kürleme reaksiyonu, genellikle metil etil keton peroksit (MEKP) gibi organik peroksitler aracılığıyla başlatılan serbest radikal polimerizasyon mekanizması ile gerçekleşmektedir. Bu mekanizma, reçinenin düşük sıcaklıklarda dahi kürlenmesine olanak tanıyarak filament sarma prosesinin esnekliğini artırmaktadır (Mallick, 2007).

## **Reolojik ve İşlenebilirlik Özellikleri**

Filament sarma prosesinde reçinenin viskozitesi, lif demetlerinin yeterli şekilde ıslanması ve boşluksuz bir yapı elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Doymamış polyester reçineler, genellikle düşük–orta viskozite aralığında yer almakta olup cam ve karbon elyaf demetlerine kolay nüfuz edebilmektedir (Strong, 2008). Jel süresi ve pot-life değerleri, sarma hızı ve üretim süresiyle doğrudan ilişkilidir ve proses kontrolünde dikkatle ayarlanmalıdır.

## **UP Reçinelerin Sarma Sistemleri ve Proses Akışı**

UP esaslı filament sarma kompozitlerinin üretiminde en yaygın kullanılan yöntem ıslak filament sarma tekniğidir. Bu yöntemde elyaf demetleri, sarma işleminden hemen önce reçine banyosundan geçirilerek ıslatılmakta ve ardından mandrel üzerine belirlenen açıyla sarılmaktadır (Peters et al., 2019).

Proses; elyaf besleme, reçine emdirme, sarma ve kütleme olmak üzere temel aşamalardan oluşmaktadır. Reçine banyosunun sıcaklığı ve viskozitesi, liflerin düzgün şekilde kaplanması açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca elyaf geriliminin kontrolü, sarma sırasında lif kayması ve boşluk oluşumunu önlemek için kritik bir parametredir (Strong, 2008).

Mandrel malzemesi ve geometrisi, üretilen parçanın boyutsal doğruluğunu ve yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. UP sistemleriyle uyumlu metal ve çözünebilir mandreller, yaygın olarak tercih edilmektedir

## **UP ESASLI FİLAMENT SARMA KOMPOZİTLERİNDE KULLANILAN MALZEMELER**

### **Elyaf Takviyeler**

Filament sarma prosesinde kullanılan takviye elyafları, nihai kompozit yapının mekanik, fiziksel ve çevresel performansını belirleyen en kritik bileşenlerdir. UP esaslı sistemlerde tercih edilen elyaf türleri; maliyet, mekanik gereksinimler ve çevresel koşullar dikkate alınarak seçilmektedir.

### **Cam Elyaf Takviyeler**

Cam elyaflar, UP reçinelerle kimyasal uyumlulukları ve düşük maliyetleri nedeniyle en yaygın kullanılan takviye malzemeleridir (Mallick, 2007). E- tipi cam elyaflar genel mühendislik uygulamalarında tercih edilirken, daha yüksek dayanım ve modül gerektiren durumlarda S- tipi cam elyaflar kullanılmaktadır (Hull and Clyne, 1996). Cam elyafların UP reçineyle iyi ıslanabilmesi, düşük boşluk oranına sahip kompozit yapıların elde

edilmesini kolaylaştırmaktadır. Şekil 1’de filament sarma yönteminde kullanılan cam elyaf bobinlerin görüntüsü verilmiştir.

#### Karbon Elyaf Takviyeler

Karbon elyaflar, yüksek özgül dayanım ve rijitlik sunmaları nedeniyle daha ileri performans gerektiren filament sarma uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak karbon elyaf-UP ara yüzey yapışması, epoksi sistemlere kıyasla daha zayıf olabildiğinden yüzey kaplamaları ve proses optimizasyonu büyük önem taşımaktadır (Campbell, 2010).



Şekil 1. Cam elyaf bobinler (advancedglassfiberyarns.com)

#### Hibrit Elyaf Sistemleri

Hibrit elyaf sistemleri, cam ve karbon elyafların birlikte kullanılmasıyla hem maliyet hem de mekanik performans açısından dengeli çözümler sunmaktadır (Strong, 2008). Bu yaklaşım, özellikle basınçlı kap ve boru uygulamalarında yaygınlaşmaktadır. Aşağıda UP esaslı filament sarma uygulamalarında kullanılan elyafların fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Elyafların fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	E-Cam elyaf	S-Cam elyaf	Karbon elyaf
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	~2.55	~2.49	~1.75-1.90
Çekme Dayanımı (MPa)	2000-3500	4000-4800	3500-6000
Elastiklik Modülü (GPa)	70-75	85-90	230-600
UP ile uyumluluk	Çok iyi	Çok iyi	Orta-iyi
Tipik uygulamalar	Borular, tanklar	Yüksek basınçlı kaplar	Yapısal bileşenler

#### Kür Sistemleri ve Katkı Maddeleri

UP reçinelerde kürlendirme, serbest radikal polimerizasyon mekanizmasıyla gerçekleşmektedir. Bu süreçte organik peroksitler, kür başlatıcı olarak görev yapmaktadır. Filament sarma uygulamalarında en yaygın kullanılan başlatıcı

metil etil keton peroksit (MEKP) olup, düşük sıcaklıklarda etkin kütleme sağlamaktadır.

Hızlandırıcılar, kür reaksiyonunu kontrol etmek amacıyla sisteme ilave edilmektedir. Kobalt naftenat ve kobalt oktoat gibi kobalt bazlı hızlandırıcılar, kütleme hızını artırarak üretim sürelerinin kısaltılmasına olanak tanımaktadır. Ancak hızlandırıcı miktarının fazla olması, ani ekzotermik reaksiyonlara ve iç gerilmelere neden olabilmektedir (Mallick, 2007).

Katkı maddeleri, viskozite düzenleyiciler, dolgu maddeleri, UV stabilizatörler ve mekanik özellik geliştiriciler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Dolgu maddeleri (örneğin; CaCO<sub>3</sub> veya silika vb. gibi), maliyeti düşürürken rijitliği artırabilmekte ancak aşırı dolgu kullanımı reçine akışını olumsuz etkileyerek lif ıslanmasını zorlaştırmaktadır (Strong, 2008).

## **ELYAF SARMA DESENLERİ VE ELYAF YERLEŞİMİ**

Sarma deseni ve elyaf yerleşimi, filament sarma kompozitlerinin yük taşıma mekanizmasını belirleyen temel faktörlerdir. UP esaslı sistemlerde en yaygın kullanılan desenler helisel ve çemberel (hoop) sarma desenleridir.

Helisel sarma, liflerin belirli bir açıyla mandrel üzerine sarılmasıyla elde edilir ve aksel yüklerin taşınmasında kritik rol oynar. Sarma açısının artması, çevresel dayanımı artırırken aksel dayanımı azaltmaktadır. Bu nedenle basınçlı kap uygulamalarında genellikle helisel ve çemberel sarma birlikte kullanılmaktadır.

Çemberel sarma, liflerin mandrel eksenine dik olacak şekilde sarılmasıyla gerçekleştirilir ve çevresel gerilmelerin karşılanmasında en etkili yöntemdir (Peters et al., 2019). UP reçinelerin nispeten düşük elastiklik modülü dikkate alındığında, hoop sarma desenleri özellikle iç basınç altında çalışan yapılarda vazgeçilmezdir.

Elyaf yerleşiminin homojenliği, lif dalgalanmasını ve reçine zengin bölgeleri önlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Uygun elyaf hacim oranı (%55–65), UP esaslı filament sarma kompozitlerinde optimum mekanik performans için hedeflenmektedir.

Basınçlı kaplarda genellikle helisel ve çemberel sarma kombinasyonu kullanılmaktadır. Elyaf sarma açısı arttıkça çevresel dayanım artmakta, aksel dayanım azalmaktadır (Hull & Clyne, 1996). Optimum mekanik performans için elyaf hacim oranının %55–65 aralığında tutulması önerilmektedir (Campbell, 2010).

## **PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİLERİ**

Filament sarma prosesinde kontrol edilen parametreler, kompozit yapının mikro yapısını ve dolayısıyla makro ölçekli özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

**Elyaf gerilimi**, liflerin mandrel üzerine düzgün şekilde yerleşmesini sağlar. Düşük gerilim lif dalgalanmasına neden olurken, aşırı gerilim lif kırılmalarına ve reçinenin lifler arasından uzaklaşmasına yol açabilmektedir (Strong, 2008).

**Sarma hızı**, liflerin reçine banyosunda kalma süresini belirler. Yüksek hızlar, yetersiz reçine emdirilmesine ve boşluk oluşumuna sebep olurken; düşük hızlar üretim verimliliğini düşürmektedir (Mallick, 2007).

**Reçine viskozitesi**, lif demetleri arasındaki penetrasyonu belirleyen en kritik parametrelerden biridir. UP reçinelerde ideal viskozite aralığı sağlandığında, homojen mikro yapı ve düşük boşluk oranı elde edilmektedir.

## **KÜRLEME YÖNTEMLERİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİ**

UP esaslı filament sarma kompozitlerinde kürlleme genellikle oda sıcaklığında kürlleme, fırın kürlleme ve post-cure olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Oda sıcaklığında kürlleme, üretim kolaylığı sağlarken; post-cure işlemleri çapraz bağ yoğunluğunu artırarak cam geçiş sıcaklığını (T<sub>g</sub>) ve mekanik dayanımı iyileştirmektedir (Peters et al., 2019). Yetersiz kürlleme, düşük mekanik performans ve erken hasara yol açarken; aşırı ekzotermik reaksiyonlar iç gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır (Mallick, 2007). Bu nedenle kürlleme profili, parça kalınlığı ve geometrisine bağlı olarak optimize edilmelidir.

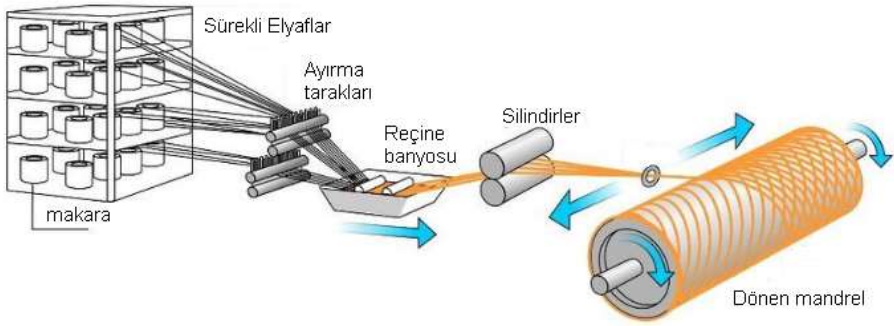
## **UP ESASLI FİLAMENT SARMA KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ**

UP esaslı filament sarma kompozitleri, yüksek özgül dayanım ve anizotropik mekanik davranış sergilemektedir. Çekme, basma ve eğme dayanımları elyaf yönelimiyle doğrudan ilişkilidir (Hull and Clyne, 1996). Basınçlı kap uygulamalarında patlama dayanımı, lif-matris yapışması ve sarma geometrisi tarafından belirlenmektedir. Fiziksel özellikler açısından bakıldığında, UP reçineler iyi kimyasal dayanım ve düşük su emme eğilimi sunmaktadır. Ancak termal dayanım, epoksi sistemlere kıyasla daha sınırlıdır (Strong, 2008).

## **FİLAMENT SARMA YÖNTEMİ**

Filament sarma yöntemi, sürekli elyaf takviyeli kompozit yapıların, önceden belirlenmiş bir geometriye sahip döner bir mandrel üzerine kontrollü gerilim, hız ve açı altında sarılması esasına dayanan otomatik bir üretim tekniğidir.

Bu yöntemde takviye elyafları, reçine ile emprenye edilerek (ıslak filament sarma) veya ön emprenyeli (prepreg) halde mandrel üzerine yerleştirilmektedir (Campbell, 2010). Bu yöntem, özellikle aksel simetriye sahip yüksek dayanımlı ve yüksek rijitlikli yapıların üretiminde tercih edilmektedir. Filament sarma yöntemi, yüksek elyaf hacim oranı, düşük boşluk içeriği ve elyaf yöneliminin hassas biçimde kontrol edilebilmesi gibi avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle özellikle basınçlı kaplar, borular, depolama tankları ve enerji sistemleri gibi aksel simetriye sahip yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Peters et al., 2019; Strong, 2008). Filament sarma yönteminin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



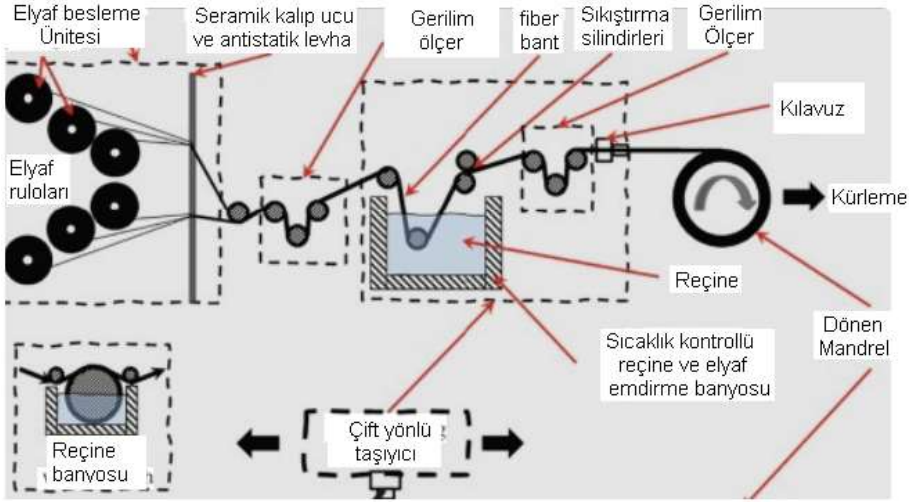
Şekil 2. Filament sarma yönteminin şematik gösterimi

### **Filament Sarma Makinasının Bileşenleri**

Bir filament sarma makinesi, elyafın bobinden çözülmesinden mandrel üzerine sarılmasına kadar olan tüm süreci kontrol eden mekanik, elektronik ve yazılımsal alt sistemlerden oluşmaktadır. Aşağıda Şekil 3’de filament sarma makine bileşenleri proses sırasına göre detaylandırılmıştır.

#### **Elyaf Besleme Ünitesi**

Elyaf besleme ünitesi, takviye elyaflarının bobinler halinde yerleştirildiği ve kontrollü biçimde çözüldüğü sistemdir (Bakınız Şekil 4). Bir filament sarma makinesinde bir veya çok sayıda bobin aynı anda kullanılabilir. Creel sisteminin temel görevi, elyafların düzgün, burulmasız ve kesintisiz şekilde proses hattına aktarılmasını sağlamaktır (Strong, 2008). Bobin çözülme hızının kontrolsüz olması, elyaf kopmaları veya lif dalgalanması gibi üretim hatalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle modern sistemlerde mekanik veya manyetik frenleme mekanizmaları kullanılmaktadır (Campbell, 2010).



Şekil 3. Filament Sarma Makinası Bileşenleri (Roy and Putluri,2023)



Şekil 4. Elyaf besleme ünitesi(directindustry.com)

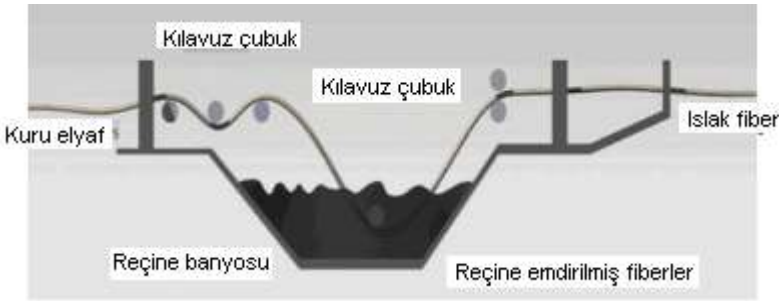
#### Elyaf Gerilim Kontrol Sistemi

Elyaf besleme ünitesinden çıkan lifler, elyaf gerilim kontrol sisteminden geçirilerek istenilen çekme kuvvetine ayarlanır. Elyaf gerilimi, filament sarma prosesinde liflerin mandrel üzerine düzgün yerleşmesi açısından kritik bir parametredir (Mallick, 2007). Elyaf besleme ünitesi, takviye elyaflarının bobinler halinde yerleştirildiği ve kontrollü biçimde çözüldüğü sistemdir. Bir filament sarma makinesinde bir veya çok sayıda bobin aynı anda kullanılabilir. Creel sisteminin temel görevi, elyafların düzgün, burulmasız ve kesintisiz şekilde proses hattına aktarılmasını sağlamaktır (Strong, 2008). Bobin çözülme hızının kontrolsüz olması, elyaf kopmaları veya lif dalgalanması gibi üretim hatalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle modern sistemlerde mekanik veya manyetik frenleme mekanizmaları kullanılmaktadır (Campbell, 2010). Düşük elyaf gerilimi lif dalgalanmasına yol açarken, aşırı gerilim lif kopmasına veya

reçinenin lifler arasından sıyrılmasına neden olmaktadır. Güncel filament sarma makinelerinde bu kontrol, sensörler ve kapalı çevrim servo sistemler aracılığıyla sağlanmaktadır (Peters et al., 2019).

### Reçine Banyosu

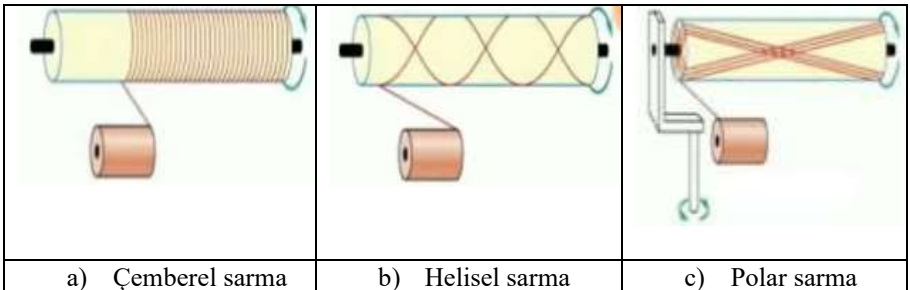
Islak filament sarma yönteminde elyaflar, mandrel üzerine sarılmadan önce Şekil 5’de verilen bir reçine banyosundan geçirilerek emprenye edilir. Bu ünitenin temel amacı, reçinenin lif demetlerine homojen biçimde nüfuz etmesini sağlamaktır (Mallick, 2007). Reçine banyosunda viskozite, sıcaklık ve reçine seviyesi kontrol altında tutulmalıdır. Düşük viskozite lif ıslanmasını artırırken, aşırı düşük viskozite reçine damlamasına ve reçine zengin bölgelerin oluşmasına neden olabilmektedir (Strong, 2008).



Şekil 5. Filament Sarma Reçine banyosu (Francucci,2026)

### Elyaf Yönlendirme Sistemi

Reçine banyosundan çıkan elyaflar, fiber delivery eye olarak adlandırılan yönlendirme sistemi aracılığıyla mandrel üzerine iletilmektedir. Bu sistem, elyaf demetlerinin sarma açısını ve mandrel üzerindeki konumunu hassas biçimde kontrol eder (Campbell, 2010). Fiber yönlendirme ünitesi, mandrel eksenine boyunca hareket ederek helisel, çemberel veya karma sarma desenlerinin oluşturulmasını sağlar (Bakınız Şekil 6). Bu sistemin hassasiyeti, sarma geometrisinin doğruluğunu ve mekanik performansı doğrudan etkilemektedir (Peters et al., 2019).



Şekil 6. Filament Sarmada sarma desenleri (Mulelid, 2018)

### Mandrel (Kalıp Sistemi)

Mandrel, filament sarma ile üretilecek parçanın iç geometrisini belirleyen kalıp sistemidir. Mandrel malzemesi uygulamaya bağlı olarak metal, çözünebilir, şişirilebilir veya kompozit olabilir (Strong, 2008). Mandrel yüzeyinin düzgünlüğü ve yüzey enerjisi, lif yerleşimi ve kütleme sonrası mandrel çıkarma işlemini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle mandrel yüzeyine genellikle ayırıcı ajanlar uygulanmaktadır (Campbell, 2010).

### Mandrel Tahrik ve Hareket Sistemi

Mandrelin dönme hızı ve eksenel hareketi, sarma açısının belirlenmesinde temel rol oynamaktadır. Bu hareketler servo motorlar ve CNC kontrollü sistemler aracılığıyla senkronize şekilde gerçekleştirilir (Peters et al., 2019). Mandrel dönme hızının artması çemberel sarma eğilimini artırırken, eksenel hızın artması helisel sarma açısını küçültmektedir. Bu nedenle mandrel hareket sistemi, sarma geometrisinin hassas şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır (Mallick, 2007).

### Kontrol Ünitesi ve CNC Yazılımı

Modern filament sarma makineleri, bilgisayar kontrollü (CNC) yazılımlarla donatılmıştır. Bu yazılımlar sayesinde sarma açısı, katman dizilimi, elyaf yerleşimi ve sarma hızları önceden programlanabilmektedir (Campbell, 2010). CNC sistemleri, mandrel geometrisini ve mekanik yük gereksinimlerini dikkate alarak optimum sarma stratejilerini oluşturmaktadır. Bu sayede yüksek tekrarlanabilirlik ve düşük üretim hatası sağlanmaktadır (Strong, 2008).

### Mandrel Çıkarma ve Son İşlem

Sarma işlemi tamamlandıktan sonra kompozit yapı, reçinenin polimerleşmesi için kütleme işlemine tabi tutulur. UP esaslı sistemlerde kütleme genellikle oda sıcaklığında başlatılmakta, gerekli durumlarda fırın veya post-cure uygulamalarıyla tamamlanmaktadır (Mallick, 2007). Kütleme sırasında sıcaklık kontrolü büyük önem taşımaktadır. Aşırı ekzotermik reaksiyonlar iç gerilmeler, mikro çatlaklar ve boyutsal hatalara yol açabilmektedir (Peters et al., 2019).

### Kütleme Ünitesi

Kütleme işlemi tamamlandıktan sonra mandrel, mekanik veya kimyasal yöntemlerle yapıdan çıkarılmaktadır. Bunu takiben yüzey bitirme, talaşlı imalat ve kalite kontrol işlemleri uygulanmaktadır. Bu aşama, nihai ürünün boyutsal doğruluğu ve yüzey kalitesi açısından kritik öneme sahiptir (Strong, 2008).

## HASAR MEKANİZMALARI VE ÜRETİM KAYNAKLI HATALAR

UP esaslı filament sarma ürünlerinde gözlenen başlıca hasar mekanizmaları; lif kopması, matris çatlağı, lif-matris ayrılması ve delaminasyondur. Üretim sırasında oluşan boşluklar ve reçine zengin bölgeler, lokal gerilme yığılmalarına neden olarak erken hasarı tetiklemektedir (Hull and Clyne, 1996). Kütleme sırasında oluşan iç gerilmeler, özellikle kalın cidarlı yapılarda mikro çatlakların oluşmasına yol açabilmektedir (Peters et al., 2019). Bu nedenle proses parametrelerinin ve kütleme koşullarının dikkatle kontrol edilmesi, yüksek kaliteli filament sarma ürünlerinin elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

## FİLAMENT SARMA PROSESİNDE KONTROL PARAMETRELERİ

### Filament Sarma Prosesinde Kontrol Parametreleri

Filament winding prosesinde nihai kompozit yapının mekanik performansı, boyutsal doğruluğu ve servis ömrü; proses sırasında kontrol edilen parametrelere doğrudan bağlıdır. Bu parametreler elyaf yerleşimi, reçine davranışı ve kütleme kinetiği üzerinde belirleyici etkiye sahiptir (Mallick, 2007).

#### Elyaf Sarma Açısı (Winding Angle)

Sarma açısı, elyafın mandrel eksenine göre yaptığı açığı ifade eder ve yük taşıma mekanizmasını doğrudan belirler.

- Düşük açılar ( $\pm 10^\circ$ – $\pm 30^\circ$ ): eksenel yük taşıma
- Orta açılar ( $\pm 45^\circ$ ): kesme ve burulma yükleri
- Yüksek açılar ( $\pm 80^\circ$ – $\pm 90^\circ$ ): çevresel (hoop) yükler

Basıncılı kaplar gibi uygulamalarda genellikle helisel ve çemberel sarma kombinasyonları tercih edilmektedir (Peters et al., 2019).

#### Elyaf Gerilimi

Elyaf gerilimi, liflerin düzgün yerleşmesi ve boşluk oluşumunun engellenmesi açısından kritik bir parametredir. Yetersiz gerilim lif dalgalanmasına, aşırı gerilim ise lif kopmasına ve reçine fakir bölgelerin oluşmasına yol açmaktadır (Strong, 2008).

#### Mandrel Dönme Hızı ve Eksenel İlerleme Hızı

Mandrel dönme hızı ile fiber yönlendirme ünitesinin eksenel hızı arasındaki oran, sarma açısını belirler. Bu parametrelerin senkronize kontrolü CNC sistemler aracılığıyla sağlanmaktadır (Campbell, 2010).

#### Reçine Viskozitesi ve Banyo Sıcaklığı

Islak filament sarma prosesinde reçine viskozitesi, liflerin yeterli şekilde ıslanması açısından büyük önem taşır. Düşük viskozite iyi emprenye sağlarken, aşırı düşük viskozite reçine akması ve reçine zengin bölgelerin oluşmasına neden olabilir (Mallick, 2007).

#### Elyaf Hacim Oranı

Filament sarma yöntemi, yüksek elyaf hacim oranlarının (%55–70) elde edilmesine olanak tanır. Elyaf hacim oranı, mekanik dayanım ve rijitlik üzerinde doğrudan etkilidir (Peters et al., 2019).

#### Kürleme Parametreleri

Kürleme sıcaklığı, süresi ve ısıtma hızı; reçinenin çapraz bağ yoğunluğunu ve iç gerilme seviyelerini belirler. Kontrolsüz ekzotermik reaksiyonlar mikro çatlaklara ve boyutsal hatalara yol açabilmektedir (Campbell, 2010).

## **FİLAMENT SARMA PROSESİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI VE UYGULAMALAR**

Filament sarma, sürekli elyaf takviyeli kompozit üretim yöntemleri arasında önemli avantajlara sahiptir:

- Elyaf yöneliminin hassas biçimde kontrol edilebilmesi
- Yüksek elyaf hacim oranı ve düşük boşluk içeriği
- Otomasyona uygunluk ve yüksek tekrarlanabilirlik
- Malzeme israfının düşük olması
- Yüksek özgül dayanım ve rijitlik elde edilmesi

Bu avantajlar, filament sarma yöntemini yapısal performansın kritik olduğu uygulamalar için cazip hale getirmektedir (Strong, 2008; Peters et al., 2019). Her ne kadar filament sarma yöntemi yüksek performans gösterse de aşağıda belirtilen bazı sınırlamalara da sahiptir. Bu aşağıda belirtilen dezavantajlar, proses tasarımı ve malzeme seçimi sırasında mutlaka dikkate alınmalıdır (Mallick, 2007).

- Geometri kısıtlaması (çoğunlukla aksenal simetrik yapılar)
- Keskin köşeli veya karmaşık şekillerin üretiminde zorluk
- Mandrel maliyetleri ve mandrel çıkarma problemleri
- Reçine damlaması ve yüzey pürüzlülüğü sorunları (ıslak sarma)
- Kürleme sırasında iç gerilme oluşumu

## **FİLAMENT SARMA PROSESİ İLE ÜRETİLEN ÜRÜNLER**

Filament sarma yöntemi, özellikle yüksek basınç ve yük taşıma gerektiren yapısal bileşenlerin üretiminde (bakınız Şekil 7) yaygın olarak

kullanılmaktadır. Bu ürünler, metal alternatiflerine kıyasla daha düşük ağırlık ve daha yüksek korozyon direnci sunmaktadır (Peters et al., 2019).

- Basıncılı kaplar (hidrojen, CNG, LPG tankları)
- Kompozit borular ve boru hatları
- Kimyasal depolama tankları
- Roket motor muhafazaları
- Kompozit silindirler ve kolonlar



Şekil 7.Filament sarma yöntemi ile imal edilen ürünler

## REFERANSLAR

- Campbell, F. C. (2010). Manufacturing processes for advanced composites. Elsevier.
- Francucci G. (2026). 5- Recent advances in the processing and performances of thermoset biocomposites, *Biocomposites in Manufacturing, Properties, Processes and Industrial Applications*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 109-153
- Hull, D., and Clyne, T. W. (1996). An introduction to composite materials (2nd edition). Cambridge University Press.
- Mallick, P. K. (2007). Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design (3rd ed.). CRC Press.
- Peters, S. T., Humphrey, W. D., and Foral, R. F. (2019). Filament winding composite structure fabrication. SAMPE.
- Roy S.S., Potburi P. (2023). 7- Braiding and Flament Winding, *Design and Manufacture of Structural Composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pp.145-187

Mulelid M. (2018). Novel Impregnation System for Flament Winding. Material Science and Engineering.

Strong, A. B. (2008). Fundamentals of composites manufacturing (2nd ed.). SME.

<https://www.fictiv.com/articles/composite-layup-manufacturing-guide>

<https://kevra.fi/guides/vacuum-infusion/?lang=en>

<https://www.osborneindustries.com/news/resin-transfer-molding-process-works/>

<https://www.directindustry.com/prod/comsat/product-139348-2693954.html>

<https://advancedglassfiberyarns.com/index.php/roving-for-filament-winding/>



# Çimentolu Harç ve Betonlarda Polipropilen Liflerin Performansı

**Ömer Faruk PORTAKAL<sup>1</sup>**

**Özlem ÇALIŞKAN<sup>2</sup>**

**Ahmet Ferdi ŞENOL<sup>3</sup>**

- 1- İnşaat Mühendisi; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD. [omerfaruk\\_portakal05@hotmail.com](mailto:omerfaruk_portakal05@hotmail.com) ORCID No: 0009-0009-9052-3158
- 2- Doç.Dr.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [ozlem.caliskan@bilecik.edu.tr](mailto:ozlem.caliskan@bilecik.edu.tr) ORCID No: 0000-0002-5272-9552
- 3- Öğr.Gör.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. [ahmetferdi.senol@bilecik.edu.tr](mailto:ahmetferdi.senol@bilecik.edu.tr) ORCID No: 0000-0002-6663-3340

## ÖZET

Polipropilen lifler, son yıllarda çimentolu harç ve betonların performansını geliştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan lif türlerinden biri haline gelmiştir. Bu çalışmada, çimentolu harç ve betonlarda kullanılan polipropilen liflerin performansı, özellikle son yıllardaki literatürde yer alan çalışmalar kapsamında değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle polipropilen liflerin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiş, ardından bu liflerin taze harç ve beton özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun yanında lif katkısının betonun mekanik davranışı üzerindeki etkileri; basınç, eğilme, çekme ve darbe dayanımları ile tokluk ve süneklik özellikleri açısından da değerlendirilmiştir. Ayrıca polipropilen liflerin dayanıklılık performansı üzerindeki etkileri de ele alınmış; özellikle su emme ve geçirimsizlik davranışı, rötre ve çatlak kontrolü ile yüksek sıcaklık ve yangın dayanımı gibi konular incelenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar genel olarak polipropilen liflerin taze karışımların işlenebilirliğini bir miktar azalttığını göstermektedir. Buna karşılık lif katkısının çekme ve eğilme dayanımı ile darbe direnci ve süneklik özellikleri üzerinde olumlu etkiler oluşturabildiği görülmektedir. Basınç dayanımı üzerindeki etkinin ise lif miktarı, lif boyutu ve karışım tasarımı gibi parametrelere bağlı olarak değişebildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca polipropilen liflerin rötre çatlaklarının oluşumunu sınırlayabildiği ve yüksek sıcaklık koşullarında buhar basıncını azaltarak betonun yangın performansına katkı sağlayabildiği değerlendirilmektedir.

*Anahtar Kelimeler – Beton, Polipropilen lif, İşlenebilirlik, Mekanik Özellikler, Dayanıklılık*

---

## GİRİŞ

Beton yapılar; araç çarpışmaları, düşen cisimler ve patlama etkileri gibi çeşitli darbe yüklerine maruz kalabilmektedir. Bu tür yükleme durumlarında geleneksel harç ve betonlar genellikle gevrek kırılma davranışı sergilemekte ve ani hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, betonun darbe etkilerine karşı davranışını iyileştirmek amacıyla farklı türde liflerin beton matrisine ilave edilmesi yaygın olarak başvurulan bir yöntemdir. Lif takviyesi, çatlak oluşumunu geciktirerek betonun enerji yutma kapasitesini artırmakta ve daha sünek bir davranış sergilemesini sağlamaktadır (Khan vd., 2026).

Polipropilen lifler, özellikle yol kaplamaları, püskürtme uygulamaları ve yangına karşı koruma gereken yapısal elemanlarda tercih edilir; çatlak oluşumunu engelleyerek malzemenin bütünlüğünü korur ve askeri yapılar gibi yüksek güvenli alanlarda da etkin rol oynar (Şenol, 2022:10).

Bu bağlamda, polipropilen liflerin çimento esaslı kompozitlerde kullanımı özellikle malzemenin kırılma davranışının azaltılması ve eğilme

dayanımının geliştirilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Polipropilen lifler, matris içerisinde çatlak köprüleme mekanizması oluşturarak çatlak ilerlemesini sınırlandırmakta ve böylece kompozitin sünekliğini artırmaktadır. Bununla birlikte literatürde, polipropilen lif kullanımının basınç dayanımı üzerinde belirgin bir artış sağlamadığı, bazı durumlarda ise sınırlı bir azalmaya neden olabildiği bildirilmektedir. Buna karşın lif takviyesinin özellikle eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu belirtilmektedir. Ayrıca lif miktarındaki artışın, kompozit yapıda porozite ve su emme oranını bir miktar artırabildiği de ifade edilmektedir (Akgül, 2025, 722–725).

Literatürde polipropilen liflerin özellikle bağ dayanımı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Abdulrahman vd. (2025:12) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada polimer modifiyeli çimento harçlarında polipropilen lif kullanımının eğik kesme bağ dayanımı (slant-shear) ve doğrudan çekme bağ dayanımı (pull-off) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada harç karışımlarına %0–1.5 hacim oranlarında polipropilen lif ilave edilmiş ve bağ dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, lif ilavesinin özellikle slant-shear bağ dayanımını önemli ölçüde artırdığını ve %1.5 lif oranında yaklaşık %100'e varan bir artış sağlandığını göstermiştir. Buna karşılık, pull-off bağ dayanımında lif katkısının daha sınırlı bir etki gösterdiği ve yalnızca bazı karışımlarda yaklaşık %20 civarında bir artış elde edildiği belirlenmiştir.

Bu kapsamda, polipropilen liflerin çimento esaslı kompozitlerdeki performansının kapsamlı biçimde değerlendirilmesi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, çimentolu harç ve betonlarda kullanılan polipropilen liflerin temel özellikleri ve mühendislik performansına olan etkileri literatürdeki çalışmalar ışığında derlenmiştir. Öncelikle polipropilen liflerin kimyasal ve fiziksel özellikleri ile beton ve harçlarda kullanım amaçları ele alınmıştır. Ardından lif katkısının basınç dayanımı, çekme ve eğilme dayanımı, darbe dayanımı ile tokluk ve süneklik gibi mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca polipropilen liflerin su emme ve geçirimsizlik davranışı, rötre ve çatlak kontrolü, donma-çözülme dayanımı ile yüksek sıcaklık ve yangın performansı gibi dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri de literatür kapsamında değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında ele alınan alt başlıklar çerçevesinde mevcut araştırmalar sistematik bir şekilde incelenerek polipropilen lif takviyesinin çimentolu kompozitlerin performansına olan katkıları bütüncül bir bakış açısıyla ortaya konulmuştur.

## **POLİPROPİLEN LİFLER VE TEMEL ÖZELLİKLERİ**

### ***Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri***

Polipropilen lifler, düşük yoğunluk ve düşük elastisite modülüne sahip sentetik lifler olup beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılan takviye malzemelerinden biridir. Bu liflerin çapları genellikle 10–100 µm, uzunlukları ise 6–50 mm aralığında değişmektedir (Şekil 1). Bu geometrik

özellikler, liflerin çimentolu matris içerisinde homojen şekilde dağılabilmesine ve çatlak oluşumunun erken aşamalarında etkili bir köprüleme mekanizması oluşturmaya katkı sağlamaktadır.

Bununla birlikte polipropilen lifler hidrofobik bir yüzey yapısına sahiptir ve bu nedenle çimento hamuru tarafından kolaylıkla ıslanmaz. Ancak liflerin düşük yoğunluğa sahip olması, hafiflikleri, düşük maliyetleri ve düşük termal iletkenlikleri gibi avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca polipropilen lifler asidik ve alkali ortamlara karşı yüksek kimyasal direnç göstermekte olup bu özellikleri sayesinde çimento esaslı kompozitlerde dayanıklı bir takviye malzemesi olarak tercih edilmektedir (Şenol, 2022:11).



Şekil 1: Polipropilen liflerin harç ve betonlarda kullanımı (Şenol, 2022:11)

## **POLİPROPİLEN LİFLERİN İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Polipropilen liflerin beton ve harç karışımlarına ilave edilmesi, taze betonun işlenebilirliği üzerinde belirgin etkiler oluşturabilmektedir. Literatürde, lif ilavesinin genellikle karışımın akışkanlığını azalttığı ve lif miktarının artmasıyla birlikte çökme (slump) değerlerinde düşüş meydana geldiği bildirilmektedir (Karahan ve Atis, 2011:1045). Bu durum, liflerin karışım içerisinde oluşturduğu fiziksel engelleme etkisi ve lif-matris etkileşimleri ile açıklanmaktadır.

Polipropilen liflerin çimento esaslı karışımlara eklenmesi karışımın reolojik özelliklerini de değiştirebilmektedir. Özellikle lif varlığının akma gerilmesi ve viskozite değerlerini artırabildiği ifade edilmektedir. Ayrıca lif uzunluğu ve lif miktarının artmasıyla birlikte karışımın akış davranışının değiştiği ve bunun taze harçların işlenebilirliği üzerinde belirgin bir etki oluşturduğu belirtilmektedir (Si vd., 2026:1). Deneysel çalışmalar da bu eğilimi desteklemektedir. Eidan vd. (2019:198) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada beton karışımlarına 6 mm ve 12 mm uzunluğunda polipropilen lifler sırasıyla 1, 1.5 ve 2 kg/m<sup>3</sup> dozajlarında ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, lif miktarının artmasıyla birlikte betonun işlenebilirliğinin azaldığını ve çökme değerinin 185 mm'den 155 mm'ye kadar düştüğünü göstermiştir.

Benzer şekilde Sarıkaya ve Susurluk (2023:8) tarafından yapılan araştırmada beton karışımlarına %1, %2 ve %3 oranlarında polipropilen lif eklenmiş ve lif dozajındaki artışın çökme değerlerinde önemli bir azalmaya yol açtığı belirlenmiştir. Çalışmada kontrol betonunda yaklaşık 170 mm olan çökme değerinin, %3 polipropilen lif içeren karışımlarda yaklaşık 20 mm seviyesine kadar düştüğü rapor edilmiştir.

Buna karşın, bazı araştırmalarda lif katkısının yalnızca işlenebilirliği azaltmakla kalmayıp taze betonun kohezyonunu da artırabildiği ifade edilmektedir. Açıkgenç vd. (2012:46) tarafından yapılan deneysel çalışmada beton karışımlarına hacimce %1 ve %2 oranlarında polipropilen lif ilave edilmiş ve lif oranı arttıkça betonun çökme miktarının azaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte araştırmacılar, lif katkısının taze betonun işlenebilirliğini azaltmasına rağmen karışımın kohezyonunu artırarak segregasyon riskini azaltabildiğini belirtmiştir.

## **POLİPROPİLEN LİFLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİ** ***Basınç Dayanımına Etkisi***

Polipropilen liflerin beton içerisine ilave edilmesi, betonun mekanik performansını etkileyebilen önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Genel olarak lif takviyesinin betonun basınç dayanımında belirli iyileşmeler sağlayabildiği ve bu durumun lif takviyeli betonların mekanik performansına olumlu katkılar sunabildiği ifade edilmektedir (Boğa vd., 2022:3). Bununla birlikte literatürde, lif içeriğinin belirli bir seviyeye kadar artırılmasının basınç dayanımını yükseltebildiği; ancak lif miktarının aşırı artırılması durumunda dayanımın yeniden azalabildiği bildirilmektedir (Sun ve Xu, 2009:200). Bu durumun, lif miktarına, lif uzunluğuna ve karışım özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebildiği de belirtilmektedir (Si vd., 2026:1).

Öte yandan bazı çalışmalarda polipropilen lif katkısının betonun basınç dayanımı üzerinde belirgin bir iyileşme sağlamadığı ve lif miktarındaki artışa bağlı olarak dayanımda sınırlı azalmalar meydana gelebileceği ifade edilmektedir (Karahana ve Atis, 2011:1046). Bu bağlamda

yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde, farklı sonuçların elde edilebildiği görülmektedir.

Yuan ve Jia (2020:11) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, su/bağlayıcı oranı 0.30 ve 0.35 olan beton karışımlarına %0.45, %0.90 ve %1.35 hacim oranlarında polipropilen lif ilave edilerek betonun mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Araştırma sonuçları, lif oranının aşırı artırılması durumunda beton matrisinde boşluk oluşumunun arttığını ve %1.35 lif içeriğinde basınç dayanımının yaklaşık %70 oranında azalabildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Islam ve Gupta (2016:353) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada beton karışımlarına %0.1, %0.15, %0.2, %0.25 ve %0.3 hacim oranlarında polipropilen lif ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, lif katkısının betonun basınç dayanımı üzerinde sınırlı bir etki oluşturduğunu ve lif oranının artmasıyla birlikte dayanımda %2–10 arasında azalma meydana geldiğini ortaya koymuştur.

Buna karşılık bazı araştırmalarda polipropilen lif kullanımının basınç dayanımında artış sağlayabildiği de rapor edilmiştir. Kakooei vd. (2012:75) tarafından gerçekleştirilen çalışmada beton karışımlarına 0–2 kg/m<sup>3</sup> aralığında polipropilen lif ilave edilmiş ve lif içeriğinin artmasıyla birlikte betonun basınç dayanımının yükseldiği belirlenmiştir. Çalışmada kontrol betonunda yaklaşık 25 MPa olan basınç dayanımı, 0.5, 1, 1.5 ve 2 kg/m<sup>3</sup> polipropilen lif içeren karışımlarda sırasıyla yaklaşık %16, %28, %44 ve %48 oranlarında artış göstermiştir. Ayrıca lif katkısının betonun geçirgenliğini azaltarak dayanıklılık performansını da iyileştirdiği ifade edilmiştir.

Bununla birlikte bazı araştırmalar lif miktarının belirli bir seviyeyi aşması durumunda dayanımın yeniden düşebildiğini göstermektedir. Sarıkaya ve Susurluk (2023:8) tarafından yapılan çalışmada beton karışımlarına %1–3 oranlarında polipropilen lif ilavesinin basınç dayanımını bir miktar azalttığı belirlenmiştir. 28 günlük basınç dayanımı kontrol betonunda yaklaşık 49.76 MPa iken, %3 polipropilen lif içeren karışımlarda yaklaşık 44.19 MPa seviyesine gerilemiştir. Benzer şekilde Açıkgenç vd. (2012:48–49) tarafından yapılan çalışmada da polipropilen lif oranının belirli bir seviyeye kadar artırılmasıyla basınç dayanımının yükseldiği; ancak lif oranının daha fazla artırılması durumunda dayanımın yeniden azalabildiği belirlenmiştir. Araştırmacılar özellikle %1 lif oranında referans betona göre dayanım artışı gözlenirken, %2 lif oranında bazı karışımlarda dayanımın azaldığını rapor etmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, polipropilen liflerin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisinin lif miktarı, lif boyutu, karışım tasarımı ve matris yapısına bağlı olarak değişebildiği ve literatürde farklı eğilimlerin rapor edildiği görülmektedir.

### ***Çekme ve Eğilme Dayanımına Etkisi***

Polipropilen liflerin beton matrisi içerisinde kullanılması, betonun özellikle çekme ve eğilme davranışı üzerinde olumlu etkiler oluşturabilmektedir. Lif takviyesi sayesinde betonun eğilme dayanımının artabildiği ve kırılma davranışının daha sünek bir karakter kazandığı bildirilmektedir. Bu durumun temel nedeni, liflerin çatlak oluşumu sonrasında gerilmelerin yeniden dağılımına katkı sağlaması ve çatlak ilerlemesini sınırlandırmasıdır. Böylece betonun yapısal performansı önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir (Sun ve Xu, 2009:198–200). Polipropilen liflerin beton matrisi içerisinde çatlak köprüleme etkisi oluşturduğu ve bu mekanizma sayesinde çatlakların ilerlemesini sınırlandırarak kırılma davranışının daha sünek hale gelmesine katkı sağladığı ifade edilmektedir (Boğa vd., 2022:5). Liflerin bu etkisi, özellikle çatlak oluşumundan sonraki yük taşıma kapasitesinin korunmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Ayrıca literatürde, polipropilen liflerin beton matrisi içerisinde üç boyutlu bir lif ağı oluşturduğu ve bu yapının gerilmelerin daha homojen şekilde dağıtılmasına katkı sağladığı belirtilmektedir. Bu durum, betonun genel mekanik performansını iyileştirebilmekte ve özellikle çekme ve eğilme davranışının gelişmesine yardımcı olabilmektedir (Zhang vd., 2026:4). Benzer şekilde Si vd. (2026:1) tarafından yapılan çalışmalarda da liflerin matris içerisinde oluşturduğu ağ yapısının gerilmelerin yeniden dağıtılmasına katkı sağladığı ve bu mekanizmanın çatlak ilerlemesini sınırlandırarak çekme ve eğilme performansının iyileştirilmesine yardımcı olduğu ifade edilmektedir.

### ***Darbe Dayanımına Etkisi***

Polipropilen liflerin beton karışımlarına ilave edilmesi, betonun darbe etkileri altındaki davranışını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Deneysel çalışmalar, lif takviyesinin betonun darbe direncini ve dinamik performansını artırdığını göstermektedir. Özellikle lif içeren beton numunelerinde ilk çatlak oluşumu ve nihai kırılma için gerekli darbe sayısının, lifsiz betonlara kıyasla belirgin şekilde arttığı bildirilmektedir (Sun ve Xu, 2009:200). Polipropilen liflerin beton içerisine ilave edilmesi betonun darbe yükleri altında sergilediği performansı geliştirebilmekte ve uygun lif miktarının seçilmesi durumunda betonun enerji yutma kapasitesinin önemli ölçüde artabildiği ifade edilmektedir (Zhang vd., 2026:4). Bu durum, liflerin çatlak ilerlemesini sınırlandırması ve darbe etkisi altında oluşan gerilmelerin matris içerisinde daha dengeli şekilde dağıtılmasına katkı sağlaması ile açıklanmaktadır. Literatürde yer alan deneysel çalışmalar da bu durumu desteklemektedir. Şahin vd. (2021:484) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, 12 mm uzunluğunda ve 32 µm çapında M12 monofilament tip polipropilen lifler beton karışımlarına farklı oranlarda ilave edilmiştir. Lif oranları %0.20, %0.40, %0.60, %0.80 ve %1 olarak belirlenmiş ve lif katkısının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak

incelenmiştir. Darbe dayanımı deney sonuçları, polipropilen lif katkısının betonun darbe performansını önemli ölçüde artırdığını ve darbe dayanımında %318'e varan artışlar sağlanabildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Dong (2020:5) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada beton kompozitlerine 0.5, 1, 1.5 ve 2 kg/m<sup>3</sup> oranlarında polipropilen lif ilave edilerek betonun mekanik ve dayanıklılık performansı incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre lif içeriğinin artmasıyla birlikte betonun darbe dayanımının önemli ölçüde yükseldiği belirlenmiştir. Lif içermeyen beton numunelerinde ilk çatlak oluşumu ortalama 47 darbe sonrasında gerçekleşirken, 2 kg/m<sup>3</sup> polipropilen lif içeren numunelerde bu değer yaklaşık 135 darbe seviyesine yükselmiştir. Bu sonuçlar, polipropilen liflerin beton içerisinde çatlak ilerlemesini sınırlandırarak darbe dayanımını artırdığını göstermektedir.

Öte yandan, lif miktarının aşırı artırılması her zaman olumlu sonuçlar vermeyebilmektedir. Xiaogang vd. (2025:3) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada polipropilen lif takviyeli betonların dinamik darbe davranışı Split Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) sistemi kullanılarak incelenmiştir. Araştırma sonuçları, uygun lif içeriğinin betonun enerji yutma kapasitesini ve darbe altındaki mekanik performansını artırdığını; ancak lif oranının aşırı yükseltilmesi durumunda enerji sönmüleme etkisinin azalabildiğini göstermiştir.

### ***Tokluk ve Süneklik Özelliklerine Etkisi***

Polipropilen liflerin beton içerisine ilave edilmesi, betonun tokluk ve süneklik özellikleri üzerinde önemli iyileşmeler sağlayabilmektedir. Liflerin en önemli etkilerinden biri, beton matrisi içerisinde çatlak köprüleme mekanizması oluşturarak çatlakların birbirine bağlanmasına katkı sağlamasıdır. Bu mekanizma sayesinde betonun kırılma sonrası deformasyon kapasitesi artmakta ve kırılma sonrası esneklik davranışı gelişebilmektedir (Şenol, 2022:11). Benzer şekilde polipropilen liflerin çatlak köprüleme etkisi sayesinde betonun tokluğunu artırdığı ve çatlama sonrasında yük taşıma kapasitesinin belirli ölçüde korunmasına katkı sağladığı bildirilmektedir (Sun ve Xu, 2009:203). Bunun yanı sıra liflerin beton matrisi içerisinde gerilmelerin yeniden dağıtılmasına katkı sağladığı ve bu sayede betonun enerji yutma kapasitesinin arttığı ifade edilmektedir. Lif takviyesi ile betonun çatlak sonrası davranışının iyileştiği ve kırılma sürecinde daha sünek bir davranış sergilendiği belirtilmektedir (Boğa vd., 2022:3). Bu durum, özellikle liflerin matris içerisinde oluşturduğu bağlanma etkisi ve çatlak ilerlemesini sınırlandırma kapasitesi ile açıklanmaktadır.

Literatürde ayrıca polipropilen liflerin beton içerisindeki çatlak ilerlemesini sınırlandırarak tokluk ve süneklik özelliklerini geliştirdiği vurgulanmaktadır. Liflerin çatlak yüzeyleri arasında köprü görevi görmesi, çatlakların ani şekilde ilerlemesini engelleyebilmekte ve böylece betonun kırılma davranışı daha kontrollü hale gelmektedir (Zhang vd., 2026:4).

Deneyisel çalışmalar da bu bulguları desteklemektedir. Xiaogang vd. (2025:3) tarafından gerçekleştirilen çalışmada polipropilen liflerin beton içerisinde çatlak ilerlemesini sınırladığı ve kırılma sırasında oluşan parçacık boyutunu küçülterek kırılma mekanizmasını değiştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca liflerin mikro ölçekte çatlak direnci oluşturarak betonun kırılma dayanımını ve enerji sönmüleme kapasitesini geliştirdiği rapor edilmiştir.

## **POLİPROPİLEN LİFLERİN DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

### ***Su Emme ve Geçirimsizlik Özellikleri***

Polipropilen liflerin betonun dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri literatürde farklı yönleriyle ele alınmaktadır. Bazı araştırmalarda, polipropilen liflerin beton mikro yapısını değiştirerek boşluk miktarını azaltabildiği ve bunun sonucunda betonun su geçirimsizliğinin azalabildiği bildirilmektedir (Sun ve Xu, 2009:198). Bu durum, liflerin beton matrisi içerisinde mikro çatlakların ilerlemesini sınırlandırması ve çatlakların sürekliliğini azaltması ile açıklanmaktadır.

Bununla birlikte, bazı çalışmalarda polipropilen liflerin hidrofobik yüzey özellikleri nedeniyle lif çevresinde su cepleri oluşabildiği ve geçiş bölgesinde (ITZ) daha fazla hava kabarcığı çekerek gözenekliliği artırabildiği belirtilmektedir (Boğa vd., 2022:3). Bu durum lif-matris ara yüzeyinde oluşan boşlukların betonun gözenek yapısını etkileyebileceğini göstermektedir.

Polipropilen lif içeren betonlarda porozite ve su emme değerlerinin lif içeriğinin artmasıyla birlikte yükseldiği ve bunun beton içerisindeki boşluk yapısındaki değişim ile ilişkili olabileceği ifade edilmektedir (Karahan ve Atis, 2011:1046). Nitekim bazı araştırmalar, lif ilavesinin beton içerisinde ek ara yüzey bölgeleri oluşturması nedeniyle su ve gaz geçirimsizliğini artırabildiğini ortaya koymaktadır. Bu durumun, liflerin beton matrisi içerisinde yeni ara yüzey bölgeleri oluşturmasına ve gözenek bağlantılarını artırmasına bağlı olabileceği belirtilmektedir (Islam ve Gupta, 2016:353).

Deneyisel çalışmalar da benzer eğilimleri ortaya koymaktadır. Sarıkaya ve Susurluk (2023:7) tarafından gerçekleştirilen çalışmada lif dozajının artmasıyla birlikte beton numunelerinin su emme oranlarının da arttığı belirlenmiştir. Araştırmacılar bu durumun liflerin beton içerisinde yeni ara yüzey bölgeleri oluşturması ve boşluk yapısında meydana gelen değişim ile ilişkili olabileceğini ifade etmiştir.

### ***Rötre ve Çatlak Kontrolü***

Polipropilen liflerin beton içerisine ilave edilmesi, betonun rötre davranışı ve çatlak oluşumu üzerinde olumlu etkiler sağlayabilmektedir. Özellikle lif takviyesinin betonun rötre deformasyonunu azaltabildiği ve erken yaşlarda meydana gelen çatlakların gelişimini sınırlandırabildiği bildirilmektedir (Sun ve Xu, 2009:202). Bu durum, liflerin beton matrisi

içerisinde oluşan gerilmeleri dengeleyerek mikro çatlakların ilerlemesini kontrol etmesi ile açıklanmaktadır.

Yapılan araştırmalar, lif hacim oranının artmasıyla birlikte kuruma rötrelere azaldığını ve liflerin beton içerisindeki mikro hareketleri sınırlayarak çatlak oluşumunu kontrol edebildiğini göstermektedir (Karahan ve Atis, 2011:1047). Liflerin bu etkisi, beton matrisi içerisinde oluşan çekme gerilmelerinin daha dengeli şekilde dağıtılmasına katkı sağlaması ile ilişkilendirilmektedir.

Deneysel çalışmalar da polipropilen liflerin özellikle plastik rötre çatlaklarının kontrolünde oldukça etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Islam ve Gupta (2016:352) tarafından gerçekleştirilen çalışmada polipropilen liflerin plastik rötre çatlaklarının oluşumunu önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Beton karışımlarına %0.1–0.3 oranında lif ilavesi ile plastik rötre çatlaklarının %50–99 oranında azaldığı, ayrıca çatlak genişliğinin %72–93 oranında küçüldüğü rapor edilmiştir.

### ***Yüksek Sıcaklık ve Yangın Dayanımı***

Polipropilen liflerin betonun yüksek sıcaklık davranışı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bu lifler yaklaşık 170 °C üzerindeki sıcaklıklarda eriyerek beton matrisi içerisinde mikro kanallar oluşturmakta ve böylece iç buhar basıncının azalmasına katkı sağlamaktadır. Bu mekanizma sayesinde betonun iç gerilmeleri düşmekte ve yüksek sıcaklık altında meydana gelebilecek patlayıcı parçalanma (spalling) riskinin azalabildiği ifade edilmektedir (Şenol, 2022:11).

Deneysel çalışmalar da polipropilen liflerin yüksek sıcaklık performansına olumlu katkılar sağlayabildiğini göstermektedir. Eidan vd. (2019:202) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 12 mm uzunluğunda polipropilen lif içeren beton numuneleri 100–600 °C sıcaklık aralığına maruz bırakılmıştır. Araştırma sonuçları, 400 °C sıcaklık sonrasında lif içeren betonların artık dayanım değerlerinin lifsiz betonlara göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca 600 °C sıcaklık uygulamasından sonra da polipropilen lif içeren betonların lifsiz betonlara kıyasla daha yüksek artık dayanım sergilediği belirlenmiştir.

Rudnik ve Drzymała (2018:1006–1012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada beton karışımlarına 1.8 ve 3.0 kg/m<sup>3</sup> oranlarında polipropilen lif ilave edilerek betonun yüksek sıcaklık altındaki davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmada numuneler 200 °C ve 300 °C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve betonun termal davranışı eşzamanlı termal analiz yöntemi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre polipropilen lif ilavesi betonun termal stabilitesini artırmış ve yüksek sıcaklık etkisi altında betonun iç yapısında meydana gelen değişimleri sınırlamıştır. Ayrıca liflerin yüksek sıcaklıklarda erimesi sonucunda beton içerisinde oluşan mikro kanalların su buharı basıncını azaltarak patlayıcı parçalanma riskini düşürdüğü ifade edilmiştir.

## SONUÇ

Bu çalışmada, çimentolu harç ve betonlarda kullanılan polipropilen liflerin performansı, literatürde yer alan çalışmalar doğrultusunda incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Polipropilen lifler düşük yoğunlukları, kimyasal dayanımları ve hidrofobik yüzey özellikleri sayesinde çimento esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan sentetik liflerdir. Liflerin matriste oluşturduğu çatlak köprüleme mekanizması, betonun kırılma davranışını daha sünek hale getirerek yapısal performansın iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Polipropilen lif ilavesi, taze betonun işlenebilirliğini genellikle azaltmaktadır. Lif miktarı ve lif uzunluğu arttıkça karışımın akışkanlığında azalma ve çökme değerlerinde düşüş meydana gelebilmektedir. Buna karşın liflerin karışımın kohezyonunu artırarak segregasyon riskini azaltabildiği de rapor edilmektedir.

Mekanik özellikler açısından değerlendirildiğinde, polipropilen lifler özellikle çekme, eğilme ve darbe dayanımı üzerinde belirgin iyileşmeler sağlayabilmektedir. Liflerin beton matrisi içerisinde oluşturduğu üç boyutlu ağ yapısı ve çatlak köprüleme etkisi sayesinde çatlak ilerlemesi sınırlandırılmakta ve betonun enerji yutma kapasitesi ile tokluk özellikleri geliştirilmektedir. Buna karşılık basınç dayanımı üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu ve bazı durumlarda lif içeriğinin artmasıyla birlikte dayanımın azalabildiği değerlendirilmektedir.

Dayanıklılık özellikleri açısından polipropilen liflerin betonun rötre deformasyonunu azaltabildiği ve özellikle plastik rötre çatlaklarının oluşumunu önemli ölçüde sınırlandırabildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte bazı çalışmalarda lif ilavesinin betonun porozitesini ve su emme oranını artırabildiği, bunun ise lif-matris ara yüzeyinde oluşan boşluk yapısı ile ilişkili olabileceği ifade edilmektedir.

Polipropilen liflerin yüksek sıcaklık performansı üzerinde de olumlu etkileri bulunmaktadır. Liflerin yaklaşık 170 °C üzerindeki sıcaklıklarda eriyerek beton içerisinde mikro kanallar oluşturması, su buharı basıncını azaltarak patlayıcı parçalanma riskini düşürmekte ve betonun yangın dayanımını artırabilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, polipropilen liflerin çimentolu harç ve betonlarda özellikle süneklik, darbe direnci ve çatlak kontrolü açısından önemli avantajlar sağladığı; ancak optimum lif içeriğinin belirlenmesinin hem mekanik performans hem de dayanıklılık özellikleri açısından kritik bir parametre olduğu görülmektedir.

## REFERANSLAR

- Abdulrahman, P. I., Bzeni, D. K., & Ahmed, S. M. (2025). Pull-off and slant-shear tests for evaluating bond strength in polymer-modified cement mortar reinforced with polypropylene fibers. *Journal of Building Engineering*, 104, 112259.
- Açıkgenç, M., Arazsu, U., & Alyamaç, K. E. (2012). Farkli karışım oranlarına sahip polipropilen lifli betonların dayanım ve durabilite özellikleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(3), 41-54.
- Akgül, M. (2025). Polipropilen lifli mikro betonlarda nano silika kullanımının etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 721-731.
- Boğa, A. R., Karakurt, C., and Şenol, A. F. (2022). The effect of elevated temperature on the properties of SCC's produced with different types of fibers. *Construction and Building Materials*, 340, 127803.
- Dong, H. (2020). Preparation and performance analysis of polypropylene fiber-reinforced concrete composite. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15, e2445.
- Eidan, J., Rasoolan, I., Rezaeian, A., and Poorveis, D. (2019). Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. *Construction and Building Materials*, 198, 195-206.
- Islam, G. S., and Gupta, S. D. (2016). Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 345-354.
- Kakooei, S., Akil, H. M., Jamshidi, M., & Rouhi, J. (2012). The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 27(1), 73-77.
- Karahan, O., and Atis, C. D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials and Design*, 32, 1044-1049.
- Khan, M. M., Ahmad, S., Al-Huri, M., Mukhtar, F., & Al-Osta, M. A. (2026). Mechanical behaviour and impact response of ultra-high-performance concrete incorporating steel and polypropylene fibers. *Next Materials*, 10, 101436.
- Rudnik, E., & Drzymała, T. (2018). Thermal behavior of polypropylene fiber-reinforced concrete at elevated temperatures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 1005-1015.
- Şahin, M., Karagöz, İ., Öksüz, M., and Yazıcıoğlu, S. (2021). Properties of concrete reinforced with m12 monofilament type polypropylene fiber. *El-Cezeri*, 8(1), 481-494.
- Sarıkaya, H., & Susurluk, G. (2023). Thermal and Mechanical Properties of Concretes Containing Polypropylene, Kapok and Coconut Fibers. *Usak University Journal of Engineering Sciences*, 6(1), 1-11.
- Si, W., Khan, M., & McNally, C. (2026). Designing polypropylene fiber reinforcement for 3D concrete printing: Rheology control, thixotropic recovery and mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 514, 145562.
- Şenol, A. F. (2022). Beton teknolojisinde lif türleri ve lif takviyeli betonların özellikleri. Editör Ö. S. Bideci, *Mühendislik bilimlerinde güncel tartışmalar* (pp. 7-23). Duvar Yayınları.

- Sun, Z., and Xu, Q. (2009). Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering A*, 527, 198–204.
- Xiaogang, W., Zhifan, Q., Shiao, W., Shuaixin, M., Mengqing, S., Jingyu, F., & Guanghui, L. (2025). Experimental study on dynamic impact mechanical properties and fracture resistance mechanism of polypropylene fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*, 112, 113654.
- Yuan, Z., & Jia, Y. (2021). Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 266, 121048.
- Zhang, X., Niu, D., Luo, D., vd. (2026). Flexural performance of polypropylene fiber reinforced coral aggregate concrete at different curing ages. *Construction and Building Materials*, 506, 144792.



# **Endüstriyel İşletmelerde Enerji Yönetimi ve Verimliliği**

**Şengül GÜVEN**

Metaller ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye  
([sgacar@pau.edu.tr](mailto:sgacar@pau.edu.tr))

## ÖZET

Son yıllarda artan enerji ihtiyacı ile birlikte enerjinin yönetilme süreçleri ve enerji verimliliği konuları büyük önem kazanmıştır. İşletmelerde enerji yönetimi, enerjinin kullanımının planlanmasını, takibini ve analizini, ayrıca gerekli iyileştirmelerin yapılmasını kapsamaktadır. Burada, daha az enerji ile aynı üretim ve hizmetin sürdürülebilirliği hedeflenmektedir ve bu süreç genellikle ISO 50001 standardına göre yürütülür. Daha az enerji tüketimi, maliyetlerin ve çevresel etkilerin azaltılması anlamına gelmektedir. Bu çalışmada, enerji yönetim sistemlerinin temel prensiplerini incelemek ve endüstriyel işletmelerde enerji verimliliğini artırmaya yönelik pratik yaklaşımları değerlendirmek amaçlanmıştır. ISO 50001 gibi standartların uygulanması ile işletmelerde enerji tüketiminin izlenmesi, kontrolü ve optimizasyonu mümkün olmaktadır. Enerji verimliliği uygulamaları ile işletmelerde %10–30 oranında enerji tasarrufu, sera gazı emisyonlarında önemli azalma ve operasyonel güvenilirlikte iyileşme sağlandığı görülmektedir. Uzun vadeli enerji verimliliği hedeflerine ulaşmada, teknik çözümler ile enerji politikalarının bütüncül ve uyumlu bir şekilde uygulanması büyük önem taşımaktadır.

*Anahtar Kelimeler – Enerji Yönetimi, Enerji Verimliliği, Endüstriyel Sistemler, Sürdürülebilirlik, ISO 50001.*

---

### I. GİRİŞ

Sanayi ve teknolojideki ilerlemelerle birlikte yükselen enerji talebi, çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratarak küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Bu sorunların azaltılması amacıyla enerji verimliliği çalışmalarının önemi giderek artmaktadır. Enerjinin yoğun kullanıldığı sektörlerdeki enerji maliyetleri toplam işletme giderlerinin büyük kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle, enerji verimliliği çalışmaları çevresel etkilerin yanı sıra ekonomik etkiler açısından da önem taşımaktadır. Enerji yönetimi, enerji kaynaklarının ve enerjinin verimli kullanılmasını sağlamak üzere yürütülen eğitim, etüt, ölçüm, izleme, planlama ve uygulama süreçlerini içeren kapsamlı bir sistemdir. Enerji yönetimi, enerji süreçlerinin baştan sona verimli, planlı ve sistematik şekilde yürütülmesini sağlayan bir uygulamadır. Enerji performansının sürdürülebilir ve ölçülebilir şekilde geliştirilmesi için ISO 50001 gibi uluslararası standartlardan yararlanılmaktadır.

### II. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMLERİ

Enerji yönetim sistemleri, sistematik ve sürekli iyileştirmeyi amaçlayan bir yaklaşım sunar. Bu amaçla kullanılan ISO 50001 standardının işleyişi, Planla–Uygula–Kontrol Et–Önlem Al (PUKÖ) döngüsüne dayanmaktadır.

Enerji yönetimi sistemi, ilk olarak enerji politikasının oluşturulması ile başlayıp, enerji planlaması ve tüketim verilerinin elde edilmesi, uygulama, performans

değerlendirme ve son olarak da sürekli iyileştirme ile birbirini izleyen ve sürekli gelişimi hedefleyen bir süreçtir.

Enerji politikalarının belirlenmesindeki en önemli aşama, enerji talep tahminlerinin sağlıklı bir şekilde yapılmasıdır.

Enerji talep tahminlerinin dayandırılması gereken temel parametreler başlıca: ekonomik büyüme (sermaye birikimi, istihdam, iş veriminde artış, vb.), nüfus (çoğalma oranı, göç, etkin çalışan nüfus, vb.), enerji fiyatları, teknolojik gelişmeler, enerji politikaları (vergi politikaları, teşvikler, vb.) ve enerji tasarrufuna yönelik tüketici davranışlarıdır. Bunların bilimsel ve gerçekçi yöntemlerle öngörülmesi ve gerek dünyadaki gerek ülkedeki gelişmeler doğrultusunda sürekli güncellenmesi ve gerektiğinde revize edilmesi ise doğru bir enerji politikasının ön koşuludur [1].

Ayrıca enerji güvenliği de enerji altyapısına yönelik terörist saldırılardan yatırım eksikliklerinin doğuracağı kesintilere, doğal afetlerin ortaya çıkaracağı engellerden ambargolara, grevlerden lokavtlara, iç savaştan işgale kadar birçok olasılıkla birlikte değerlendirmesi gereken bir kavramdır [2].

Enerji güvenliği açısından, enerji kaynaklarında dışa bağımlılığın azaltılması büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, fosil yakıt rezervlerinin azalması, küresel ısınmayı artırıcı ve çevreye olumsuz etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı giderek artmaktadır. Kullanılacak enerji kaynaklarının belirlenmesi enerji planlamasının önemli bir adımıdır. Planlama aşamasındaki süreç;

- Enerji performansını artırmak için yapılacak çalışmaların belirlenmesi,
  - Enerji verimliliği projelerinin planlanıp uygulanması,
  - Çalışanlara enerji konusunda eğitim verilmesi,
  - Enerji kullanımını etkileyen işlemler için kontrol yöntemlerinin oluşturulması,
  - Enerji tüketimi yüksek olan süreçlerin düzenli olarak takip edilmesi,
- şeklinde ifade edilebilir.

Uygulama aşaması, planlanan enerji yönetim faaliyetlerinin fiilen yürütülmesini ifade ederken; kontrol etme aşaması, enerji performans göstergelerinin izlenmesi, ölçülmesi ve değerlendirilmesini kapsar. Kontrol aşamasında uygulanan faaliyetlerin ne kadar etkili olduğu ölçülerek değerlendirilir. Temel olarak bu faaliyetler şunları kapsamaktadır:

- Enerji tüketim verilerinin düzenli olarak izlenmesi ve kayıt altına alınması,
- Enerji performans göstergelerinin analizi,
- Gerçekleşen performansın belirlenen hedeflerle karşılaştırılması,
- İç denetimlerin yürütülmesi,
- Uygunsuzlukların ve sapmaların tespit edilmesi.

Planlama, uygulama ve kontrol aşamaları hepsi birlikte enerji yönetim sisteminin etkinliğinin doğrulanmasını sağlar ve elde edilen veriler sürekli iyileştirme (önlem alma) faaliyetlerinin planlanması için temel oluşturur.

### III. MATERYAL VE YÖNTEM

#### A. Endüstriyel Uygulamalar

Enerji verimliliği uygulamaları, üretim sistemleri, termal prosesler, pompalar ve kompresörler gibi akışkan taşıma sistemleri ile ısıtma, soğutma ve iklimlendirme (HVAC) sistemlerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu uygulamalar, enerji tüketiminin azaltılması, sistem performansının artırılması ve işletme maliyetlerinin düşürülmesine önemli katkı sağlamaktadır.

Özellikle demir-çelik üretimi, jeotermal enerji üretimi, çimento sanayi, petrokimya ve rafineri süreçleri, cam ve seramik üretimi, kağıt ve selüloz endüstrisi, tekstil sektörü ile gıda işleme sanayi gibi enerji yoğun sektörlerde enerji yönetimi, sistem verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır.

#### B. Enerji Verimliliğinin Artırılması

Enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik olarak işletmelerde öncelikle enerji etütleri gerçekleştirilmektedir. Bu etütler kapsamında; enerji tüketimine ilişkin veriler sistematik olarak toplanmakta ve analiz edilmekte, kullanılan tüm ekipmanların performans değerlendirmeleri yapılmakta ve sistemde oluşan enerji kayıpları tespit edilmektedir. Buna ek olarak, SCADA tabanlı izleme ve kontrol sistemleri aracılığıyla enerji tüketimi gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. Elde edilen verilerin sürekli olarak kayıt altına alınması ve analiz edilmesi, veri odaklı karar alma mekanizmalarının geliştirilmesine katkı sağlamakta; bu sayede operasyonel verimlilik artarken enerji yönetim süreçleri de daha etkin bir şekilde yürütülmektedir. Enerji verimliliğinin artırılmasında teknolojik gelişmelerden de etkin bir şekilde yararlanılmaktadır. Bu kapsamda, yüksek verimli motorların kullanımı, değişken hızlı sürücü (VSD) uygulamaları, atık ısı geri kazanım sistemlerinin entegrasyonu ve gelişmiş malzemelerle sürekli iyileştirilen yalıtım tekniklerinin uygulanması öne çıkan başlıca yöntemler arasında yer almaktadır.

### IV. BULGULAR

#### A. Enerji Yönetimi ve Verimliliğinin Ekonomik ve Çevresel Etkileri

Enerji yönetimi ve verimliliği uygulamaları, işletmeler için hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır.

Ekonomik Etkiler:

- Enerji maliyetlerinde %10–30 oranında azalma sağlanabilmektedir.

- Enerji verimliliği yatırımlarının geri ödeme süreleri kısalmaktadır.
- Verimli ekipman ve optimizasyon süreçleri ile üretkenlik artmakta ve sistemlerin duruş süreleri azalmaktadır.
- İşletme maliyetlerinin azalması ve verimliliğin artması ile birlikte rekabet avantajı ve uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik sağlanmaktadır.

#### Çevresel Etkiler:

- Azalan enerji tüketimi, fosil yakıt kullanımını azaltmakta ve buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarının düşmesine katkı sağlamaktadır.
- Atık ısı geri kazanımı, yüksek verimli ekipman kullanımı ve sürdürülebilir enerji uygulamaları, enerji tüketiminin optimize edilmesini sağlayarak doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmakta; aynı zamanda karbon ayak izinin azaltılmasına ve çevresel etkilerin minimize edilmesine önemli ölçüde destek olmaktadır.

#### V. TARTIŞMA

Enerji yönetim sistemlerinin dijital teknolojiler ve Endüstri 4.0 uygulamalarıyla entegrasyonu, işletmeler için enerji kullanımının optimize edilmesi ve operasyonel verimliliğin artırılması ile ilgili olarak yeni fırsatlar sunmaktadır. Yapay zeka (AI) ve makine öğrenmesi (ML) uygulamaları ile kestirimci bakım, enerji tüketimi tahmini ve süreç optimizasyonu alanlarında önemli avantajlar sağlanmaktadır. Ancak yüksek başlangıç maliyetleri, farkındalık eksikliği ve teknik uzman yetersizliği gibi etkenler enerji yönetimi ve enerji verimliliği uygulamalarını sınırlandırmaktadır.

#### VI. SONUÇLAR

Türkiye’de enerji verimliliği çalışmaları, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yürütülen politika, teşvik ve destek programlarıyla aktif olarak desteklenmektedir. Mevzuat kapsamında büyük ölçekli işletmelerin enerji yönetim sistemlerinin etkinliğini sağlamak amacıyla enerji yöneticisi bulundurması zorunludur. Ayrıca, enerji verimliliği yatırımları için sağlanan mali destekler, enerji performans sözleşmeleri ve teknik danışmanlık hizmetleri, işletmelerin enerji tüketimini azaltmalarına, maliyetleri düşürmelerine ve sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmalarına katkı sağlamaktadır.

Enerji yönetimi ve verimliliği sürdürülebilir endüstriyel gelişimin temel unsurlarındandır. Yapılandırılmış yönetim sistemleri, ileri teknolojilerin uygulanması ve sürekli izleme mekanizmaları sayesinde işletmeler önemli enerji tasarrufları ve çevresel kazanımlar elde edebilmektedir. Gelecekte, akıllı teknolojilerin, nesnelerin interneti (IoT) tabanlı sensörler ve veri analitiği entegrasyonu ile enerji performansının daha da iyileştirilmesi öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] N. Pamir, *Enerji Politikaları ve Küresel Gelimeler*, Stratejik Analiz, Aralık, ss. 68-74, 2005.
- [2] A. N. Pamir, *The Black Sea: A Gateway to Energy Security and Diversification*, Southeast European and Black Sea Studies, Vol. 7, No. 2, June 2007, pp. 245–263, 2007.

