



Paleoiklim Arşivi Olarak Mağara Çökelleri

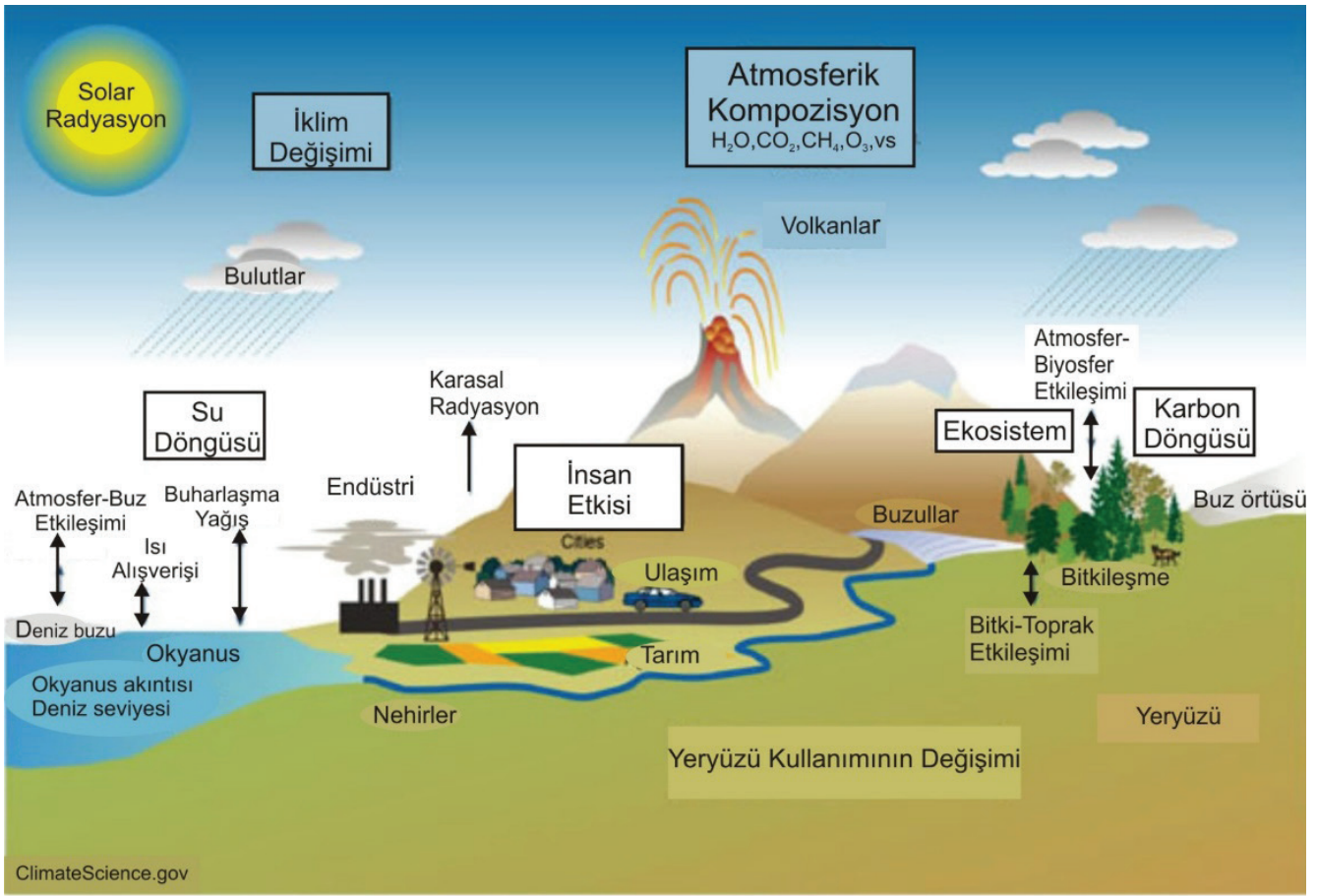
Geçmiş iklimsel koşulların (paleoiklim) kurgulanmasında ve gelecek için öngörü modellerinin oluşturulmasında kimyasal mağara çökelleri (damlataşlar) güvenilir ve anlaşılabilir kayıtlar ve kanıtlar sunmaktadır.

Dr. Gizem ERKAN

Hacettepe Üniversitesi,
Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
ANKARA

gizems@hacettepe.edu.tr

Tüm canlıların yaşam koşullarını şekillendirdiği düşünüldüğünde iklim kavramı, genellikle uzun süre gözlemlenen sıcaklık, nem, rüzgâr, yağış gibi tanımlamalar kullanılarak ifade edilmektedir. Bununla birlikte iklim enlem, yeryüzü şekilleri, yükselti, kar örtüsü, buz hacmi, deniz yüzey sıcaklıkları, atmosferik içerik, okyanus akıntıları, volkanik ve tektonik aktiviteler ile Dünya'nın döngüsel hareketindeki değişikliklerinden kaynaklanan daha geniş kapsamlı etkenler ve süreçler tarafından belirlenmektedir. Bu durumda iklim, küçük ölçekli bileşenler arasındaki etkileşim ve geri beslenme mekanizmaları ile ortaya çıkan dinamik ve büyük ölçekli bir sistemi ifade etmektedir (Şekil 1).



Şekil 1: İklim sistemi bileşenleri ve bunlar arasındaki ilişkiler büyük ölçekli bir sistemi tanımlamaktadır.

Küçük ölçekli sistemlerin kendi içinde ve/veya birbirleri ile ilişkilerinde meydana gelen etkileşimler, iklimin değişkenlik göstermesine neden olmaktadır. Yeryüzünde varoluşla birlikte sürekli olarak farklı zaman ölçeklerinde iklimsel dalgalanmalar ve değişiklikler meydana gelmiştir. İklim üzerinde etkili olan faktörler periyodik (döngüsel) olan veya olmayan süreçlerle oluşmaktadır. Güneş aktivitesindeki döngüler, Dünya'nın kendi eksenini ve Güneş çevresindeki dönüşü ile ilgili Milankovitch döngüleri, atmosferik ve okyanusal döngüler, Kuzey Atlantik Salınımı (North Atlantic Oscillation-NAO), Güney Salınımı-El Nino, volkanik aktiviteler, plaka tektoniği, rüzgârlar, buz örtüleri, deniz seviyesi değişimleri vb faktörler ve bunların sistem elemanları, yerel ve/veya küresel ölçekte iklim değişikliklerine neden olmaktadır.

Tüm dünyada yer şekilleri ve ekosistemler, zaman içinde onları şekillendiren ve bugünkü konumlarına getiren doğal ve kültürel süreçlerin ürünleridir (1). Yeryüzünde Kuvaterner'de (son 2.6 milyon yıl) ve özellikle de Holosen'de (son 12 bin yıl) meydana gelen çeşitli iklimsel değişimler, birçok farklı bilimsel disiplindeki araştırma çalışmalarının iklim değişimi üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur. Geçmiş iklim değişiklikleri, ağırlıklı olarak Pleyistosen (2.6 milyon yıl ile 12 bin yıl arası) Buzul ve Buzularası Dönemler arasındaki iklimsel salınımlarla ifade edilmektedir. Günümüzdeki iklimsel koşullar ve ortamlar, önemli ölçüde yaklaşık 20 bin yıl önce sonlanan Son Buzul Dönemini takiben geçen son 12 bin yıllık dönem süresince şekillenmiştir.

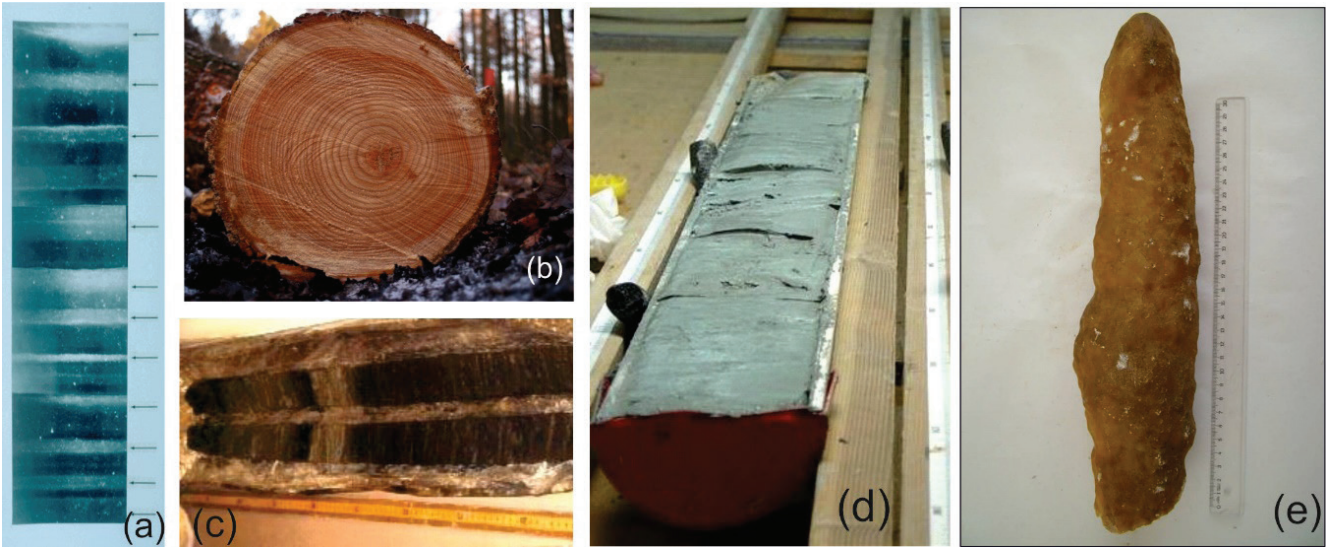
İklimsel değişim süreci üzerinde insan etkisi, tanımlanan diğer değişim mekanizmalarına göre çok daha etkilidir ve kısa sürede gerçekleşmektedir. Bu durumda tarihsel olarak iklimsel değişim mekanizmalarının, çevre-insan ilişkisinin belirlenmesi ve geleceğe dönük öngörülerde bulunulabilmesi için iklim değişimi kavramının iyi anlaşılması gerekmektedir. Genel olarak yağış ve sıcaklık değişimleri

şeklinde tanımlanan küresel ısınma ve yağış rejimlerindeki değişiklikler ve bunlara eşlik eden atmosferik ve okyanusal değişimler insan yaşam koşullarını ve alanlarını etkilemekte ve belirlemektedir. Sosyal ve kültürel yaşam üzerinde de etkili olan bu değişiklikler taşkın, orman yangınları, kuraklık, asit yağmurları, atmosferdeki karbondioksit (CO₂) seviyesinin artması vb olayların gerçekleşmesine de neden olmaktadır.

Uzun süreli bir perspektiften bakıldığında, çevresel bileşenlerin doğa/iklim üzerinde ne zaman, nerede ve nasıl etkili olduğunun, yeryüzündeki sistemin buna nasıl karşılık verdiğinin anlaşılabilmesi için geçmişte bu süreçlerin nasıl gerçekleştiğine ilişkin birtakım bilgilere ihtiyaç vardır. Bu nedenle, geçmiş iklim değişimlerinin bir bakıma doğadaki arşiv kayıtlarını içeren karasal ve denizel çökellerdeki bilgilerin çözümlenmesi ve yaşlandırılması gerekmektedir. Geçmişte iklimin yerkürenin değişik yerlerinde ve farklı zamanlarda nasıl değiştiğinin bilinmesi ile iklime etkiyen parametreler kullanılarak matematiksel iklim modelleri oluşturulabilmekte, bu modellere güncel verilerin uygulanması ile gelecekteki iklim tahmin edilebilmektedir. Henüz emekleme aşamasında olan uzun süreli iklim tahmin modellerinden, elde edilen yeni bilgi ve verilerin de katkısıyla, her geçen gün daha da güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

Geçmiş iklim verileri, paleosıcaklık, atmosferik kompozisyon, okyanusal sirkülasyon, paleoyağış ve buzullaşma gibi parametrelerin nitel ve nicel ifadeleridir. Doğal arşiv ya da tıpkı bir kayıt cihazı gibi tanımlanabilecek karasal ve denizel çökellerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik içerikleri, geçmiş iklim yorumlamaları açısından önemli ipuçları taşımakta ve yol gösterici olmaktadır.

Ağaç halkaları, eski topraklar (paleosoller), okyanus-göl çökelleri, buzul karotları ve buzul çökelleri (morenler) ile kimyasal mağara çökelleri olan dikitler, paleoiklimin ve paleo çevre koşullarının başlıca doğal arşivlerini/kayıtlarını oluşturmaktadırlar. Bu depolama ortamlarındaki tabakalanma (laminasyon) kalınlıkları, kimyasal içerikler, renklenmeler, gözenek oluşumları, mineralojik, duraylı izotop ve iz element içerikleri iklimsel değişimlere karşı hassasiyet gösteren başlıca veri kaynaklarıdır (Şekil 2).



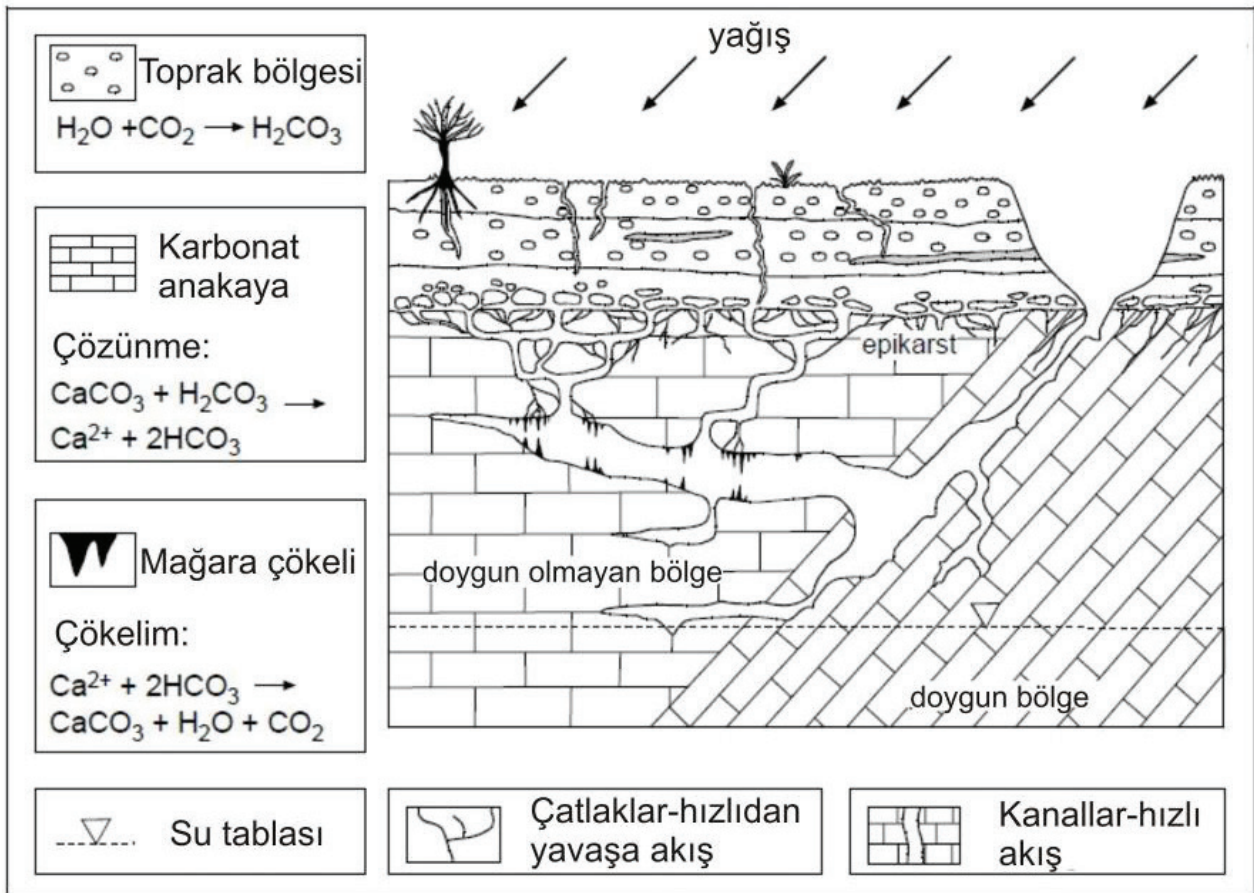
Şekil 2: (a) buzul karotu, (b) ağaç halkası, (c) göl çökeli karotu, (d) okyanus/deniz çökeli karotu, (e) mağara çökeli (dikit) başlıca paleoiklim arşivleridir.

Doğal paleoiklim arşivleri, geçmişteki ortamsal değişikliklerin zamanının belirlenmesinde, yeryüzü iklimini etkileyen okyanus ve atmosfer arasındaki ilişkinin anlaşılmasında, deniz yüzey sıcaklıklarının belirlenmesinde, bitki örtüsünün tanımlanmasında, sıcaklık değişimlerinin belirlenmesinde, buzul yayılımlarının değerlendirilmesinde ve bunlardan hareketle iklim koşullarının yorumlanmasında çok

önemlidirler. Genel olarak karşılaştırıldıkları zaman birbirlerine göre farklı zaman aralıklarında kanıtlar içeren karasal ve denizel bu göstergeler, sahip oldukları kayıtlar ile birbirlerini tamamlamaktadır.

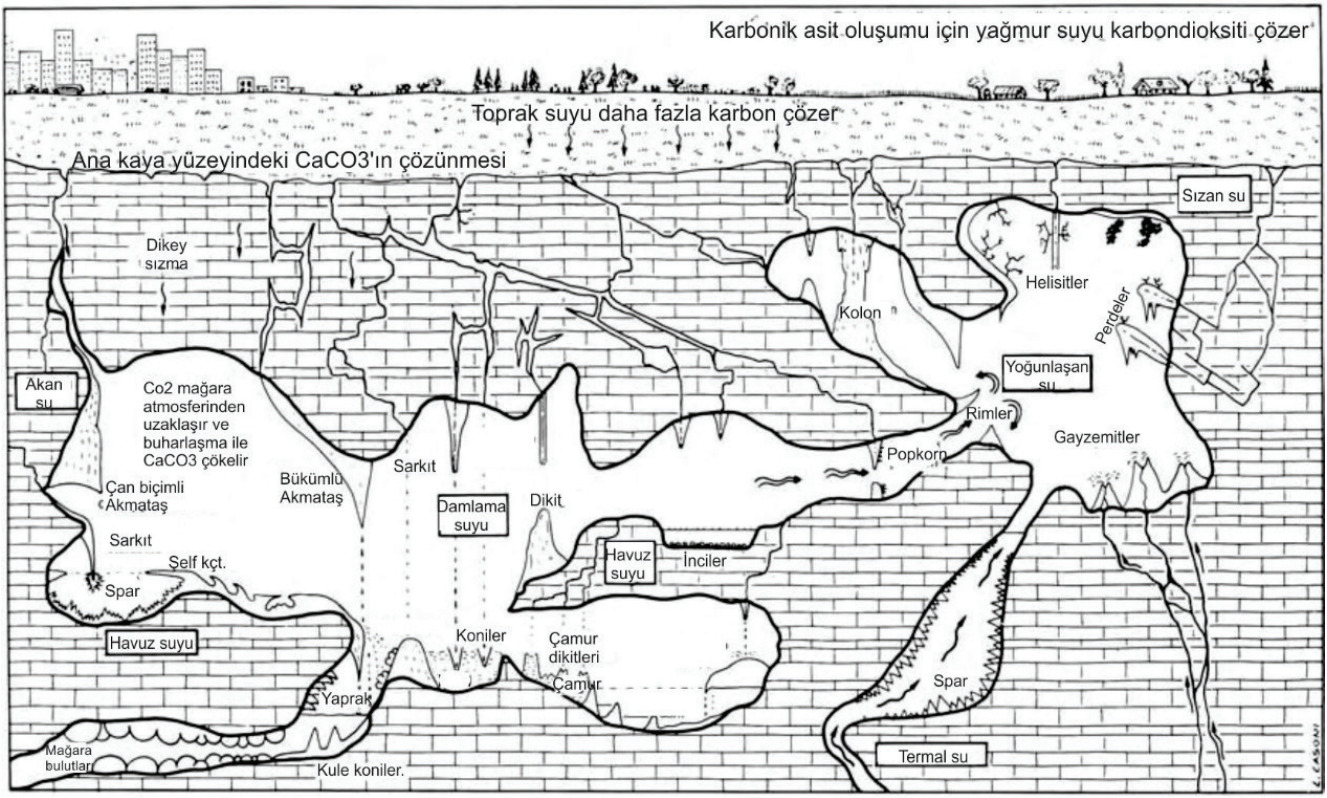
Bununla birlikte, pek çok paleoklim arşivinin kısa süreli kayıt içermesi, kayıtların ait oldukları zamanların hassas biçimde belirlenememesi gibi güçlükler, mağara çökellerinin öne çıkmasına neden olmuştur. Mağara çökellerinden elde edilen bilgiler yardımıyla yaklaşık olarak son 500 bin yıllık dönemdeki paleoklim, paleoçevre değişimleri ± 10 yıla varan hassaslıkta belirlenebilmektedir. Mağara çökelleri aynı zamanda diğer doğal arşiv kayıtlarından farklı olarak yeryüzünün hemen her yerinde bulunabilmekte, bu nedenle de belirli bir zaman diliminde Dünya'nın farklı yerlerindeki iklim ve ortam farklılıkları hakkında da bilgi sunabilmektedir.

Mağaralardaki kimyasal çökel oluşumu mağara içindeki ve dışındaki koşullar tarafından kontrol edilmektedir. Toprak zonu, bitki kök solunumu ve organik madde bozunmasına bağlı olarak yüksek miktarda karbondioksit gazı (CO_2) içermektedir. Yeraltına sızan ve toprak zonundan yüksek CO_2 içeriği kazanan su da süzülme yolu boyunca karbonatlı minerallerin çözünmesine neden olmaktadır. Yeraltına süzülen bu su, atmosferi CO_2 açısından daha fakir olan mağaraya ulaştığında yapısındaki CO_2 'i mağara atmosferine salmakta, buna bağlı olarak da bünyesindeki kalsiyum ve karbonat iyonları kalsit veya aragonit (CaCO_3) minerali formunda sarkıt/dikit, damlataş, akmataş vb türde mağara çökellerinin oluşumuna neden olmaktadır (Şekil 3).



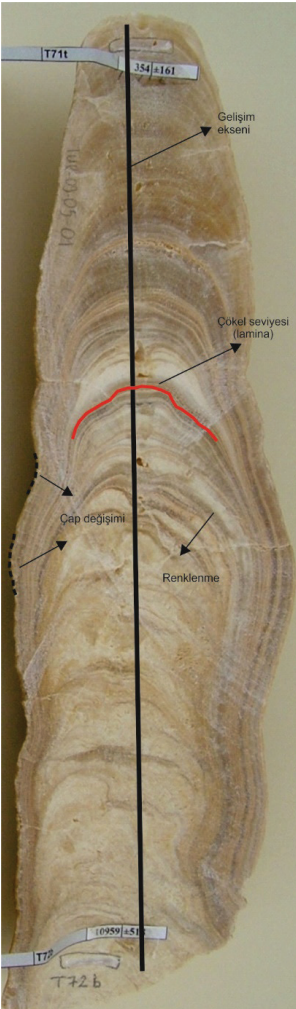
Şekil 3: Yeraltına süzülen yüksek CO_2 içeriğine sahip su, akış yolu boyunca çözünen karbonatlı minerallerin mağara içinde çökmesine neden olur (2)

Mağaralarda tavandan veya duvarlardan sızan suların sızma hızına ve miktarına ve diğer etkenlere bağlı olarak oluşan çökeller sarkıt, dikit, akmataş, perde vb



Şekil 4: Mağaralarda sarkıt, dikit, akmataşı, perde vb biçimdeki kimyasal çökeltilerin tipik konumları (3)

Mağara çökeltileri genel olarak geçmiş iklimin fiziksel ve kimyasal göstergelerini içerirler ve geçmiş yağış, sıcaklık ve bitki örtüsünün kurgulanmasında kullanılırlar. Araştırmalarda en çok tercih edilen çö-



kel formu dikitlerdir. Dikitlerin dokusal, fiziksel, kimyasal, izotop ve iz element içerikleri, yüksek zamansal çözünürlüklü yaşlandırma yöntemleri ile geçmiş iklim ve ortam koşulları hakkında anlaşılır bilgiler sunmaktadır (Şekil 5).

Dikitler görsel olarak değerlendirildiğinde silindirik dikit örneklerinde birim zamanda oluşan çökel kalınlığı (lamina) diğer çökel biçimlerine (sarkıt, akmataşı vb) göre daha incedir. Böylece daha küçük çökel hacminden daha uzun geçmiş ortam bilgisine ulaşılabilmektedir. Dikitlerin gelişim eksenini boyunca çaplarında meydana gelen daralma ve genişlemeler dikiti besleyen damlama suyunun devamlılığını ve beslenme hızındaki değişimleri, laminasyon kalınlığındaki değişimler ise çökelin büyüme hızını ifade etmektedir. Bu değişimlere bağlı olarak dikitin oluşum dönemindeki yağış miktarı ile ilgili değerlendirmeler yapılabilmektedir. İliman ve yağışlı dönemlerde lamina kalınlıklarının soğuk ve görece daha az yağışlı dönemlere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Laminalarda görülen açık (beyaz) veya koyu (krem) renkler çoğunlukla mağara üzerinde bulunan toprak zonundaki biyolojik faaliyetlerle ilişkilidir. Biyolojik aktivitenin azaldığı, soğuk ve görece daha az yağışlı dönemlerde azalan hümik ve fülvik asit üretimine bağlı olarak dikitlerdeki laminalar daha açık renkli olmaktadır. Çökelde belirlenen iz elementlerin (Cu, Mg, Ba, Sr, Al, Mn, Si, K, P, S gibi) tür ve bolluklarının değişimi de dış ortam koşullarını tanımlamaktadır. Yağışların yoğun olduğu dönemlerde çökeli besleyen su ile taşınan kırıntılı malzemenin artış göster-

Şekil 5: Dikitin gelişim eksenini boyunca dikit çapında, laminasyon kalınlığı ve rengindeki değişimler geçmiş iklimin ve ortam koşullarının değerlendirilmesi konusunda faydalı bilgiler vermektedir.

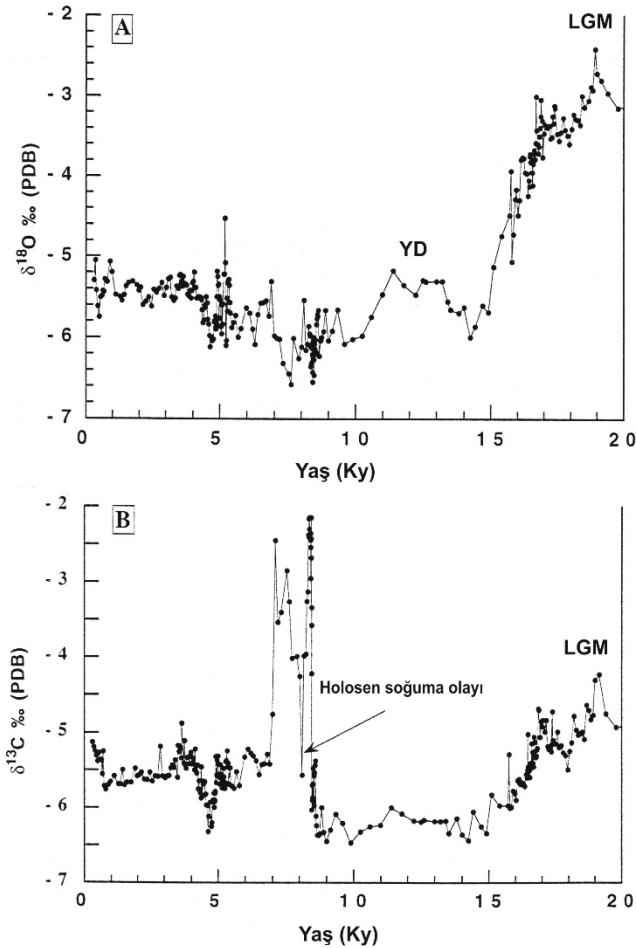
mesi çökelerde fosfat (P) ve kükürt (S) bolluklarının artmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde Mg içeriğindeki değişimler mağara içi sıcaklık değişimlerini ifade etmektedir. Dikite gözlenen iz element derişimlerinde değişimler değerlendirilerek yağış ve sıcaklık gibi dış ortam koşulları belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, Dikit kimyasının damlama suyunun kimyası tarafından belirlendiği ve suyun kimyasında mağara dışındaki sıcaklık, yağış değişimleri, bitkisel aktivite yoğunluğunun birinci derecede önemli olduğu düşünülüğünde, dikitlerdeki kimyasal değişim değerlerine bakarak iklimin etkisini belirlemek denizel karbonatlar (mercanlar, foraminifer kabukları) gibi diğer arşiv kayıtlarına göre daha karmaşık ve zordur.

Mağara çökellerinin oksijen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) ve karbon-13 ($\delta^{13}\text{C}$) duraylı izotop içerikleri de geçmiş iklim ve çevre koşulları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Oksijen izotop değişimleri mağara ve dış ortam hava sıcaklığının, karbon izotop değişimleri ise mağara üzerindeki toprak zonu biyokimyasal aktivite yoğunluğunun göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Genel olarak, çökeldaki $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^{13}\text{C}$ izotop değerlerinin bağıl azalma eğilimi göstermesi, ılıman ve nemli iklime geçişin göstergesidir.

Mağara çökellerinde kaydedilen geçmiş iklim ve çevre koşullarına ilişkin göstergelerin zamansal değişimlerinin yorumlanması için çökellerin oluşum zamanlarının yüksek hassasiyetle yaşlandırılması gerekmektedir. Paleoiklim kronolojisini oluşturmak için genel olarak ^{230}Th (Toryum 230) ve ^{14}C (Karbon 14) radyometrik yaşlandırma yöntemleri kullanılmaktadır.

^{14}C yaşlandırması pratik olarak son 75 bin yıllık dönem ile sınırlıdır ve genellikle çok hassas yaş değerleri verememektedir. Buna karşın ^{230}Th yöntemi ile son 600.000 yıllık döneme ilişkin, ± 10 yıla inebilen hata düzeyine sahip yaşlandırma yapılabilmektedir. Yöntemin bir diğer avantajı daha az miktarda örnek malzemesi gerektirmesidir.

Geçmiş iklimin yeniden kurgulanmasında kullanılan kimyasal mağara çökelleri ile yapılan paleokronolojik verilerle desteklenmiş çalışmalar incelendiğinde, farklı etkilerle oluşmuş küresel iklim olaylarının Dünyanın farklı bölgelerinde de benzer biçimde izlenebildiği görülmektedir. Örneğin, Çin'de yaz muson etkisinin büyüklüğünün belirlenmesi amacıyla Hulu ve Dongge Mağaraları'na ait dikit örneklerinden elde edilen $\delta^{18}\text{O}$ izotop verileri GISP2 (Greenland Ice Sheet Project) buzul karotları $\delta^{18}\text{O}$ verileri ile birlikte değerlendirildiğinde farklı iki bölgedeki sıcaklık değişimi davranışının benzer olduğu belirlenmiştir (4). Bir başka çalışmada buzul kayıtları ile belirlenen Dansgaard-Oeschger, Younger Dryas, Heinrich gibi küresel ölçekte etkili ısınma ve soğuma olaylarının İsrail'de bulunan Soreq Mağarası (5) ve Umman'da bulunan Qunf Mağarası (6) dikit kayıtlarında da izlendiği görülmüştür (Şekil 6). Benzer şekilde Hulu (7) ve Dongge (8) Mağaralarında izlenen Younger Dryas soğuma periyodunun izleri Türkiye'de Sofular Mağarası (Zonguldak) (9) dikit örneklerinde de gözlenmektedir. Daha yakın zaman diliminde ise güncel küresel



Şekil 6: Soreq Mağarası (İsrail) dikit kayıtlarında gözlenen (A) $\delta^{18}\text{O}$ ve (B) $\delta^{13}\text{C}$ izotop verileri günümüzden önce yaklaşık 20 bin yıllık (20 Ky) zaman periyodunda artma (Son Buzul Maksimumu-LGM) ve azalma (Younger Dryas-YD ve Holosen soğuma olayı) davranışı göstererek iklimsel olarak koşulların değiştiğini ifade etmektedir (11).

iklimin Holosen'den (~12 bin yıl) itibaren yaşanmaya başlandığı, Son Buzul Maksimumu (Günümüzden 20 bin yıl öncesi) olarak tanımlanan dönemden sonra iklim karakteristiklerinin Asya'da, Atlantik'te, Akdeniz havzasında, kutuplarda ve Dünya'nın birçok farklı yerinde değişiklik göstermeye başladığı belirlenmiştir. Mağara çökellerinden elde edilen geçmiş iklim verileri, kuzey Atlantik'te yaşanan serin koşulların Asya'daki kurak döneme eşlik etmesi gibi birbirinden uzak bölgelerdeki iklimin zıt yönlü etkileşimi konusunda da bilgi verebilmektedir (10).

Sonuç olarak, geçmiş iklimsel değişiklikler (paleoiklim) ile ilgili kayıtlar ve kanıtlar farklı kaynaklardan elde edilebilmekte, bu bilgiler yeryüzünde geçmiş iklim koşullarının yeniden kurgulanmasına yardımcı olmaktadır. Bu noktada kimyasal mağara çökellerinden elde edilen yüksek yaşlandırma hassaslığına sahip verilerin, diğer verilere göre büyük bir üstünlüğe ve öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Değınilen Belgeler

- (1) Roberts, N., 2014. The Holocene: An Environmental History, 3rd eds., Wiley Blackwell Publishing, 364 p.
- (2) Fairchild, I.J., Baker, A., 2012. Speleothem Science: From Process to Past Environments, Wiley Blackwell Publishing, 432 p.
- (3) Ford, D., Williams, P., 2007. Karst and Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley and Sons Ltd., England, 562 p.
- (4) Fairchild, I.J., Frisia, S., Borsato, A., Tooth, A.F., 2006. Chapter 7 Speleothems, Geochemical Sediments and Landscapes, Nash, D.J., and McLaren, S.J. (eds), Blackwell Publishing, 488 p.
- (5) Bar Matthews, M., Ayalon, A., Kaufman, A., 1997. Late Quaternary paleoclimate in the eastern Mediterranean region from stable isotope analysis of speleothems at Soreq cave, Israel, Quaternary Research, 47, 155-168.
- (6) Fleitmann, D., Burns, S.J., Mangini, A., Mudelsee, M., Kramers, J., Villa, I., Neff, U., Al-Subbary, A.A., Buettner, A., Hippler, D., Matter, A., 2007. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra), Quaternary Science Reviews 26, 170-188.
- (7) Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C-C., Dorale, J.A., 2001. A high resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China, Science 294, 2345-2348.
- (8) Dykoski, C.A., Edwards, R.L., Cheng, H., Yuan, D., Cai, Y., Zhang, M., Lin, Y., Qing, J., An, Z., Revenaugh, J., 2005. A high resolution absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China, Earth and Planetary Science Letters 233, 71-86.
- (9) Göktürk, O.M., 2011. Climate in the Eastern Mediterranean through the Holocene inferred from Turkish stalagmites, PhD Thesis, Faculty of Science of the University of Bern, Institute of Geological Sciences and Oeschger Centre for Climate Change Research, Switzerland, 113 p.
- (10) Henderson, G.M., 2006 . Caving in to New Chronologies, Science 313, 620-622.
- (11) Bar Matthews, M., Ayalon, A., Kaufman, A., Wasserburg, G.J., 1999. The eastern Mediterranean paleoclimate as a reflection of regional events: Soreq cave, Israel, Earth and Planetary Science Letters 166, 85-95.