

Doğu Anadolu Fay Zonu Ilıca Segmentindeki Traverten Oluşumlarına Bir Örnek: Hacılar (Bingöl) Sırt Tipi Traverten

Serap ÇOLAK EROL^{1*}, Ercan AKSOY²

^{1,2} Jeoloji Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

^{*1} serapcolak@firat.edu.tr, ² eaksoy@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 17/03/2025;

Kabul/Accepted: 03/07/2025)

Öz: Bu çalışmada Bingöl şehir merkezinin yaklaşık 34 km kuzeydoğusunda bulunan ve Türkiye'nin ikinci büyük neotektonik yapısı özelliğine sahip sol yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Ilıca segmenti üzerindeki sırt tipi traverten oluşumu ele alınmıştır. Paleozoik-Mesozoik yaşlı Bitlis Metamorfitleri'nin Bingöl çevresindeki yüzlekleri, traverten oluşumunda kaynak kaya rolü oynamakta olup genellikle mermerlerle karakterize edilir. Çoğunlukla piroklastik kayalardan oluşan Solhan Volkanitleri'nin ise bu sıcaklığı koruyan bir örtü kaya rolü oynadığı düşünülmektedir. Traverten örneklerinde belirlenen element miktarları, Ca: 370140-380789 ppm, Mg: 7116.30-9468.30 ppm, Sr: 7104-16292 ppm düzeyindedir. Yüksek Sr içeriği, sırt tipi traverten çökelten suların derin dolaşımı olduğunu göstermektedir. $\delta^{13}\text{C}$ değerleri 4.9 ile 6.1 (‰ PDB), $\delta^{18}\text{O}$ değerleri ise -18.6 ile -15.0 (‰ PDB) arasındadır. Pozitif $\delta^{13}\text{C}$ değerleri, magmatik faaliyetlerin dışında termo-metamorfik süreçler sonucunda ortaya çıkan CO_2 'nin katkısını göstermektedir. Örneklerden elde edilen U-Th yaş verileri, traverten çökelişinin günümüzden en azından 7000 yıl önce Holosen'de (MIS 1, Marine Isotope Stage'e denk gelen zamanda) başlamış olduğuna işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: Doğu Anadolu Fay Zonu, Ilıca segmenti, sırt tipi traverten, Bingöl, U-Th yaş analizi.

An Example of Travertine Formations in the Ilıca Segment of the East Anatolian Fault Zone: Hacılar (Bingöl) Ridge Type Travertine

Abstract: In this study, the formation of ridge type travertine on the Ilıca segment of the left-lateral strike-slip East Anatolian Fault Zone, which is located approximately 34 km northeast of Bingöl city center and has the second largest neotectonic structure feature in Turkey, is discussed. The outcrops of the Paleozoic-Mesozoic Bitlis Metamorphites around Bingöl play the role of source rock in the formation of travertine and are generally characterized by marbles. It is thought that the Solhan Volcanics, which mostly consist of pyroclastic rocks, play the role of a cap rock that maintains this temperature. The element amounts determined in the travertine samples are Ca: 370140-380789 ppm, Mg: 7116.30-9468.30 ppm, Sr: 7104-16292 ppm. The high Sr content indicates that the waters that precipitated the ridge type travertine had deep circulation. $\delta^{13}\text{C}$ values range from 4.9 to 6.1 (‰ PDB), and $\delta^{18}\text{O}$ values range from -18.6 to -15.0 (‰ PDB). Positive $\delta^{13}\text{C}$ values indicate the contribution of CO_2 resulting from thermo-metamorphic processes other than magmatic activities. U-Th age data obtained from the samples indicate that travertine deposition started at least 7000 years ago in the Holocene (corresponding to MIS 1, Marine Isotope Stage).

Key words: The East Anatolian Fault Zone, Ilıca segment, ridge type travertine, Bingöl, U-Th age analysis.

1. Giriş

Traverten, karstik ve sıcak su kaynaklarının çevresinde, küçük nehirler ve bataklıklarda oluşabilen, kimyasal ve/veya biyokimyasal yolla çökelebilen sık dokulu kalsiyum karbonat (CaCO_3) birikimleri olarak adlandırılır ve birincil minerali kalsittir [1-5].

Barnes ve diğerlerinin belirttiği gibi faylanmalar, hidrotermal akışkanın yüzeye taşınmasında önemli rol oynadığından, dünya çapında traverten çökelişi ile tektonik olarak aktif olan zonlar arasında çok yakın bir ilişki vardır [6]. Bundan dolayı travertenler, bölgesel tektoniğin bazı belirtilerini yansıtır. Pleyistosen döneminden günümüze kadar birçok traverten kütlesi oluşmaya devam ettiğinden [7] hem aktif hem de aktif olmayan travertenlerin varlığı, tektonik aktivitenin günümüzde ya da yakın geçmişte hâlâ devam ettiğine işaret etmektedir. Aktif ve aktif olmayan travertenlerin aynı bölgede bulunması, tektonik aktivitenin binlerce yıldır sürdüğünün bir göstergesidir. Travertenler, çökeltme sırası ve çökeltme sonrası tektonik kayıtları barındırdığından bu süreçlerde yaşanan tektonik hareketlilik hakkında değerli bilgiler sunar [8].

* Sorumlu yazar: serapcolak@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1957-3012, ² 0000-0001-5078-7217

Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ), ülkemizin depremselliği açısından en önemli fay sistemlerinden biri olup kuzeydoğuda Karlıova (Bingöl) ile güneybatıda Akdeniz arasında uzanır. Fay zonu, Anadolu bloğu ile Arap-Afrika plakaları arasında ortaya çıkan etkileşimi, yanal bir hareketle karşılar [9-15]. DAFZ, günümüze kadar farklı disiplinlerden birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve Doğu Akdeniz'in en önemli aktif tektonik yapılarından biri olarak nitelendirilmiştir. Faylar ve travertenler arasındaki ilişki, ülkemizde pek çok araştırmacı tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir [16-32].

2. Jeolojik-Tektonik Özellikler

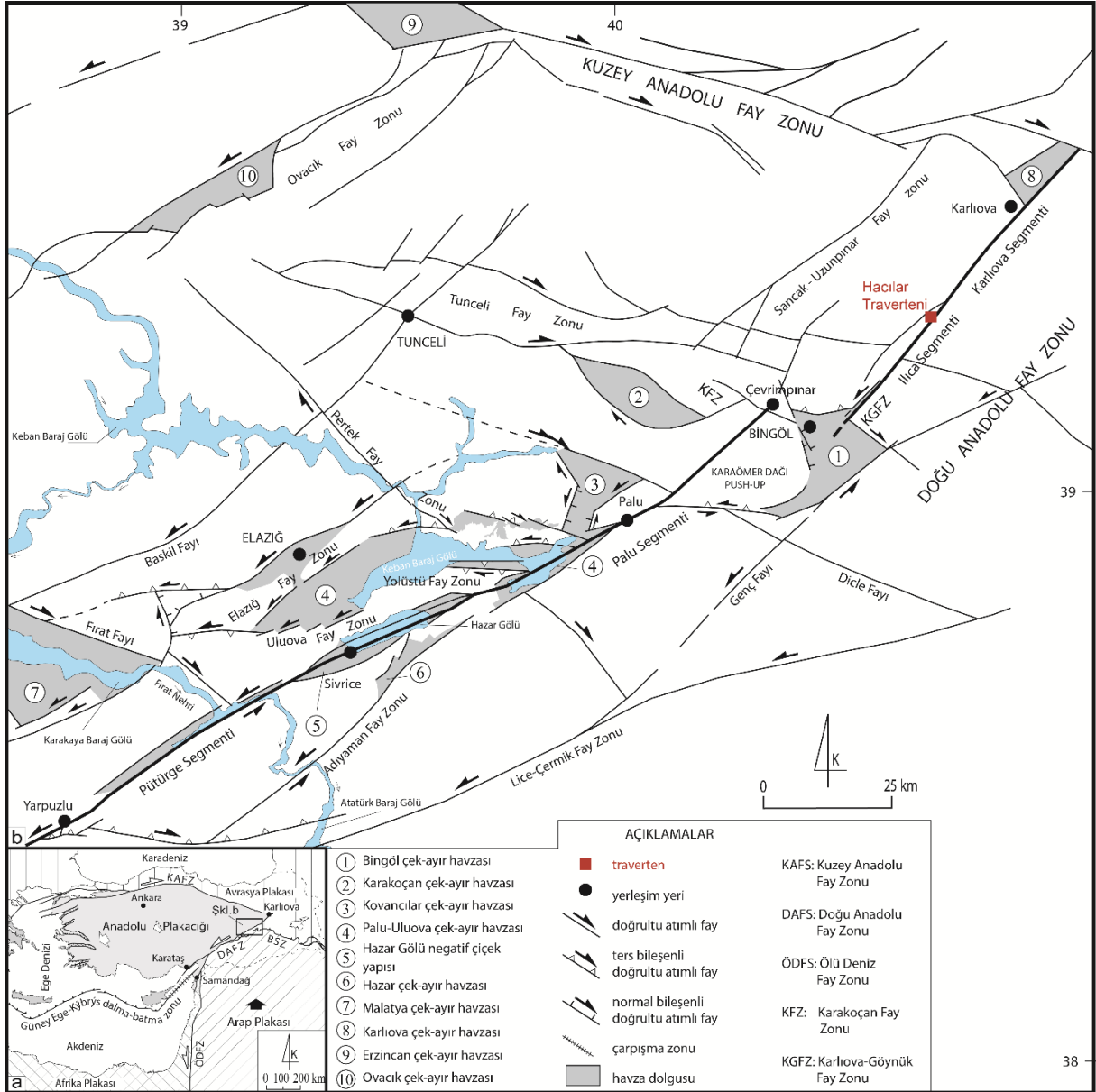
Çalışmanın odak noktasını oluşturan Hacılar traverteni, Bingöl-Karlıova karayolunun (Erzurum-Bingöl D950 numaralı devlet karayolu) 43. kilometresinde yer alan Hacılar Köyü'nün (Karlıova / Bingöl) yaklaşık 1.5 km güneybatısında yüzeylemektedir. Şekil 1 ([12]'den değiştirilerek) ve 2'de [28] gösterilen ve Hacılar traverteni olarak adlandırılan bu yüzlek, Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Ilica segmenti üzerinde depolanmıştır. Morfolojik yapıya bağlı sınıflama türüne göre *sırt tipi traverten* kategorisine girmektedir. Şekil 2'deki 1 no'lu sırt, köyün yerleşim alanı içinde kalmış olup, deniz seviyesinin 1570 m üzerinde yer alır [28]. Bu sırtı oluşturan travertenler, köylüler tarafından yapı taşı olarak kullanıldığından ötürü söz konusu sırt tahrip edilmiştir. Şekil 2 ve 5'de gösterilen 2 no'lu sırt ise köyün 1.5 km batı-güneybatısında ve deniz seviyesinin 1540 m üzerinde yer alan sırttır. 3 no'lu sırt Hacılar Köyü'nün yaklaşık 2 km güneybatısında, deniz seviyesinin 1570 m üzerinde bulunur. Bu çalışmada köyün sadece 1.5 km batı-güneybatısındaki 2 no'lu sırt incelenmiştir.

Hacılar Köyü çevresinde Pliyosen yaşlı Solhan Volkanitleri ile Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı Bitlis Metamorfikleri yüzeyler. Solhan Volkanitleri'ni karasal kökenli sedimanter kayalar, bazaltik-andezitik bileşimli lav, obsidiyen, aglomera, volkanik breş, lapilli, tuf ve kül içeren piroklastik kayalar oluşturmaktadır [33]. Bitlis Metamorfikleri ise Hacılar Köyü yakınında üst gruba ait mermerlerle temsil edilmektedir. Fay zonu içinde olmalarından dolayı, fazlasıyla ezik ve breşik bir yapı niteliği kazanan mermerlerin bu yapısı, hidrotermal akışkanların dolaşımı ve yüzeye çıkması için uygun bir ortam oluşturur. Büyük kısmı mermerlerden oluşan Bitlis Metamorfikleri'nin, traverten oluşumunu sağlayan sıcak sular için hazne kaya rolü oynadığı; çoğunlukla piroklastik kayalardan ibaret olan Solhan Volkanitleri'nin ise bu sıcaklığı koruyan bir örtü kaya niteliği taşıdığı düşünülmektedir (Şekil 3 ve 4 [28]).

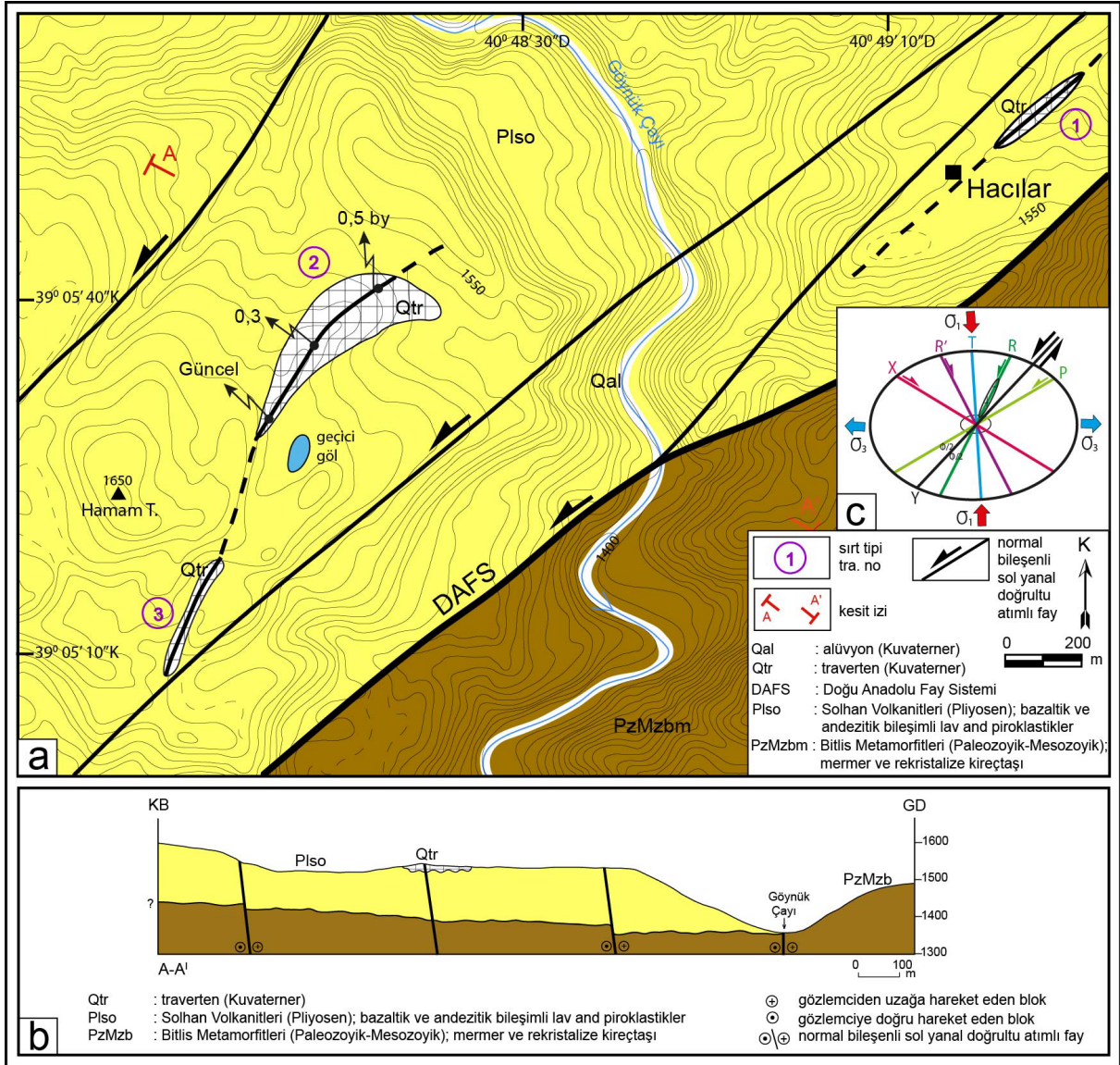
Şekil 5'te görülen Hacılar sırt tipi travertenin üzerinde yer aldığı Solhan Volkanitleri, Doğu Anadolu Bölgesi'nde kendisinden yaşlı birimleri keserek yüzeye kadar ulaşan volkanizma ürünlerinden oluşur ve farklı alanlarda farklı kayaç birimlerini örter. Hacılar Köyü yakınında ise genellikle bazaltik-andezitik bileşime sahip piroklastiklerle temsil edilen birimin taban kısmında, Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı Bitlis Metamorfikleri'nin mermer ve şistleri bulunur [33]. Hacılar sırt tipi traverteni yakın çevresinde, her iki birim arasındaki sınırı, DAFZ'nin Ilica segmenti oluşturur (Şekil 2). Hacılar Köyü'nün yakın çevresinde fayın dallanması ve örgülü yapıya sahip olmasından dolayı, doğrultu atımlı faylara özgü yapılardan olan uzamış sırtlar ile çizgisel dizilmiş heyelanlar oldukça yaygındır.

Traverten sırtları, ana kayadaki kırıklar boyunca yükselen sıcak sulardan oluşan traverten depolanmalarını karakterize eden yaygın morfotektonik oluşumlardır [5, 16, 18, 26, 34-38]. Sırtların uzunlukları 2 km, genişlikleri 400 m ve yükseklikleri 20 m'ye kadar olabilen ve harita görünüşlerinde çizgisel veya eğri biçimli olan yapılardır [39].

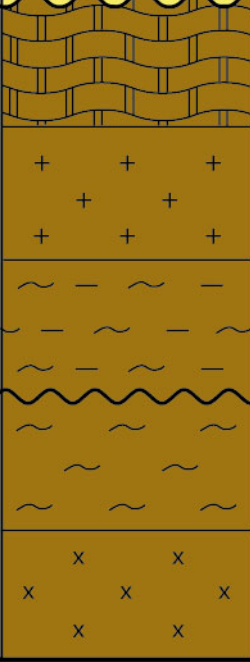
Çalışma alanında yer alan traverten sırtının eksen, harita görünüşü dikkate alındığında GD'ya doğru içbükey bir görünüm sergilemektedir. Ana fay ile üzerinde traverten sırtının geliştiği kırık arasında 10° lik bir açı vardır. Şekil 6'da verilen çatlak eksen için hazırlanan doğrultu gül diyagramına göre ([21]'den değiştirilerek) K 25° D ve K 55° D olmak üzere iki kırık takımı şeklinde yoğunlaşmış ortalama doğrultusu, K 40° D' dur. DAFZ'nun ana kırığının bu bölgedeki doğrultusu, K 50° D'dur.



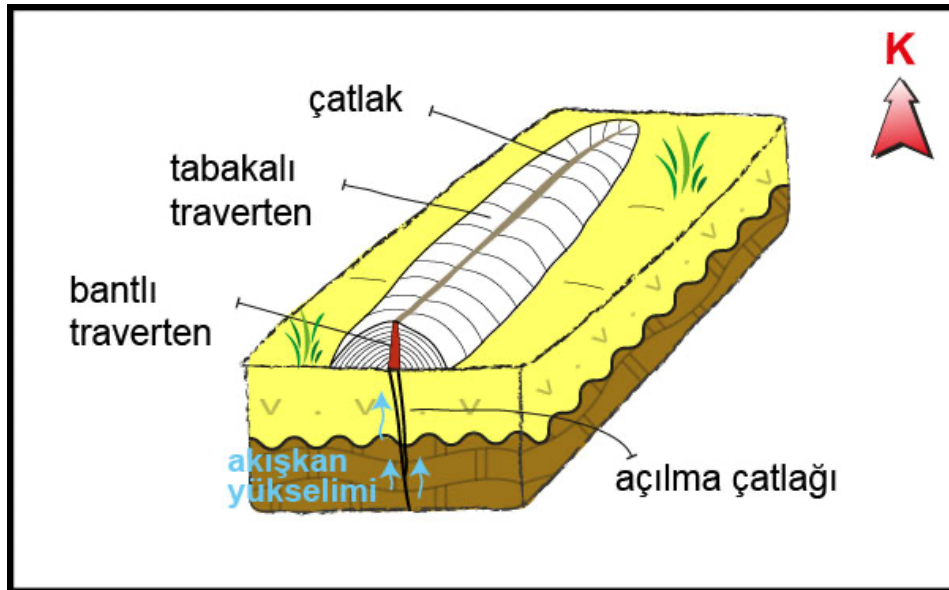
Şekil 1. Çalışma sahasına ait harita. a-Doğu Akdeniz Bölgesi'nin ana plakaları ve bunları sınırlayan faylar (sadeleştirilmiş) b- Çalışma sahasının yeri ve Bingöl-Elazığ dolayında Doğu Anadolu Fay Zonu'nu meydana getiren ana fay zonlarını ve doğrultu atım havzalarını gösteren tektonik harita



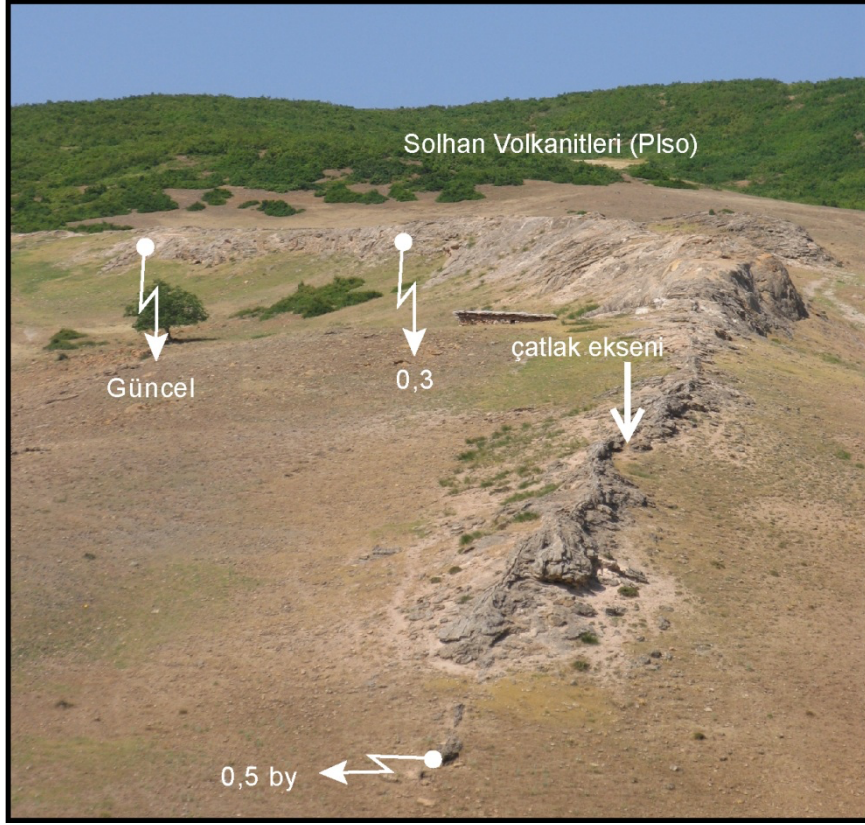
Şekil 2. Hacılar sırt tipi traverten çevresine ait
a- jeolojik harita b- enine jeolojik kesit; c- travertenin deformasyon elipsoidi üzerindeki konumu

Yaş	Kayaç Birimi	Litoloji	Açıklama
Kuvaterner	Traverten		traverten
Pliyosen	Solhan Volkanitleri		bazaltik-andezitik bileşimli lav ve piroklastikler
Paleozoyik - Mesozoyik	Bitlis Metamorfitleri		mermer
			kuvarsit
			mika şist
			amfibolit şist
			gnays

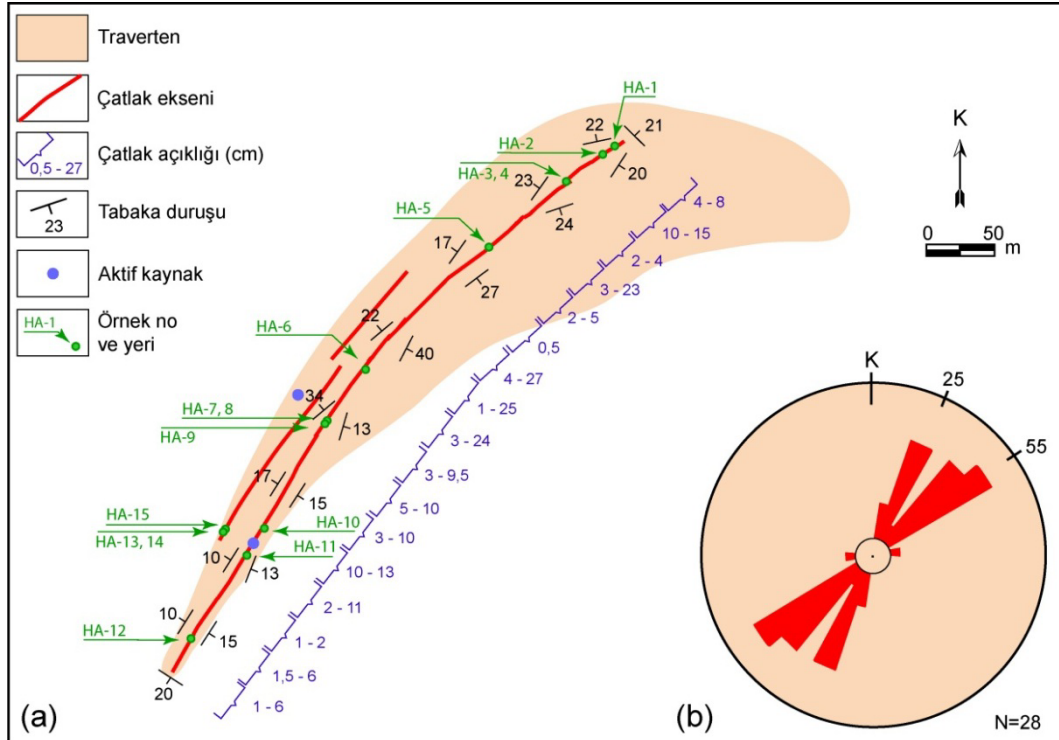
Şekil 3. Hacılar sırt tipi traverten çevresinin genişletilmiş stratigrafik dikme kesiti



Şekil 4. Hacılar sırt tipi travertenin oluşum modeli



Şekil 5. Hacılar Köyü'nün 1.5 km GB'sında Solhan Volkanitleri üzerinde yer alan sırt tipi travertenin arazi görünümü; by: bin yıl. Bakış, B'ya



Şekil 6. a- Sırt haritası; b- çatlak eksenı doğrultu gül diyagram

3.Yöntem ve Bulgular

3.1.Depolanma Özellikleri

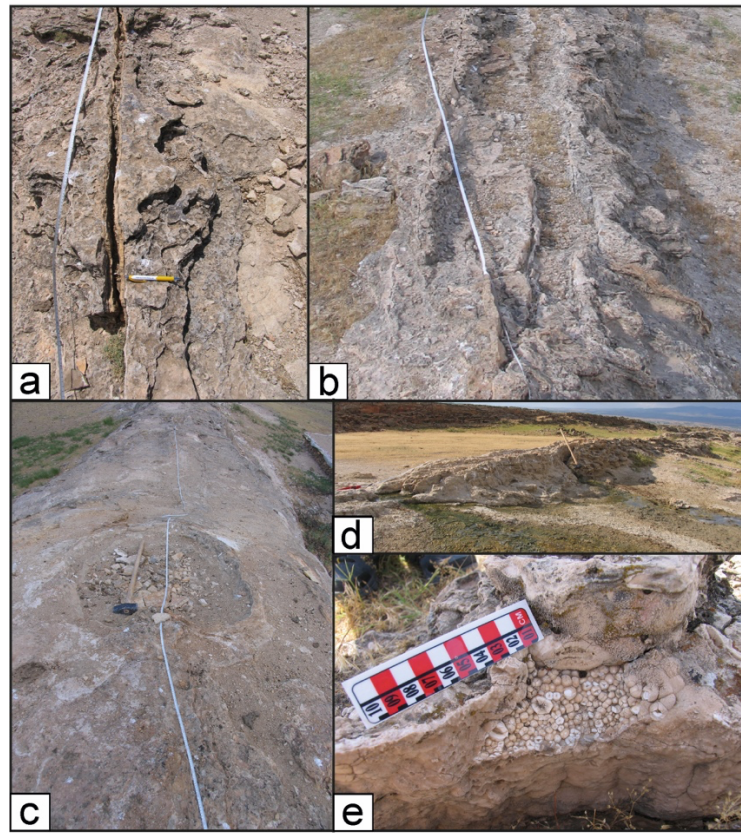
Saha çalışmaları sırasında sırt eksenin doğrultusu ve doğrultudaki değişimler jeolog pusulası ile ölçülmüştür. Aynı şekilde sırt ekseninin her iki tarafında yer alan eğimli traverten tabakalarının eğim ve doğrultuları pusula yardımıyla ölçülmüştür. Traverten sırtı, fotoğraflanmış ve haritalanmıştır. Buna göre sırt tipi travertenin çatlak ve yamaçlarına ait depolanma özellikleri tespit edilmiştir.

Çatlak

Sırtın ana çatlağı, 520 m uzunluğunda bir yay şeklinde olup iç bükey kısmı GD'ya bakmaktadır (Şekil 2, 5, 6). Sırt eksenini boyunca, bazı kesimlerde bir adet basit çatlak (Şekil 7a), bazı kesimlerde ise çoklu (Şekil 7b), birbirine paralel ve yer yer sıçramalar yapan kademeli çatlaklar gelişmiştir. Çatlakların açıklık miktarı, sırtın orta bölümünde en yüksek değerlerde seyrederken (27cm), uçlara doğru açıklık miktarı azalmaktadır (0.5cm) ve çatlak duvarları, düşey konumlu bantlı travertenlerle kaplıdır. Bu konumda yer alan kalsit kristalleri, sıkı, boşluksuz ve ince kristallidir. Ana çatlağın bazı kesimlerinde, kaynak ağız çapının 15-220 cm aralığında olduğu ve sıcak suların yüzeye ulaştığı gözlenmektedir (Şekil 7c, d). Bazı kaynak ağızlarında ve çatlak duvarlarına tutunmuş şekilde, 2 cm'ye ulaşan çaplara sahip pizoidler gözlenmiştir (Şekil 7e).

Sırt Yamaçları

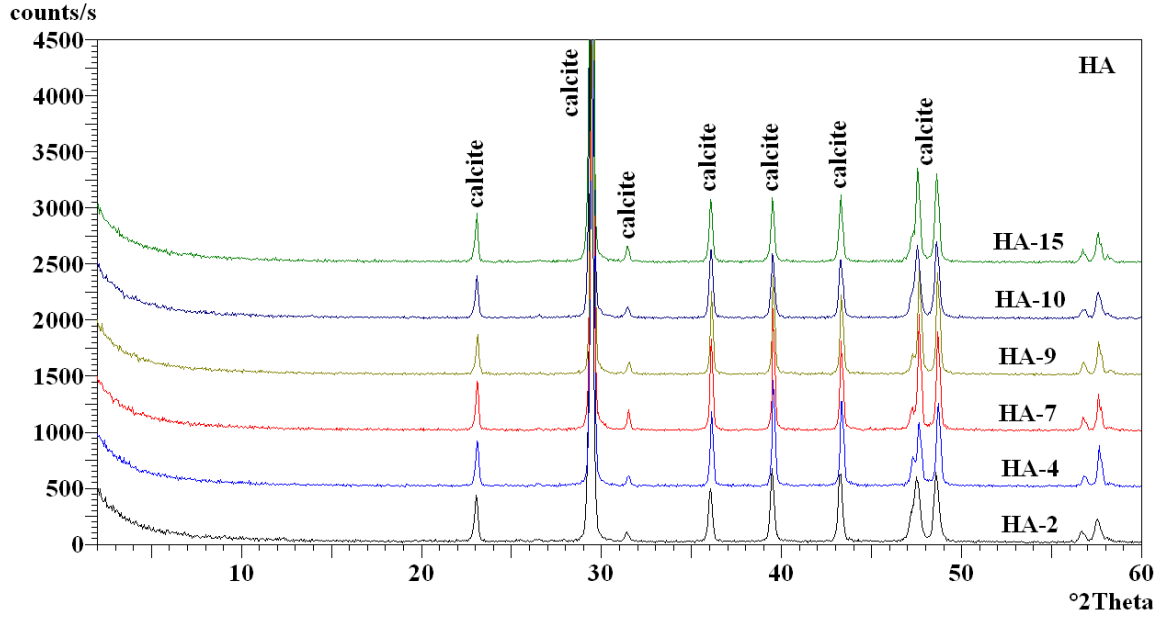
Sırt yamaçları, tabakalı travertenlerden oluşmakta olup, yamaç yüzeylerinde traverten tabakalarının eğimleri, kısa mesafede sık sık değişmekte ve 40°'ye kadar eğimlerle sırt ekseninden uzaklaşmaktadır (Şekil 6). Tabaka eğimlerinin çatlak eksenine dik bir şekilde geliştiği gözlenmiş olup, çatlak uçlarında çatlak eksenine paralel gelişim söz konusudur. Bu eğimlerin tektonizma etkiyle oluşmadığı ve ilksel olarak kazanılan bir özellik olduğu düşünülmektedir. Kristalin kabuk tipi travertenler [5, 41], tabakalı travertenlerin en önemli bileşeni olan ve yamaç yüzeylerinde termal suyun hızlı ve türbülanslı akışı ile oluşan litotiptir. Kalınlıkları 10 cm seviyelerine kadar ulaşan kristalin kabuk traverten tabakaları, depolanma yüzeyine dik gelişmiş sedir ağacı görünümüne sahip kalsit kristal demetlerinden kuruludur.



Şekil 7. Hacılar sırt tipi traverteninin saha görüntüleri. a- Basit çatlak, b- kademeli çatlaklar, c ve d- aktif ve pasif kaynak ağızı, e- pizoid örneği

3.2. Mineralojik Bileşim

Çatlak ve yamaçlardaki traverten çökeltilerini oluşturan ve submikroskopik tane boyuna sahip (optik mikroskop ile incelenemeyecek boyutlardaki) karbonat minerallerini belirlemek amacıyla Jeolojik ve Jeokimyasal Araştırma Enstitüsü'ndeki (Budapeşte, Macaristan) Philips PW1730 difraktometresi kullanılarak 45 kV ve 35 mA'da CuK α radyasyonu ile X-ışını kırınım yöntemi (XRD) tekniğiyle numuneler analiz edildi. Bu amaçla, taze, hava koşullarına maruz kalmamış numunelerden elde edilen rastgele yönlendirilmiş tozlar kullanıldı ve yarı-kantitatif mineral bileşimi, ilgili yöntemle göre [42] belirlendi. Buna göre Şekil 8'de görülen [21] Hacılar sırt tipi travertenine ait 6 adet örneğin XRD difraktogramı incelendiğinde tamamen kalsitten oluştuğu ve bazı örneklerde eser miktarda kuvarsa rastlandığı gözlenmiştir.



Şekil 8. Hacılar traverten örneklerinin XRD difraktogramı

Traverten örneklerine ait element bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir [21]. Örneklerde en yüksek element konsantrasyonlarına Ca ile Mg sahiptir ve ppm seviyeleri sırasıyla 380789 ppm ve 9468 ppm'dir. Sr içerikleri de, 7104-16292 ppm arasında değişmekte ve çok yüksek konsantrasyon seviyelerine sahiptir. Dünya ölçeğinde travertenlerdeki Sr içeriğinin 20-14000 ppm arasında değiştiği bilindiğinden [43] Hacılar traverten örneklerindeki Sr içeriğinin yüksekliğine bağlı olarak traverten çökelten termal suların, derin dolaşimli sular oldukları düşünülmektedir.

Tablo 1. Hacılar traverten örneklerinin element konsantrasyonları (ppm)

Hacılar Örnek No	Ca	Si	Al	Fe	Mg	Mn	Ba	Sr
HA-2	370140	6030	2858	2308.14	7960.61	< 7745	107	15007
HA-7	379645	1963	371	5595.49	8201.84	< 7745	45	7104
HA-9	380217	1075	476	3217.41	8563.68	< 7745	65	9210
HA-9A	374714	2104	847	1818.53	9468.30	< 7745	117	16292
HA-10	376643	1169	318	5595.49	7116.30	< 7745	109	13728
HA-15	380789	1075	212	3357.29	8865.22	< 7745	81	11431

3.3. Duraylı İzotop Bileşimi

Çatlak ve yamaçlardaki traverten oluşumunun duraylı izotop sonuçları, bunların kökeni hakkında bilgi sağlama potansiyeline sahiptir [22, 43, 44]. Bantlı travertenlerin duraylı izotop analizleri, IGGR-HAS'ta (Jeoloji ve Jeokimyasal Araştırma Enstitüsü, Macaristan Bilimler Akademisi, Astronomi ve Yer Bilimleri Araştırma

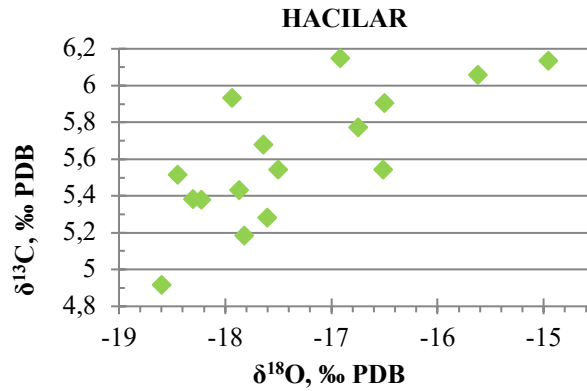
Merkezi) gerçekleştirildi. Yığın karbonat örneklerinin karbon ve oksijen izotop analizleri, sürekli akış tekniği kullanılarak gerçekleştirildi [45]. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ve $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ oranları, CO_2 gazlarında Finnigan Thermo delta plus XP kütle spektrometresi kullanılarak belirlendi. Tüm örnekler en azından iki kez ölçüldü ve izotopik bileşimler, Vienna Pee Dee Belemnite'e (VPDB; $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$) göre binde δ gösteriminde ifade edildi.

Termojen yani kireçtaşlarından çözünen veya doğrudan üst mantodan gelen CO_2 kaynaklı çökeller, yaygın olarak volkanik veya tektonik aktivitenin olduğu bölgelerde gözlenir. Meteojen çökeller ise topraktan ve atmosferden gelen CO_2 'yi kullanan çökellerdir [46]. Termojen travertenlerin duraylı izotop kayıtları genellikle pozitif değerler verirken, meteojen travertenlerin (ör., tufaların) duraylı izotop kayıtları genellikle negatif değerler verir [43]. Pozitif $\delta^{13}\text{C}$ değerleri, magmatik faaliyetlerin dışında termo-metamorfik süreçler sonucunda ortaya çıkan CO_2 'nin katkısını gösterirken, negatif $\delta^{13}\text{C}$ değerleri olasılıkla derin kökenli CO_2 ve toprak zonundan gelen CO_2 'nin birleşmesini gösterir.

Köken belirleme amacıyla bu sırt tipi travertenler üzerinde $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ duraylı izotop analizleri yapılmıştır. Tablo 2'de görülen sonuçlara göre [21] Hacılar traverten örneklerinin $\delta^{13}\text{C}$ değerlerinin +4.9 ile +6.1 (‰ PDB) arasında olduğu; $\delta^{18}\text{O}$ değerlerinin ise -18.6 ile -15.0 (‰ PDB) arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 9'da [28] Hacılar traverten örneklerinin $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ izotop değerlerinin grafik dağılımı verilmiştir. Gerek $\delta^{13}\text{C}$, gerekse $\delta^{18}\text{O}$ değerlerinin oldukça homojen bir dağılım sunduğu görülmektedir. Tüm örnekler hidrotermal kökenli olmakla birlikte, bantlı travertenlerin olduğu çatlak boşluğu, göreceli olarak daha homojen bir ortam olması nedeniyle birbirine çok yakın ^{13}C değerleri vermiştir.

Tablo 2. Hacılar traverten örneklerinin $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ duraylı izotop değerleri

Hacılar Örnek No	Traverten tipi	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ PDB)
HA-1	Bantlı	5.5	-16.5
HA-2	Kristalin kabuk	6.1	-16.9
HA-3	Bantlı	5.4	-18.3
HA-4	Bantlı	5.5	-18.4
HA-5	Bantlı	5.3	-17.6
HA-6	Bantlı	5.5	-17.5
HA-7	Bantlı	5.8	-16.8
HA-8	Kristalin kabuk	5.4	-17.9
HA-9	Pizolit	6.1	-15.0
HA-10	Kristalin kabuk	5.9	-17.9
HA-10a	Bantlı	5.9	-16.5
HA-11	Oolit	5.7	-17.6
HA-12	Bantlı	5.2	-17.8
HA-13	Bantlı	4.9	-18.6
HA-14	Bantlı	6.1	-15.6
HA-15	Bantlı	5.4	-18.2



Şekil 9. Hacılar traverten örneklerinin $\delta^{13}\text{C}$ ve $\delta^{18}\text{O}$ izotop değerlerinin grafik dağılımı

3.4.Yaş Bulguları

Traverten ve ilişkili karbonat damarlarının tarihlendirilmesi önemlidir. Çünkü tektonik ve paleosismik aktivitenin zamanlaması üzerinde kısıtlamalar getirir [27, 39, 44]. U-Th tarihlemesi için, boşluk dolduran kalsit çimentolarından kaynaklanan ikincil kirlenmeleri önlemek amacıyla açık renkli, yoğun ve görünüşte gözeneksiz birincil örnekler (çoğunlukla bantlı/damar, kristalin kabuk ve sal litotipleri) seçilmiştir. Traverten örneklerinin U serisi tayini, Kanada, Montreal'deki Quebec Üniversitesi'nin GEOTOP araştırma merkezinde gerçekleştirilmiştir.

Uranyum-Toryum, kalsiyum karbonat (CaCO_3) materyallerin yaşını belirlemek amacıyla yaygın şekilde kullanılan bir radyometrik yaşlandırma tekniğidir. Bu çalışmada Smart (1991) temel alınarak kullanılan tekniğin genel ilkeleri oluşturulmuştur [47]. Kuramsal açıdan Ca (kalsiyum) içeren doğal sularda U (uranyum) rahatlıkla çözülebilir. Dolayısıyla çökelti sonucu meydana gelen kayaçlar uranyum izlerini taşır. Th (toryum), U'dan farklı olarak çözeltide çözülemez ve hızlıca hidroliz olur. Katı yüzeyler üzerine sıkıca tutunabildiğinden bu sulardan çökelen kayaçlar genellikle toryum içermez. Uranyum, kalsiyum karbonatın kimyasal veya biyolojik çökmesi esnasında, aynı anda çökmekte ve kalsit kristalleri arasında depolanmaktadır. Fakat toryum çökmemekte ve doğal sulardaki toryum miktarı göz ardı edilmektedir. Dolayısıyla ana izotop olan ^{234}U 'a karşın ^{230}Th eksikliği ortaya çıkar. Zamanla $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ oranı, eşitlik sağlanıncaya dek kademeli şekilde yükselir. ^{234}U ve ^{238}U arasında bir eşitsizlik ortaya çıkar ve ^{234}U 'nın ayrışması sayesinde $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ oranı giderek artar.

Bir karbonat örneği için Uranyum serisi yaş tekniğinin başarılı şekilde uygulanması için depolanma sırasında kristallerde ^{230}Th var olmaması ve tane yüzeylerindeki toryumun, ^{232}Th olması gereklidir; ayrıca karbonat örneği aynı çözeltiden hemen kristallenmiş olmalıdır. Bu nedenle sonradan gelen toryum kirliliğini takip etmek amacıyla bu uzun ömürlü izotoptan yararlanılabilir. Eğer $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ değeri 20'den düşükse ^{230}Th için düzeltme gereklidir. Düzeltme için farklı metodlar uygulanmakta olup, taneli ve çok poroziteli örneklerden sakınılmalıdır. Ayrıca sistemin çökme bittikten sonraki U ve Th sirkülasyonuna kapalı olması gereklidir. Fazla gözeneklilik işaretleri olan örneklerden sakınılmalı, rekristalleşme ve ikincil kristalleşme oluşmamalıdır. U-Th yaşlandırma tekniği, özellikle 400.000-5.000 yıl arasında uygulanabilmektedir [44].

Bu çalışma kapsamında Hacılar traverten sahasından alınan 5 adet traverten örneği için U-Th yaşlandırma tekniği uygulanmış ve Tablo 3'te görülen U-Th yaşları elde edilmiştir [28]. Bu yaş verileri dikkate alındığında Hacılar sırt tipi traverten sahasında traverten çökeliiminin günümüzden yaklaşık 7000 yıl önce, Holosen (MIS 1, Marine Isotope Stage)'e denk gelen zamanda başlamış olduğu söylenebilir. Travertenin çökmesinden sorumlu termal akışkanların taşınmasını ve CO_2 salınımının bu zaman aralığında aktif olduğu söylenebilir. Ayrıca batı kısımda bulunan 150 m'lik kısa sırtın 520 m'lik uzun sırttan daha yaşlı olması, kırıkların ana faya doğru gençleştiğini gösterir.

4.Tartışma ve Sonuçlar

Traverten oluşum tipleri, tektonizma ile yakından ilişkilidir. Özellikle termojen kökenli traverten oluşumları için jeotermal bir aktiviteye ihtiyaç vardır. Jeotermal aktivite de, tektonizmanın ve/veya volkanizmanın kontrollünder. Su derine inerken ortamda var olan CaCO_3 'ı çözüp bünyesine alır ve daha sonra ısınıp yeryüzüne taşınır. Bu taşınma, fay ve çatlak gibi tektonik hatlar boyunca olur.

Traverten birikimi, ekstansiyonel tektoniğin etkili olduğu yerlerde daha yaygındır [16, 18, 22, 23, 34, 48, 49, 50]. Bu tür yerlerde, genellikle çok sayıda ekstansiyonel kırıkla birlikte görülen normal faylanma sonucu oluşan hasar bölgeleri, termal sıvıların dolaşımı için uygun ortamlardır ve dolayısıyla traverten birikimi için önemli bir potansiyele sahiptir [35, 51]. Buna karşılık, büyük doğrultu atımlı fay zonları boyunca traverten çökmesi daha az yaygındır. Basınç sırtları, serbestleyen/sıkıştıran bükümler ve doğrultu atımlı havzanın bir kısmını çevreleyen normal fayların kesişimiyle sınırlıdır. Sıvı dolaşımı, hidrolik kanalların oluşmasına neden olan yoğun şekilde kırılmış kaya kütleleri tarafından kontrol edilir. Bu nedenle hidrotermal sistemler ve kaynak karbonatları, kırıklar tarafından kontrol edilir [51]. Sonuç olarak hem ekstansiyonel hem de doğrultu atımlı tektonik ortamlarda, traverten çökmesi için ön koşul parametreleri şunlardır: (1) sıvıların dolaşımına izin veren geçirgen temel kayaçlardaki bir kırık sistemi ve (2) CO_2 ve bikarbonat açısından zengin aşırı basınçlı hidrotermal sular. Karbonat temel kayaçlarındaki kırıklar, meteorik suların yeraltına inmesine ve hidrotermal sıvıların yüzeye çıkmasına izin veren doğal yollardır [22]. Bu çalışmada incelenen Hacılar traverteni, Doğu Anadolu Fay Zonu'nu meydana getiren segmentlerden biri olan İlıca segmentinin aktivitesine bağlı olarak genişlemeli bir alanda çökmüştür. Bitlis Metamorfikleri'nin mermerleri, bu traverten çökeliimine köken olan ana kayadır.

Tablo 3. Hacılar traverten sahası için U-Th yaşlandırma analiz sonuçları

	Örnek No				
	HA-1	HA-7	HA-12	HA-14	HA-15
²³⁸ U ppm	0.505	0.404	0.442	0.440	0.485
±	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002
²³² Th ppm	0.602	0.032	0.030	0.010	0.001
±	0.007	0.000	0.000	0.000	0.005
²³⁴ U/ ²³⁸ U	4.124	4.549	4.477	4.495	4.755
±	0.022	0.029	0.030	0.038	0.021
²³⁰ Th/ ²³⁴ U	0.082	0.008	0.004	0.056	0.064
±	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001
²³⁰ Th/ ²³⁸ U	0.339	0.034	0.018	0.253	0.303
±	0.006	0.001	0.002	0.004	0.002
²³⁰ Th/ ²³² Th	0.870	1.302	0.799	35.697	38.248
±	0.019	0.024	0.095	0.638	0.328
Hesaplanan yaş (binyıl)	9.246	0.820	0.438	6.263	7.112
Hata	0.179	0.015	0.051	0.110	0.062
Düzeltilen yaş (binyıl)	0.485	0.300	0.000	6.123	6.965
Hata	4.942	0.283	0.000	0.127	0.089

Önceki çalışmalarda, traverten yataklarından ve özellikle damar travertenlerinden elde edilen U serisi yaş verileri, çatlak sırtlarındaki genişlemenin hesaplanması, traverten dolu çatlakların uzunluğu boyunca yanıl yayılımının [16, 25, 34, 39] hesaplanması, fay aktivitesinin ve sismisitenin belirlenmesi gibi bazı neotektonik yorumlar için kullanılmıştır. Jeotermal alanlarda, hidrotermal sıvıların dolaşımı ve yükselmesi ve dolayısıyla traverten çökmesi faylanma ve kırılma dönemlerinde kolaylaşır [35]. Buna göre, travertenlerden elde edilen mutlak tarihlendirme sonuçları tektonik aktivite veya faylanma dönemlerine karşılık gelir [39, 51]. Bölgeyi etkileyen genel sıkışma doğrultusunun, K-G olduğu ve makaslama zonlarında oluşan sentetik kırıkların (R kırıkları) ana fayla 10°-30° arasında açı yaptığı göz önünde bulundurulduğunda, bu sırt tipi travertenin bir sentetik kırık (R kırığı) üzerinde açılmaya bağlı olarak geliştiği sonucuna varılır. Genç bir sırt olduğundan ve dolayısıyla yeterli kalınlıkta gelişmediğinden bantlı travertenlerin sırt boyunca yanıl açılma hızı belirlenememiştir.

Duraylı izotop analizlerinden elde edilen $\delta^{13}\text{C}$ değerlerinin 4.9 ile 6.1 (‰ PDB) aralığında; $\delta^{18}\text{O}$ izotop değerlerinin ise -18.6 ile -15.0 (‰ PDB) aralığında olduğu görülmüştür. Tüm örnekler hidrotermal kökenlidir. Gerçekleştirilen XRD analizleri, travertenlerin tamamen kalsitten meydana geldiğini göstermektedir.

U-Th yaşlandırma tekniği yoluyla elde edilen yaş verileri, Hacılar bölgesindeki traverten oluşumunun günümüzden en az 7000 yıl önce başladığını göstermektedir. Bu yaş değerinin büyük bir makaslama zonu olan sol yanıl doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu'nun oluşum yaşıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 110Y172 ve FUBAP 2023 no'lu projeler kapsamında desteklenmiş olup Serap ÇOLAK EROL'un doktora tezinden üretilmiştir. Ayrıca yazarlar, Pamukkale Üniversitesi'nden Mehmet ÖZKUL'a teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Bates RL, Jackson JA. Glossary of Geology (2nd edition). Virginia, USA: American Geology Institute Falls Church, 1980.
- [2] Julia R. Travertines, In: Carbonate Depositional Environments. Scholle PA, Bebout DG, Moore CH (Eds). Tulsa, Oklahoma, USA: Mem Am Assoc Pet Geol Memoir, 1983; 33, 64-72.

- [3] Chafetz HS, Folk RL. Travertines, depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentary Petrology* 1984; 54: 289-316.
- [4] Wyatt, A. Challinor's Dictionary of Geology (6th edition). Cardiff, UK: University of Wales Press, 1986.
- [5] Guo L, Riding R. Hot-springs travertine facies and sequences, Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy. *Sedimentology* 1998; 45: 163-180.
- [6] Sibson RH, Moore JM, Rankin AJ. Seismic pumping a hydrothermal fluid transport mechanism. *J Geol Soc London* 1975; 131: 653-659.
- [7] Heimann A, Sass E. Travertines in the northern Hula Valley, Israel. *Sedimentology* 1989; 36(1): 95-108.
- [8] Altunel E. Pamukkale travertenlerinin morfolojik özellikleri, yaşları ve neotektonik önemleri. *MTA Dergisi* 1996; 118: 47-64.
- [9] Arpat E, Şaroğlu F. Doğu Anadolu Fayı ile ilgili bazı gözlem ve düşünceler. *MTA Bülteni* 1972; 73: 1-9.
- [10] Jackson J, McKenzie D. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan. *Geoph J Royal Astr Soc* 1984; 77: 185-264.
- [11] Şengör AMC, Görür N, Şaroğlu F. Strike-slip faulting and related basin formation in zone of tectonic escape: Turkey as a case study. In: *Strike-slip deformation, basin deformation and sedimentation*. Biddle KT, Christie-Blick N (Eds). Soc Econ Paleont and Min Spec Publ, 1985; 37: 227-264.
- [12] Koçyiğit A, Aksoy E, İnceöz M. Basic neotectonic characteristics of the Sivrice Fault Zone in the Sivrice-Palu area, East Anatolian Fault System (EAFS), Turkey. *International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault systems; Recent progress in Tectonics and Paleoseismology 2003*; 31 August to 12 September 2003; METU-Ankara-Turkey. Pre-International workshop excursion guide-book, 20 p.
- [13] Şaroğlu F, Emre Ö, Kuşçu İ. The East Anatolian fault zones of Turkey. *Annales Tectonicae* 1992; 6: 99-125.
- [14] Westaway R. Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean updated. *Turkish J Earth Sci* 2003; 12: 5-46.
- [15] Gürsoy H, Tatar O, Piper JDA, Heiman A, Mesci L. Neotectonic deformation linking the East Anatolian and Karatas-Osmaniye intracontinental transform fault zones in the Gulf of İskenderun, Southern Turkey, deduced from paleomagnetic study of the Ceyhan-Osmaniye volcanic. *Tectonics* 2003; 22 (6): 1067.
- [16] Altunel E, Hancock PL. Morphology and structural setting of Quaternary travertines at Pamukkale, Turkey. *Geological Journal* 1993; 28: 335-346.
- [17] Çakır Z. Tectonic significance of Quaternary travertine deposits in the Gediz and Menderes grabens, Western Turkey. MSc, Bristol University, UK, 1996
- [18] Çakır Z. Along-strike discontinuity of active normal faults and its influence on Quaternary travertine deposition: Examples from western Turkey. *Tr J of Earth Sciences* 1999; 8: 67-80.
- [19] Ayaz E, Sıcak Çermik (Yıldızeli-Sivas) yöresindeki traverten sahalarının jeolojisi ve travertenlerin endüstriyel özellikleri. Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 1998.
- [20] Karabacak V, İhlara Vadisi civarındaki traverten oluşumları ve tektonik önemleri. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2002.
- [21] Çolak Erol S, Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin kuzeydoğu bölümündeki travertenlerin neotektonik önemi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2014.
- [22] Özkul M, Kele S, Gökgöz A, Shen CC, Jones B, Baykara MO, Förlis I, Nemeth T, Chang YW, Alçiçek MC. Comparison of the Quaternary travertine sites in the Denizli extensional basin based on their depositional and geochemical data. *Sedimentary Geology* 2013; 294: 179-204.
- [23] Özkul M, Gökgöz A, Kele S, Baykara MO, Shen CC, Chang YW, Kaya A, Hançer M, Aratman C, Akın T, Örü Z. Sedimentological and geochemical characteristics of a fluvial travertine: a case from the eastern Mediterranean region. *Sedimentology* 2014; 61: 291-318.
- [24] Mesci BL, Sıcak Çermik ve yakın yöresindeki (Sivas) travertenlerin gelişimi ve aktif tektonikle ilişkisi. Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 2004.
- [25] Mesci BL, Gürsoy H, Tatar O. The evolution of travertine masses in the Sivas area (Central Turkey) and their relationship to active tectonics. *Turkish Journal of Earth Sciences* 2008; 17: 219-240.
- [26] Mesci BL. Active tectonics of the Ortaköy fissure-ridge-type travertines: Implications for the Quaternary stress state of the Neotectonic structures of the Central Anatolia, Turkey. *Geodinamica Acta* 2013b; 25: 12-25.
- [27] Uysal T, Feng Y, Zhao J, Altunel E, Weatherley D, Karabacak V, Cengiz O, Golding SD, Lawrence MG, Collerson KD. U-series dating and geochemical tracing of late Quaternary travertines in co-seismic fissures, Earth and Planetary Science Letters 2007; 257: 450-462.
- [28] Çolak Erol S, Özkul M, Aksoy E, Kele S, Ghaleb B. Travertine occurrences along major strike-slip fault zones: Structural, depositional and geochemical constraints from the Eastern Anatolian Fault System (EAFS), Turkey. *Geodinamica Acta* 2015; 27 (2-3): 154-173.
- [29] Çolak Erol S. Doğrultu atımlı fay sistemlerindeki traverten oluşumlarının jeolojik, tektonik, jeokimyasal ve jeokronolojik özelliklerine Sivrice (Elazığ) güneybatısı'ndan bir örnek. *Türkiye Jeoloji Bülteni* 2016; 59(3): 341-356.
- [30] Çolak Erol S, Aksoy E, Özkul M. Bağdere tufası'nın jeolojik, jeokimyasal ve jeokronolojik özellikleri (Elazığ, D Türkiye). *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2022; 34(1): 377-388.
- [31] Koçak İ, Temiz U, Öksüz N. Salanda Fay Zonu (SFZ) ile ilişkili traverten oluşumlarının paleoklimsel önemi. *Müh Bil ve Araş Dergisi* 2021; 3(2): 218-225.

- [32] Demirkıran Z, Elçi H. Urganlı (Manisa) travertenlerinin morfolojik özellikleri ve tektonizma ile ilişkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 2022; 10(3): 1027-1042.
- [33] Şaroğlu F, Güner Y. Doğu Anadolu'nun jeomorfolojik gelişimine etki eden öğeler: jeomorfoloji, tektonik volkanizma ilişkileri. *Türkiye Jeol. Kur. Bül* 1981; 24(2): 39-50.
- [34] Altunel E, Karacabak V. Determination of horizontal extension from fissure-ridge travertines: a case study from the Denizli Basin, southwestern Turkey. *Geodinamica Acta* 2005; 18: 333-342.
- [35] Brogi A, Capezzuoli E. Travertine deposition and faulting: the fault-related travertine fissure ridge at Terme S. Giovanni, Rapolano Terme (Italy). *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 2009; 98: 931-947.
- [36] De Filippis L, Faccenna C, Billi A, Anzalo E, Brilli M, Özkul M, Soligo M, Tuccimei M, Villa I. Growth of Fissure Ridge Travertines from Geothermal Springs of Denizli Basin, Western Turkey. *Geological Society of America Bulletin* 2012; 124 (9-10):1629-1645.
- [37] Mesci BL. Özgün Niteliklere Sahip Travertenler ve Önemleri: Sivas Yöresi Travertenlerinden Örnekler. *Türkiye Jeoloji Bülteni* 2013a; 56 (1): 23-37.
- [38] Brogi A, Capezzuoli E, Alçiçek MC, Gandin A. Evolution of a fault-controlled fissure-ridge type travertine deposit in the western Anatolia extensional province: the Çukurbağ fissure-ridge (Pamukkale, Turkey). *Journal of the Geological Society* 2014; 171 (3): 425-441.
- [39] Hancock PL, Chalmers RML, Altunel E, Çakır Z. Travertines: using travertines in active fault studies. *Journal of Structural Geology* 1999; 21: 903-916.
- [40] Koçyiğit A, Aksoy E, İnceöz M. Basic neotectonic characteristics of the Sivrice Fault Zone in the Sivrice-Palu area, East Anatolian Fault System (EAFS), Turkey. *International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault systems; Recent progress in Tectonics and Paleoseismology* 2003; 31 August to 12 September 2003; METU-Ankara-Turkey. Pre-International workshop excursion guide-book, 20 p.
- [41] Özkul M, Varol B, Alçiçek MC. Denizli travertenlerinin petrografik özellikleri ve depolanma ortamları. *MTA Dergisi* 2002; 125: 13-29.
- [42] Bárdossy Gy, Bottyán L, Gadó P, Griger Á, Sasvári J. Automated quantitative phase analysis of bauxites. *American Mineralogist* 1980; 65: 135-141.
- [43] Pentecost A. Travertine. Berlin, Germany: Springer Verlag, 2005.
- [44] Uysal IT, Feng Y, Zhao J, Işık V, Nuriel P, Golding SD. Hydrothermal CO₂ degassing in seismically active zones during the late Quaternary. *Chemical Geology* 2009; 265: 442-454.
- [45] Spötl C, Vennemann T. Continuous-flow isotope ratio mass spectrometric analysis of carbonate minerals. *Rapid communications in mass spectrometry* 2003; 17(9): 1004-1006.
- [46] Deocampo D M. The geochemistry of continental carbonates. *Developments in Sedimentology* 2010; 62: 1-59.
- [47] Smart PL. Uranium series dating, In: *Quaternary dating Methods-a User's Guide*. Smart PL, Francis PD (Eds). London, UK: Qart Res Assoc Tech Guide 4, 1991; 45-83.
- [48] De Filippis L, Faccenna C, Billi A, Anzalo E, Brilli M, Özkul M, Soligo M, Tuccimei M and Villa I. Growth of Fissure Ridge Travertines from Geothermal Springs of Denizli Basin, Western Turkey. *Geological Society of America Bulletin* 2012; 124 (9-10):1629-1645.
- [49] Kele S, Özkul M, Gökgöz A, Fórizs I, Baykara MO, Alçiçek MC, Németh T. Stable isotope geochemical and facies study of Pamukkale travertines: new evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation. *Sedimentary Geology* 2011; 238: 191-212.
- [50] Selim HH, Yanık G. Development of the Cambazlı (Turgutlu/MANISA) fissure-ridge-type travertine and relationship with active tectonics. *Gediz Graben, Turkey. Quaternary International* 2009; 199 (1-2): 157-163.
- [51] Brogi A, Capezzuoli E, Buracchi E, Branca M. Tectonic control on travertine and calcareous tufa deposition in a low-temperature geothermal system (Sarteano, Central Italy). *Journal of the Geological Society* 2012; 169(4): 461-476.