



Olur Çayı Havzası'nda (Erzurum-KD Türkiye) tafoni oluşumunu kontrol eden faktörler ve tafoni hücrelerinin morfolojik özellikleri

Factors controlling tafoni formation in Olur stream basin, Erzurum, NE Turkey, and morphological features of tafoni cells

İbrahim Kopar*^a Fuat Şaroğlu^b

^a Atatürk Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Erzurum.

^b UNESCO, Türkiye Milli Komisyonu, Jeopark Grubu Üyesi.

MAKALE BİLGİ

Geliş/Received: 03.06.2016

Kabul/Accepted: 11.08.2016

Anahtar Kelimeler:

Kafesli çözülme

Tafoni

Tuz kristalizasyonu

Kumtaşı

Olur - Türkiye

Keywords:

Cavernous weathering

Tafons

Salt crystallisation

Sandstone

Olur - Turkey

*Sorumlu yazar/Corresponding author

(İ. Kopar) ikopar@atauni.edu.tr

<http://dx.doi.org/10.17211/tcd.36593>

ÖZ / ABSTRACT

Bu makalede Türkiye'nin kuzeydoğusundaki Olur Çayı Havzası'nda, kumtaşları üzerinde tafoni oluşumunu kontrol eden faktörler, Enerji-Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX), X-Işını Difraksiyonu (XRD) ve X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) analizleriyle araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar kumtaşlarında tafoni oluşumuna sebep olan esas faktörlerin petrografik özellikler ve tuz (sodyum nitrat) kristalleşmesi olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca tafoni hücrelerinin genişlik-derinlik, genişlik-yükseklik, yükseklik-derinlik gibi değişkenler arasındaki ilişkiyi ölçmek amacıyla regresyon analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde ayrışma çukurlarının alansal büyüme ve derinleşme süreçlerinin uyumlu geliştiği, çukurlar derinleştikçe taban tavan arasındaki mesafenin arttığı ve ayrışmanın süreklilik gösterdiği anlaşılmıştır.

In this article, factors controlling the formation of tafoni on sandstones in Olur stream basin in the northeastern Turkey have been studied by using Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX), X-Ray Powder Diffractometry (XRD) and X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) analysis. Results revealed that the petrographic features and salt (sodium nitrate) crystallisation were the primary factors that caused tafoni formation on sandstones. Moreover, to measure the relationship between the variables such as width-depth, width-height, and height-depth of tafoni cells, regression analyses were conducted. In these analyses, it was seen that areal growth and deepening processes of weathering pits developed harmoniously, and as the pits got deeper the distance between ground and ceiling increased and weathering was continuous.

1. Giriş

Tafoniler, Turkington ve Phillips (2004) tarafından kemer şeklinde girişleri olan, oluştuğu tabakanın eğimine göre şekil almış, tabanı ayrışma enkazıyla kaplı kovuklar şeklinde tanımlanmıştır. Bu türden kovuklar kurak ve yarıkurak bölgelerde özellikle granit, kumtaşı, kalker ve tüf gibi farklı kayaç türleri üzerinde oluşmaktadır (Dragovic, 1969; Bouchart, 1930; White, 1944; Blank, 1951; Rondeau, 1965; Tschang, 1969; Twidale, 1976; Twidale ve Bourne, 1976; Kelletat, 1980; Gill, 1981; Mustoe, 1982; Mustoe, 1983; Farımaç, 1988; Sancho ve Benito, 1990; Mellor vd., 1997; Mc Bride ve Picard, 2004; Turkington ve Paradise, 2005; Mustoe, 2010). Tafoniler, Darwin (1839) ve Dana (1849)'nın Avustralya'nın kurak bölgelerinde yaptığı ilk çalışmalarından günümüze kadar yoğun bir ilgiyle takip edilmiştir (Bouchart, 1930; White, 1944; Blank, 1951; Rondeau, 1965; Dragovic, 1969; Kelletat, 1980; Gill, 1981; Mustoe, 1982; Mustoe, 1983; Sancho ve Benito, 1990; Mellor vd., 1997; Mc Bride ve Picard, 2004; Turkington and Paradise, 2005; Mustoe, 2010).

Tafonilerin oluşmasında etkili olan faktörler konusunda bir takım tartışmalar olsa da (Álvarez, 2012), eskiden beri en fazla

tuz kristalizasyonu (Evans, 1970; Bradley vd., 1978; Young, 1987; Rodriguez-Navarro ve Doehne, 1999; Goudie vd., 2002), kimyasal ayrışma (Twidale, 1976; Twidale ve Bourne, 1976; Campbell, 2001; Brandmeier vd., 2011) rüzgar erozyonu (Barturum, 1936; Rodriguez-Navarro vd., 1999), donma-çözülme gibi faktörler üzerinde durulmaktadır (Mustoe, 1982, Turkington ve Phillips, 2004; Turkington ve Paradise, 2005). Bu faktörlerden tuz kristalizasyonunun neden olduğu ayrışma şekillerine kurak ve yarıkurak bölgeler (Wilhelmy, 1964; Viles, 2011) ve kıyı bölgelerinde (Bourcart, 1930; Evans, 1970; Bradley vd., 1978; Mc Greevy, 1985; Trenhaile, 1987; Cooke vd., 1993; Mottershead ve Pye, 1994; Sunamura, 1996; Mellor vd., 1997; Uzun, 1998; Andrews vd., 2004; Erginal vd., 2007; Owen, 2013) pek çok örnek bulunmaktadır. Tafoni oluşumunda çeşitli etkenlerin doğrudan ve dolaylı şekilde rolü olmakla birlikte tuz kristalizasyonunun faktörler içinde en etkili ajan olduğu hem arazi hem de laboratuvar gözlemlerinden açıkça anlaşılmıştır (Taber, 1916; Jutson, 1918; Goudie ve Day, 1980; Trenhaile, 1987; Mustoe, 1982; Smith, 1994; Siedel, 1996; Price, 2000; Nash, 2000; Cha-

rola, 2000; Unruh, 2001; Dohne, 2002).

Tafonilerin oluştuğu anakayanın dış yüzeyinde kalsiyum karbonat birikimi nedeniyle kalınlığı değişen sertleşmiş bir kabuk oluşmaktadır. Bu kabuğun hemen altında ise henüz sertleşmemiş bölümler bulunmaktadır. Kabuklaşma (case-hardening) kayacın dış etkenlere karşı bir taraftan doğal direncini artırırken (Ireland, 1979) diğer taraftan kayacın iç ve dış bölümleri arasında diferansiyel ayrışmaya yol açmaktadır. Bununla birlikte kabuk sertleşmesi, tafoni gelişiminde etkili olsa da tafonilerin oluştuğu farklı topografyaların hepsinde görülmediği için bir etken olarak düşünülmemektedir (Kejonen ve Lahti, 1988).

Türkiye'de doğrudan kovuklu çözülme şekillerine yönelik çalışmalar bir kaç araştırma ile sınırlıdır. Farımaç (1988)'in Yukarı Narman Havzası'ndaki (Erzurum) tafonilerle Erginal vd., (2007)'nin Gelibolu Yarımadası'nın batı kıyılarında ve Uzun (1998)'un Gelincik Burnu (Ayancık-Sinop) ve civarındaki alveolar ayrışma şekillerini esas alan çalışmaları dışında araştırmaya rastlanmamıştır.

Olur Çayı Havzası'nda gelişen tafoniler ilk kez bu çalışmada ortaya konulmuştur. Bu hedefe yönelik olarak ilk önce tafonilerin oluştuğu doğal ortama ait bazı temel özellikler araştırılmış, ardından ayrışmayı kontrol eden petrografik faktörler ve morfolojik özellikler üzerinde durulmuştur.

2. Araştırma Alanı ve Doğal Ortam

Olur Çayı Havzası Karadeniz Bölgesi'nin Doğu Karadeniz Bölümü içinde yer almaktadır (Şekil 1). Havza, kuzeyden Zamp Dağı (2746 m) ve güneyden Akdağlar (2342 m) tarafından kuşatılmıştır.



Şekil 1. Lokasyon haritası.

Figure 1. Location map.

Tafoniler, Zamp Dağı'nın güneybatıya uzantısı durumunda birbirine kuş uçuşu 2,5 km mesafedeki Ortakaban ve Kocakarı (Kilis T.) tepeleri üzerinde bulunmaktadır. Ortakaban Tepede (1715 m) özellikle güney-güneybatıya dönük yamaçlarda yoğunlaşan tafoniler 1550 m ile 1710 m yükselti basamakları arasında yer almaktadır. Diğer bir tafoni alanı olan Kocakarı Tepede (1503 m) ise güney-güneydoğuya dönük yamaçlarda 1350 metre ile 1420 metreler arasında rastlanmaktadır.

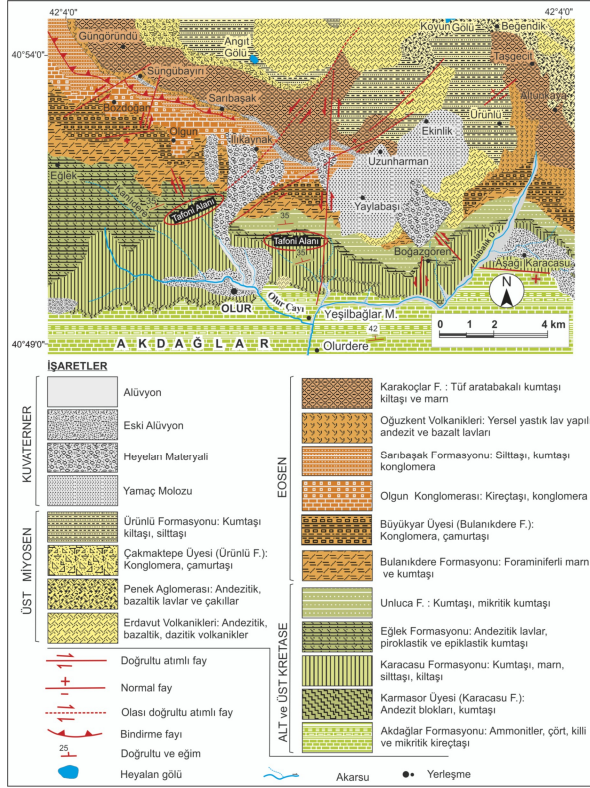
Doğu Pontidlerin (Ketin, 1966) doğu kenarında kalan inceleme alanının temeli, Üst Kretase yaşta ultrabazik kayalarından oluşmaktadır. Bunların üzerine diskordansla fliş ve lagüner fasiyes-

teki Jura-Kretase ve Eosen tortul serisi ve Miyosen yaştaki volkanik kayalar gelmiştir (Bulut vd., 1984). Genel hatlarıyla kuzeyden güneye doğru kuzeydoğu-güneybatı doğrultulu yapısal zonlar oluşturan bu birliklerden biri Konak vd., (2001) tarafından ayrıntılı şekilde çalışılan Olur-Tortum Zonu içindeki Olur Birliği'dir. Bu birlik çok sayıda formasyondan oluşmaktadır (Bozkuş, 1992). Araştırmaya konu olan tafoniler, birlik içindeki Karacasu formasyonu üzerinde meydana gelmiştir. Eğimlenmiş şelf üzerinde zaman zaman bulantı akıntılarıyla taşınan unsurları içeren formasyon Apsiyen-Santoniyen yaşındaki, kumtaşı arakatmanlı marn ve silttaşları ile çakıltaşı ve kumtaşı tabakalarından oluşmaktadır. Yanal değişimler gösteren formasyon gri-boz renklere, ince-orta katmanlı, orta-az tutturulmuş, yer yer çapraz ve paralel, kumtaşı, marn-silttaşı-kilttaşı ardalanması şeklinde istiflenmiştir. Tabakalar N 55° E doğrultulu ve 35° ile 37° NW'ya eğimlidir. Berriyasiyen-Apsiyen yaşlı Akdağlar formasyonu (kireçtaşı) üzerine uyumlu olarak gelen formasyon, üstte Santoniyen Eğlek formasyonu (piroklastik ve epiklastik kayalar) tarafından uyumlu olarak örtülmüştür (Konak vd., 2001). İnceleme alanı ve yakın çevresinde bunlardan başka fliş karakterli Eosen kayalarla (Büyükyar, Bulanıkdere, Sarıbaşak, Olgun formasyonları), Miyosen (Erdavut bazaltı) ve Kuvaterner yaşta kayalar (eski ve yeni alüvyonlar ve heyelan materyali) yüzeylenmektedir (Şekil 2).

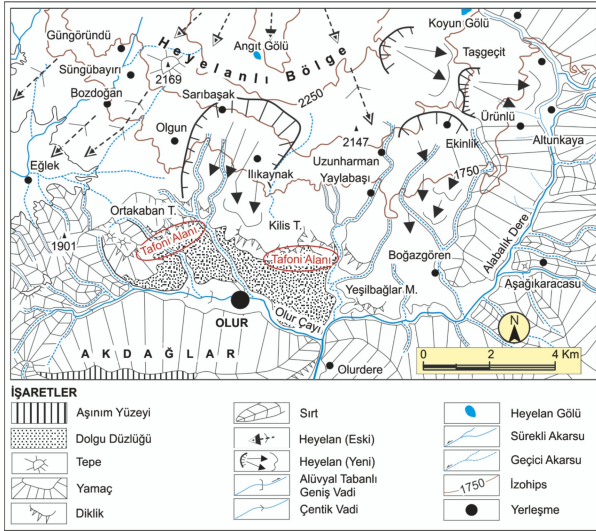
Jeomorfolojik bakımdan saha Kuzey Anadolu orojenik sistemi içindeki kuzeydoğu-güneybatı doğrultulu dağ sıraları ve tektonik oluklarla temsil edilmektedir. Nitekim sahanın kuzeyi orojenik sistemin güney kanadını meydana getiren Mescit (Dumlu Tepe; 3250 m)-Yalnızçam (Çadır Dağı; 3054 m) dağ sırası, güneyi ise kuzeydoğuda volkanik kökenli Ardahan-Göle Platosu'na bağlanan Kargapazarı (Top Dağı; 3288 m)-Allahuekber (3054 m) dağları tarafından kuşatılmıştır. Çoruh Nehri'nin büyük kolları durumundaki Oltu ve Olur çaylarının aşındırmasıyla sahada 1000-1200 metreye ulaşan derinlikte vadiler meydana gelmiştir. Bu vadilerin yamaçları oldukça dik (40°-70° arasında) ve sarp bölümlere sahiptir.

Olur ilçe merkezinin kuzeydoğusunda, tortul ve volkanik kayalardan meydana gelen Zamp Dağı (2746 m), güneyinde ise tortul kökenli Akdağlar (2342 m) uzanmaktadır. İlçe merkezinin kuzeybatısındaki Ortakaban Tepesi'nin (1725 m) güney-güneydoğuya dönük yamacındaki kumtaşından oluşan kornişler boyunca çok sayıda tafoni gelişmiştir. Bundan başka daha sınırlı olarak Olur'un kuzeydoğusundaki Kocakarı T. (1484 m) nin güneydoğu yamacında da tafoniler yer almaktadır. Tafonilerin bulunduğu saha çok sayıda heyelana ev sahipliği yapmaktadır. Bu heyelanlar arasında çalışma sahası sınırları içinde kalan Sarıbaşak, Sülüklü, Ilıkaynak, Yaylabaşı, Taşgeçit-Ürnlü heyelanları gibi büyük ve aktüel heyelanlar örnek olarak gösterilebilir. Bunlardan başka küçük çaplı heyelanlar da bulunmaktadır (Şekil 3).

Araştırma alanı konumu nedeniyle Nemli Karadeniz iklimi ile Karasal Doğu Anadolu iklimi arasında geçiş iklimi özellikleri göstermektedir. Nitekim Thornthwaite metoduna (Ardel vd., 1969; Dönmez, 1984) göre hazırlanan iklim sınıflandırmasında, sahanın iklimi C1 B'1 d b'2 harfleriyle gösterilen "yarı nemli-yarıkuru, mezotermal (orta sıcaklıkta), su fazlası olmayan veya çok az olan, karasal iklim yakın iklim" olarak belirlenmiştir (Şekil 4). Sahada yıllık ortalama sıcaklık 10,2 °C dir. En sıcak ay ağustos (22,7 °C), en soğuk ay ocak (-2,1 °C) tr. Minimum sıcaklıkların -1,0 °C olduğu günlerin toplamı 114,7 gün bulunmaktadır. Düşük



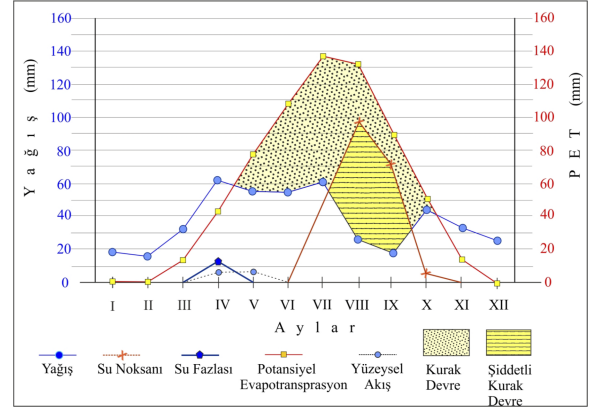
Şekil 2. Araştırma sahası ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Konak vd. 2001).
Figure 2. Geological map of the study area and its immediate surroundings (Konak et al. 2001).



Şekil 3. Araştırma sahası ve yakın çevresinin sadeleştirilmiş jeomorfoloji haritası.
Figure 3. Simplified geomorphological map of the study area and its immediate surroundings.

sıcaklıkların görüldüğü kış mevsiminde zemin donmaktadır. Sıcaklıkların mart (3,9 °C) ayından itibaren yükselme eğilimine girmesiyle donmuş toprak katı çözülmeğe başlamıştır. Sahada sıcaklıklar ağustos ayında (22,7 °C) en yüksek ortalama değere erişmektedir. Bu ayı izleyen eylül (18,3 °C) itibaren ise yeniden düşüşe geçmektedir.

Yıllık ortalama toplam yağış tutarının 439,2 mm olduğu sahada yıllık düzeltilmiş potansiyel evapotranspirasyon (PET) 663,6



Şekil 4. Thornthwaite metoduna göre su bilançosu grafiği.
Figure 4. Graphic of the water balance according to Thornthwaite method.

mm olup yağışın buharlaşmayı karşılayamadığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla yılın dört ayında (temmuz, ağustos, eylül, ekim) toprakta su noksanı bulunmaktadır. Bu durum sahada yarı kurak koşulların etkili olduğunu göstermesi bakımında önemlidir. Sahada yağışın önemli bir bölümü buharlaşma düzeyinin yüksek seyrettiği ilkbahar (147,8 mm: %33,7) ve yaz (139,8 mm: %31,8) mevsiminde düşmektedir. En az yağış alınan mevsim kış (58,4 mm: %13,3) mevsimidir. Bununla birlikte kış mevsimi % 67 oranında ortalama bağıl nem sahiptir. Buna karşılık yaz mevsimi % 47,6'lık ortalama bağıl nem oranı ile en düşük bağıl nemliliğe sahiptir.

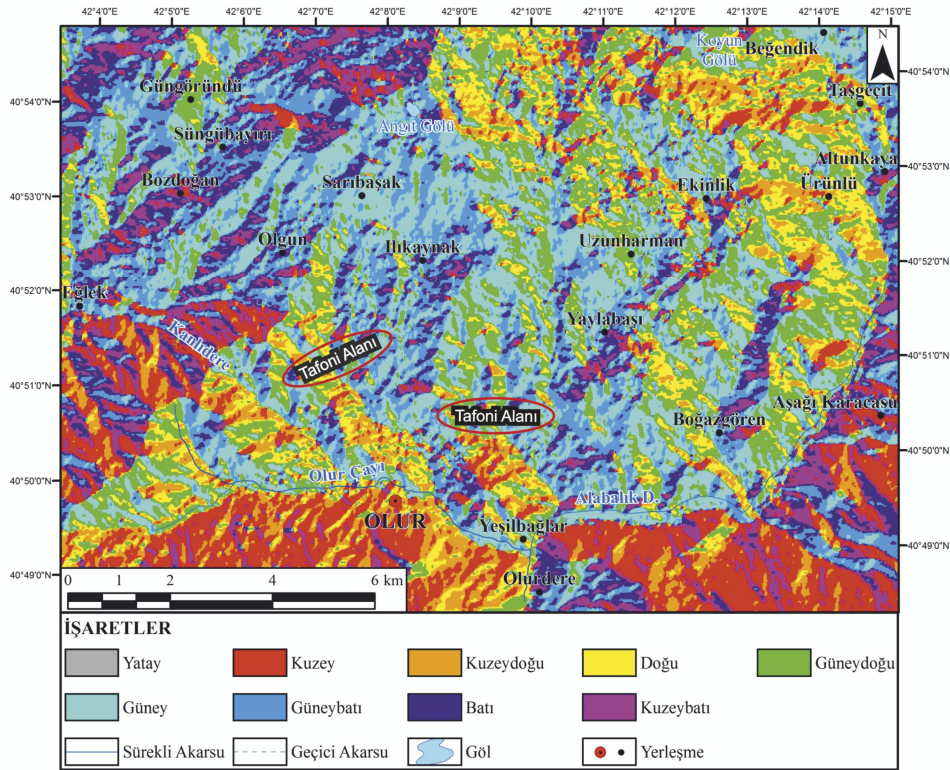
Sahadaki her iki tafoni alanında hücre ağız bakıları ağırlıklı olarak güneye dönüktür (Şekil 5). Dolayısıyla hücrelerin güneşe bakan yanakları daha şiddetli güneşlenmektedir. Bu ortamda kılcal çatlakları kullanan suyun buharlaşarak azalması ve içinde çözülmüş şekilde dolaşan tuzun kılcal boşluklarda birikerek git-tikçe büyümesi ve çevresine etkin şekilde basınç yapması mümkün olmaktadır.

Sahada genellikle düşük hıza sahip rüzgârlar etkili olmaktadır. Rüzgâr hızları 1,3 m/sn ile 2,0 m/sn arasında değişmektedir. Hâkim rüzgâr yönü batı (esme sayısı: 15.640) ve güney (esme sayısı: 15.578) dir. Bunları doğu (esme sayısı: 12.896) sektörü izlemektedir. Tafonilerin yer aldığı kesim doğrudan sözü edilen rüzgârların etkisi altında kalmaktadır. Tafoni hücrelerinin birçoğunda ayrışma ürünü döküntülerin rüzgârlarla süpürüldüğü görülmüştür. Bu bağlamda batı (15.640) ve güney (15.576) sektörü rüzgârların egemen olduğu tafoni sahasında rüzgârın gevşek taneleri sökme ve küçük taneleri süpürmede başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

Bununla birlikte bazı hücrelerin tabanında kalınlığı birkaç cm olabilen iri kum depoları mevcuttur. Tafonilerin oluştuğu tabakaların kuzeybatıya eğimli oluşu ve dolayısıyla hücre ağızlarının kısmen yağmura açık olması yağmur sularının hücreye ulaşmasını sağlamaktadır. Bu durum hücre içindeki döküntülerin şiddetli yağışlarda yıkanarak temizlenmiş olabileceğini hatta bu bağlamda su erozyonu katkısıyla hücrelerin genişlemiş olabileceğini düşündürmektedir.

3. Materyal ve Yöntem

Tafoni oluşumunu kontrol eden mineralojik ve petrografik faktörleri tayin etmek amacıyla tafonilerin oluştuğu kayacın dışın-



Şekil 5. Araştırma sahası ve yakın çevresinin baki haritası.

Figure 5. Exposure map of the study area and its immediate surroundings.

daki kabuktan ve tafoni içinde tavan, yanak ve tabanı kaplayan ayrışma enkazından kayaç örnekleri toplanmış ve Enerji- Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX), X-ışını Difraksiyonu (XRD) ve X-ışını Floresans Spektroskopisi (XRF) yöntemleriyle majör, minör ve iz element analizleri yapılmıştır. Tafonilerin morfolojik karakterini belirlemek amacıyla sahadaki tüm tafonileri temsil edebilecek nitelikte olduğu düşünülen 80 tafoninin ayrı ayrı genişlik, derinlik ve yükseklikleri ölçülmüştür. Ölçüm değerleri yardımıyla tafoni gelişimine dair bazı öngörülere ulaşmak amacıyla doğrusal regresyon analizleri yapılmıştır. Ayrıca konuyu daha iyi aktarmak amacıyla grafik, fotoğraf ve harita gibi görsel materyallerden yararlanılmıştır.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Tafonileşmeyi Kontrol Eden Faktörler

Ayrışma üzerinde petrografik yapının etkisini değerlendirmek amacıyla ayrışma hücrelerinin geliştiği 1500 m-1700 m seviyelerinde yer alan kaya yüzeylerinde sertleşmiş dış kabuk, tafonilerin iç duvarları ve tafoni tabanlarında birikmiş ayrışma enkazı olmak üzere üç farklı kısımdan örnekler alınmıştır. Bunda amaç ayrışmada hangi mineral ve elementlerin dirençli-düşük dirençli olduklarının tespiti, dolayısıyla ayrışma üzerinde litolojik kontrolün tespitidir. Analiz sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Dış kabuktan alınan örnekte toplamda % miktarı %1'in altına düşmeyen elementler Si (18.11), Al (11.11), Fe (7.96), Ca (6.93), Na (5.7), Mg (4.52), K (1.34) şeklinde sıralanmaktadır (Si>Al>Fe>Ca>Na>Mg>K). Bu durum ayrışmanın görülmediği ve tafonilerin iç kısımlarına göre görece daha sert olan kısımlarının mineral yapısını muhafaza ettiğini ve aşınmaya karşı sertliği yükselten elementlerin daha yoğun olduğunu gösterir. Ayrıca

XRD analizlerinde tespit edilen demir ile magnezyumun kayaç yüzeyinde sertleştirici rol oynadığı anlaşılmaktadır.

Tafonilerin iç duvarlarının ayrışmadaki durumunu anlamak için alınan örnekte yapılan analizlerde de aynı şekilde % miktarı %1'in altına düşmeyen elementler Si (19.53), Al (10.79), Ca (8.28), Fe (7.58), Na (4.23), Mg (3.54), K (1.02) dur. Yüzdellik dilim içinde en fazla bulunan elementlerin sıralaması Si>Al>Ca>Fe>Na>Mg>K şeklindedir. Bu diziliş biçimiyle iç kabukta da sertleşmiş dış kabuğun kimyasal kompozisyonuna benzer sonuçlar elde edilmiştir.

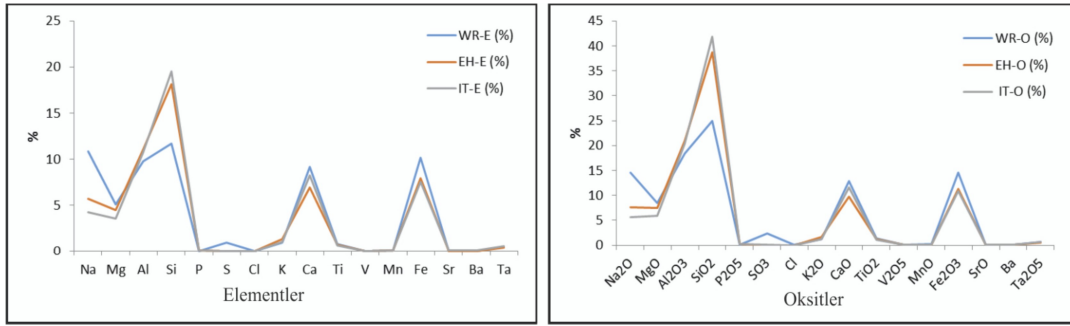
Tafoni tabanlarında ayrışma sonucu biriken kırıntılı malzemeden alınan örneklerin XRF analizinde ise % miktarı %1'in altına düşmeyen elementlerin dağılımı Si (11.67), Na (10.82), Fe (10.18), Al (9.78), Ca (9.15) Mg (5.13) şeklindedir. Analizde %1'e yakın değere sahip elementler içinde S (0.9) ve K (0.9) öne çıkmaktadır. Bu durumda azalış sırasına göre Si>Na>Fe>Al>Ca>Mg>K>S biçiminde bir element dağılımı söz konusudur. Analizlerde dikkat çeken önemli bir durum olarak Si miktarındaki azalmaya karşılık Ca ve Fe miktarlarında bir artış görülmektedir. Ca ve Fe miktarındaki artış karşısında Si deki azalma kumtaşındaki ayrışmanın fiziksel parçalanma egemen olarak geliştiğini açıklar. Ayrıca potasyum feldspatların daha fazla ayrıştığını bu nedenle K ve Si miktarında azalma olduğunu düşünmek de olasıdır (Şekil 6).

X-ışını Difraksiyonu (XRD) analizlerinde analcite (NaAl (SiO₃)₂ · H₂O), analcime (Na (Si₂Al) O₆ · H₂O), analcime syn., (Na 0.931 (Al Si₂O₆) (H₂O), sodium nitrate (Nitratite or Nitratine: NaNO₃) ile diopside (calcium magnesium catena-silicates / Ca Mg Si₂O₆) mucochloric acid (C₄ H₂ C₁₂ O₃) bileşikleri tanımlanmıştır (Tablo 2).

Tablo 1. Tafoni tabanında ayrışmayla depolanan kırıntılı malzeme ile sertleşmiş dış kabuk ve tafoni iç duvarından alınan örneklerin XRF and XRD analizlerinden elementler ve oksitlerin dağılımı (%).

Table 1. XRF and XRD analysis results obtained from weathered residuals at tafoni bottoms, case-hardened outer parts, and interior side walls of tafoni cells (%).

Ayrışmış Tortu				Sertleşmiş Dış Kabuk				Tafoni Hücresi İç Duvar			
Element	(%)	Oksitler	(%)	Element	(%)	Oksitler	(%)	Element	(%)	Oksitler	(%)
Na	10.82	Na ₂ O	14.59	Na	5.7	Na ₂ O	7.68	Na	4.23	Na ₂ O	5.7
Mg	5.13	MgO	8.5	Mg	4.52	MgO	7.49	Mg	3.54	MgO	5.88
Al	9.78	Al ₂ O ₃	18.47	Al	11.11	Al ₂ O ₃	21	Al	10.79	Al ₂ O ₃	20.39
Si	11.67	SiO ₂	24.97	Si	18.11	SiO ₂	38.74	Si	19.53	SiO ₂	41.77
P	0	P ₂ O ₅	0.13	P	0.13	P ₂ O ₅	0.29	P	0.12	P ₂ O ₅	0.27
S	0.94	SO ₃	2.35	S	0.01	SO ₃	0.02	S	0.03	SO ₃	0.07
Cl	0.03	Cl	0.03	Cl	0.02	Cl	0.02	Cl	0.02	Cl	0.02
K	0.98	K ₂ O	1.18	K	1.34	K ₂ O	1.61	K	1.02	K ₂ O	1.22
Ca	9.15	CaO	12.81	Ca	6.93	CaO	9.69	Ca	8.28	CaO	11.59
Ti	0.83	TiO ₂	1.38	Ti	0.7	TiO ₂	1.17	Ti	0.65	TiO ₂	1.08
V	0.03	V ₂ O ₅	0.06	V	0.02	V ₂ O ₅	0.04	V	0.02	V ₂ O ₅	0.04
Mn	0.15	MnO	0.19	Mn	0.13	MnO	0.16	Mn	0.12	MnO	0.16
Fe	10.18	Fe ₂ O ₃	14.55	Fe	7.96	Fe ₂ O ₃	11.38	Fe	7.58	Fe ₂ O ₃	10.83
Sr	0.06	SrO	0.07	Sr	0.05	SrO	0.06	Sr	0.12	SrO	0.15
Ba	0.06	Ba	0.06	Ba	0.06	Ba	0.06	Ba	0.08	Ba	0.08
Ta	0.53	Ta ₂ O ₅	0.64	Ta	0.46	Ta ₂ O ₅	0.56	Ta	0.59	Ta ₂ O ₅	0.73



Şekil 6. Farklı alanlardan alınan örnekler içerisindeki elementler ve oksitlerin dağılışı (WR-E: Ayrışma enkazı - elementler, WR-O: Ayrışma enkazı - oksitler, EH-E: Sertleşmiş dış kabuk - elementler, EH-O: Sertleşmiş dış kabuk - oksitler, IT-E: Tafoni iç duvarı - elementler, IT-O: Tafoni iç duvarı - oksitler).

Figure 6. Distribution of elements and oxides within samples taken from different sites (WR-E: Weathered residues - elements, WR-O: Weathered residues - oxides, EH-E: Exterior case-hardened crust - elements, EH-O: Exterior case-hardened crust - oxides, IT-E: Interior wall of tafoni - elements, IT-O: Interior wall of tafoni - oxides).

Tablo 2. X-ışını Difraksiyonu (XRD) analizlerinden çıkan sonuca göre ayrışma hücrelerinin oluşumunda asıl ajan olarak tespit edilen bazı bileşikler.

Table 2. Some compounds are identified as main agents of formation of weathering cells based on X-Ray Powder Diffractometry (XRD) analysis.

Görü nür	Ref. Kodu	Skor	Bileşik Adı	Faktör Ölçeği	Kimyasal Formülü
*	00-003-0391	46	Analcite	0.728	Na Al (SiO ₃) ₂ · H ₂ O
*	00-041-1478	43	Analcime	0.453	Na (Si ₂ Al) O ₆ · H ₂ O
*	00-051-2113	13	Mucochloric acid	0.111	C ₄ H ₂ Cl ₂ O ₃
*	01-075-1092	13	Calcium magne sium catena si licate	0.136	Ca Mg Si ₂ O ₆
*	01-089-6324	40	Analcime, svn	0.717	Na _{0.931} (AlSi ₂ O ₆) (H ₂ O)
*	01-079-2056	10	Sodi um Nitrate	0.204	NaNO ₃

Bu bileşiklerden analcime ile özellikle sodyum nitrat tuzunun kimyasal ayrışmada önemli bir ajan olduğu (Goudie vd., 2002: Adamovič vd., 2011) ve sodyum nitrat'ın iyi bilinen sodyum klorür (NaCl) tuzundan daha bozucu olduğu rapor edilmiştir (Chapman 1980; Cooke vd., 1993). Daha çok kaliş (calcrete) olarak bilinen çökellerde doğal olarak bulunan sodyum nitrat tuzu iri taneli, gözenekli kumtaşları arasında birikerek, yerinde büyümektedir (Nash, 2011). Nitekim bu süreçte tuzun çatlak ve diğer boşluklarda çevresindeki kayalara basınç yaparak taneler arasındaki bağı çözdüğü ve iri kumtaşı çakıllarını yerinden oynatarak söktüğü anlaşılmıştır. Özellikle bazı tafoni hücrelerinin tavan ve yanaklarında yüzeye çıkmış tuz kristalleri, ayrışmış kesimlerdeki kayaç dilimleri ve bu dilimlerle anakaya arasındaki

tuz yoğunluğu, yerinden sökülmiş-itilmiş iri çakılların altında görülen tuz birikimleri, sertleşmiş dış kabuk yüzeylerindeki eksfoliasyon gelişimi, tuzun ayrışmadaki rolünü açıkça ortaya koymaktadır (Şekil 7).

XRF analiz sonuçlarının istatistiksel anlamlılığına bakıldığında Tablo 3 deki sonuçlara ulaşılmıştır. Analiz sonuçları tüm değerler arasında dağılımın iki yanlı şekline göre 0.01 düzeyinde anlamlı pozitif korelasyon bulunduğunu göstermektedir.

4.2. Tafoni Hücrelerinin Morfolojik Özellikleri

Araştırma sahasındaki 80 ayrı tafoni hücresinde yapılan geniş-



Şekil 7. Tafoni hücrelerinin içinde ve dışında ayrışma dilimleriyle (a-b-c-d) ana kaya arasında yüzeye çıkmış tuz kristalleri, eksfoliasyon dilimlerinin (e) yitilmesine kadar varan ayrışma sürecinde tuzun tafoni gelişimini kontrol eden önemli bir etmen olduğunu ortaya koymaktadır (f).

Figure 7. Salt crystal accumulation within exfoliation slabs (a-b-c-d), interior softened sandstone left by dislocation block (e), and salt deposition in a tafoni cell (f).

Tablo 3. Ölçülmüş değerler arasındaki korelasyon katsayıları (WR-E: Ayrışma enkazı - elementler, WR-O: Ayrışma enkazı - oksitler, EH-E: Sertleşmiş dış kabuk - elementler, EH-O: Sertleşmiş dış kabuk - oksitler, IT-E: Tafoni iç duvarı - elementler, IT-O: Tafoni iç duvarı - oksitler).

Table 3. Correlation coefficients between measured values (WR-E: Weathered residues - elements, WR-O: Weathered residues - oxites, EH-E: Exterior case-hardened crust - elements, EH-O: Exterior case-hardened crust - oxites, IT-E: Interior wall of tafoni - elements, IT-O: Interior wall of tafoni - oxites).

	WR-O	EH-E	EH-O	IT-E	IT-O
WR-O	0.970**	0.989**	0.814**	0.863**	0.783**
EH-E		0.973**	0.927**	0.949**	0.904**
EH-O			0.985**	0.993**	0.974**
IT-E				0.986**	0.996**
IT-O					0.986**

**Korelasyon 0.01 düzeyinde anlamlı (2-Y anlı)

lik ölçümlerine göre, hücrelerin maksimum 8.3 metre ile minimum 10 cm genişlikte olduğu belirlenmiştir. Ortalama tafoni boyutu 1.16 metredir. Diğer taraftan tafonilerin % 60'dan fazlasında boyut 1 (bir) metreyi geçmemektedir. Derinliği 3 metreye yakın olan bir tafoni dışında tafoni derinlikleri 40 cm – 2 metre arasında değişir. Bununla birlikte tafonilerin ortalama derinliği 60 cm olup, tafonilerin % 20'sinde derinlik 1 metrenin üzerindedir.

Ölçülen tafoni hücrelerinin genişlik-yükseklik, genişlik-derinlik ve yükseklik-derinlik ilişkileri şekil 8'de gösterilmiştir. Buna göre genişlik-yükseklik ilişkisi istatistiksel açıdan 0.73 değer, ile doğru orantıya işaret etmektedir. Bu değer ölçüm parametreleri içinde en anlamlı olanıdır. Diğer bir ifadeyle tafoni hücrelerinin genişlikleri arttıkça yüksekliklerinde (tavan-taban arası mesafe) de artış gözlenmektedir. Bu doğrusal ilişki en çok her iki değeri

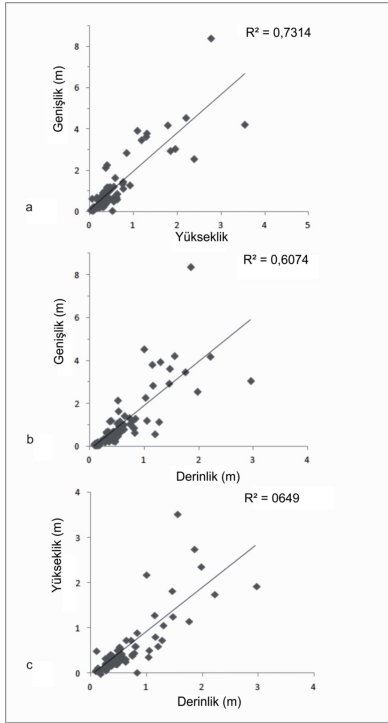
1 (bir) metreyi aşmayan ayrışma çukurları için geçerlidir. Tafoni boyutları arttıkça istatistiksel anlamlılık düzeyi azalmaktadır.

Ölçülen diğer bir parametre olan genişlik-derinlik ilişkisinde de istatistiksel bakımdan 0.60 pozitif yönlü (anlamlı) doğrusal ilişki söz konusudur. Bu durum ayrışma çukurlarının alansal büyüme ve derinleşme süreçlerinin uyumlu olarak geliştiğine yorumlanabilir. Yine genişliği ve derinliği 1 metrenin altında olan tafoni hücrelerinde bu ilişki daha belirgindir.

Son olarak 0.64 değer ile temsil edilen yükseklik-derinlik ilişkisinde de istatistiksel açıdan anlamlılık yüksektir. Bu durum ayrışma çukurları derinleştikçe tavan-taban arasındaki mesafenin arttığına işaret etmektedir. Tüm bu sonuçlar tafoni hücrelerinin gelişiminde alansal büyüme, hücre giriş yüksekliği ve derinliklerinin eş zamanlı olarak geliştiğini ortaya koymaktadır.

Çalışma sahasındaki tafoniler şekil bakımından farklı özellikler göstermektedir. Bu durum ayrışma derecesinin farklılığını ortaya koymaktadır. Genellikle oval, hilal, elipsoidal, dairesimsi, birleşik ve düzensiz tafoni formları egemendir. Özellikle oval ve elipsoidal şekilli tafoniler kumtaşı tabakalarındaki yapısal zayıflıklar üzerinde yer almaktadır. Böylece birbirine paralel ve tabaka uzanışına uyumlu uzamış hücrelerin oluşması mümkün olmaktadır. Tafonilerin büyük bir bölümü ağızdan başlayarak derine doğru daralan huni (funnel) şeklindeki bazıları içi boş bir torbaya benzemektedir. Bu durum çözülme olayının gölge ve daha nemli olan ayrışma hücresinin derinliklerinde kesintisiz sürdüğünü göstermektedir. Ayrışma hücrelerinde yan duvarların içeriden çözülmesi nedeniyle tafonilerin önemli bir kısmı birleşik tafoni yapısındadır. Sahada tanımlanan büyük tafoniler birleşik formludur. Büyük tafonilerin tavanlarında yarım met-

reden daha sığ olan ikincil ayrışma çukurları da gözlenmektedir. Bu durum tafoni tavanlarının ayrışması nedeniyle oluşan kayaç dilimlerinin eksfoliasyon sürecinde anakayadan ayrılıp tafoni hücrelerinin tabanına düşmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 8. Ölçülen tafoni çukurlarında genişlik-yükseklik, genişlik-derinlik ve yükseklik-derinlik ilişkileri.

Figure 8. Pits of tafoni with width-height, width-depth, and height-depth relations.

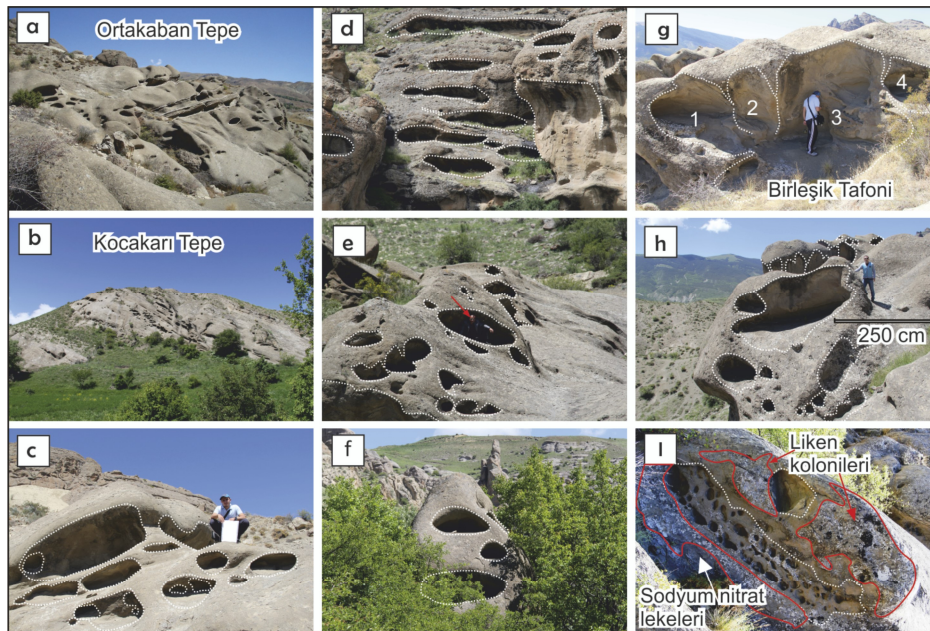
Eksfoliasyon olayı sertleşmiş dış kabukta da yaygın şekilde oluşmaktadır. İç kabuktaki eksfoliasyon dilimiyle karşılaştırıldığında genellikle dış kabukta daha ince dilimlenme görülmektedir. İç kabukta 5 cm'yi bulan soyulma dilimleri dış kabukta çoğunlukla 1-2 cm kalınlıktadır. Gözlemlerimize göre soğanın katmanları gibi soyularak pul pul dökülen sert kabuğun altına karşılık gelen kısımlarda tafoni gelişimi daha kuvvetli gerçekleşmektedir.

Tafonilerin tabanları kumtaşı tabakalarının yapısına uygun olarak topoğrafik eğim yönünde hafif eğimlidir ve ayrışma enkazı ile kaplıdır. Yamaç eğimi yönünde ağzı tamamen açık veya yarı açık tafoniler yaygındır. Ayrışma hücrelerinin iç kısımlarında ayrışmanın daha ileri safhalarını karakterize eden ve derinlere doğru gelişme gösteren dar oluklar da gözlenmektedir. Özellikle yatak eklemeleri ve tabaka düzlemlerinin belirgin olduğu kısımlarda ise alçak, yani tavan-taban uzaklığı dar olan dar-uzun elipsoidal tafoni hücreleri oluşmuştur (Şekil 9-d).

Yer yer liken kolonilerinin de örtüğü kumtaşı yüzeylerinde tafoniler dışında cm ölçüsünde genişlik ve derinlikte olan boş bal peteği (honeycomb) görünümü yapılar da bulunmaktadır. Bu yapılar daire şeklinde ve yamaç eğimine dik yönde uzanan tekli ve birleşik formlara sahiptir (Şekil 9-l).

Kumtaşlarının daha massif ve ince taneli olduğu kısımlarda tafoni oluşumu iyi derecede gelişmemiştir. Ancak kaba taneli kumtaşlarının bulunduğu bölümlerde tafoni yoğunluğu yüksektir. Yer yer kumtaşlarından oluşan istif içindeki çakıl boyutundaki (< 200 mm) tanelerin düşmesiyle açılan küçük çukurlar da zamanla gelişerek tafoni hücrelerine dönüşmektedir.

Tafoni sahasında yer yer peribacası görünümü yerşekilleri de dikkat çekmektedir. Bu şekillerin aşınma sürecinde dikliğini korumayı başarmış kısımlar olduğu düşünülmüştür.



Şekil 9. Ortakaban ve Kocakarı tepelerindeki tafoniler farklı boyut ve şekillere sahiptir (a-b), Tafonilerin çoğunda egemen ağız formu oval'dir (c-d-e-f). Tafoni tabanları kumtaşı tabakalarının yapısına uygun olarak topoğrafik eğim yönünde hafif eğimlidir (c-e). Bazı tafoniler zamanla birleşerek daha geniş ağızlı tafonilere dönüşmüştür (g-h), Ayrıca sahada bal peteği (honeycomb) şeklinde ayrışma hücreleri de vardır (i).

Figure 9. Tafoni of different sizes and shapes in Ortakaban Hill and Kocakarı Hill (a-b). Most of tafoni dominant form the oval in the mouth (c-d-e-f). Tafoni base in accordance with the structure of the sandstone layer is slightly inclined towards the topographic slope (c-e). Some tafoni have become combined more wide-mouthed tafoni in time (g-h). There are also cells like honeycomb in area (i).

5. Sonuçlar

Anadolu'nun kuzeydoğusundaki Olur Çayı Havzası'nda sınırlı bir alanda görülen tafoniler ilk kez bu çalışmada ayrıntılı olarak tanımlanmış ve tafoni oluşumuna neden olan faktörler bağlamında petrografik yapının etkisini değerlendirmek için çeşitli analizler yapılmıştır. Yarı kurak iklim şartlarında kumtaşları üzerinde tafoni gelişimini kontrol eden en önemli faktörün tuz (sodyum nitrat) kristalizasyonu olduğu tespit edilmiştir. Hem sertleşmiş dış kabuk hem de tafoni hücrelerinin tavan ve yanaklarında tuz ayrışmasıyla oluşan ufalanma ve yer yer daha etkili görülen eksfoliasyon dilimleri anakayadan koptukça tafoni hücreleri büyümektedir. Anakaya yüzeyinde ve tafoni hücrelerinde oluşan sertleşmiş kabuk, oluşturduğu yüzeyin direncini büyük ölçüde artırsa da tuz kristalizasyonu esnasında yitilerek dilimler halinde anakayadan ayrılmaktadır. Kaba taneli kumtaşlarında ince taneli kumtaşlarına nispetle daha fazla ayrışma hücreleri bulunmaktadır. Tafoni hücrelerinin genelde oval, hilal, elips ve dairesel, birleşik ve düzensiz şekilli olduğu belirlenmiştir. Bu durum genellikle kumtaşındaki yatak eklemleri ve tabaka düzlemlerinde gelişen ayrışmanın daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrışma hücrelerinde yan duvarların içeriden çözülmesi nedeniyle tafonilerin önemli bir kısmının birleşik tafoni yapısı gösterdiği tespit edilmiştir.

Farklı ölçülere ve formlara sahip olan tafoni hücrelerinden 80 tanesinin morfolojik analizleri sonucunda genişlik-derinlik, genişlik-yükseklik, yükseklik-derinlik gibi ilişkilerde istatistiksel bakımdan anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu doğrultuda tafoni hücrelerinin genişlikleri arttıkça yüksekliklerinde de (tavan-taban arası mesafe) artış gözlenmiştir. Bu durum tafonilerde alansal büyüme ve derinleşme süreçlerinin uyumlu geliştiğini ortaya koymuştur.

Tafonilerin küçük mağaralara benzeyen kovuklu yapısı insanları etkilemekte ve kendine çekmektedir. Tamamen doğal yollarla oluşan ve kendine has özellikleri olan bu şekillerin belirli iklim ve topografik koşullar altında oluşması ve dolayısıyla her yerde görülmemesi doğa turizmi bakımından kayda değer bir jeosit birimi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle tafoniler yörenin turizm envanteri içinde bir kaynak değer olarak ele alınmalı ve tafonilere zarar verecek her türlü peyzaj çalışmasından da uzak durulmalıdır. Bu bağlamda farklı zamanlarda görüşlerine başvurduğumuz yöre halkı ve yerel yönetimin doğal yollarla oluşan turizm kaynaklarını koruma ve değerlendirme konusunda oldukça hassas oldukları anlaşılmıştır.

Katkı Belirtme

Arazi çalışmaları sırasındaki yardımları için Yrd. Doç. Dr. Çağlar Çakır ve Ahmet Serdar Kopar'a çok teşekkür ederiz.

Kaynakça

Adamovič, J. Mikuláš, R. Schweigstillová, J. Böhmová, V. (2011). Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Acta Geodyn Geomater*, v. 8: p. 29–45.

Álvarez, E., (2012). Interpretación de sistemas naturales complejos: el problema de los tafoni. *B. Asoc. Geogr. Esp.*, v. 60: p. 349-368.

Andrews, J. E., Brimblecombe, P., Jickells, T. D., Liss, P. S., Reid, B. J., (2004). *An introduction to environmental chemistry*. Blackwell Science, Oxford, U.K.

Ardel, A., Kurter, A., Dönmez, Y., 1969. *Klimatoloji Tatbikatı*, İst. Üni.

Yayınları, No: 1123, Edebiyat Fakültesi Yayınları, No: 40, İstanbul.

Bartrum, J. A., (1936). Honeycomb weathering of rocks near the shore-line. *The New Zealand Journal of Science and Technology*, v. 18: p. 593-600.

Blank, H. R., (1951). Rock doughnuts, a product of granite weathering, *American Journal of Sci.*, v. 249: p. 822-829.

Bourcart, J., (1930). Les probleme des 'taffoni' de Corse et l'erosion alveolaire. *Rev. Geogr. Phys. Geol.* v. 3: p. 5–18.

Bozkus, C., (1992). Stratigraphy of the Olur (Erzurum) region. *Geological Bulletin of Turkey*, v. 35: p. 103-119.

Bradley, W. C., Hutton, J. T., Twidale, C. R., (1978). Role of salts in development of granitic tafoni, South-Australia. *J. Geol.* v. 86: p. 647–654.

Brandmeier, M., Kuhlemann, J., Krumrei, I., Kubik, P. W., (2011). New challenges for tafoni research. A new approach to understand processes and weathering rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 36: p. 839-852.

Bulut, A., Ogen, Y., Demirci, S., Bozkus, C., Taka, M., Oner, A., (1984). Detailed geological investigation and coal facilities of Tortum-Narman-Oltu-Olur and surrounding area (Erzurum-Turkey), Report of General Directorate of Mineral Research and Exploration, No: 8889: p. 1-67.

Chapman, R., (1980). Salt weathering by sodium chloride in the Saudi Arabian desert. *American Journal of Science*, v. 280: p. 116-129.

Charola, A. E., (2000). Salts in the deterioration of porous materials: An overview. *Journal of the American Institute for Conservation*, v. 39: p. 327-343.

Cooke, R. U., Warren, A., Goudie, A. S., (1993). *Weathering forms and processes, Desert Geomorphology*, Chapter: 5, Taylor & Francis Books Ltd, London, UK., p. 23-44.

Dana, J. D., (1849). *Manual of geology*, 1st Ed., Ivison, Blakeman, Taylor and Company, New York.

Darwin, C., (1839). *The Voyage of the Beagle*, Collier & Son Company, New York.

Dohne, E., (2002). Salt Weathering: A selective review, *Geological Society Special Publication, Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*, v. 205: p. 51-64.

Dönmez, Y., (1984). *Umumi Klimatoloji ve İklim Çalışmaları*, İ. Ü. Yay. No: 2506, Coğrafya Enstitüsü Yay. No: 102, İstanbul.

Dragovich, D., (1969). The origin of cavernous surfaces (tafoni) in granitic rocks of southern South.Australia, *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 13: p. 163–181.

Erginal, A. E., Gönüz, A., Bozcu, M., Ates, A. S., Cetiner, Z. S., (2007). The first findings on the origin of alveolar disintegration at the western shores of the Gelibolu peninsula. *Bulletin of Mineral Research and Exploration*, v. 134: p. 27–34.

Evans, I. S., (1970). Salt crystallization and rock weathering: A review. *Rev. Géomorphol. Dynam.* v. 9: p.153-177.

Farımaz, N., (1988). Tafonileşme olayı ve örnek olarak Narman Havzası, *Jeomorfoloji Dergisi*, Sayı: 16, s. 31-36.

Gill, E. D., (1981). Rapid honeycomb weathering (tafoni formation) in greywacke, S.E. Australia, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 6: p.81-83.

Goudie, A. S. and Day, M. J., (1980). Disintegration of fan sediments in Death Valley, California, by salt weathering. *Physical Geography*, v. 1: p. 126-137.

Goudie, A. S., Wright, E., Viles, H. A., (2002). The roles of salt (sodium nitrate) and fog in weathering: a laboratory simulation of conditions in the northern Atacama Desert, Chile. *Catena*, v. 48: p. 255-266.

Ireland, P., (1979). Geomorphological variations of "case hardening" in Puerto Rico. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 32: p. 9-20.

Jutson, J. T., (1918). The influence of salts in rock weathering in sub-arid Western Australia. *Royal Society of Victoria, Proceedings*, v. 30: p. 165-172.

Kejonen, A. K., Lahti, S., (1988). Cavernous weathering forms in Finland. *Geogr. Ann. Ser. A- Physical Geography*, 70A: p. 315–321.

Kelletat, D., (1980). *Formenschatz und prozessgefüge des "Biokarstes"*

- and der küeste von Nordost-Mallorca (CalaGuya). Berl. Geogr. Stud. 7: s. 99–113.
- Konak, N., Bilgiç, T., Bilgin, R., Hepşen, N., Ercan, T., Hakyemez, Y., (2001). Geology of the northeast Pontides (Oltu-Olur-Şenkaya-Narman-Tortum-Uzundere), The Report of General Directorate of Mineral research and Exploration No: 10489: p.1-384.
- McBride, E. F., Picard, M. D., (2004). Origin of honeycombs and related weathering forms in Oligocene Macigno Sandstone, Tuscan coast near Livorno, Italy. *Earth Surf Process Landforms*, v: 29: p. 713–735.
- McGreevy, J. P., (1985). A preliminary scanning electron-microscope study of honeycomb weathering of sandstone in a coastal environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 10: p. 509–518.
- Mellor, A., Short, J., Kirkby, S. J., (1997). Tafoni in the El Chorro area, Andalusia, southern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 22: p. 817–833.
- Mottershead, D. N., Pye, K., (1994). Tafoni on coastal slopes, south Devon, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 19: p. 543–563.
- Mustoe, G. E., (1982). The Origin of honeycomb weathering. *Geol. Soc. Am. Bull.* v. 93: p.108–115.
- Mustoe, G. E., (1983). Cavernous weathering in the Capitol Reef Desert, Utah. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 8: p. 517–526.
- Mustoe, G. E., (2010). Biogenic origin of coastal honeycomb weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 35: p. 424–434.
- Nash, D. J., (2011). Thomas, D. S. G. (editor), *Desert crust and rock coatings, Arid Zone Geomorphology; Process, form and change in drylands*, Wiley-Blackwell, ISBN: 978-0-470-51908-0, v: 7: p. 131-180.
- Nash, D., (2000). *Arid Geomorphology. Progress in physical geography*, v. 24: p. 425-443.
- Owen, A. M., (2013). Lace, M. J. and Mylroie, J. E., (editors), *Tafoni development in the Bahamas, Coastal Karst Landforms*, Coastal Research Library v. 5 (8): 177-205.
- Price, C. A., 2000. An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials. *European Commission Research Report 11, Protection and Conservation of European Cultural Heritage*. London: Archetype Publications, 136 p.
- Robinson, D. A., Williams, R. B. G., (1987). Gardiner V. (ed.), *Surface crusting of sandstone in southern England and northern France*. *International Geomorphology*, Wiley: 67: p. 623–635.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., Sebastian, E., (1999). Origins of honeycomb weathering: The role of salts and wind: *Geol. Soc. Am. Bull.* v. 111: p. 1250-1255.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., (1999). Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 24: p. 191-209.
- Rondeau, M. A., (1965). Formes d'érosion superficielles dan les grés de Fountainbleau. *Bull Assoc Geogr Fr* 334/335: p. 58-66.
- Sancho, C., Benito, G., (1990). Factors controlling tafoni weathering in the Ebro Basin (NE Spain), *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 34: p. 165–177.
- Siedel, H., (1996). Experiences from desalting of tuffstone and sandstone monuments by compresses, *Le dessalement des matériaux poreux. 7es journées d'études de la SFIC, Poitiers, 9 - 10 mai 1996*. SFIC, Champs-sur-Marne, p. 191-198.
- Smith, B. J., (1994). Weathering processes and forms. In: A.D. Abrahams and A.J. Parsons (Ed.), *Geomorphology of Desert Environments*. Routledge Chapman & Hall, London, p. 39-63.
- Sunamura, T., (1996). A physical model for the rate of coastal tafoni development, *J. Geol.* v. 104: p. 741–748.
- Taber, S., (1916). The growth of crystals under external pressure. *American journal of Science*, v. 41: p. 532-556.
- TC. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, *Erzurum Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, Olur Meteoroloji İstasyonuna ait 1990-2007 Aralığını Kapsayan Rasat Verileri*, Erzurum.
- Thorntwaite, C. W., (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate, *Geogr. Rev.*, v. 38: p. 55-94.
- Trenhaile, A. S., (1987). *The geomorphology of the rock coasts*, Clarendon Press, Oxford, p. 48-51.
- Tschang, H., (1969). Geomorphological observations on the tafoni forms of Honk Kong. *The Chung Chi Journal*, v. 9: p. 32-51.
- Turkington, A. V., (1998). Cavernous weathering in sandstone: lessons to be learned from natural exposure. *Q J Eng Geol Hydrogeol.*, v. 31: p. 375–383.
- Turkington, A. V., Paradise, T. R., (2005). Sandstone weathering: A century of research and innovation. *Geomorphology*, v. 67: p. 229-253.
- Turkington, A. V., Phillips, J. D., (2004). Cavernous weathering, dynamical instability and self-organization. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 29: p. 665–675.
- Twidale, C. R., (1976). The shaping and interpretation of large residual granite boulders. *J. Geol Soc., Aust.*, v. 23: p. 371–381.
- Twidale, C. R., Bourne, J. A., (1976). Origin and significance of pitting on granitic rocks. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 20: p. 405–416.
- Unruh, J., (2001). A revised endpoint for ceramics desalination at the archaeological site of Gordion, Turkey. *Studies in Conservation*, v. 46: p. 81-93.
- Uzun, A., (1998). Weathering forms on sandstones directly exposed to sea effects in Gelincikburnu and its surroundings (south coast of the Black Sea). *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 42: p. 233-244.
- Viles, H. A., (2011). Thomas, D. S. G., (Editor), *Weathering systems, Arid Zone Geomorphology; Process, form and change in drylands*, Wiley-Blackwell, ISBN: 978-0-470-51908-0, v. 7: p. 85-100.
- White, W. A., (1944). Geomorphic effect of indurated veneers on granites in the southeastern states, *Journal of Geology*, v. 52: p. 333-341.
- Wilhelmy, H., (1964). Cavernous rock surfaces (tafoni) in semiarid and arid climates. *Pakistan Geographical Review*, v. 9: p. 9–13.
- Young, A. R. M., 1987. Salt as an agent in the development of cavernous weathering. *Geology*, v. 15 (10): p. 962–966.

