

Uranyum serisi ile yaş saptama yöntemlerinin hidrojeolojide kullanım olanakları

Mehmet Ekmekçi, H.Ü., Jeoloji Müh. Böl. Beytepe, Ankara

Kuvaterner yaşlı karasal ortamlarda çöken litolojik malzemelerin yanal ve düşey devamlılıklarının az olması, bu tür ortamlarda, klasik litostratigrafik yöntemlerle yapılan denestirme çalışmalarının, özellikle, bölgesel araştırmalar söz konusu olduğunda, güvenilir sonuç vermesini engellemektedir. Kuvaterner dönemini çalışan yerbilimciler, bu sorunu, belli bir döneme ait fauna ve flora örneklerinden yararlanarak aşmaya çalışmışlardır. Ancak, biyolojik evrimin çok yavaş olması, bu yöntemlerle 1 milyon yıldan daha genç yaşların belirlenebilmesine olanak vermemektedir. Kaldı ki, benzer paleoiklimsel koşullarda aynı toplulukların, farklı dönemlerde ortaya çıkması da olasıdır. Bu durum da, sağlıklı yaş verme ve denestirme olanağını kısıtlamaktadır. Kuvaterner jeolojisinde olduğu kadar, arkeometri, jeomorfoloji, jeotermal sistemler, jeokimyasal araştırmalar ve karst evriminin belirlenmesinde de kullanım potansiyeli yüksek olan Uranyum Serisi Yaş Saptama Teknikleri, bu tür sorunlara sayısal, güvenilir ve hassas çözümler getirmektedir.

Öte yandan, hidrolojik bir havzanın hidro-dinamik yapısının ortaya konması, karst hidrojeolojisi incelemelerinde öngörülen ana amaçların başında gelmektedir. Sistemin hidro-dinamik yapısı, karstlaşmanın zaman içinde üç boyuttaki gelişmesine bağlıdır. Söz konusu gelişme, karstlaşmayı etkileyen koşullara (iklimsel, kimyasal, stratigrafik, yapısal vb.) bağlı olarak hızlanır, yavaşlar veya durur. Çözünme ve çökmenin jeolojik zaman cetvelinde kısa sürelerde meydana gelmesi ve bu tür çökellerin aralarında düzenli, sürekli ve

yaygın litostratigrafik bir ilişki bulunmayışı, özellikle bölgesel anlamda yapılacak denestirme, değerlendirme ve yorumun sağlıklı ve hatalı olmasına neden olmaktadır. Bu tür sorunlar, Kuvaterner dönemi için, büyük oranda Uranyum Serisi ile Yaş Saptama Teknikleri ile çözülebilmektedir. Sunulan çalışmada, yaş saptama tekniklerinin temel ilkeleri verildikten sonra bu tekniklerden özellikle karst hidrojeolojisinde yararlanma olanakları konusu tartışılmıştır.

Giriş

Uranyum Serisi (U - Serisi) ile Yaş Saptama Yöntemleri, 1 milyon yıl yaşına kadar olan çok çeşitli jeolojik malzemelere uygulanabildiklerinden, özellikle Kuvaterner jeolojisi çalışmaları açısından büyük önem taşımaktadırlar. Ivanovic ve Harmon (1992)'nin bildirdiğine göre, ilk uygulamalar, Joly (1908)'in derin denizel çökellerin radyum (Ra) içeriğinin, sığ denizel çökellerinden yüksek olduğu yolundaki gözlemleriyle başlamıştır. Daha sonraları, Piggot ve Uray (1942) Ra fazlasının, yine yüksek oranda bulunan 230Th (toryum)'dan kaynaklandığını ortaya koymuşlardır. II. Dünya Savaşı'ndan sonra radyoaktivitenin daha sağlıklı ve hassas bir şekilde saptanabilmesini sağlayan tekniklerin geliştirilmesi derin deniz çökellerinin kronolojilerinin oluşturulmasını sağlamıştır. U - Serisi ile Yaş Saptama Tekniklerini, karasal karbonatlı çökellere (mağara çökelleri ve travertenler) ilk olarak Rosholt ve Antal (1962) uygulamışlardır (Ivanovic and Harmon, 1992).

Özellikle Kuvaterner jeolojisi, jeokimyasal ve jeotermal prospeksiyon, paleoiklimsel yorumlamalar ve jeomorfolojik evrim gibi çalışmalara sayısal veriler sağlayan bu tekniklerin karstlaşma evriminin ortaya konmasına yönelik olarak önemli bir kullanım alanı bu-

lunmaktadır. Karst hidrojeolojisi incelemelerinin ülkemiz için önemi, Türkiye'nin yüzölçümünün yaklaşık üçtebirinin karstlaşabilen karbonatlı kayalarla kaplı olmasından kaynaklanmaktadır. Karmaşık bir hidrodinamik yapı sunan karstik alanlarda bulunan yeraltısuyu araştırmaları, klasik yöntemler dışında, özel bazı yöntem ve teknikler gerektirmektedir. Türkiye'de bu tür alanlarda bulunan yeraltısuyu potansiyelinin önemli bir bölümünden halen yararlanılamamaktadır. Bugün sayısal olarak ortaya konamayan birçok parametre arasında karstlaşma evrimine ilişkin parametrelerin de bulunması, yeraltısuyu akımının meydana geldiği yolların sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesini engellemektedir. Bu amaçla yapılan speleoloji çalışmalarına büyük katkılar sağlayacak olan Uranyum Serisi Yaş Saptama Tekniklerini uygulama çalışmaları, bu alanda büyük bir eksikliği tamamlamış olacaktır. Sayısal sonuçlar veren Uranyum Serisi Yaş Saptama Teknikleri, Kuvaterner yaşlı malzemelerde kronostratigrafi, paleoklimsel yorum ve deniz seviyesindeki alçalma - yükselmelerin belirlenmesi, buradan giderek karstlaşma evrimi ve sistem (akiferin) hidrodinamiğinin ortaya konmasında büyük yararlar sağlayacaktır.

Kuvaterner dönemi yaş saptama yöntemleri

Colma et. al (1987) ve Smart and Frances (1991) Kuvaterner dönemi yaş saptama yöntemlerini, kullandıkları teknik ve verdikleri sonuçlara bağlı olarak iki tür sınıflama önermişlerdir (Çizelge 1).

1- Sayısal Yöntemler: Bu tür yöntemler, belli bir hata payı ile salt (absolüt) yaş verirler. Yöntemde yaş, belli bir ölçek kullanılarak sayısal olarak verilmektedir. Radyokarbon ve diğer izotopların kullanıldığı yöntemler bu gruba girerler.

2- Kalibrasyon Yöntemleri: Herhangi bir parametrenin zaman içerisinde sistematik olarak meydana gelen değişimlerinin ölçüldüğü yöntemlerdir. Ancak, burada değişimin ölçülmesinde kullanılan ölçüt yine başka (ve çoğu durumda bilinmeyen) bir değişkendir. Bu nedenle, bağımsız bir kronolojik parametre ile kalibrasyon yapılmaktadır. Yapılış tarihi bilinen mezar taşları, duvarlar ve binalar üzerinde likenometri ve radyokarbonlu morrenler kalibrasyon için kullanılabilirler.

3- Bağlı Yöntemler: Adından da anlaşıldığı gibi, bağlı yaşlar veren bir grup yöntemlerden ancak, yaklaşık büyüklükler elde edilebilmektedir. Bağlı yaşı gösteren bu büyüklükler, bağımsız kronoloji bir parametre bulunduğu takdirde kalibrasyon yöntemlerinin verdiği yaşa dönüştürülebilirler. Aminoasit teknikleri bu yöntemlere örnek oluştururlar. Bu tekniklerde hesaplaması

güç olan parametre, epimerizasyon hızıdır. Çünkü, epimerizasyon hızı büyük ölçüde geçmişte hüküm süren iklim koşullarına bağlıdır.

4- Korelasyon Yöntemleri: Bu yöntemler sadece, herhangi bir olaya eşdeğerlik kanıtları sağlarlar. Derin deniz karotlarından elde edilen foraminiferlerdeki ^{18}O içeriği buna bir örnektir.

Bunların dışında, temel ilkeler, kabul edilen varsayımlar, kullanılan teknikler ve uygulama alanlarına göre altı grup yöntem belirlenmiştir (Çizelge 1). Herhangi bir çalışmada kullanılacak yöntem, yaş verilecek malzemenin türüne, incelenen zaman aralığına ve sonuçta istenen duyarlılığa bağlı olarak seçilmelidir. Eldeki laboratuvar olanakları da yöntem seçiminde önemli parametrelerden birini oluşturmaktadır. Uygulanacak yöntemde izlenen fiziksel ve kimyasal süreçlere bağlı olarak ancak belli yöntemlerle belirli jeolojik malzemelere yaş verilebilmektedir (Çizelge 2). Öte yandan her yöntemin etkin olduğu bir minimum ve maksimum yaş sınırı bulunmaktadır. Çizelge 3'te çeşitli yöntemlerin etkin olarak kullanılabildiği yaş aralığı verilmiştir.

U - serisi ile yaş saptama tekniklerinin temel ilkeleri

Dinamik Denge Kavramı

Kütle Spektrometrisinin gelişmesine bağlı olarak, ilk yıllarda yaş saptamada uranyum serisinin ancak yarılanma ömrü ($T_{1/2}$) uzun olan izotopları (^{238}U , ^{235}U ve ^{232}Th) (Şekil 1) kullanılabiliyordu. Yarılanma ömürlerinin çok uzun olması ise bu tekniğin bir milyon yıldan daha yaşlı örneklerle uygulanabilmesini sağlamıştır. Spektrometrik tekniklerin gelişmesi, son 35 yılda, yarılanma ömürleri daha kısa olan U - serisi izotoplarının yaş saptamada kullanılabilmemesine olanak sağlamıştır.

U - Serisi yardımıyla yaş saptama teknikleri, uranyumun ve radyoaktif bozunma sonucunda oluşan ürünlerinin aktivitelerinin ölçülmesine dayanmaktadır. Birkaç milyon yıl boyunca her türlü fiziksel, kimyasal, jeolojik vb. olaya kapalı bir durumda kalmış olan ve uranyum içeren herhangi bir doğal malzemede, bozunmaya uğrayan izotop ile bu izotopun bozunması sonucunda oluşan ürünler arasında dinamik bir denge oluşmaktadır. Radyoaktif bozunma zincirini oluşturan izotoplardan birinin ortamdan uzaklaştırılması veya ortama katılması, sözkonusu dinamik dengeyi bozar. İşte bu şekilde oluşan denge bozulması uranyum serisi yaş saptama tekniklerinin temelini oluşturmaktadır.

Uranyumun doğal olarak oluşan iki bozunma serisi vardır. Bozunma serilerinin ana izotopları ^{238}U ve ^{235}U olup her iki izotopun da yarılanma ömrü çok uzundur

Çizelge 1. Kuvaterner Dönemi Yaş Saptama Yöntemleri (Smart and Frances, 1991'den).

Sonuç Türü*					
===== Sayısal =====					
----- Kalibrasyon -----					
----- Bağlı -----					
----- Korelasyon -----					
Yöntem					
Takvimsel	İzotopsal	Radyojenik	Kimyasal ve Biyolojik	Jeomorfik	Korelasyon
Tarihsel kayıtlar	¹⁴ C	Yarılma - İzi	Aminoasit epimerizasyon	Toprak profili gelişimi	Litostratigrafi
Dendro-kronoloji	K-Ar ve ³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar	Luminisans	Obsidiyen ve tefra hidrasyon	Kayaç ve mineral ayrışması	Tefrokronoloji
Lamina-kronolojisi	Uranyum serisi	Elektron-spin rezonans	Likenometri	Yeryüzü yapısı değişimleri	Paleomagmetizma
	Uranyum-trend		Toprak kimyası	Çökelme hızı	Fosiller ve tarihi eserler
	Kozmojenik izotoplar (²¹⁰ Pb, ¹⁰ Be, ³⁶ Cl, vb.)		Kayaç cila kimyası	Deformasyon oranı	Duraylı izotoplar
				Jeomorfik konum	Yörüngesel değişimler Tektit ve mikrotektitler

*Kesikli çift çizgilerin arasındaki sonuç türü, çizgilerin uzandığı kesimin altında kalan yöntemlerden genellikle elde edilen sonuç türünü göstermektedir. Kesikli tek çizgiler arasındaki sonuç türü, çizgilerin altında kalan yöntemlerden ancak belli durumlarda elde edilebilecek sonuç türüdür.

(Şekil 1). ²³⁶U izotopu, yarılanma ömrünün görece olarak kısa oluşu (2.4×10^7 yıl) nedeniyle, artık doğada bulunmamaktadır. Fakat bozunma ürünü olan ²³²Th, 1.39×10^{10} yıllık bir yarılanma ömrüne sahiptir. Bu nedenle doğada yaygın olarak bulunur. ²³²Th izotopunun bozunması sonucunda oluşan ürünler Şekil 1'de gösterilmiştir. ²³⁸U izotopunun α - taneciği yayarak bozunması sonucu oluşan ²³⁴U izotopu, görece olarak daha kısa yarılanma ömrü nedeniyle (2.48×10^5 yıl) doğada görece olarak az bulunan uranyum izotoplarındadır.

Bununla birlikte, Şekil 1'den de görüldüğü gibi bozunmaya uğrayan ana izotoplar (başka bir değişle seri başındaki izotoplar), bozunma sonucu oluşan izotoplardan çok daha uzun yarılanma ömürlerine sahiptirler. Bu durum, seri başı izotopunun atom sayısının, bozunma

ürünü izotopun birkaç kat yarı ömrü kadar bir süre boyunca sabit kalması anlamına gelmektedir. Bozunma ürünü izotopun aktivitesi, kendi bozunma katsayısına bağlı olup üstel bir fonksiyona uygun bir şekilde artar. Sözkonusu artış

$$N_2 \lambda_2 = N_1 \lambda_1 (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

eşitliği ile ifade edilmektedir (Smart and Frances, 1991).

Eşitlikte

N_1 = bozunan atomların sayısı

λ_1 = bozunun izotopun (birincil izotop) bozunma katsayısı

N_2 = bozunma ürünü atomların sayısı

Çizelge 2. Yaş Saptama Yöntemleri ve uygulanabildikleri jeolojik malzemeler. Yöntemin güvenilirliği dörtgenin kapalılık oranı ile artmaktadır. Soru işaretleri yöntemin uygulanabilirliği konusunda yeterli bilgi bulunmadığını göstermektedir. Çizgi ise yöntemin uygulanamadığı malzemeleri göstermektedir (Smart and Frances, 1991).

	Deniz Karotları	Mercan	Volkanik	Sediman	Tufa	Mağara Çökeli	Kabuk	Kemik	Diş	Odun ve bitki kalıntısı
Radyokarbon			—	—						
Potasyum-Argon		—		—	—	—	—	—	—	—
Uranyum Serisi										
Helyum-Uranyum	—		????	—	—	????	—	—	—	—
Luminisans					????		—	—	—	—
Electron spin Rezonans										—
Yarılma İzi	—	—		—	—	—	—	—	—	—
Amino Asit	—	????	—	—	—	—				—
Paleo-magnetizma		—			—		—	—	—	—
Yörünge Ayarı		—	—	—	—	—	—	—	—	—

Çizelge 3. Çeşitli yaş saptama tekniklerinin etkin oldukları yaş aralığı (α = alfa spektrometresi ile analiz, MS = kütle spektrometresi ile analiz). Parantez içindeki rakamlar, belirli uygun koşullarda erişilebilen eşiği göstermektedir (Smart and Frances, 1991).

Yöntem	Yaş Aralığı (x 1000 yıl)
Radyokarbon	0.3 - 45
Potasyum - Argon	(1) 30 -> 20 000
Uranyum Serisi	$^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ (α) 100 - 1 500
	$^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ (α) 3 - 350
	$^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ (MS) 0.05 - 500
	$^{231}\text{Pa} / ^{235}\text{U}$ (α) 5 - 150
Helyum - Uranyum	100 -> 2 000?
Uranyum trend	10 - 1 000?
Termoluminisans	0.1 - 100 (500)
Elektron spin rezonans	(1) 5 - 900
Fizyon - İzi	(0.1) 50 -> 2 000
Paleomagnetizma	0.05 -> 2 000
Yörüngesel ayar	1 -> 2 000

Çizelge 4. Uranyum ve Toryumun Kaynakları ve Bulunma Bollukları (Ivanovich and Harmon, 1992).

Kayaç Türü	Adı	U(ppm)	Th(ppm)	Th/U
Magmatik	granit	2.2-6.1	8-33	3.5-6.3
	granodiyorit			
	riyolit			
	dasit	0.8	3.8	4.3
	gabro	0.1-1	0.2-5	1-5
	bazalt	<0.015	<0.05	değişken
Metamorfik	ultramafik			
	eklojit	0.3-3	0.2-0.5	2-4.3
	granolit	4.9	21	4.3
	gnays	2.0	5-27	1-30
	şist	2.5	7.5-19	≥3
	fillit	1.9	5.5	2.9
Sedimanter	sleyt	2.7	7.5	2.8
	ortokuvarsit	0.45-3.2	1.5-9	1.6-3.8
	grovak	0.5-0.2	1-7	~2
	şeyl: gri - yeşil	2-4	10-13	2.7-7
	kırmızı-sarı	2-4	10-13	2.7-7
	siyah	3-1250	-	düşük
	boksit	11.4	49	~5
	kireçtaşı	~2	0-2.4	<1
	dolomit	0.03-2	-	-
	fosfat	50-300	1-5	<0.1
	evaporit	<0.1	<1	-
	mağara çökeli	<0.03-100	0-10	-
	yaşayan mollusk	<0.01-0.5	düşük	-
	fosil mollusk	0.5-8	düşük	-
	mercan	2-4	düşük	-
	manganez			
	nodülleri	2-8	10-130	~7
	denizel kumlar ve	0.7-4		
	killer	1-12	1-30	0.4-10
	turba	<50-80	1-5	<1
	linyit	<10	-	-
	kömür	<6000	-	-
	asfalt	10-3760	-	-
	petrol	4-77	-	-

elementlerin yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında hareket edebilme (göçebilme) yetilerinin artışı ile açıklanmıştır.

Uranyum, özellikle linyit, kömür gibi hümit maddelerden oluşan organik çökellerde büyük miktarlarda bulunmaktadır. Hümit maddeler, sudaki (çözeltilerdeki) U ve Th'u tutabilme (absorbe) yetileri nedeniyle bu tür çalışmalarda büyük önem taşımaktadırlar. Hümit maddelerin uranyumu uranil olarak iyon - değişimi ile tutması veya doğrudan doğruya adsorplaması genellikle

bitkinin ölümünden sonra meydana gelen olaylar olarak bilinmektedir. Bununla birlikte, planktonlar ve tatlı - su alglerinin de bulundukları sulu ortamdan 10^3 - 10^6 kat fazla uranyum içerebildikleri gösterilmiştir (Mann and Fyfe, 1985).

Deniz suyunda 3.3 ppb oranında uranyum bulunurken, tatlı suların uranyum içerikleri uranyum içeren kayaç veya malzeme ile temas sürelerine, bu kayaçların veya malzemelerin uranyum içeriklerine, buharlaşma oranına ve uranyumun çözeltiye geçmesini sağlayan iyonların varlığına bağlıdır.

Yüzeysel sularda genellikle 0.01 - 5 ppb olan uranyum derişimi yeraltısularında 0.1 ile 50 ppb arasında değişir. Ancak, yeraltısuları için bu oranın 2000 ppb'ye yükelebildiği de belirtilmektedir. Yeraltısularındaki bu geniş aralıktaki değişimin akım yolu boyunca uranyumun çökmesine neden olabilen Eh - pH koşullarına bağlı olduğunu açılamlışlardır. Buna karşın Th'un doğal sulardaki miktarı yok denecek kadar azdır (Ivanovich and Harmon, 1992).

U ve Th'un jeokimyasal özellikleri

Uranyum ve toryum yükleri +4 iken, yüzeeye yakın ortamlarda ve düşük sıcaklıklarda kimyasal olarak hemen hemen durağandırırlar. Ancak, uranyum yükseltile-nerek U⁺⁶ haline geldiğinde ortam değiştirebilmektedir. Bu durumu Langmuir (1978), aşağıdaki tepkime ile ifa-de etmiştir.



Buradaki UO₂⁺², uranil iyonu olarak adlandırılmak-tadır. Karbonatlı kayalılarda bulunan uranyum, genellik-le uranil iyonu şeklinde-dir. Uranil iyonunun doğal su-lardaki çözünlürlüğü yüksek olup, karbonat ve fosfatlarla anyon kompleksleri oluşturmaktadır. Buna karşın toryum, kil mineralleri, hidroksitler veya başka katı madde yüzeyleince tutulur (adsorplanır). Uranil içeren çözeltiden itibaren, biyogenik veya kimyasal ola-rak çökme meydana geldiğinde, uranyum da kristal yapısına girer. Çözeltide toryum bulunmadığından, bu çökelerde de toryum bulunmaz. Bu durum, yeni çökelen malzemede ²³⁴U izotopunun bol miktarda, buna karşın bu izotopun bozunma ürün olan ²³⁰Th izotopunun hiç bulunmaması anlamına gelmektedir. Çökelden itibaren zaman geçtikçe ²³⁰Th / ²³⁴U oranı artar ve sonunda dinamik dengeye ulaşılır.

Uranyum ve toryumun jeokimyasal çevriminde et-ken olan indirgenme - yükseltgenme ortamları, yeraltı-suyunun tuzluluğu, organik madde varlığı, taşınma or-tamları (kolloid, gaz, sediman vb.) inorganik - biyogenik çökme, tutulma (adsorplanma), sedimantasyon, diya-jenez gibi olaylar bu çalışmanın amacına bağlı olarak burada incelenmemiştir. Bu tür bilgiler Goldschmidt (1954), Yılmaz (1988) ve Ivanovich and Harmon (1992)'de bulunabilir.

Uranyum serisi ile yaş saptama yöntemleri

U - Serisi ile yaş saptama, kullanılan izotoplara bağ-lı olarak çok sayıda yöntemle gerçekleştirilebilmek-te-dir. Ancak, kullanılan izotoplar ne olursa olsun, bütün yöntemler dayandıkları temel ilkeye göre ikiye ayrılı-rlar; ortamda ikincil (bozunma ürünü) izotopun denge durumundan *eksik* miktarlarda bulunmasına dayanan

yöntemler ve ikincil izotopun *fazla* miktarlarda bulun-masına dayanan yöntemler. İkincil izotopun *eksik* olu-şuna dayanan yöntemlerde, çökme sırasında ortamda sadece birincil izotopun varolduğu, zamanla birincil izo-topun bozunması ile ikincil izotopun oluştuğu varsayı-mı geçerlidir. Radyoaktif bozunma özellikleri bilinen bu izotoplar arasındaki oran, çökmenin bugünden ne kadar zaman önce meydana geldiğini göstermektedir. Karbonatlı çökellerin yaşlarının saptanmasında kulla-nılan ²³⁰Th / ²³⁴U ve ²³¹Pa / ²³⁵U bu tür yöntemlere örnek olarak verilebilir.

İkincil izotop fazlalığına dayanan yöntemlerde ise, ikincil izotop, başlangıçta, birincil izotoptan daha bü-yük miktarlarda bulunmaktadıdır. Malzemenin yaşı, çö-kelme anından itibaren, bu fazlalıktan meydana gelen bozunmanın ölçülmesi ile saptanmaktadır. Derin deniz çökellerinin yaşlarının saptanmasında kullanılan ²³⁰Th ve ²³¹Pa fazlalığına dayanan yöntemler bu gruba gir-mektedirler.

Karbonatlı çökellerin yaşlarının saptanmasında en yaygın olarak kullanılan yöntem Çizelge 2'den de görüldüğü gibi ²³Th / ²³⁴U yöntemidir. Bu nedenle, U - Serisi yaş saptama yöntemlerinin, karst hidrojeolojisindeki uygulamaları açısından incelendiğı bu çalışmada, ²³⁰Th / ²³⁴U yöntemi ele alınmıştır.

²³⁰Th / ²³⁴U Yöntemi

Mağara çökelleri, traverten, kaliçi, mollusk, mercan, kemik, diş, gölşel çökeller, evaporit, fosforit ve turba gibi çok çeşitli malzemelerin yaşlarının saptanmasında kullanılan ²³⁰Th / ²³⁴U yöntemi, U - serisi yöntemleri arasında en yararlı olanı olarak görülmektedir. Bu yön-temin mağara çökellerinde geçerli sonuçları verdiğini ilk olarak Thompson (1973) göstermiştir (Ivanovich and Harmon, 1992). Thompson, Virginia'daki bir mağa-radan aldığı bir dikit örneğinde 137 ile 35 bin yıl (bin yıl = ky) arasında değişen sekiz ayrı yaş bulmuştur. Bulduğı bütün bu yaşların stratigrafik dizilimle uyum-lu olduğunu göstermiştir. Harmon (1975) (Smart and Frances, 1991'de) ise ²³⁰Th / ²³⁴U yöntemini Kuzey Amerika'da, paleoiklimsel çalışmalarda kullanılmış-tır.

Bu yöntem, alfa spektrometresi ile 350.000 yıl (350 ky), kütle spektrometresi ile 500 ky önce oluşmuş çö-keller için güvenilir sonuçlar vermektedir (Ivanovich and Harmon, 1992). Yöntem, ²³⁴U izotopu ile bu izoto-pun kaynağı olan ²³⁸U ve ürünü ²³⁰Th arasındaki denge-sizlikten yararlanarak, çökelin yaşının saptanmasına olanak sağlamaktadır. ²³⁸U izotopunun radyoaktif bo-zunmasından kaynaklanan ikincil ve üçüncül izotoplar sırasıyla ²³⁴Th ve ²³⁴Pa, çok kısa yarılanma ömürlerine sahip olduklarından (şekil 1), bu yöntemde bu izotoplar dikkate alınmamaktadırlar.

^{234}U ile ^{238}U arasındaki dengesizliğin yanı sıra ^{234}U izotopu radyoaktif bozunmaya uğradıkça $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ oranı çok düşük oranda da olsa artmaktadır. Şekil 2'de verilen ve $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ ile $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ oranları arasındaki ilişkiyi zamana bağlı olarak gösteren eşyaş eğrilerinde (isochron) bu artış görülebilmektedir. Şekilde gösterilen eşyaş eğrileri, başlangıç $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ oranları farklı, ancak $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ başlangıç oranı sıfır olan kapalı bir sistem için oluşturulmuşlardır (Smart and Frances, 1991).

Eşyaş eğrilerinin matematiksel ifadesi;

$$^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U} = [(1 - e^{-\lambda_{230}t}) / (^{234}\text{U} / ^{238}\text{U})] + [1 - (1 / ^{234}\text{U} / ^{238}\text{U})] [\lambda_{230} / \lambda_{230} - \lambda_{234}] [1 - e^{-(\lambda_{230} - \lambda_{234})t}]$$

şeklindedir.

$^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ ve $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ oranları belli olan bir örnek için bu denklem iteratif yöntemlerle çözülebilir.

$^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ Yöntemi'ndeki varsayımlar ve kısıtlar

Yöntem, çökelme sırasında kristal yapısında ^{232}Th izotopu bulunmadığı varsayımına dayanmaktadır. ^{230}Th izotopunun büyük bir kısmı, ^{232}Th izotopu çok uzun yarılanma ömrüne sahip olduğundan yerli olmayan (veya sedimanlarla gelmiş) toryum katkısı (toryum kirlenmesi) çeşitli yöntemlerle belirlenebilmektedir. Kırıntılı malzemelerden itibaren uranyum katkısı da söz konusu olabilir. Bu nedenlerden dolayı kırıntılı malzeme içeren kayaç veya malzemelerin yaşlarının bu yöntemle saptanması amacıyla örnek olarak seçilmemeleri gerekir (Çizelge 5).

Yöntemin dayandığı bir başka varsayım, çökelme sona erdikten sonra, ortamın uranyum ve toryum göçüne (giriş - çıkışına) kapalı olduğudur. Bu durum, aynı yaştaki örneklerde $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ oranı (>1) ile $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ arasında pozitif bir korelasyonun varlığı ile belirlenebilir. Ayrıca, örnek yaşları $^{231}\text{Pa} / ^{235}\text{U}$ yöntemi ile elde edilen yaşlarla uyumlu değilse, sistem kapalı değildir demektir. Sistemin kapalı olmadığı, fiziksel olarak, örneğin dış görünüşünden de belirlenebilmektedir. Yeniden kristallenme, çözünme, ikincil çökelme veya yüksek gözeneklilik açık sistemin kanıtlarıdır. Bu tür örneklerden kaçınmak gerekir.

$^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ ve $^{230}\text{Th} / ^{232}\text{Th}$ aktivite oranlarının ölçülmesi

Uranyum serisi izotoplarının aktivitelerinin ölçülmesinde kullanılan en yaygın yöntem alfa - spektroskopisidir. $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ birbirlerine çok yakın enerji düzeylerinde alfa (K) parçacığı yayarlar. Bu nedenle analizden önce Th ve U izotoplarının kimyasal yollarla birbirlerinden ayrılması gerekmektedir. Bu izotoplar, kimyasal özellikleri farklı olduğundan dolayı çözeltiden farklı oranlarda alınabilmektedirler. Kimyasal yollarla

çözeltiden Th ve U izotoplarının ne kadar etkin bir şekilde alınabildikleri (kimyasal verim) ayırma işleminin önce çözeltiye, örnekte bulunmayan Th ve U izotoplarından belli bir derişimde izleyici (spike) eklenerek belirlenebilmektedir.

Ayırma işlemi yapıldıktan sonra K - spektrometresinde izleyici izotopların derişimlerinden yola çıkarak örnekteki Th ve U izotoplarının kimyasal verimleri hesaplanabilmektedir.

İzleyici olarak kullanılacak izotopların alfa enerjileri, örnekte bulunan ve analiz edilecek olan izotoplarından tamamen farklı olmalıdır. İzotoplar arasında ayırılma oluşmamalıdır. Karbonatlı kayaçlar için kullanılan izleyici ^{229}Th ve ^{236}U 'dur. Sayımdan gelecek hatanın %1 dolayında tutulabilmesi için spektrometrede en az 10^4 sayım yapılmalıdır. Bunun için gereken zaman, kaynağın (örnekteki U ve Th) aktivitesine bağlıdır. Elde edilen piklerin altında kalan alan izotopun aktivitesini vermektedir.

U ve Th derişimlerinin hesaplanması

W (g) ağırlığındaki bir örnekteki uranyum ve toryum izotoplarının derişimleri ppm olarak aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$[^{238}\text{U}] = (^{238}\text{U}) \cdot ^{236}\text{W}_s[^{236}\text{U}]_s / 0.747 \text{ W}(^{236}\text{U}) \text{ ve } [^{232}\text{Th}] = (^{232}\text{Th}) \cdot ^{229}\text{W}_s[^{229}\text{Th}]_s / 0.246 \text{ W}(^{229}\text{Th})$$

Burada W_s çözeltiye eklenen izleyici ağırlığı; [] ise derişimi göstermektedir. (), spektrometrede okunan piklerin altında kalan alanı belirtmektedir. Aktivite oranları $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ ve $^{229}\text{Th} / ^{236}\text{U}$ okumalarından doğrudan elde edilebilmektedir. Ancak, $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ aktivite oranı, farklı spektrumlardan elde edildiği için aşağıdaki şekilde düzeltilmelidir.

$$[^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}]_{\text{gerçek}} = (^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U})_m \cdot (^{236}\text{U} / ^{229}\text{Th})_m \cdot \{ ^{229}\text{W}_s[^{229}\text{Th}]_s / ^{236}\text{W}_s[^{236}\text{U}]_s \}$$
 burada m, ölçülen izotop aktivitesini göstermektedir.

$^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ yaşının belirlenmesi

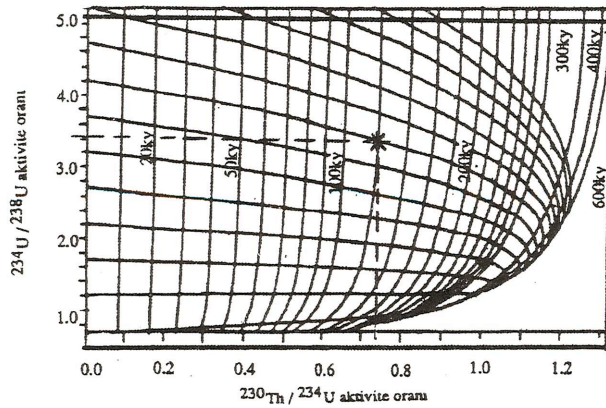
Düzeltilmiş $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ ve $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ aktivite oranları belli olan bir örnek için yukarıda verilen denklem kullanılarak yaş saptanabilmektedir. Yaş saptama, grafiksel veya sayısal yöntemlerle yapılabilmektedir. Grafiksel yöntemde kullanılan diyagram Şekil 2'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi eşyaş eğrilerinin eğimleri yaş arttıkça düşmektedir. 50 ky'dan genç örnekler için eşyaş eğrileri hemen hemen dik olup genç örnekler için $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ aktivite oranının etkisi çok düşüktür. Yaşlar, eşyaş eğrileri arasında enterpolasyon ile saptanabilmektedir. Sayısal yöntem ise iterasyon tekniğine dayanmaktadır. İterasyonun Newton - Raphson'a göre yapıldığı UTAGE - 3 programı Thompson (1973) tarafından yeniden düzenlenip düzeltilmiştir. Program

'background' hesaplamalarına dayanarak düzeltme yapmakta, doğal kirlenmeyi, ikincil izotopların uranyum - toryum ayırımından sonraki bozunma sonucunda oluşan miktarlarını ve kimyasal verimi de dikkate almaktadır. Program listesi Ivanovich and Harmon (1992)'de verilmiştir.

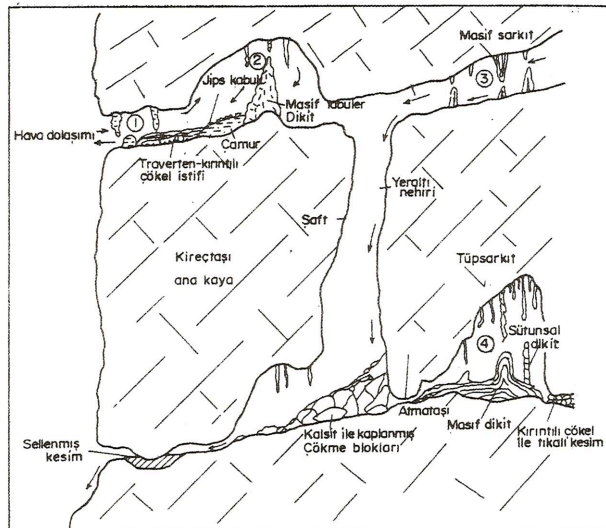
Hidrojeolojide kullanım olanakları

Mağaraların oluşum yaşlarının saptanması

Mağara çökellerinden en yaygın olanları sarkıtlar, diktler ve akma - taşlarıdır. Bu çökeller, genellikle kalsit, bazen de aragonitten oluşmaktadır. Karbonatlı mağara çökelleri, yeraltısularının mağaralara ulaştıkları anda CaCO_3 'ca doymun hale gelmeleriyle çökelmeye başlamaktadırlar. Çökeltme ya topraktan kaynaklanan CO_2 'in, mağara atmosferi ile dengeye gelmesi için kaybolması (uçması) ve/veya yeraltısuyunun buharlaşması sonucunda oluşmaktadır. Buharlaşma genellikle görel



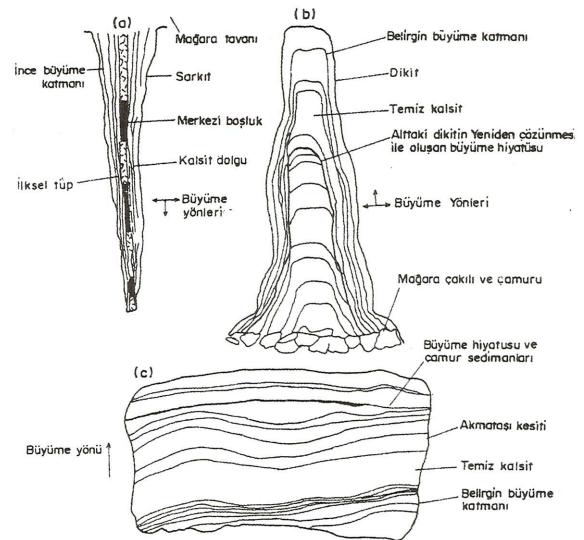
Şekil 2. Grafiksel Yöntem ile Yaş Saptama Örneği.



Şekil 3. Bir Mağaranın Genel Kesiti ve Oluşan Mağara Çökelleri (Ivanovich and Harmon, 1992'den).

nem oranının düşük olduğu ortamlarda görülmektedir. CO_2 gazı uçuşu ile oluşan çökellerde büyüme yavaştır. Bu tür çökeller sıvı kapanımlar da içerdiklerinden, hem kalsitten hem de bu sıvı kapanımlarındaki duraylı izotop içeriklerinden yararlanılarak paleoklimsel yorumlamalarda kullanılabilirler. Şekil 3'te gösterilen mağara kesitinde mağara çökelleri ve oluşum yerleri görülmektedir. Mağara tavanından süzülen sular, tavanda CaCO_3 çökeltmeye başlarlar. Çökeltme yavaş yavaş bir tüp şeklinde büyüyerek tabüler veya pipet şeklinde sarkıtlar oluşturur. Tüpün tıkanması sonucunda sarkıtın etrafında çökeltme devam eder. Diktler ise mağara tabanında, tavandan damlayan sulardan itibaren çökellerler. Genellikle sarkıtlardan daha kalın olan diktler suyun yere çarparak yayılması sonucunda daha geniş alanlar kaplarlar. Akma taşları ise ince katmanlı çökeller olup sızan suların mağara duvarında veya tabanında akmaları sonucunda oluşurlar. Her üç tür mağara çökeline de kristaller genellikle dış yüzeye dik olarak büyürler. İç yapılarında büyüme katmanları, renk, doku, saflık ve sıvı kapanım yoğunluklarındaki farklardan ayırtedilebilirler (Şekil 4). Sediman içermeyen, saf karbonattan oluşan çökeller, beyaz, turuncu, kırmızı, kahverengi - siyah arasında değişen renklerde görülebilmektedirler. Renk farklılıkları, çoğunlukla organik madde içeriğine bağlıdır. Bazı durumlarda, herhangi bir elementin bol miktarda bulunması da çökelin belli bir renk almasına neden olmaktadır.

Mağara çökellerinin büyümesine etki eden birçok faktör arasında en önemlisi, hava ile dolu ortamlara (boşluklara) yavaş ancak sürekli bir su akışının varlığıdır. Eğer büyüme su akışının kesilmesi veya ortamın



Şekil 4. Karbonatlı Mağara Çökellerinin İç Yapısı a: sarkıt b: dikt c: akmatası (Ivanovich and Harmon, 1992'den).

Çizelge 5. ^{230}Th - ^{234}U Yaş Saptama Yönteminin, karasal malzemelerin kapalı sistemden sapma derecelerine ve kırıntılı malzemelerle kirlenme oranlarına bağlı olarak güvenilirlik sınırları.

Güvenirlilik Malzeme	Kapalı sistem ?	Kirli mi ?
Güvenilir	Bozulmamış mercan Temiz mağara çökeli Volkanik kayaçlar Kirli mağara çökeli	Temiz Temiz - Kirli
Muhtemelen Güvenilir	Demirli bileşikler Tufa Yumuşakça kabuğu Fosfatlar	Muhtemelen kapalı Kirli Kirli Kirli Kirli
Genellikle Güvenilir değil	Diyajenez sonucu Bozunmuş mercan Kemik Evaporitler Kaliş Stromatolitler Turba ve odun	Açık Temiz ? Kirli Kirli Kirli ?

su ile dolması sonucunda durursa, çökeldaki kristal sürekliliği (büyümesi) de sona erer. Çökelin yüzeyi toz, çamur veya kum gibi ince bir sediman katmanıyla kaplanır. Daha sonra çökeltme yeniden başladığında bu katman tamamen kaybolmadığı için iki büyüme evresi arasında belirleyici bir seviye olarak kullanılabilir. Bu seviye 'hiyatüs'ü temsil eder ve bazı durumlarda bölgedeki iklimsel değişimi (buzul ve kurak koşullar) ifade eder. Bununla birlikte, mağaraların derinliklerinde (iç kısımlarında) ve sellenme düzeyinin üzerinde oluşan mağara çökelleri klastik sediman içermemeleri nedeniyle uranyum serisi yaş saptama teknikleri için ideal örnekler oluşturmaktadırlar.

Büyüme katmanları, genellikle büyüme eksenini boyunca kesilen çökellerde kolayca ayırdedilebilmektedir. Bu tür örneklerde, belli büyüme katmanından altörnek alınıp eksen boyunca birden fazla yaş saptanabilmektedir. Böylece, mağaranın gelişme evrimi, dolayısıyla karstlaşma evrimi konusunda önemli bilgiler elde edilmiştir.

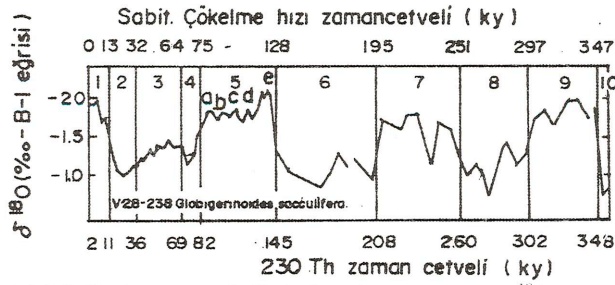
Mağara çökelleri genellikle masif, gözenekleri bulunmayan kalsitten oluştuklarından, izotop göçü (kayıp - kazanç) veya yeniden kristallenme gibi sorunlarla pek karşılaşmamaktadır. Ancak, büyüme seviyeleri arasında, kalsit içinde tutulan sedimanların neden olduğu uranyum ve toryum katkısı yaygın olarak karşılaştırılan bir sorundur. Alt örnek alınırken bu seviyelerden mümkün olduğunca kaçınmak gerekir. Elde edilen yaşlar ile çökelin içsel stratigrafisi uyum içinde olmalıdır. Örneğin diktlerin tabanında en büyük, tavanında en küçük yaşın elde edilmesi gerekir.

Sarkıtlar, eksenlerindeki boşluktan su akımı sürdürdüğünden ve merkezde oluşan yeniden kristallenmeden dolayı uygun örnek oluşturmazlar. Bu açıdan diktler ve akma taşları yaş saptama çalışmaları açısından daha uygundurlar.

Traverten ve tufaların oluşum yaşlarının saptanması

Traverten sözcüğü yüzeysel türeyen bütün masif CaCO_3 çökellerinin tanımı için kullanılmaktadır. Tufa ise bu tür malzemelerden çok daha yüksek oranda gözenekli ve bitki kalıntılarının etrafında görülen çökeller için kullanılmaktadır (Chafetz and Folk, 1984). Bu tür malzemelerin yaşlarının saptanması, flüviyal erozyon, buzul veya flüviyal çökeltme, yağışlı - kurak dönemlerin belirlenmesi, genç tektonik hareketlere yaş verilmesi gibi özel amaçlarla yapılmaktadır.

Travertenlerin genel olarak fiziksel yapısı, bu tür malzemelerin yaşlarının U - Serisi ile sağlıklı bir şekilde saptanmasını engellemektedir. Özellikle, yosun, alg veya diğer bitki kalıntıları üzerinde çökeltmeleri ve bu bitki kalıntıları ve yosunların daha sonra çürüyerek çökellerin gözenekli ve geçirimli bir yapı kazanmalarını sağlamaları izotop göçüne (ortama katılması veya ayrılmasına) neden olmaktadır. Ayrıca, atmosfere açık olarak meydana geldiği için çökeltme sırasında rüzgarla, akarsularla vb. gibi etkenlerle getirilen sedimanlar, hataya neden olan toryum kirlenmesi yaratmaktadırlar. Buna bağlı olarak fosil travertenlerin pek çoğunun bir kısmı klastik sediman hamuru ile dolmuştur. Bir kısmı da CaCO_3 açısından doygun suların ikincil kalsit kristalleri



Şekil 5. Derin deniz çökellerinden alınan örneklerin ^{18}O izotopu içeriklerinden yararlanılarak hazırlanan Buzul - Buzularası Devreler (Smart and Frances, 1991'den).

ile doldurulmuşlardır. Böylece, genç traverten ile yaşlı traverten karışmış olur. Bu da sağlıklı sonuç anlamına gelmektedir. Bu nedenle, ilksel gözenekliliği çok düşük örnekler üzerinde çalışmak sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için zorunludur. Mikroskop altında inceleme bu tür örnek seçiminde izlenen yöntemlerden birisidir. Traverten çökeltten kaynakların, periyodik olarak daha az gözenekli ve daha yoğun katmanlar çökeltmesi, bu katmanların yaş saptamada kullanılabilmesini sağlamaktadır.

Paleoklimsel yorum ve deniz seviyesi değişimleri

Kuvaterner dönemi, jeolojik yapısı, çökme ortamları, biyotası, hidrosfer ve atmosferdeki değişimleri ile farklı bir özellik taşımaktadır. Bu özelliği, dünya ikliminde bu dönemde sık sık meydana gelen değişimlerle kazanmıştır. Büyük buz kütleleri zaman zaman ilerlemiş, zaman zaman da kıta içlerine çekilmişler, böylece deniz seviyesinde yükselme ve alçalmalara neden olmuşlardır. Bu iklimsel değişimler, bıraktıkları jeolojik ve jeomorfolojik izlerden belirlenebilmekte, böylece denizel veya karasal paleoklimsel tarihçe bu dönem için yeniden oluşturulabilmektedir. Söz konusu olayların meydana geldiği zaman ölçeğinin görece olarak çok kısa olması, bilinen, klasik yaş saptama yöntemlerinin bu alanda yetersiz kalmasına neden olmaktadır.

Uranyum serisi ile tarihlleme, genellikle 40 bin yıldan (ky) daha genç malzemeler için kullanılabilen radyokarbon yöntemi ile 500 ky'dan yaşlı malzemeler için kullanılabilen Potasyum - Argon ve $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ gibi yöntemler arasındaki boşluğu doldurmuştur. Ancak, uranyum serisi ile yaş saptanacak malzemenin, iklimsel değişimi yansıtacak çökme özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle, Kuvaterner jeolojisi ile ilgili çalışmalar genellikle kara ve kıyılarda gözlenen jeomorfolojik yapılar üzerinde yoğunlaşmıştır.

Öte yandan iklimsel değişimlerin kronolojisi, denizel çökellerin, özellikle derin deniz çökellerindeki foraminiferaların incelenmesi ile ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu çökellerin üst kesiminin yaşı doğrudan doğruya ^{14}C ile saptanmıştır. Ancak çökel kesitinin büyük bir kısmı için, paleomagnetik terslenme ile desteklenen uranyum serisi yardımıyla yaş saptama mümkün olmuştur. Derin deniz çökellerindeki bentik foraminiferalarda ^{18}O izotopundaki değişimler karalardaki buzulların hacmindeki değişimlere bağlıdır. Bu nedenle, ^{18}O izotopu, en azından teorik olarak, paleoklimsel değişimlerin tarihlenmesinde kullanılabilir. Bu konuda bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar henüz genel bir geçerlik kazanamamıştır. Bu nedenle derin deniz çökellerinden yararlanılarak oluşturulan ^{18}O izotopu devreleri (Şekil 5) henüz tam olarak klasik buzul devreleri yerine kullanılamamaktadır. Buzulların ilerlemesi veya gerilemesi yerel ölçekte makro (global) ve mikro (yerel) iklim koşullarının etkileşimi sonucunda meydana gelmektedir. Bu da genel yapı hakkında bilgi toplarken dikkate alınması gereken bir konudur. Bununla birlikte son yıllarda, foraminiferalardan elde edilen izotopik kayıtlar ile denizel karbonatlar arasında ^{14}C , U - Serisi ve ^{18}O kullanılarak doğrudan bir korelasyon kuran çalışmalar yaygınlaşmaktadır (Smart and Frances, 1991).

doğruya ^{14}C ile saptanmıştır. Ancak çökel kesitinin büyük bir kısmı için, paleomagnetik terslenme ile desteklenen uranyum serisi yardımıyla yaş saptama mümkün olmuştur. Derin deniz çökellerindeki bentik foraminiferalarda ^{18}O izotopundaki değişimler karalardaki buzulların hacmindeki değişimlere bağlıdır. Bu nedenle, ^{18}O izotopu, en azından teorik olarak, paleoklimsel değişimlerin tarihlenmesinde kullanılabilir. Bu konuda bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar henüz genel bir geçerlik kazanamamıştır. Bu nedenle derin deniz çökellerinden yararlanılarak oluşturulan ^{18}O izotopu devreleri (Şekil 5) henüz tam olarak klasik buzul devreleri yerine kullanılamamaktadır. Buzulların ilerlemesi veya gerilemesi yerel ölçekte makro (global) ve mikro (yerel) iklim koşullarının etkileşimi sonucunda meydana gelmektedir. Bu da genel yapı hakkında bilgi toplarken dikkate alınması gereken bir konudur. Bununla birlikte son yıllarda, foraminiferalardan elde edilen izotopik kayıtlar ile denizel karbonatlar arasında ^{14}C , U - Serisi ve ^{18}O kullanılarak doğrudan bir korelasyon kuran çalışmalar yaygınlaşmaktadır (Smart and Frances, 1991).

Sunulan çalışmanın amacı doğrultusunda paleoklimsel yorumlama çalışmalarının denizel çökellerle ilgili kısmı yerine karasal çökellerle ilgili kısmı incelenmiştir. Paleoklim yorumlamaları, karst akiferlerinin gelişmesi ve evrimi ile ilgili önemli bilgiler vermektedir. Paleoklimsel değişimlere bağlı olarak deniz seviyesinde meydana gelen yükselme ve alçalmalar, karstlaşma evriminin temel ögesi olan karstlaşma tabanını belirlemesi nedeniyle karst hidrojeolojisi çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Bu tür ortamlarda inşaa edilecek barajlarda, örneğin enjeksiyon perdesinin inmesi gereken derinliğin belirlenmesinde önemli bilgiler bu yolla sağlanabilecektir. Özellikle Türkiye'de bazı karst yapılarının bugünkü deniz seviyesinin de altında kaldığı Toros Karst Kuşağında akifer hidrodinamiğinin açıklanmasında bu tür bilgiler büyük yararlar sağlayacaktır. Kuvaterner sırasında oluşmuş iklimsel değişimlerle ilgili bilgiler çeşitli karasal çökellerde saklı bulunmaktadır. Aşağıda bu çökelere ilişkin bilgiler özetlenmiştir.

Göller

Yarı kurak bölgelerde, yağışın, buharlaşma ve yüzeysel akışla meydana gelen kayaplara oranla artı .., göl seviyesinin yükselmesine neden olmaktadır. Bu durumda göl hacminde oluşan artış, yerel olarak tuzlanmayı azaltmakta (aksi halde kapalı havza koşulları geçerli olacağından tuzlanma artacaktır) ve ayrıca kıyı şeridinin büyümesine neden olmaktadır. Bu tür bir olay, göl ve kıyı çökellerinden edinilecek bilgilerden yararlanılarak belirlenebilmektedir. U - Serisi yöntemi ile yaş saptanabilecek malzeme bu tür çökellerden elde

edilebilmektedir. Buradan giderek paleoiklimsel yorumlamalar yapılabilir.

Akarsular

Akarsu vadilerinde aşınma - derinleşme oranları, yine büyük oranda iklimsel değişimlere bağlı olarak gelişmektedir. İklimsel değişim, akarsu akımını ve bazı durumlarda buzulların erime oranını etkilemektedir. Fluvial malzemeler her ne kadar U - Serisi ile tarihlenebilirlerse de, bu malzemeleri üzerleyen kaynaklardan itibaren çökelen tufa gibi malzemelerin yaşı saptanabilmektedir. Böylece, dolaylı olarak fluvial malzemelerin yaşı saptanmış olmaktadır. Bu tür malzemelerin vadilerdeki konumları, saptanan yaşlarla birlikte değerlendirilerek paleoiklimsel yorum yapılabilmesini sağlamaktadır.

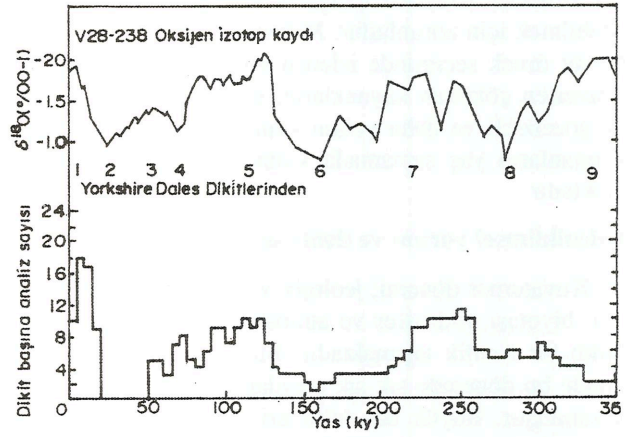
Kaynaklar

Kaynak akımı genellikle yağıştaki değişimler tarafından denetlenmektedir. Yağış ise atmosferik dolaşıma bağlıdır. Kurak bölgelerde kaynak akımı ancak yerel akiferin yağışla beslendiği dönemlerde yani fluvial dönemlerde görülebilir. Çeşitli dönemlerde buzul etkisi altında kalan bölgelerde kaynakların boşalttığı akiferin beslenmesi buzullaşma ile kesilmektedir. Buz örtüsü ve permafrost bu olaya neden olan başlıca etkenlerdir. Karbonatlı kayaç akiferlerini boşalttıklarında kaynaklar tufa ve traverten çökeltmektedirler. Karbonatlı kayaç akiferlerini boşalttıklarında kaynaklar tufa ve traverten çökeltmektedirler. Temiz, sediman içermeyen ve gözenekliliği yüksek olmayan tufa ve travertenlerin yaşı ^{14}C veya Uranyum Serisi yöntemleriyle saptanabilmektedir. Bu karbonatlı çökeller genellikle paleoiklim konusunda önemli bilgi veren buzul tilleri, morenler, lössler, paleosoller, polen içeren alüvyon, kollüvyum gibi malzemeleri örtmekte veya bu malzemelerden oluşan ana katmanlar içerebilmektedirler. Ayrıca erozyona bağlı olarak oluşmuş yerçekilleri ile travertenler arasında ilişkiler de yorumlamada kullanılan önemli bilgiler sağlamaktadırlar. Bu şekilde, kaynakların hidrolojik rejimleri ve paleoiklim konusunda yorumlamalar yapılabilir.

Mağara çökelleri

Karstik mağaralar, yerel karbonatlı çökellerin bozulmadan uzun süre kalabildikleri ortamlar sağlamaktadırlar. Bu nedenle iklimsel yorumlamalar için eşsiz örnekler barındırmaktadırlar. Mağara çökelleri çeşitli kırıntılı çökeller arasında veya üzerinde oluşabilmektedir. Genellikle kalsit veya aragonit şeklinde çökelen kalsiyumkarbonat çok düşük oranlarda uranyum içerirken, hiç toryum içermemesi nedeniyle U - Serisi yöntemi için önemli malzeme oluşturmaktadır. Karbonatlı mağara çökellerinin izotopsal ve kimyasal değişimleri

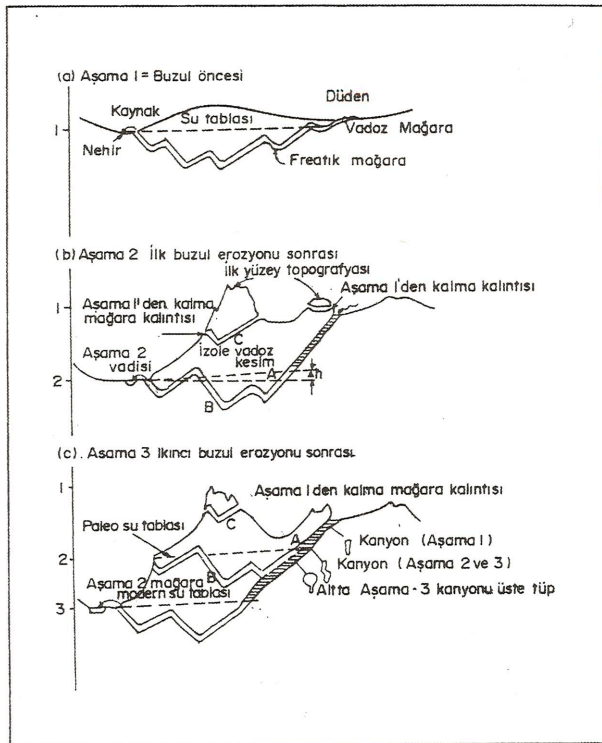
de önemli paleoiklimsel bilgiler sağlamaktadırlar. Eğer, suyun ^{18}O içeriği açısından denge koşulları sağlanmış halde iken bu malzemeler çökelmişlerse, oluşum döneminin ortam sıcaklığı ve suyun izotopik bileşimi konusunda da önemli bilgiler elde edilebilmektedir. Mağara çökelleri, kristallenme sonrasında kristal aralarında, oluştukları sudan küçük miktarlarda kapanlar da içerebilmektedirler. Bu suyun izotopsal bileşimi de yine yerel sıcaklık ve iklimsel yorumlamalarda kullanılabilir. Kurak bölgelerde, mağara çökelleri pluvial dönemlerde oluşabilirler. Buzullarla kaplı alanlarda çökeltme mümkün olmamaktadır. Mağara çökellerinin yaşlarına ilişkin yoğunluk analizleri buzlanma - pluvial iklim dönemleri konusunda bilgiler verebilir. Bu tür bir çalışmaya örnek Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Mağara çökellerinin yoğunluk analizi ile buzlanma - pluvial dönem yorumlamalarına bir örnek (Ivanovich and Harmon, 1992'den).

Yeraltıları ve jeotermal sistemler

U - Serisi kullanılarak yeraltılarının ve çözünmüş maddelerin geçiş süreleri, çatlak ve kırıkları dolduran damar dolgularının yaşları, hidrotermal faaliyet süresi, element taşınım mekanizmaları, kırık boyutu ve akım miktarı gibi hidrojeolojik karakteristikler konusunda bilgiler elde edilebilmektedir. Bununla beraber, bu konularda bugüne kadar yapılan çalışmaların ancak bir kısmı başarılı sonuçlar vermiştir. Bunun nedeni, izotopların tutulması (adsorplanması), çökeltme ile ilgili fizikokimyasal süreçlerin çok karmaşık olması ve bu karmaşıklıkların önerilen modellerde dikkate alınamamasıdır. Bu da, modellerden elde edilen bazı parametrelerin yanlış yorumlanmasına neden olmaktadır. Öte yandan, kırıkların geometrisi, kırıklara yakın bölgelerde kayaçtaki heterojen yapının etkisi, henüz çözümlenememiş olduğundan dolayı çeşitli varsayımlara dayanmaktadır. Bu nedenle kayaç - su etkileşimi net bir şekilde açıklanamamaktadır.



Şekil 7. Vadi tabanı derinleşmesinin U - serisi teknikleri ile analizi (Ford and Williams, 1989'dan).

Jeomorfolojik evrim

Vadi tabanı derinleşmesi

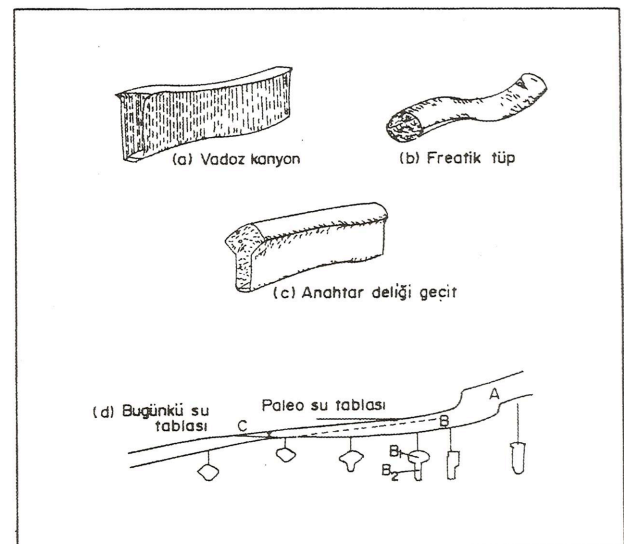
U - Serisi kullanılarak vadi tabanındaki aşınma oranının belirlenmesi düşüncesi ilk olarak Ford et al (1972) tarafından ileri sürülmüş, Ford et al (1981) tarafından geliştirilmiştir (Ford and Williams, 1989). Akarsu alüvyonları gibi yumuşak çökellerin erozyonla kolaylıkla yok olması, öte yandan vadi yamaçlarında bu malzemenin teraslar şeklinde korunabilmesi, önceki vadi tabanı seviyelerinin saptanabilmesine olanak vermektedir. Ancak, bu tür malzemeler, genellikle yaş saptamaya uygun çökeller içermemektedirler. Öte yandan, vadi tabanlarının bir diğer göstergesi yaş tayinine uygun karbonatlı çökeller içeren mağaralardır. Bu mağaraların evrimi, vadi tabanı derinleşmesi ile ilgili bilgiler vermektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi karbonatlı kayalarla kaplı ve ortalama bir topoğrafyaya sahip bir alanda bulunan mağara sistemi (a) suyunu vadi tabanındaki bir kaynaktan boşaltmaktadır. Daha sonra meydana gelen yükselme ve erozyon, örneğin buzul erozyonu, önceki topoğrafik yüzeyin daha engebeli bir görünüm kazanmasına neden olmaktadır (b). Ancak yüzey altındaki mağaralar, yüzeyden daha iyi bir şekilde korunmuş olarak kalırlar. Yeni mağara sistemi, suyunu bu kez yeni (derinleşen) vadi tabanındaki yeni kaynaktan boşaltmaya başlar. İkinci bir erozyon vadinin biraz da-

ha derinleşmesine neden olur (c). Bu kez ikinci mağara sistemi de fosilleşir ve yeni bir mağara sistemi oluşur. İlk mağara sisteminden kalıntılar artık daha da azalmıştır. Görüldüğü gibi mağara sistemlerinin gelişimi, yüzey şekillerinin evrimi ile yakından ilişkilidir.

Şekil 7'de verilen jeomorfolojik evrimin ilk aşamaları, mağaraların morfolojileri kullanılarak yeniden oluşturulabilmektedir. Genel anlamda, mağaralar kireçtaşlarının, su tablası üzerinde ve altında olmak üzere iki farklı koşul altında çözünmeleri ile oluşurlar.

Su tablası üzerinde, vadoz mağaralar oluşurlar. Çok kısa bir süre sonra, mağaranın meydana geldiği kırıklar su ile dolar, yeraltı nehirleri mağara tabanında akmaya ve böylece tabanı aşındırarak derinleştirmeye başlarlar. Sonuçta Şekil 8'de görülen vadoz kanyonlar oluşur. Buna karşılık, su tablasının altında kalan kırıklar, boyutları ne olursa olsun sürekli olarak su ile dolu kalırlar. Bu nedenle, tabanda, duvarlarda ve tavandaki aşınma oranı hemen hemen eşittir ve freatik tüp olarak bilinen dairesel veya eliptik kesitli erime boşlukları oluşur (Şekil 8).

Mağaralar ilk olarak freatik (suya doygun - derin) bölgede gelişirler. Daha sonra karstlaşma tabanının, deniz seviyesi değişimleri ve kıtasal yükselmeler gibi çeşitli nedenlerle alçalması ile vadoz ortam koşullarında kalırlar. Bu durumda oluşan morfoloji, anahtar deliğine benzediğinden, anahtar deliği terimi ile anılmaktadır (Şekil 8). Aktif mağara sistemlerinde mağaranın kesiti, su tablasına yaklaşık vadoz bölgede aldığı şekilden, freatik tüpe doğru değişen morfolojilerde görülür. Bu morfoloji değişimi paleo - su seviyesinin bir göstergesidir (Şekil 8). Kireçtaşı katmanlarının yüksek

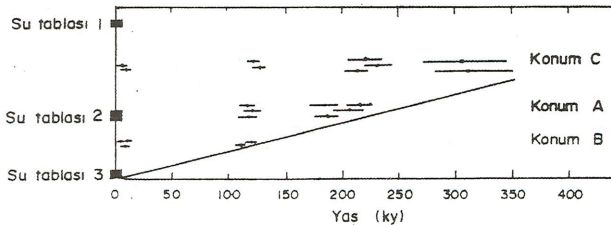


Şekil 8. Oluşum türüne göre mağara morfolojileri (Ford and Williams, 1989'dan).

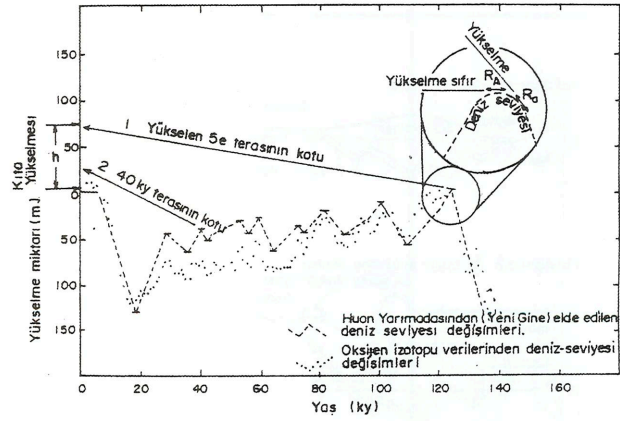
eğime sahip olduğu bölgelerde mağaralar düşey yönde zigzaglar çizerek gelişmektedirler (Ford ve Williams, 1989). İlk çözünme katmanlanma düzlemi boyunca gelişmekte, daha sonra su, rastladığı eklem sisteminden yukarı doğru hareket etmekte ve yeniden katmanlanma düzlemi boyunca akmaya devam etmektedir. Böylece şekilde gösterilen freatik yükselme - alçalmalar görülmektedir. Bu dalgalanmanın üst kesimi su tablasının konumunu temsil etmektedir. Bu nedenle, mağaraların ayrıntılı bir şekilde morfolojileri, genel mağara geometrisi ile birlikte incelendiğinde paleo - su seviyeleri konusundan önemli bilgiler elde edilebilmektedir. Paleo - su seviyeleri ise yüzeydeki yerçekillerinin evrimini denetleyen temel etkenlerdendir. Mağara sistemlerinin paleo - su seviyeleri ve yüzey yerçekillerinin evrimindeki önemi bu sistemlerin yaşlarının saptanmasını gerektirmiştir. Bu da U/Th yöntemi ile önceki kısımlarda anlatıldığı şekilde yapılabilmektedir. Şekil 9, bu amaçla yapılmış yaş saptamalarının nasıl yorumlandığı konusunda bir örnek oluşturmaktadır. Şekildeki A seviyesinden alınan dikit en yaşlı dikit olup 225 kky yaş vermiştir. Eğer vadi, kısa bir buzul döneminde hızlı bir şekilde B'den C'ye derinleştiyse, bu durumda 225 ky, buzlanma çağıının minimum yaşını verir. Öte yandan vadi tabanı derinleşmesi genellikle sabit bir oranla gelişir. Dikitlerden alınan yaşlar yorumlanacak olursa, vadi tabanı derinleşme oranı bütün noktaları içerecek en dik eğime sahip doğurun eğimi ile verilebilir. Ancak bu oran, vadi tabanı derinleşmesinde etkili olan çeşitli faktörlerin gözardı edilmesi nedeniyle oldukça kaba bir tahmine dayanmaktadır.

Kıtaların yükselme oranı

Mercan yaşlarının U - Serisi ile saptanması, tektonik etkilerle kıyıların yükselme oranlarının belirlenebilmesine olanak sağlamıştır. Mercanlar deniz seviyesinin karaya göre kararlı olduğu tropik - subtropik alanlarda oluşmaktadırlar. Tektonik olarak kararlı kıyılarda, Pleistosen sırasında deniz seviyesinin birkaç bin yıl veya daha uzun sürelerde sabit kaldığı zamanlarda mercanlar yaygın olarak oluşmuştur. Yükselen kıyı şeritlerinde, bölgesel deniz seviyesinin (eustatic) yükselme oranı ile karaların yükselme oranı eşit olduğunda resifler oluşmaya başlamaktadır. Mercan resifleri sadece sığ sular-



Şekil 9. Mağaralarda Paleo - su seviyelerinin yorumlanması (Ivanovich and Harmon, 1992'den).



Şekil 10. Uranyum serisi analizleri yardımıyla kıta yükselme oranının saptanmasına ilişkin bir örnek (Ivanovich and Harmon, 1992'den).

da, fotik (ışığın süzülmediği) zonlarda oluşmakta ve eğer resif ve resife bağlı olarak tutulan sedimanlar iyi korunmuşsa, genellikle, oluşum dönemlerindeki ortalama deniz seviyesinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Hızlı yükselen kıyılarda, basamaklı resif teras oluşumu yaygın olarak gözlenmektedir. Bu terasların yaşlarının saptanması, son 250 ky için paleo - deniz seviyelerinin tarihçesinin belirlenebilmesini sağlamıştır. Ancak, basamaklı teraslanmanın, doğrudan deniz seviyesi ile bağlantılı olarak yorumlanmasından önce yerel tektonik yükselmenin belirlenmesi gerekir. Bu sorun, terasın kofu (bugünkü deniz seviyesinde yüksekliği) ile oluşumu sırasındaki paleodenz seviyesi arasındaki ilişki ile çözülebilmektedir (Şekil 10). İki yükselti arasındaki fark terasın oluşumundan bu yana meydana gelen yükselme miktarını vermektedir. Burada çözülmesi gereken bir döngü bulunmaktadır; yükselme miktarının belirlenebilmesi için paleodenz seviyesinin belirlenmesi gerekir; aynı anda paleodenz seviyesinin belirlenebilmesi için de yükselme miktarının bilinmesi gerekmektedir. Bu döngü, Bermuda veya Bahama adaları gibi tektonik açıdan oluşumundan bugüne kadar hep kararlı olduğu bilinen bölgelerde yapılan çalışmalarda çözülmüştür. Son buzularası dönemde paleodenz seviyesinin bugünkü deniz seviyesinden 5 - 8 m daha yüksek olduğu belirlenmiştir. U - Serisi ile yapılan analizler sonucunda, kararlı kıyılarda resif oluşumunun 125 ky önce gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu dönem "5e oksijen - izotopu dönemine" karşılık gelmektedir. Bu bulgu, bölgesel (global - eustatic) deniz seviyesinin Pleistosen sırasında ancak bir kez bugünkü deniz seviyesinden daha yüksek olduğu sonucunu vermiştir ki bu sonuç derin deniz sedimanlarının izotop analizleri ile uyumlu bulunmuştur (Shackleton and Opdyke, 1973; Smart and Frances, 1991). Bu durumda, tektonik etkilerle yükselen kıyılarda, yerel yükselmeler, 5e dönemine ait terasların U - Serisi ile

saptanması ile belirlenebilmektedir. Teras yükseltisi ile 6.5 m olan 5e dönemi paleodeniz seviyesi arasındaki fark, kıta yükselme miktarını vermektedir.

Sonuçlar

Yer bilimcilerinin çeşitli dallarında değerlendirme ve yorumlamaların sayısal verilere dayandırılmasına yönelik olarak yoğunlaşan çalışmalar, bu bilimin, uygulamada daha sağlıklı sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Jeomorfoloji, jeokimya, tektonik gibi yer bilimlerinin diğer dalları ile yakından ilişkili olan hidrojeoloji bilim dalı, yeraltısuyu hareketinin matematiksel olarak ifade edilebilmesi nedeniyle, ilgili olduğu alanda sayısal çözümler üretebilmektedir. Öte yandan, karst hidrojeolojisinde, klasik yöntemlerin geçersiz olması, bu tür ortamlardaki yeraltısuyu dolaşım sisteminin ortaya konmasında büyük güçlükler neden olmaktadır. Karstlaşma evriminin nasıl geliştiği konusunda sayısal veri elde etme güçlüğü, bu tür sorunların başında gelmektedir. Karbonatlı malzemelere, uranyum serisi ile yaş verme çalışmaları, karstlaşmayı denetleyen ana etmenlerin sayısallaştırılması konusunda büyük yararlar sağlamaktadır. Paleoiklimsel değişimlerin ortaya konduğu izotopik yöntemlerle birlikte ele alındığında, uranyum serisi ile yaş saptama teknikleri karst evriminin açıklanmasında önemli sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$ yöntemi, bu amaçla izlenebilecek en uygun yöntem olarak kabul edilmektedir. Özellikle, toryum kirlenmesi ve ikincil kalsit çökmesi veya çözünmesi görülmeyen traverten - tufa malzemelerde sağlıklı sonuçlar veren bu yöntem, Türkiye'deki mağaralarda bulunan çökellerin büyük bir kısmında sorunsuz uygulanabilir. Uranyum Serisi kullanılarak, özellikle karasal karbonatlı çökellere yaş verme tekniklerinin gelişmesi, Kuvaterner döneminin paleoiklimsel koşullarının belirlenebilmesini sağlamıştır. Paleoiklimsel yorumlama ile birlikte jeomorfolojik evrim konusunda yapılan çalışmalar özellikle Kuvaterner Jeolojisi ve Jeomorfolojisi konularında önemli katkılar sağlamıştır. Paleoiklim ve jeomorfolojik yorumlamalara koşut olarak karstlaşma evriminin belirlenebilmesine olanak sağlayan bu teknikler, özellikle Türkiye'nin Toros Karst Kuşağında olduğu gibi, karstlaşmanın bugünkü deniz seviyesinin altında da gözlemlendiği bölgelerde, hidrodinamik yapının ortaya konmasında çok önemli bilgiler sağlamaktadır. Yeraltısuyu dolaşımının meydana geldiği karstik ortamlar, çözünme - çökeltme süreçleri sonucun-

da oluşmaktadırlar. Çözünme ve çökeltme farklı iklimsel koşulların göstergesi olarak ele alındığına göre paleoiklimsel yorumlama, bu süreçlerin tarihçesinin belirlenebilmesini sağlamaktadır. Öte yandan, karstlaşmanın deniz seviyesine bağlı olarak gelişmesi ve U - serisi teknikleri ile deniz seviyesindeki dalgalanmaların belirlenebilmesi, karstik akiferin gelişme evriminin açıklanabilmesinde kullanılan önemli bilgiler vermektedir. Böylece, akiferin bugünkü durumu ve yeraltısuyunun dolaşımı ile ilgili sağlıklı yorumlamalar yapılabilmektedir. Bugüne kadar, gözlemlere ve deneyime bağlı olarak yapılan bu tür yorum ve açıklamalar, uranyum serisi izotopları kullanılarak geliştirilen yaş saptama teknikler ile sayısal bir karakter taşıyacaktır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (HÜ - UKAM) ile Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) arasında yürütülen TUR / 88 / 007 kodlu proje kapsamında, Bristol Üniversitesi (İngiltere) Coğrafya Bölümü, Uranyum Serisi Yaş Saptama Laboratuvarında yazar tarafından yapılan kuramsal ve uygulamalı çalışmalar sonucunda hazırlanmıştır. Yazar, bu çalışmanın yapılabilmesi için gerekli her türlü desteği sağlayan UKAM Merkez Müdürü, Prof. Dr. Gültekin Günay'a ve Bristol Üniversitesi'ndeki çalışmaları başlatıp yakından izleyen, her türlü bilgi ve ekipmanı sağlayan Prof. Dr. Peter L. Smart'a teşekkür eder.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Goldschmidt, V.M., 1954, *Geochemistry*, Clarendon Press, Oxford.
- Heir, K.S. and Adams, J.A.S., 1965, Concentration of radioactive elements in deep crustal material. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 29, 53 - 61.
- Langmuir, D., 1978, Uranium solution - mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 547 - 69.
- Chafetz, H.S. and Folk, R.L., 1984, Travertines: Depositional Morphology and The Bacterially Constructed Constituents, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 54, No. 1, p. 289 - 316.
- Yılmaz, H., 1988, Uranyum ve Toryum Jeokimyası, M.T.A. Yayınları, Eğitim Serisi, No. 29, Ankara.
- Ford, D.C. and Williams, P.W., 1989, *Karst Geomorphology and Hydrology*, Unwin Hyman, London.
- Smart, P.L. and Frances, P.D., (eds) 1991, *Quaternary Dating Methods - A User's Guide* Quaternary Research Association, Technical Guide No. 4, Cambridge.
- Ivanovich, M. and Harmon, R.S., (eds) 1992, *Uranium Series Disequilibrium, Applications to Earthy, Marine and Environmental Sciences*, 2nd Edition, Clarendon Press, Oxford.