

# ASAL GAZ İZOTOPLARI YENİ JEOTERMAL KAYNAKLARIN KEŞFİNDE ÖNCÜ OLABİLİR Mİ?

Halim MUTLU  
Nilgün GÜLEÇ  
Duru ARAL

## ÖZET

Jeotermal enerjinin büyük bir bölümü volkanizmanın aktif olduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Ancak yeni araştırmalar jeotermal potansiyelin sadece volkanizma ile sınırlı kalmayıp derin fay düzlemleri boyunca alt kabuğa kadar inen ve ısınarak yüzeye yükselen meteorik su akışları ile de yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Açılmalı tektonik rejim etkisiyle kırılğan üst kabuk ile sünek alt kabuk arasındaki sınır boyunca geçirimsizliğin artması ve derin fayların uçucular için uygun kanal görevi üstlenmesi manto ve/veya kabuk kökenli akışkanların kolaylıkla yüzeye taşınmasına olanak sağlar. Bu kapsamda, başta helyum olmak üzere diğer asal gaz ve karbon izotopları, jeokimyasal sinyallerin aksine, akışkanın türediği rezervuar kaynağına yönelik önemli ipucu sunarlar.  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (R) veya atmosferdeki helyum bileşimine göre oranlanmış şekli ile ( $R/R_A$ ) ifade edilen helyum izotop değerleri manto kaynaklı akışkanlarda yüksek iken ( $8 - 30 R_A$ ) kabuksal litolojilerden türemiş akışkanlarda ise oldukça düşüktür ( $0.05 R_A$ ). Bununla birlikte, hidrotermal gaz salınımı, kalsit çökmesi ( $\text{CO}_2$  kaybı) ile manto ve çeşitli kabuk kökenli uçucuların karışımı gibi çeşitli ikincil süreçler He ve diğer asal gaz izotop bileşimini önemli ölçüde etkilemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Asal gaz izotopları, manto, kabuk, jeotermal potansiyel.

## ABSTRACT

Most of geothermal energy is found in active volcanic areas. However, new investigations reveal that geothermal potential is not limited to volcanism but also closely related to meteoric waters flows through deep fault planes which penetrate the lower crust and then rise to surface while heated. As a result of deformations in the extensional tectonic regimes, permeability increase along the boundary between the brittle upper crust and ductile lower crust and the acting of deep faults as suitable conduit for volatile fluxes facilitate delivery of mantle and/or crustal fluids to the surface. In this context, contrary to geochemical signals, noble gas (particularly helium) and carbon isotopes are definitive tracers for the source of reservoir from which fluids are derived. Helium isotope values which are expressed as  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (R) or  $R/R_A$  (proportional to the atmospheric helium composition) are high in mantle-derived fluids ( $8 - 30 R_A$ ) and extremely low in fluids from crustal lithologies ( $0.05 R_A$ ). In addition, various secondary processes such as hydrothermal degassing, calcite precipitation ( $\text{CO}_2$  loss) and mixing between mantle and crustal volatiles greatly modify isotopic compositions of helium and other noble gases.

**Key Words:** Noble gas isotopes, mantle, crust, geothermal potential.

## 1. GİRİŞ

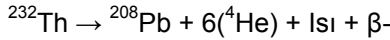
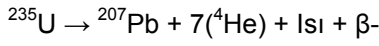
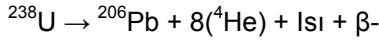
Jeotermal akışkanların izotop bileşimleri genellikle akış boyunca farklı mekan ve zamanlarda meydana gelen çeşitli kimyasal tepkimeler ve/veya diğer akışkanlar ile karışıma bağlı olarak değişikliğe uğrar. Ancak bazı durumlarda, akışkanlardaki eylemsiz (inert) element bileşimleri (örneğin asal gazlar) başlangıç koşulları ve kaynak rezervuara yönelik izotopik kayıtlar değişmeksizin korunabilir. Korunumlu özellik sergileyen asal gazlar (He, Ne, Ar, Kr, ve Xe) ısı ve akışkan kaynağının tespit edilmesinde kullanılan en önemli izleyicilerdir. Örneğin, mantonun helyum izotopik bileşimi yer kabuğuna oranla yaklaşık 1000 kat daha yüksektir [1].

$$(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{Manto}} = \sim 10^{-5}$$

$$(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{Kabuk}} = \sim 10^{-8}$$

Buna karşın, korunumlu olmayan bazı reaktif elementlerin (H, C, O, S ve N) izotop bileşimleri kimyasal bağların kırılması, elektron transferi veya faz değişimi (kaynama, yoğunlaşma gibi) gibi bir dizi süreci kapsayan kimyasal tepkimeler tarafından farklılaştırılabilir. Bu tür elementler akışkanların beslenme (meteorik) kaynağı, su/kayaç oranları ve kimyasal denge sıcaklıklarına yönelik önemli bilgi sağlarlar.

Yunanca Güneş (hêlios) anlamına gelen helyum sadece asal gazlar içinde değil Evrende en yaygın bulunan elementtir. Helyumun  $^3\text{He}$  ve  $^4\text{He}$  şeklinde iki adet izotopu vardır.  $^4\text{He}$  bolluğu  $^3\text{He}$ 'e göre oldukça yüksektir. Örneğin atmosferik  $^3\text{He}/^4\text{He}$  oranı ( $R_A$ )  $1.39 \times 10^{-6}$  civarındadır [2, 3]. Yerküredeki  $^4\text{He}$  tümüyle uranyum ve toryumun radyoaktif bozunması sonucu oluşur. Ancak  $^3\text{He}$ 'ün tamamına yakını ilksel kökenlidir. Çok az kısmı doğal trityumun ( $^3\text{H}$ ) bozunmasından (trityujenik helyum) meydana gelir.



Neonun  $^{16}\text{Ne}$ 'dan  $^{34}\text{Ne}$ 'e kadar uzanan 19 adet izotopu mevcuttur. Bunlardan  $^{20}\text{Ne}$  (%90,5),  $^{21}\text{Ne}$  (%0,3) ve  $^{22}\text{Ne}$  (%9,2) duraylı diğerleri ise radyoaktif olup çok kısa ömürlüdür.  $^{21}\text{Ne}$  bolluğu nükleer tepkimelere bağlı olarak değişim gösterir (nükleojenik değişim) [4]. Bu üç izotopun kendi aralarındaki oranlar değişik rezervuarlar için oldukça farklı değerler gösterir. Örneğin  $(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{Atm}} = 9.5 - (^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{Güneş}} = 13.5$ .

Argonun  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{38}\text{Ar}$  ve  $^{40}\text{Ar}$  şeklinde üç adet duraylı izotopu vardır. Kütle olarak argonun tamamına yakınını oluşturan  $^{40}\text{Ar}$  tümüyle  $^{40}\text{K}$ 'ın bozunması sonucu ortaya çıkmıştır. Helyum ve neona göre daha ağır olan argon uzaya kaçmadığından yerküredeki argon bütçesinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Hesaplamalar argonun atmosfer ve alt kabukta eşit miktarda biriktiğini ancak gaz salınımı nedeniyle üst kabuğun jeolojik zaman içinde giderek argon bakımından tüketildiğini göstermiştir [5].

Kriptonun altı adet duraylı ( $^{78}\text{Kr}$ ,  $^{80}\text{Kr}$ ,  $^{82}\text{Kr}$ ,  $^{83}\text{Kr}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  ve  $^{86}\text{Kr}$ ) ve 1 adet radyoaktif ( $^{81}\text{Kr}$ ) izotopu mevcuttur.  $^{238}\text{U}$ 'un doğal füzyonu ile çok düşük miktarlarda kripton üretilmektedir. Sığ derinlerde uçuculuğu artan kriptonun  $^{81}\text{Kr}$  izotopu (yarılanma ömrü: 250,000 yıl) yeraltı sularının yaşlandırılması için oldukça uygundur.

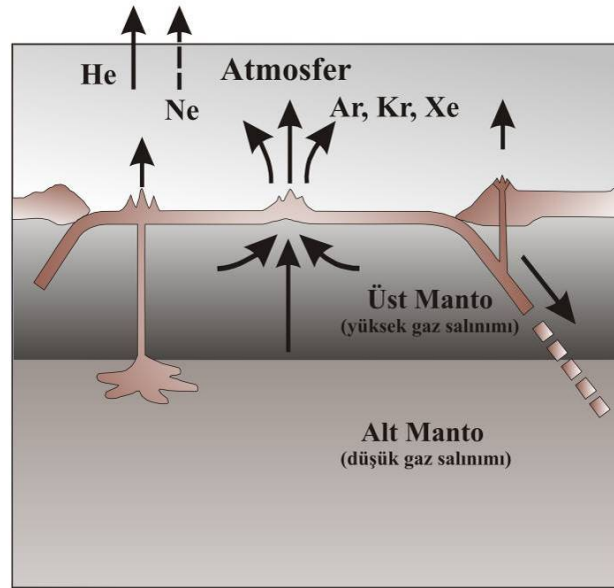
Ksenon dokuz izotopu olan ağır bir asal gazdır. Yeryüzündeki ksenon bolluğu, doğada tükenmiş radyoaktivite formları ve  $^{238}\text{U}$ 'un doğal füzyonu şeklinde 2 tür radyoaktif bozunma ile ilişkilidir. Ksenon izotoplarından  $^{130}\text{Xe}$  söz konusu süreçler neticesinde oluşmadığından referans izotop olarak kullanılır. Ksenon izotop verileri genel olarak  $^{134}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$  veya  $^{136}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$  (uranojenik ve plütojenik ksenon) oranına karşılık  $^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$  (iyotojenik) grafikleri şeklinde değerlendirilir.

## 2. YERKÜREDEKİ ASAL GAZ BOLLUKLARI

Manto, kabuk ve atmosfer asal gazların yerküredeki başlıca rezervuarlarını teşkil etmektedir (Şekil 1). Asal gaz ölçümlerinde referans (standart) olarak kullanılan yerküre atmosferinin asal gaz izotop bileşimleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Atmosferdeki Asal Gaz İzotop Bileşimleri (Koyu Renk ile Gösterilen İzotoplar Referans Olarak Kullanılmaktadır) [6].

İzotop	Nispi bolluk	Molar bolluk yüzdesi
<sup>3</sup> He	$(1.399 \pm 0.013) \times 10^{-6}$	0.000140
<b><sup>4</sup>He</b>	<b>≡ 1</b>	<b>100</b>
<sup>20</sup> Ne	9.80 ± 0.08	90.50
<sup>21</sup> Ne	0.0290 ± 0.0003	0.268
<b><sup>22</sup>Ne</b>	<b>≡ 1</b>	<b>9.23</b>
<b><sup>36</sup>Ar</b>	<b>≡ 1</b>	<b>0.3364</b>
<sup>38</sup> Ar	0.1880 ± 0.0004	0.0632
<sup>40</sup> Ar	295.5 ± 0.5	99.60
<sup>78</sup> Kr	0.6087 ± 0.0020	0.3469
<sup>80</sup> Kr	3.9599 ± 0.0020	2.2571
<sup>82</sup> Kr	20.217 ± 0.004	11.523
<sup>83</sup> Kr	20.136 ± 0.021	11.477
<b><sup>84</sup>Kr</b>	<b>≡ 100</b>	<b>57.00</b>
<sup>86</sup> Kr	30.524 ± 0.025	17.398
<sup>124</sup> Xe	2.337 ± 0.008	0.0951
<sup>126</sup> Xe	2.180 ± 0.011	0.0887
<sup>128</sup> Xe	47.15 ± 0.07	1.919
<sup>129</sup> Xe	649.6 ± 0.9	26.44
<b><sup>130</sup>Xe</b>	<b>≡ 100</b>	<b>4.070</b>
<sup>131</sup> Xe	521.3 ± 0.8	21.22
<sup>132</sup> Xe	660.7 ± 0.5	26.89
<sup>134</sup> Xe	256.3 ± 0.4	10.430
<sup>136</sup> Xe	217.6 ± 0.3	8.857

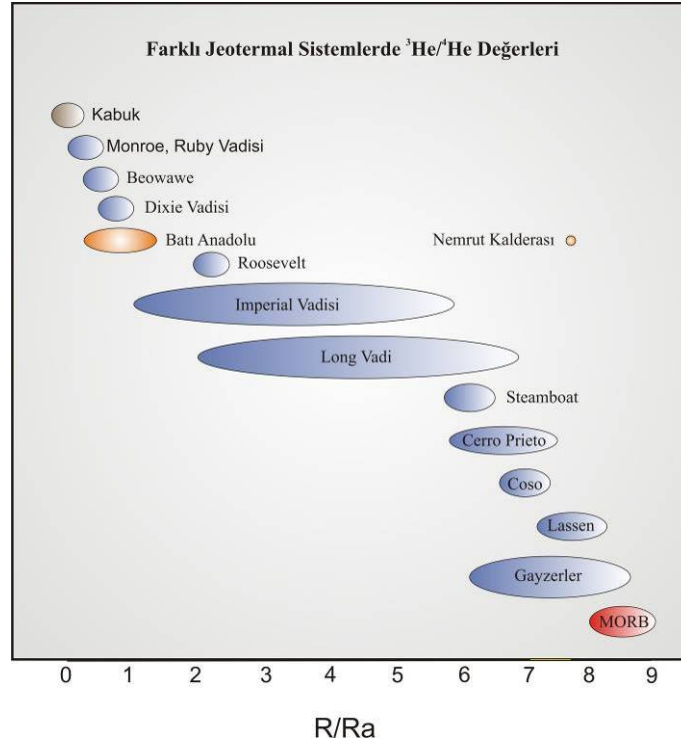


**Şekil 1.** Yerküredeki Akışkanlardaki He İzotop Bileşimleri [7].

## 2.1. Helyum İzotop Jeokimyası

Katı yerküreden ilksel kökenli uçucuların salınımına yönelik ilk kuvvetli bulgu He izotoplarının incelenmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Atmosferik He izotop bileşimi ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ :  $R_A = 1.4 \times 10^{-6}$ ) iyi bir referans teşkil etmesine karşın yerküredeki uçucuların kökenine yönelik önemli bir değer taşımamaktadır. Bunun nedeni uzaya kaçmadan önce helyumun atmosferde sadece 1 milyon yıl kadar kalması ve bu elemente ait izotopların farklı kaynaklardan türemesidir [8].  $^3\text{He}/^4\text{He}$  oranı  $0.01 R_A$  civarında olan radyojenik helyum esas olarak  $^4\text{He}$ 'ten oluşmaktadır [9]. Ancak okyanus ortası sırtlarda yürütülen helyum izotop ölçümleri manto-kaynaklı okyanus ortası sırt bazaltlarına (MORB) ait  $^3\text{He}/^4\text{He}$  oranlarının atmosferik değerden oldukça fazla olduğunu ortaya koymuştur (ortalama  $8 R_A$ ) [10]. Bu nedenle, mantosal helyum yerkürenin oluşumu sırasında tutulan ve yüksek  $^3\text{He}/^4\text{He}$  oranına sahip "ilksel" helyum içermektedir. Jüpiter atmosferinde tespit edilen  $^3\text{He}/^4\text{He} = 120 R_A$  değeri Güneş Bulutsusu helyum izotop bileşimi için iyi bir tahmin olup bu oran aynı zamanda yerkürenin başlangıç değeri olarak kabul edilmektedir [11].

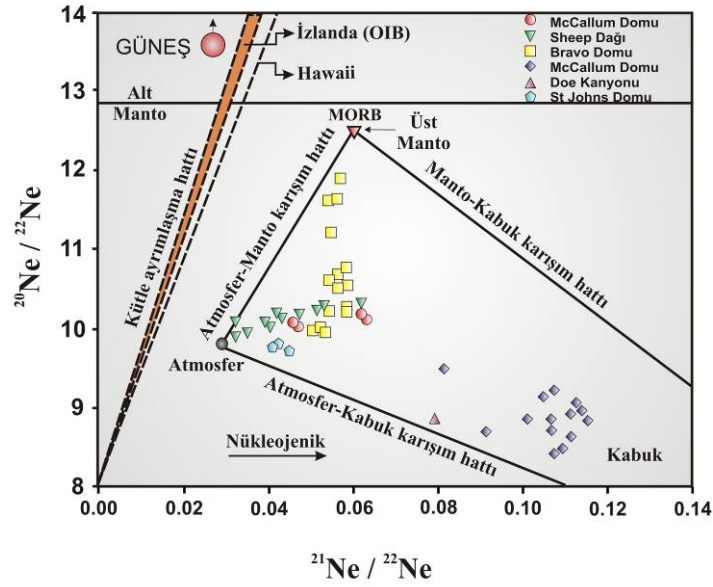
Farklı tektonik ortamlarda oluşan mağmatik kayalarda ölçülen helyum izotop değerleri aynı ortamlardaki jeotermal akışkanlarda da tespit edilmiştir. Şekil 2'de dünyanın değişik tektonik rejimlerinden örneklenen jeotermal akışkanların (su veya gaz) helyum izotop bileşimleri gösterilmiştir. Açılma rejimlerine ait helyum izotop değerleri iki uç üye olarak alınan kabuk ve manto arasında oldukça farklı yönelimler sergilemektedir.



**Şekil 2.** Jeotermal Akışkanlardaki He İzotop Bileşimleri (Kabuk: [12]; Monroe Ruby valley: [13]; Beowawe: [14]; Dixie valley: [15]; Batı Anadolu ve Nemrut Kalderası: [16]; Roosevelt: [13]; Imperial valley: [17]; Long Valley: [18]; Steamboat: [19]; Cerroprieto: [17]; Coso: [13]; Lassen: [20]; Gayzerler: [19]; MORB: [1]).

## 2.2. Neon İzotop Jeokimyası

Atmosfer, kabuk, manto ve Güneşe ait üçlü Ne izotop bileşimleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Güneşin  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  oranı yerküre rezervuarlarına göre oldukça yüksektir. Güneş rüzgarlarından elde edilen  $13.8 \pm 0.1$  civarındaki  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  oranının ilksel Güneş Bulutsusu bileşimini yansıttığı düşünülmektedir [21].



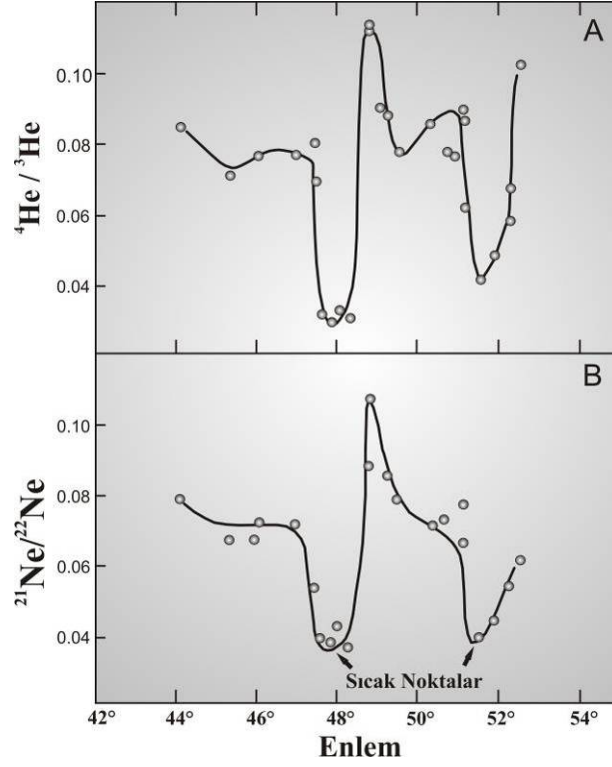
**Şekil 3.** Yerküredeki Rezervuarlar ve Çeşitli Jeotermal Sahalardaki Gazlara Yönelik Neon İzotop Bileşimleri [22].

Yerküre atmosferinin yaklaşık 9.8 civarındaki  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  oranı meteorit ve Güneş bileşenlerinin karışımı veya Güneşsel neonun ayrılaşmasını yansıtmaktadır. Güneş (0.033) ve atmosferik (0.029)  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  oranları Güneşsel neonun ayrılaşması ve nükleojenik  $^{21}\text{Ne}$  ilavesi ile oldukça uyumludur [23].

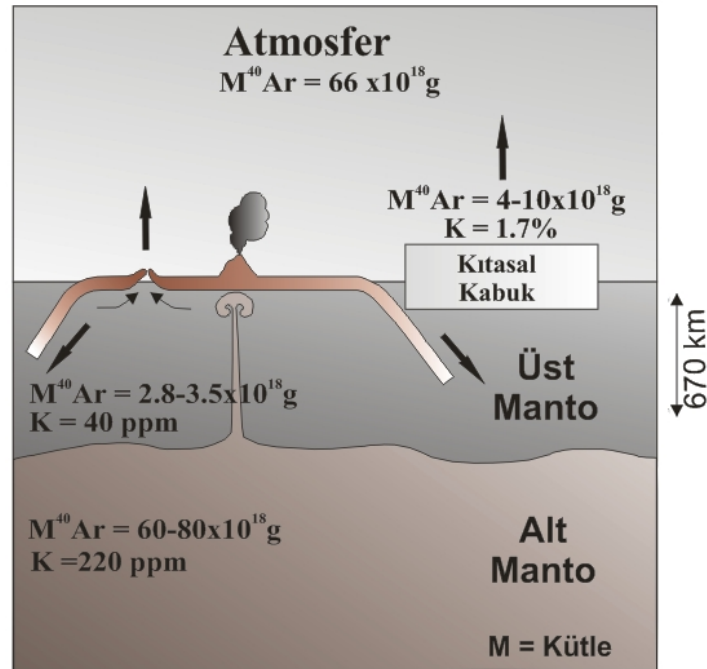
Değişik tektonik ortamlardan elde edilen neon izotop ölçümleri iki farklı karışım hattını (Atmosfer–MORB ve Atmosfer–Güneş hatları) ortaya koymuştur. Atmosfer–MORB hattı Atmosfer–Güneş hattına göre daha düşük bir eğime sahiptir. Buna karşın, OIB (okyanus adası bazaltları) da Güneş hattına paralel bir yönelim sergilemektedir. Bu veriler mantonun 2 farklı katmandan oluştuğunu desteklemektedir; düşük  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  oranları ile temsil edilen Alt Manto ve nükleojenik  $^{21}\text{Ne}$  katkısı sonucu yüksek  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  oranları ile karakterize olan Üst Manto (MORB). Asal gazlar içinde en hafifleri olan helyum ve neon radyojenik ve/veya nükleojenik izotop üretimi nedeniyle manto katmanlaşmasını mükemmel şekilde belirtmektedir. Şekil 4’de gösterilen Orta Atlantik Sırtı boyunca  $^4\text{He}/^3\text{He}$  ve  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  oranlarındaki değişimler mantoda sıcak noktaların (hot spots) varlığını ortaya koymaktadır.

### 2.3. Argon İzotop Jeokimyası

Argonun yerkürenin evrimini anlamada He ve Ne’ a göre oldukça büyük avantajları vardır. Ağır olmasından dolayı atmosferde alıkonulmakta ve böylece yerküre için Ar bütçesi hesabı yapılabilmektedir.  $^{40}\text{Ar}$ ’nın tamamı  $^{40}\text{K}$ ’in bozunması sonucu oluşmaktadır. Ancak atmosferik kirlenmeye karşı oldukça hassas olması argonun en büyük dezavantajıdır. MORB yastık lavlarından elde edilen  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  oranı 30,000 civarındadır (atmosfer için bu oran 296; Tablo 1). Silikat yerkürenin ortalama potasyum içeriği 250–280 ppm olduğu ve  $^{40}\text{K}$ ’in toplam potasyumun  $1.16 \times 10^{-4}$ ’ünü oluşturduğu göz önüne alındığında, 4.55 milyar yıl boyunca yerkürede üretilen  $^{40}\text{Ar}$  miktarı  $140\text{--}156 \times 10^{18}$  gr olacaktır. Atmosferdeki toplam argon bolluğu  $66 \times 10^{18}$  gr civarındadır. Kıtasal kabuktaki argonun en fazla  $4\text{--}10 \times 10^{18}$  gr olduğu kabul edilirse geriye kalan  $60\text{--}88 \times 10^{18}$  gr argon yerküre içindeki kayıp argona karşılık gelmektedir. Bu sonuçlar yerküredeki argonun ancak yarısının salındığına işaret etmektedir [7]. MORB için ölçülen  $^4\text{He}/^3\text{He}$  ve  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  oranları üst mantoda çok az  $^{40}\text{Ar}$  bulunduğunu ( $1.8\text{--}2.4 \times 10^{18}$  gr) göstermektedir. Bu değer manto için tahmin edilen kütle için oldukça altındadır. Tüm bu değerlendirmeler mantodaki Ar asıl kaynağının alt manto olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, He ve Ne izotoplarının da vurguladığı üzere, mantonun iki-katmanlı bir yapıya sahip olduğunu teyit etmektedir (Şekil 5).

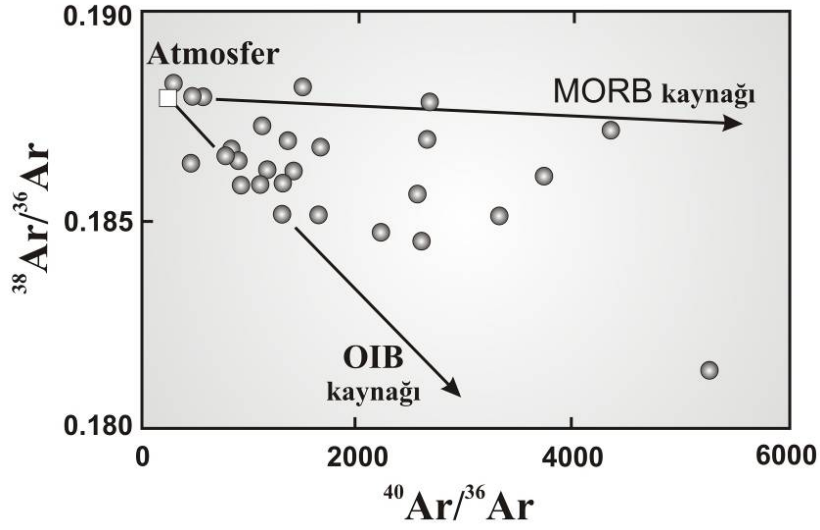


Şekil 4. Orta Atlantik Sırtı Boyunca (A)  $^4\text{He}/^3\text{He}$  ve (B)  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  Oranlarındaki Değişimler [24].



Şekil 5. Yerküredeki Argon Kütle Dengesi [7].

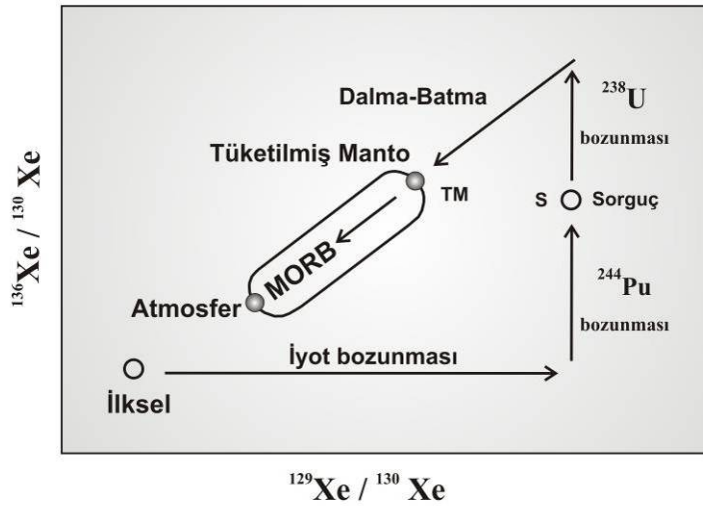
$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  ve  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  oranlarının kullanıldığı üçlü izotop diyagramında da (Şekil 6), Atmosfer–MORB (okyanus ortası sırtı bazaltları) ve Atmosfer–OIB (okyanus adası bazaltları) şeklinde mantoya ait iki farklı yönelim dikkat çekmektedir.



Şekil 6. Argon Üçlü İzotop Diyagramı [25].

#### 2.4. Ksenon İzotop Jeokimyası

Fizyojenik ve iyotojenik ksenonun evrimi Şekil 7'de gösterilmiştir [26]. İyot ve plütonyum bozunmasına bağlı olarak, alt mantodaki ksenonun ilksel güneş veya gezegensel bileşimden günümüz alt manto (S) bileşimine doğru evrimleştiği düşünülmektedir. Alt mantodan kaçan ksenona üst mantoda gerçekleşen uranyum bozunmasından açığa çıkan ksenon eşlik eder. Bu ksenon daha sonra dalma-batma zonlarındaki atmosferik ksenon ile karışarak üst manto (TM) bileşimine erişir. MORB ksenonu ise atmosfer ve tüketilmiş manto (TM) arasındaki karışımı karşılık gelmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Fizyojenik Ksenonun Evrimini Gösteren Kavramsal Model [26].

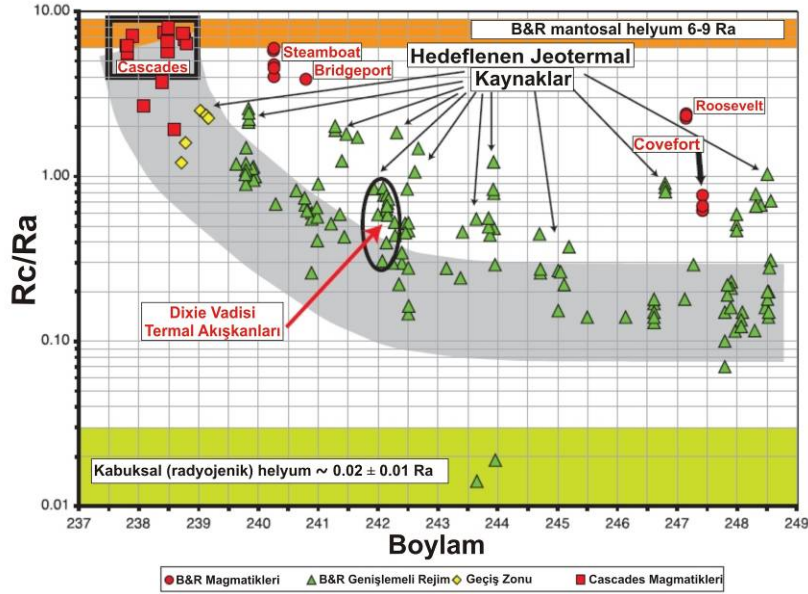
### 3. JEOTERMAL ARAŞTIRMALARDA ASAL GAZ UYGULAMALARI

Dünyanın en büyük yanıl atımlı faylarından biri olarak kabul edilen San Andreas Fayından (SAF) boşalan akışkanların kaynağı ve bunların SAF dinamiğine olan etkileri su kimyası ve izotop çalışmaları

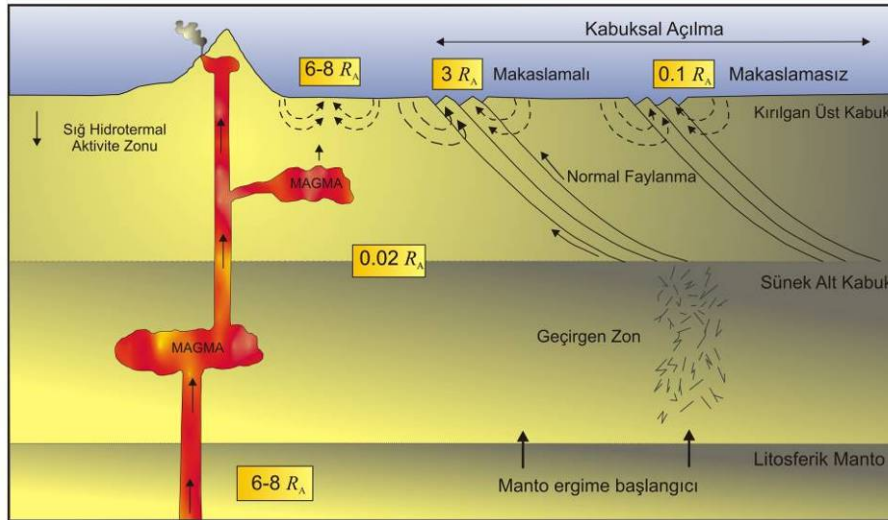




derinlere doğru (alt kabuk ve muhtemelen litosferik manto) parçalanmasına ve/veya genişlemesine yol açabilir (Şekil 10). Yüksek geçirgenlikli bu zonlar akışkanların kolaylıkla yüzeye taşınması için uygun kanal görevi üstlenmişlerdir [29, 31].



**Şekil 9.** Kuzey Amerika'daki Cascades Volkanikleri ve Basin And Range Bölgesindeki Jeotermal Suların Helyum İzotop Bileşimlerinin Boylama Göre Değişimi [29].



**Şekil 10.** Manto Akışkanlarının Kabuk Boyunca Kaçış Mekanizmalarını Gösteren Şematik Kesit [31].

Yerküredeki ısının yaklaşık %75'i uranyum ve toryumun radyoaktif bozunmasından ortaya çıktığı için helyum ve ısı arasında mükemmel bir ilişki mevcuttur. Bu ilişki kullanılarak herhangi bir jeotermal rezervardaki ısı içeriği ve kaynağı değerlendirilebilir. Çeşitli jeotermal sistemlerdeki akışkanların  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ve  $Q(\text{ısı})/^3\text{He}$  oranlarının gösterildiği Şekil 11'de, Reykjavik (İzlanda), Alto Peak (Filipinler) ve Northwest Gayzerleri (Kaliforniya) jeotermal sistemlerindeki ısının tamamına yakınının manto kaynaklı olduğu görülmektedir. Buna karşın, Dixie Vadisi ve Beowave (Nevada) jeotermal rezervuarlarındaki ısının yaklaşık %15'i ( $^3\text{He}$ 'ün  $\sim 95$ 'i) mantodan türemiştir. Dixie Vadisine benzer bir açılma rejimi altında gelişen Batı Anadolu jeotermal sistemlerdeki ısının değişik oranlarda manto ve kabuk kaynaklı olduğu ortaya konmuştur (Şekil 11) [16; 32, 33].



rastlanması bu tezi güçlendirmektedir [36]. Uzaklaşan levha sınırlarında ise bu oran oldukça düşüktür. Magmatik bileşenin He içeriği meteorik bileşenden daha yüksektir ( $He/Ar \approx 0.1$ ).

Kabuksal bileşen ise büyük oranda radyojenik helyumdan meydana gelmektedir.  $^4He$  bileşiminin gazların kabukta bulunma süresi ile paralel olarak artması beklenir.

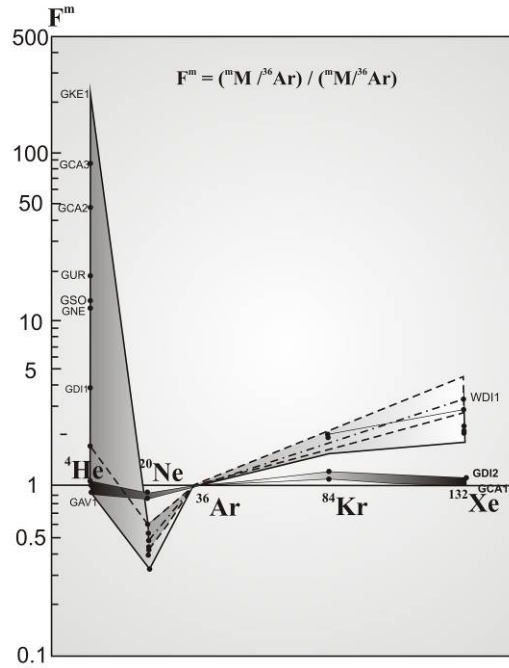
Oksijen gazının eklenmesi nedeniyle serbest hava (atmosfer) her zaman kirlenmenin belirtisidir.  $N_2/Ar$  oranı 84 civarındadır.

Asal gazların bolluk dereceleri aşağıda verilen denklem ile grafikleştirilebilir [37, 38].

$$F = \frac{({}^m X / {}^{36} Ar)_{\text{Örnek}}}{({}^m X / {}^{36} Ar)_{\text{Atmosfer}}} \quad (1)$$

Denklemden  ${}^m X$  yerine  ${}^4He$ ,  ${}^{20}Ne$ ,  ${}^{36}Ar$ ,  ${}^{84}Kr$  ve  ${}^{132}Xe$  izotop bileşimleri kullanılmaktadır. Şekil 13'de Anadolu'nun çeşitli bölgelerindeki termal derlenen akışkanlarda ağır asal gazların aşamalı şekilde zenginleştiği görülmektedir. Helyum dışındaki diğer asal gazların genellikle atmosfer kökenli oldukları ( $F \approx 1$ ) buna karşın örneklerin çoğunda helyumun kabuk veya mantodan türediği dikkat çekmektedir.

Helyum izotop bileşimlerinin diğer asal gazlara göre daha geniş bir aralıkta seyretmesi helyumun jeotermal ve petrojenetik çalışmalarda neden tercih edildiğini açıklamaktadır.



**Şekil 13.** Anadolu'nun Çeşitli Bölgelerindeki Termal Akışkanların Asal Gaz Bolluk Dereceleri [39, 40].

## SONUÇ

Asal gazlar eylemsiz (inert) element olmaları nedeniyle rezervuardaki tepkimelerden ve kaynak bölgeden yeryüzüne yükselirken karşılaştıkları kimyasal ve fiziksel süreçlerden (kaynama, yoğunlaşma gibi) en az etkilenirler. Bu özellik asal gazları jeotermal ve petrojenetik çalışmaların vazgeçilmez bir parçası haline getirmiştir. Diğer soy gazlara göre daha hafif olan helyum ve neon

jeotermal akışkanların türedikleri rezervuar konusunda kesin bulgular sunmaktadır. Asal gazların sudaki çözünürlükleri yüksek sıcaklıklarda ( $T > 150^{\circ}\text{C}$ ) oldukça düşüktür. Bu nedenle faz ayrımı (kaynama) gibi işlevler sonucunda kalıntı akışkan bu gazlarca fakirleşecektir. Asal gazların bu hususiyeti jeotermal rezervuarlara geri basılacak soğuk akışkanların yeraltındaki hareketlerinin hassas şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır [41].

## KAYNAKLAR

- [1] FARLEY, K.A., NERODA, E., “Noble gases in the Earth’s mantle”, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 26, 189-218, 1998.
- [2] MAMYRIN, B.A., ANUFRIEV, G.S., KAMENSKY, I.L, TOLSTIKHIN, I.N., “Determination of the isotopic composition of atmospheric helium”, Geochemistry International, 7, 498-505, 1970.
- [3] CLARKE, W.B., JENKINS, W.J., TOP, Z., “Determination of tritium by mass spectrometric measurement of  $^3\text{He}$ ”, International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 27, 515-522, 1976.
- [4] CRAIG, H., LUPTON, J.E., “Primordial neon, helium and hydrogen in oceanic basalts”, Earth and Planetary Science Letters, 31, 369-385, 1976.
- [5] ALLÈGRE, C.J., HOFMANN, A.W., O’NIONS, R.K., “The argon constraint on mantle structures”, Geophysical Research Letters, 23, 3555-3557, 1996.
- [6] PORCELLI, D., BALLENTINE, C.J., WIELER, R., “Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry”, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America and the Geochemical Society, 844 pp., 2002.
- [7] ALLÈGRE, C.J., “Isotope Geology”, Cambridge University Press, 2008.
- [8] TORGERSEN, T., “Terrestrial helium degassing fluxes and the atmospheric helium budget: Implications with respect to the degassing processes of continental crust”, Chemical Geology, 79, 1-14, 1989.
- [9] MORRISON, P., PINE, J., “Radiogenic origin of the helium in rock”, Annals of the New York Academy of Sciences, 62, 71-92, 1955.
- [10] CLARKE, W.B., BEG, M.A., CRAIG, H., “Excess  $^3\text{He}$  in the sea: evidence for terrestrial primordial helium”, Earth and Planetary Science Letters, 6, 213-220, 1969.
- [11] MAHAFFY, P.R., DONAHUE, T.M., ATREY, S.K., OWEN, T.C., NIEMANN, H.B., “Galileo probe measurements of D/H and  $^3\text{He}/^4\text{He}$  in Jupiter’s atmosphere”, Space Sci. Rev., 84, 251-263, 1998.
- [12] ANDREWS, J.N., “The isotopic composition of radiogenic He and its use to study groundwater movement in confined aquifer”, Chemical Geology, 49, 339-351, 1985.
- [13] WELHAN, J.A., POREDAI, R.J., RISON, W., CRAIG, H., “Helium isotopes in geothermal and volcanic gases of the western United States, I. Regional variability and magmatic origin”, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 34, 185-199, 1988.
- [14] KENNEDY, B.M., FISCHER, T.P., SHUSTER, D.L., “Heat and helium in geothermal systems”, Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 24-26, 2000.
- [15] KENNEDY, B.M., KHARAKA, Y.K., EVANS, W.C., ELLWOOD, A., DEPAOLO, D.J., THORSDEN, J., AMBATS, G., MARINER, R.H., “Mantle fluids in the San Andreas fault system, California”, Science, 278, 1278-1281, 1997.
- [16] GÜLEÇ, N., HILTON, D.R., MUTLU, H., “Helium isotope variations in Turkey: relationship to tectonics, volcanism and recent seismic activities”, Chemical Geology, 187, 129-142, 2002.
- [17] WELHAN, J.A., POREDA, R.J., LUPTON, J.E., CRAIG, H., “Gas chemistry and helium isotopes at Cerro Prieto”, Geothermics, 8, 241-244, 1979.
- [18] HILTON, D.R., “The helium and carbon isotope systematics of a continental geothermal system: results from monitoring studies at Long Valley caldera (California, U.S.A.)”, Chemical Geology, 127, 269-295, 1996.
- [19] TORGERSEN, T., JENKINS, W.J., “Helium isotopes in geothermal systems: Iceland, The Geysers, Raft River and Steamboat Springs”, Geochimica et Cosmochimica Acta, 46, 739-748, 1982.
- [20] CRAIG, H., LUPTON, J.E., WELHAN, J.A., POREDA, R., “Helium isotope ratios in Yellowstone and Lassen Park volcanic gases”, Geophysical Research Letters, 5, 897-900, 1978.

- [21] BENKERT, J.P., BAUR, H., SIGNER, P., WIELER, R., “He, Ne, and Ar from solar wind and solar energetic particles in lunar ilmenites and pyroxenes”, *Journal of Geophysical Research*, 98, 147-162, 1993.
- [22] GILFILLAN, S.M.V., BALLENTINE, C.J., HOLLAND, G., BLAGBURN, D., LOLLAR, B.S., STEVENS, S., SCHOELL, M., CASSIDY, M., “The noble gas geochemistry of natural CO<sub>2</sub> gas reservoirs from the Colorado Plateau and Rocky Mountain provinces, USA”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 1174-1198, 2008.
- [23] PORCELLI, D., BALLENTINE, C.J., “Models for Distribution of Terrestrial Noble Gases and Evolution of the Atmosphere”, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47, 481-538, 2002.
- [24] SARDA, P., MOREIRA, M., STAUDACHER, T., SCHILLING, J.G., ALLÈGRE, C.J., “Rare gas systematics on the southernmost mid-Atlantic ridge: Constraints on the lower mantle and the Dupal source”, *Journal of Geophysical Research*, 105, 5973-5996, 2000.
- [25] DICKIN, A.P., “Radiogenic Isotope Geology”, Cambridge University Press, 2005.
- [26] PORCELLI, D., WASSERBURG, G.J., “Mass transfer of helium, neon, argon and xenon through a steady-state upper mantle”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 4921-4937, 1995.
- [27] OXBURGH, E.R., O’NIONS, R.K., “Helium loss, tectonics, and the terrestrial heat budget”, *Science*, 237, 1583-1588, 1987.
- [28] ALLARD, P., “Global emissions of helium-3 by subaerial volcanism”, *Geophysical Research Letters*, 19, 1479-1481, 1992.
- [29] KENNEDY, B.M., VAN SOEST, M.C., “Flow of mantle fluids through the ductile lower crust: helium isotope trends”, *Science*, 318, 1433-1436, 2007.
- [30] HAMMOND, W.C., THATCHER, W., “Contemporary tectonic deformation of the Basin and Range province, western United States: 10 years of observation with the Global Positioning System”, *Journal of Geophysical Research*, 109(B8), 8403, 2004.
- [31] HILTON, D.R., “The leaking mantle”, *Science*, 318, 1389-1390, 2007.
- [32] GÜLEÇ, N., HILTON, D.R., “Helium and heat distribution in Western Anatolia, Turkey. Relationship to active extension and volcanism”, *Geological Society of America Special Paper*, 409, 305-319, 2006.
- [33] MUTLU, H., GÜLEÇ, N., HILTON, D.R., “Helium-carbon relationships in geothermal fluids of western Anatolia, Turkey”, *Chemical Geology*, 247, 305-321, 2008.
- [34] GIGGENBACH, W.F., “Chemical techniques in geothermal exploration”, In: Franco D 'More, Editor, *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*, UNITAR/UNDP, Rome, Italy, pp. 119-142, 1991.
- [35] ELKINS, L.J., FISCHER, T.P., HILTON, D.R., SHARP, Z.D., MCKNIGHT, S., WALKER, J., “Tracing nitrogen in volcanic and geothermal volatiles from the Nicaraguan volcanic front”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 5215-5235, 2006.
- [36] MATSUO, S., SUSUKI, M., MIZUTANI, Y., “Nitrogen to argon ratio in volcanic gases”, In: Alexander, E.C. and Ozima, M., Editors, *Terrestrial Rare Gases*, Center for Academic Publishing Japan, Tokyo, pp. 17-25, 1978.
- [37] SUMINO, H., NOTSU, K., NAKAI, S., MASANORI, S., NAGAO, K., HOSOE, M., WAKITA, H., “Noble gas and carbon isotopes of fumarolic gas from Iwojima volcano, Izu-Ogasawara arc, Japan: implications for the origin of unusual arc magmatism”, *Chemical Geology*, 209, 153- 173, 2004.
- [38] SHIMIZU, A., SUMINO, H., NAGAO, K., NOTSU, K., MITROPOULOS, P., “Variation in noble gas isotopic composition of gas samples from the Aegean arc, Greece”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140, 321- 339, 2005.
- [39] NAGAO, K., MATSUDA, J.I., KITA, I., ERCAN, T., “Noble gas and carbon isotopic compositions in Quaternary volcanic area in Turkey”, *Bulletin of Geomorphology*, 17, 101-110, 1989.
- [40] ERCAN, T., MATSUDA, J.I., NAGAO, K., KITA, I., “Noble gas isotopic compositions in gas and water samples from Anatolia”, In: Erler, A., Ercan, T., Bingöl, E., Örcen, S., *Geology of the Black Sea Region: Proc. Int. Symposium on the Geology of the Black Sea Region*, Ankara, Turkey, pp. 197- 206, 1995.
- [41] KENNEDY, B.M., “Natural geochemical tracers for injectate fluids at Dixie Valley”, *Proc. 24th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, 24, 108-113, 1999.

## ÖZGEÇMİŞ

### Halim MUTLU

1962 İstanbul doğumludur. 1984 yılında İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Müh. Bölümünü bitirmiştir. 1988 yılında South Dakota School of Mines and Technology'den (Amerika Birleşik Devletleri) Yüksek Mühendis ve 1996 yılında da ODTÜ Jeoloji Müh. Bölümünden Doktor unvanını almıştır. 1988–1998 yılları arasında Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğünde görev yapmıştır. 1998 yılından beri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeoloji Müh. Bölümü Maden Yatakları ve Jeokimya Anabilim Dalında Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. İzotop jeokimyası, jeotermal sistemler, su-kayaç etkileşimi ve asal gaz jeokimyası konularında çalışmaktadır.

### Nilgün GÜLEÇ

1956 İstanbul doğumludur. Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde, sırasıyla, 1979 ve 1982 yıllarında tamamlamış, Doktora derecesini ise 1987 yılında University of Cambridge (İngiltere) 'den almıştır. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde 1979–1983 yılları arasında Asistan, 1987–1994 yılları arasında Yardımcı Doçent, 1994–2000 yılları arasında Doçent olarak çalışmıştır, 2000 yılından bu yana aynı üniversitede Profesör kadrosunda görev yapmaktadır. Uzmanlık alanı jeokimya ve izotop jeolojisi olup, petrojenez, cevherleşme kökenleri, jeotermal sistemler ve gaz jeokimyası konularında çalışmaktadır.

### Duru ARAL

1984 Eskişehir doğumludur. Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Jeoloji Müh. Bölümünde tamamlamıştır. 2009 yılından beri aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmakta ve Maden Yatakları ve Jeokimya Anabilim Dalında Doktora eğitimini sürdürmektedir.