



## Paleosismoloji Arşivi Olarak Mağara Çökelleri

**Gelecekteki depremlerin öngörülebilmesi açısından aletsel dönem öncesinde gerçekleşmiş, günümüzde varlığı bilinmeyen geçmiş depremlerin ne zaman ve ne güçte oluştuklarına yönelik bilgilerin elde edilmesi oldukça önemlidir. Bu kapsamda mağara çökelleri önemli veri kaynakları olabilmektedirler. Mağaralarda, bir dizi çözünme-çökeltme sürecine bağlı olarak gelişen damlataşlar gibi kimyasal çökeller ile buzul kazınması ve/veya sellenme sonucu mağara içersine taşınan kum, kil ve çakıl depoları gibi fiziksel çökeller; buldukları mağaranın geçmişine dair birçok bilgiyi de içlerinde barındırmaktadır. Mağara içlerinde gelişen diktlerin kesitlerinde gözlenen mm kalınlıklı laminalı yapıdaki renk, kalınlık ve asimetriklik gibi özellik değişimlerinin mağara dolayındaki tarihsel sismik faaliyetlerden etkilenebildiği gözlenmektedir. Bu nedenle mağara çökellerinden elde edilen verilerin paleosismolojik çalışmalara önemli katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.**

**Dr. Murat AKGÖZ**

[murat\\_akgoz@yahoo.com](mailto:murat_akgoz@yahoo.com)

**G**erek kimyasal gerekse de fiziksel mağara çökelleri üzerinde gözlenen anomalilerin uygun tekniklerle yaş tayinlerinin yapılması ile mağaranın bulunduğu bölgenin paleoklim kayıtlarının yanı sıra paleosismoloji kayıtları da elde edilebilmektedir. Paleosismoloji, tarihsel dönemlerde oluşmuş ve yüzey kırığı oluşturmuş depremlerin sayısını, büyüklüğünü, atım miktarını ve depremlerin yinelenme sıklığını saptamak amacıyla yapılan çalışmaların tamamını kapsamaktadır. Sahip oldukları kimyasal ve fiziksel çökellerin özellikle dış etmenlere bağlı deformasyonlara karşı binlerce yıl çok iyi korunabilmeleri ve dolayısıyla oldukça uzun bir dönemle ilgili verilerin elde edilmesine olanak sağlamalarından dolayı, bu çö-

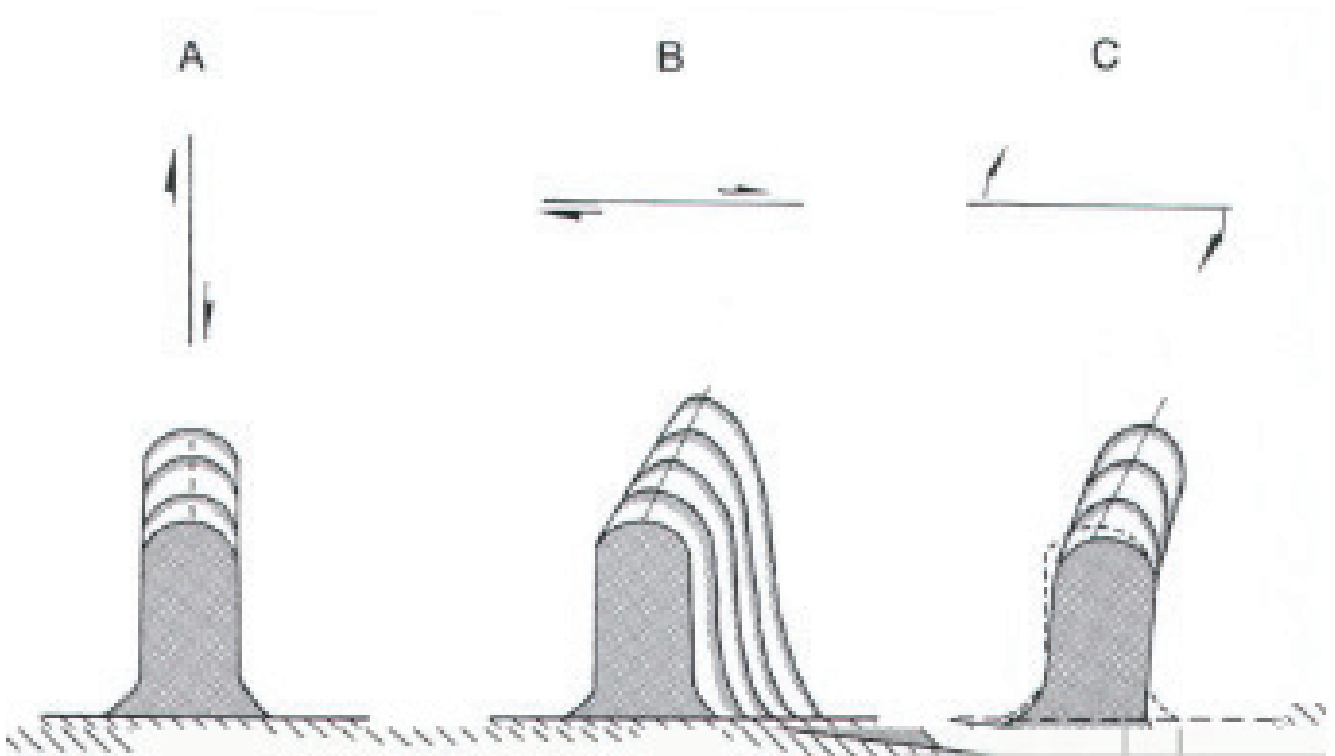
kellerden yararlanılarak mağaraların bulunduğu bölgenin deprenselliğine ışık tutacak veriler de elde edilebilmektedir.

Mağaralardaki kimyasal çökellerden birisi olan sarkıtların frekanslarının sismik frekanstan daha yüksek olmasından dolayı çoğu sarkıt, depremden sonra herhangi bir deformasyona uğramadan kalır. Ancak, ince sarkıt ve dikitler ile aykırı (eksantrik) sarkıtlar kolayca kırılabilir (1). Bu nedenle bu tür sarkıtlar paleosismik verilerin elde edilmesinde son derece yararlıdır. Bununla birlikte; paleoklim çalışmalarında olduğu gibi paleosismoloji çalışmaları açısından da en uygun örnekleri, silindirik görünümlü dikitler oluşturmaktadır. Dikiti besleyen suyun miktarı, suyun akış şekli ve içeriğindeki CO<sub>2</sub> oranındaki değişimlere bağlı olarak çökeltim hızı ve miktarı da değişmektedir. Bu, artan çökeltim miktarına bağlı olarak dikitin genişlediği, tersi durumda ise dikit çapında daralmanın olacağı anlamına gelmektedir. Dikitin tabandan uca doğru gidildikçe azalan çapı dikiti besleyen su miktarının dönemsel olarak azaldığını göstermektedir (2).

Dikitlerin boyuna kesitlerinde, laminalar arasında görülen kalınlık ve renk farklılığı ile gelişim

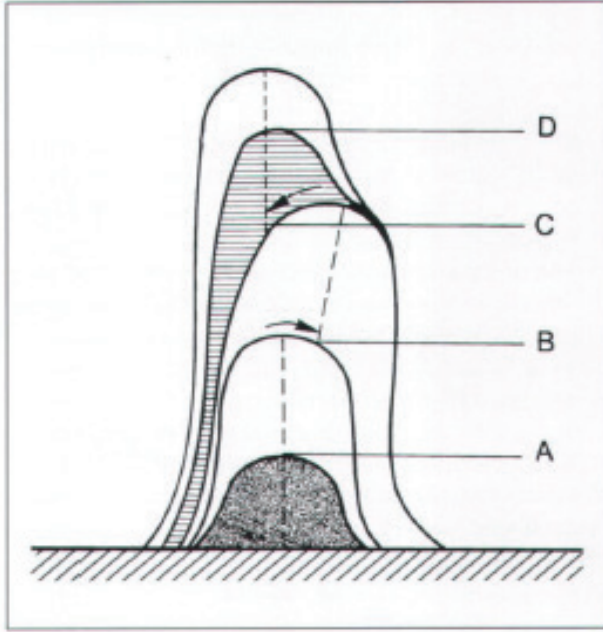
ekseni doğrultusundaki değişimler; dikitin gelişim sürecindeki ani değişimlerin göstergesidir. Paleoklim ve özellikle paleosismoloji çalışmalarında dikit gelişim eksenleri boyunca görülen bu değişimler, olası bir sismik aktivitenin olası göstergesi olarak kabul edilmektedir (1,3,4,5). Yeraltında, tektonik hareketlere bağlı gelişen titreşimlerin etkilerinin yüzeye göre daha düşük olmasına karşın; deprem sırasındaki kırılmalara bağlı olarak, kısa sürede yüksek frekanslarda enerjisinin daha fazla olacağı ve buna bağlı olarak da deprem odak merkezi uzak olan depremlerin uzun süreli düşük hızlanma hareketlerinin uzun-ince dikitler üzerinde sapma ve yer değişimlerine neden olabileceği kabul edilmektedir (6, 7).

Bu bağlamda farklı tektonik hareketler ve bu hareketlere bağlı olarak dikitler üzerinde meydana gelebilecek etkiler Şekil 1'de gösterilmektedir. Dikey hareket durumunda (A) tavandan damlayan suda herhangi bir yer değişimi olmayacağı için dikitte deformasyon gelişmeyecektir. Yatay hareket durumunda (B) ise tavandan damlayarak dikiti besleyen suyun damlama noktası yanal yönde değişeceği için bu yanal değişim yönünde dikitin büyümesi esnasında asimetrik laminalar



**Şekil 1:** Farklı tektonik hareketlere bağlı olarak dikit üzerinde gelişebilecek deformasyonların şematik gösterimi (3).

gelişecektir. Dönel hareket (C) durumunda ise dikiti besleyen suyun damlama noktasında değişim olmamasına karşın dikit gelişim ekseninde simetrik değişimler gözlenecektir (3).



**Şekil 2:** Farklı yön ve karakterdeki sismik hareketlere bağlı olarak dikit gelişim eksen ve laminalar arasındaki değişimlerin şematik gösterimi (3).

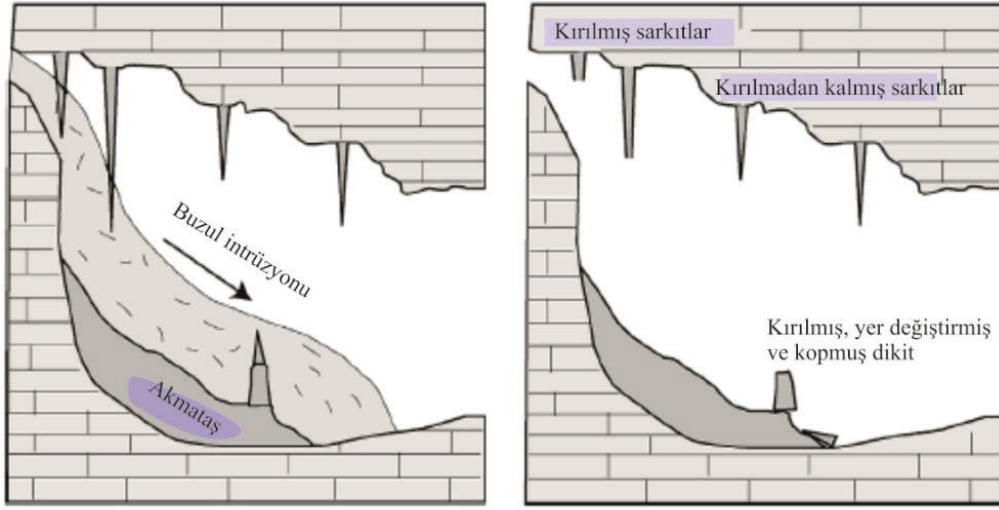
Farklı yön ve karakterdeki tektonik hareketlere bağlı olarak dikitlerin gelişim eksen açısında ve laminaları arasında gelişen ani ve keskin değişimler (şemada B ve C harfleri ile belirtilmiştir) deprem sırasında aniden boşalan mekanik enerjiden kaynaklanan sismik şoklara bağlı olarak gelişen olası doku, renk ve kimyasal değişimler dikitlerin içyapılarında görülen deprem kanıtları olarak kabul edilmektedir (Şekil 2).

Her ne kadar özellikle dikit gelişim ekseninde ve laminasyonda görülen deformasyonlar olası sismik aktivitenin kanıtı olarak kabul edilseler de; özellikle paleosismoloji ve paleoiklim çalışmalarında kullanılacak sarkıt ve dikit mağara çökellerinde görülen deformasyonların başka birçok nedeninin de olabileceği gözardı edilmemelidir. Bu nedenle paleosismoloji çalışmalarında öncelikli olarak deformasyonların nedenleri saptanmaya çalışılır. Mağara tabanını oluşturan taşınmış gevşek kum veya kil zeminin duraysızlığına bağlı olarak bu zeminler üzerinde gelişmiş dikit gibi çökellerde kırılma veya devrilme gerçekleşebilmektedir (Şekil 3). Yine, benzer şekilde çökelin bulunduğu zeminin altındaki mağara pasajlarından kaynaklanan oturma ve çökmeler de deformasyona neden olabilmektedir. Buzul kazınması ya da sellenmeye bağlı olarak mağara içine kırıntılı jeolojik malzemenin taşınması esnasında çökellerde oynama, kırılma ya da devrilme gerçekleşebilir. Fauna etkisi (özellikle ayıların kış uykusu için kullandığı mağaralarda olduğu gibi) ya da madencilik faaliyetleri veya vandalizm (barbarlık) gibi antropojenik (insan kaynaklı) etkilere bağlı olarak da deformasyonlar gelişebilmektedir.

İnsanlık tarihi boyunca barınma, korunma, av alanı, inanç merkezi gibi çeşitli amaçlarla kullanılan gelmiş olan mağaralardaki sarkıt, akmataşı ve dikit gibi çökellerde gözlenen devrilme, kuruma veya kırılma, parçalanma (vandalizm) gibi deformasyonlar büyük oranda insan kaynaklı olarak oluşmuştur. İnsanın doğrudan etkilerinin yanı sıra; mağaraların yakın çevresindeki madencilik faaliyetlerine bağlı olarak patlatma ve ağır tonajlı araç kaynaklı titreşimler de mağara çökellerinde deformasyonların gelişmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, paleosismoloji ve paleoiklim çalışmaları için mağaralarda örnekleme yapılacağı zaman mağarada insan aktivitelerine ait izlerin çok iyi tanınması ve sonuçlar yorumlanırken dikkate alınması gerekmektedir.



**Şekil 3:** Sakarlık Düdeni'nde (Mersin) mağara zeminindeki oturmalara bağlı olarak devrilmiş bir dikit üzerinde gelişmiş yeni dikit (8).



**Şekil 4:** Snezma Jama (Slovenya) mağarasındaki mağara çökellerinin kırılmalarına neden olan buzul kazımalarının şematik gösterimi (4).

Paleosismoloji ve paleoklim verilerinin mağara çökellerinden elde edilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, çökellerde karşılaşılabilecek deformasyonların bir diğer kaynağını ise buzul kazımalarının oluşturduğu kabul edilmektedir (4). Yüksek dağlık bölgelerde, iklimdeki soğumaya bağlı olarak buz tabakaları oluşabilmektedir. Buzulların büyüklüğü yeni kar yağışları ile artmakta, artan ağırlıkla buzul kendiliğinden yavaşça hareket etmektedir. Buzullar altlarında bulunan mağaraları da etkilemektedirler. Ancak, mağaraların buzul hareketlerinden nasıl etkilendiği çok fazla bilinmemektedir (1). Dikitlerde, buzul kazımalarına bağlı gelişebilecek olası deformasyonlar şematik olarak Şekil 4'de verilmiştir. Genellikle, buzul kazımalarına bağlı deformasyonların gelişmiş olduğu düşünülen mağaralarda, kazımaya bağlı olarak mağaraya taşınan kırıntılı jeolojik malzemenin (moren) mağara duvar ve tabanında oluşturduğu kazıma izleri ve bunlardan oluşan birikimler (moren depoları) aranmaktadır. Buzul kazımalarına benzer şekilde, özellikle sellenme bölgelerinde sel suları ve beraberinde taşınan materyallerin mağara tabanında yayılması esnasında çökeller üzerinde de deformasyonlar gelişebilmektedir.

Buzul kazımaları ve/veya antropojenik vb kökenli deformasyonlar dikkate alınarak seçilen dikit-

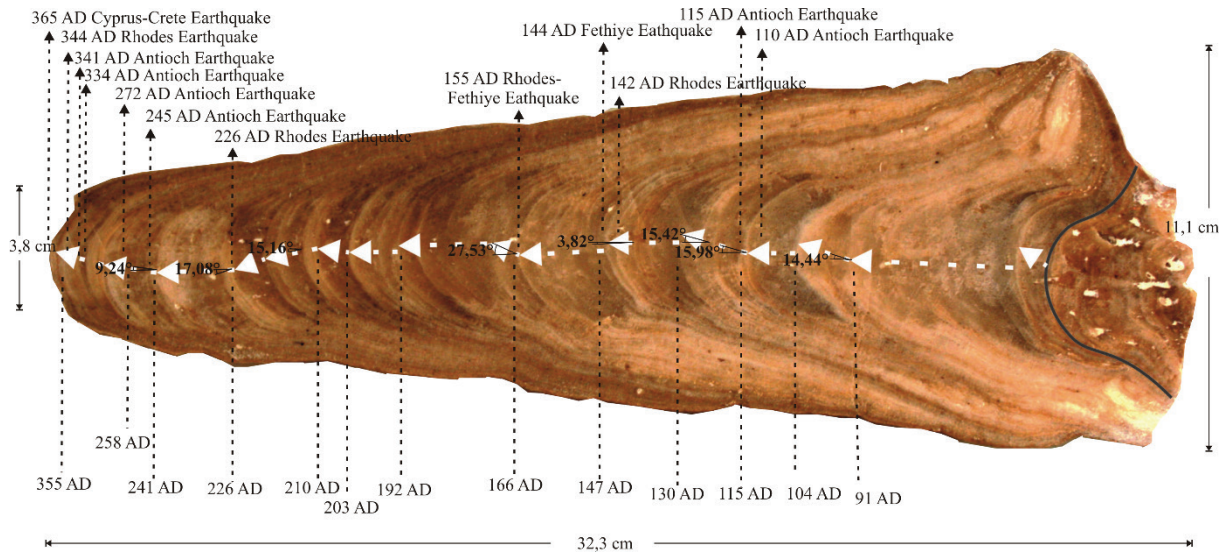
lerin özellikle gelişim eksenlerindeki sapmalar, paleosismoloji çalışmaları için oldukça iyi veriler sağlamaktadır. Dikitlerde görülen kırılma, kopma, parçalanma, kuruma gibi deformasyonların tektonik hareketlere bağlı olarak gelişip gelişmediğinin saptanmasında; deformasyonların mağara içerisindeki diğer çökeller üzerinde de kırılma, kopma, devrilme gibi benzer deformasyonların varlığı önemli bir kanıt olarak kabul edilir.

Günümüzde paleosismoloji ve paleoiklim amaçlı çalışmalarda mağara çökellerinin yaşı U/Th-230 yaş tayin yöntemiyle belirlenmekte; çökelin oluşum dönemindeki çevresel şartlar ise çökelin Oksijen-18 ve Karbon-13 izotop içerikleri kullanılarak belirlenmektedir. Başlangıç örneklerinde toryumun olmadığı kabul edilerek  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ve  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  oranlarının ölçülmesine dayanan U/Th-230 yaş tayini tekniği ile ilgili ilk çalışma Derek Ford, Henry Schwartz ve öğrencileri tarafından Batı Virjinya mağaralarında paleoiklim verilerinin elde edilmesi amacıyla yapılmıştır (9).

Ford ve ekibinin kullandığı yöntemle, Fransa'nın güneyinde yer alan Garrel Mağarası'nda yapılan bir çalışmada; mağara içerisindeki akmetaşların gelişmelerinin Üst Pleistosen'de aktif bir faya bağlı olarak kesintiye uğradığı ve deformasyona uğramamış (kırılmamış) akmetaşlarında yapılan analizler sonucu bu fayın 466.000 yıldır aktif olmadığı belirlenmiştir. Bir diğer çalışmada ise, Ölü Deniz (İsrail) fayının 40 km batısında yer alan Soreq ve Har-tuv mağaralarındaki çökellerde U/Th-230 yaş tayini ve yüksek çözünürlükte  $^{18}\text{O}$  analizleri yapılmış ve depremlerin oluşma sıklığının 10.000-14.000 yıllık bir aralığa sahip olduğu saptanmıştır (1).

Benzer bir çalışma ülkemizde de gerçekleştirilmiş ve Mersin'de yer alan farklı mağaralardan alınan dikitler üzerinde olası depremlerin kanıtları olarak görülen dikit gelişim eksen doğrultusundaki sapmaların gerçekleşme zamanları U/Th-230 yönetimi ile belirlenmiştir (8). Bu sonuçlar bölgeyi etkileyen tarihsel depremlerin gerçekleşme zamanlarıyla karşılaştırılmıştır. Paleosismoloji verilerinin elde edilebilmesi amacıyla seçilen dikit örneklerinden biri 52 m'lik tek bir inişle ulaşılabilen Sakarlak Düdeni (Silifke/Mersin)'nden alı-

nan dikit örneğidir. Örneğin oluşum ve gelişim eksen doğrultusundaki sapma zamanlarının belirlenmesi için, Manyetik Sektör MC-ICPMS tekniği ile U/Th-230 yaş tayinleri yaptırılmış; örneğin MS 55 ile MS 313 yılları arasındaki yaklaşık 258 yıllık bir dönemde çökeldiği belirlenmiştir (8). Örneğin, olası depremlerin kanıtları olarak görülen dikit gelişim eksen doğrultusundaki sapmaların yaşlarıyla mağaranın bulunduğu bölgeyi etkilemiş olan tarihsel depremlerin yaşları çok büyük oranda örtüşmektedir (Şekil 5). Örneğin; dikit gelişim eksen doğrultusundaki yaklaşık  $16^\circ$ lik bir sapmanın meydana geldiği noktanın çökelim zamanı M.S. 115 yılıdır. Bu tarih, literatürde anılan M.S. 110 ve M.S. 115 Antakya depremleri ile örtüşmektedir. Literatürde M.S. 110 Antakya depreminin 8 şiddetinde, M.S. 115 Antakya depreminin ise 9 şiddetinde olduğu ve deprem sonucunda yaklaşık 260.000 kişinin öldüğü belirtilmektedir (10,11,12). Benzer şekilde, dicitin uç kesimlerinde görülen lamina kalınlık ve renk farklılıkları ile dikit gelişim eksen doğrultusundaki nispeten küçük dereceli sapmalar; literatürde 9 şiddetinde olduğu belirtilen M.S. 334 Antakya depremi, 8 şiddetinde olduğu belirtilen M.S. 341 Antakya depremi, Rodos'un büyük oranda yıkıldığı 9 şiddetindeki M.S. 344 Rodos depremi ve yaklaşık 9 m yüksekliğinde tsunami dalgalarının oluştuğu belirtilen 9 şiddetindeki M.S. 365 Kıbrıs-Girit depremi ile örtüşmektedir (11,12,13,14,15,16,17).



**Şekil 5:** U/Th yaş verilerinden elde edilen Sakarlık Düdeni'ne (Mersin) ait dikit üzerinde gelişim eksen doğrultusundan sapmaların gerçekleştiği zamanlar ile bölgeyi etkileyen tarihsel depremlerin gerçekleşme zamanlarının karşılaştırılması (8) (Şekilde; AD latince milattan sonra anlamına gelen Anno Domini sözcüğünün kısaltmasıdır. Cyprus-Kıbrıs, Crete-Girit, Rhodes-Rodos, Antioch-Antakya, earthquake: deprem).

Sakarlık Düdeni'ne ait dikit örneğinde de görüldüğü üzere dikit gelişim eksen doğrultusunda farklı dönemlerde oluşan sapmalar, belirgin bir şekilde doğrudan ve/veya dolaylı olarak sismik hareketlere bağlı olarak gelişmiş, dikiti besleyen suyun damlama noktasının değişmesine ve/veya besleyen kanalın tıkanmasına bağlı olarak dicitin çökelişi duraksamış ya da sonlanmıştır.

Sonuç olarak binlerce mağaranın bulunduğu tahmin edilen ülkemizde, mağaraların buldukları bölgenin jeolojik, jeomorfolojik, hidrolojik, hidrojeolojik, sismolojik, ekolojik ve antropolojik tarihçesi hakkında önemli bilgiler içeren çok değerli veri tabanları içerdikleri anlaşılmaktadır. Bu nedenle, mağaraların yalnız sundukları görsel güzellikler açısından değil, içerdikleri bilgilerin önemi açısından da korunması büyük önem taşımaktadır.

## Değerlendirilen Belgeler

- (1) Šebela, S., 2008. Broken speleothems as indicators of tectonic movements. *Acta Carsologica*, v. 37, no. 1, 51-62.
- (2) Bayarı, S., ve Özyurt, N., 2005. Mağara Çökellerinden Geçmiş Ortam Koşullarının Belirlenmesi. *Ulusal Mağara Günleri Sempozyumu*, Konya, 19-29.
- (3) Forti, P., 2001. Seismotectonic and paleoseismic studies from speleothems: The state of the art. *Geologica Belgica (vol. Karst & Tectonics)*, v. 4, no. 3-4, 175-185.
- (4) Gilli, E., 2005. Review on The Use of Natural Cave Speleothems as Palaeoseismic or Neotectonics Indicators, *C. R. Geoscience*, v. 337, 1208-1215.
- (5) Postpischl, D., Agostini, S., Forti, P., Quinif, Y., 1991. Palaeoseismicity from Karst Sediments: the "Grotta del Cervo" Cave Case Study (Central Italy), *Tectonophysics*, v. 193, 33-44.

- (6) Lacave, C., Koller, M. W., Eichenberger, U., Jeannin, P. Y., 2003. Prevention of Speleothem Rupture During Nearby Construction, *Environmental Geology*, v. 43, 892-900.
- (7) Becker, A., Davenport, C. A., Eichenberger, U., Gilli, E., Jeannin, P. Y., Lacave, C., 2006. Speleoseismology: A Critical Perspective, *Journal of Seismology*, v. 10, 371-388.
- (8) Akgöz, M., and Eren M., 2015, Traces of Earthquakes in the Caves: Sakarlak Ponor and Kepez Cave, Mersin, (Southern Turkey), *Journal of Cave and Karst Studies*, 77-1, 63-74
- (9) White, W.B., 2007. Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 69, 76-93.
- (10) Altınok, Y., Alpar, B., Özer, N., Aykurt, H., 2011. Revision of the Tsunami Catalogue Affecting Turkish Coasts and Surrounding Regions, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 11, 273-291.
- (10) Erel, T. L., Adatepe, F., 2007. Traces of Historical earthquakes in the ancient city life at the Mediterranean region, *J. Black Sea/Mediterranean Environment*, vol. 13: 241-252.
- (12) Sbeinati, M. R., Darawcheh, R., Mouty, M., 2005. The Historical Earthquakes of Syria: An Analysis of Large and Moderate Earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D., *Annals of Geophysics*, v. 48, 347-435.
- (13) Antonopoulos, J., 1980. Data From Investigation on Seismic Sea-waves Events in the Eastern Mediterranean from the Birth of Christ to 500 A.D., v. 33, 141-161.
- (14) Carayannis, G. P., 2011. The Earthquake and Tsunami of July 21, 365 AD in the Eastern Mediterranean Sea - Review of Impact on the Ancient World - Assessment of Recurrence and Future Impact, *Science of Tsunami Hazards*, v. 30, 253-292.
- (15) Papadopoulos, G. A., Daskalaki, E., Fokaefs, A., Giraleas, N., 2007. Tsunami Hazard in the Eastern Mediterranean Sea: Strong Earthquakes and Tsunamis in the West Hellenic Arc and Trench System, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 7, 57-64.
- (16) Soloviev, S. L., Solovieva, O. N., Go, C. N., Kim, K. S., Shchemikov, N. A., 2000. Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 BC - 2000 AD, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Kluwer Academic Publishers, 244 s.
- (17) Tinti, S., Armigliato, A., Pagnoni, G., Zaniboni, F., 2005. Scenarios of Giant Tsunamis of Tectonic Origin in the Mediterranean, *Journal of Earthquake Technology*, v. 42, 171-188.