

DOĞAL RADYASYON, MALZEME BİLİMİ ve ÇEVRESEL ETKİLER ÜZERİNE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR



Editör
ABDULLAH GÖKTAŞ

BİÖGE

BİDGE Yayınları

**Doğal Radyasyon, Malzeme Bilimi ve Çevresel Etkiler Üzerine
Güncel Yaklaşımlar**

Editör: ABDULLAH GÖKTAŞ

ISBN: 978-625-8567-97-7

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

KAYAÇLARDA DOĞAL RADYOAKTİVİTENİN DAĞILIMI	1
<i>AYLA SANDIKCIOĞLU GÜMÜŞ</i>	
RADON GAZI VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ	38
<i>AYLA SANDIKCIOĞLU GÜMÜŞ</i>	
MOLEKÜLER MODELLEME VE HESAPLAMALI KİMYA YAZILIMLARI/PAKET PROGRAMLARI: GAUSSIAN, SPARTAN VE HYPERCHEM	63
<i>ERCAN TÜRKKAN, HALİL UĞUR TAŞDEMİR</i>	
MİKROÇİP ÜRETİMLERİNDE 2D MALZEMELERİN ENTEGRASYONU	72
<i>MERVE EREN YAKISIKLIER</i>	
İÇ ANADOLU BÖLGESİNDEKİ HAVA KİRLİLİĞİNİN DİSİPLİNLERARASI EKONOFİZİK YAKLAŞIMI İLE İNCELENMESİ	93
<i>ERSİN KANTAR</i>	

BÖLÜM 1

KAYAÇLARDA DOĞAL RADYOAKTİVİTENİN DAĞILIMI

1.AYLA SANDIKCIOĞLU GÜMÜŞ¹

Giriş

İnsanlar, yaşamları boyunca doğal ve yapay kaynaklı iyonlaştırıcı radyasyona sürekli olarak maruz kalmaktadır (ICRP, 2007). Bu radyasyonun temel bileşenleri arasında atmosfer dışından gelen kozmik ışınlar ve yerkabuğunda bulunan radyoaktif elementlerin (terrestrial) kendiliğinden bozunmaları yer almaktadır (UNSCEAR, 2000, 2008). Atmosferi aşarak yerkabuğuna ulaşan kozmik kökenli ışınımın oluşturduğu kozmik radyasyon, yükseklik ve atmosfer koşullarına bağlı olarak değişmekle birlikte, dünya genelinde çoğu yerde nispeten homojen bir şekilde dağılmıştır. Buna karşın, toprak ve kayalardaki radyoaktif maddelerin dağılımı, bulunduğu bölgenin jeolojik yapısına göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Whicker et al., 1997). Toprak ve kayaç bünyesinde yer alan doğal radyoaktif elementler, zaman içerisinde gerçekleşen bozunma süreçleri yoluyla doğal radyasyon alanına katkıda bulunmaktadır. Bu radyoaktif elementler,

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fizik Bölümü, Orcid: 0000-0002-2021-6840

alfa ve beta parçacıkları ile gama ışınları şeklinde iyonlaştırıcı radyasyon yayarak kendiliğinden bozunur ve bu süreçte radyoaktif bozunma ürünleri oluşur. Oluşan bozunma ürünleri kararlı olabildiğ i gibi, bazı durumlarda radyoaktif özelliklerini koruyarak ardışık bozunma zincirlerine katılabilmektedir. Yerkabuğunda bulunan kayaçlar, genellikle çok düşük konsantrasyonlarda (örneğin milyonda bir mertebesinde) bulunan doğ al radyoaktif elementlerin bozunmasından kaynaklanan düşük düzeyli bir doğ al radyoaktivite sergiler. Kayaç ve topraklardaki doğ al radyasyon düzeyleri, başlıca doğ al radyoaktif elementlerin konsantrasyonlarına ve birim kütle başına birim zamanda gerçekleş en bozunma sayısı olarak tanımlanan spesifik aktiviteye bağlıdır. Spesifik aktivite, radyoaktif elementin yarı ömrü ile ters orantılı olup, yalnızca ana elementlerin değ il, bozunma zinciri boyunca oluş an ara ve son bozunma ürünlerinin katkılarını da kapsayacak biçimde değ erlendirilmektedir.

Kayaç ve topraklardaki doğ al radyoaktivitenin başlıca kaynaklarını, uranyum, toryum ve potasyum gibi doğ al radyoaktif özellik gösteren elementler oluşturmaktadır. Özellikle uranyum-238 (²³⁸U) ve toryum-232 (²³²Th) ve potasyum-40 (⁴⁰K) izotopları ile bunların bozunma ürünleri, çevresel doğ al radyasyonun en önemli bileş enleri arasında yer almaktadır. Gözlenen radyasyon hem ana radyoaktif çekirdeklerin hem de yavru radyoaktif çekirdeklerin bozunmalarından kaynaklanmakta olup, bu durum doğ al radyasyon alanının karmaşık bir yapıya sahip olmasına neden olmaktadır.

Kayaçlarda doğ al radyoaktivitenin düzeyi ve mekânsal dağ ılımı, yalnızca uranyum, toryum ve potasyum gibi doğ al radyoaktif özellik gösteren elementlerin toplam bolluğ una değ il, aynı zamanda kayaçların mineralojik bileş imine, kristal kimyasına ile oluş um ve evrim süreçlerine de bağlıdır. Uranyum ve toryum gibi inkompatibl elementler, erken kristallenmiş minerallerin kristal yapısına kolayca giremedikleri i in magmatik evrim sırasında eriyik fazda kalma eė ilimi gösterir ve bu nedenle magmatik ayrımlaşma ile

hidrotermal alterasyon süreçleri sırasında belirli kayaç türlerinde zenginleşebilir; potasyum ise K-feldispat ve mika grubu mineraller aracılığıyla kayaçların doğal radyoaktivite özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Rollinson, 1993a; Wilson, 1989; Winter, 2014a). Bu nedenle asidik magmatik kayaçlar genellikle daha yüksek doğal radyoaktivite düzeyleri sergilerken, mafik ve ultramafik kayaçlar düşük radyoaktivite ile karakterize edilmektedir. Sedimanter ve metamorfik kayaçlarda doğal radyoaktivite düzeyleri, öncelikle kaynak kayaçların mineralojik ve jeokimyasal bileşimine bağlı olarak belirlenmekte; buna ek olarak ayrışma, taşınma, çökme, diyajenez ve metamorfizma gibi sonraki jeolojik süreçlerin etkisiyle kayaç türleri arasında geniş bir değişkenlik göstermektedir.

Toprakların doğal radyoaktivite özellikleri büyük ölçüde türedikleri ana kayaçların radyoaktif element içeriklerini yansıtmakta; bu durum, bölgesel ölçekte doğal radyasyon alanlarının belirgin biçimde farklılaşmasına neden olmaktadır. Kayaç ve tortullarda bulunan doğal radyoaktif izotoplar, ancak mineral fazlardan çözünmeleri ya da süzülmeleri ve sulu ortamda taşınabilir hâle gelmeleri durumunda yeraltı suyunun radyoaktivitesine katkı sağlayabilmektedir. Yeraltı suyuna geçen bu radyoaktif bileşenlerin miktarı; söz konusu elementlerin mineral kristal yapıları içindeki konsantrasyonlarına, tortulların tutma kapasitesine ve özellikle çözünme, süzülme ile desorpsiyon süreçlerinin hızlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Kayaçlarda doğal radyoaktivitenin dağılımının anlaşılması, çevresel radyasyon seviyelerinin değerlendirilmesi, doğal arka plan dozlarının tanımlanması ve doğal kaynaklı radyasyon maruziyetinin yorumlanması açısından temel bir öneme sahiptir. Bu bölümde, kayaçlarda doğal radyoaktivitenin dağılımı; uranyum, toryum ve potasyumun jeokimyasal özellikleri ile kayaç türlerine bağlı olarak gözlenen farklılıklar çerçevesinde ele alınmakta ve doğal arka plan düzeyleriyle ilişkisi genel hatlarıyla değerlendirilmektedir.

Doğal Radyoaktif Elementler

Kayaçlardaki doğal arka plan radyoaktivitesi, başlıca uzun yarı ömürlü doğal radyoaktif izotoplar olan uranyum-238 (^{238}U), toryum-232 (^{232}Th) ve potasyum-40 (^{40}K) tarafından belirlenmektedir.

Uranyum ve Bozunma Ürünleri

Uranyum, yer kabuğunda doğal olarak bulunan ve radyoaktif bozunma özellikleri nedeniyle jeoloji, çevre bilimleri ve radyasyon güvenliği açısından önem taşıyan bir elementtir. Uranyum, doğada üç temel izotop halinde bulunmaktadır: Uranyum-238 (^{238}U), uranyum-235 (^{235}U), uranyum-234 (^{234}U). Bu izotopların tamamı radyoaktif olup, uranyum-238 (^{238}U) ve uranyum-235 (^{235}U), izotopları iki ayrı doğal bozunma serisinin ana (ebeveyn) çekirdeklerini oluşturmaktadır. Bu bozunma serileri, uzun yarı ömürlü ardışık radyoaktif dönüşümler sonucunda sırasıyla kararlı kurşun izotopları olan kurşun-206 (^{206}Pb) ve kurşun-207' (^{207}Pb)'nin oluşumu ile sonlanmaktadır (UNSCEAR, 2000, 2008). Doğal uranyumun kütleli izotop bollukları yaklaşık olarak uranyum-238 için %99,275; uranyum-235 için %0,72 ve uranyum-234 için %0,005'tir (UNSCEAR, 2000). Bu dağılıma karşılık günümüzde $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ izotop oranı yaklaşık 137,9 olarak kabul edilmektedir. Doğal uranyum içerisinde en yüksek bolluğa sahip izotop uranyum-238 olup günümüzde $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, izotop oranı yaklaşık 137,9 olarak kabul edilmektedir. Bu izotop oranı jeolojik zaman ölçeğinde sabit olmayıp, uranyum-235'in uranyum-238'e kıyasla daha kısa yarı ömre sahip olması nedeniyle zaman içerisinde artış göstermiştir. Uranyum-235 izotopunun yarı ömrü yaklaşık $7,04 \times 10^8$ yıl, uranyum-238 izotopunun yarı ömrü ise yaklaşık $4,47 \times 10^9$ yıldır (IAEA, 2003; UNSCEAR, 2008). Uranyum-234 izotopu, uranyum-238'in bozunma zinciri içerisinde oluşan ikincil bir üründür ve görece kısa yarı ömrü ($2,45 \times 10^5$ yıl) nedeniyle doğal uranyum

içerisindeki bolluğu oldukça düşüktür. Yarı ömürleri oldukça uzun olan uranyum-238 ($4,47 \times 10^9$ yıl), uranyum-235 ($7,04 \times 10^8$ yıl) ve uranyum-234 ($2,45 \times 10^5$ yıl), çoğu kayada en yaygın bulunan uranyum izotoplarıdır. Bununla birlikte, uranyum bozunma serilerinde yer alan ve görece uzun yarı ömürlere sahip bazı yavru radyoaktif elementler (Şekil 1) özellikle radyum-226 (^{226}Ra) (yarı ömür: 1599 yıl), kurşun-210 (^{210}Pb) (yarı ömür: 22,6 yıl) ve polonyum-210 (^{210}Po) (yarı ömür: 138,4 gün) doğal olarak oluşan önemli radyoizotoplar arasında yer almaktadır.

Doğada bulunan radyoaktif elementlerin önemli bir bölümü Uranyum-238'in bozunma zinciri içerisinde yer almaktadır. Uranyum-238, toplam 14 temel çekirdeği içeren bu zincirin başlangıç noktasını oluşturur ve süreç çeşitli alt serilere ayrılarak ilerler. Uranyum-238 zinciri boyunca radyum-226 (^{226}Ra)'nın alfa bozunması sonucu radon-222 (^{222}Rn) gazı oluşur. Radon-222 kimyasal tepkimeye girmeyen radyoaktif bir soygazdır. Radonun kısa yarı ömrü 3,82 gündür ve inert gaz yapısıyla çevresel radyasyon çalışmalarında özel bir yere sahiptir.

“Uranyum, dünya kabuğunda ortalama 1–3 ppm ile nispeten az rastlanan bir elementtir. Doğal uranyum, ^{238}U , ^{235}U ve ^{234}U izotoplarından oluşmakta olup, bu izotoplar arasında ^{238}U en yüksek bolluğa sahip izotoptur; yaygın kaya türlerindeki dağılımın genel bir özeti Tablo 1’de sunulmuştur (Cumberland et al., 2016; Fayek et al., 2011; Hazen et al., 2009).

Tablo 1 Başlıca kayaç türlerindeki uranyum konsantrasyonlarının dağılımı

Kategori	Ortam / Kayaç Türü	Uranyum Konsantrasyon Aralığı
Magmatik Kayaçlar	Siyenitler ve fonolitler	0,1–26 ppm
Magmatik Kayaçlar	Granitler ve riyolitler	2–50 ppm
Magmatik Kayaçlar	Ortaç bileşimli kayaçlar	1–6 ppm
Magmatik Kayaçlar	Bazaltlar ve diğer mafik kayaçlar	0,1–1 ppm
Magmatik Kayaçlar	Ultramafik kayaçlar	0,001–1 ppm
Sedimanter Kayaçlar	Şeyller, killer ve çamurtaşları	1–5 ppm
Sedimanter Kayaçlar	Siyah şeyller (organik maddece zengin)	2–1250 ppm
Sedimanter Kayaçlar	Fosforitli siyah şeyller	≤700 ppm
Sedimanter Kayaçlar	Kumtaşları	0,5–4 ppm
Sedimanter Kayaçlar	Kireçtaşları ve dolomitler	<0,1–9 ppm
Sedimanter Kayaçlar	Kömürler, linyitler ve turbalıklar	1–6000 ppm
Sedimanter Kayaçlar	Saf evaporitler	<0,1 ppm
Metamorfik Kayaçlar	Düşük dereceli metamorfik kayaçlar	<1–5 ppm
Metamorfik Kayaçlar	Orta dereceli metamorfik kayaçlar	<1–5 ppm
Metamorfik Kayaçlar	Yüksek dereceli metamorfik kayaçlar	<1–7 ppm

Kaynak: (Cumberland et al., 2016b; Fayek et al., 2011; Hazen et al., 2009)

Magmatik Kayaçlarda Uranyum

Magmatik kayaçlardaki uranyum bolluğu yalnızca petrojenez (kayaçların oluşum ve evrim süreçleri) süreçlerinin anlaşılması açısından değil, aynı zamanda doğal çevresel radyoaktivitenin değerlendirilmesi bakımından da önem taşımaktadır. Uranyumun bozunma zincirinde yer alan radyum ve radon gibi kısa ömürlü bozunma ürünleri, doğal radyasyon kaynaklarının oluşumunda etkili olmaktadır. Uranyum içeriği görece yüksek olan kayaçların yaygın olduğu bölgelerde, bu bozunma ürünlerine bağlı olarak doğal radyasyon düzeylerinin artabileceği bildirilmektedir (UNSCEAR, 2000). Bu bağlamda, magmatik kayaçlarda uranyum içeriğinin belirlenmesi, çevresel radyasyon değerlendirmeleri ve doğal radyasyon kaynaklarının yönetimi açısından önemli bir veri sağlamaktadır.

Uranyumun yerkabuğundaki dağılımı ve jeokimyasal davranışı, özellikle magmatik süreçler bağlamında incelenmekte olup, magmatik kayaçlar bu açıdan temel litolojik birimler arasında yer almaktadır (Faure & Mensing, 2005). Magmanın kökeni, kimyasal bileşimi ve farklılaşma derecesi, magmatik kayaçlarda gözlenen uranyum derişimlerini belirleyen başlıca faktörlerdir. Jeokimyasal açıdan uranyum, uyumsuz (incompatible) bir element olarak davranmakta ve magmatik farklılaşma süreci boyunca eriyik fazda zenginleşme eğilimi göstermektedir. Bu nedenle, felsik bileşimli kayaçlar olan granitler ve riyolitlerde uranyum bolluğu genellikle daha yüksek değerlere ulaşırken, bazaltik ve özellikle ultramafik kayaçlarda uranyum içerikleri oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu genel dağılım eğilimi, kıtasal kabuğun bileşimi ve magmatik evrim süreçleriyle ilişkilendirilmekte ve literatürde yaygın olarak kabul edilmektedir (Wedepohl, 1978a)

Uranyum, litofil özellik gösteren bir elementtir ve magmatik kayaçlardaki birincil dağılımı, felsik bileşimli ve ileri derecede

evrimleşmiş magmalarla yakından ilişkilidir (Faure & Mensing, 2005). Magmanın evrimi ilerledikçe, başka bir deyişle magmatik fraksiyonlaşma derecesi arttıkça, uranyumun uyumsuz bir element olarak eriyik fazda zenginleştiği ve kayaçlardaki toplam uranyum içeriğinin arttığı bilinmektedir (Wedepohl, 1978a). Bu bağlamda, felsik bileşimli magmatik kayaçlar uranyum bakımından görece zengin litolojiler arasında yer almaktadır. Küresel ölçekte değerlendirildiğinde, granitik ve riyolitik kayaçların uranyum içerikleri genellikle 2–15 ppm aralığında değişmektedir (Cumberland et al., 2016; Wedepohl, 1978a).

Silisçe zengin alkali kayaçlarda ise uranyum derişimleri çoğu zaman daha yüksek değerlere ulaşabilmekte ve bazı örneklerde 26 ppm U'ya kadar çıkabilmektedir (Cumberland et al., 2016; Wedepohl, 1978a). Bununla birlikte, bazı granit türlerinin ortalama değerlerin belirgin biçimde üzerinde uranyum içerebildiği bilinmektedir. Özellikle belirli jeolojik koşullarda gelişmiş granitlerin daha uranyumca zengin olabildiği, Avustralya'daki bazı Proterozoyik granitlerde uranyum içeriğinin 50 ppm U'ya kadar ulaştığı bildirilmektedir (Alloway, 2013; Kreuzer et al., 2010). Ortaç bileşimli magmatik kayaçlar genellikle 1–6 ppm arasında değişen uranyum içerikleri ile karakterize edilmektedir (Wedepohl, 1978a). Buna karşılık, mafik kayaçlarda uranyum bolluğu belirgin biçimde daha düşüktür; bu kayaçlarda uranyum içeriği çoğunlukla 0,1–1 ppm aralığında olup, ortalama bir bazalt yaklaşık 1 ppm U içermektedir (Alloway, 2013; Cumberland et al., 2016). Ultramafik magmatik kayaçlar ise uranyum bakımından en fakir grubu oluşturmakta ve bu kayaçlarda uranyum derişimi genellikle 1 ppm'in oldukça altında kalmaktadır (Wedepohl, 1978a)

Metaformik Kayaçlarda Uranyum

Uranyum, yer kabuğunda doğal olarak bulunan ve litofil karakteri nedeniyle kayaçların oluşum ve dönüşüm süreçleriyle yakından ilişkili olan bir elementtir. Metamorfik kayaçlar, öncül kayaçların (protolitlerin) kimyasal bileşimini ve metamorfizma sırasında gerçekleşen fiziksel–kimyasal süreçlerin etkilerini birlikte yansıttıkları için, uranyumun yerkabuğundaki yeniden dağılımının anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Faure & Mensing, 2005). Bu kayaçlardaki uranyum bolluğu, büyük ölçüde protolitin bileşimi, metamorfik derece ve sistemin açık ya da kapalı olma durumu tarafından kontrol edilmektedir.

Metamorfik kayaçlar, genel olarak granitik ya da silisik alkali magmatik kayaçlara kıyasla daha düşük uranyum içeriklerine sahiptir. Bununla birlikte, bu tür genellemeler sınırlı bir yaklaşım sunmaktadır; zira farklı protolitlerden türemiş ve farklı basınç–sıcaklık koşulları altında gelişmiş metamorfik kayaçlarda uranyum içeriğinin geniş bir aralıkta değişmesi beklenmektedir. Nitekim (Wedepohl, 1978a) tarafından derlenen veriler, metamorfik kayaçlarda uranyum içeriğinin yaklaşık 0,1–45 ppm U arasında değişebildiğini ve metamorfik dereceden bağımsız olarak tipik değerlerin çoğunlukla 1–4 ppm U civarında yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum, metamorfik derecenin tek başına uranyum bolluğunu belirleyen bir parametre olmadığını ortaya koymaktadır (Faure & Mensing, 2005). Metamorfizma süreci boyunca uranyumun davranışı, özellikle akışkan (fluid) varlığı ve element mobilitesi ile yakından ilişkilidir. Düşük ve orta dereceli metamorfizma koşullarında uranyum çoğu zaman protolitten miras kalan mineraller içerisinde korunurken, daha yüksek dereceli metamorfizma ve yoğun akışkan dolaşımı durumlarında uranyumun kısmen yeniden dağıldığı ya da sistemden uzaklaştırılabildiği bildirilmektedir (Faure & Mensing, 2005; Rollinson, 1993). Bu süreçler, metamorfik kayaçlar arasında gözlenen uranyum

bolluğundaki geniş değişim aralığını açıklayan temel etkenler arasında yer almaktadır.

Metamorfik kayaçlardaki uranyum bolluğu, yalnızca metamorfik evrim ve petrojenez süreçlerinin yorumlanması açısından değil, aynı zamanda doğal çevresel radyoaktivitenin değerlendirilmesi bakımından da önem taşımaktadır. Uranyumun bozunma zincirinde yer alan radyum ve radon gibi ürünler, uranyumca zengin protolitlerden türeyen metamorfik kayaçların yaygın olduğu bölgelerde doğal radyasyon düzeylerini etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, metamorfik kayaçlarda uranyum içeriğinin belirlenmesi, çevresel radyasyon değerlendirmeleri ve doğal radyasyon kaynaklarının yönetimi açısından önemli bir veri sağlamaktadır (UNSCEAR, 2000).

Sedimanter Kayaçlarda Uranyum

Sedimanter kayaçlardaki uranyum miktarı sabit bir değer göstermez; aksine oldukça geniş bir aralıkta değişir. Bunun temel nedeni, sedimanter kayaçların tek bir ortamda değil, farklı çökelme koşulları altında ve çok aşamalı süreçler sonucunda oluşmasıdır. Bu değişkenliğin anlaşılmasında iki temel unsur öne çıkmaktadır. Bunlardan ilki, sedimanların türediği kaynak kayaçların mineralojik ve jeokimyasal bileşimidir. İkincisi ise uranyumun kimyasal davranışının çevresel koşullara, özellikle oksidasyon–indirgenme (redoks) durumuna son derece duyarlı olmasıdır (Faure & Mensing, 2005; Langmuir, 1997; Plant et al., 2003). Uranyumun sedimanter sistemlerdeki davranışı, kayaçlar henüz oluşmadan önce, kaynak kayaçların yüzey koşullarında ayrışmasıyla başlamaktadır. Bu süreçte uranyum içeren mineraller fiziksel ve kimyasal ayrışmadan etkilenmekte, açığa çıkan uranyum ayrışma ürünleriyle birlikte akarsular, rüzgâr veya buzullar aracılığıyla taşınarak farklı çökelme ortamlarına ulaşmaktadır. Taşınım ve çökelme aşamalarında uranyumun jeokimyasal davranışı, ortamın kimyasal özelliklerine,

özellikle oksidasyon–indirgenme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Sedimanların çökmesini takiben gelişen gömülme ve diyajenez süreçleri sırasında ise uranyumun kayaç içerisindeki dağılımı yeniden düzenlenebilmekte ve ikincil zenginleşme ya da yeniden taşınma süreçleri meydana gelebilmektedir (Faure & Mensing, 2005; Langmuir, 1997; Tucker, 2003). Uranyum, redoksa duyarlı bir elementtir; yani bulunduğu ortamın oksitleyici ya da indirgen olması, elementin çözünürlük ve hareketliliğini doğrudan etkiler. Teorik olarak uranyum farklı oksidasyon basamaklarında bulunabilse de, doğal koşullarda esas olarak dört ve altı değerlikli formları (U^{4+}) ve (U^{6+}) yaygındır. Beş değerlikli uranyumun (U^{5+}) bazı özel minerallerde tanımlanmış olması, bu genel davranışa nadir bir istisna oluşturmaktadır (Burns & Finch, 1999). Bu kimyasal özellik, uranyumun sedimanter ortamlarda taşınmasını ya da çökmesini belirleyen temel faktörlerden biridir. Bu nedenle, sedimanter kayaçlarda ölçülen uranyum derişimleri bazı durumlarda ana magmatik kayaçlardakinden daha yüksek olabilir (Tablo 1) (Cumberland et al., 2016). Ancak burada önemli bir noktanın altı çizilmelidir: bu tür yüksek değerler sedimanter kayaçların tamamı için geçerli değildir. Çok yüksek uranyum zenginleşmeleri yalnızca özel jeolojik ve kimyasal koşullar altında gelişir. Gabon’daki Oklo doğal nükleer reaktörleri, Prekambriyen yaşlı kayaçlar içerisinde gelişmiş bu tür sıra dışı örneklerin en bilinenidir. Burada gözlenen %20’nin üzerindeki uranyum derişimleri, genel bir durumu değil, istisnai koşulları temsil eder (Gauthier-Lafaye et al., 1989). Sedimanter kayaç türlerine bakıldığında, silisiklastik kayaçlarda (kumtaşları, şeyller ve çamurtaşları) uranyumun önemli bir bölümü dayanıklı detritik ağır mineraller içerisinde bulunur. Zirkon, monazit, apatit ve titanit gibi bu mineraller, kimyasal ayrışmaya karşı dirençli oldukları için sedimanter süreçler boyunca korunabilir. Bu mineraller bazen doğrudan kayaç içerisinde iz miktarlarda yer alır, bazen de kuvars, feldispat ve mika gibi yaygın minerallerin içinde kapanımlar halinde bulunur (Wedepohl, 1978a). Karbonat

kayaçlarında ise uranyum genellikle çok düşük derişimlerde bulunur ve çoğu zaman kristal yapı içerisinde kalsiyumun yerine geçerek mineral kafesine dahil olur. Buna karşılık, organik maddece zengin ve fosfatlı sedimanlar uranyum açısından daha yüksek değerlere ulaşabilen kayaç gruplarıdır. Fosforitlerde bazı oluşumlarda 700 ppm'e kadar uranyum derişimleri rapor edilmiştir (Bowell et al., 2011; Cumberland et al., 2016; Wedepohl, 1978a). Siyah şeyller ile kömür, linyit ve turba gibi organik sedimanlar ise uranyum içeriği bakımından oldukça geniş bir aralık gösterir. Bu tür birimlerde 1 ppm'den 6000 ppm'e kadar değişen uranyum derişimleri ölçülmüş ve bazı alanlarda belirgin yerel zenginleşmeler saptanmıştır (Tablo 1). Özellikle Birleşik Krallık'taki bazı turba yatakları bu duruma örnek olarak gösterilmektedir (Ball et al., 1991; Milodowski et al., 1990).

Uranyum Taşıyıcı (Barındırıcı) Mineraller

Uranyum, yer kabuğunda doğal olarak bulunan ve oksijenle kolayca bileşikler oluşturan litofil bir elementtir. Doğada serbest halde ya da sülfür mineralleri şeklinde bulunmaz; bunun yerine oksijen içeren mineral fazları içerisinde yer alır (Fron­del, 1958; Wedepohl, 1978a). Günümüze kadar uranyumun kristal yapının temel bir bileşeni olduğu 160'tan fazla mineral tanımlanmıştır ve bu mineraller uranyumun doğal ortamlardaki başlıca taşıyıcılarını oluşturmaktadır (Burns & Sigmon, 2013). Uranyumun ana yapı bileşeni olduğu başlıca mineraller uraninit ile çeşitli uranil mineralleri (rneğin karnotit, otunit ve torbernit) olarak sıralanabilir (Finch & Murakami, 2019; Fron­del, 1958). Bununla birlikte uranyum, yalnızca bu minerallerle sınırlı olmayıp, birçok yaygın mineralde de düşük derişimlerde bulunabilmektedir. Örneğin zirkon, apatit, monazit ve ksenotim gibi aksesuar minerallerde uranyum, kristal yapı içindeki ana elementlerin yerini alarak iz veya minör bileşen şeklinde yer alabilmektedir (Hoskin & Schaltegger, 2003; Krivovichev et al., 2007). Benzer şekilde titanit, demir oksitleri ve

Toryum ve Bozunma Ürünleri

Toryum (Th), yer kabuğunda doğal olarak bulunan, radyoaktif ve litofil karaktere sahip bir aktinit elementtir. Doğal toryumun izotopik bileşimi büyük ölçüde tek bir izotop tarafından belirlenmektedir. Doğada bulunan toryumun neredeyse tamamı, çok uzun yarı ömrü nedeniyle günümüze kadar varlığını sürdüren ^{232}Th izotopundan oluşur. Bu izotopun yarı ömrü yaklaşık $1,41 \times 10^{10}$ yıl olup, jeolojik zaman ölçeğinde son derece kararlı kabul edilmektedir (UNSCEAR, 2000). ^{232}Th , kararlı ^{208}Pb izotopu ile sonlanan uzun bir radyoaktif bozunma zincirinin ana çekirdeğini oluşturur. Literatürde bu zincir toryum bozunma serisi olarak adlandırılmaktadır (UNSCEAR, 2000). Seri içerisinde yer alan kız ürünlerin büyük bölümü kısa yarı ömürlü olmakla birlikte, bazı ara ürünler çevresel ve radyolojik açıdan özel önem taşımaktadır.

Doğal toryumun uzun ömürlü diğer izotopu olan ^{230}Th ise birincil bir izotop olmayıp, ^{238}U bozunma zincirinin bir ürünü olarak oluşmaktadır. Yaklaşık $7,5 \times 10^4$ yıllık yarı ömre sahip olan bu izotop, genellikle uranyum içeren minerallerde ve uranyumca zengin jeolojik ortamlarda bulunur (Faure & Mensing, 2005). ^{232}Th bozunma serisindeki bozunma ürünlerinin çoğu kısa yarı ömürlüdür; ancak bazı izotoplar görece daha uzun yarı ömürleri nedeniyle doğal kaynaklı radyoaktif maddeler (NORM) açısından önemlidir (NORM: Naturally Occurring Radioactive Materials). Bu izotopların başında, yaklaşık 5,75 yıllık yarı ömre sahip olan ^{228}Ra gelmektedir. ^{228}Ra , özellikle NORM içeren endüstriyel atıklarda ve yan ürünlerde çevresel ve radyolojik açıdan dikkate alınması gereken bir bileşen olarak değerlendirilmektedir (IAEA, 2013; UNSCEAR, 2000).

Tablo 2 Başlıca kayaç türlerindeki toryum konsantrasyonlarının dağılımı

Ortam / Kayaç Türü	Toryum Konsantrasyon Aralığı
Siyenitler ve fonolitler	0,7–35 ppm (genellikle >10 ppm)
Granitler, riolitler ve orta bileşimli magmatik kayaçlar	8–56 ppm
Bazaltlar ve diğer mafik kayaçlar	0,1–4 ppm
Ultramafik kayaçlar	<0,1 ppm
Metamorfik kayaçlar	Yüksek değişkenlik; genellikle 6–10 ppm
Şeyller, killer, çamurtaşları	10–13 ppm
Pelajik killer ve silisli çökeller	2–30 ppm
Kumtaşları	1–7 ppm
Fosforitler	1–5 ppm
Kireçtaşları, dolomitler	<0,05–3 ppm
Boksitler	~50 ppm

Kaynak: (Hazen et al., 2009; Wedepohl, 1978a)’den uyarlanmıştır

Toryum, yer kabuğunda görece düşük bolluğa sahip olmakla birlikte, uranyuma kıyasla daha yaygın bulunan bir elementtir. Ortalama kabuksal toryum derişimi 6–10 ppm aralığında olup, yer kabuğunda ortalama Th:U oranı yaklaşık 3:1’dir (Adams & Weaver, 1958; Wedepohl, 1978a). Jeokimyasal açıdan toryum, doğada yalnızca dört değerlikli (Th^{4+}) oksidasyon durumunda bulunur. Altı değerlikli uranyumun (U^{6+}) yüksek çözünürlüğüne karşılık, toryum son derece düşük çözünürlük gösteren ve bu nedenle jeokimyasal olarak oldukça durağan bir elementtir. Birincil uranyum–toryum minerallerinin oksidatif alterasyon, ayrışma ve

yıkanma süreçleri sırasında uranyum çözelti fazına geçerek taşınabilirken, toryum çoğunlukla bulunduğu ortamda kalarak rezidüel birikimlerde zenginleşir. Bu durum, uranyum ve toryum arasında belirgin bir jeokimyasal ayrışmaya yol açmaktadır (Adams & Weaver, 1958). Toryum, granitik ve asidik magmatik kayalarda çoğunlukla monazit, allanite ve zirkon gibi aksesuar minerallerde yoğunlaşma eğilimi göstermektedir (Deer et al., 2013). Buna karşılık, uranyum için karakteristik olan karmaşık ikincil mineral topluluklarının toryum açısından belirgin bir karşılığı bulunmamaktadır. Toryumun yaygın kayaç türlerindeki tipik derişim aralıkları Tablo 2’de sunulmaktadır.

Magmatik Kayalarda Toryum

Toryum (Th), aktinitler grubunda yer alan, radyoaktif ve litofil karakterli bir element olup yerkabuğundaki dağılımı büyük ölçüde magmatik süreçler tarafından belirlenmektedir (Adams & Weaver, 1958; Faure & Mensing, 2005). Doğada baskın olarak dört değerlikli (Th^{4+}) oksidasyon durumunda bulunan toryum, düşük çözünürlüğü ve yüksek iyonik yarıçapı nedeniyle magmatik sistemlerde çoğunlukla ergiyik (magma) fazında zenginleşmekte ve kristallenmenin ileri evrelerinde aksesuar mineraller bünyesinde tutulmaktadır (Deer et al., 2013; Wedepohl, 1978a). Bu özellikleri, toryumu magmatik kayaların jeokimyasal evrimini ve kaynak özelliklerini incelemede önemli bir izleyici element hâline getirmektedir.

Magmatik kayalarda toryum derişimi, kayaç bileşimi ve magmanın farklılaşma derecesi ile yakından ilişkilidir. Genel olarak toryum, silisçe zengin ve alkalın karakterli magmatik kayalarda daha yüksek derişimlerde bulunurken, mafik ve ultramafik kayalarda belirgin biçimde daha düşük seviyelerde gözlenmektedir (Hazen et al., 2009; Wedepohl, 1978a). Granit ve granodiyoritlerde toryum derişimi genellikle ~10 ppm düzeyindeyken, siyenitler bazı

örneklerde 35 ppm'e kadar ulaşan daha yüksek toryum içerikleri gösterebilmektedir. Buna karşılık bazaltlar, gabrolar ve diğer mafik intrüzif kayalarda toryum derişimi tipik olarak 0,1–4 ppm aralığında olup, ultramafik kayalarda ise çoğu zaman iz düzeylerine kadar düşmektedir (Wedepohl, 1978a). Toryumun magmatik kayalardaki bu dağılımı, fraksiyonel kristallenme, ergiyik–mineral ayrımı ve kabuksal katkı gibi temel petrojenez süreçlerinin bir sonucudur. Toryum, erken kristallenme evrelerinde ana kayaç oluşturan mineraller tarafından sınırlı ölçüde tutulurken, monazit, allanite ve zirkon gibi aksesuar minerallerde yoğunlaşma eğilimi göstermektedir (Deer et al., 2013; Faure & Mensing, 2005). Bu durum, toryumun özellikle geç evre magmatik ürünlerde ve asidik kayalarda zenginleşmesini açıklamaktadır.

Magmatik kayalardaki toryum dağılımının anlaşılması, yalnızca petrojenez ve jeokimyasal evrim açısından değil, aynı zamanda doğal radyoaktivite düzeylerinin değerlendirilmesi ve doğal kaynaklı radyoaktif maddelerin (NORM) yorumlanması açısından da önem taşımaktadır (IAEA, 2014; UNSCEAR, 2000). Bu nedenle, farklı magmatik kayaç türlerinde gözlenen toryum derişimlerinin sistematik olarak incelenmesi, yerkabuğundaki doğal radyoelement dağılımının anlaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Sedimanter Kayalarda Toryum

Sedimanter kayalardaki toryum derişimleri, kayaç türüne ve oluşum koşullarına bağlı olarak geniş bir aralıkta değişmektedir (Wedepohl, 1978a). Bu değişkenlik, toryumun jeokimyasal özellikleri ile kaynak kayaç bileşimi, ayrışma süreçleri ve sedimantasyon ortamlarının birlikte etkisiyle açıklanmaktadır. Magmatik ve metamorfik kökenli kayaçların ayrışması sırasında toryum, uranyuma kıyasla daha düşük hareketlilik sergilemektedir. Ayrışma ve alterasyon süreçleri boyunca toryum; zirkon, monazit,

ksenotim ve apatit gibi dayanımlı ağır mineraller bünyesinde tutulmakta ya da kil mineralleri ile demir ve mangan oksitli alterasyon ürünlerine bağlanmaktadır (Wedepohl, 1978a). Bu durum, toryumun çözelti fazında taşınımını sınırlandırmakta ve sedimanter sistemlerde büyük ölçüde katı faza bağlı olarak birikmesine yol açmaktadır. Bu özellikler nedeniyle toryum, yoğun ayrışmaya uğramış ortamlarda gelişen rezidüel birikimlerde ve ağır mineral konsantrasyonlarında görece zenginleşmektedir. Küresel ölçekte derlenen veriler, sedimanter kayaç türleri arasında toryum içeriği bakımından belirgin farklılıklar bulunduğunu göstermektedir (Wedepohl, 1978a).

İnce taneli sedimanter kayaçlar, özellikle şeyller, kiltaşları ve çamurtaşları, toryum açısından görece zengin olup bu kayaçlarda derişimler genellikle birkaç ppm ile onlarca ppm arasında değişmektedir. Kumtaşlarında toryum içerikleri çoğunlukla 1–7 ppm aralığında bulunurken, karbonat minerallerinin kristal yapısına sınırlı ölçüde girebilmesi nedeniyle kireçtaşlarında toryum derişimleri düşüktür. Fosfatlı kayaçlarda toryum genellikle 1–5 ppm düzeylerinde gözlenmekte, boksitler ve bentonitler gibi rezidüel birikimlerde ise daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir (Wedepohl, 1978a). Sedimanter kayaçlardaki bu dağılım, toryumun kil mineralleri ve ağır mineral fraksiyonu ile olan jeokimyasal ilişkisini yansıtmaktadır (Faure & Mensing, 2005). Sedimanter kayaçlardaki toryum konsantrasyonlarının incelenmesi; sediman kaynak alanlarının belirlenmesi, ayrışma derecesinin değerlendirilmesi ve sedimanter havzaların jeokimyasal evriminin anlaşılması açısından önemli bilgiler sunmaktadır (Hazen et al., 2009). Bunun yanı sıra, doğal radyoaktivite düzeylerinin belirlenmesi ve doğal kaynaklı radyoaktif maddelerin (NORM) değerlendirilmesi bağlamında da toryum önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır (IAEA, 2014; UNSCEAR, 2000). Bu nedenle, farklı sedimanter kayaç türlerinde gözlenen toryum konsantrasyonlarının sistematik olarak

değerlendirilmesi hem temel jeokimya hem de çevresel çalışmalar açısından büyük önem taşımaktadır.

Metaformik Kayaçlarda Toryum

Metamorfik kayaçlardaki toryum konsantrasyonları, başlıca protolitin bileşimi, metamorfizma derecesi ve metamorfik süreçler sırasında gerçekleşen mineralojik yeniden düzenlenmelere bağlı olarak geniş bir değişkenlik göstermektedir (Adams & Weaver, 1958; Wedepohl, 1978a). Doğada baskın olarak dört değerlikli (Th^{4+}) oksidasyon durumunda bulunan toryum, düşük çözünürlüğü nedeniyle metamorfik koşullar altında çoğu durumda sınırlı jeokimyasal hareketlilik sergilemektedir. Bu durum, toryumun metamorfizma sırasında büyük ölçüde katı faza bağlı kalmasına ve akışkan fazlarla taşınımının genellikle sınırlı olmasına neden olmaktadır (Faure & Mensing, 2005). Dolayısıyla metamorfik kayaçlardaki toryum dağılımı, büyük ölçüde protolitten miras alınan jeokimyasal özelliklerin korunmasıyla karakterizedir.

Metamorfik süreçler boyunca toryum, zirkon, monazit, allanite ve ksenotim gibi aksesuar minerallerde yoğunlaşma eğilimi göstermektedir. Yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına karşı dayanıklı olan bu mineraller, toryumu kristal yapılarına etkin biçimde dahil edebilmeleri nedeniyle metamorfik kayaçlardaki toryum bütçesinin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır (Deer et al., 2013; Faure & Mensing, 2005). Özellikle orta ve yüksek dereceli metamorfik kayaçlarda toryumun önemli bir bölümü bu aksesuar fazlar tarafından tutulmaktadır.

Kayaç türüne bağlı olarak metamorfik kayaçlardaki toryum konsantrasyonlarında belirgin farklılıklar gözlenmektedir. Pelitik kökenli şistler ve gnayslar, felsik bileşenlerden türeyen protolitlerin etkisiyle toryum açısından görece zengin iken; mafik protolitli amfibolitler ve ultramafik kökenli metamorfik kayaçlar genellikle daha düşük toryum konsantrasyonları sergilemektedir (Wedepohl,

1978a). Sayısal veriler, metamorfik kayalarda toryum derişimlerinin oldukça geniş bir aralıkta değışebildiğini ortaya koymaktadır. (Wedepohl, 1978a), mermerlerde toryum konsantrasyonlarının <0,1 ppm gibi son derece düşük değerlere inebildiğini, buna karşılık bazı feldispatça zengin ve yüksek dereceli metamorfik kayalarda >67 ppm düzeylerine ulaşabildiğini belirtmektedir. Bununla birlikte, metamorfik kayaların büyük çoğunluğunda toryum içeriğinin yerkabuğu için kabul edilen ortalama değerlere yakın olup yaklaşık 6–10 ppm aralığında yer aldığı kabul edilmektedir.

Metamorfik kayalardaki toryum konsantrasyonlarının değerlendirilmesi; protolitin tanımlanması, metamorfik süreçlerin izlenmesi ve kabuksal evrimin anlaşılması açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca toryum, doğal radyoaktivite düzeylerinin belirlenmesi ve doğal kaynaklı radyoaktif maddelerin (NORM) değerlendirilmesi bağlamında da dikkate alınması gereken bir elementtir (IAEA, 2014; UNSCEAR, 2000). Bu nedenle, farklı metamorfik kayaç türlerinde gözlenen toryum dağılımlarının sistematik olarak incelenmesi hem temel jeokimya hem de uygulamalı çevresel çalışmalar açısından önem taşımaktadır.

Toryumun Bulunduğu (Taşıyıcı) Mineraller

Toryum (Th), aktinitler grubunda yer alan, radyoaktif ve litofil karakterli bir element olup yerkabuğundaki dağılımı büyük ölçüde mineralojik konaklanma biçimi tarafından kontrol edilmektedir. Doğada baskın olarak dört değerlikli (Th^{4+}) oksidasyon durumunda bulunan toryum, düşük çözünürlüğü ve yüksek iyonik yarıçapı nedeniyle kayaç oluşturan ana mineraller yerine çoğunlukla aksesuar mineraller bünyesinde yoğunlaşma eğilimi göstermektedir (Faure & Mensing, 2005; Wedepohl, 1978a).

Magmatik, sedimanter ve metamorfik ortamlarda toryumun başlıca taşıyıcıları; zirkon, monazit, allanite, ksenotim ve apatit gibi

nadir toprak elementi (NTE) açısından zengin aksesuar minerallerdir. Bu mineraller, kristal yapılarında büyük iyonları barındırabilme yetenekleri sayesinde toryumu etkin biçimde bünyelerine alabilmekte ve jeolojik süreçler boyunca önemli ölçüde koruyabilmektedir (Deer et al., 2013). Özellikle monazit ve allanite, toryum için en önemli konak mineraller arasında yer almakta olup, felsik magmatik kayalar ve bunlardan türeyen metamorfik birimlerde toryum bütçesinin büyük bir kısmını kontrol etmektedir (Wedepohl, 1978a). Toryumun bu aksesuar minerallerde yoğunlaşması, elementin jeokimyasal davranışının doğrudan bir sonucudur. Ana kayaç oluşturan minerallerin kristallenmesi sırasında toryum büyük ölçüde ergiyik fazında kalmakta; kristallenmenin ileri evrelerinde ise geç oluşan aksesuar minerallerde birirmektedir. Bu durum, toryumun özellikle geç evre magmatik ürünlerde ve yüksek dereceli metamorfik kayalarda zenginleşmesini açıklamaktadır (Deer et al., 2013; Faure & Mensing, 2005).

Sedimanter sistemlerde ise toryum, büyük ölçüde birincil konak minerallerden türeyen dayanımlı detrital ağır mineraller aracılığıyla taşınmakta ve birirmektedir. Zirkon ve monazit gibi mekanik ve kimyasal ayrışmaya karşı dirençli mineraller, toryumun sedimanter ortamlarda korunmasını ve yeniden dağılımını sağlayan başlıca fazlardır (Wedepohl, 1978a). Bu nedenle, toryumun mineralojik konaklanmasının anlaşılması; kayaların kökeni, jeokimyasal evrimi ve doğal radyoaktivite özelliklerinin yorumlanması açısından temel bir öneme sahiptir.

Toryumu temel bileşen olarak içeren birincil minerallerin sayısı sınırlı olup, başlıca torit, torianit ve bunların uranyumlu türevleri ile monazit grubunun toryumca zengin bileşenleri tarafından temsil edilmektedir; bu mineraller, özellikle alkalin granitik kayalar, siyenitler ve bunlarla ilişkili pegmatitlerde gelişen toryum ve uranyum açısından zengin magmatik sistemlerin

karakteristik aksesuar fazları arasında yer almaktadır (Wedepohl, 1978a).

Torit–uranotorit, toriyanit–uranotoriyanit ve monazit (şeralit), çoğunlukla alkalin granitik kayaçlar, siyenitler ve bunlarla ilişkili pegmatitlerde birincil aksesuar mineraller olarak bulunmaktadır. Bu mineraller, özellikle toryum ve uranyum açısından zengin magmatik sistemlerin karakteristik bileşenleri arasında yer almaktadır.

Monazit, bazı sedimanter ve düşük dereceli metamorfik ortamlarda da oluşabilmektedir. Birleşik Krallık başta olmak üzere çeşitli bölgelerde, çamurtaşları ve düşük dereceli metamorfik kayaçlarda, düşük sıcaklık koşullarında gelişen diagenetik (otijenik) monazit oluşumları rapor edilmiştir (Evans et al., 2009; Milodowski & Zalasiewicz, 1991).

Torogummit, çoğunlukla ikincil kökenli, düşük sıcaklıklarda gelişen bir mineral olup, birincil torit ve diğer toryumca zengin minerallerin alterasyonu ve hidrasyonu sonucunda oluşmaktadır. Bu mineral genellikle ince taneli ve zayıf kristallenmiş bir yapı sergilemektedir (Fronde1, 1953).

Potasyum

Doğal potasyum üç izotoptan oluşmaktadır. Potasyum-39 doğada yaklaşık %93,1 oranında bulunurken, potasyum-41 yaklaşık %6,88’lik bir bolluğa sahiptir; potasyum-40 ise yalnızca yaklaşık %0,01 gibi çok düşük bir oranda bulunmasına rağmen radyoaktif özellik göstermesi nedeniyle özel bir öneme sahiptir (Faure & Mensing, 2005; UNSCEAR, 2000). Bu izotoplar arasında yalnızca potasyum-40 radyoaktif olup, yaklaşık 1,25 milyar yıllık yarı ömrü ile bozunmaktadır. Potasyum-40, beta bozunması yoluyla kalsiyum-40’a ve elektron yakalama süreci sonucunda gama ışıınımı eşliğinde argon-40’a dönüşmektedir (Dickin, 2018).

Potasyum-40'(^{40}K)'ın bozunması sonucu oluşan argon-40 (^{40}Ar), kayaç ve minerallerin kristal yapıları içerisinde tutulabilmesi nedeniyle K–Ar ve $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ yaşlandırma yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır. Bu özellik, potasyum-40'ı yalnızca doğal çevresel radyoaktivitenin önemli bir bileşeni yapmakla kalmayıp, aynı zamanda jeokronoloji çalışmalarında yaygın olarak kullanılan temel izotoplardan biri hâline getirmektedir (Faure & Mensing, 2005; McDougall & Harrison, 1999). Buna karşılık, kalsiyum-40 yer kabuğunda bol miktarda bulunan kararlı bir izotop olup, potasyum-40'ın bozunma ürünlerinden biri olmasına rağmen yaşlandırma yöntemlerinde doğrudan kullanılmamaktadır.

Potasyumun jeolojik ortamlardaki dağılımı büyük ölçüde feldispatlar, mika grubu mineraller ve kil mineralleri tarafından kontrol edilmektedir. K-feldispatlar ve mikalar, magmatik ve metamorfik kayaçlarda potasyumun başlıca konak fazlarını oluştururken, sedimanter ortamlarda önemli bir bölüm kil minerallerine bağlanmaktadır (Blatt et al., 2006; William M. White, 2013). Bu mineralojik kontrol, potasyumun tane boyu dağılımı ve ayrışma derecesi ile yakından ilişkili bir jeokimyasal davranış sergilemesine yol açmaktadır.

Magmatik sistemlerde potasyum, genellikle fraksiyonel kristallenmenin ileri evrelerinde zenginleşmekte ve felsik–alkalin kayaçlarda daha yüksek derişimlere ulaşmaktadır. Buna karşılık, mafik ve ultramafik kayaçlar potasyum açısından belirgin biçimde fakirdir; bu durum, potasyumun uyumsuz (incompatible) bir element olarak davranmasının doğal bir sonucudur (Wilson, 1989; Winter, 2014a).

Potasyum, birçok silikat kayaçta ana bileşenlerden biri olarak bulunmakla birlikte, kireçtaşları, dolomitler ve bazı kimyasal çökel kökenli sedimanter kayaçlarda yalnızca ikincil ya da iz element

düzeylerinde yer alır. Farklı kayaç türlerindeki potasyum içeriklerinin genel dağılımı Tablo 3’te özetlenmiştir.

Tablo 3 Farklı kayaç türlerindeki potasyum içeriklerinin genel dağılımı

Magmatik Kayaçlar	Potasyum Konsantrasyonu Derişimi
Siyenitler ve fonolitler	3–6 %
Granitler, riyolitler ve ara magmatik kayaçlar	2.5–4.5 %
Bazaltlar ve diğer mafik kayaçlar	1–2 %
Ultramafik kayaçlar	<10 ppm – 1 % (ort. ~0.6 %)
Metamorfik Kayaçlar	Ana kayaca bağlıdır (magmatik ve sedimanter kayaçlara)
Sedimanter Kayaçlar	
Şeyller, killer, çamurtaşları	<0.01–7.1 %
Kumtaşları	<0.01–5.6 %
Evaporitler	değişken
Saf alçıtaşı, anhidrit, halit	0 %
Silvit (KCl)	52.4 %
Kireçtaşları, Dolomitler	<0.01–5 %
Ortalama kireçtaşı	~0.3 %
Ortalama dolomit	~0.6 %

Kaynak: (Wedepohl, 1978b)

Magmatik Kayaçlarda Potasyum Konsantrasyonu

Potasyum (K), magmatik kayaçların kimyasal bileşimi ve mineralojik özelliklerinin yorumlanmasında temel öneme sahip alkali elementlerden biridir. Magmatik sistemlerde potasyumun

davranışı; magmanın kökeni, kısmi erime koşulları, fraksiyonel kristallenme ve kabuksal etkileşimler gibi süreçlerle yakından ilişkilidir. Bu nedenle potasyum, magmatik kayaçların jeokimyasal karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan başlıca göstergeler arasında yer almaktadır (Rollinson, 1993; Winter, 2014).

Magmatik kayaçlarda potasyum konsantrasyonları, kayaç türüne ve magmanın evrim derecesine bağlı olarak belirgin farklılıklar göstermektedir. Felsik ve asidik kayaçlar, K-feldispat ve biyotit gibi potasyumca zengin minerallerin bolluğu nedeniyle genellikle yüksek potasyum içeriklerine sahipken, mafik ve ultramafik kayaçlarda potasyum konsantrasyonları oldukça düşüktür. Bu dağılım, magmanın evrimi sırasında gerçekleşen mineral ayrışması ve fraksiyonel kristallenme süreçlerinin doğal bir sonucudur (Wilson, 1989).

Potasyum içeriği, özellikle potasyum oksit (K_2O) oranı temel alınarak yapılan jeokimyasal sınıflandırmalarda ve tektonik ortam yorumlarında önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır. Düşük-K, orta-K ve yüksek-K kalk-alkalen seriler, volkanik yaylar ve kıtasal kabuk gelişimi gibi farklı jeodinamik ortamların ayırt edilmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Gill, 2010).

Yaygın magmatik kayaçlarda potasyumun dağılımı ve konsantrasyon aralıkları (Wedepohl, 1978a) tarafından derlenmiş ve Tablo 3'te özetlenmiştir. Potasyum, ileri derecede fraksiyonlaşmış alkali ve silisik kayaçlarda belirgin biçimde zenginleşirken, silis bakımından fakir ultramafik kayaçlarda en düşük düzeylerde bulunmaktadır. Bu durum, potasyumun başlıca alkali feldispatlar, mikalar, feldispatitler ve alkali içeren amfiboller gibi potasyum taşıyıcı silikat mineralleri tarafından kontrol edilmesiyle ilişkilidir.

Sayısal olarak değerlendirildiğinde; granit, granodiyorit, riyolit ve traktit gibi alkali magmatik kayaçlar genellikle %2,5–4,5 arasında potasyum içerirken, siyenitler ve fonolitlerde bu oran %3–

6'ya kadar çıkabilmektedir. Ara bileşimli diyorit ve andezitlerde potasyum konsantrasyonları çoğunlukla %1–2 düzeyindedir. Mafik kayaçlar (gabro ve bazaltlar) genellikle %0,5–1,3 aralığında potasyum içerirken, ultramafik kayaçlar potasyum bakımından son derece fakir olup <10 ppm ile yaklaşık %1 arasında değişen geniş bir aralık sergilemektedir. Ultramafik kayaçlar için ortalama potasyum konsantrasyonu yaklaşık %0,6 olarak kabul edilmektedir. Ultramafik kayaçlar için ortalama potasyum konsantrasyonu çoğu çalışmada %0,05'in altında kabul edilmektedir (Wedepohl, 1978a).

Sedimanter Kayaçlarda Potasyum Konsantrasyonu

Sedimanter kayaçlar; ayrışma, taşınma, çökelme ve diyajenez süreçlerinin ürünü olup, kimyasal bileşimleri hem kaynak kayaç özelliklerini hem de yüzey koşullarını yansıtmaktadır. Bu bağlamda potasyum (K), başlıca kil mineralleri, mikalar ve potasyum feldispatlar gibi belirli mineral fazlarda yoğunlaşması nedeniyle sedimanter kayaçların jeokimyasal karakterizasyonunda önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Potasyumun sedimanter sistemlerdeki dağılımı, özellikle sediman kaynağının (provenans) belirlenmesi ve kimyasal ayrışma derecesinin değerlendirilmesi açısından yaygın biçimde kullanılmaktadır (Pettijohn et al., 1987; Rollinson, 1993)

Sedimanter kayaçlarda potasyum dağılımı, kayaç türü ve mineralojik bileşimle yakından ilişkilidir. Silisiklastik kayaçlar, özellikle şeyl ve kilttaşları, illit ve mika gibi potasyumca zengin kil minerallerinin yaygınlığı nedeniyle genellikle daha yüksek potasyum içerikleri sergiler. Buna karşılık, kuvarsça zengin kumtaşları ile karbonat kayaçlar potasyum açısından görece fakirdir. Bu genel eğilimler; sedimanter kayaçların mineralojik olgunluğu, taşınma süreçleri ve çökelme ortamlarıyla ilişkilendirilmektedir (Rollinson, 1993; Tucker, 1991).

Potasyum, sedimanter kayaçlarda yalnızca jeokimyasal bir bileşen olarak değil, aynı zamanda doğal radyoaktivitenin temel kaynaklarından biri olarak önem taşımaktadır. Özellikle 40K izotopu, kuyu içi gama ışını loglarının temel bileşenlerinden birini oluşturarak litolojik ayrımların yapılmasına önemli katkı sağlamaktadır (Rider & Kennedy, 2011; Serra, 1984). Potasyum, sedimanter ortamlarda hem jeokimyasal süreçlerin hem de doğal radyoaktivitenin değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir elementtir.

Sedimanter kayaçlardaki potasyum bolluğu ve konsantrasyon aralıkları, Wedepohl tarafından küresel ölçekte derlenmiş olup bu veriler sedimanter sistemlerin kimyasal bileşiminin değerlendirilmesinde temel başvuru kaynakları arasında yer almaktadır (Wedepohl, 1978a, 1978b). Buna göre sedimanter kayaçlarda potasyum konsantrasyonu geniş bir aralıkta değişmekte olup, bu değişkenlik başlıca detrital mineralojik bileşim, birincil kimyasal çökelimle oluşmuş sedimanter mineraller ve diyajenetik süreçler tarafından kontrol edilmektedir.

Karbonat kayaçlar ve sedimanlar, <0,01 ile %5 arasında değişen potasyum içeriklerine sahip olabilmekle birlikte, bu ortamlardaki potasyumun büyük bölümü karbonat fazı yerine karbonat dışı fraksiyonda yoğunlaşmaktadır. Bu fraksiyon, başlıca alkali feldispatlar, mikalar ve özellikle illit, smektit ile karışık tabakalı illit–smektit gibi potasyumca zengin kil minerallerinden oluşan detrital silikat minerallerini içermektedir. Saf kireçtaşları ve dolomitler ise genellikle yalnızca iz düzeyinde potasyum içermektedir (Wedepohl, 1978b)

Çamur kayaçlarında (kıltaşı, şeyl, çamurtaşı ve silttaşı) potasyum içeriği büyük ölçüde kil mineralojisi tarafından kontrol edilmektedir. Potasyum konsantrasyonu ile kil mineral içeriği arasında genellikle güçlü bir pozitif ilişki bulunmakta olup, bu ilişki

kuyu içi gama ışını loglarında da açık biçimde izlenebilmektedir (Hurst, 1990). Çamur kayaçlarında potasyumun başlıca taşıyıcıları illit ve detrital mikalar olup, bazı sedimanter dizilerde glokonit de potasyum açısından önemli bir bileşen olarak yer alabilmektedir.

Kumtaşlarında potasyum içeriği, başlıca K-feldispat, mika ve yer yer glokonit gibi potasyumca zengin minerallerin varlığı tarafından kontrol edilmektedir. Sedimanter olgunluğun artmasıyla birlikte detrital K-feldispat ve mika miktarı genellikle azalmakta, buna bağlı olarak kumtaşlarının potasyum içeriğinde de düşüş gözlenmektedir. Buna karşılık, kilce zengin ve düşük derecede ayrıışmış kumtaşları, detrital feldispat ve mika bolluğu nedeniyle görece daha yüksek potasyum konsantrasyonları sergileyebilmektedir (Tucker, 1991).

Evaporit kayaçlar genellikle uranyum ve toryum bakımından fakir olup, potasyum kaynaklı doğal radyoaktivite yalnızca geç evre evaporit istiflerinde gelişen potas minerallerinin varlığı durumunda anlamlı düzeylere ulaşabilmektedir (Warren, 2006).

Metamorfik Kayaçlarda Potasyum

Metamorfik kayaçlar, magmatik veya sedimanter kökenli kayaçların sıcaklık, basınç ve akışkan koşullarındaki değişimlere bağlı olarak mineralojik ve kimyasal açıdan yeniden düzenlenmesi sonucunda oluşur. Bu süreçler sırasında majör elementlerin, özellikle alkali elementlerin dağılımı ve yeniden kristallenme davranışı, hem protolit özelliklerinin hem de metamorfik koşulların anlaşılmasında önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bağlamda potasyum (K), hem metamorfik kayaçların mineralojik evrimi ve kimyasal karakterizasyonunda, hem de doğal radyoaktivite özelliklerinin değerlendirilmesinde temel öneme sahip elementlerden biri olarak görölmektedir (Winter, 2014; Yardley & Warren, 2021).

Metamorfik kayalar da potasyum konsantrasyonu, büyük ölçüde protolitin bileşimi ve metamorfizma derecesine baēlı olarak geniş bir aralıkt a deēiřim göstermektedir. Sedimanter kökenli protolitlerden türeyen pelitik metamorfik kayalar, kil minerallerinin metamorfizma sırasında mikalara dönüşmesi sonucu biyotit ve muskovit gibi potasyumca zengin mineraller bakımından zenginleşmekte ve dolayısıyla yüksek potasyum içeriklerine sahip olmaktadır. Buna karşılık, mafik ve ultramafik protolitlerden gelişen metamorfik kayalar da potasyum konsantrasyonları genellikle oldukça düşüktür (Yardley & Warren, 2021). Benzer şekilde, kuvarsça zengin, temiz kumtaşlarının metamorfizmasıyla oluşan kuvarsitler, potasyum taşıyan minerallerin yok denecek kadar az olması nedeniyle çok düşük ya da ihmal edilebilir potasyum içerikleri sergilemektedir.

Metamorfik kayalar da potasyumun daēılımı, metamorfizma sırasında gelişen mineral reaksiyonları ve yeniden kristallenme süreçleri tarafından kontrol edilmektedir. Özellikle biyotit ve muskovit gibi potasyum içeren minerallerin varlıēı, metamorfik kayalar ın ^{40}K kaynaklı doēal radyoaktivite düzeylerinin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır. Metamorfik derecenin artmasıyla birlikte kil minerallerinin mikalara dönüşmesi, potasyumun kayaç içindeki baēlanma biçimini deēiřtirerek doēal radyoaktivitenin mineralojik kontrol altında yeniden daēılımına neden olmaktadır (Bucher & Frey, 2002).

Sonuç

Kayalar da doēal olarak bulunan uranyum, toryum ve potasyum gibi radyoaktif elementler, bozunma süreçleri boyunca alfa, beta ve gama ışınımları üreterek doēal radyasyon alanının temel bileşenlerini oluşurmaktadır. Bu radyasyonun düzeyi, kayaç türü, mineralojik bileşim, protolit özellikleri ve jeolojik süreçlere baēlı olarak önemli ölçüde deēiřkenlik göstermektedir. Magmatik,

sedimanter ve metamorfik kayalardaki doğal radyoaktif elementlerin dağılımının anlaşılması; yerkabuğunun jeokimyasal evriminin yorumlanması, doğal radyasyon dűzeylerinin değerlendirilmesi ve doğal kaynaklı radyoaktif maddelerin (NORM) çevresel etkilerinin ortaya konulması ağısından bűyűk ۆnem taşımaktadır. Bu nedenle, kayalardaki doğal radyoaktivitenin kapsamlı biğimde ele alınması hem yerbilimlerine yۆnelik temel çalışmalar hem de çevresel uygulamalar ağısından ۆnem taşımaktadır.

Kaynakça

Adams, J. A. S., & Weaver, C. E. (1958). Thorium-to-Uranium Ratios as Indicators of Sedimentary Processes: Example of Concept of Geochemical Facies. *AAPG Bulletin*, 42(2), 387–430.

Allegre Claude J. (2008). *Isotope Geology*. Cambridge University.

Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed. (Alloway B.J, Ed.). Springer.*

Ball, T. K., Cameron, D. G., Colman, T. B., & Roberts, P. D. (1991). Behaviour of radon in the geological environment: a review. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 24(2), 169–182.

Blatt, Harvey., Tracy, R. J., & Owens, B. Edward. (2006). *Petrology : igneous, sedimentary, and metamorphic*. W.H. Freeman.

Bowell, R. J., Grogan, J., Hutton-Ashkeny, M., Brough, C., Penman, K., & Sapsford, D. J. (2011). Geometallurgy of uranium deposits. *Minerals Engineering*, 24(12), 1305–1313. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.005>

Bucher, K., & Frey, M. (2002). Petrogenesis of Metamorphic Rocks (7th ed.). In *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04914-3>

Burns, P. C., & Sigmon, G. E. (2013). *Uranium : cradle to grave*. Published by the Mineralogical Association of Canada (MAC).

Burns, P. C., & Finch, R. J. (1999). *Uranium- Mineralogy, Geochemistry, and the Environment* (C. B. Peter & J. F. Robert, Eds.).

Cumberland, S. A., Douglas, G., Grice, K., & Moreau, J. W. (2016a). Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes. *Earth-Science Reviews*, 159, 160–185.

Cumberland, S. A., Douglas, G., Grice, K., & Moreau, J. W. (2016b). Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes. *Earth-Science Reviews*, 159, 160–185.

Cumberland, S. A., Douglas, G., Grice, K., & Moreau, J. W. (2016c). Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 159, pp. 160–185). Elsevier B.V.

Deer, W. A. ., Howie, R. A. ., & Zussman, J. . (2013). *An introduction to the rock-forming minerals*. The Mineralogical Society.

Dickin, A. P. (2018). Radiogenic Isotope Geology, Third Edition. In *Radiogenic Isotope Geology, Third Edition*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316163009>

Evans, J. A., Zalasiewicz, J. A., & Chokey-Jones, A. (2009). Facies effects on the behaviour of Nd and Sr isotope systems in turbidite mudrocks during diagenesis. *Sedimentology*, 56(4), 863–872.

Faure, G., & Mensing, T. M. (2005a). *Isotopes: Principles and Applications, 3rd Edition*. Scientific Research Publishing. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1769865>

Faure, G., & Mensing, T. M. (2005b). *Isotopes, Principles and Applications Third Edition*.

Faure, G., & Mensing, T. M. (2005c). *Isotopes, Principles and Applications*, Third Edition.

Fayek, M., Horita, J., & Ripley, E. M. (2011). The oxygen isotopic composition of uranium minerals: A review. *Ore Geology Reviews*, 41(1), 1–21.

Finch, R., & Murakami, T. (2019). Systematics and paragenesis of uranium minerals. *Uranium: Mineralogy, Geochemistry, and the Environment*, 91–179.

Fron del, C. (1953). Hydroxyl substitution in thorite and zircon. *American Mineralogist*, 38, 1007–1018.

Fron del, C. (1958). *Systematic Mineralogy Of Uranium And Thorium*.

Gauthier-Lafaye, F., Weber, F., & Ohmoto, H. (1989). Natural fission reactors of Oklo. *Economic Geology*, 84(8), 2286–2295.

Gill, R. (2010). *Igneous Rocks and Processes*. Wiley-Blackwell.

Hazen, R. M., Ewing, R. C., & Sverjensky, D. A. (2009). Evolution of uranium and thorium minerals. *American Mineralogist*, 94(10), 1293–1311.

Hoskin, P. W. O., & Schaltegger, U. (2003). The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1), 27–62.

Hurst, A. (1990). Natural gamma-ray spectrometry in hydrocarbon-bearing sandstones from the Norwegian Continental Shelf. In *Geological Society Special Publication* (Vol. 48). Geological Society of London.

IAEA. (2003). Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. International Atomic Energy Agency.

IAEA. (2013). Radiation protection and management of NORM residues in the phosphate industry (Safety Reports Series No. 78). IAEA.

IAEA. (2014). Safety Standards for protecting people and the environment, General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3.

ICRP, I. C. on R. Protection. (2007). *ICRP Publication 103- The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*.

Kreuzer, O. P., Markwitz, V., Porwal, A. K., & McCuaig, T. C. (2010). A continent-wide study of Australia's uranium potential. Part I: GIS-assisted manual prospectivity analysis. *Ore Geology Reviews*, 38(4), 334–366.

Krivovichev, S. V., Burns, P. C., & Tananaev, I. G. (2007). *Structural chemistry of inorganic actinide compounds*. 494.

Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry: Langmuir, Donald: Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.

McDougall, I., & Harrison, T. M. (1999). *Geochronology and thermo chronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method*. Oxford University Press.

Milodowski, A. E., Basham, I. R., Hyslop, E. K., & Pearce, J. M. (1990). *The Uranium Source Term Mineralogy And Geochemistry At The Broubster Natural Analogue Site, Caithness 1st edition*. British Geological Survey.

Milodowski, A. E., & Zalasiewicz, J. A. (1991). Redistribution of rare earth elements during diagenesis of turbidite/hemipelagite mudrock sequences of Llandovery age from central Wales. In A. C. Morton, S. P. Todd, & P. D. Haughton (Eds.), *Geological Society Special Publication* (Vol. 57, pp. 101–124). Geological Society, London.

Newsome, L., Morris, K., & Lloyd, J. R. (2014). The biogeochemistry and bioremediation of uranium and other priority radionuclides. *Chemical Geology*, 363, 164–184.

Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (1987). *Sand and sandstone* (2nd ed.). Springer-Verlag.

Plant, J. A., Reeder, S., Salminen, R., Smith, D. B., Tarvainen, T., De Vivo, B., & Petterson, M. G. (2003). The distribution of uranium over Europe: Geological and environmental significance. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science*, 112(3), 221–238.

Rider, M. H., & Kennedy, M. (2011). *The Geological Interpretation of Well Logs: M.H. Rider: 9780954190682: Amazon.com: Books*. Rider-French Consulting Limite.

Rollinson, H. R. (1993a). Using Geochemical Data: Evolution, Presentation, Interpretation.

Rollinson, Hugh. R. (1993b). Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific & Technical.

Serra, O. (1984). Fundamentals of well-log interpretation: Volume 1 – the acquisition of logging data. Elsevier.

Tucker, M. E. (2003). Sedimentary Rocks in the Field, Third Edition. Wiley.

Tucker, M. E. (1991). *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. Blackwell Scientific Publications.

UNSCEAR. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes Volume I: Sources United Nations.

UNSCEAR. (2008). Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, General Assembly Official Records Sixty-third Session Supplement No. 46.

Warren, J. K. (2006). *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer.

Wedepohl, K. H. (1978a). Handbook of geochemistry (Vol. II/5: Elements La (57) to U (92)) (K. H. Wedepohl, Ed.). Springer.

Wedepohl, K. H. (1978b). *Handbook of Geochemistry: Volume II/2 Elements Si (14) to V (23)* (C. W., S. D. M., T. K. K., W. K. H. , & Z. J. Correns, Ed.). Springer.

Whicker, F. W., Eisenbud, M., & Gesell, T. (1997). Environmental Radioactivity from Natural, Industrial, and Military Sources. In *Radiation Research* (Vol. 148, Issue 4).

William M. White. (2013). *Geochemistry*. Wiley-Blackwell /John Wiley & Sons.

Wilson, M. (1989). Igneous Petrogenesis. In *Igneous Petrogenesis*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9388-0>

Winter, J. D. (2014a). Principles of igneous and metamorphic petrology. Pearson Education.

Winter, J. D. (2014b). Principles of igneous and metamorphic petrology (2nd ed.). Pearson Education.

Yardley, B. W. D., & Warren, Clare. (2021). *An introduction to metamorphic petrology*. Cambridge University Press.

BÖLÜM 2

RADON GAZI VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

AYLA SANDIKCIOĞLU GÜMÜŞ¹

Giriş

İnsanlar, evrenin oluşumundan günümüze kadar doğal radyasyon kaynaklarının etkisi altında yaşamlarını sürdürmektedir. Bu maruziyetin başlıca bileşenlerini, uzaydan yeryüzüne ulaşan yüksek enerjili kozmik ışınlar ile yerkabuğunda doğal olarak bulunan radyoaktif elementlerden kaynaklanan karasal radyasyonlar oluşturmaktadır. Yeryüzünde yaygın olarak bulunan uzun yarı ömürlü doğal radyoaktif elementler arasında uranyum-238 (^{238}U), toryum-232 (^{232}Th) ve potasyum-40 (^{40}K) yer almakta; bu elementlerin bozunma zincirlerinde ise radyum-226 (^{226}Ra) ve özellikle radon-222 (^{222}Rn) gibi ikincil radyoaktif ürünler ortaya çıkmaktadır. Bu doğal radyoaktif izotoplar, toprak, kayalar, yapı malzemeleri ve atmosfer aracılığıyla insanların çevresinde her zaman mevcuttur.

Doğal kaynaklı radyasyona maruz kalma, canlıların çevresel koşullarının ayrılmaz bir parçası olup tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir. Bununla birlikte, maruziyet düzeyleri coğrafi

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fizik Bölümü, Orcid: 0000-0002-2021-6840

koşullar, jeolojik yapı, yapı özellikleri ve yaşam alışkanlıkları gibi pek çok etkene bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) tarafından yayımlanan raporlara göre, dünya genelinde bireylerin doğal kaynaklar nedeniyle aldığı ortalama yıllık etkin dozun yaklaşık 2,4 mSv olduğu tahmin edilmektedir (UNSCEAR, 2000). Bu değer, doğal radyasyonun küresel ölçekte insan maruziyetine olan katkısını ortaya koymakta ve özellikle iç mekanlarda radon kaynaklı maruziyetin değerlendirilmesinin önemine işaret etmektedir.

Uranyum ve radyum, yer kabuğunda doğal olarak bulunan kayaçlar ve toprak içerisinde yaygın biçimde yer almaktadır. Radon izotoplarının tamamı uranyum bozunma serisine bağlı olup, radon gazının başlıca kaynağını toprak ve kayaçlar oluşturmaktadır. Radon-222 (^{222}Rn), periyodik tabloda asal gazlar grubunda yer alan, kimyasal olarak inert özellik gösteren; renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Yeraltında oluşan radon, binaların iç basıncının genellikle toprak basıncından daha düşük olması nedeniyle yukarı doğru hareket etme eğilimindedir. Bu süreçte radon gazı, bina temellerindeki boşluklar ve çatlaklar ile su ve diğer tesisat borularının geçtiği açıklıklardan sızarak yapı içerisine girmekte ve kapalı mekânlarda birirmektedir. Radon, havaya kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olan ağır bir soygazdır. Bunun yanı sıra, enerji verimliliğini artırmak amacıyla modern binalarda uygulanan gelişmiş yalıtım önlemleri, hava değişimini sınırlayarak radon gazının iç mekânlarda daha fazla hapsolmesine ve konsantrasyonunun artmasına yol açabilmektedir. Özellikle havalandırmanın yetersiz olduğu kapalı alanlarda radon zamanla birikerek sağlık açısından tehlikeli düzeylere ulaşabilmektedir. İnsanlar solunum yoluyla radon gazını aldıklarında, asal gaz grubunda yer alması nedeniyle radon dokularla kimyasal bağ oluşturmaz; çünkü kimyasal reaktivitesi oldukça düşüktür. Radonun

dokulara geçmesi durumunda dahi, biyolojik dokulardaki çözünürlüğü son derece sınırlıdır. Ancak radonun bozunması sonucu oluşan ürünlerin önemli bir kısmı radon gibi gaz halinde olmayıp katı parçacık formundadır ve kimyasal açıdan daha aktif özellikler göstermektedir. Bu bozunum ürünleri, havada bulunan toz zerrecikleri ve diğeri aerosollerle kısa sürede etkileşime girerek radyoaktif aerosoller oluşturmaktadır. Bu radyoaktif aerosoller, solunum sırasında akciğeri tarafından tutulabilecek boyutlara sahip parçacıklara dönüşmekte ve solunum yoluyla akciğere ulaşmaktadır. Akciğere giren bu parçacıklar, bronşiyal ağacın farklı bölümlerine kadar ilerleyebilmekte ve burada tutunarak kalabilmektedir. Bozunum süreci, bu parçacıklar kararlı hâle gelinceye kadar akciğeri dokusu içerisinde devam etmekte ve bu süre boyunca çeşitli seviyelerde radyasyon yayılımı gerçekleşmektedir. Radyoaktif bozunma sırasında yayılan özellikle alfa parçacıkları, canlı dokuların iyonizasyonuna yol açarak hücrel DNA yapısında hasar oluşmasına neden olabilmekte; bu durum uzun vadede akciğeri dokusunda yapısal bozulmalara ve zamanla kanser gelişimine zemin hazırlayabilmektedir (Axelson, 1995; Field et al., 2000; Lázár et al., 2003; UNSCEAR, 2000).

Kapalı ortamlar; konutlar, iş yerleri ve okul, hastane gibi kamuya açık binaları kapsamakta olup, bireylerin günlük yaşamlarının büyük bir bölümünü oluşturur. Çeşitli çalışmalar, insanların zamanlarının büyük bir kısmını kapalı mekânlarda geçirdiğini göstermektedir; yapılan zaman-aktivite araştırmalarına göre bireylerin günlük zamanlarının yaklaşık %90'ı kapalı ortamlarda geçmektedir. Ulusal insan aktivite kalıpları araştırmasına göre, ortalama bir birey kapalı mekân zamanının neredeyse %70'ini kendi konutunda geçirmektedir (Klepeis et al., 2001). Bu nedenle radona maruziyetin önemli bir halk sağlığı sorunu olarak değerlendirilmesi gerektiği açıktır.

Doğal Radyoaktivite

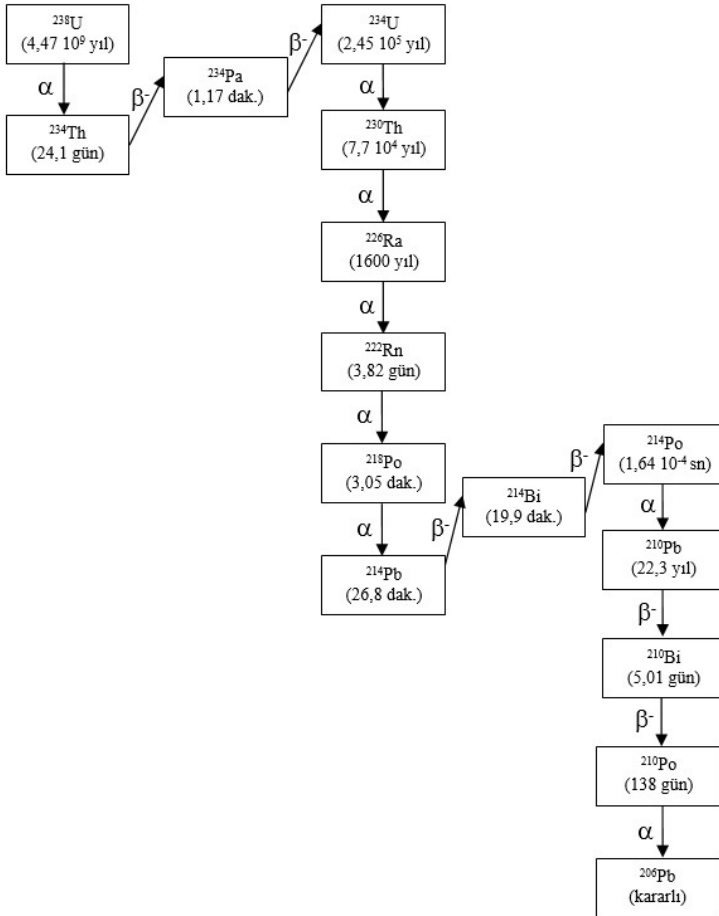
Radyasyon, temel olarak enerjinin veya parçacıkların uzayda ya da maddeler aracılığıyla yayılmasıdır ve bu yayılım elektromanyetik dalga (gama, X ışını) veya parçacık (alfa, beta, nötron) biçiminde gerçekleşebilir. Doğal radyasyonun başlıca kaynakları, yer kabuğunda bulunan radyoaktif elementler, kozmik ışınlar ve radyoaktif bozunma ürünleridir. Yer kabuğunda özellikle uranyum, toryum ve potasyum gibi elementler bulunur ve bunların bozunma zincirleri, alfa, beta ve gama ışınları yayarak çevresel radyasyonun önemli bir bölümünü oluşturur.

İnsanlar, yaşamları boyunca doğal ve yapay kaynaklı iyonlaştırıcı radyasyona sürekli olarak maruz kalmaktadır (ICRP, 2007). Bu radyasyonun temel bileşenleri arasında atmosfer dışından gelen kozmik ışınlar ve yer kabuğunda bulunan radyoaktif elementlerin (terrestrial) kendiliğinden bozunmaları yer almaktadır (UNSCEAR, 2000, 2008). Kozmik radyasyon, yükseklik ve atmosfer koşullarına bağlı olarak değişmekle birlikte, dünya genelinde çoğu yerde nispeten homojen bir şekilde dağılmıştır. Buna karşın, toprak ve kayalardaki radyoaktif maddelerin dağılımı, bulunduğu bölgenin jeolojik yapısına göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Whicker et al., 1997). Bu nedenle doğal radyasyon seviyeleri; bölgenin jeolojik yapısı, toprağın mineral içeriği ve coğrafi koşulları başta olmak üzere birçok faktöre bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir (IAEA, 2001).

İnsanlar, yaşadıkları ortamın fiziksel özellikleri, bina malzemelerinin türü ve yaşam tarzlarına bağlı olarak değişen dozlarda radyasyon almaktadır. Yapılan araştırmalar, yer kabuğundaki toprak ve kayalarda yüksek konsantrasyonlarda bulunabilen özellikle Uranyum-238 (^{238}U) ve Toryum-232 (^{232}Th) radyoaktif serileri ile bunların bozunma ürünlerinin (özellikle radon), insanların doğal radyasyon maruziyetine en büyük katkıyı

sağladığını ortaya koymuştur (UNSCEAR, 2011). Doğada bulunan radyoaktif elementlerin önemli bir bölümü Uranyum-238'in bozunma zinciri içerisinde yer almaktadır. Uranyum-238, toplam 14 temel çekirdeği içeren bu zincirin başlangıç noktasını oluşturur ve süreç çeşitli alt serilere ayrılarak ilerler. Uranyum-238 zinciri boyunca radyum-226 (^{226}Ra)'nın alfa bozunması sonucu radon-222 (^{222}Rn) gazı oluşur. Uranyumun bozunma zinciri Şekil 1'de sunulmaktadır.

Şekil 1 ^{238}U 'in bozunma ürünleri şeması



Radon Gazının Oluşumu ve Özellikleri

Doğal radyoaktivitenin en dikkat çekici örneklerinden biri radon gazıdır. Radon gazı, Alman kimyager Friedrich Ernst Dorn tarafından 1898 yılında radyumun (^{226}Ra) bozunma ürünlerini incelerken keşfedilmiştir. Dorn radyumdan ayrılan bilinmeyen bir gaz fark etmiş ve bu gazın yeni bir element olduğunu ortaya koymuştur. Keşfinden sonraki yıllarda element, “parlamak” anlamına gelen Latince *nitens* sözcüğünden türetilen niton adıyla anılmıştır. Ancak 1923’te yapılan isimlendirme düzenlemeleriyle birlikte elementin adı resmi olarak radon olarak kabul edilmiştir.

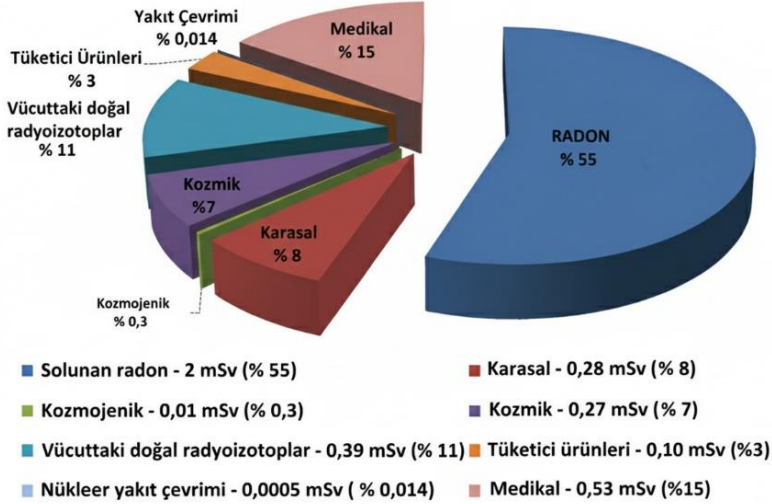
Radon-222, yer kabuğunda bulunan uranyum-238’in bozunma zincirinde yer alan radyum-226’nın alfa bozunması sonucu oluşur ve kimyasal tepkimeye girmeyen radyoaktif bir soygazdır. Radonun kısa yarı ömrü 3,82 gündür ve inert gaz yapısıyla çevresel radyasyon çalışmalarında özel bir yere sahiptir. Doğal çevrede başlıca üç radon izotopu önem taşır: radon-222 (radon), radon-220 (toron) ve radon-219 (aktinon). Bu izotoplar sırasıyla uranyum-238 (^{238}U), toryum-232 (^{232}Th) ve uranyum-235 (^{235}U) bozunma serilerinin bir ürünü olarak ortaya çıkar. Doğal uranyumun kütleli izotop bollukları yaklaşık olarak uranyum-238 için %99,275; uranyum-235 için %0,72 ve uranyum-234 için %0,005’tir. Bu izotoplar, yer kabuğunda gerçekleşen radyoaktif bozunma süreçlerinin başlangıcını oluşturur. Radon (^{222}Rn)’nun yarılanma ömrü 3,82 gün, oluştuğu seri uranyum-238; toronun (^{220}Rn) yarılanma ömrü 55 saniye, oluştuğu seri toryum-232 ve aktinonun (^{219}Rn) yarılanma ömrü 3,9 saniyedir ve oluştuğu seri uranyum-235’dir. Radon-220 (toron) ve radon-219 (aktinon)’un yarı ömürleri çok daha kısa olduğundan ortam havasında daha sınırlı bir birikim gösterirler. Uranyum-238’in doğada yüksek bolluğa sahip olması ve radon-222’nin diğer radon izotoplarına kıyasla daha uzun yarı ömre sahip olması nedeniyle, kapalı ortamlarda birikerek insanların maruz

kaldığı doğal radyasyon dozuna en büyük katkıyı radon-222 yapmaktadır.

Radon, periyodik tablonun 86. sırasında yer alan ve fiziksel olarak renksiz, kokusuz ve tatsız olması nedeniyle doğal ortamda varlığı doğrudan algılanamayan bir asal gazdır. Normal sıcaklık ve basınç altında görünmez bir gaz olan radon hem yoğunluğu hem de viskozitesi bakımından atmosferik hava bileşenlerinden ayrılır; bu özellikler kapalı ortamlarda birikebilme potansiyeline işaret eder. Kimyasal açıdan son derece durağan bir element olduğundan bilinen koşullar altında başka elementlerle bileşik oluşturmaz. Suda sınırlı düzeyde çözünebilmekle birlikte, çözünürlüğü sıcaklığın artmasıyla birlikte belirgin şekilde azalır. Termal özellikleri incelendiğinde, radonun yaklaşık $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de eridiği ve $-61,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında kaynama noktasına ulaştığı bilinmektedir (UNSCEAR, 2000). Düşük sıcaklıklara maruz kaldığında sıvı hale geçen radonun kaynama ve erime noktalarının diğer soygazlara göre daha yüksek olması, elementin kütesinin büyüklüğüyle ilişkilidir. Bu termal ve kimyasal özellikler, onun hem ağır bir soy gaz olarak konumunu hem de çevresel davranışını, iç mekân birikimini belirleyen temel parametreler arasında yer alır. Bu nedenle, ortamdaki varlığı doğrudan duymasal yollarla tespit edilemez ve yalnızca özel ölçüm teknikleri aracılığıyla belirlenebilir.

Kararsız çekirdeklerin enerji yaymasıyla meydana gelen radon, kayalardan ve minerallerden kolaylıkla ayrılarak gözenekli topraklar ve yeraltı suları aracılığıyla yüzeye taşınabilir. Yoğunluğu havadan daha yüksek olduğundan, özellikle kapalı ve yetersiz havalandırılan alanlarda birikme eğilimi gösterir. Şekil 2'de görüldüğü gibi doğal kaynaklardan alınan dozun en önemli bileşeni, radon gazı ve onun kısa yarı ömürlü bozunma ürünleridir. Radon gazından dolayı maruz kalınan yıllık doz yaklaşık 2 mSv 'dir (UNSCEAR, 2017).

Şekil 2 İnsanların maruz kaldığı radyoaktif dağılım ve radon gazı oranı



Kaynak: (UNSCEAR, 2017)

Ortamdaki varlığı doğrudan duyumsal yollarla tespit edilemez; çünkü radon, insan duyularının algılayabileceği herhangi bir görsel, kokusal veya tatsal uyarı üretmeyen, elektromanyetik tayfın görünür bölgesinde ışık soğurmeyen ve kimyasal tepkimeye girme eğilimi son derece düşük olan inert bir gazdır. Bu nedenle radon, havada bulunsa dahi renk değişimi, koku oluşumu ya da tahriş gibi herhangi bir fiziksel belirti meydana getirmez ve yalnızca özel ölçüm cihazları özellikle alfa parçacığı dedektörleri, pasif iz dedektörleri veya sürekli radon monitörleri kullanılarak nicel olarak saptanabilir.

Radonun oluşumu ve çevresel dağılımı, yer kabuğunun jeokimyasal yapısı ve litolojik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle radon, doğal radyasyonun anlaşılmasında ve izlenmesinde önemli bir gösterge olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca radon, yer

altı suyu ve atmosferik ölçümlerle takip edilerek, çevresel radyasyon çalışmalarına ve jeolojik araştırmalara ışık tutmaktadır (Gundersen & Richard, 1991; UNSCEAR, 2000).

Başlıca Radon Gazı Kaynakları

Radon, başta kayaç ve toprakta bulunan radyumdan açığa çıkmak üzere; yeraltı suları, dış ortam havası, bazı yapı malzemeleri, doğal gaz gibi çeşitli kaynaklardan ortama yayılabilen doğal bir radyoaktif gazdır. Radon gazının çevresel ve iç mekânlardaki dağılımı, farklı kaynakların katkısıyla şekillenmektedir. Bu kaynaklar, radonun ortama giriş yollarını ve birikim potansiyelini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Dolayısıyla radon maruziyetinin anlaşılabilmesi için, bu kaynakların birlikte incelenmesi önem taşımaktadır. Bu bölümde radonun başlıca kaynakları ana hatlarıyla açıklanmaktadır:

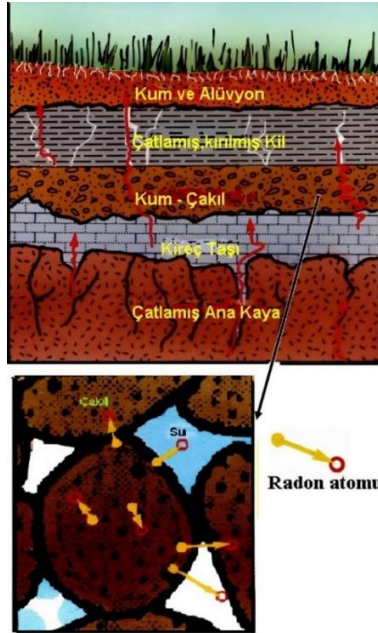
Toprakta Radon Gazı

Yeraltındaki uranyum yataklarının belirlenmesinde, toprak gazı ve yer atmosferindeki radon ölçümleri uzun süredir kullanılan önemli jeokimyasal arama yöntemlerindendir. Bu yöntemin değerli olmasının temel nedeni, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde bulunan uranyum kaynaklarından açığa çıkan radonun, bozunma sürecinin ardından toprağın gözenekli yapısı boyunca yüzeye doğru göç etmesi ve bu süreç sonucunda toprak gazında ya da yakın atmosferde ölçülebilir bir yoğunluk artışı oluşturmalarıdır (The U.S. Department of Energy, 1983). Bu nedenle radon anomalileri, yüzeyden doğrudan gözlemlenemeyen uranyum zenginleşmelerini işaret edebilme potansiyeline sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle radon, jeolojik araştırmalarda ön değerlendirme aracı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Toprak–Su Ortamında Radon Davranışı

Radonun gaz fazında bulunması, onu toprak içerisindeki uranyum ve radyum gibi katı halde bulunan ana kaynak izotoplarına kıyasla daha hareketli hâle getirir (UNSCEAR, 2000). Gaz formunda olan radon, toprak taneleri arasındaki gözeneklerden ve kayaçlardaki açıklık ile çatlaklardan sızarak bulunduğu ortamdan ayrılabilir (Lawrence Berkeley National Laboratory, 1987). Gözenekli yapılarda hareket edebilmesi, belirli koşullar altında radonun yer altı boyunca daha uzun mesafelerde taşınmasına olanak tanır (Tanner, 1980). Toprak içindeki radonun taşınma hızı büyük ölçüde gözeneklerdeki su miktarı tarafından etkilenir; çünkü toprak nemi, gözeneklilik düzeyi ve su–hava geçirirmliliği ortamın genel permeabilitesini belirleyen başlıca faktörlerdir (Şekil 3) (WHO, 2009).

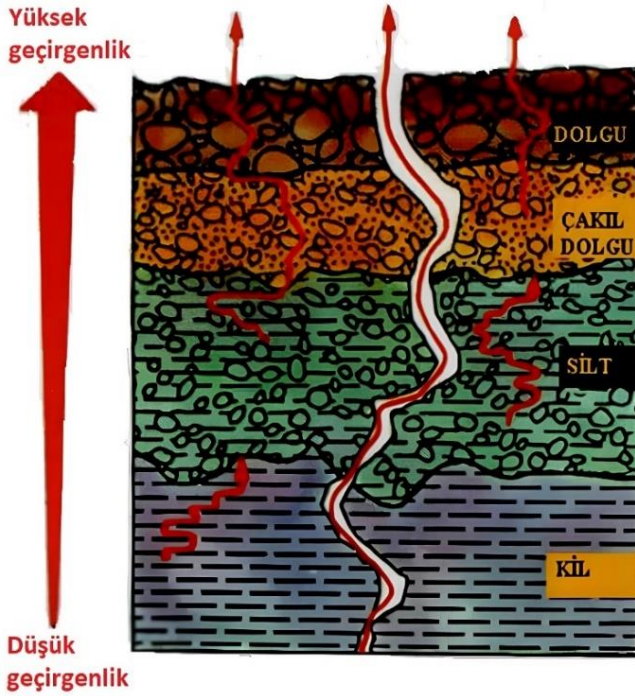
Şekil 3 Yeraltı Ortamlarında Radon Taşınımı



Kaynak: (Otton, 1992)'den uyarlanmıştır

Bu nedenle radon, yüksek geçirgenliğe sahip kumlu veya çakıllı zeminlerde, geçirgenliği düşük killi zeminlere göre daha kolay hareket edebilir. Ayrıca toprak ya da kayaç içinde kırık ve çatlakların bulunması radonun taşınımını artırabilen önemli bir diğer jeolojik etkidir (Gundersen & Richard, 1991; Nazaroff, 1992). Şekil 4’de radon gazının farklı toprak türlerindeki geçirgenliği gösterilmiştir.

Şekil 4 Radon gazının farklı toprak türlerindeki geçirgenliği



Kaynak: (Otton, 1992)

Radonun yüzeye ulaşmasını sağlayan bu göç mekanizması, jeokimyasal aramalarda ölçülen radon anomalilerinin temelini oluşturmaktadır. Radyum-226’nın alfa bozunması sonucu ortaya çıkan radon-222 izotopu, tanecik yüzeyine yeterince yakın oluşmuşsa ve çekirdek geri tepmesi (recoil) etkisiyle tanecik dışına savrulmuşsa, mineral taneciğinden kurtularak gözenekli ortama

geçebilir (Tanner, 1980; UNSCEAR, 2000). Bu kaçış ya da serbest kalış olayı yalnızca radyoaktif bozunmaya değil; aynı zamanda toprağın mineralojik bileşimine, tanecik boyutuna, nem durumuna ve gözenekliliğine de bağlıdır (Tanner, 1980; UNSCEAR, 2000). Dolayısıyla radonun toprak gözenek havasına geçişi, ancak uygun fiziksel ve kimyasal koşulların bir araya gelmesiyle mümkün olur. Toprak gözeneklerinde oluşan radon, ortamdaki suyla etkileşime girerek, su ile temas eden bölgelerde çözünerek yeraltı suyuna da geçebilir. Radonun suya transferi; sıcaklık, basınç, çözülmüş gazların parsiyel basınçları ve su-toprak temas yüzeyinin niteliği gibi çevresel faktörlere bağlıdır (UNSCEAR, 2000). Yeraltı suyunda çözülmüş radon, özellikle çatlaklı kaya akiferlerinde daha yüksek olabilir; çünkü radonun üretildiği radyojenik mineraller doğrudan akış yollarıyla temas hâlinindedir (Cothorn & Rebers, 1990). Bu nedenle içme suyu kaynaklarında ölçülen radon seviyeleri hem kayacın jeokimyasal özelliklerini hem de akiferin hidrodinamik davranışını yansıtır.

Sularda Radon

Yer altındaki uranyumca zengin formasyonlardan süzülerek çıkan sular ile derin jeolojik zonlardan yüzeye ulaşan hidrotermal akımlar, doğal olarak yüksek radon ve radyum konsantrasyonları içerebilir. Bu nedenle termal bölgelerdeki ılıca, kaplıca ve mineralli sular, jeolojik yapıdaki uranyum ve radyumun çözünmesine bağlı olarak radyojenik izotoplar açısından dikkat çeken kaynaklardır (Cothorn & Rebers, 1990; UNSCEAR, 2000). Yer altı uranyum yataklarının belirlenmesine yönelik çalışmalarda radon ölçümlerinin çoğunlukla memba ve kuyu sularında yapılmasının nedeni, bu suların doğrudan yer altı akarsu ve kırık sistemleriyle ilişkili olmasıdır (UNSCEAR, 2000). Yeraltı suları, magmatik zonlara yakın bölgelerden geçerken ısınabilir ve artan sıcaklık, kayalarındaki uranyum ve radyumun çözünürlüğünü artırabilir. Bu süreç sonucunda uranyum ve radyum yeraltı suyuna geçerken, radon ise

bozunma ürünü olarak suda çözünmüş halde taşınır (Cothorn & Rebers, 1990; UNSCEAR, 2000). Bu nedenle memba ve kuyu sularının bileşiminde radon, radyum ve uranyumun bulunması jeolojik açıdan beklenen bir durumdur. Yeraltı sularındaki radon seviyeleri yüzey sularına kıyasla genellikle daha yüksektir; çünkü radonun yüzeye ulaşana kadar henüz atmosfere kaçma şansı olmamıştır (UNSCEAR, 2000). Bu sulardan gelen radon, kullanım sırasında, özellikle suyun püskürtüldüğü veya çalkalandığı durumlarda, kapalı ortamlara geçerek iç ortam radon konsantrasyonunu artırabilir (EPA, 1999). Derin kuyu sularında radon konsantrasyonlarının bölgesel jeolojik özelliklere bağlı olarak geniş bir aralıkta değişebildiği, uluslararası raporlarda da belirtilmektedir (UNSCEAR, 2000; WHO, 2009). Bu nedenle yeraltı suyunun kullanımı, ev içi radon maruziyetine kayda değer bir katkı sağlayabilir.

Binalarda Radon Gazı

Radon gazı özellikle granit ve tüf gibi uranyumca zengin kayalarda daha yüksek oranlarda oluşur ve toprağın gözenekliliği, nem içeriği ile mineralojik yapısı, radonun yüzeye taşınmasında belirleyici rol oynar (IAEA, 2015). Radon, genellikle toprak gözeneklerinden ve yüzeye yakın kaya çatlaklarından geçerek atmosfere dağılır. Ancak bir yapının bulunduğu alanlarda, toprak havası çoğu zaman üç temel nedenle binanın temeline doğru yönelir: toprak ile yapı içi arasındaki basınç farkları, temelde bulunan çeşitli açıklıklar ve (varsa) bodrum çevresindeki artmış geçirgenlik. Yer altındaki toprak ve kayalarda oluşan radon, toprağın gözenekleri ve çatlakları boyunca ilerleyerek ya da doğrudan zeminle temas hâlindeki yapı temelleri aracılığıyla binaların iç mekânlarına sızabilmekte olup, bu süreç radonun binalara girişindeki en yaygın mekanizmayı oluşturmaktadır (Nazaroff, 1992). Binaya ulaşacak radon miktarı; bölgedeki ana kayadaki uranyum derişimine, bozulmuş bölgeyi çevreleyen toprağın ve çakıl tabakasının altındaki

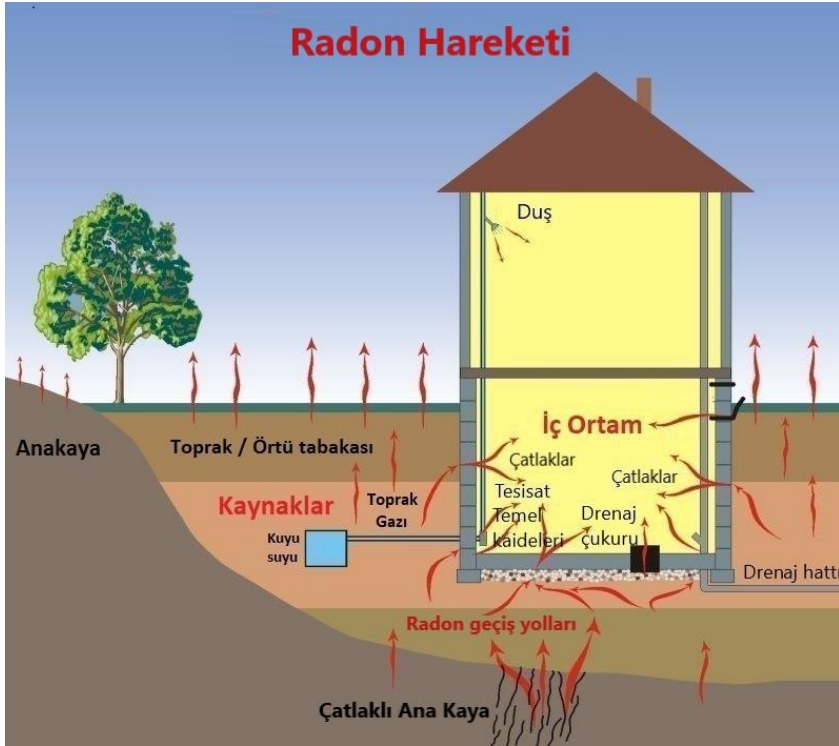
zeminin türü ile geçirgenliğine ve ayrıca toprağın nem içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterir (Nuccetelli et al., 2020). Zemin koşulları, geçirgenlik, gözeneklilik, su doygunluğu, nem içeriği ve toprağın radyoaktif element (örneğin radyum-226) içeriği, radonun topraktan yapıya taşınmasında belirleyici rol oynar; dolayısıyla zeminden gelen radon genellikle iç mekân radonunun en baskın kaynağıdır (Nazaroff, 1992; Nuhu et al., 2021). Radon, bina temellerindeki çatlaklar, döşeme derzleri, duvar–zemin birleşimleri ve servis boru ile kablo geçişleri gibi küçük boşluklardan iç mekâna sızabilir (IAEA, 2015; WHO, 2009). Radon gazının birikimi özellikle bodrum, kiler veya zemin kat gibi toprakla doğrudan temas hâlindeki alanlarda daha yoğun gözlemlenir. Hava akımı ve sızma mekanizmaları sayesinde radon, bu alanlardan yaşam alanlarına ve oturma odalarına da taşınabilir (WHO, 2009). Bu özellikleri nedeniyle radon ölçümleri ve kontrol önlemleri, bina tasarımı ve iyileştirmelerinde önemli bir gerekliliktir.

İç mekânda radon birikimi, bina–zemin basınç farkları, yapı malzemelerinin difüzyon ve emanasyon özellikleri, mevsimsel değişimler ile havalandırma ve kullanım alışkanlıklarının etkileşimiyle belirlenir (Baltrenas et al., 2020; WHO, 2009). Şekil 5’de görüldüğü üzere radon; zemindeki çatlak ve kırıklar, yapısal bağlantı noktaları, duvarlardaki ayrılmalar ve zemin yapısındaki boşluklar gibi çeşitli geçiş yollarını kullanarak binalara sızmakta ve iç ortamlarda birikebilmektedir. Ayrıca, binalarda kullanılan su ve doğalgaz da belirli ölçüde radon taşınmasına katkıda bulunabilmektedir.

Çoğu evde, çevredeki toprak havasının basıncı genellikle ev içindeki hava basıncından daha yüksektir. Bu basınç farkı nedeniyle, hava bozulmuş bölgeden ve çakıl tabakasından temel üzerindeki açıklıklardan iç mekâna doğru akma eğilimindedir. Her evin temelinde; çatlaklar, tesisat borularının giriş noktaları, temel duvarları ile döşeme arasındaki birleşim yerleri, çeşitli boşluklar,

geçirgen yapı malzemeleri ile bodrum ve zemin katlarda üzeri kapatılmamış toprak yüzeyler gibi hava geçişine izin veren açıklıklar bulunur. Radon-222 izotopunun yaklaşık 3,82 günlük yarı ömrü, gazın olduğu yerden yapı içlerine ulaşması ve burada birikmesi için yeterli bir süre sağlar (WHO, 2009) .

Şekil 5 Radonun binalara sızma yolları



Kaynak: (Jose-Luis Guti rrez Villanueva, 2008)

Radonun binalara girişinde temel rolü genellikle zemin kaynaklı geçişler oynasa da yapı içinde kullanılan doğalgaz gibi enerji kaynakları da iç ortam radon konsantrasyonuna ek bir katkı sağlayabilmektedir. Doğalgaz,  retim ve dağıtım süreçlerinde yer kabuğundaki uranyum ve toryum içeren jeolojik birimlerle temas ettiği için düşük miktarda radon içerebilir. Doğalgaz, bazı durumlarda binalarda radon düzeylerine katkıda bulunabilen bir

kaynaktır. Isıtma ve pişirme amaçlı kullanılan doğalgazın bünyesinde bulunan radon, kullanım sırasında ayrılarak iç ortama geçebilmektedir. Yapıya ulaşan radon miktarı ise doğalgazdaki radon derişimine, tüketim miktarına ve gazın üretim noktasından kullanıcıya ulaşmasına kadar geçen süreye bağılı olarak değışmektedir. Bu nedenle, bazı durumlarda doğalgazın yanması sırasında radonun iç ortama sınırlı ölçüde katkıda bulunduğı bildirilmektedir. Ancak uluslararası kuruluşlar, doğalgazın genellikle binalardaki başlıca radon kaynakları arasında yer almadığını, katkısının çoğı ülkede toprak ve yapı zeminindeki geçiş yollarına kıyasla oldukça düşük kaldığını belirtmektedir. Yine de, radon kontrolü ve iç ortam hava kalitesi değıerlendirmelerinde doğalgazın potansiyel bir ikincil kaynak olarak göz önünde bulundurulması önerilmektedir (UNSCEAR, 2000; WHO, 2009).

Binalardaki radon düzeyleri, çevresel ve yapısal pek çok etkene bağılı olarak değışkenlik göstermektedir. Bu düzeyleri belirleyen başlıca unsurlar; bölgenin iklim koşulları, iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık ile basınç farkları ve yapının yerden yüksekliğıdir. Bunun yanı sıra, bina içinde kullanılan doğalgaz ve suyun özellikleri (içerdikleri radon miktarı ve kullanım sıklığı gibi), yapının toprakla temas eden yüzey alanı ve yalıtım durumu da radon birikimini etkileyen önemli faktörler arasındadır. Toprağın ve yapı malzemelerinin nem içeriğı ve radon potansiyeli, binanın havalandırma kapasitesi ve iç hacmi ile birlikte, kullanıcıların günlük yaşam alışkanlıkları da iç mekândaki radon konsantrasyonunun belirlenmesinde rol oynamaktadır (UNSCEAR, 2000; WHO, 2009).

Farklı ülkeler ile uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen ev içi radon konsantrasyonu sınır değıerleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Kapalı ortamlardaki radon düzeylerinin düzenli olarak izlenmesi ve bu sınırların aşılması durumunda gerekli azaltma önlemlerinin uygulanması önemlidir.

Tablo 1: Farklı ülkeler ile uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen ev içi radon aktivite konsantrasyonu sınır değerleri

Ülke/Kurum	Sınır Değer (Bq/m ³)	Ülke/Kurum	Sınır Değer (Bq/m ³)	Ülke/Kurum	Sınır Değer (Bq/m ³)
ABD	150	Hindistan	150	Norveç	200
Almanya	250	İngiltere	200	Rusya	200
Avustralya	200	İrlanda	200	Türkiye	400
Çin	200	İsveç	200	AB Ülkeleri	400
Danimarka	400	Kanada	800	ICRP	400
Fransa	400	Lüksemburg	250	WHO	100

AB: Avrupa Ülkeleri, ICRP: Uluslararası Radyasyon Koruması Komisyonu, WHO: Dünya Sağlık Örgütü

Kaynak: (EPA, 2016; European Commission, 2013; IAEA, 2015; TAEK, 2012; UNSCEAR, 2000; WHO, 2009)'den derlenmiştir

Toprak gazı, bu mekanizmalar aracılığıyla birincil radon kaynağı olarak kabul edilir; ancak bazı durumlarda yapı malzemeleri veya yer altı suları da ek radon katkısı sağlayabilir (IAEA, 2015). Bazı yapı malzemeleri (örneğin granit, tuğla ve beton), düşük düzeylerde uranyum ve radyum içerebildiklerinden radon salınımına katkıda bulunabilmektedir; ancak kapsamlı çalışmalarda, yapı malzemesi kaynaklı katkının çoğu durumda zeminden kaynaklanan radona kıyasla daha sınırlı olduğu bildirilmektedir (Jasaitis & Pečiulienė, 2021; Nuccetelli et al., 2020).

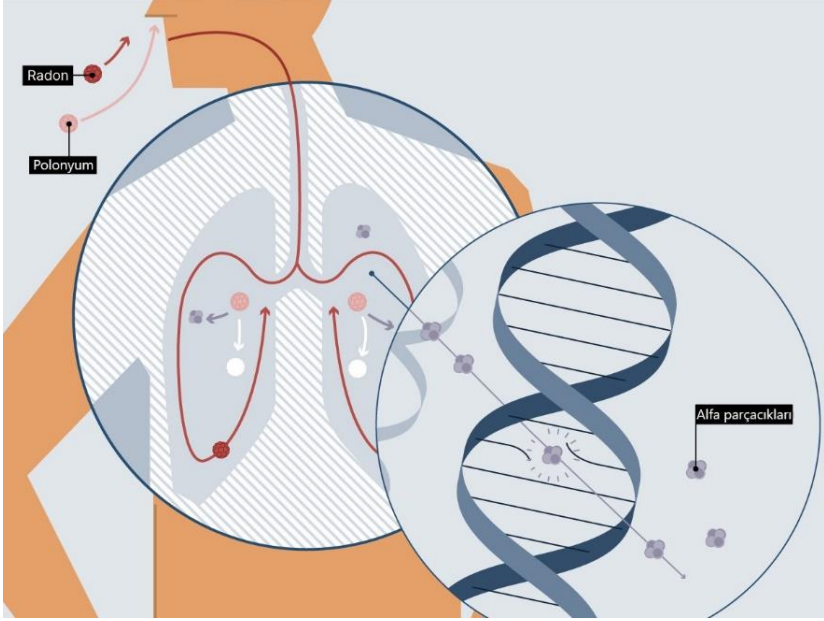
Radon Gazının İnsan Sağlığına Etkileri

Radon bulunduğu gazın kendisi genellikle kısa sürede dışarı atılır; buna karşın radonun bozunmasıyla oluşan küçük radyoaktif parçacıklar solunum yollarında tutulabilir. Radon-222 gazı kimyasal olarak tepkimeye girmeyen bir soygaz olduğundan, dokuya bağlanıp uzun süre kalmaz; akciğere giren radonun çoğu, yarı ömrünü tamamlamadan solunum yoluyla vücut dışına atılır (ICRP, 1993; UNSCEAR, 2000). Oysa radonun bozulmasıyla oluşan

polonyum, bizmut ve kurşun gibi kısa ömürlü izotoplar katı parçacık halinde bulunur; bu parçacıklar havadaki toz ve aerosol damlacıklarına kolayca tutunur ve solunum sırasında akciğer yüzeyine yapışarak içeride kalabilirler. Bu parçacıklar özellikle burun ve üst solunum yollarından geçerken hava yollarının iç yüzeyine yapışabilir ve en çok da bronşların yüzeyini örten hücreleri etkiler. Yerleştikleri bölgelerde kararlı bir yapıya ulaşana kadar bozunmayı sürdürürler ve bu süreçte alfa, beta ve gama ışımaları ortaya çıkar. Akciğer dokusunda en belirgin biyolojik etkiyi, enerjisi yüksek ancak menzili çok kısa olan alfa ışımaları oluşturur. Buna karşılık beta ve gama ışınlarının dokuda birim yol başına bıraktığı enerji ve buna bağlı biyolojik etkileri, alfa ışımalarına kıyasla oldukça düşüktür (ICRP, 1993; National Research Council BEIR VI, 1999).

Bu nedenle radon maruziyetindeki asıl risk, gazın kendisinden ziyade, bu kısa ömürlü radyoaktif parçacıkların solunum yollarına yapışması ve yaydıkları radyasyonun zaman içinde akciğer dokusunda hasara yol açabilmesidir (UNSCEAR, 2000). Akciğerlerin ne kadar radyasyona maruz kaldığını değerlendirebilmek için, solunumla ne kadar radon bozunma ürünü parçacığının içeri girdiğini ve bu parçacıkların vücutta ne kadar süre kaldığını bilmek gerekir. Radonun bu kısa ömürlü bozunma ürünleri, solunum yollarında tutulduktan sonra genellikle 20 dakika ile yaklaşık 5 saat arasında değişen bir biyolojik yarı ömre sahiptir (ICRP, 1993). Bu maddeler akciğer dokusunda bozunmaya devam ettikçe radyasyon yayar ve zaman içinde biriken doz sağlık riski oluşturabilir. Bu nedenle iç radyasyon riski esas olarak gazdan çok bu bozunma ürünlerinin akciğerde bıraktığı radyasyon tarafından belirlenir (National Research Council BEIR VI, 1999; WHO, 2009).

Şekil 6 Radonun akciğerde tutulması ve DNA hasarı



Kaynak: (BFS, 2025)

ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), radon maruziyetinin ülkede sigaradan sonra akciğer kanserinin en önemli ikinci nedeni olduğunu ve her yıl yaklaşık 20.000 ölümün radona bağlı akciğer kanseri ile ilişkili olduğunu bildirmektedir (EPA, 2016; National Research Council BEIR VI, 1999). Bu bulgular, radon ve bozunma ürünlerinin solunum yoluyla alınmasının halk sağlığı açısından ciddiyetini ortaya koymaktadır.

Sigara kullanımı akciğer kanseri riskini belirgin biçimde artırmaktadır. Bireyin hem sigara içmesi hem de yüksek düzeyde radona maruz kalması durumunda, bu iki faktörün birlikte etkisi nedeniyle riskin daha da yükseldiği uluslararası kuruluşların değerlendirmelerinde vurgulanmaktadır (International Agency for Research on Cancer (IARC), 2012; WHO, 2009).

Radon Gazına Karşı Alınabilecek Önlemler:

Yeni Binalarda Radona Karşı Alınabilecek Önlemler

Deprem kuşağında yer alan ve bazı bölgelerinde radon potansiyeli yüksek olan ülkelerde, yeni yapılacak binalarda radon riskinin daha proje aşamasında dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, binanın inşa edileceği alanın jeolojik özellikleri, kayaç türleri ve zemin yapısı belirlenmeli; zemin etütleri radon açısından da değerlendirilmelidir (IAEA, 2015; WHO, 2009).

Yeni binaların toprakla temas eden yüzeyleri, özellikle temel ve bodrum katlar, radon sızıntısını önleyecek şekilde yalıtılmalıdır. Bu kapsamda, temel altında çatlak içermeyen beton şap uygulamaları yapılmalı ve temelden gelebilecek radona karşı bohçalama gibi sürekli ve esnek su-gaz yalıtım sistemleri kullanılmalıdır (EPA, 1999; WHO, 2009).

Yapı malzemelerinin seçiminde radon ve doğal radyoaktivite dikkate alınmalıdır. Radyoaktivite düzeyi önerilen sınırların üzerinde olan malzemelerin bina yapımında kullanımı sınırlandırılmalı; bu amaçla yapı malzemelerinin radyolojik analizleri yapılmalıdır (European Commission, 1999; IAEA, 2015). Yeni binalarda radonun yapı içine girmeden uzaklaştırılmasını sağlayan sistemlerin projelendirme aşamasında planlanması önerilmektedir. Zemin altına yerleştirilen gaz geçirgen çakıl tabakası ve buna bağlı havalandırma boruları sayesinde, radon gazı basınç farkından yararlanılarak yapı içine girmeden atmosfere tahliye edilebilir. Radon düzeyinin yüksek olduğu durumlarda bu sistemler fan eklenerek aktif hale getirilebilir (EPA, 2016).

Mevcut Binalarda Radona Karşı Alınabilecek Önlemler

Mevcut binalarda, özellikle eski yapılar ve zeminle doğrudan temas eden konutlarda, radon konsantrasyonlarının düzenli aralıklarla ölçülmesi gerekmektedir. Ölçüm sonuçlarının ulusal veya

uluslararası sınır değerleri aşması durumunda uygun iyileştirme önlemleri alınmalıdır (IAEA, 2015; WHO, 2009). Binaların duvarlarında, zeminlerinde ve özellikle su ile kanalizasyon borularının geçtiği bölgelerde bulunan çatlaklar ve açıklıklar, radon gazının bina içine sızmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, söz konusu çatlak ve birleşim noktaları onarılmalı ve gerekli durumlarda ek yalıtım uygulanmalıdır (EPA, 2016).

Kapalı ortamlarda radon birikimini azaltmanın en etkili yollarından biri havalandırmadır. Özellikle iyi yalıtılmış, kapı ve pencereleri sızdırmaz olan binalarda havalandırma süresi artırılmalı; doğal havalandırmanın yetersiz kaldığı durumlarda mekanik havalandırma sistemlerinden yararlanılmalıdır (WHO, 2009). Radon düzeyinin yüksek olduğu mevcut binalarda, zemin altından gelen radonun uzaklaştırılması amacıyla radon havalandırma sistemleri uygulanabilir. Bu sistemlerde, zemin altındaki gaz geçirgen tabakaya yerleştirilen borular aracılığıyla radon gazı çatı seviyesinden atmosfere verilir. Gerektiğinde sisteme fan eklenerek daha etkin bir radon giderimi sağlanabilir (EPA, 2016). Ayrıca, emlak alım-satım süreçlerinde radon ölçüm sonuçlarının veya radon sertifikalarının dikkate alınması, uzun vadede toplum sağlığının korunmasına katkı sağlayacaktır (WHO, 2009).

Kaynakça

Axelsson, O. (1995). *Cancer Risks from Exposure to Radon in Homes*. 103(2), 37–43.

Baltrenas, P., Grubliauskas, R., & Danila, V. (2020). Seasonal variation of indoor radon concentration levels in different premises of a university building. *Sustainability (Switzerland)*, 12(15).

BFS. (2025). *BFS-Health effects of radon-How radon affects health*.

Cothorn, C. Richard., & Rebers, P. A. (1990). *Radon, radium, and uranium in drinking water*. CRC Press.

EPA. (1999). *Environmental Protection Agency*.

EPA. (2016). *A Citizen's Guide to Radon The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon Indoor Air Quality (IAQ)*. www.epa.gov/radon

European Commission. (1999). *Radiation Protection 112 Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials European Commission Document*.

European Commission. (2013). *Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom*.

Field, R. W., Steck, D. J., Smith, B. J., Brus, C. P., Fisher, E. L., Neuberger, J. S., Piatz, C. E., Robinson, R. A., Woolson, R. F., & Lynch, C. F. (2000). Residential radon gas exposure and lung cancer the Iowa radon lung cancer study. *American Journal American Journal*, 151(11), 1091–1102.

Gundersen, L. C. S., & Richard, B. W. (1991). *Field Studies of Radon USGS*.

IAEA. (2001). *Generic Models For Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment*.

IAEA. (2015). *Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation*.

ICRP. (1993). The International Commission on Radiological Protection, Protection against radon-222 at home and at work. In *Annals of the ICRP* (Vol. 23, Issue 2).

ICRP, I. C. on R. Protection. (2007). *ICRP Publication 103-The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*.

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2012). *Radiation volume 100 D A review of human carcinogens*.

Jasaitis, D., & Pečiulienė, M. (2021). Natural radioactivity and radon exhalation from building materials in underground parking lots. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16).

Jose-Luis Gutiérrez Villanueva. (2008). *Radon concentrations in air, soil, and water in a granitic area: instrumental development and measurements*.

Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V, Hern, S. C., & Engelmann, W. H. (2001). *The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants*. www.nature.com/jea

Lázár, I., Tóth, E., Marx, G., Cziegler, I., & Köteles, G. J. (2003). Effects of residential radon on cancer incidence. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 258(3), 519–524.

National Research Council BEIR VI. (1999). *Health Effects of Exposure to Radon*. National Academy Press.

Nazaroff, W. W. (1992). Radon transport from soil to air. *Reviews of Geophysics*, 30(2), 137–160.

National Council on Radiation Protection and Measurements. (1984). *Evaluation of occupational and environmental exposures to radon and radon daughters in the United States* (NCRP Report No. 78). NCRP

Lawrence Berkeley National Laboratory. (1987). *Radon and its Decay Products in Indoor Air: an Overview*.

Nuccetelli, C., Leonardi, F., & Trevisi, R. (2020). Building material radon emanation and exhalation rate: Need of a shared measurement protocol from the european database analysis. *Journal of Environmental Radioactivity*, 225.

Nuhu, H., Hashim, S., Saleh, M. A., Sanusi, M. S. M., Alomari, A. H., Jamal, M. H., Abdullah, R. A., & Hassan, S. A. (2021). Soil gas radon and soil permeability assessment: Mapping radon risk areas in Perak State, Malaysia. *PLoS ONE*, 16(7 July).

Otton, J. K. (1992). *The Geology of Radon*.

TAEK. (2012). *Kapalı Ortamlarda Radon ve Yapı Malzemelerindeki Radyoaktiviteye İlişkin Kılavuz*.

Tanner, A. (1980). Radon Migration in the Ground: A Supplementary Review. *National Radiation Environment III*, 1, 5–56.

The U.S. Department of Energy. (1983). *A Comparative Evaluation of Radon Measurement Techniques for Uranium Exploration*.

UNSCEAR. (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes Volume I: Sources United Nations*.

UNSCEAR. (2008). *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, General Assembly Official Records Sixty-third Session Supplement No. 46*.

UNSCEAR. (2011). *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2010: fifty-seventh session, includes scientific report, Summary of low-dose radiation effects on health*. United Nations.

UNSCEAR. (2017). *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation Annex B Epidemiological Studies of Cancer Risk Due to Low-Dose-Rate Radiation from Environmental Sources Contents*.

Whicker, F. W., Eisenbud, M., & Gesell, T. (1997). Environmental Radioactivity from Natural, Industrial, and Military Sources. In *Radiation Research* (Vol. 148, Issue 4).

WHO. (2009). *The World Health Organization, Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective*. World Health Organization.

MOLEKÜLER MODELLEME VE HESAPLAMALI KİMYA YAZILIMLARI BÖLÜMÜ GAUSSIAN, SPARTAN VE HYPERCHEM

**ERCAN TÜRKKAN¹
HALİL UĞUR TAŞDEMİR²**

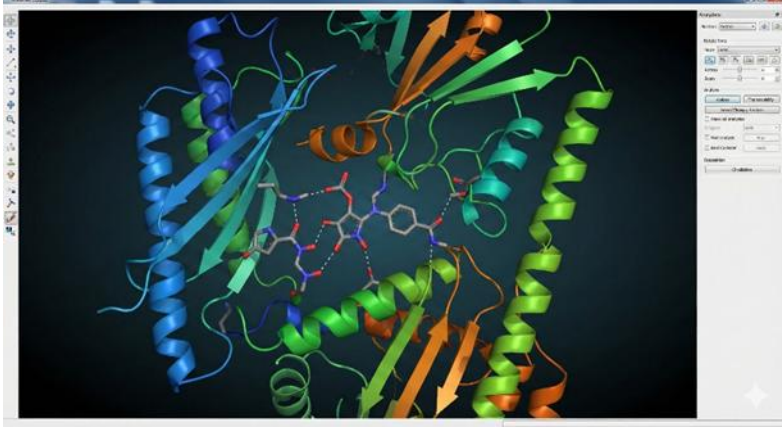
Giriş

Bilimsel araştırmaların evrimi, son yarım yüzyılda "in vivo" (canlı içinde) ve "in vitro" (cam içinde/laboratuvar ortamında) deneylerin yanına, güçlü bir üçüncü ayak olarak "in silico" (bilgisayar ortamında/silikon çipte) çalışmalarını eklemiştir. Moleküler modelleme, karmaşık kimyasal sistemlerin davranışlarını atomik düzeyde anlamak, deneysel olarak gözlemlenmesi zor olan geçiş hallerini aydınlatmak ve yeni ilaç moleküllerini tasarlamak için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Bu süreçte, teorik kimyanın karmaşık matematiksel denklemlerini araştırmacılar için çözülebilir ve görselleştirilebilir hale getiren paket programların rolü büyüktür.

¹ Prof.Dr. Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi, Fizik Eğitimi Bölümü, Orcid: 0000-0003-4365-5544

² Dr.Öğr. Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi, Fizik Eğitimi Bölümü, Orcid: 0000-0002-6205-0092

Şekil 1 Hesaplamalı kimya yöntemleri kullanılarak karmaşık bir moleküler yapının üç boyutlu uzayda modellenmesi ve analizi ile



Günümüzde hesaplamalı kimya, sadece teorik kimyacıların değil; biyologların, eczacıların ve malzeme mühendislerinin de rutin olarak başvurduğu bir disiplindir. Bu disiplinin temel amacı, Schrödinger denkleminin veya Newton mekaniğinin prensiplerini kullanarak moleküllerin enerjilerini, geometrilerini ve spektroskopik özelliklerini tahmin etmektir (Cramer, 2004). Ancak bu hesaplamaların manuel olarak yapılması imkânsız olduğundan, araştırmacılar gelişmiş yazılımlara ihtiyaç duyarlar. Bu kitap bölümünde, literatürde en sık karşılaşılan ve hem akademik hem de endüstriyel alanda yaygın kullanıma sahip olan üç temel yazılım paketi; Gaussian, Spartan ve HyperChem incelenecektir.

Bu çalışmanın temel amacı, bu yazılımların teknik detaylarında boğulmadan; hangi amaçla kullanıldıklarını, temel yeteneklerini ve kullanıcı arayüzü özelliklerini karşılaştırmalı bir perspektifle sunmaktır. Okuyucular, bu bölümü tamamladıklarında, kendi araştırma problemlerine en uygun yazılımın hangisi olduğuna dair net bir fikre sahip olacaklardır.

2. HESAPLAMALI KİMYA YAZILIMLARININ TEMEL PRENSİPLERİ

Herhangi bir moleküler modelleme yazılımını anlamak için, bu yazılımların arka planda çalıştırdığı teorik motorları kısaca tanımak gerekir. İncelenecek olan Gaussian, Spartan ve HyperChem yazılımlarının tamamı, temelde üç ana hesaplama yöntemini kullanır: Moleküler Mekanik (MM), Yarı-Deneysel (Semi-Empirical) Yöntemler ve Ab Initio (İlk İlkelere Dayalı) Yöntemler.

Moleküler mekanik, atomları toplar ve bağları yaylar olarak kabul eden klasik fizik yasalarına dayanır. Bu yöntem oldukça hızlıdır ve büyük biyomoleküller (proteinler, DNA) için idealdir. Ancak elektronların hareketini dikkate almadığı için kimyasal reaksiyonları (bağ kırılması/oluşumu) modelleyemez. Buna karşın, Ab Initio yöntemler ve Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT), kuantum mekaniğini temel alır ve elektron dağılımlarını hesaplar (Jensen, 2017). Bu yöntemler yüksek doğruluk sağlar ancak hesaplama maliyeti çok yüksektir. İncelenecek yazılımlar, bu yöntemlerin tamamını veya bir kısmını kullanıcının hizmetine sunarak esnek bir çalışma ortamı yaratırlar (Leach, 2001).

3. GAUSSIAN PAKET PROGRAMI

Gaussian, hesaplamalı kimya dünyasında özellikle elektronik yapı teorisi (ab-initio MO ve DFT) hesaplamaları söz konusu olduğunda bir endüstri standardı olarak kabul edilir. İlk olarak 1970 yılında, daha sonra Nobel Kimya Ödülü'nü alacak olan John Pople ve grubu tarafından geliştirilmeye başlanan bu yazılım, günümüzde Gaussian 16 gibi versiyonlarla gelişimini sürdürmektedir (M. J. Frisch G. et al., 2004)

3.1. Temel Özellikler ve Kullanım Alanları

Gaussian, adını moleküler orbitalleri tanımlamak için kullanılan "Gaussian tipi orbitallerden" (GTO) alır. Yazılımın en güçlü yanı, kuantum mekaniksel yöntemlerdeki çeşitliliği ve hassasiyetidir. Hartree-Fock (HF), Møller-Plesset pertürbasyon teorisi (MP2, MP4), Coupled Cluster (CC) ve özellikle Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) hesaplamalarında literatürdeki en güvenilir sonuçları veren programlardan biridir.

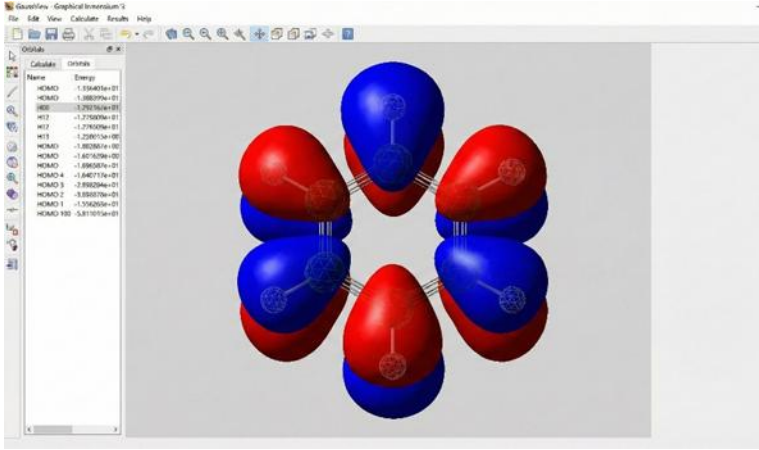
Yazılımın temel yetenekleri şunlardır:

- I. Moleküler geometrilerin optimizasyonu ve kararlı moleküler yapıların bulunması.
- II. Geçiş hali (Transition State) yapılarının tespiti ve reaksiyon mekanizmalarının belirlenmesi.
- III. IR, Raman, NMR, EPR(ESR) ve UV-Vis spektrumlarının teorik olarak hesaplanması.
- IV. Termokimyasal verilerin (öz ısı, entalpi, serbest enerji vb.) hesaplanması.

3.2. Arayüz ve Kullanıcı Deneyimi

Gaussian, özünde bir "hesaplama motorudur". Bu, programın aslında komut satırı üzerinden veya metin tabanlı girdi dosyalarıyla çalıştığı anlamına gelir. Ancak, kullanıcıların molekülleri görsel olarak çizmesini ve sonuçları analiz etmesini sağlayan "GaussView" isimli bir grafik arayüz (GUI) ile birlikte kullanılır.

Şekil 2 Gaussian hesaplama paket programının grafik arayüzü olan GaussView'dan bir ekran görüntüsü. Şekilde, Gaussian ile hesaplanmış bir molekülün sınır moleküler orbitallerinin (Frontier Molecular Orbitals) görselleştirilmesi gösterilmektedir



GaussView, kullanıcının molekülü üç boyutlu uzayda inşa etmesine, hesaplama parametrelerini (temel set, yöntem, çözücü ortamı vb.) menülerden seçmesine olanak tanır. Hesaplama bittiğinde ise, moleküler orbitalleri, elektrostatik potansiyel haritalarını ve titreşim hareketlerini görselleştirmek için yine bu arayüz kullanılır. Gaussian'ın en büyük avantajı literatürdeki yaygınlığıdır; bir araştırmacı makalesinde "B3LYP/6-31G(d) seviyesinde Gaussian ile hesaplanmıştır" ibaresini kullandığında, bu sonuç bilimsel camiada genel geçer bir kabul görür.

4. SPARTAN YAZILIMI

Wavefunction Inc. tarafından geliştirilen Spartan, özellikle kullanım kolaylığı ve gelişmiş grafik arayüzü ile tanınan bir moleküler modelleme yazılımıdır. Eğer Gaussian "safkan bir araştırma motoru" ise, Spartan hem araştırmada hem de eğitimde

kullanılabilen "kullanıcı dostu bir platform" olarak nitelendirilebilir (Hehre, 2003).

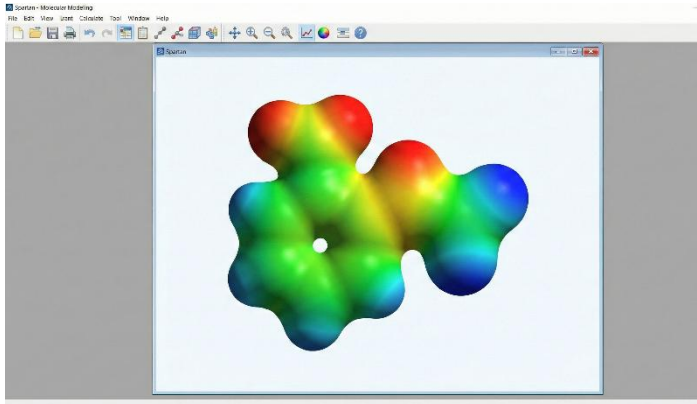
4.1. Kullanıcı Dostu Yaklaşım ve Eğitimdeki Yeri

Spartan'ın en belirgin özelliği, karmaşık kuantum kimyası terminolojisini basitleştiren arayüzüdür. Program, kullanıcının karmaşık anahtar kelimeler ezberlemesine gerek kalmadan, sadece menüleri kullanarak ileri düzey hesaplamalar yapmasına olanak tanır. Bu özelliği, onu lisans ve lisansüstü eğitimde hesaplamalı kimyayı öğretmek için mükemmel bir araç haline getirir.

4.2. Veritabanı Entegrasyonu ve Görselleştirme

Spartan, kendi bünyesinde binlerce molekülün önceden hesaplanmış verilerini barındıran geniş bir veritabanına (Spartan Spectra and Properties Database - SSPD) sahiptir. Bir kullanıcı yaygın bir molekülü çizdiğinde, program sıfırdan hesaplama yapmak yerine veritabanındaki yüksek doğruluklu sonuçları saniyeler içinde sunabilir.

Şekil 3 Spartan yazılımının/paket programının kullanıcı dostu arayüzünde oluşturulmuş bir Elektrostatik Potansiyel Haritası (ESP). Kırmızı bölgeler elektronca zengin (negatif potansiyel), mavi bölgeler ise elektronca fakir (pozitif potansiyel) alanları temsil ederek moleküler reaktivite hakkında bilgi verir



Ayrıca Spartan, moleküler orbitallerin, elektron yoğunluk yüzeylerinin ve yerel iyonlaşma potansiyeli haritalarının görselleştirilmesinde oldukça başarılıdır. İlaç tasarımı için kullanılan QSAR (Kantitatif Yapı-Etkinlik İlişkisi) analizleri için gerekli olan moleküler tanımlayıcıları (descriptors) otomatik olarak türetebilir.

5. HYPERCHEM YAZILIMI

HyperChem, Hypercube Inc. tarafından geliştirilen ve özellikle Windows ortamında moleküler modelleme için esnek çözümler sunan bir diğer önemli yazılımdır. HyperChem'i diğerlerinden ayıran en önemli özellik, sunduğu yöntem çeşitliliği ve etkileşimli yapısıdır.

5.1. Çok Yönlülük ve Moleküler Dinamik

HyperChem, hem basit moleküler mekanik (MM+, AMBER, OPLS) yöntemlerini hem de gelişmiş kuantum mekaniksel yöntemleri (Semi-empirical, Ab Initio, DFT) tek bir çatı altında sunar. Bu çeşitlilik, kullanıcının çalışacağı sisteme göre (örneğin bir protein için MM, küçük bir ilaç molekülü için DFT) yöntem değiştirmesine olanak tanır (Froimowitz, 1993).

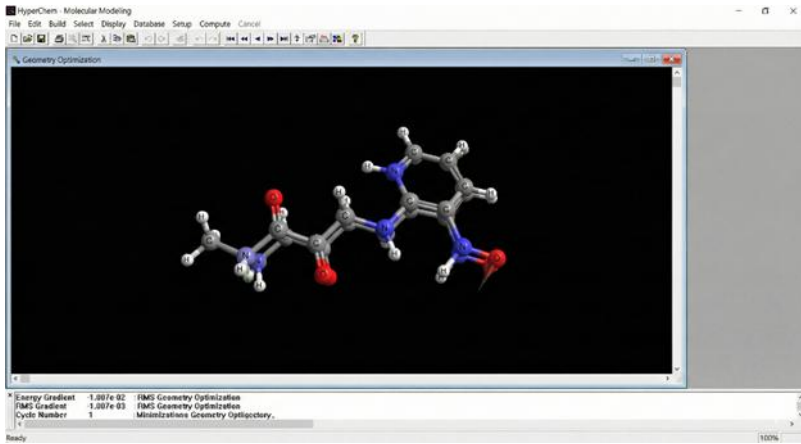
Yazılımın bir diğer güçlü yönü "Moleküler Dinamik" (MD) simülasyonlarına olanak tanınmasıdır. Kullanıcılar, bir molekülün belirli bir sıcaklıkta ve zaman aralığındaki hareketlerini simüle edebilir, molekülün ısıtıldığında nasıl davrandığını veya bir proteinin katlanma sürecini izleyebilirler.

5.2. Etkileşimli Optimizasyon

HyperChem, hesaplama yapılırken molekülü ekranda manipüle etme imkânı sunar. "Model Build" aşamasında, kullanıcı bir molekülü optimize ederken (enerjisini minimize ederken), farenin imleci ile bir atomu tutup çekiştirebilir ve molekülün bu dış etkiye karşı nasıl tepki vererek tekrar kararlı hale geldiğini gerçek zamanlı olarak

izleyebilir. Bu özellik, moleküller arası etkileşimleri ve sterik engelleri anlamak için eşsiz bir görsel deneyim sunar.

Şekil 4 HyperChem arayüzünde gerçekleştirilen bir enerji minimizasyonu (geometri optimizasyonu) işlemi. Program, molekülün sterik enerjisini en aza indirecek en kararlı konformasyonu yinelemeli hesaplamalarla bulur ve bu süreci ekranda anlık olarak gösterir



6. SONUÇ

Moleküler modelleme, modern kimyanın teorik altyapısını görsel ve sayısal bir zemine oturtan güçlü bir alandır. Bu bölümde incelenen üç yazılım paketi de, araştırmacıların farklı ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde tasarlanmıştır.

Gaussian, özellikle elektronik yapı hesaplamaları, reaksiyon mekanizmaları ve spektroskopik verilerin doğrulanması konularında, literatürün en çok atıf alan ve en güvenilir bulunan yazılımıdır. Yüksek hassasiyet gerektiren akademik çalışmalarda ilk tercihtir. Spartan ise, sağladığı üstün grafik arayüzü ve kullanım kolaylığı ile hem kimya eğitiminde hem de hızlı tarama (screening) gerektiren endüstriyel Ar-Ge çalışmalarında öne çıkmaktadır.

Karmaşık teorik altyapıyı kullanıcıdan soyutlayarak sonuca odaklanmayı sağlar. HyperChem, moleküler mekanikten kuantum mekaniğine uzanan geniş yelpazesi ve moleküler dinamik yetenekleri ile çok yönlü bir araçtır. Özellikle biyolojik makromoleküllerin modellenmesi ve eğitim amaçlı simülasyonlarda etkin bir şekilde kullanılabilir.

Sonuç olarak, hangi yazılımın kullanılacağı araştırmanın niteliğine, incelenen sistemin büyüklüğüne ve kullanıcının teorik kimya deneyimine bağlıdır. Ancak bu araçların sağladığı "in silico" veriler, deneysel verilerle birleştirildiğinde bilimin ilerlemesine paha biçilemez katkılar sunmaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

- Cramer, C. J. (2004). *Essentials of computational chemistry : theories and models* (2nd ed). Chichester, West Sussex, England: Wiley.
- Froimowitz, M. (1993). HyperChem: a software package for computational chemistry and molecular modeling. *BioTechniques*, 14 6, 1010–1013. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:34721993>
- Hehre, W. J. . (2003). *A guide to molecular mechanics and quantum chemical calculations*. Wavefunction.
- Jensen, F. (2017). *Introduction to Computational Chemistry*. England: Wiley.
- Leach, A. R. (2001). *Molecular Modelling: Principles and Applications*. Prentice Hall.
- M. J. Frisch G., W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, M. A. Robb, J. R. Cheeseman, ... J. A. Pople. (2004). Gaussian 03. Wallingford CT: Gaussian, Inc.

BÖLÜM 4

MİKROÇİP ÜRETİMLERİNDE 2D MALZEMELERİN ENTEGRASYONU

MERVE EREN YAKIŞIKLIER¹

Giriş

Yarı iletken teknolojilerindeki hızlı gelişim, modern elektronik endüstrisinin hem ekonomik hem de teknolojik açıdan en stratejik alanlarından biri hâline gelmiştir. Mikroçipler; bilgisayarlardan sensörlere, mobil cihazlardan savunma sistemlerine kadar uzanan geniş bir uygulama alanında dijital toplumun temel bileşenini oluşturmaktadır. Ancak silikon temelli geleneksel yarı iletken mimarilerin fiziksel sınırlarına yaklaşılması, özellikle 5 nm, 3 nm ve altı üretim düğümlerinde taşıyıcı hareketliliği, ısıl yönetim ve ölçeklenebilirlik açısından önemli performans kısıtları yaratmaktadır (IRDS, 2023; ITRS, 2015). Bu nedenle endüstri, silikonun ötesine geçebilecek yeni nesil malzemelere yönelmiş ve son on beş yılda iki boyutlu (2D) malzemeler bu bağlamda güçlü adaylar olarak konumlanmıştır. Grafen, geçiş metali dikalkojenitleri (TMDs), hekzagonal bor nitrür (h-BN) ve siyah fosfor gibi atomik incelikte yapılar; yüksek taşıyıcı hareketliliği, düşük yüzey pürüzlülüğü ve ayarlanabilir bant aralığı gibi özellikleri sayesinde geleneksel yarı iletkenlere önemli avantajlar sunmaktadır (Novoselov et al., 2004; Wang et al., 2012). Örneğin grafen oda sıcaklığında $200.000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 'nin üzerinde elektron hareketliliğine

ulaşabilirken (Schwierz, 2010), MoS₂ ve WS₂ gibi TMD malzemeleri doğrudan bant aralığı sunarak FET mimarilerinde daha kontrollü kapı modülasyonu sağlamaktadır (Radisavljevic et al., 2011). Bu üstünlükler, 2D malzemeleri hem yüksek performanslı transistörler hem de düşük güç tüketimli, esnek ve yüksek yoğunluklu elektronik sistemler için ideal hâle getirmektedir.

Ayrıca 2D malzemelerin mikroçip mimarisine entegrasyonu yalnızca elektronik performansı artırmakla kalmamakta; enerji verimli üretim süreçleri, entegre sensör platformları ve yeni cihaz mimarileri geliştirme olanağı da sunmaktadır. Özellikle yapay zekâ hızlandırıcılar, IoT cihazları, radyasyon ve biyosensör entegreli çipler gibi alanlarda 2D malzemelerin düşük güç, yüksek hassasiyet ve hızlı anahtarlama davranışları dikkat çekmektedir (Akinwande et al., 2019; Cheng et al., 2023). Intel, Samsung ve TSMC'nin wafer ölçeğinde 2D malzeme büyütme, düşük temas direnci geliştirme ve CMOS uyumlu entegrasyon üzerine yoğun yatırımlar yapması, bu teknolojinin endüstriyel uygulanabilirliğini giderek güçlendirmektedir (Samsung Advanced Foundry Forum, 2022; Intel 2D Materials Research Program, 2023).¹

Bununla birlikte, büyük alanlı kusursuz film sentezi, temas direncinin azaltılması, arayüz mühendisliği, wafer-scale bütünlük ve yüksek sıcaklıklı üretim süreçleriyle uyumluluk gibi konular hâlen çözülmesi gereken temel teknik zorluklar arasında yer almaktadır.

(Chhowalla et al., 2016; Duan et al., 2022). Bu nedenle 2D malzemelerin mikroçip endüstrisindeki konumu, hızlı ilerleme

¹ Dr. Öğr. Üyesi., Yozgat Bozok Üniversitesi, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Orcid: 0000-0002-6920-359X

gösteren ancak olgunlaşma süreci devam eden yüksek potansiyelli bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Bu bölümde, 2D malzemelerin mikroçip üretimindeki entegrasyonuna yönelik bilimsel ilkeler, üretim yöntemleri, endüstriyel uygulamalar ve karşılaşılan zorluklar literatür ve güncel yol haritaları ışığında kapsamlı şekilde ele alınmaktadır.

2D MALZEMELERİN ORTAYA ÇIKIŞI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ

2D Malzemelerin Ortaya Çıkışı

İki boyutlu malzemelerin ortaya çıkışı, yarı iletken teknolojisinin gelişim çizgisinde kritik bir dönüm noktasını temsil eder. Mikroelektronik endüstrisi onlarca yıl boyunca silikon temelli mimariler üzerine inşa edilmiş olsa da, 32 nm, 14 nm ve 7 nm gibi üretim düğümlerinden 5 nm ve daha küçük geometrilere geçişle birlikte silikonun fiziksel sınırları görünür hâle gelmiştir. Kanal uzunluğunun küçülmesi, kapı kontrolünün zayıflaması, sızıntı akımlarının artması ve kuantum tünelleme gibi sorunlar, silikon tabanlı transistörlerde ölçeklenmenin giderek zorlaştığını göstermektedir (IRDS, 2023; Lundstrom, 2003). Bu nedenle araştırmacılar, silikonun sağlayamadığı elektrostatik kontrolü sunabilecek atomik düzeyde ince ve elektronik açıdan kararlı yeni malzemelere yönelmiştir.

Grafenin 2004 yılında Novoselov ve Geim tarafından izole edilmesiyle birlikte, tek atom kalınlığındaki kristal yapıların yalnızca laboratuvar merakı değil, elektronik için gerçek bir potansiyel taşıdığı anlaşılmıştır (Novoselov et al., 2004). Grafenin yüksek hareketliliği ve atomik inceliği, kısa kanal transistörlerde kapı kontrolünü dramatik biçimde iyileştirebileceğini ortaya koymuştur (Schwierz, 2010). Aynı dönemde MoS₂, WS₂ ve h-BN gibi tabakalı malzemelerin doğal olarak iki boyutlu kristal yapılar oluşturduğu fark edilmiş; bant aralığı, mekanik dayanım, kimyasal

kararlılık ve yüzey pürüzsüzlüğü gibi özelliklerinin elektronik uygulamalar için kritik avantajlar sunduğu görülmüştür (Wang et al., 2012; Akinwande et al., 2019). Böylece 2D malzemelerin gelişimi, hem malzeme bilimi hem de yarı iletken endüstrisinin ölçeklenme krizine verdiği stratejik bir yanıt olarak hız kazanmıştır.

2D Malzemelerin Sınıfları

İki boyutlu malzemeler, kimyasal kompozisyonları, kristal yapıları ve elektronik özellikleri bakımından geniş bir çeşitlilik sunar.

Grafen, karbon atomlarının sp^2 hibritleşmesiyle oluşan altıgen bir ağ yapısına sahiptir ve tek atom kalınlığındaki bu yapı olağanüstü elektron hareketliliği ile bilinir (Schwierz, 2010). Bu özellik, grafen yüksek frekanslı elektronikler ve düşük direnç gerektiren uygulamalarda son derece avantajlı kılar. Ancak grafenin bant aralığına sahip olmaması, dijital transistörlerde tek başına kullanılmasını engeller.

Bu boşluk geçiş metali dikalkojenitleri (TMD'ler) tarafından doldurulmaktadır. MoS_2 , WS_2 , $MoSe_2$ ve WSe_2 gibi TMD malzemeleri, tek katman hâline getirildiklerinde doğrudan bant aralığına sahip olabilir ve güçlü bir kapı kontrolü sunarlar (Radisavljevic et al., 2011). Bu özellikler, onları özellikle düşük sızıntı akımı gerektiren gelecek nesil FET tasarımları için uygun hâle getirir.

Bir diğer önemli 2D malzeme olan hekzagonal bor nitrür (**h-BN**), geniş bant aralığına ve mükemmel yalıtkan özelliklere sahiptir. Atomik düzlemselliği ve kimyasal kararlılığı sayesinde h-BN, 2D malzemeler için ideal bir dielektrik ara tabaka görevi görür (Dean et al., 2010).

Siyah fosfor (BP) ise yönlü bant yapısı ve ayarlanabilir bant aralığıyla hem optoelektronik hem de yüksek hareketlilik gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Tek katman hâline getirildiğinde

bant aralığı genişler, çok katmanlı hâlde daralır; bu ayarlanabilirlik BP'yi çok amaçlı bir 2D yarı iletken yapar (Li et al., 2014).

Bu geniş malzeme çeşitliliği, 2D malzemeleri yalnızca silikonun yerine geçebilecek potansiyel kanal malzemeleri değil, aynı zamanda çok katmanlı heteroyapıların tasarlanabildiği bir platform hâline getirmiştir (Geim & Grigorieva, 2013).

2D Malzemelerin Elektronik ve Fiziksel Özellikleri

2D malzemelerin en karakteristik özelliği, tek atom ya da birkaç atom kalınlığında olmalarıdır. Bu atomik incelik, malzemelerin yüzey–hacim oranını maksimum düzeye çıkarır ve elektriksel özelliklerin büyük ölçüde yüzey koşulları tarafından belirlenmesine yol açar. Yüzey hassasiyetinin bu derece yüksek olması, özellikle sensör ve transistör gibi yüzeye duyarlı cihazlarda performans artışını mümkün kılmaktadır (Schedin et al., 2007). Örneğin grafenin olağanüstü yüksek elektron hareketliliği, atomik düzlemselliği sayesinde minimum saçılma mekanizmalarının görülmesi ile doğrudan ilişkilidir (Schwierz, 2010). Buna karşın MoS₂ gibi yarı iletken TMD malzemeleri daha düşük taşıyıcı hareketliliğine sahip olsa da, güçlü elektrostatik kapılama davranışı sayesinde düşük güçlü dijital elektronikler için ideal bir kanal malzemesi olarak öne çıkar (Radisavljevic et al., 2011).

Termal ve mekanik özellikler açısından değerlendirildiğinde, 2D malzemeler dikkat çekici bir dayanım ve performans aralığı sunar. Grafen, bilinen en yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerden biridir ve 3000 W/m·K seviyesine ulaşabilen bu özelliği, onu ısı yönetim uygulamalarında benzersiz kılar (Balandin et al., 2008). h-BN, yüksek kimyasal kararlılığı ve geniş bant aralığı sayesinde yüksek sıcaklık uygulamalarına dayanabilen ideal bir dielektrik malzemedir (Dean et al., 2010). Siyah fosforun (BP) yönlü kristal yapısı, hem esnek hem de yüksek mobiliteli uygulamalara olanak

tanır; bant aralığının katman sayısına göre değişebilmesi, optoelektronik tasarımda önemli bir avantaj sunar (Li et al., 2014). Ayrıca 2D malzemelerin çoğu atomik düzlemsellik gösterdiği için litografi, ince film biriktirme ve temas mühendisliğinde pürüzlülük kaynaklı hataları önemli ölçüde azaltır (Akinwande et al., 2019). Bu elektronik, mekanik ve termal özelliklerin tamamı, modern mikroçip teknolojilerinin gerektirdiği yüksek doğruluk, düşük kayıp ve yüksek verimli mimariler için kritik öneme sahiptir.

2D Malzemelerin Üretim Teknikleri

2D malzemelerin üretimi, atomik düzeyde düzgünlük, düşük defekt yoğunluğu ve geniş alanlı uniformite gerektirdiğinden hem malzeme bilimi hem de yarı iletken üretim mühendisliğinin kesiştiği özel bir uzmanlık alanıdır. En yüksek kristal kalitesi, grafenin ilk keşfinde de kullanılan mekanik eksfoliasyon yöntemiyle elde edilse de, bu yöntem büyük ölçekli üretim için uygun değildir (Novoselov et al., 2004).

Endüstride en yaygın kullanılan yöntem kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniğidir. Grafen üretiminde bakır yüzeyler üzerinde yüksek sıcaklıklı metan ayrışımı yaygın bir yöntemdir (Li et al., 2009). MoS₂ gibi TMD malzemelerin üretiminde ise metal oksitlerin kükürtlenmesine dayalı katı kaynaklı CVD veya metal-organik gaz fazı öncüllerinin kullanıldığı MOCVD teknikleri tercih edilmektedir (Dumcenco et al., 2015).

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) teknikleri, özellikle metal tohum tabakaları ve ara tabakaların oluşturulmasında önemli rol oynar. Atomik tabaka biriktirme (ALD) ise gate dielektriği gibi ultra ince ve atomik hassasiyet gerektiren ara tabakaların biriktirilmesinde kritik önemdedir. 2D malzemelerin yüzeyine zarar vermeden yüksek-k dielektrik filmlerinin büyütülebilmesi, ALD'yi CMOS

entegrasyonu için merkezi bir yöntem hâline getirmiştir (Kim et al., 2012).

Moleküler ışın epitaksisi (MBE), yüksek kristal doğruluğu gerektiren heteroyapı ve kuantum yapılar için kullanılan bir başka yöntemdir. Ancak hem maliyet hem de süreç karmaşıklığı nedeniyle endüstriyel ölçekte sınırlı uygulanmaktadır (Ugeda et al., 2014).

Son yıllarda 2D malzemelerin mikroçip teknolojisine entegrasyonu için en kritik gelişme, wafer üzerinde doğrudan büyütme (wafer-scale growth) teknikleridir. Bu yöntemler, 2D malzemelerin doğrudan silikon, safir veya oksit yüzeylerde sentezlenmesini mümkün kılmakta; böylece transfer adımlarından kaynaklanan kırışıklık, yırtılma ve kontaminasyon gibi problemleri ortadan kaldırmaktadır. Samsung, Intel ve TSMC'nin bu alanda yoğun Ar-Ge yatırımları yaptığı bilinmektedir (Cheng et al., 2023; Samsung Foundry, 2022). Bu gelişmeler, 2D malzemelerin CMOS uyumlu üretimin bir parçası hâline gelmesinin yolunu açmıştır.

Geleneksel Mikroçip Üretim Süreçleri ve Sınırları

Mikroçip Üretim Süreçlerinin Temelleri

Geleneksel mikroçip üretimi, bir yarı iletken wafer üzerinde birbirini izleyen çok sayıda ince film biriktirme, yüzey işleme, desen oluşturma ve metal bağlantı adımlarından oluşan karmaşık bir üretim hattına dayanır. Bu süreçlerin en kritik bileşeni fotolitografidir. Işığa duyarlı fotoresist kaplanan wafer, maske aracılığıyla seçilen bölgelerin ışığa maruz bırakılmasıyla desenlenir; pozlama ve geliştirme aşamalarından sonra ortaya çıkan mikro/nano ölçekli desenler, kimyasal veya plazma temelli etching süreçleriyle doğrudan yarı iletkene işlenir (Mack, 2007; Thompson et al., 2012). Kullanılan aşındırma yöntemlerindeki seçicilik, izotropik/anisotropik davranış, iyon enerjisi ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler cihaz performansını doğrudan etkileyen kritik unsurlardır.

Mikroçiplerde kullanılan dielektrik, iletken ve yarı iletken katmanlar PVD, CVD ve ALD gibi biriktirme teknikleriyle oluşturulur. PVD özellikle metal hatların ve difüzyon bariyerlerinin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılırken, CVD geniş alanlı ve homojen ince film üretimi için uygundur (Ohring, 2001). ALD ise atomik hassasiyette kontrollü büyüme sağlaması nedeniyle modern CMOS transistörlerin gate dielektriği, yüksek-k ara tabakaları ve metal oksit temelli yapı taşları için vazgeçilmez hâle gelmiştir (George, 2010). Tüm bu süreçlerin nanometre ölçekli bir üretim mimarisinde bütünleşik şekilde uygulanması, milyonlarca transistörden oluşan bir yonganın çalışabilir hâle gelmesini mümkün kılmakta ve mikroçip üretim teknolojisinin karmaşıklığını gözler önüne sermektedir.

CMOS Teknolojisinin Fiziksel Sınırları

CMOS teknolojisinin birkaç on yıl boyunca Moore Yasası doğrultusunda ölçeklenebilmiş olmasına rağmen, 5 nm ve 3 nm gibi alt düzeylerde silikonun fiziksel sınırları belirginleşmiştir. Kanal uzunluğunun azalmasıyla short-channel effects ortaya çıkar; kapı kontrolünün zayıflaması, drain-induced barrier lowering (DIBL), artan sızıntı akımları ve threshold gerilimindeki kaymalar transistör kararlılığını ciddi şekilde sınırlar (Lundstrom, 2003; Taur & Ning, 2013). Bu fiziksel problemler yalnızca cihaz ölçeğinde değil, bütünleşik devre seviyesinde de güç tüketimini artırarak performans kararsızlığına yol açar.

Ayrıca SiO₂ gate dielektriğinin yaklaşık 1 nm'nin altına indirilememesi, kuantum tünellemesi nedeniyle kaçınılmaz bir fiziksel engel oluşturur. Bu durum, sektörün yüksek-k dielektrik malzemelere geçişini zorunlu kılmıştır (Robertson, 2006). Ancak yüksek-k/Si arayüzünde oluşan yüksek trap yoğunluğu, taşıyıcı hareketliliğini düşürerek yeni zorluklar ortaya çıkarmaktadır.

Ölçeklenme, yalnızca transistör kanalını değil, metal ara bağlantıları da kritik biçimde etkilemektedir. Hat genişliklerinin küçülmesiyle

birlikte RC gecikmesi artar ve bu durum işlemci hızını sınırlayan temel darboğazlardan biri hâline gelir (International Technology Roadmap for Semiconductors [ITRS], 2015). Aynı zamanda yoğun entegrasyon nedeniyle ısı yoğunluk yükselir; yüksek sıcaklık, performans düşüşü ve cihaz ömründe kısalmaya yol açar. Bu fiziksel sınırlar, silikon temelli CMOS üretiminin artık sürdürülebilir bir ölçeklenme sağlayamadığını göstermektedir.

Endüstrinin Alternatif Malzeme Arayışı

Silikonun güç tüketimi, hız duyarlılık ve ısı yönetim konularındaki bu fiziksel limitleri, yarı iletken endüstrisini alternatif kanal malzemelerine yöneltmiştir. Özellikle atomik incelikte olmaları ve güçlü elektrostatik kapı kontrolü sağlamaları nedeniyle iki boyutlu (2D) malzemeler, bu arayışın merkezine yerleşmiştir. 2D malzemeler, silikonun sağlayamadığı ölçekte bir gate-channel etkileşimi sunarak kısa kanal etkilerini önemli ölçüde azaltabilmektedir (Akinwande et al., 2019). Örneğin MoS₂'nin tek katmanlı bant aralığı (≈ 1.8 eV), dijital transistörlerde yüksek açma-kapama oranı elde edilmesini sağlar (Radisavljevic et al., 2011). Bu özellik, düşük güç tüketimli mobil cihazlar ve IoT uygulamaları için yeni bir paradigma oluşturmaktadır.

Endüstrinin 2D malzemelere yönelmesinin bir diğer nedeni, bu malzemelerin van der Waals heteroyapılar oluşturabilme yeteneğidir. Geleneksel yarı iletkenlerde epitaksi için kafes uyumu zorunluyken, 2D malzemeler arası van der Waals etkileşimleri kafes uyumsuzluğuna karşı doğal tolerans sağlar (Geim & Grigorieva, 2013). Bu sayede dikey istiflenmiş MoS₂/h-BN/grafen yapıları gibi, yüksek hız ve düşük güç tüketimi gerektiren yeni FET mimarileri gerçekleştirilebilmektedir.

Google, Samsung, TSMC ve Intel gibi sektör liderlerinin wafer ölçeğinde 2D malzeme büyütme, düşük temas direnci ve CMOS uyumlu entegrasyon teknolojilerine milyarlarca dolarlık yatırım

yapması, 2D malzemelerin geleceğin mikroçip stratejilerinde temel yapı taşları olarak görüldüğünü ortaya koymaktadır (IRDS, 2023; Samsung Foundry Forum, 2022).

2D Malzemelerin Entegrasyon Gerekliliği

Güncel mikroelektronik cihazların gereksinimleri yalnızca daha fazla transistör yoğunluğu değil; aynı zamanda daha düşük güç tüketimi, daha yüksek hız, gelişmiş ısıl yönetim ve elektromanyetik kararlılık gibi performans kriterlerini de içermektedir. Silikonun fiziksel sınırlarına yaklaşılmaya başlanmasıyla birlikte bu beklentilerin geleneksel CMOS teknolojisiyle karşılanması giderek zorlaşmıştır (IRDS, 2023). Atomik inceliğe sahip 2D malzemeler, özellikle üstün elektrostatik kapılama yetenekleri sayesinde bu sınırlamaları aşabilecek potansiyel sunmaktadır. Kanal kalınlığının tek atom ölçeğinde olması, gate-channel etkileşimini maksimum düzeye çıkararak kısa kanal etkilerini önemli ölçüde azaltır (Akinwande et al., 2019). Bu nedenle 2D malzemeler hem yüksek performanslı işlemciler hem de düşük güçlü mobil sistemler için yenilikçi bir kanal malzemesi niteliğindedir.

2D malzemelerin atomik düzlemselliğinin sağladığı düşük yüzey pürüzlülüğü, silikon tabanlı kanallara kıyasla daha düşük arayüz tuzak yoğunluğu sunar; bu da taşıyıcı hareketliliğinin korunmasını ve çalışma ömrünün uzamasını sağlar (Dean et al., 2010). Grafen gibi malzemelerin aşırı yüksek termal iletkenlik sergilemesi, mevcut yongalarda kritik bir problem olan termal yoğunluğun azaltılmasında önemli avantajlar sunmaktadır (Balandin et al., 2008). Bu faktörler, 2D malzemelerin yalnızca silikonun yerine geçmek üzere geliştirilen alternatifler değil, aynı zamanda mevcut üretim ekosisteminin tamamlayıcısı ve geleceğin transistör mimarilerinin temel bileşenleri olduğunu göstermektedir. Bu nedenle 2D malzemelerin entegrasyonu, mikroçip teknolojisinin evrimsel bir gereksinimi olmaktan çıkıp devrimsel bir dönüşümün başlangıcı olarak değerlendirilmektedir.

2D Malzemelerin Mikroçip Üretimine Entegrasyon Yöntemleri

2D malzemelerin mikroçip üretimine entegrasyonu, hem malzeme sentezi hem de CMOS süreçlerine uyum açısından çok aşamalı ve yüksek hassasiyet gerektiren bir mühendislik sürecidir. En yaygın yaklaşımlardan biri olan transfer tabanlı entegrasyonda, grafen ve MoS₂ gibi 2D tabakalar önce metal yüzeylerde kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile büyütülmekte, ardından polimer destekli taşıyıcılar kullanılarak hedef wafer üzerine aktarılmaktadır; ancak bu yöntem polimer kalıntıları, kırışıklıklar ve arayüz defektleri gibi ciddi kalite problemlerine neden olabilmektedir (Li et al., 2009; Cheng et al., 2023). Bu nedenle endüstride wafer üzerinde doğrudan büyütme yöntemlerine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Doğrudan büyütme, 2D malzemelerin Cu yerine Si, SiO₂ veya safir yüzeylerde CVD veya plazma destekli CVD yöntemleriyle sentezlenmesine dayanmakta; transfer kaynaklı kontaminasyonu ortadan kaldırarak daha temiz, kararlı ve CMOS uyumlu arayüzler sunmaktadır (Dumcenco et al., 2015; Duan et al., 2022). Bununla birlikte klasik CVD tekniklerinin yüksek sıcaklık gerektirmesi, BEOL süreçleriyle uyumsuzluk yaratmakta ve bu nedenle düşük sıcaklıklı büyütme, katalitik büyüme veya plazma destekli yaklaşımlar gibi alternatif stratejilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Akinwande et al., 2019). Entegrasyon stratejilerinin bir diğer önemli bileşeni, farklı 2D tabakaların üst üste istiflenmesiyle oluşturulan van der Waals heteroyapılarıdır; bu yapılar kafes uyumsuzluğuna duyarlı oldukları için yeni nesil dikey mimariler, tünelleme transistörleri ve düşük güçlü elektronikler için benzersiz tasarım esnekliği sunmaktadır (Geim & Grigorieva, 2013). Atomik düzeyde temiz arayüz gereksinimi nedeniyle hem yüzey işlemleri hem de ince film biriktirme tekniklerinin hassas şekilde kontrol edilmesi zorunludur. Ayrıca 2D malzemelerin mikroçip fabrikasyonunda kullanılan litografi ve etching süreçleriyle uyumlu hâle getirilmesi gerekmektedir; çünkü atomik inceliğe sahip bu tabakalar yüksek

enerjili plazma veya agresif kimyasal aşındırıcılarla kolayca zarar görebilir. Bu nedenle oksijensiz gaz karışımlarına sahip düşük enerjili plazma etching, seçici kimyasal aşındırma ve 2D yüzeylere uygun fotoresist süreçleri gibi optimizasyonlar geliştirilmiştir (Choi et al., 2017). Tüm bu yöntemler bir arada değerlendirildiğinde, 2D malzemelerin entegrasyonu yalnızca yeni bir kanal malzemesi eklemekten ibaret değil, malzeme sentezi, arayüz mühendisliği, ince film teknolojileri ve litografi optimizasyonunun birlikte ele alındığı kapsamlı ve ileri düzey bir mikroçip üretim paradigmasıdır (IRDS, 2023).

2D Malzemelerin Mikroçip Performansına Etkisi

İki boyutlu malzemelerin ortaya çıkışı, mikroçip performansının hem cihaz hem de devre mimarisi düzeyinde yeniden tanımlanmasına olanak tanımış ve özellikle kısa kanal etkilerinin yoğunlaştığı 5 nm altı teknoloji düğümlerinde geleneksel silikon tabanlı transistörlerin karşılaştığı sınırları aşmak için güçlü bir alternatif sunmuştur. Atomik kalınlıktaki MoS₂, WS₂ ve benzeri TMD malzemeler, güçlü elektrostatik kapılama kabiliyeti sayesinde drain-induced barrier lowering (DIBL) ve threshold gerilimi kararsızlığı gibi kısa kanal etkilerini önemli ölçüde azaltarak düşük sızıntı akımı, daha istikrarlı threshold gerilimleri ve daha düşük güç tüketimi sağlar (Radisavljevic et al., 2011; Lembke & Kis, 2012). Grafenin ultra yüksek taşıyıcı hareketliliği yüksek hızlı uygulamalarda avantaj sunarken, yarı iletken MoS₂ gibi malzemelerin yüksek açık-kapalı akım oranı dijital logic uygulamaları için ideal bir platform oluşturur. Ayrıca 2D malzemelerin atomik düzlemsel yapıları, arayüz tuzak yoğunluğunu belirgin şekilde azaltarak gate dielektriği ile kanal arasındaki etkileşimi iyileştirir; h-BN gibi atomik düzlemsel dielektriklerle oluşturulan arayüzler, silikon–yüksek-k dielektrik arayüzlerine kıyasla daha düşük saçılma mekanizması ve daha yüksek hareketlilik sunar (Dean et al., 2010). Bu durum yalnızca cihaz seviyesinde

performansı artırmakla kalmaz, aynı zamanda devre düzeyinde varyasyonu azaltarak yüksek frekanslı sistemlerde daha kararlı bir davranış ortaya koyar. Termal performans açısından da grafen ve benzeri 2D malzemeler yüksek ısı iletkenlikleri nedeniyle modern işlemcilerde kritik bir sorun hâline gelen sıcaklık yığılmasını azaltma potansiyeli taşır; grafenin 3000 W/mK seviyesine ulaşan termal iletkenliği, yeni nesil ısı yönetim çözümlerinin geliştirilmesinde önemli bir avantaj sunmaktadır (Balandin et al., 2008). Ölçeklenebilirlik açısından bakıldığında, 2D malzemelerin kanal kalınlığının atomik ölçekte olması, silikonun birkaç nanometrelik kalınlıkta gösterdiği kuantum tünelleme ve yüzey saçılması kaynaklı performans kayıplarını ortadan kaldırmaktadır; bu nedenle 1 nm altı gate uzunluklarının dahi mümkün olabileceği öngörülmektedir (Desai et al., 2016; ITRS/IRDS, 2023). Devre seviyesinde ise daha yüksek açık-kapalı oranları, düşük güç tüketimli logic kapılarının tasarımını kolaylaştırırken, threshold kararlılığı daha tutarlı devre davranışı sağlar ve heteroyapılar sayesinde dikey istiflenmiş yeni mimariler mümkün olur (Geim & Grigorieva, 2013). Bu özelliklerin bir arada değerlendirilmesi, 2D malzemelerin mikroçip performansını yalnızca lokal bir düzeyde değil, sistem seviyesinde optimize edebilen bütüncül bir platform sunduğunu göstermektedir. Dolayısıyla 2D malzemeler, silikon sonrası dönemin geçici bir alternatifi değil, elektrostatik kontrol, ısı yönetim, ölçeklenebilirlik ve devre kararlılığı gibi temel performans metriklerini eş zamanlı iyileştiren bir teknoloji olarak modern mikroçip tasarımında devrimsel bir dönüşümün merkezinde yer almaktadır.

2D Malzemelerin Entegrasyonunda Karşılaşılan Zorluklar ve Çözüm Yaklaşımları

İki boyutlu malzemeler mikroçip teknolojisi için büyük bir potansiyel taşısa da, bu malzemelerin üretim süreçlerine entegre edilmesi çok sayıda teknik zorluğu beraberinde getirmektedir.

Silikon üretim zinciri onlarca yıl boyunca optimize edilmiş, yüksek verimlilikte çalışan bir ekosistem şeklinde gelişmiştir; bu nedenle atomik kalınlıktaki yeni bir malzeme sınıfının bu tür bir üretim hattına uyumlu hâle getirilmesi hem malzeme hem de süreç mühendisliği açısından önemli engeller doğurmaktadır (Akinwande et al., 2019). En temel sorun, 2D malzemelerin atomik inceliğinden kaynaklanan yapısal kırılganlıktır. Bu malzemeler transfer, litografi, aşındırma veya metal temas işlemleri sırasında kolaylıkla zarar görebildiği için üretim parametrelerinin yeniden tanımlanması gerekmektedir. Ayrıca üretim süreçlerinde kullanılan kimyasallar, plazma enerjileri ve yüksek sıcaklık gibi koşullar 2D malzemelerin kristal yapısını bozabilir veya onları tamamen yok edebilir; bu nedenle düşük enerjili ve yüksek seçicilikte yeni nesil işlem tekniklerinin geliştirilmesi zorunlu hâle gelmiştir (Choi et al., 2017).

En büyük zorluklardan biri büyük alanlı, yüksek kalitede 2D malzeme üretimidir. Mekanik eksfoliasyon laboratuvar ölçeğinde mükemmel kristal kalitesi sağlasa da mikroçip üretimi için gereken wafer boyutlarında tekrarlanabilirlik sunmaz. CVD tabanlı üretim geniş alanlı büyüme sağlasa da tek katmanlı ve kusursuz film üretimi hâlâ tam anlamıyla kontrol edilebilir değildir (Dumcenco et al., 2015). Özellikle MoS₂ gibi TMD malzemelerde tane sınırlarının elektronik performansa etkisi belirgindir ve mobilite kayıplarına neden olabilmektedir (Chhowalla et al., 2016). Çözüm olarak düşük sıcaklıklı CVD, metal-organik CVD ve seçici alan büyütme gibi yöntemler geliştirilmiş; ayrıca wafer üzerinde katalitik büyüme sayesinde kristal yönelimlerin kontrol edilmesi hedeflenmiştir (Cheng et al., 2023). Bununla birlikte, elektronik olarak kusursuz wafer-scale 2D malzeme üretimi hâlâ tam çözülmemiş bir Ar-Ge problemidir.

Transfer işlemi entegrasyon sürecinin en karmaşık adımlarından biridir. Grafen veya MoS₂ gibi malzemeler genellikle metal yüzeylerde büyütüldüğünden, bu yüzeylerden ayrılıp hedef wafer

üzerine taşınmaları gerekir; ancak polimer destekli transfer süreci kırışıklık, kalıntı, yırtılma ve arayüz bozulmaları gibi ciddi sorunlara yol açmaktadır (Li et al., 2009). Bu nedenle elektro-kimyasal delaminasyon, destek malzemesiz transfer ve kuru transfer gibi teknikler geliştirilmiştir. Ancak en sürdürülebilir çözüm, transfer gerektirmeyen doğrudan büyüme yaklaşımlarıdır. Bu nedenle TSMC, Samsung ve IMEC gibi firmalar 2D-FET yol haritalarında wafer üzerinde doğrudan büyümeyi stratejik hedef olarak belirlemiştir (IRDS, 2023).

Zorluklardan bir diğeri de metal temas mühendisliğidir. 2D malzemeler ile metaller arasında oluşan Şottki bariyerleri, temas direncinin artmasına ve cihaz performansının düşmesine neden olur. Bu sorun özellikle MoS₂ gibi yarı iletkenlerde kritiktir. Düşük iş fonksiyonlu metaller, ara tabaka mühendisliği ve 1T faz dönüşümü gibi teknikler temas direncini azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Faz mühendisliği ile metalik 1T fazının oluşturulması, kontakt direncinde belirgin iyileşme sağlar (Kappera et al., 2014). Fakat wafer ölçeğinde temas sürekliliğini korumak hâlâ önemli bir Ar-Ge alanıdır (Liu et al., 2016).

Litografi ve etching süreçleri de 2D malzemeler için kritik bir problem alanıdır. Geleneksel plazma etching işlemleri yüksek enerji içerdiğinden 2D malzemelerin atomik yapısında ciddi hasara neden olur; özellikle oksijen plazması grafen ve TMD malzemeler için geri dönüşü olmayan tahribatlar oluşturur (Choi et al., 2017). Bu nedenle düşük enerjili plazma, kriyojenik etching, oksijensiz gaz karışımları ve atomik hassasiyette down-stream plazma teknikleri geliştirilmiştir. Fotolitografi sırasında kullanılan solventlerin ve rezist kalıntılarının arayüz kirlenmesine yol açması nedeniyle rezist-free patterning ve in-situ büyüme teknikleri giderek yaygınlaşmaktadır.

Tüm bu üretimsel zorluklara ek olarak, 2D malzemelerin devre düzeyindeki varyasyonu da ciddi bir sınırlamadır. Atomik kalınlık

farkları, tane sınırı dağınıklığı ve arayüz trap yoğunluğu değişkenliği, cihazlar arasında performans sapmalarına yol açmaktadır (Duan et al., 2022). Bu nedenle yapay zekâ destekli varyasyon kompanzasyonu, kimyasal pasivasyon teknikleri, daha kararlı dielektrik-kanal arayüzleri ve homojen büyütme stratejileri üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Sonuç olarak, 2D malzemelerin mikroçip üretim süreçlerine entegrasyonu hem malzeme sentezi hem de süreç mühendisliği açısından çok katmanlı bir zorluk alanı oluşturmaktadır. Ancak transfer gerektirmeyen büyütme teknikleri, gelişmiş kontak mühendisliği çözümleri, düşük hasarlı litografi–etching yöntemleri ve arayüz optimizasyonu gibi ilerlemeler sayesinde bu malzemelerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği her geçen yıl daha da artmaktadır. Bu bağlamda 2D malzemeler yalnızca mevcut teknolojilere alternatif bir kanal yapısı değil, aynı zamanda mikroçip tasarımının geleceğini şekillendirecek temel bir platform olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç ve Öneriler

İki boyutlu malzemelerin mikroçip üretim süreçlerine entegrasyonu, yarı iletken endüstrisinin tarihsel gelişimi içinde kritik bir kırılma noktasını temsil etmektedir. Silikon tabanlı transistör mimarileri onlarca yıl boyunca Moore Yasası çerçevesinde ölçeklenmeye devam etmiş olsa da, 5 nm ve altındaki üretim düğümlerine geçişle birlikte silikonun fiziksel sınırlamaları belirginleşmiştir. Kuantum tünellemesi, elektrostatiğin zayıflaması, artan ısıl yoğunluk ve arayüz kaynaklı taşıyıcı kayıpları, geleneksel CMOS teknolojisini sürdürülebilir bir ilerleme çizgisinden uzaklaştırmıştır. Bu bağlamda 2D malzemeler, hem atomik incelikleri hem de benzersiz elektronik ve mekanik özellikleriyle mikroçip teknolojisinin yeni nesil yapı taşları olmaya aday hâle gelmiştir. Grafen, MoS₂, WS₂, h-BN ve siyah fosfor gibi 2D malzemeler, yüksek yüzey alanları, güçlü elektrostatik kapı kontrolü, düşük sızıntı akımları ve temiz arayüz

özellikleri sayesinde silikonun karşılaştığı temel sorunlara çözüm üretebilmektedir. Özellikle TMD tabanlı 2D-FET mimarileri, alt 1 nm kanal uzunluklarında dahi kararlı çalışma potansiyeli sunarak, transistor ölçeklenmesinin yalnızca yatay değil aynı zamanda malzeme tabanlı bir dönüşümle sürdürülebileceğini göstermektedir. Bu durum, hem enerji verimliliği hem de yüksek performans gerektiren bilgi işlem altyapıları açısından çığır açıcı bir rol oynamaktadır.

Bununla birlikte 2D malzemelerin üretim hattına geçirilmesi bazı teknik zorluklar içermektedir. Wafer ölçekli kusursuz büyütme, transfer sırasında oluşan yapısal bozulmalar, metal temas direnci, litografi ve etching süreçlerinde oluşan hasarlar ve devre seviyesinde varyasyon gibi problemler, bu teknolojinin endüstriyel olgunluğa ulaşmasını geciktiren başlıca engellerdir. Ancak son yıllarda geliştirilen düşük sıcaklıklı CVD teknikleri, katalitik büyütme stratejileri, destek malzemesiz transfer yöntemleri, van der Waals temas mühendisliği, düşük hasarlı aşındırma protokolleri ve yapay zekâ destekli süreç optimizasyonları, bu engellerin önemli bir kısmını aşmayı mümkün kılmıştır. Bugün TSMC, Samsung, Intel ve IMEC gibi küresel teknoloji liderleri, 2D-FET prototiplerini üretmekte ve geleceğin yol haritalarını bu malzemeler üzerine inşa etmektedir. Bu gelişmeler 2D malzemelerin yalnızca bir akademik araştırma alanı değil, yakın gelecekte ticari mikroçip tasarımlarının merkezinde yer alacak stratejik bir teknoloji olduğunu göstermektedir. Özellikle düşük güç tüketimi, yüksek hız, üç boyutlu yığın mimarileri ve optoelektronik entegrasyon gibi alanlarda 2D malzemelerin çözümler sunması, bilgi işlem altyapılarının yeniden şekillenmesine yol açacaktır.

Sonuç olarak, 2D malzemeler mikroçip teknolojisinde hem sürdürülebilir ölçeklenme hem de performans iyileştirme açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Silikon sonrası dönemin kapıları, atomik incelikteki bu malzemelerle birlikte aralanmakta; elektronik,

fotonik, sensör ve bilgi işlem teknolojilerinde yeni bir paradigma oluşmaktadır. Geleceğin mikroçip mimarileri, yalnızca daha küçük ve daha hızlı cihazlar değil, aynı zamanda yeni malzeme ekosistemlerinin üzerinde yükselen bütüncül bir teknoloji dönüşümünü yansıtacaktır. Bu nedenle 2D malzemeler, mikroelektronik alanında devrimsel bir sıçramanın temel bileşenleri olarak değerlendirilmeli ve bu alandaki araştırmalar hem bilimsel hem de endüstriyel perspektiften desteklenmelidir.

Kaynakça

Akinwande, D., Huyghebaert, C., Wang, C.-H., Serna, M. I., Goossens, S., Li, L.-J., ... & Kim, J. (2019). Graphene and two-dimensional materials for silicon technology. *Nature*, 573, 507–518.

Balandin, A. A., et al. (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 8(3), 902–907.

Cheng, R., Li, Y., & Lee, K. (2023). 2D materials for next-generation integrated circuits: Challenges and opportunities. *ACS Nano*, 17, 4450–4465.

Chhowalla, M., Jena, D., & Zhang, H. (2016). Two-dimensional semiconductors for transistors. *Nature Reviews Materials*, 1, 16052.

Choi, M. S., et al. (2017). Controlled etching of 2D materials for device fabrication. *ACS Nano*, 11, 11497–11505.

Dean, C. R., et al. (2010). Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics. *Nature Nanotechnology*, 5, 722–726.

Desai, S. B., et al. (2016). MoS₂ transistors with 1-nm gate lengths. *Science*, 354(6308), 99–102.

Duan, X., Wang, C., Pan, A., Yu, R., & Duan, X. (2022). Two-dimensional materials for device applications. *Chemical Reviews*, 122, 6331–6372.

Dumcenco, D., et al. (2015). Large-area epitaxial monolayer MoS₂. *ACS Nano*, 9, 4611–4620.

George, S. M. (2010). Atomic layer deposition: An overview. *Chemical Reviews*, 110(1), 111–131.

Geim, A. K., & Grigorieva, I. (2013). Van der Waals heterostructures. *Nature*, 499, 419–425.

Intel. (2023). Intel 2D materials research program overview.

IRDS. (2023). International roadmap for devices and systems. IEEE.

ITRS. (2015). International technology roadmap for semiconductors.

Kappera, R., et al. (2014). Phase-engineered low-resistance contacts for MoS₂ transistors. *Nature Materials*, 13, 1128–1134.

Kim, H., et al. (2012). ALD techniques for high-k dielectrics on 2D materials. *Applied Physics Letters*, 101, 123109.

Lembke, D., & Kis, A. (2012). Breakdown of high-performance monolayer MoS₂ transistors. *ACS Nano*, 6(11), 10070–10075.

Li, L., et al. (2014). Black phosphorus field-effect transistors. *Nature Nanotechnology*, 9, 372–377.

Li, X., et al. (2009). Large-area graphene growth by CVD. *Science*, 324, 1312–1314.

Liu, Y., et al. (2016). Van der Waals metal–semiconductor interfaces. *Nature*, 567, 323–331.

Lundstrom, M. (2003). Fundamentals of nanotransistors.

Mack, C. (2007). Fundamental principles of optical lithography.

Novoselov, K. S., et al. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306, 666–669.

Ohring, M. (2001). Materials science of thin films.

Radisavljevic, B., et al. (2011). Single-layer MoS₂ transistors. *Nature Nanotechnology*, 6, 147–150.

Robertson, J. (2006). High dielectric constant oxides. *Reports on Progress in Physics*, 69, 327–396.

Samsung Foundry. (2022). Samsung Advanced Foundry Forum — 2D materials integration / technical reports.

Samsung Foundry Forum. (2022). Technical presentations.

Schedin, F., et al. (2007). Detection of individual gas molecules by graphene. *Nature Materials*, 6, 652–655.

Schwierz, F. (2010). Graphene transistors. *Nature Nanotechnology*, 5, 487–496.

Taur, Y., & Ning, T. H. (2013). Fundamentals of modern VLSI devices.

Thompson, S. E., et al. (2012). A perspective on CMOS scaling. *Proceedings of the IEEE*, 100, 285–306.

Ugeda, M. M., et al. (2014). MBE-grown 2D semiconductors. *Nature Materials*, 13, 1091–1095.

Wang, Q. H., Kalantar-Zadeh, K., Kis, A., Coleman, J. N., & Strano, M. S. (2012). Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nature Nanotechnology*, 7, 699–712.

BÖLÜM 5

İÇ ANADOLU BÖLGESİNDEKİ HAVA KİRLİLİĞİNİN DİSİPLİNLERARASI EKONOFİZİK YAKLAŞIMI İLE İNCELENMESİ

Ersin KANTAR¹

Giriş

Hava kirliliği, kentleşme hızının artması, sanayileşme, ulaşım yoğunluğu ve iklim koşullarındaki değişimlerle birlikte günümüzde en kritik çevresel sorunlardan biri haline gelmiştir. Özellikle kentsel bölgelerde solunan havanın kalitesi, toplum sağlığı üzerinde doğrudan etkiler yaratmakta; solunum yolu hastalıklarından kalp-damar hastalıklarına kadar geniş bir sağlık yelpazesinde risk artışına neden olmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün yayımladığı son raporlar, PM₁₀, SO₂ ve CO gibi kirlleticilerin uzun süreli maruziyetinin ölüm oranlarını yükselttiğini, kronik hastalıkların görülme sıklığını artırdığını ve yaşam kalitesini düşürdüğünü göstermektedir (World Health Organization, 2021).

¹ Prof. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Sorgun Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, ersin.kantar@bozok.edu.tr, Orcid: 0000-0001-9302-1078.

Bu çalışma, TÜBİTAK-BİDEB 2209/A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından Proje No: 1919B012402848 ile desteklenmiştir.

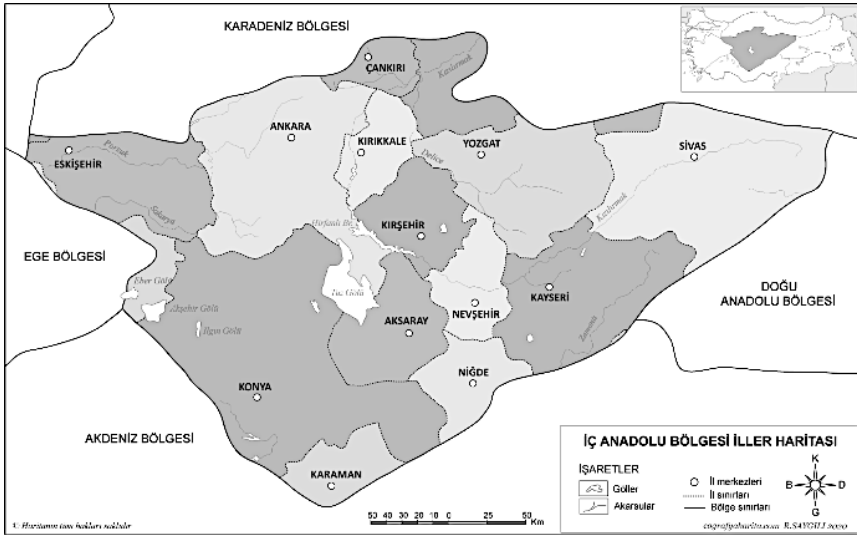
Ayrıca küresel çapta yapılan geniş kapsamlı çalışmalar, çevresel hava kirliliğinin hem kısa hem de uzun vadeli sağlık etkilerinin ciddi boyutlarda olduğunu ortaya koymakta ve özellikle partikül madde ile gaz kirleticilerin toplum sağlığı üzerindeki yükünü nicel olarak ortaya koymaktadır (Cohen et al., 2017). Bu nedenle hava kalitesinin bilimsel yöntemlerle incelenmesi, elde edilen bulguların mekânsal ve zamansal bağlamda değerlendirilmesi ve kirlilik yapısının anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

Türkiye'nin coğrafi merkezinde yer alan İç Anadolu Bölgesi hem meteorolojik özellikleri hem de sosyoekonomik yapısı nedeniyle hava kirliliğine karşı hassas bir yapı sergilemektedir. Bölgenin nispeten kapalı havza niteliği taşıyan topoğrafyası, durağan atmosfer koşullarını sıklaştırmakta; özellikle kış aylarında inversiyon olaylarının yoğun görülmesi kirleticilerin atmosferde birikmesine yol açmaktadır. Bunun yanında konut ısınmasında kullanılan yakıt türleri, motorlu taşıt yoğunluğu ve bazı şehirlerde faaliyet gösteren endüstriyel tesisler bölgesel hava kalitesini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. İç Anadolu'nun Kayseri, Konya, Karaman, Aksaray, Ankara, Niğde, Nevşehir ve Çankırı gibi önemli şehirlerinde gözlemlenen hava kirliliği seviyeleri, farklı sosyoekonomik profiller ve farklı iklimsel koşullar nedeniyle heterojen bir dağılım göstermektedir. Türkiye'de yapılan bölgesel ölçekli çalışmalar, özellikle İç Anadolu'da PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının meteorolojik kararlılık, inversiyon sıklığı ve yerleşim yoğunluğu ile güçlü ilişkiler sergilediğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, İç Anadolu Bölgesi'ndeki şehirlerin PM_{10} , SO_2 ve CO konsantrasyonlarını çok değişkenli bir perspektiften analiz etmektedir. Kirleticilerin birbirleriyle olan ilişkilerinin, şehirler arası benzerlik ve farklılıkların, yıllar içindeki ortak hareket yapılarının belirlenebilmesi için veri madenciliği ve ağ bilimi tabanlı yöntemlerden yararlanılmıştır. Özellikle En Küçük Örtün Ağ

(EÖA) yaklaşımı, kirleticiler arasındaki korelasyon yapısını azaltılmış ve yorumlanabilir bir grafik yapısı üzerinden göstermesi bakımından güçlü bir araçtır. EÖA, şehirler arasında en güçlü ilişkileri temsil eden minimum bağlı ağ yapısını ortaya koyarak hangi şehirlerin benzer kirlilik dinamiklerine sahip olduğunu belirlemekte ve kirleticilerin ortak hareket eden kümelerini görünür hale getirmektedir.

Şekil 1 İç Anadolu bölgesinin bölümler ve iller haritası



Kaynak: Coğrafyaharita, 2024

Ayrıca çalışmada EÖA'dan üretilen kümeler kullanılarak şehir grupları ve kirlilik modelleri analiz edilmiştir. Böylece İç Anadolu'daki şehirlerin benzer hava kalitesi profilleri gösterip göstermediği, hangi şehirlerin aynı kirletici davranışına sahip kümelerde yer aldığı ve bölgesel hava kirliliğinin yapısal özellikleri ortaya konulmuştur. Bu yaklaşım, klasik istatistiksel yöntemlerin ötesine geçerek kirlilik verilerini “ağ tabanlı bir ekosistem” olarak ele almakta ve şehirler arası kirleticilerin etkileşimsel haritasını sunmaktadır.

Bu bölümde hazırlanan analizler hem bölgesel hava kalitesinin anlaşılması hem de ileride yapılacak politika önerileri, temiz hava eylem planları ve sürdürülebilir şehircilik çalışmalarına temel oluşturmayı amaçlamaktadır. EÖA ve kümeleme tabanlı yaklaşım, kirleticilerin zamansal-mekânsal dinamiklerini açıklayan modern bir yöntem olarak İç Anadolu'daki hava kirliliği araştırmalarına yeni bir analitik çerçeve sunmaktadır.

Yöntem ve Hesaplamalar

İç Anadolu Bölgesi'ndeki illerin hava kalitesi ölçümü yapan istasyonları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 İç Anadolu Bölgesi hava kalitesi ölçüm istasyonları

İL	İSTASYON İSİMLERİ
ANKARA	İstasyon, Bahçelievler, Batıkent, Çankaya, Demetevler, Etimesgut, Etlik, Kayaş, Keçiören, Sanatoryum, Mamak, Ostim, Polatlı, Sıhhiye, Sincan, Siteler, Törekent, Ulus, Yaşamkent, Çubuk
ÇANKIRI	Merkez
DÜZCE	Merkez, Bahçeşehir, Belediye
ESKİŞEHİR	Cumhuriyet Bulvarı, Metin Sönmez, Odunpazarı, Tepebaşı, Vişnepark
KIRIKKALE	Merkez, Bulvar Park
KIRŞEHİR	Merkez
YOZGAT	Merkez, Sorgun
KARAMAN	Merkez, Ermenek
KAYSERİ	Kocasinan, Melikgazi, OSB, Talas, Trafik
KONYA	Akşehir, Bosna, Karkent, Laboratuvar, Meram, Sarayönü, Trafik, Ereğli, Erenköy-Belediye, Karatay, Karatay (Sunaypark), Belediye
NEVŞEHİR	Merkez, Avanos
NİĞDE	Merkez, Bor

Bu kapsamda, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA) veri bankasından alınan PM₁₀, CO, SO₂ emisyon verileri kullanılmıştır. Bu analizler sonucunda, İç Anadolu Bölgesi'nde hava kirliliğinin kaynakları belirlenerek, sanayi, otomotiv, kimya, tekstil ve diğer sektörlerin çevresel etkileri araştırılmıştır.

En küçük örten ağaç

En küçük örten ağaç (İngilizce: Minimum Spanning Tree - MST), temelini graf teorisinden alan güçlü bir ağ filtreleme yöntemidir. Karmaşık sistemlerdeki (örneğin finansal piyasalar) çok sayıda ve karmaşık ilişkiler yığınına analiz etmek, basitleştirmek ve görselleştirmek için kullanılır.

Bir EÖA, bir ağdaki tüm düğümleri (nodes) birbirine bağlayan, ancak hiçbir döngü içermeyen özel bir alt ağ olarak tanımlanır. Bir ağda N adet düğüm (örneğin, N adet hisse senedi) varsa, bu düğümlerin tamamını içeren bir EÖA, tam olarak N-1 adet kenara (edge veya link) sahip olacaktır. Bu yöntemin temel amacı, ağdaki tüm düğümleri birbirine bağlarken, kenarların toplam ağırlığını en aza indirmektir.

Finansal piyasalar bağlamında EÖA, varlıklar arasındaki binlerce korelasyon bağlantısı arasından en anlamlı ve en güçlü olanları (yani "en kısa" mesafeleri) seçerek sistemin "iskelet yapısını" veya "omurgasını" ortaya çıkarmak için kullanılır. Bu filtreleme işlemi, gürültü olarak kabul edilebilecek zayıf veya gereksiz bilgileri ayıklar ve piyasanın hiyerarşik yapısını, temel kümelenmeleri ve potansiyel risk bulaşma kanallarını daha net bir şekilde belirlemeyi sağlar.

Bir ağ için EÖA'nın oluşturulması, genellikle aşağıdaki standart metodolojik adımları içerir:

1. Veri Toplama ve Hazırlık:

İlk adımda, incelenen döneme ait varlıkların (hisse senedi, döviz kuru, tahvil faizi vb.) zaman serisi verileri (genellikle günlük, haftalık, aylık veriler) toplanır.

2. Değişim Hesaplaması:

Veri serileri, istatistiksel analizler için daha uygun olan ve genellikle durağanlık özelliği gösteren getiri serilerine dönüştürülür. Bu işlem için çoğunlukla logaritmik değişim (log-returns) kullanılır:

$$R_i(t) = \ln P_i(t + \tau) - \ln P_i(t) \quad (1)$$

Burada burada $R_i(t)$ logaritmik değişim oranı olarak adlandırılır (Mantegna, 1999). $P_i(t)$, i varlığının t zamanındaki değeridir.

3. Korelasyon Matrisinin Oluşturulması:

Varlıkların veri serileri arasındaki eş zamanlı bağımlılığı ölçmek için $N \times N$ boyutunda bir matris oluşturulur. Analizlerde en yaygın kullanılan yöntem, varlık çiftleri (i, j) arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçen Pearson Korelasyon Katsayısıdır.

$$C_{ij} = \frac{\langle R_i R_j \rangle - \langle R_i \rangle \langle R_j \rangle}{\sqrt{\left(\langle R_i^2 \rangle - \langle R_i \rangle^2 \right) \left(\langle R_j^2 \rangle - \langle R_j \rangle^2 \right)}}, \quad (2)$$

Mükemmel pozitif korelasyon $C_{ij}=1$ (en güçlü bağlantı). Sıfır korelasyon $C_{ij}=0$. Mükemmel negatif korelasyon $C_{ij}=-1$.

Korelasyondan Mesafe Matrisine Dönüşüm: EÖA algoritmaları, "ağırlık" olarak "mesafe" metriğini kullanır. Bu nedenle, korelasyon matrisinin bir mesafe matrisine d_{ij} dönüştürülmesi gerekir. Ekonomik literatüründe bu dönüşüm için Mantegna tarafından önerilen ve yaygın olarak kabul gören aşağıdaki formül kullanılır:

$$d_{ij} = \sqrt{2(1 - C_{ij})} \quad (3)$$

Bu metrik dönüşüm, korelasyon katsayılarının $[-1, 1]$ aralığını $[0, 2]$ aralığında bir mesafe değerine haritalar.

4. EÖA Algoritmasının Uygulanması:

Son adımda, elde edilen $N \times N$ boyutlu simetrik mesafe matrisi D üzerine, bir EÖA inşa etmek için standart algoritmalarından biri uygulanır. En yaygın kullanılan algoritmalar Kruskal veya Prim

algoritmalarıdır. Bu algoritmalar, tüm N düğümü birbirine bağlayan N-1 kenarı, toplam d_{ij} mesafesi en düşük olacak şekilde (ve döngü oluşturmadan) sistematik olarak seçer.

Bootstrap metodu

Metod, ilk defa 1979 yılında Efron (Efron, 1979) tarafından geliştirilmiş ve ekonofizik alanında yapılan çalışmalarda EÖA ların analizinde temel olarak elde edilen ağ yapısının istatistiksel güvenilirliğini ve kararlılığını test etmek için kullanılır.

Bir EÖA, belirli bir veri setinden (örneğin, belirli bir döneme ait hisse senedi getirileri) hesaplanan tek bir korelasyon matrisine dayanarak oluşturulur. Ancak bu ağda ortaya çıkan bağlantıların, sadece o spesifik veri örneğine özgü tesadüfi bir sonuç olup olmadığını bilmek isteriz. Bootstrap, "Acaba bu bağlantılar farklı bir veri örneği alsaydık yine ortaya çıkar mıydı?" sorusuna cevap arar.

Yöntem, mevcut veri setini kullanarak "sahte" (bootstrapped) veri seti oluşturma ve her biri için ayrı bir EÖA hesaplama prensibine dayanır. Yöntemde aşağıdaki adımlar takip edilir:

1. Yeniden Örnekleme:

Orijinal zaman serisi verilerinizden rastgele seçimler yapılır. Bu işlemle, orijinaliyle aynı uzunlukta, ancak bazı verilerin tekrarlandığı, bazılarının ise hiç yer almadığı yeni veri seti oluşturulur.

2. Çoklu EÖA Oluşturma:

Bu B adet sahte veri setinin her biri için ayrı ayrı korelasyon matrisleri, mesafe matrisleri ve son olarak da B adet farklı EÖA oluşturulur.

3. Frekans Analizi:

Son adımda, burada elde edilen ağ incelenir. Orijinal EÖA'de bulunan belirli bir bağlantının bu B adet ağı kaçında ortaya çıktığı sayılır.

Eğer orijinal EÖA'deki bir bağlantı, oluşturulan bootstrap ağlarının %90'ında, %95'inde veya %99'unda (araştırmacının belirlediği güven eşiğine bağlı olarak) yeniden ortaya çıkıyorsa, bu bağlantının istatistiksel olarak anlamlı ve kararlı olduğu kabul edilir. Bu, o iki varlık arasındaki güçlü ilişkinin, veri setindeki tesadüfi gürültüden kaynaklanmadığını gösterir. Eğer bir bağlantı, bootstrap ağlarının sadece %30'u veya %40'ı gibi düşük bir oranında görünüyorsa, bu bağlantı zayıf veya tesadüfi olarak kabul edilir ve istatistiksel açıdan güvenilir bulunmaz.

Sonuçlar

PM₁₀ için EÖA Yapısı ve Kümeleme Analizi

PM₁₀ kirleticileri için elde edilen EÖA yapısı, bölgesel kirlenme dinamiklerinin mekânsal olarak kümelendiğini göstermektedir.

Kayseri, ölçüm yapılan tüm alt istasyonlarıyla birlikte güçlü bir “kentsel endüstriyel kümelenme” sergilemektedir. OSB, Melikgazi, Hürriyet ve Talas gibi istasyonların aynı yapı altında toplanması kentin bütüncül bir PM₁₀ kirliliği problemi yaşadığını göstermektedir. Ankara istasyonları büyük bir alt küme oluşturarak PM₁₀ açısından bölgesel dominasyonu göstermektedir. EÖA yapısında Ankara istasyonlarının birbirine sıkı bağlarla bağlanması bu kirleticinin Ankara’da yüksek mekânsal bağımlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Konya, özellikle Karatay, Trafik ve Meram istasyonları ile birlikte ikinci büyük kümeyi oluşturmaktadır. Daha küçük şehirler (Aksaray, Nevşehir, Kırıkkale, Niğde vb.) büyük PM₁₀ merkez kümelerine “dışarıdan bağlanan” uç noktalar olarak görünmekte, bu da kirleticinin bu şehirlerde daha bağımsız seyrettiğini göstermektedir.

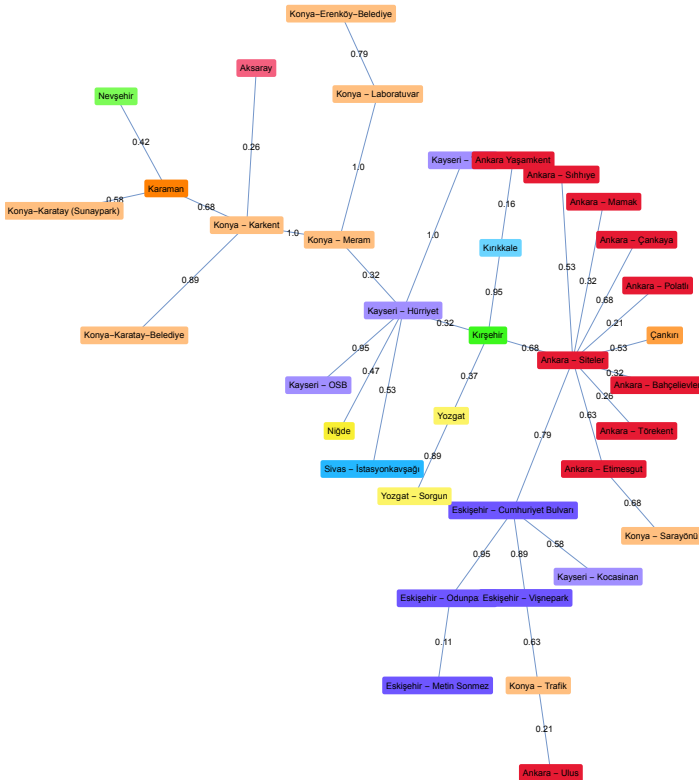
Şekil 3 CO kirleticisi için elde edilen EÖA yapısı.



SO₂ için EÖA Yapısı ve Kümeleme Analizi

SO₂ korelasyon yapısı, PM₁₀'a göre daha parçalı, ancak belirli şehir gruplarında sıkılaşan ilişkilere sahiptir. Konya istasyonları (Karatay, Meram, Bosna, Trafik vb.) SO₂ açısından belirgin bir çekirdek küme oluşturur; özellikle sanayi ve yoğun trafik bölgeleri ağın merkezine yerleşmiştir. Ankara istasyonları PM₁₀'daki kadar yoğun bir merkez oluşturmamakta, daha dağınık fakat birbirine bağlı alt kümeler halinde gözlenmektedir. Kayseri OSB ve Kırıkkale istasyonları yüksek SO₂ bağımlılığı nedeniyle EÖA'nın önemli merkezi düğümlerinden biri haline gelmektedir. Nevşehir, Aksaray ve Kırşehir gibi şehirler yine ağın uç noktalarında fakat SO₂'de PM₁₀'dan daha bağımlı şekilde görünmektedir.

Şekil 4 SO₂ kirleticisi için elde edilen EÖA yapısı.



Kaynakça

- Coğrafyaharita, (<http://cografyaharita.com/haritalarim/4mic-anadolu-bolge-iiller-haritasi.png>) Site Erişim Tarihi: 16.09.2024
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907–1918.
- SIMCBS, <https://sim.csb.gov.tr/Intro/ParametersMeta> Site Erişim Tarihi: 07.10.2024
- UHKIA, <https://sim.csb.gov.tr/Services/AirQuality> Site Erişim Tarihi: 16.09.2024
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. WHO Press.

