



# Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



## KÖPRÜÖREN HAVZASI (KÜTAHYA) SU KAYNAKLARININ ÇEVRESEL İZOTOPLAR İLE İNCELEMESİ

### INVESTIGATION OF THE WATER RESOURCES IN KÖPRÜÖREN BASIN (KÜTAHYA) WITH ENVIRONMENTAL ISOTOPES

Şebnem ARSLAN\*

\* Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı Kampüsü, Ankara

Araştırma Makalesi

#### Anahtar Sözcükler:

Köprüören Havzası,  
İzotop, Karbon-14,  
Su-Kayaç İlişkisi, Yüzeysel Su,  
Yer Altı Suyu

#### ÖZ

Bu çalışmada Kütahya Köprüören Havzası'nda bulunan su kaynaklarının izotopik özellikleri ortaya konulmuştur. İncelenen örneklerin  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta\text{D}$  içerikleri sırasıyla kurak dönemde  $-10.84\%$  ile  $-7.09\%$  ve  $-73.6\%$  ile  $-53.3\%$  arasında, yağışlı dönemde ise  $-10.81\%$  ile  $-4.71\%$  ve  $-73.3\%$  ile  $-41.5\%$  arasında değişmektedir. Örneklerin çoğu Küresel Meteorik Su Doğrusu üzerinde olduğu halde bazıları bu doğrudan sapma göstermektedir. Bu sapmanın nedeni söz konusu örneklerin  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta\text{D}$  imzalarının buharlaşma ile değişmiş olmasına bağlanmıştır. Termal su örnekleri için su-kayaç etkileşiminin örneklerin  $\delta^{18}\text{O}$  içeriğinde değişikliğe neden olmadığı belirlenmiştir. Bunun nedeni sıcak su örneklerinin kuyubaşı ve rezervuar sıcaklıklarının düşük olmasına bağlanmıştır. Örneklerde belirlenmiş trityum içerikleri yağışlı dönemde  $\sim 0$  ile 6 TU, kurak dönemde ise  $\sim 0$  ile 8 TU arasında değişmektedir. Buna göre, yeraltısuyu örneklerinin bazıları güncel yağışlar ile beslenmiş, akiferde uzun süre kalmamış, sık dolaşımli sulardır. Bunun yanı sıra, düşük trityum içeriğine sahip örnekler (sıcak sular ve iki adet yeraltısuyu örneği) akiferde nükleer denemeler öncesinde girmiş, nispeten uzun dolaşımli sulardır. Bu örneklerin yeraltında kalış süresi ile ilgili daha detaylı bilgiye sahip olunabilmesi için  $\delta^{13}\text{C}$  ve  $^{14}\text{C}$ 'den yararlanılmıştır. 5 örnekte belirlenmiş  $\delta^{13}\text{C}$  ve modern karbon içerikleri sırasıyla  $-5\%$  ile  $-14.6\%$  ve 8.2 ile 78 pmc arasında değişmektedir. Bu örnekler için karbonat çözünmesine karşı düzeltilmiş  $^{14}\text{C}$  yaşlarına göre suların yeraltında kalış süreleri günümüzden 11500 yıl öncesine kadar uzanmaktadır. Dolayısıyla, havzada derin dolaşımli ve yaşlı suların (paleo su) varlığından bahsedilebilir.  $\delta^{13}\text{C}$  verilerine göre sıcak suların  $^{14}\text{C}$  konsantrasyonları su-kayaç etkileşimi sonucunda seyrelmiştir.

Geliş Tarihi: 24.02.2016

Kabul Tarihi: 24.03.2016

#### Keywords:

Köprüören Basin,  
Isotopes, Carbon-14,  
Water-Rock Interaction,  
Surface Water,  
Groundwater

#### ABSTRACT

In this study, the isotopic properties of the water resources located in Köprüören Basin are determined.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  contents of the samples respectively ranged from  $-10.84\%$  to  $-7.09\%$  and from  $-73.6\%$  to  $-53.3\%$  in dry season and ranged from  $-10.81\%$  to  $-4.71\%$  and  $-73.3\%$  to  $-41.5\%$  in wet season. Majority of the samples plotted along Global Meteoric Water Line although some of them show deviations from this line. The reason for the deviations are attributed to evaporative enrichment, modifying the original  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  signatures of the samples.  $\delta^{18}\text{O}$  content of the thermal samples are not modified as a result of water-rock interaction due to low wellhead and reservoir temperatures. Tritium concentrations for all samples range from  $\sim 0$  to 6 TU in wet season and from  $\sim 0$  to 8 TU in dry season. Accordingly, some of the groundwater samples are recharged from modern precipitation, their groundwater residence times are short and they have shallow circulation. Besides, samples with tritium concentrations close to detection limits (thermal water samples and two of the groundwater samples) were recharged before tritium from nuclear weapon tests and have relatively higher residence times. These samples were also analysed for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$  to get information about the residence times.  $\delta^{13}\text{C}$  and percent modern carbon contents of five samples range from  $-5\%$  to  $-14.6\%$  and from 8.2 to 78 pmc, respectively. The corrected  $^{14}\text{C}$  ages for these samples are up to 11500 years before present, thereby indicating the presence of paleowaters in the basin.  $\delta^{13}\text{C}$  data indicate that  $^{14}\text{C}$  contents of the thermal waters were diluted as a result of water-rock interaction.

## 1. Giriş

Son yıllarda dünyada nüfus artışı, endüstriyel gelişim, iklim değişikliği gibi pek çok etkene bağlı olarak artan su tüketimi ile su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin önemi gittikçe artmaktadır. Günümüzde ülkemiz su kaynakları açısından kıtlık

çeken ülkeler arasında yer almamakla beraber kentleşme, sanayileşme, sulama suyu ihtiyacındaki artış, artan nüfus gibi faktörler su kaynaklarımız üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Dolayısıyla, yenilenebilen fakat kısıtlı miktarda mevcut olan su kaynaklarının güvenilir ve sürdürülebilir gelişimi açısından yapılan klasik çalışmaların yanı sıra

\* Başvurulacak Yazar: Şebnem Arslan, E-posta: sebnem\_oken@yahoo.com, Telefon: +90 312 2033416, Faks: +90 312 2150487  
<http://dx.doi.org/10.19076/mta.46155>

geleneksel metodlara ek olarak ileri tekniklerin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır (Çifter ve Sayın, 2002). İzotop teknikleri hidrolojik ve hidrojeolojik amaçlı çalışmalarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Sulara doğal olarak bulunan çevresel izotopların değişimleri insanlar tarafından kontrol edilemediğinden dolayı hidrolojide izotopik değişimlerin izlenmesi ve değerlendirilmesi ile suların kökeni ve yenilenebilirliği, beslenme alanları ve dolaşım mekanizmaları, karışım süreçleri, yer altı suyu-yüzeysel suyu ilişkileri ve yeraltında suyun kalitesini etkileyen süreçlerin aydınlatılması gibi konularda bilgi sahibi olunabilmektedir (Clark ve Fritz, 1997). Dünyada ve ülkemizde çeşitli araştırmacılar çevresel izotopları yeraltısuyu akışı, yenilenebilirliği, yeraltı geçiş süresi, su sirkülasyonunun incelenmesi gibi çalışmalarda kullanmıştır (Schlosser vd., 1988; Clark vd., 1997; Bayarı vd., 2009; Çelik vd., 2013; Arslan vd., 2015).

Köprüören Havzası yaklaşık 320 km<sup>2</sup>lik drenaj alanı ile Kütahya ili Merkez İlçesinin batısında yer almaktadır (Şekil 1). Havza, Kütahya ve Eskişehir Ovalarının menbaında bulunduğu alandaki yüzeysel ve yer altı suyu kaynakları hem miktar hem kalite bakımından önemli olup Kütahya ve Eskişehir illerini kapsayan geniş bir bölgeyi ilgilendirmektedir. Bunun nedeni havzada yeraltısularından beslenen yüzeysel sularının Enne barajından Felent çayına, Felent çayından Porsuk çayına dahil olmalarıdır. Dolayısıyla, havzada su kaynakları ile ilgili yapılacak çalışmalar önem arz etmektedir. Türkiye'nin günümüzde işletilen tek gümüş yatağı, havzada Gümüşköy civarındaki metamorfik temel kayalarda, Erken Miyosen yaşlı volkanik kayalarda ve Pliyosen birimlerinde oluşmuştur. Üretim sırasında ortaya çıkan özellikle siyanürce zengin atıklar, atık barajlarında depolanmaktadır (Şekil 1). 2011 yılının Mayıs ayında barajlardan birinde meydana gelen çökme sonucunda bu tesisin güvenilirliği ve çevreye verilen zarar konusunda çalışmalar yapılmıştır (Arslan vd., 2013; Arslan ve Çelik 2015).

Bu çalışmada Köprüören Havzası su kaynaklarının izotopik imzalarının belirlenmesi, suların kökeninin, farklı proseslerin (buharlaşma, su-kayaç etkileşimi vb.) suların izotopik özellikleri üzerindeki etkisinin ortaya konması ve yer altı sularının akiferde kalış sürelerinin tayin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla oksijen, hidrojen ve karbonun kararlı izotopları

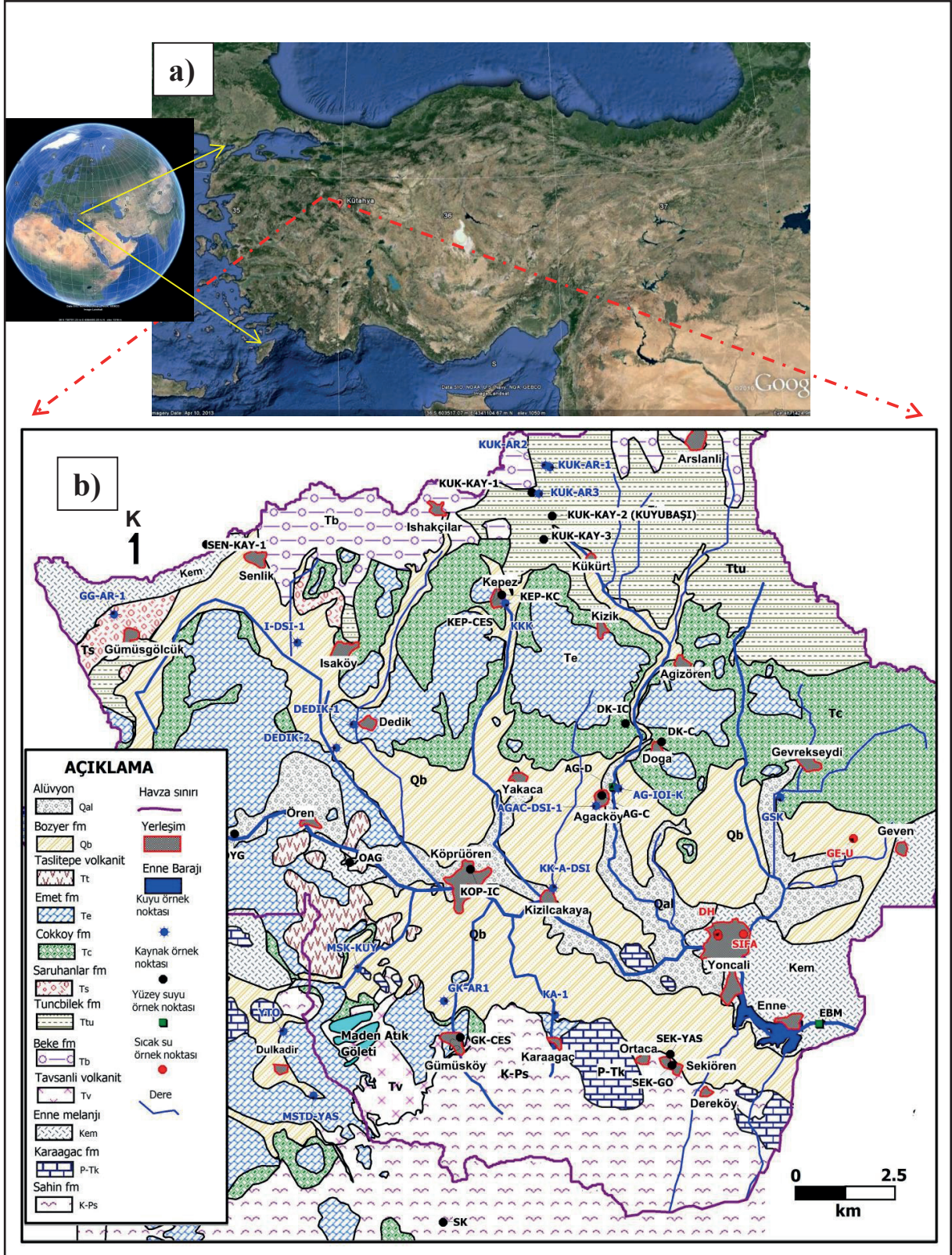
( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  ve  $\delta^{13}\text{C}$ ), hidrojen ve karbon elementlerinin radyoaktif izotopları ( $^3\text{He}$  ve  $^{14}\text{C}$ ) kullanılmıştır.

### 1.1. Coğrafi Konum, İklim ve Topoğrafya

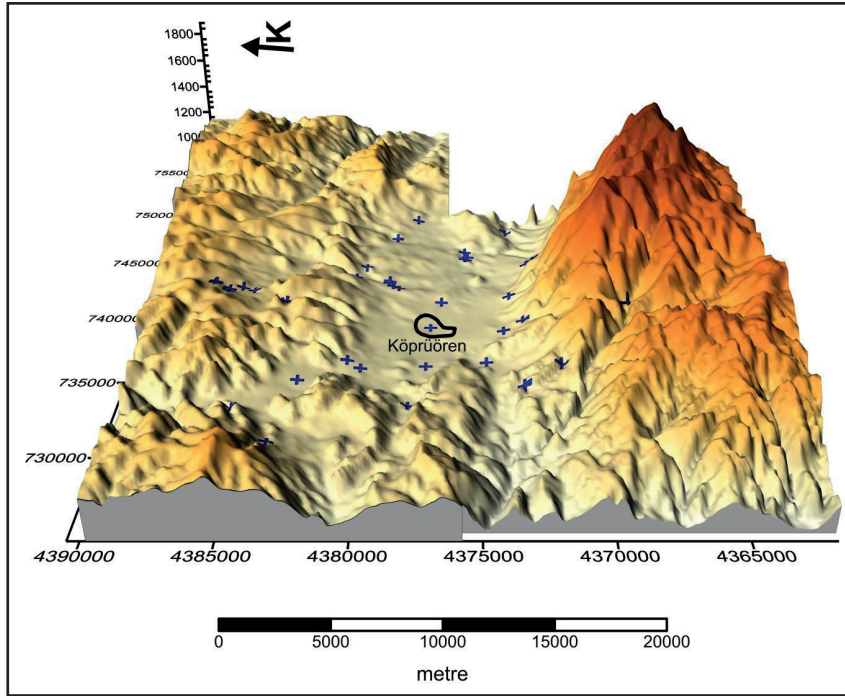
Köprüören Havzası Ege Bölgesinin İç Batı Anadolu bölümünde, Kütahya ilinin batısında, Tavşanlı ilçesinin doğusunda yer almaktadır. İnceleme alanında hem karasal hem de Akdeniz ikliminin etkileri görülmektedir. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar kar yağışlı ve soğuktur. Kütahya Meteoroloji İstasyonunda Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından 1970- 2012 yılları arasında ölçülmüş sıcaklıklara göre aylık ortalama sıcaklık 10.7 °C, yıllık ortalama yağış 546.5 mm, ortalama nisbi nem %65 ve yıllık potansiyel buharlaşma 800 mmdir. Alanda en düşük ve en yüksek rakımlı noktalar 900 m ile 1600 m arasında değişmekte olup, ortalama yükseklik 1250 mdir. Alanın kuzey kesimi hafif engebeli, orta kesimi düz, güney kesimi ise yüksek ve engebeli bir morfolojiye sahiptir (Şekil 2).

### 1.2. Jeolojik ve Hidrojeolojik Durum

Çalışma alanında Paleozoyik-Kuvaterner zaman aralığında oluşmuş metamorfik, magmatik, volkanik ve sedimanter kayalarla temsil edilen birimler yüzeylemiştir (Şekil 1) (Arık, 2002). Havzada temeli oluşturan Şahin formasyonu Karbonifer-Permian yaşlı düşük dereceli metamorfizma geçirmiş, sık kıvrımlanmış metakumtaşı, metakonglomera, ve şistlerden meydana gelmiştir (Baş, 1983; 1986; 1987; Arık, 2002). Şahin formasyonu uyumlu olan Permian-Triyas yaşlı Karaağaç formasyonu alt kesimlerde koyu gri renkli, oldukça sık kıvrımlı, kalın tabakalı, üstte ince-orta tabakalı mermerlerden oluşmuştur (Arık, 2002). Üst Kretase yaşlı Enne melanji diğer birimlerin üzerinde tektonik sınırla durmakta ve alttan üste doğru serpantin, çört ve radyolarit ihtiva etmektedir (Arık, 2002). Alanda, Geç Oligosen-Erken Miyosen döneminde meydana gelen blok faylanmalarla iki farklı çökme ortamı oluşmuştur. Kuzey kesimde Senozoyik öncesi oluşan birimlerin üzerine Alt Miyosen yaşlı, kırıntılı malzemeden oluşan Beke formasyonu kalın bir seviye halinde, uyumsuz olarak gelmiştir. Bu formasyon kırmızı, gri ve sarı renkli şist, karbonatlı kayalar, serpantin, diyabaz ve kuvars çakıllarından oluşan çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı, şeyl ve organik malzemece zengin bitümlü seviyeler ile kömür merceklerinden meydana gelmiştir (Konak, 1979; Baş, 1983; Çelik ve Kerey,



Şekil 1- Çalışma alanına ait a) yer bulduru haritası b) jeoloji ve örnek lokasyonlarını gösteren harita (Arık, 2002'den değiştirilerek alınmıştır).



Şekil 2- Çalışma alanına ait sayısal yükseklik modeli. Örnek noktaları mavi artı ile gösterilmiştir.

1999; Arık, 2002). Beke formasyonu üzerinde Orta-Üst Miyosen yaşlı Tunçbilek formasyonu uyumlu olarak durmaktadır. Tunçbilek formasyonunun taban kesimi silttaşı araseviyeli kiltası, laminalı tüfit ve kireçli kiltası ile temsil edilmektedir. Taban kesiminin üzerinde koyu kahve, siyah renkli linyitlerle temsil edilen kömür damarları bulunmaktadır. (Çelik ve Kerey, 1999). Kömür damarlarının üzerinde ince-orta tabakalı marn, killi kireçtaşı, kiltaları ve silişleşmiş tüfler yer almaktadır. Çalışma alanının güney kesiminde Orta-Geç Miyosen yaşlı, alt kesimde çok az taban konglomerası bulunan çoğunlukla alterasyona uğramış dasit, riyodasit ve riyolitik bileşimli tüfit, tuf ve aglomeralarla temsil edilen Tavşanlı volkanitleri Senozoyik öncesi temel üzerine uyumsuz olarak gelmektedir. Alanda Miyosen sonunda meydana gelen yükselme ve aşınma, Pliyosen başında tekrar blok faylanmaya uğramış ve kuzey ve güney kesimler birlikte çökelme ortamı haline gelmiştir. Bunun sonucunda Pliyosen ve sonrasında gelişen birimler alanda her yerde gözlenmektedir. Pliyosen döneminin en yaşlı birimi olan Alt Pliyosen yaşlı Saruhanlar formasyonu diğer birimler üzerinde uyumsuz olarak durmaktadır. Bu formasyon altta beyaz ve bej renklerde konglomera, üste doğru beyaz, yer yer iyi tabakalı kumtaşları, kireçtaşı ve tuf ardalanması içermektedir (Baş, 1983). Yine Alt Pliyosen yaşlı marn, kiltası, kumtaşı, konglomera tuf,

tüfit ve kireçtaşı aratabakalarından oluşan Çokköy formasyonu Saruhanlar formasyonu ile uyumludur. Bu birimlerin üzerine uyumlu olarak Üst Pliyosen yaşlı beyaz, bol gözenekli, yer yer killi kireçtaşı, kireçtaşı, silişleşmiş kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşlarından oluşan Emet formasyonu gelmektedir (Akdeniz ve Konak, 1979). Formasyonun alt kesimlerinde killi kireçtaşı ve marnlar yaygındır. Bu birime ait kireçtaşlarının kalınlıkları ince ve orta arasında değişen tabakalanma göstermekte ve tabakalar arasında yer yer killi ve çörtlü seviyeler gözlenmektedir. Arık (2002) kireçtaşlarında büyük boyutlu erime boşlukları bulunduğunu belirtmiştir. Emet formasyonu Üst Pliyosen-Kuvaterner döneminde gelişen bazik volkanizmaların ürünü olan Taşlıtepe volkanitleri tarafından kesilmektedir. Taşlıtepe volkanitleri koyu gri, siyah, bol gözenekli bazaltlar ve koyu pembe renkli andezitlerle temsil edilmektedir (Baş, 1983). Kuvaterner döneminde gelişen Bozyer formasyonu ve oluşumu halen devam eden alüvyonlar tüm birimleri uyumsuz olarak örtmektedirler. Bozyer formasyonu kırmızı, kaba ve ince taneli, az tutturulmuş kırıntılı kayaçlarla (çakıl, kum ve kil) temsil edilmektedir. Bu formasyon çalışma sahasında oldukça geniş bir alanda yayılım göstermektedir ve kil, kum, çakıl ve blok boyutunda tutturulmamış kırıntılardan oluşmaktadır (Şekil 1). Saha bugün aşınma alanı olduğundan alüvyon oluşumu devam etmektedir (Arık, 2002).

Drenaj alanı yaklaşık 320 km<sup>2</sup> olan havzada Kocasu deresi ve kolları ana yüzey suyudur (Şekil 1). Kocasu deresi Köprüören ovasını batı-doğu yönünde kat ettikten sonra Yoncalı'da Enne baraj gölüne dökülür. Bu dere, Enne barajından sonra Felent çayına dahil olur ve doğuya doğru akarak Porsuk çayına ulaşır. Enne barajı havzada bulunan başlıca yüzey suyu rezervuarı olup kısmen sulama amaçlı, kısmen havzanın kuzeyinde bulunan Seyitömer Termik Santrali'nin su ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır.

DSİ tarafından 1981 yılında yapılan hidrojeolojik araştırmalar sonucu alanda ova kenarlarında ve akarsu vadilerinde yer altı suyu tablasının topoğrafya ile kesişmesinden meydana gelen alüvyon kaynakları ile fay, dokanak kırık çatlak ve karstik kaynaklar bulunduğu belirlenmiştir. Soğuk su kaynaklarının yanı sıra Yoncalı köyü civarında Paleozoyik mermerlerin içinde mevcut faylardan çıkan Yoncalı Kaplıcası kaynakları alandaki sıcak su kaynaklarıdır. DSİ tarafından alanda sürdürülen araştırma sondajları, jeolojik ve jeofizik çalışmalarıyla başlıca akiferler belirlenmiştir (DSİ, 1981). DSİ (1981)'ye göre Kuvaterner birimler fazla killi oluşları nedeniyle ovada zayıf bir akifer oluşturmuşlardır. Alanda verimli akifer olarak Neojen serisi formasyonları içinde yer alan kireçtaşları ve tüfler gösterilebilir. Ovada yer altı suyu akımının kuzeyden ve güneyden Kocasu dereye doğru olduğu ve havza çıkışında boşalmanın Enne barajına olduğu belirlenmiştir. Havza genelinde yer altı suyu kullanarak sulama yapmak amacıyla kurulmuş 6 adet sulama kooperatifi (Dedik, Yakaca, Ağaçköy, Kızılcakaya, Köprüören, Gümüşköy) bulunmaktadır. Bu kooperatiflerden aktif olarak sulama yapılanlar Dedik, Gümüşköy, Kızılcakaya ve Ağaçköy'dür. Diğer köylerde DSİ tarafından açılmış ve sulama yapılan sınırlı sayıda kuyu bulunmaktadır.

Arslan ve Çelik (2013)'e göre alandaki suların çoğunluğu için baskın katyonların Ca ve Mg ve baskın anyonun ise HCO<sub>3</sub> olduğunu belirlemiştir. Bazı örneklerde SO<sub>4</sub>'ün da baskın olduğu çizelge 1'de görülebilir. Örneklerin çoğu Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>'lü ve Mg-Ca-HCO<sub>3</sub>'lü sular tipinde oldukları Arslan ve Çelik (2013) tarafından saptanmıştır. (Çizelge 1). Diğer örneklerden farklı olarak Gümüşgölcük köyü kuyusundan alınmış örnekteki baskın katyon Na, su tipi Na-HCO<sub>3</sub> olarak belirlenmiştir (Arslan ve Çelik, 2013).

## 2. Arazi ve Analiz Çalışmaları

2011 ve 2012 yıllarında 3 arazi çalışması gerçekleştirilmiş ve yüzey sularından, yer altı sularından, kaynaklardan ve termal sulardan 40 farklı lokasyonda yerinde elektriksel iletkenlik (EC) ölçümleri, döteryum ( $\delta D$ ) ve oksijen-18 ( $\delta^{18}O$ ) örnekleme, 20 farklı lokasyonda trityum ( $^3H$ ), 5 lokasyonda ise karbon-13 ( $\delta^{13}C$ ) ve karbon-14 ( $^{14}C$ ) örnekleme yapılmıştır.  $\delta^{18}O$  ve  $\delta D$  izotop analizleri için örnekler 500 ml, trityum ve  $\delta^{13}C$  ile karbon-14 ( $^{14}C$ ) örnekleri için 1000 ml HDPE plastik şişelere toplanmıştır (Çizelge 2 ve 3).  $^{14}C$  örnekleri analiz öncesinde 0.2 ml cıva klorür ( $HgCl_2$ ) solüsyonu eklenerek muhafaza edilmiştir. Böylece örnekleme sonrasında oluşabilecek biyolojik aktivitenin karbon konsantrasyonu ve izotopik kompozisyonu etkilemesinin önüne geçilmiştir.

Ekim 2011 ve Eylül 2012'de toplanmış örnekler kurak dönemi temsilen, Mayıs 2012'de toplanmış örnekler ise yağışlı dönemi temsilen alınmıştır.  $\delta^{18}O$  ve  $\delta D$  analizi için Ekim 2011'de 17 adet, Mayıs 2012'de 25 adet, Eylül 2012'de ise 22 adet örnek alınmıştır (Çizelge 2). Örnek noktalarının bazılarında üç dönemde de örnekleme yapılmış, böylece kurak ve yağışlı dönemler için suların kararlı izotop içeriğinde değişim olup olmadığını saptanması amaçlanmıştır.  $^3H$  analizi için Ekim 2011'de 5 adet, Mayıs 2012'de 12 adet ve Eylül 2012'de 14 adet örnek alınmıştır (Çizelge 2).  $\delta^{13}C$  ve  $^{14}C$  için örnekleme Eylül 2012'de yapılmıştır (Çizelge 3).

$\delta^{18}O$  ve  $\delta D$  izotop analizleri Hacettepe Üniversitesi Kararlı İzotop Laboratuvarında lazer spektroskopik analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Referans standardı olarak VSMOW (Viyana Standard Ortalama Okyanus Suyu) kullanılmış ve ölçüm hassasiyeti  $\delta^{18}O$  için 0.2‰,  $\delta D$  için ise 1‰ olarak belirtilmiştir.  $^3H$  analizleri Hacettepe Üniversitesi Çevresel Trityum Laboratuvarında alkali elektrolit zenginleştirmeli ultra düşük düzey sıvı parıldaama sayımı ile yapılmıştır. Analiz hatası  $\pm 0.4$  TU olarak rapor edilmiştir.  $\delta^{13}C$  ve  $^{14}C$  analizleri Beta Analytic Laboratuvarlarında (ABD) yaptırılmıştır.  $\delta^{13}C$  örnekleri su içerisinde Çözünmüş İnorganik Karbon'dan (ÇİK) kararlı kütle spektrometresi, karbon-14 örnekleri yine ÇİK'den hızlandırıcı kütle spektrometresi (AMS) kullanılarak ölçülmüştür.

Köprüören Havzası Su Kaynakları İzotopik İncelemesi

Çizelge 1- Örneklere ait UTM projeksiyonu (Universal Transverse Mercator) koordinat ve kot bilgileri, örnek açıklamaları, su tipleri ve arazide Mayıs 2012 ve Eylül 2012'de ölçülmüş elektriksel iletkenlik değerleri.

ÖRNEK NO	X	Y	KOT (m)	EC (µS/cm)		Su tipi (Arslan ve Çelik, 2013)	AÇIKLAMA
				Mayıs 2012	Eylül 2012		
OAG	734678	4377301	1024	573	518	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Volkaniklerden çıkan kaynak (göl içinden-kaynak çıkış noktasından örnek alındı)
KK-A-DSI	739718	4376655	1035	518	774	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Kızılcakaya köyü DSI sulama kuyusu No: 41052
GG-AR-1	728846	4383426	1108	402	389	Na-HCO <sub>3</sub>	Gümüşgölcük köyü kuyu (artezyen)
SK	736997	4368394	1233	484	507	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Şahin köyü girişi çeşme
I-DSI-1	733384	4382727	1055		881	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	İsaköy köyü DSI sulama kuyusu No: 55505
EBM	746560	4373445	998	485		Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Enne barajı mansabı yüzey suyu örneği
YTO	733039	4373105	1080			Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Yılmazlar Taş ocağı kuyusu
KUK-KAY-1	739192	4386460	1150			Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Kükürt köyü kaynak
KUK-KAY-2 (KUYUBAŞI)	739699	4385874	1125	1600	1572	Mg-Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	Kükürt köyü kaynak
KUK-KAY-3	739489	4385299	1128		1101	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Kükürt köyü kaynak
GSK	745350	4378900	1034	820		Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Gevrekseydi köyü DSI sulama kuyusu No: 55227
KUK-AR-1	739641	4387068	1171	760		Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Kükürt köyü artezyen kuyusu
SIFA	744435	4375525	1000			Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Şifa otel kuyusu- Soğuk ve sıcak su karışımı
YKK	743794	4375531	1007		990	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Yoncalı termal otel kuyusu- sıcak su
DH	743807	4375477	1006			Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Dübecik Hamam kuyusu- sıcak su
SEN-KAY-1	731131	4385175	1077			Mg-HCO <sub>3</sub>	Şenlik köyü kaynak
KKK	738535	4383710	1135			Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Kepez köyü kuyusu
AG-C	740923	4378959	1047	356		Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Ağaçköy çeşme
AG-IOI-K	741337	4379120	1038	1194		Mg-Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	Ağaçköy İl özel idare kuyusu
AG-D	741210	4379158	1035	1600		Mg-Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	Ağaçköy dere
DK-C	742403	4380288	1058	1345	1122	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	Doğaköy çeşme
DK-IC	741511	4380739	1054	378	352	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Doğaköy içme suyu çeşme
OYG	731833	4378007	1032	613	956	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Ören köyü batısı kaynak
SEK-YAS	742618	4372554	1071	671	1010	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Sekiören köyü çeşme
SEK-GO	742666	4372278	1100	551	381	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Sekiören köyü gölet öncesi kaynak
KOP-IC	737670	4377130	1018	569		Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Köprüören köyü içme suyu kaynağı (çeşme)
KEP-CES	738444	4383924	1153	573	600	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Kepez köyü çeşme
KUK-AR2	739530	4387123	1173	870		Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Kükürt köyü artezyen kuyusu
KUK-AR3	739367	4386420	1146	958		Mg-HCO <sub>3</sub>	Kükürt köyü artezyen kuyusu
GK-AR1	737018	4373857	1049	590	704	Ca-MgHCO <sub>3</sub>	Gümüşköy DSI sulama kuyusu No: 52884
GE-U	747156	4377891	1038	533	1102	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Geven köyü Dumlupınar üniversitesine ait kuyu (sıcak su)
Y-YAG	744060	4375408	990			Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	Yoncalı köyü yağmur örneği
MSK-KUY	734890	4374659	1031	410		Ca-Mg-Na-HCO <sub>3</sub>	Maden sahası mansap lokasyon kuyu
MSTD-YAS	733788	4371522	1113	426		Ca-HCO <sub>3</sub>	Dulkadir köyü yakını kuyu
AGAC-DSI-1	740779	4378690	1043		823	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Ağaçköy DSI sulama kuyusu No: 36813
GK-CES	737419	4372971	1094		636	Ca-HCO <sub>3</sub>	Gümüşköy ortası çeşme
KA-1	739768	4373513	1068		736	Ca-Mg HCO <sub>3</sub>	Karaağaç köyü kuyusu
DEDİK-1	734779	4380705			660	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Dedik köyü DSI sulama kuyusu No: 41946
DEDİK-2	734350	4380125	1042		665	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Dedik köyü DSI sulama kuyusu No: 41949
KEP-KC	738444	4383924	1137		600	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Kepez köyü ortası çeşme

Çizelge 2- Ekim 2011, Mayıs ve Eylül 2012 dönemlerinde alınan izotop örneklerinde oksijen-18, döteryum, döteryum fazlalığı ve trityum sonuçları.

Örnek No	Döteryum (‰)			Oksijen-18 (‰)			Döteryum fazlalığı (‰)			Trityum (TU)		
	Ekim 2011	Mayıs 2012	Eylül 2012	Ekim 2011	Mayıs 2012	Eylül 2012	Ekim 2011	Mayıs 2012	Eylül 2012	Ekim 2011	Mayıs 2012	Eylül 2012
OAG	-60.3	-61.8	-61.2	-8.57	-8.56	-8.55	8.3	6.7	7.2		3.44	
KK-A-DSI	-62.5	-63.3	-65.3	-8.71	-8.8	-9.01	7.2	7.1	6.7		0.6	-0.4
GG-AR-1	-71.5	-72.1	-72.8	-10	-9.98	-10.19	8.5	7.8	8.7		-0.41	0.87
SK	-68.3	-73.3	-73.6	-10.29	-10.81	-10.62	14.0	13.2	11.4	4.11	5.41	
I-DSI-1	-65.1		-66.4	-9.05		-9.24	7.3		7.6			5.66
EBM	-53.3	-68.2		-7.09	-9.67		3.5	9.2				
YTO	-63.3			-8.88			7.7					
KUK-KAY-1	-61.1			-8.59			7.6			7.87		
KUK-KAY-2 (KUYUBAŞI)	-62.2	-61.3	-63.9	-8.6	-8.48	-8.82	6.6	6.5	6.7			6.3
KUK-KAY-3	-60.1		-63.5	-8.4		-8.59	7.1		5.2			
GSK	-63.4	-64.7		-8.68	-8.95		6.0	6.9		2.44	0.79	1.69
KUK-AR-1	-60.6	-61.1		-8.63	-8.55		8.4	7.3		2.55	4.58	6.57
SIFA	-65.3			-9.23			8.5					
YKK	-68.3		-70.0	-9.86		-9.88	10.6		9.1	0.3		
DH	-66.8			-9.78			11.5					
SEN-KAY-1	-63.2			-9.03			9.0					2.95
KKK	-61.2			-8.76			8.9					
AG-C		-64.5			-9.11			8.4				
AG-IOI-K		-60.8			-8.28			5.5				
AG-D		-58.4			-8.05			6.0				
DK-C		-62.6	-63.0		-8.78	-9.11		7.6	9.9		1.18	
DK-IC		-65.3	-63.6		-9.11	-9.03		7.6	8.6			
OYG		-61.4	-62.0		-8.5	-8.7		6.6	7.6		6.11	6.44
SEK-YAS		-71.6	-68.4		-10.55	-10.08		12.8	12.2		5.33	6.74
SEK-GO		-71.6	-69.9		-10.47	-10.61		12.1	14.9			
KOP-IC		-60.6			-8.3			5.8				
KEP-CES		-61.9	-65.0		-8.87	-9.19		9.1	8.6			7.23
KUK-AR2		-62.2			-8.84			8.5			3.48	
KUK-AR3		-62.4			-8.78			7.9				
GK-AR1		-67.3	-69.1		-9.72	-10.23		10.4	12.7		5.06	3.61
GE-U		-64.7	-73.4		-8.73	-10.53		5.2	10.9		1.02	0.48
Y-YAG		-34.5			-5.79			11.8				
MSK-KUY		-41.5			-4.71			-3.8				
MSTD-YAS		-63.3			-9.33			11.4				
AGAC-DSI-1			-63.8			-8.71			5.9			1.33
GK-CES			-72.6			-10.84			14.2			
KA-1			-66.9			-9.81			11.6			
DEDİK-1			-63.3			-8.95			8.3			4.31
DEDİK-2			-62.7			-8.58			6.0			
KEP-KC			-65.9			-9.07			6.7			

Çizelge 3-  $\delta^{13}\text{C}$  ve  $^{14}\text{C}$  analiz sonuçları, düzeltilmemiş radyokarbon yaşları, q faktörü ve karbon-13 metodu ile düzeltilmiş görünür radyokarbon yaşları

Örnek No	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Modern Karbon içeriği (pmc)	Modern karbon içeriği hata payı (pmc)	Suyun yaşı (herhangi bir düzeltme olmadan) (BP*)	Suyun yaşının Hata Payı (BP)	q faktörü	Suyun düzeltilmiş yaşı (BP)
GE-U	-5.0	8.18	0.09	20110	90	0.26	9420
KK-A-DSI	-11.4	19.10	0.12	13300	50	0.48	7375
GG-AR-1	-14.6	13.99	0.1	15800	60	0.59	11500
GSK	-13.3	77.96	0.28	2000	30	0.54	-2920
YKK	-4.8	13.18	0.09	16280	60	0.26	5380

\* Radyokarbon yaşları sudaki başlangıç  $^{14}\text{C}$  içeriğinin 100 pmc olduğunu varsayarak ve bozunma yarı ömrü olarak Libby yarı ömrü ( $t_{1/2}=5568$  yıl) kullanılarak hesaplanmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Sularda Oksijen-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) ve Döteryum ( $\delta\text{D}$ ) İlişkisi

Çalışma alanındaki su örneklerinin Mayıs 2012 ve Eylül 2012'de gerçekleştirilmiş arazi çalışmaları sırasında saptanmış elektriksel iletkenlik değerleri Mayıs 2012'de 24 örnek için 356  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ile 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  arasında, Eylül 2012'de ise 22 örnek için 352  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ile 1572  $\mu\text{S}/\text{cm}$  arasında değişmektedir (Çizelge 1).

Ekim 2011, Mayıs ve Eylül 2012 örnekleme dönemine ait çevresel izotop analiz sonuçları Çizelge 2'de sunulmuştur. Buna göre, aynı lokasyonda kurak (Ekim 2011 ve Eylül 2012) ve yağışlı (Mayıs 2012) dönemde alınan numuneler arasında önemli bir farklılık gözlenmemektedir (EBM, SEK-GO, KEP-CES ve GE-U örnekleri dışında). Kurak dönemde alınan numunelerde  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta\text{D}$  değerleri sırasıyla -10.84‰ ile -7.09‰ ve -73.6‰ ile -53.3‰ arasında, yağışlı dönemde alınan numunelerde ise -10.81‰ ile -4.71‰ ve -73.3‰ ile -41.5‰ arasındadır (Çizelge 2).  $d = \delta\text{D} - 8 * \delta^{18}\text{O}$  formülü ile hesaplanan ve Çizelge 2'de sunulmuş döteryum fazlalıkları Ekim 2011 örnekleri için 3.5 ‰ ile 13.9 ‰, Mayıs 2012 örnekleri için -3.8 ‰ ile 13.2 ‰ ve Eylül 2012 örnekleri için 5.22 ‰ ile 14.94 ‰ arasında değişmektedir.

Tüm örnekler için  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta\text{D}$  verileri her bir örnekleme dönemi için ayrı ayrı Küresel ve Doğu Akdeniz Meteorik Su Doğrularıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 3, 4, 5). Ekim 2011 örnekleme döneminde alınan su örneklerinin bazıları Küresel Meteorik Su Doğrusu (GMWL) üzerinde olduğu halde bazı örnekler meteorik su doğrusundan sapma göstermektedir (Şekil 3). Genel olarak, meteorik su doğrusundan sapma buharlaşma, yoğunlaşma ve kayaç- su etkileşimi gibi

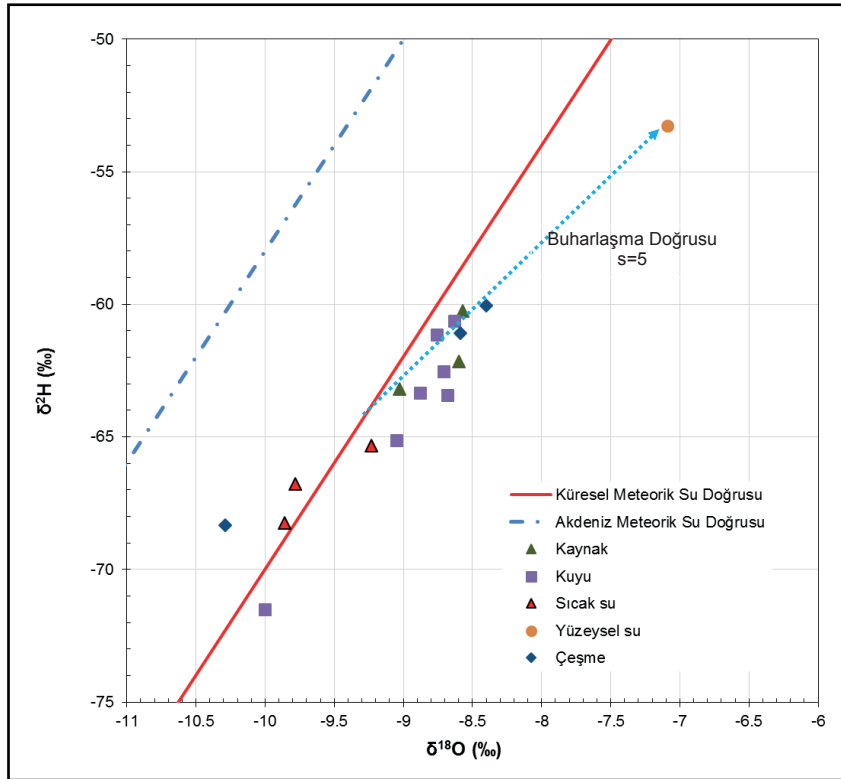
farklı süreçlerden dolayı olabilir. Buharlaşma sırasında öncelikle hafif izotoplar buhar fazına geçtikleri için sıvı faz ağır izotoplarca zenginleşir (Clark ve Fritz, 1997). Dolayısıyla, Şekil 3'te GMWL'den sapma gösteren örnekler ile bir buharlaşma doğrusu belirlenmiştir. Buharlaşma doğrusunun eğimi (s), nem oksijen ve hidrojeni farklı etkilediği için, havadaki bağıl nem bağlıdır (Clark ve Fritz, 1997). Şekil 3'te oluşmuş doğrusunun eğimi yaklaşık 5 olarak belirlenmiştir. Clark ve Fritz (1997)'e göre bağıl nem %25 ile %75 arasındaysa buharlaşma doğrusunun eğimi 4 ile 5 arasındadır. Kütahya Meteoroloji İstasyonunda Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından 1970 yılından bu yana ölçülmüş ortalama bağıl nem %65'tir (Arslan ve Çelik, 2013). Bu durumda, buharlaşma doğrusunun eğimi ile çalışma sahasındaki bağıl nem miktarı birbiriyle uyumludur. Şekil 3'te maksimum buharlaşma gösteren örnek kurak dönem boyunca yüksek sıcaklığa maruz kalarak buharlaşmaya uğramış olan Enne Barajı'ndan alınmıştır. Buharlaşma doğrusu üzerinde yer alan diğer örnekler için de kısmen buharlaşma söz konusudur. Çeşmelerden alınan örnekler için buharlaşma örnekleminin doğrudan kaynağın çıkış noktasından yapılamamış olması ile ilişkili olabilir. Kuyular için ise beslenme öncesinde sığ yer altı sularının buharlaşmaya maruz kaldığı anlaşılmıştır.

Buharlaşma etkisinde olmayan ve negatif  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta^2\text{H}$  değerlerine sahip örneklerden bazıları termal sulardır. Burada termal su örneklerinin GMWL üzerinde olduğu saptanmıştır. Genellikle jeotermal sular, meteorik sulara oranla daha yüksek  $\delta^{18}\text{O}$  değerlerine sahiptir. Bunun nedeni suların yeraltı dolaşımında yan kayaçlar ile etkileşimde bulunarak bünyelerine ağır izotoplar açısından zengin kayaçlardan  $\delta^{18}\text{O}$  alarak zenginleşmeleridir (kayaçların hidrojen içeriği akışkana göre daha düşüktür dolayısıyla  $\delta\text{D}$  değerlerinde değişiklik

olmamaktadır) (Güleç ve Mutlu, 2002). Yoncalı kaplıcalarında örneklenen termal suların kuyubaşı sıcaklıkları 40 °C civarındadır (Arslan ve Çelik, 2013). Ayrıca, Fournier (1977)'e göre hesaplanmış rezervuar sıcaklıkları kalsedon ve kuvars jeotermometrelerine göre Yoncalı için 49-84 °C, Geven için ise 68-99 °C arasındadır (Arslan ve Çelik, 2013). Dolayısıyla, termal sular için gerek kuyubaşı sıcaklıklarının gerekse rezervuar sıcaklıklarının nispeten düşük olması nedeniyle bu örneklerin  $\delta^{18}\text{O}$  içeriklerinin kayaç-akışkan etkileşiminden etkilenmemiş oldukları görülmektedir. Yoncalı'dan alınan örneklerden biri soğuk su örneklerine yakın  $\delta^2\text{H}$  ve  $\delta^{18}\text{O}$  içeriğine sahiptir (Şekil 3). Bu örnek diğer iki örnek gibi sıcak su kuyusunun başından alınmak yerine sıcak su ile soğuk su karışımından oluşan bir havuzdan alınmıştır. Dolayısıyla söz konusu örneğin  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta\text{D}$  içeriği sıcak suların izotop içeriğini değil sıcak-soğuk su karışımının izotop içeriğini yansıtmaktadır. Yine şekil 3'e göre sıcak sulardan daha negatif (hafif izotoplarca zengin)  $\delta^2\text{H}$  ve  $\delta^{18}\text{O}$  değerlerine sahip iki örnek olduğu görülmektedir. Bu örneklerden biri Gümüşgölcük'te bulunan artezyen kuyusundan alınmış olup ilerleyen bölümlerde trityum ve radyokarbon verileri ile birlikte

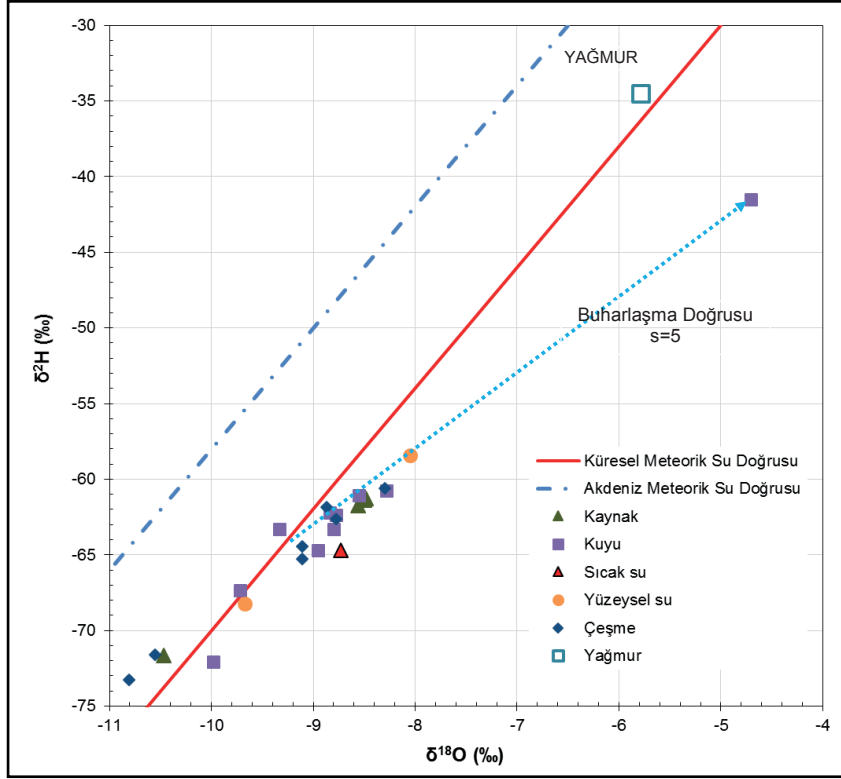
değerlendirilecektir. Diğer örnek Şahin köyünün girişinde bir çeşmeden alınmıştır (SK, boşalım kotu: 1233 m). SK örneğinin trityum içeriği de ( $T=4.11$  TU) dikkate alındığında bu örneğin yüksek kotlara düşen güncel yağışlardan beslenmekte olduğu söylenebilir.

Yağışlı dönem kararlı izotop içerikleri kullanılarak hazırlanmış olan şekil 4'e göre Ekim 2011 verileriyle elde edilmiş buharlaşma doğrusunun bir benzeri bu şekilde de oluşmuştur. Doğru eğimi yine bağıl nem ile uyumlu olarak  $s=5$  olarak hesaplanmıştır. Burada maksimum buharlaşma gümüş maden sahası mansabında bulunan lokasyonundaki bir kuyudan alınmış örnekte gözlenmiştir. Bunun nedeni, kuyuda örnekleme öncesi çekim yapılamaması ve kuyu içinde bekleyerek buharlaşmaya maruz kalan suyun alınmasıdır. Buharlaşma doğrusu üzerinde kalan bir başka nokta Ağaçköy yakınında örneklenmiş olan dere suyudur ve yüzey suyunda buharlaşma etkisi beklenen bir sonuçtur. Burada buharlaşma konusunda dikkat çeken bir nokta Enne Barajı'nda Ekim 2011'de örnekleme yapılan lokasyonda Mayıs 2012'de alınan örneğin  $\delta^2\text{H}$ -  $\delta^{18}\text{O}$  içeriğine göre buharlaşmanın gözlenmemesidir. Örnekleme yapılan lokasyonda

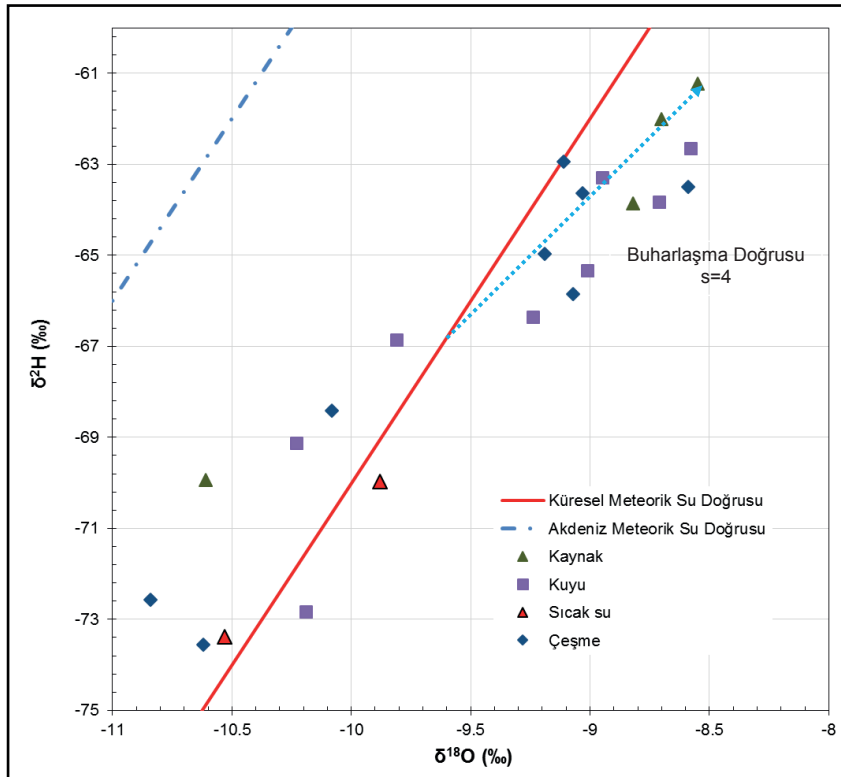


Şekil 3- Su örneklerinin Ekim 2011 (kurak dönem) döneminde  $\delta^2\text{H}$ -  $\delta^{18}\text{O}$  grafiği (Küresel Meteorik Su Doğrusu  $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O}+10$  (‰ SMOW) Craig (1961), Akdeniz Meteorik Su Doğrusu  $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O}+22$  (‰ SMOW) ise Gat ve Carmi (1970) tarafından tanımlanmıştır).

Köprüören Havzası Su Kaynakları İzotopik İncelemesi



Şekil 4- Su örneklerinin Mayıs 2012 (yağışlı dönem) döneminde  $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$  grafiği (Küresel Meteorik Su Doğrusu  $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$  (‰ SMOW) Craig (1961), Akdeniz Meteorik Su Doğrusu  $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 22$  (‰ SMOW) ise Gat ve Carmi (1970) tarafından tanımlanmıştır).



Şekil 5- Su örneklerinin Eylül 2012 (kurak dönem) döneminde  $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$  grafiği.

yağış sonucu kurak ve yağışlı dönem arasında baraj su seviyesindeki değişiklik oldukça fazladır ve söz konusu örneğin izotop içeriğinde yağışların etkisiyle meydana gelen değişiklik çarpıcıdır. Bu dönemde, arazi çalışması sırasında şiddetle yağın sağanak sonrasında Yoncalı civarında örnekleme yapmak mümkün olmuştur. Bu örneğin  $\delta^2\text{H}$ -  $\delta^{18}\text{O}$  içeriği Küresel Meteorik Su Doğrusu'na çok yakındır (Şekil 4). Mayıs 2012'de bir noktada sıcak su örnekleme yapılmıştır. Söz konusu örnek alınırken Geven köyünde bulunan ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından açılmış bir termal kuyudan örnekleme yapılması planlanmış, fakat kuyu başına girmek mümkün olmadığından kuyudan sızan suların oluşturduğu bir dereden örnek alınmıştır. Dolayısıyla değinilen örnek tam olarak sıcak suyun izotopik içeriğini yansıtmadığı gibi buharlaşma etkisi altındadır. Bu örnekten Eylül 2012'de kuyu başında örnekleme yapılmıştır. Mayıs 2012 ile Eylül 2012 örnekleme döneminde söz konusu örnek için rapor edilmiş  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta\text{D}$  içerikleri arasındaki farklar sırasıyla 1.8‰ ve 8.7 ‰'dir. Bu farklar mevsimsel değişimi yansıtmaktan uzak olup tamamen örnekleme ile ilgilidir.

Eylül 2012 örneklerine ait kararlı izotop içerikleriyle hazırlanmış  $\delta^2\text{H}$ -  $\delta^{18}\text{O}$  grafiğine göre, bazı kaynaklar, kuyular ve çeşmeler için yine bir buharlaşma doğrusu oluşmuştur (Şekil 5). Söz konusu doğrunun eğimi önceki dönemlerde elde edilmiş eğimden azdır ( $s \sim 4$ ). Bu dönemde ağır izotoplarca en fakir örnekler Şahin ve Sekiören köylerinde bulunan çeşmelerden, Geven köyünde bulunan Dumlupınar Üniversitesi sıcak su kuyusundan ve Gümüşgölcük köyü kuyusundan alınmış örneklerdir.

Üç örnekleme dönemi boyunca alınmış örneklerin döteryum fazlalıkları incelendiğinde en düşük döteryum fazlalığına sahip olan örneklerin buharlaşma etkisindeki örnekler, en yüksek döteryum fazlalığına sahip örneğin ise Şahin köyü'ndeki kaynaktan alınan ve diğer örnekler göre ağır izotoplarca zenginleşmiş, daha yüksek bir kottan boşalan ve buharlaşma etkisi göstermeyen bir örnek olduğu belirlenmiştir.

### 3.2. Yağışlar İçin Yükseklik ve $\delta^{18}\text{O}$ İlişkisi

Yağışlardaki oksijen-18 içeriği yükseklik, sıcaklık ve enlem ile değişir. Yükseklik artınca, sıcaklıklar düşer ve yağış ağır izotoplarca fakirleşir. Bu fakirleşme  $\delta^{18}\text{O}$  için 100 metrelik bir yükseklik artışına karşılık -0.15 ile -0.5 per mil arasında değişir

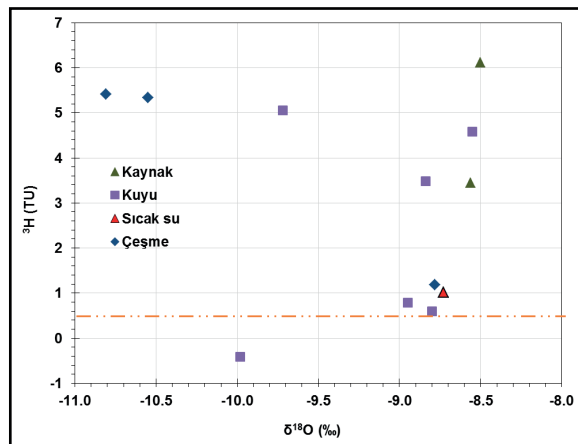
(Clark ve Fritz, 1997). Bu çalışma kapsamında mevsimlik kaynaklardan alınan örneklerin izotop içerikleri kullanılarak farklı yükseklikteki yağışların izotopik karakteri hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmış, fakat havzada yağışlar için  $\delta^{18}\text{O}$  ile yükseklik ilişkisinin doğru bir şekilde çıkarılması için yeterli sayıda ve farklı yüksekliklerden boşalan mevsimlik kaynaklar bulunması mümkün olmamıştır. Dolayısıyla, bu konuda yapılan yorumlar yeraltı suları ve sıcak suların beslenme yükseklikleri için göreceli bir karşılaştırma şeklinde yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında, havza genelinde soğuk sular arasında ağır izotoplarca en fakir örnekler Gümüşgölcük artezyen kuyusu (GG-AR-1), Şahin köyü kaynağı (SK), Sekiören köy çeşmesi (SEK-YAS) ve gölet öncesi kaynak (SEK-GO), Gümüşköy çeşme (GK-CES) ve kuyu (GK-AR-1) diğer örnekler göre daha yüksek kotlara düşen yağışlardan beslenmişlerdir.

### 3.3. Trityum Verilerinin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında kararlı izotopların yanı sıra hidrojen ve karbonun radyoaktif izotoplarından da yararlanılmıştır. Hidrojenin kısa ömürlü radyoaktif izotopu olan trityum atmosferde  $^{14}\text{N}$  izotopunun kozmik ışınlar ile tepkimesi sonucu oluşmaktadır. Bunun yanı sıra, nükleer denemeler de atmosferde trityum salınımına neden olmaktadır. Yeraltı suyu sistemlerinde su molekülü içinde bulunması nedeniyle trityum mükemmel bir izleyicidir. Radyoaktif olmasından dolayı (yarı ömrü 12.43 yıl) uğradığı zamansal değişim nedeniyle yeraltı sularının bağlı yaşının belirlenmesi çalışmalarında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Clark ve Fritz, 1997). Trityumun meteorik sulardaki derişimi Trityum Birimi (TU) cinsinden verilmektedir (1 TU=1 atom  $^3\text{H}$  /10<sup>18</sup> atom H). Trityumun, özellikle kuzey yarımkürede, atmosferdeki derişimi nükleer denemeler sonucu değişmiştir. 1963 yılından önce derişimler 5 TU civarında olduğu halde nükleer denemeler ile atmosfere yayılan trityum ile 1963 yılında maksimum 3000 TU'ya ulaşmıştır (Mazor, 1991). 1963 yılında yağışların 5 TU trityum içeriğine sahip olduğu varsayılırsa, örnekleme tarihi olan 2012 yılına kadar geçen zamanda 49 yıllık radyoaktif bozuma sonucunda derişimin 0.32 TU civarında olması beklenmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada yeraltı sularında ölçülmüş trityum içerikleri yorumlanırken, genel olarak, yeraltı suyu trityum içermiyor veya 0.32 TU'dan az trityum içeriyorsa, örneklenen suyun nükleer denemelerden (1963 yılı) daha önce gerçekleşen yağışlardan beslendiği söylenebilir.

Çalışma süresince elde edilmiş trityum ( $^3\text{H}$ ) verilerine göre suların trityum içerikleri yağışlı dönemde  $\sim 0$  TU ile 6.11 TU, kurak dönemde ise  $\sim 0$  TU ile 7.87 TU arasında değişmiştir. Buna göre, havzada hem nükleer denemelerden ( $\sim 1963$  yılından) önceki ( $< 0.32$  TU) hem de sonraki ( $> 0.32$  TU) yağışlardan beslenmiş sular mevcuttur. Yer altı suyu örneklerinin çoğu güncel yağışlar ile beslenmiş, akiferde uzun süre kalmamış, sığ dolaşım sulardır. Gümüşgölcük ve Kızılcağaya köyleri artezyen kuyularından ve sıcak sulardan alınmış örnekler oldukça düşük trityum içeriğine sahip olup büyük ihtimalle nükleer denemelerin başlangıcından önce beslenmişlerdir. Söz konusu örnekler için daha detaylı yorum ilerleyen bölümde karbon-14 verileri değerlendirilirken yapılacaktır.

Yağışlı dönemde (Mayıs 2012) trityum ile  $\delta^{18}\text{O}$  arasındaki ilişkiye göre iki kaynaktan alınmış örnekler yüksek kotlara düşen güncel yağışlardan beslenmektedir (Şekil 6).  $^3\text{H}$  içeriği nispeten düşük örnekler ise nispeten daha alçak kotlara düşen yağışlardan beslenmiştir. Sığ dolaşıma sahip örneklerin tümü incelendiğinde (trityum içeriği yüksek örnekler) bu örneklerin farklı kotlardan beslenmiş oldukları söylenebilir. Bazı örnekler buharlaşma etkisi altında olduğundan (özellikle sıcak su örneği: GE-U)  $\delta^{18}\text{O}$  verileri ile ilgili beslenme yükseltisi hakkında kesin yorum yapılamamaktadır. Kurak dönem (Eylül 2012) için hazırlanmış  $^3\text{H}$ -  $\delta^{18}\text{O}$  grafiğine göre en yüksek kotlardan beslenmiş, derin dolaşım örnekler sıcak su örnekleridir (Şekil 7). Ayrıca, düşük trityum içeriğine sahip iki yer altı suyu örneği (GG-AR-1 ve KK-A-DSI) farklı kotlardan beslenmektedir (GG-AR-1 nispeten daha yüksek kotlara düşen yağışlardan beslenmiştir).



Şekil 6- Çalışma alanında yer alan su kaynaklarında yağışlı dönem Trityum-  $\delta^{18}\text{O}$  ilişkisi (Mayıs 2012).

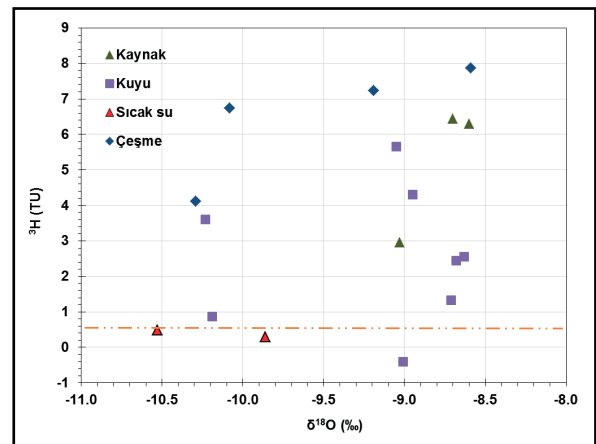
Trityum ile oksijen-18 arasında tüm örnekler için belirli bir ilişki olmadığı görülmektedir (Şekil 7).

Yağışlı ve kurak dönemler için trityum-elektriksel iletkenlik ilişkisi Şekil 8 ve 9'da sunulmuştur. Şekil 8'e göre sığ dolaşıma sahip örneklerde  $^3\text{H}$  ile EC ters orantılıdır. Azalan trityum içeriği ile EC'nin artması beklenen bir bulgudur (akiferde kalış süresi arttıkça örnekte çözülmüş iyon miktarı da artar). Nispeten derin dolaşım örnekleri ise 400 ile 1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  arasında değişen EC değerlerine sahiptirler. Şekil 9'a göre ise sığ ve nispeten derin dolaşım suların EC değerleri benzerdir ve  $^3\text{H}$  ile EC arasında bir ilişki saptanamamıştır.

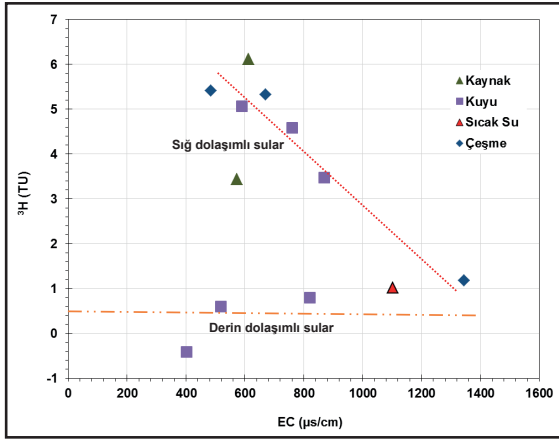
### 3.4. Karbon-13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ve Karbon-14 Verilerinin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında, düşük trityum içeriğine sahip örnekler için radyokarbon analizleri yaptırılarak söz konusu örneklerin yer altı geçiş süreleri belirlenmeye çalışılmıştır. 40000 yıl öncesine kadar yaşlandırma yapmayı mümkün kılan standart bir metod olan radyokarbon metodu yer altı suyunda çözülen inorganik karbondan ( $\text{ÇİK} = \text{CO}_2(\text{aq}) + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) karbon-13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ve karbon-14 ( $^{14}\text{C}$ )'ün ölçülmesi esasına dayanır. Karbonun radyoaktif izotopu olan  $^{14}\text{C}$  (yarı ömrü 5730 yıl) atmosferde bulunur ve yer altı su seviyesine ulaşana kadar çözülerek yer altı suyu sisteminde nitrojene dönüşür.

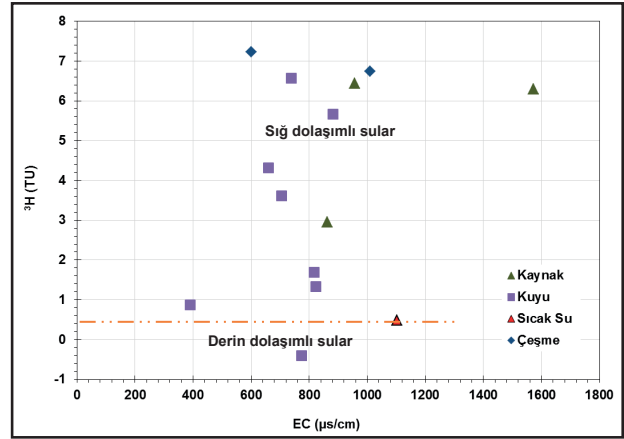
Çizelge 3'e göre 5 örnekte belirlenmiş modern karbon içerikleri ( $^{14}\text{C}$ ) 8.18 pmc ile 77.96 pmc arasında değişmektedir. En yüksek içerik Gevrekseydi artezyen kuyusunda, en düşük içerik ise Geven'de bulunan Dumlupınar Üniversitesine ait sıcak su kuyusunda



Şekil 7- Çalışma alanında yer alan su kaynaklarında kurak dönem Trityum-  $\delta^{18}\text{O}$  ilişkisi (Eylül 2012).



Şekil 8- Çalışma alanında yer alan su kaynaklarında Tritiyum-Elektriksel İletkenlik (Mayıs 2012- yağışlı dönem).



Şekil 9- Çalışma alanında yer alan su kaynaklarında Tritiyum-Elektriksel İletkenlik (Eylül 2012- kurak dönem).

belirlenmiştir. Karbon-13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) içerikleri ise soğuk sulara -11.4 ile -14.6‰ arasındayken, bu içerikler sıcak sular için -5‰ civarındadır. Sıcak ve soğuk sular arasında  $\delta^{13}\text{C}$  içeriklerindeki bu fark sıcak sular için su-kayaç etkileşimine bağlıdır. Bir başka deyişle,  $\delta^{13}\text{C}$  içeriğinde gözlenen zenginleşme, özellikle sıcak su örneklerinde, su ile akifer arasında izotopik takas olduğunu ortaya koymaktadır.

$^{14}\text{C}$  yöntemiyle yeraltısuyunun yaşının belirlenmesi  $^{14}\text{C}$  radyonüklidinin azalma miktarının ölçümü esasına dayanır (Clark ve Fritz, 1997). Herhangi bir suyun radyokarbon yaşı aşağıda verilmiş olan denklem ile hesaplanabilir.

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{Denklem 1})$$

Denklem 1'de A örneğin ölçülen veya gözlemlenen aktivitesini,  $\lambda$  bozunma katsayısını ve t beslenimden sonra geçen zamanı (yer altı suyu geçiş süresini) ifade etmektedir. Söz konusu denklemin doğru sonuç verebilmesi için değerlendirilen suda  $A_0$  ile gösterilen başlangıçtaki aktivitenin doğru olarak belirlenmesi gereklidir.  $^{14}\text{C}$ 'ün sudaki varlığı birçok süreçten etkilendiği için başlangıç değerini doğru olarak tahmin etmek oldukça zordur. A ile ifade edilen  $^{14}\text{C}$ 'ün sudaki nihai konsantrasyonu kristalleşme ve çökeltme reaksiyonları sırasındaki izotop değişimlerine göre modifiye edilebilir.

### 3.4.1 Karbonat Sisteminde Karbon-13

Clark ve Fritz (1997) yeraltısularında karbonat gelişimi için karbon-13'ün mükemmel bir izleyici olduğuna işaret etmiştir. Bunun nedeni değişik karbon

rezervuarlarının farklı karbon-13 değerlerine sahip olmalarıdır. Çözünmüş İnorganik Karbonun (ÇİK) gelişimi ve  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  atmosferik  $\text{CO}_2$  ile başlar. Bu noktada  $\delta^{13}\text{C}$  değeri yaklaşık -7 ‰ VPDB'dir.  $\text{CO}_2(\text{atm})$ 'nin fotosentetik alımı  $\delta^{13}\text{C}$  değerlerinde gözle görülür bir fakirleşmeye neden olur. Bu alım yaprak gözeneginden  $\text{CO}_2$  difüzyonu sırasında ve yaprakların kloroplastı tarafından gerçekleştirilen karbon sabitleştirme ( $\text{CO}_2$ 'nin  $\text{CH}_2\text{O}$ 'ya dönüşmesi) sırasında olur (Clark ve Fritz, 1997). İzlenen fotosentetik döngüye göre  $\delta^{13}\text{C}$  miktarındaki fakirleşme değişir. Bilinen üç ana fotosentetik döngü bulunmaktadır. Bunlar Calvin veya  $\text{C}_3$  döngüsü, Hatch-Slack veya  $\text{C}_4$  döngüsü ve Crassulacean asit metabolizma (CAM) döngüsüdür (Clark ve Fritz, 1997). Calvin döngüsü bitkilerin yüzde 85'ine izlenir ve bu döngüyü izleyen bitkilerin  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri ortalama -27 ‰'dir (Vogel, 1993). Daha yüksek sıcaklıklarda bitkiler  $\text{C}_4$  döngüsünü izlerler ve  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri ortalama -12.5 ‰ civarında olur (Vogel, 1993).

### 3.4.2 $^{14}\text{C}$ Yaşlarının Karbonat Çözünmesine Karşı Düzeltmesi

Görünür  $^{14}\text{C}$  yaşlarının hesaplanması için değişik yöntemler bulunmakta olup, bu yöntemlerin uygulanmasına genelde kimyasal sisteme ve eldeki verilere göre karar verilmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen veriler ile tahmini bir yaş hesabı yapabilmek için Pearson (1965) ve Pearson ve Hanshaw (1970) tarafından önerilmiş  $\delta^{13}\text{C}$  karışım modeli kullanılmıştır. Bu model, açık sistem koşullarında karbonat çözünmesi ile kapalı sistem koşullarında radyokarbon seyrelmesinin birlikte kullanılmasına olanak sağlar (Clark ve Fritz, 1997). ÇİK havuzuna

karbon ekleyen, havuzdan karbon çıkmasına neden olan her proses  $\delta^{13}\text{C}$  konsantrasyonlarını etkiler. Bir alanda yer altı sularında ÇİK'nın değişimi karbon-14 konsantrasyonlarını ölü karbon katkısıyla ne derece etkilediğini gösterebilir (Clark ve Fritz, 1997). Karbon-14 konsantrasyonlarını etkileyen faktörlerin yaş hesaplamalarında yanlış sonuçlara yol açmaması için seyrelme faktörü (q) olarak hesaplanabilecek bir sayı kullanılır. Bu faktör aşağıdaki denklemde verilmiştir (Pearson ve Hanshaw, 1970).

$$q = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{cik}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{karb}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{toprak}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{karb}}} \quad (\text{Denklem 2})$$

Denklem 2'de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{cik}}$  suda çözülmüş inorganik karbondan ölçülmüş  $\delta^{13}\text{C}$ ;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{toprak}}$  topraktaki  $\text{CO}_2$ 'nin  $\delta^{13}\text{C}$ 'i (bitki örtüsüne bağlıdır,  $\text{C}_3$  bitkileri -27‰,  $\text{C}_4$  bitkileri yaklaşık -12.5‰); ve  $\delta^{13}\text{C}_{\text{karb}}$  çözülmüş kalsitin  $\delta^{13}\text{C}$ 'dür (genellikle 0 ‰'e çok yakın, denizel karbonatlar için 2‰). Çalışma kapsamında, sahada yeraltı sularına ev sahipliği yapan akifer materyali karbonatlı kayalardan bir örnek (mikrokristalline kireçtaşı, Ören köyü yakını) alınmış ve bu örnekte  $\delta^{13}\text{C}$  içeriği +2.9‰ olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, q hesaplanırken tek bilinmeyen bitki örtüsüne göre değişen toprağın  $\delta^{13}\text{C}$  içeriğidir.  $\text{C}_4$  bitkileri daha çok tropik ve yarı tropik bölgelerde yetişirler. Havza alanı civarında, hakim bitki örtüsü genel olarak orman ve bozkır tipinde olup, bu bitki türleri fotosentez yaparken baskın olarak  $\text{C}_3$  döngüsünü izlemektedir. Buna göre, güncel örnekler için bu içeriğin -27‰ olarak alınması uygundur. Öte yandan, bu değer geçmişten günümüze kadar sabit kalmamış olabilir. Fakat, çalışma alanında günümüzden 20.000 yıl öncesine kadar alandaki bitki örtüsünün ne olduğunun tahmini güçtür. Bu nedenle, güncel olmayan örnekler için yaş hesabında  $\delta^{13}\text{C}_{\text{toprak}}$  değerine bağlı olarak bir miktar belirsizlik olduğu göz önüne alınmalıdır. Karbon-13 düzeltmesiyle yaş hesabı yapılırken, eğer  $t_{1/2} = 5568$  yıl olarak alınırsa, Denklem 1 Denklem 3 haline gelmektedir (Clark ve Fritz, 1997). Bu denklemde,  $A_0$  100 pmc olarak kabul edilerek hesaplanmış radyokarbon yaşları çizelge 3'te sunulmuştur.

$$t = -8035 * \ln\left(\frac{A_t^{14}\text{C}}{q * A_0^{14}\text{C}}\right) \quad (\text{Denklem 3})$$

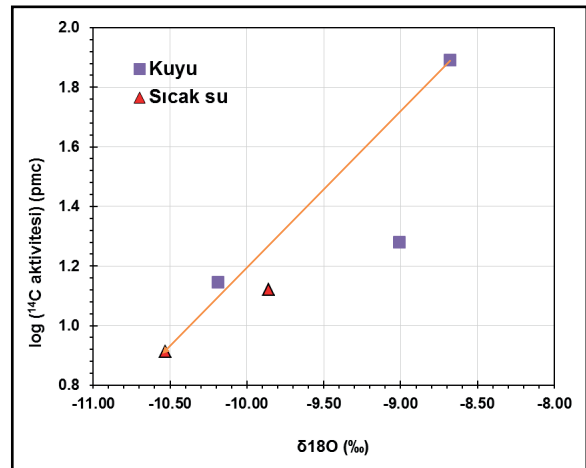
Çizelge 3'te sunulan radyokarbon yaşları karşılaştırıldığında sıcak sular için karbonat çözünmesine karşı düzeltme fazla olduğu için görünür yaşlar düzeltme yapılmadan hesaplanan yaşlara

göre oldukça düşüktür. Bunun nedeni, özellikle sıcak su örneklerine su-kayaç etkileşimi sonucunda milyonlarca yıl yaşıdaki karbonat akifer matrisinden modern karbon içeriği 0 pmc olan "ölü karbon" katkısı olmasıdır. Ölü karbon katkısı sonucunda örnekte ölçülen  $^{14}\text{C}$  konsantrasyonları seyrelmekte ve yaşlar gerçekte olduğundan daha yaşlı çıkmaktadır (Ingebritsen ve Sanford, 1998). Dolayısıyla, örnekte belirlenen karbon-13 içeriği ne kadar pozitif ise, bir başka deyişle, ölü karbon katkısı ne kadar fazla ise, düzeltilmiş yaşlar ile düzeltilmemiş yaşlar arasındaki fark da o kadar fazladır.

Düzeltilmiş yaşlar, Gümüşgölek'te örneklenen artezyen kuyudan (GG-AR-1) alınan örneğin, bünyesine akifer materyalinden yüksek miktarda ölü karbon almadan en uzun yeraltı dolaşım süresine sahip olduğu, Gevrekseydi kuyusundan alınan örnekte ise günümüz yağışlarıyla beslenmenin hakim olduğu anlaşılabilir. GG-AR-1 örneğinin yeraltı kalış süresi 11,500 yıl olarak belirlenmiştir ve sonuçlar havzada fosil yeraltı sularının varlığına işaret etmektedir. Kızılcaakaya artezyen kuyusu, sıcak sular ile benzer yeraltında kalış süresine sahip olduğu için bu kuyuya sıcak su karışımı olduğu sıcaklık ve kimyasal verilerin de desteği ile söylenebilir (Arslan ve Çelik, 2013). Su örneklerinde radyokarbon aktivitesi ile oksijen-18 içeriklerinin ilişkisini gösteren diyagrama göre ağır izotoplarca daha fakir örneklerin modern karbon aktivitesi daha düşüktür (Şekil 10).

#### 4. Sonuçlar

Hidrolojik sistem içerisinde davranışları ayrıntılı bir şekilde bilinen izotopların hidrojeolojik çalışmalarda



Şekil 10- Radyokarbon aktivitesinin logaritması ile  $\delta^{18}\text{O}$  ilişkisi.

kullanımı araştırmacılara faydalı bilgiler sunmaktadır. Bu alışmada Kproren Havzası'nda bulunan yüzey suları ve yeraltısularının izotopik özellikleri ortaya konmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre bazı örneklerin  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta\text{D}$  içerikleri Küresel Meteorik Su Doğrusu'ndan sapma göstermektedir. Bu örneklerin  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta\text{D}$  imzaları buharlaşma ile değişmiştir. Buharlaşma yüzey sularında beklenen bir durumdur. Farklı örneklenme dönemlerinde buharlaşma için belirlenen buharlaşma doğrularının eğimlerinin havadaki bağıl nem ile uyumlu olduğu ortaya konmuştur. Termal su örneklerinin  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\delta\text{D}$  içeriklerine göre Küresel Meteorik Su Doğrusu üzerinde olduğu saptanmıştır. Ayrıca, bu örnekler için su-kayaç etkileşiminin örneklerin  $\delta^{18}\text{O}$  içeriğinde artışa neden olmadığı belirlenmiş, bunun nedeni termal su örneklerinin kuyu başı ve rezervuar sıcaklıklarının nispeten düşük olmasına bağlanmıştır. Çalışma kapsamında yağışlar için  $\delta^{18}\text{O}$  ve yükseklik arasında ilişki kurmak mümkün olmadığından  $\delta^{18}\text{O}$  verilerine göre beslenme yükseltisi hesabı yapılamamıştır. Bu nedenle bu konuda yapılan yorumlar göreceli bir karşılaştırma şeklinde yapılmıştır. Tritiyum verilerine göre yeraltısuyu örneklerinin bazıları güncel yağışlar ile beslenmiş, akiferde uzun süre kalmamış, sığ dolaşımlı sulardır. Bunun yanı sıra, sıcak sular ve iki adet yeraltı suyu örneğinde belirlenmiş düşük tritiyum içerikleri akifere nükleer denemelerden önce (son 50 yıldan önce girmiş), nispeten uzun dolaşımlı suların varlığına işaret etmiştir. Dolayısıyla, bu örneklerin yeraltında kalış süresi ile ilgili daha detaylı bilgi sahip olunabilmesi için örneklere ait  $\delta^{13}\text{C}$  ve  $^{14}\text{C}$  verileri değerlendirilmiştir. Söz konusu örnekler için karbonat znmesine karşı düzeltildiği  $^{14}\text{C}$  yaşlarına göre suların yeraltında kalış süreleri günümüzden 11500 yıl öncesine kadar uzanmaktadır. Bu sonuçlara göre havzada fosil (paleo) suların varlığı ortaya konmuştur. Sıcak sular için su-kayaç etkileşimi sonucunda örneklerin bünyelerine kayaçlardan aldığı l karbon nedeniyle örneklerde llen  $^{14}\text{C}$  konsantrasyonları seyrelmiştir, dolayısıyla bu örnekler için karbonat znmesine karşı düzeltme fazladır.

### Katkı Belirtme

Bu alışma TÜBİTAK tarafından 110Y225 proje numarası ile desteklenmiştir. Arazi alışmaları sırasında verdikleri destekten ötürü yöre halkına, Mehmet elik, Uğur Erdem Dokuz ve Orhan Arslan'a teşekkürü bir borç biliririm.

### Değinilen Belgeler

- Akdeniz, N. Konak, N. 1979. Simav-Emet-Tavşanlı-Dursunbey-Demirci Yrelerinin Jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Rapor No: 6547*, 108 s. Ankara (yayımlanmamış).
- Arık, F. 2002. Gümüşköy (Kütahya) gümüş yatağının jeokimyasal modellenmesi. Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü*, 318 s. Konya (yayımlanmamış).
- Arslan, ř., elik, M. 2013. Kproren Havzası (Kütahya) yüzey ve yeraltısularında arsenik kirliliğinin hidrojeokimya ve çevresel izotoplarla incelenmesi. TÜBİTAK proje raporu No: 110Y225, 149 s. Ankara (yayımlanmamış).
- Arslan, ř., elik, M., Dokuz, U.E., Berhe, B.A. 2013. Kproren Havzasında (Kütahya) insan kaynaklı su kirliliği. 2. *Tıbbi Jeoloji alıştayı*, 4-6 Aralık 2013, Antalya, 213-219.
- Arslan, ř., elik, M. 2015. Assessment of the Pollutants in Soils and Surface Waters around Gümüşköy Silver Mine (Kütahya, Turkey). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 95, 499-506.
- Arslan, ř., Yazıcıgil, H., Stute, M., Schlosser, P., Smethie, W.M. 2015. Analysis of groundwater dynamics in the complex aquifer system of Kazan Trona, Turkey, using environmental tracers and noble gases. *Hydrogeology Journal* 23, 175-194.
- Baş, H. 1983. Domaniç-Tavşanlı-Kütahya-Gediz Yrelerinin Tersiyer Jeolojisi ve Volkanitlerin Petrolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Rapor No. 7293*, Ankara (yayımlanmamış).
- Baş, H. 1986. Domaniç-Tavşanlı-Kütahya-Gediz Yrelerinin Tersiyer Jeolojisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 27, 11-18.
- Baş, H. 1987. Tavşanlı- Domaniç (Kütahya) Volkanitlerinin zellikleri ve Batı Anadolu Senozoyik Volkanizmasındaki nemi. *Türkiye Jeoloji Bülteni* 30, 67-80.
- Bayarı, C.S., zyurt, N.N., Kilani, S. 2009 Radiocarbon age distribution of groundwater in the Konya Closed Basin, central Anatolia, Turkey. *Hydrogeology Journal* 17, 347-365.
- Clark, I., Fritz, P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. *CRC Press*, 342 s.

- Clark, J.F., Stute, M., Schlosser, P., Drenkard, S. 1997. A tracer study of the Floridan aquifer in southeastern Georgia: implications for groundwater flow and paleoclimate. *Water Resources Research* 33, 281–289.
- Çelik, M., Dokuz, U.E., Türköz, P.E., Güllü, Ö., Arslan, Ş. 2013. Nasrettin Hoca kaynağının (Sivrihisar, Eskişehir) hidrojeokimyasal ve izotopik incelemesi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* 146, 93-104.
- Çelik, Y., Kerey, İ.E. 1999. Domaniç Neojen Havzası Kömür İçerikli Çökellerin Litofasiyeleri ve Depolanma Ortamları. 52. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildirileri Kitabı*, 10-12 Mayıs 1999, Ankara, 318-325.
- Çifter, C., Sayın, M. 2002. İzotopların hidrolojide kullanılması, *Hidrolojide İzotop tekniklerinin kullanılması sempozyumu*. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 21-25 Ekim 2002, Adana, 1-14.
- DSİ. 1981. Kütahya ve Köprüören Ovaları Hidrojeolojik Etüt Raporu, *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü*, 64 s, Ankara (yayımlanmamış).
- Fournier, R.O. 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics* 5, 41-50.
- Güleç, N., Mutlu, H. 2002. Jeotermal Alanlarda İzotop Jeokimyası. Jeotermalde Yerbilimsel Uygulamalar, Yaz Okulu Ders Kitabı. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları* No. 306, 64-88 s. İzmir
- Ingebritsen, S.E., Sanford, W.E. 1998. Groundwater in Geologic Processes. *Cambridge University Press*, 564 p.
- Konak, N. 1979. Simav grabeni ve getirdiği kentleşme sorunları. *Türkiye Jeoloji Mühendisliği 1. Bilimsel ve Teknik Kongresi Bildirileri*, 157-164.
- Mazor, E. 1991. Applied chemical and isotopic groundwater hydrology. *Wiley*, 256 p.
- Pearson, F.J. 1965. Use of C-13/C-12 Ratios to Correct Radiocarbon Ages of Material Initially Diluted by Limestone. Chatters R.M., Olsen, E.A. (Eds.) Proceedings of the 6th International Conference on Radiocarbon and Tritium Dating. *US Atomic Energy Commission, CONF-650652*. Washington, 357-366.
- Pearson, F.J., Hanshaw, B.B. 1970. Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating. *International Atomic Energy Agency Symposium on Use of Isotopes in Hydrology*, 1970, Vienna, 271-285 p.
- Schlosser, P., Stute, M., Horr, C., Sonntag, C., Munnich, K.O. 1988. Tritium/<sup>3</sup>He Dating of Shallow Groundwater. *Earth and Planetary Science Letters* 89, 352-363.
- Vogel, J.C. 1993. Variability of carbon isotope fractionation during photosynthesis. Ehleringer, J.R., Hall, A.E., Farquhar, G.D. (Eds.). Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations. *Academic Press*. San Diego, 29-45.