

# HİD481 İzotop Hidrolojisi

## 8. Hafta Yeraltısuyu Yaşı

Prof.Dr. C. Serdar BAYARI, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Hidrojeoloji Anabilim Dalı



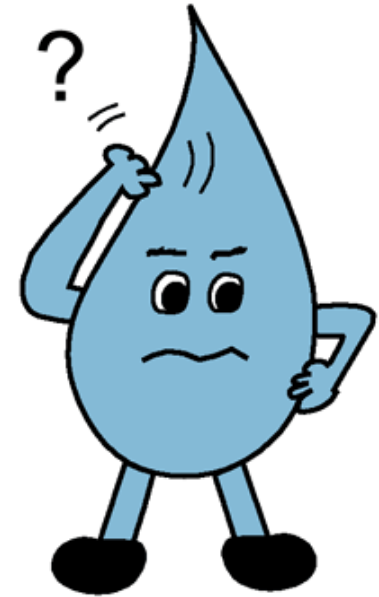
Kaynak kitap: Clark & Fritz, Environmental Isotopes in Hydrology

# YERALTISUYU YAŞI NEDİR? NASIL BELİRLENİR?

N.Nur ÖZYURT

C.Serdar BAYARI

III. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu  
13-17 Ekim 2008 Orhantepe-İSTANBUL



# YERALTISUYU YAŞI KAVRAMI 1970'li yıllarda gündeme gelmiştir.

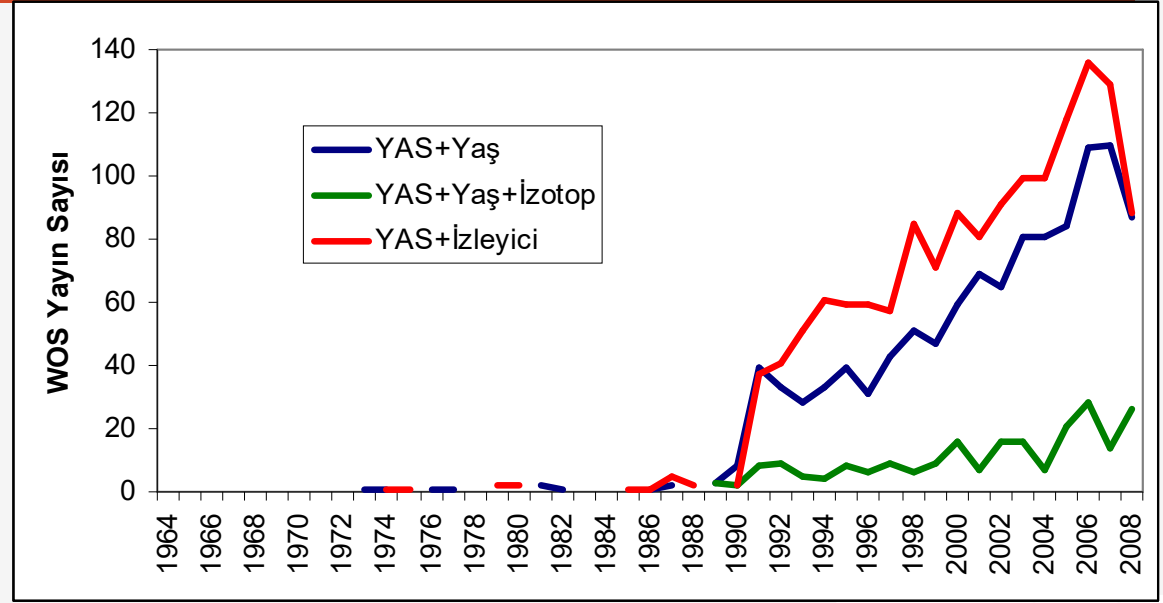
Hidrojeoloji biliminin gelişimi 1900'lü yılların başından itibaren litolojik birimlerin suyu iletme ve içirme kabiliyetlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalarla başlamıştır.

Daha sonra 1960'lı yıllardan itibaren su kalitesi, yerel ve bölgesel yeraltısuyu dolaşımı, ve yeraltısuyu yaşı gibi kavramlara yönelik çalışmalar yürütülmüştür.

Günümüzde ise "su yönetimine" yönelik çalışmalar öne çıkmaya başlamıştır.

Bu kapsamda yeraltısuyu yaşı önemli bir kavramdır.

Grafik "yeraltısuyu" + "yaşı" + "izotoplar" + "izleyiciler" anahtar sözcükleri ile ilgili makale sayısının yıllara göre değişiminin göstermektedir. Son yıllarda konuyla ilgili kitaplar da yayınlanmaya başlanmıştır.



- Groundwater Age and Groundwater Age Dating, 2008 Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Bethke, Johnson
- GROUNDWATER AGE 2006, Kazemi, Lehr, Perrochet



# YERALTISUYU YAŞI NEDİR?

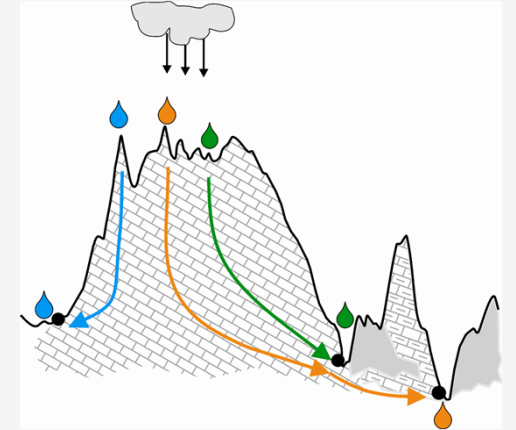
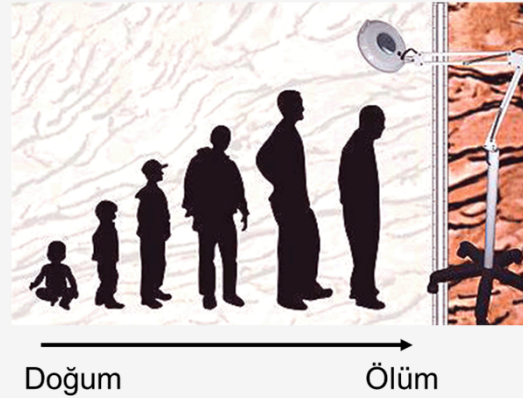
İnsan kütleleri farklı yaştaki bireylerin toplamından oluşurlar. Her birey doğduğu yıldan itibaren geçen süreye bağlı bir yaşa sahiptir. Bireyler doğarlar ve ölürlər. Ölüm bazen kaza, hastalık vb nedenle bazen de doğal olarak gerçekleşir.

Yeraltısuyu içeren kütleler de (akifer, akıtar, akifüj, akiklud) insan kütleleri gibidir.

Yeraltısuyu kütlesindeki her bir molekül bir insan gibi düşünülebilir. İnsanın doğum yılı, su molekülün yeraltına giriş (beslenim) yılına eşleniktir. İnsanların ölüp içinde bulundukları kütleyi terk etmeleri gibi yeraltısuyu molekülleri de zamanla içinde bulundukları kütleyi terk ederler. Doğum ve ölüm arasında geçen süreye ömür denir. Yaş ise doğduktan sonra geçen süredir.

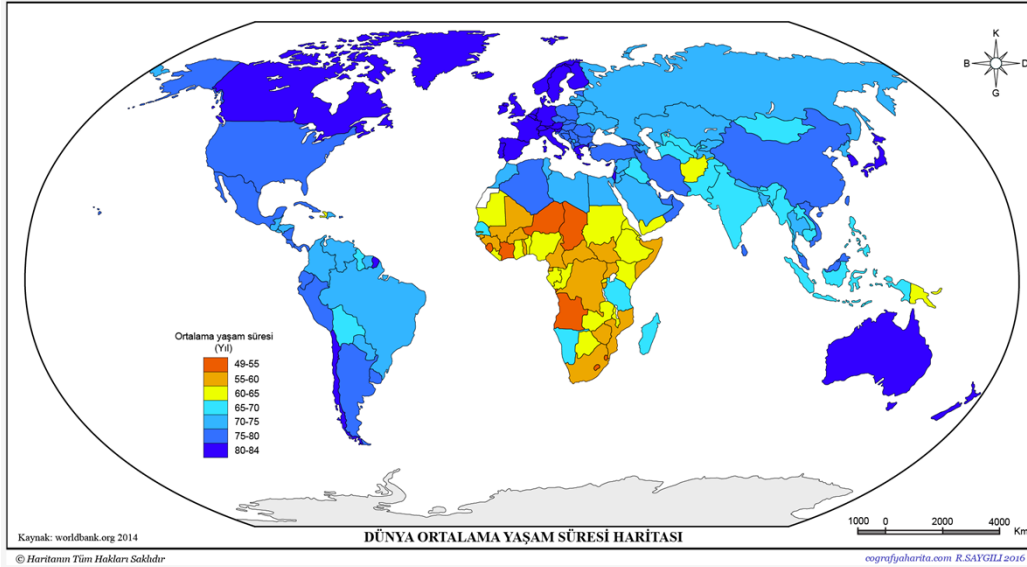
Bireylerin ölümü kendiliğinden ya da bir dış etkene (hastalık, kaza) bağlı olarak gerçekleşebilir. Yeraltısuyu molekülleri de jeolojik sistemi kendiliğinden (bir akarsuya, kaynağa, denize boşalma) ya da bir dış etkene bağlı olarak (örneğin pompaj, drenaj kanalına akış) terk edebilirler.

İster kendiliğinden, ister dış etkenlere bağlı olsun; içinde bulunduğu kütleyi o anda terk eden insanların ortalama yaşı jeolojik sistemi terk eden yeraltısuyu moleküllerinin (su örneğinin) ortalama yaşıdır. Bu yaş değeri "Yeraltısuyu Yaşı" ya da "Yeraltısuyu Geçiş Süresi" olarak adlandırılır.

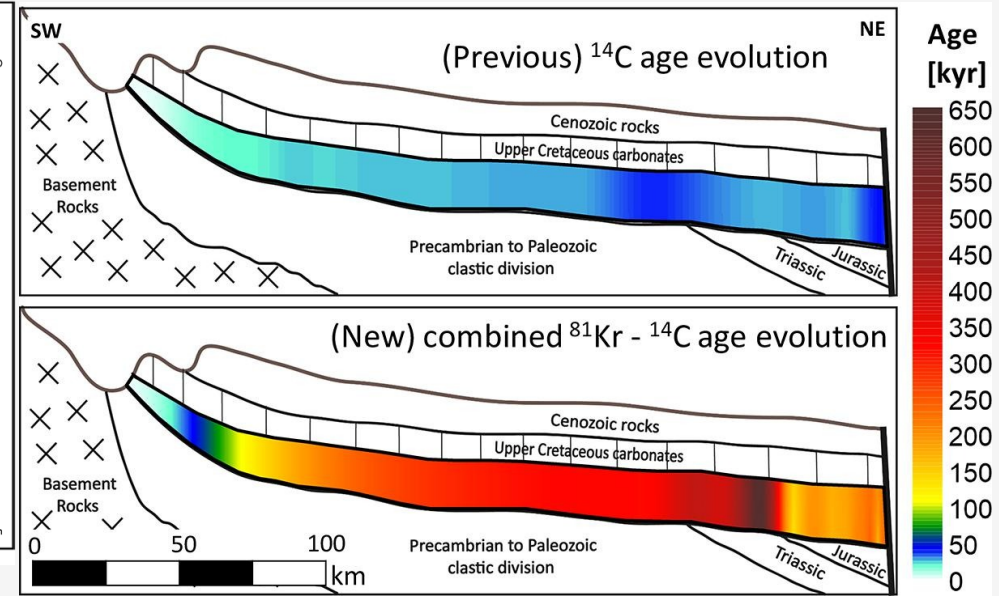


# YERALTISUYU YAŞI NEDİR?

Aşağıdaki haritada ülkelerin ortalama yaşam sürelerini göstermektedir. Ülkeleri farklı akiferler, insan yaşam sürelerini de akiferlerdeki su kütlelerinin ortalama yaşı gibi düşünebilirsiniz.



Aşağıdaki kesitte bir hidrojeolojik sistemde akış yolu boyunca yeraltısuyu yaşının değişimi karbon-14 ve kripton-81 izotop yaşları kullanılarak gösterilmiştir.



## YERALTISUYU YAŞ BİLGİSİ KULLANILARAK ÇÖZÜM ÜRETİLEN HİDROJEOLÖJİK PROBLEMLER

|    |                                                                                 |
|----|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Yeraltısuyu kaynaklarının yenilenebilirliği                                     |
| 2  | Bilimciler ile yöneticiler arasında etkin bir iletişim aracı                    |
| 3  | Aşırı çekim ve kirliliği önlemek için sürekli yeraltısuyu yaş gözlemi yapılması |
| 4  | Beslenme hızı tahmini                                                           |
| 5  | Yeraltısuyu akım hızının hesaplanması                                           |
| 6  | Yeraltısuyu akım yollarının belirlenmesi                                        |
| 7  | Akitardlarda yeraltısuyu ve kirletici taşınım hızının belirlenmesi              |
| 8  | Yeraltısuyu akım ve taşınım model parametrelerinin hesaplanması                 |
| 9  | Farklı uç bileşenlerden karışımın belirlenmesi                                  |
| 10 | Holosen iklim çalışmaları                                                       |

|    |                                                                              |
|----|------------------------------------------------------------------------------|
| 11 | Yeraltısuyu kirliliğinin değerlendirilmesi/evrimi                            |
| 12 | Yeraltısuyu cephesinin ilgilenilen noktaya olan varış süresinin hesaplanması |
| 13 | Sığ akiferlerde kirlenebilirlik haritalarının oluşturulması                  |
| 14 | Radyoaktif atık depolamasına uygun sahaların seçimi                          |
| 15 | Deniz suyu seviye değişimlerinin belirlenmesi                                |
| 16 | Deniz suyu girişi için süre öngörüsünde bulunmak                             |
| 17 | Derin-tuzlu yeraltısuyu sistemlerinin atık imha deposu olarak kullanımı      |
| 18 | Kurak alanların tuzlanma açısından yönetimi                                  |
| 19 | Hidrograf ayrımı                                                             |

# YERALTISUYU YAŞ DAĞILIMI

## Yeraltısuyu yaşı suyun yeraltına giriş ve çıkış zamanları arasındaki farktır.

Çıkış doğal (kaynaktan boşalım) ya da yapay yolla (pompajla boşalım) olabilir.

Yeraltısuyu kütlesi farklı yaştaki su moleküllerinin karışımından oluşur.

Bir litre su 1000 gr / 18 gr/mol = 55.55 mol su molekülü içerir.

Bir mol =  $6.02 \times 10^{23}$  adet.

Bir litre su

$55.55 \times 6.02 \times 10^{23} = 334 \times 10^{23} = 334 \times 10^4 \times 10^9 \times 10^9 \times 10^9 = 3.3$  milyon çarpı milyar(1), çarpı milyar(2), çarpı milyar(3) adet su molekülü içerir.

YAS içeren jeolojik birim;

- Santoniyen (Geç Kretase, 85 milyon yıl) yaşlı kumtaşı olsun,
- diyajenez sonrasında bünyesindeki deniz suyunun tamamı yıkanıp gitmemiş olsun,
- birim üzerine en son bir yıl önce yağmur yağmış olsun.

Bu durumda; bu birimden alınan su örneğindeki bazı moleküller 85 milyon yıl yaşında bazıları ise bir yaşında olacaktır.

## **BİLİNER EN YAŞLI YERALTISUYU** **NATURE | NEWS**

Reservoir deep under Ontario holds billion-year old water.  
Jessica Marshall, 15 Mayıs 2013

Dünya yüzeyinin 2.4 kilometre altında bir Kanada madeninde çalışan bilimciler en az bir milyar yıldır izole kalmış durumda bir su kaynağı buldu.

Timmins, Ontario yakınlarındaki 2.7 milyar yıllık bir bakır ve çinko madenindeki sülfür yataklarının çatlaklarından akan suyun içerdiği azal gaz izotoplarının incelenmesi sonucunda suyun 1 ila 2.6 milyar yıldan beri atmosferle temas etmediği anlaşılmıştır.



# YERALTISUYU YAŞ DAĞILIMI

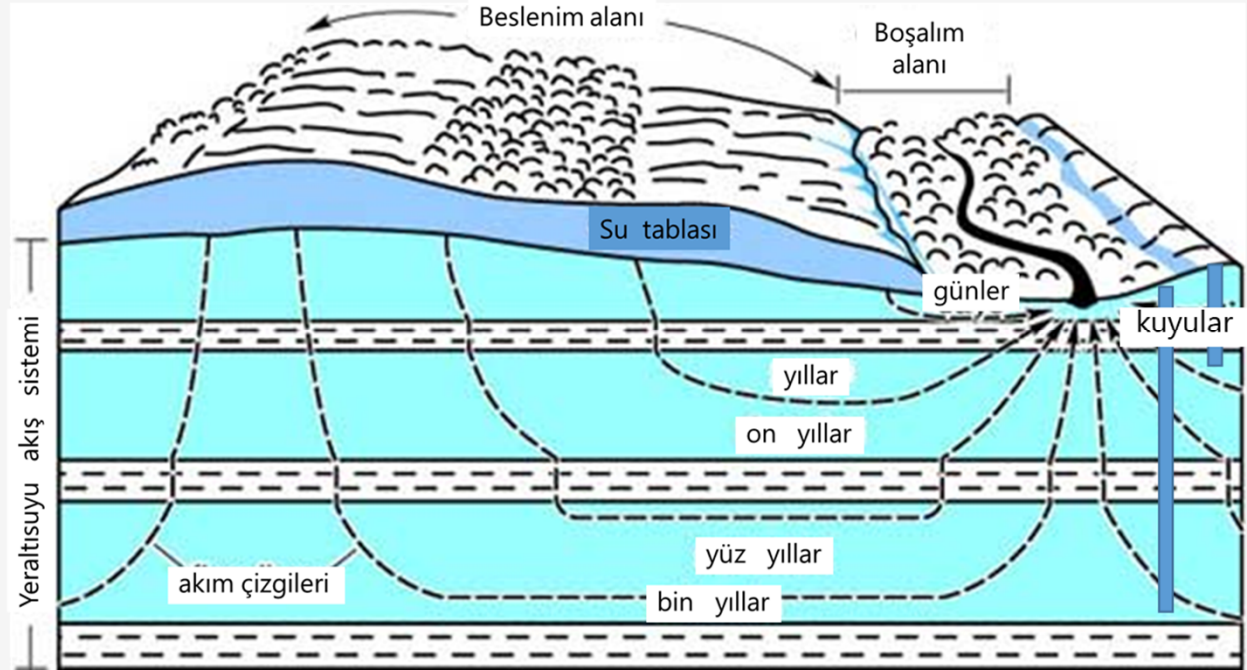
**Yeraltısuyunun beslenme ve boşalım zamanları (yani akifere giriş ve çıkış zamanları) arasındaki süre yeraltısuyu yaşı olarak tanımlanır.**

Bu süre aynı anda akifere giren tüm su molekülleri için aynı uzunlukta değildir. Bazı moleküller kısa sürede akiferi terk ederlerken, diğerleri için bu süre o jeolojik birimin yaşı kadar uzun olabilir. Formasyon suyu kayacın taşlaşması döneminden itibaren bazı gözeneklerde kalan sudur.

Akarsu, göl ve deniz gibi boşalım alanlarında farklı derinliklerden gelen, farklı yaşlardaki yeraltısuyunu ileten akım çizgileri birbirine yakınsar.

Kuyularda ise, akım çizgileri birbirine paraleldir yani birbirine yakınsamaz. Kuyularda kuyu derinliği ile artan biçimde artan yaşlardaki yeraltısuyunu ileten akım çizgileri kuyuya ulaşırlar.

Açıklanan nedenlerden dolayı doğal boşalım alanlarına ya da kuyulara ulaşan yeraltısuyu farklı – hayali- akım çizgileri boyunca iletilen, farklı yaşlardaki suların karışımından oluşur. Bu nedenle, su örnekleri en güncel ve en yaşlı beslenimleri birlikte içerirler. Su örneğindeki en yaşlı bileşenin yaşı –eğer daha yaşlı bir formasyondan su iletilmedi ise- o formasyonun oluşum yaşıdır. Bu bileşene “formasyon suyu” denir ve çoğunlukla formasyonun oluştuğu dönemdeki deniz/göl suyunun günümüze ulaşan kalıntısıdır.



# YERALTISUYU YAŞ DAĞILIMI

## Bir yeraltısuyu örneği farklı yaşlardaki su moleküllerinin karışımından oluşur.

Pek çok yeraltısuyu sisteminde akış hızı oldukça düşüktür (0.1-1.0 m). Bu yüzden Reynolds sayısı  $Re < 2300$  olup, akış çizgilerinin birbirini kesmediği laminar (tabakalı) akış koşulları egemendir.

Bu koşullardaki yeraltısuyu akışı Darcy Yasası'na uyar.

Darcy Yasası;  $q$  yeraltısuyu akışı,  $K$  hidrolik iletkenlik katsayısı ve  $i$  hidrolik gradyan olmak üzere

$q (L/T) = K (L/T) * i (L/L)$  şeklindedir.

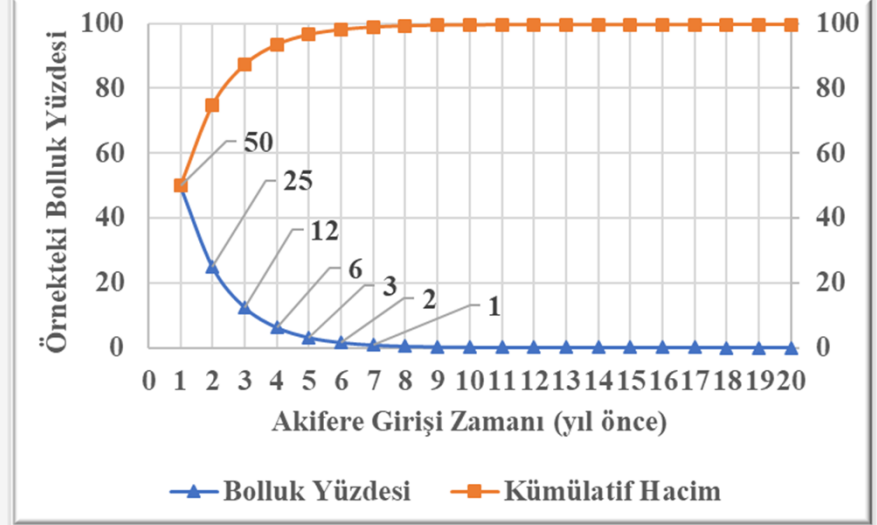
Yeraltısuyu akışı kayacın gözeneklerinde gerçekleşir. Darcy hızı olarak adlandırılan bu eşitlik akışın gerçekleştiği etkin gözenekliliğe ( $n_e$ , boyutsuz) bölündüğünde yeraltısuyunun gerçek akış hızı eşitliği elde edilir:

$$V (L/T) = q (L/T) / n_e (L^3 / L^3)$$

Hız  $V (L/T) = L (m) / T (s)$  olduğundan, sabit hızda belirli bir uzaklığın kat edilmesi için geçmesi gereken süre  $T (s) = L (m) / V (m/s)$  eşitliği ile belirlenebilir.

Hızın sabit olması durumunda, suyun beslenme noktası ile boşalım noktası arasındaki uzaklığı (L) kat etmesi için geçen süre (T) uzaklığın büyüklüğü ile doğrusal orantılıdır.

Bu nedenle belirli bir  $\Delta T$  zaman diliminde (örneğin 10 yıl) boşalım noktasına ulaşan suların büyük bölümü bu noktanın yakın çevresindeki beslenimden kaynaklanır.



Yakın çevrede  $L$  daha kısa olduğundan  $T$ 'de daha kısadır ve boşalım noktasına ulaşan suların çoğunluğu diğer bileşenlere göre daha gençtir.

Yukarıdaki grafikte bir su örneğindeki bileşenlerin yaş dağılımı gösterilmektedir. Yaş bileşenlerinin su örneğindeki bolluk oranları şu şekildedir: %50 (1 yıl), %25 (2 yıl), %12 (3 yıl), %6 (4 yıl), %3 (5 yıl), %2 (6 yıl), %1 (7 yıl), diğer bileşenler daha yaşlıdır.

Bu yeraltısuyu örneğinin –ağırlıklı ortalama- yaşı ise 2 yıldır. Hesaplayınız!

# İNSAN VE YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ

---

İnsan kütlelerinde bütün kütlenin ortalama yaşını ve yaş dağılımını Adrese Dayalı Nüfus Sistemi ile belirleyebilirsiniz.

Her bir bireyin (su molekülünün) ne zaman doğduğu belli olup, bireyler doğdukları (su molekülleri jeolojik sisteme girdikleri) tarihi belirten birer kimlik kartına sahiptirler.

Su moleküllerinin kimlik kartı yoktur!

İnsan kütlesini yaşı kendiliğinden (doğal ölüm sonucu) ya da kaza/hastalık gibi nedenlerle terk eden bireylerin doğum ve ölüm tarihlerinden hesaplanabilir.

İnsan (ya da akiferdeki yeraltısuyu) kütlesinin bir parçası olan bir sınıftaki öğrencilerin (ya da bir yeraltısuyu örneğinin) ortalama yaşı ya da yaş dağılımı nüfus kayıt sistemi bilgilerinden hesaplanabilir.

Su moleküllerinin kimlik kartı olmadığından bunların doğum tarihlerini ancak dolaylı yaklaşımlarla belirleyebiliriz.

Bu yaklaşımlarda suyun yaşını belirten

**“yaş belirteçlerinden (age indicator)”** ya da suyu izleyen **“izleyicilerden (tracer)”** yararlanılır.

**Yeraltısuyu’nun yaşını belirlemede kullanılan yaklaşımlar iki başlıkta incelenir:**

**1) Nitel Yaklaşımlar**

**2) Nicel Yaklaşımlar**

# YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ

---

## **Yeraltısuyu'nun yaşı aşağıdaki yaklaşımlarla belirlenir:**

1) Nitel Yaklaşımlar (Belirteçler: kimyasal madde ilk ve son kullanım/üretim zamanları)

2) Nicel Yaklaşımlar

a) İzleyici Kullanımı (izotoplar, çözünmüş gazlar)

i) Ci zamanda sabit (Radyoaktif bozunma yasası, örg. Karbon-14)

ii) Ci zamanda değişken (Tümsel Modeller, Radyoaktif bozunma yasası, örg. Tritiyum)

iii) Piston Akım Yaklaşımı (Çözünmüş gazlar)

iv) H-3/He3\* yaşı

b) Kinematik Yaklaşım ( $Zaman = Yol / Hız$ )

i) Darcy Hızı

ii) Yeraltısuyu Akım Modelleri

iii) Yeraltısuyu Akım ve Taşınım Modelleri

# YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (1 Nitel Yaklaşımlar)

## 1) Nitel Yaklaşımlar (Belirteçler: kimyasal madde ilk ve son kullanım zamanları)

Yaş belirteci olarak bozunmaya dayanıklı sentetik (doğada olmayan), organik kimyasallardan yararlanılır.

Örnek: DDT (DikloroDifenilTrikloroetan) renksiz, tatsız, kokusuz bir böcek öldürücü. Doğada olmayan, yapay bir kimyasal, 1939'da sentezlendi, trımda ve sıtma ile savaşta yaygın kullanıldı. Kansere neden olduğu anlaşılnca kullanımı 1972'de ABD'nde, 2004'te Dünya'da yasaklandı. Özel izinle kullanımı mümkün.

- Suda DDT VARsa 1972 sonrası beslenim içerir.
- Suda DDT YOKsa 1972 öncesi beslenim içerir.
- Suda DDT YOKsa 1972 sonrası beslenim içerMEZ (mi?)

Derişim ve **Minimum Ölçülebilir Derişim (MÖD)** nedir?

Örnek: 1 ppb (parts per billion, ppb) = milyarda bir kısım = 1 mikro gram / kg Su = 1 mikro gram / L Su

**MÖD\_DDT** = 1 ppb. Suda 0.1 ppb DDT var ise, bu derişim ölçülemez ve suda DDT yok denir. YANLIŞ ifadedir; doğrusu **SUDA ÖLÇÜLEBİLİR DERİŞİMDE DDT SAPTANMAMIŞTIR** olmalıdır!

## YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (2 Nicel Yaklaşımlar)

a) İzleyici Kullanımı (izotoplar, çözünmüş gazlar)

---

### 2) Nicel Yaklaşımlar

a) İzleyici Kullanımı (izotoplar, çözünmüş gazlar)

Yeraltısuyu yaş tayininde kullanılan izleyicilerin suyu beslenim anından itibaren izledikleri varsayılır.

İzleyiciler bir anlamda yeraltısuyunun doğum zamanı bilgisini içeren kimlik kartı gibi düşünülebilir.

İzleyici herhangi bir kimyasal ya da izotopik bileşik olabilir.

İzleyicide aranan temel özellikler şunlardır:

- Suyla birlikte hareket etmeli, önde ya da arkada gitmemeli,
- Fiziksel ve kimyasal reaksiyonlardan etkilenmemeli ya da bu etkiler hesaplanabilmeli.
- Zamana ilişkin bilgi verebilmelidir.

En ideal izleyici su molekülünün ( $H_2O$ ) doğal bir bileşeni olan tritium izotopudur ( $^3H$ ). Uygun koşullarda 130 yıla değin yeraltısuyu yaş tayininde kullanılabilmıştır (Özyurt, 2007).

Nicel yaklaşımda kullanılan izleyiciler genel olarak suda çözünmüş gazlardan ve izotoplardan oluşur.

# YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (2 Nicel Yaklaşımlar)

## a) İzleyici Kullanımı (izotoplar, çözünmüş gazlar)

Aşağıdaki çizelgede yeraltısuyu (YAS) yaş tayininde kullanılan başlıca izotoplar gösterilmiştir. Bunlardan Helyum (He), Kripton (Kr), Argon (Ar) suda çözünmüş asal gaz, CFC (Klorofluorokarbon) ve SF<sub>6</sub> (Sülfür hegza florür) inert gaz diğerleri ise suda çözünmüş iyon formundadırlar. Hidrojen ve oksijen izotopları su molekülünün bileşenleridir. YAS yaş tayininde Mavi fonlu izleyiciler daha yaygın kullanılmaktadır. Sarı fonlu izleyicilerin kullanımı ikinci derece yaygınlığa sahiptir. Diğer izleyiciler akademik araştırma amaçlı kullanılmaktadır.

| Genç YAS                         | Yaşlı YAS                       | Çok Yaşlı YAS         |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 0-100 yıl                        | 100-50,000 yıl                  | 50,000->1,000,000 yıl |
| <sup>3</sup> H                   | <sup>32</sup> Si                | <sup>81</sup> Kr      |
| <sup>3</sup> H/ <sup>3</sup> He* | <sup>39</sup> Ar                | <sup>36</sup> Cl      |
| <sup>85</sup> Kr                 | <sup>14</sup> C                 | <sup>4</sup> He       |
| CFC                              | <sup>18</sup> O- <sup>2</sup> H | <sup>40</sup> Ar      |
| SF <sub>6</sub>                  |                                 | <sup>129</sup> I      |
| <sup>36</sup> Cl/Cl              |                                 | Uranyum serisi        |
| <sup>18</sup> O- <sup>2</sup> H  |                                 |                       |

Yaş Aralığı (yıl)

# YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (2 Nicel Yaklaşımlar)

## 2) Nicel Yaklaşımlar

a) İzleyici Kullanımı (izotoplar, çözünmüş gazlar)

i) Ci zamanda sabit (Radyoaktif bozunma yasası,  $^3\text{H}$ )

Sisteme giren izleyici derişimi zamanda sabit olduğunda bu derişime sadece kimyasal ve/veya radyoaktif bozunma düzeltmesi uygulanır. Sonuç  $C_i(t)$  derişimi ( $= A_o$ ) örnek derişimi ( $A_t$ ) ile kıyaslanarak YAS yaşı belirlenir.

Arkeolojik buluntuda  $^{14}\text{C}$  aktivitesi: 0.25 pmc

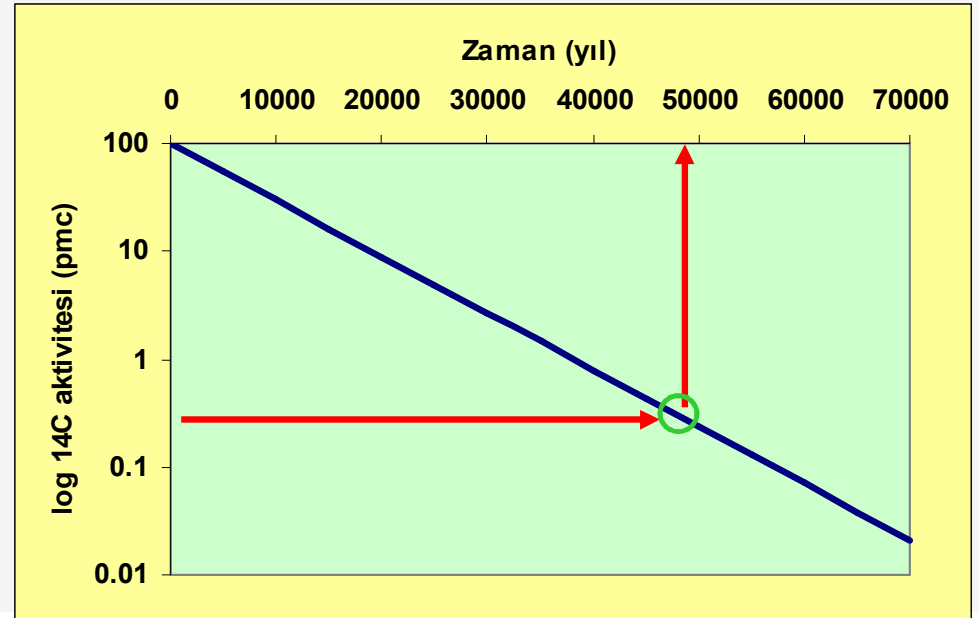
Radyoaktif bozunma eşitliği

$$A_t = A_o * \exp(-L*t), L = \ln(2)/T_{1/2}$$

$$A_o = 100 \text{ pmc}, T_{1/2} = 5730 \text{ yıl}$$

$$t (\text{yıl}) = \{\ln (A_t/A_o)\}/-L$$

$$t (\text{yıl}) = \{\ln (0.25/100)\}/-0.000121 = 49,529 \text{ yıl}$$



# YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (2 Nicel Yaklaşımlar)

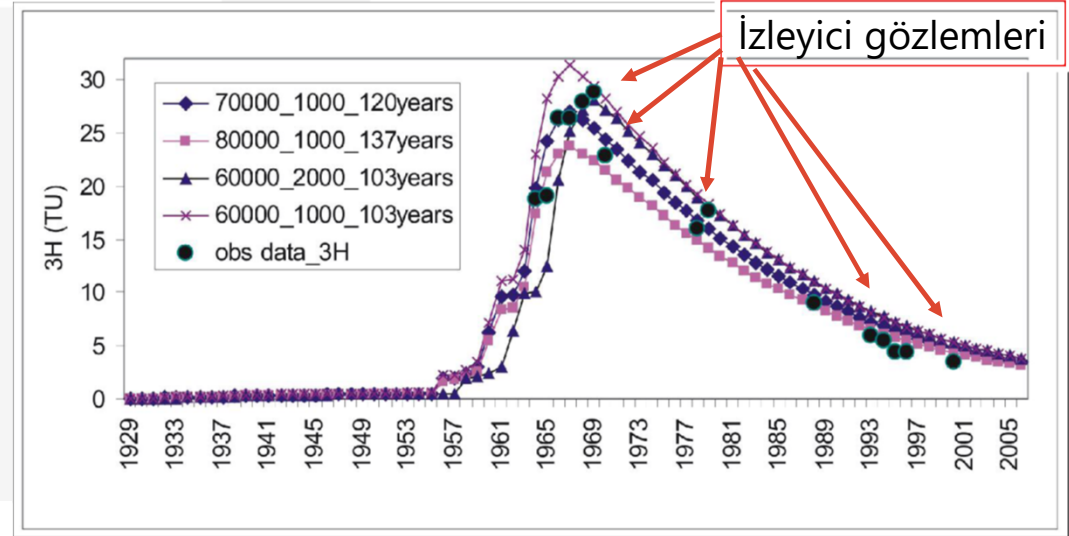
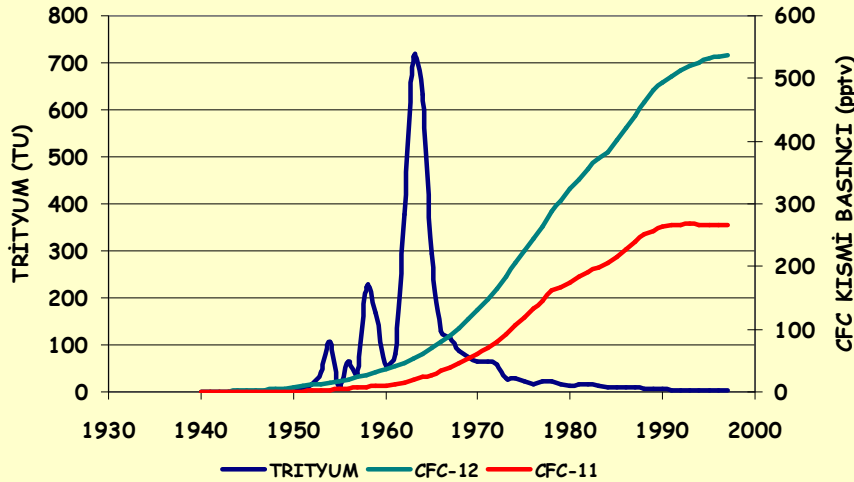
## 2) Nicel Yaklaşımlar

a) İzleyici Kullanımı (izotoplar, çözünmüş gazlar)

ii) Ci zamanda değişken (Tümsel Modeller, Radyoaktif bozunma yasası,  $^3\text{H}$ , CFC,  $\text{SF}_6$ )

Sisteme giren izleyici derişimi zamanda değişken olduğunda sisteme farklı giriş anlarındaki tüm  $C_i(t)$  derişimlerinin örnekleme zamanına ( $t_0$ ) göre düzeltilmesi gerekir. Bu işlemi Sistem Tepki Fonksiyonu (STF) yapar. İzleyici Çıktı Fonksiyonu şeklindeki sonuç izleyici gözlemleri ile karşılaştırılarak YAS yaşı belirlenir.

İzleyici Girdi Fonksiyonu  $\rightarrow$  Sistem Tepki Fonksiyonu  $\rightarrow$  İzleyici Çıktı Fonksiyonu



# YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (2 Nicel Yaklaşımlar)

## 2) Nicel Yaklaşımlar

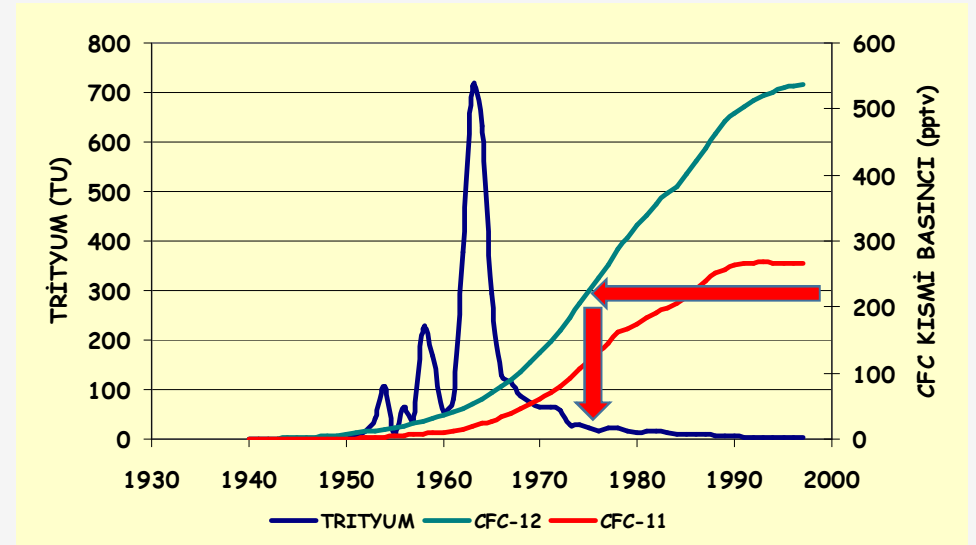
a) İzleyici Kullanımı (izotoplar, çözünmüş gazlar )

iii) Piston Akım Yaklaşımı (Çözünmüş gazlar, **CFC, SF<sub>6</sub>**)

Piston Akım Yaklaşımında sisteme giren izleyici derişimi ile örnekteki derişim karşılaştırılarak izleyicinin sisteme girdiğı yıl ve örnekleme yılı arasındaki farktan YAS yaşı belirlenir.

Sisteme giren izleyicinin kendisinden önceki ve sonraki izleyici girişleri ile karışmadığı (piston akım) varsayılır. Bu doğru bir yaklaşım değildir ama örnekler arası bağıl kıyaslama amacıyla kullanılabilir. Örnek derişiminin beslenme yükseltisi ve sıcaklığına göre düzeltilmesi gerekir.

Örnekte ölçülen CFC-12 derişimi 220 pptv, Bu derişimin atmosferde gözleendiğı yıl 1975. Örneklemeye yılı 2020. YAS "CFC-12 yaşı" = 2020 – 1975 = 35 yıl



# YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (2 Nicel Yaklaşımlar)

## 2) Nicel Yaklaşımlar

a) İzleyici Kullanımı (izotoplar, çözünmüş gazlar )

iv) H-3/He3\* (Tritiyum-Tritiyojenik Helyum-3) yaşı

Yöntem, trityum-tritiyojenik helyum-3 ( $^3\text{H}/^3\text{He}^*$ ) yöntemi olarak da anılmaktadır. Yeraltısuyuna beslenim sonucu giren  $^3\text{H}$  izotopu radyoaktif bozunma sonucu  $^3\text{He}$  izotopuna (tritiyojenik helyum-3,  $^3\text{He}^*$ ) dönüşür. Diğer bir deyişle beslenim anında 10 TU birimi  $^3\text{H}$  içeren bir suyun  $^3\text{He}^*$  içeriği (derişim TU olarak ifade edildiğinde) 0 TU olacak, ilksel  $^3\text{H}$  bütünüyle bozunarak  $^3\text{He}^*$ 'a dönüştüğünde ise,  $^3\text{He}^* = 10 \text{ TU}$  olacaktır.

$^3\text{H}/^3\text{He}^*$  yaş tayin yönteminde beslenimden sonra herhangi bir anda suyun atmosferle ilişkisinin kesildiği süre (yaş)

$t_{3\text{H}/3\text{He}} = \lambda^{-1} \ln(^3\text{He}^*/^3\text{H} + 1)$   
eşitliği ile belirlenmektedir.

Burada;  $t_{3\text{H}/3\text{He}}$ :  $^3\text{H}/^3\text{He}$  yaşı, yıl,

$\lambda$ ,  $^3\text{H}$  bozunma katsayısı ( $\ln 2 / ^3\text{H}$  yarı ömrü =  $\ln 2 / 12.43$  yıl),

$^3\text{He}^*$ : yeraltısuyunun tritiyojenik helyum-3 içeriği (TU) ve,

$^3\text{H}$ : yeraltısuyunun trityum içeriğidir (TU).

Bir yeraltısuyu örneğinde ölçülen toplam  $^3\text{He}$  derişimi ve bu toplamdan itibaren hesaplanan atmosferik ve radyojenik+manto kökenli gaz bileşenleri ile birlikte ölçülmüş trityum içeriği tabloda verilmiştir.

|                                        | cm <sup>3</sup> / g H <sub>2</sub> O |
|----------------------------------------|--------------------------------------|
| Ölçülen toplam $^3\text{He}$           | 2.70 10 <sup>-13</sup>               |
| Atmosferik kökenli $^3\text{He}$       | 2.40 10 <sup>-13</sup>               |
| Radyojenik+manto kökenli $^3\text{He}$ | 1.40 10 <sup>-14</sup>               |
| Tritiyum ( $^3\text{H}$ ) TU           | 5 TU                                 |

Bu dağılımdan itibaren

Tritiojenik  $^3\text{He}^* = \text{Ölçülen toplam } ^3\text{He} - (\text{Atmosferik kökenli } ^3\text{He} + \text{Radyojenik} + \text{manto kökenli } ^3\text{He})$ , Tritiojenik  $^3\text{He}^* = 1.60 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^3 / \text{g H}_2\text{O}$

$\text{cm}^3 / \text{g H}_2\text{O}$  cinsinden  $^3\text{He}^*$  derişimi  $4.02 \cdot 10^{-14}$  ile çarpılarak  $^3\text{He}^*$  derişimi trityum birimi (TU) cinsinden hesaplanmış olur.

Tüm bileşenleri hesaplanan eşitlik çözüldüğünde

$t_{3\text{H}/3\text{He}} = \lambda^{-1} \ln(^3\text{He}^*/^3\text{H} + 1) = 14.83$  yıl olarak belirlenmiş olur.

## YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (2 Nicel Yaklaşımlar)

---

### 2) Nicel Yaklaşımlar

b) Kinematik Yaklaşım (Zaman = Yol / Hız)

i) Darcy Hızı

Sayısal yeraltısuyu akım modeli yaklaşımı ile yeraltısuyu yaşının belirlenmesinde hız = yol / zaman eşitliğinden yararlanılır. Burada zaman su molekülünün beslenim anından itibaren akifer içinde geçirdiği süre olup, molekülün örneklendiği andaki yeraltısuyu akım hızının ve beslenim anından itibaren izlediği akım çizgisi uzunluğunun bilinmesi durumunda zaman (yaş) da kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Bu yolla belirlenen yeraltısuyu yaşı kinematik yaş (kinematic age) olarak adlandırılır (Goode, 1998). Sayısal akım modellerinde yeraltısuyu akım hızı basit doğrusal bir fonksiyon olan Darcy eşitliği kullanılarak belirlenir. Hidrolik iletkenlik katsayısı  $K$  (L/T) ve hidrolik gradyan  $i$  (L/L) ile gösterilmek üzere Darcy akım hızı  $q$  (L/T) aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$q = K * i$$

Gerçek yeraltısuyu akım hızının belirlenmesi için sistemin etkin gözenekliliğinin de ( $n_e$ ) dikkate alınması gerekecektir.  $V$  (L/T) =  $q$  (L/T)/ $n_e$

Hidrojeoloji camiasında genel kabul gören sayısal modellerden MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1996) ile hız dağılımı, MODPATH (Pollock, 1989) ile de akım çizgisi uzunluğu belirlenerek bir akiferin her noktası için yeraltısuyu yaşını hesaplamak mümkündür.

# YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (2 Nicel Yaklaşımlar)

## 2) Nicel Yaklaşımlar

b) Kinematik Yaklaşım (Zaman = Yol / Hız)

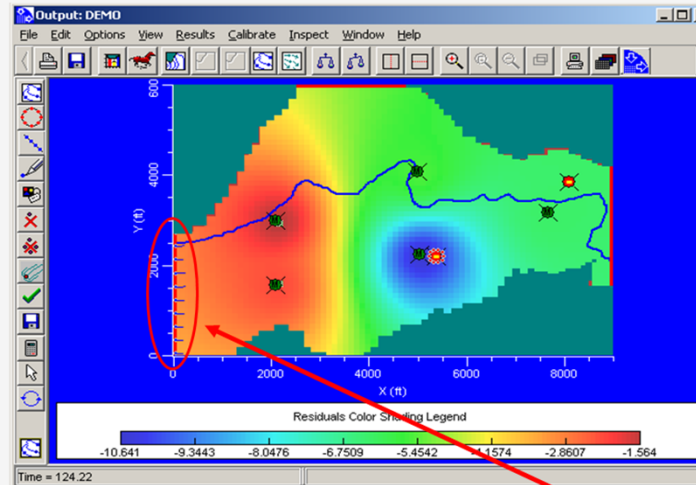
ii) Yeraltısuyu Akım Modelleri

Sayısal akım modelleri ile yeraltısuyu yaşının belirlenmesi

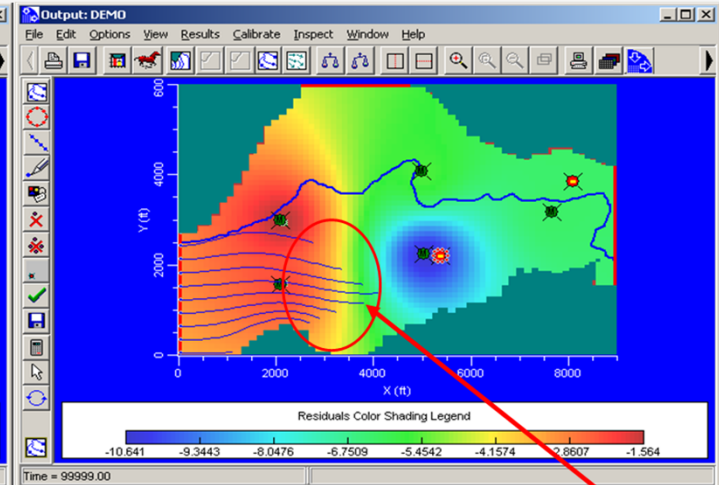
**Zaman = Yol / Hız** Eşitliğine dayanmaktadır.

Eşitliği çözüm üretebilmesi için akım yolu uzunluğunun ve yeraltısuyu akım hızının bilinmesi gereklidir.

Hidrojeolojik sistemlerde sayısal akım modellerinin oluşturulabilmesi için temel hidrojeolojik özellikler olan hidrolik iletkenlik, hidrolik gradyan, etkin gözeneklilik bilgilerine ihtiyaç vardır. Unutulmaması gereken bu bilgilerin akiferin 3 boyutuna gerçekçi olarak dağıtılmasının gerekliliğidir.



Aynı anda sisteme giren moleküller



Moleküllerin 10. yıl sonundaki konumu

# YERALTISUYU KÜTLELERİNDE YAŞIN BELİRLENMESİ (2 Nicel Yaklaşımlar)

## 2) Nicel Yaklaşımlar

b) Kinematik Yaklaşım (Zaman = Yol / Hız)

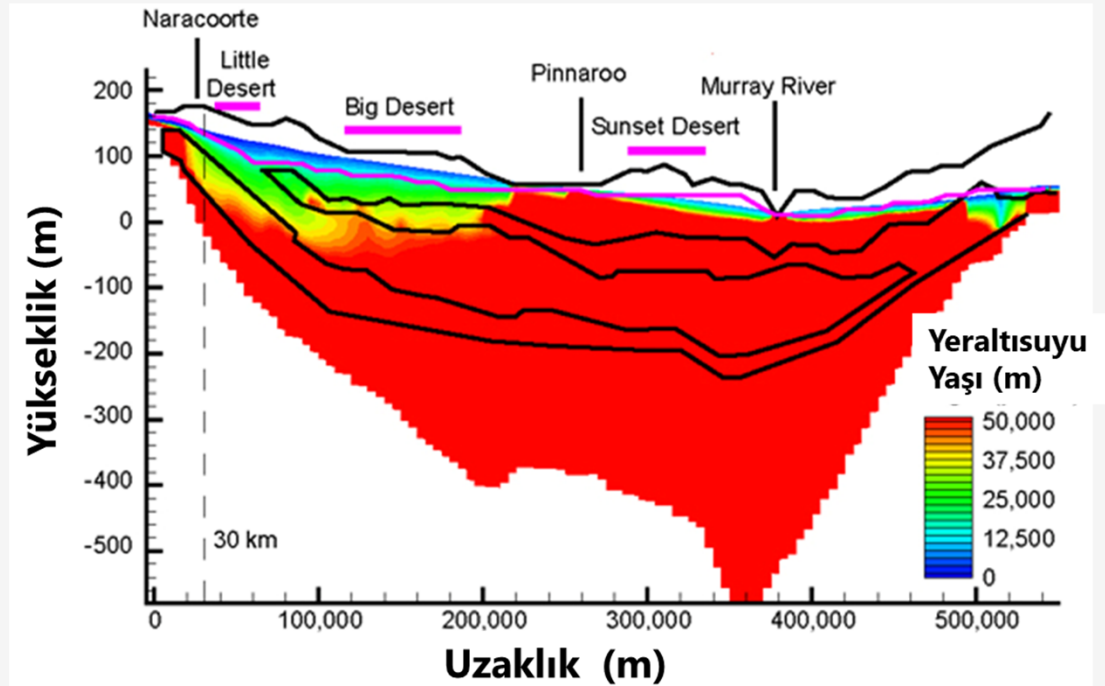
iii) Yeraltısuyu Akım ve Taşınım Modelleri

Sayısal akım modelleri üzerine kurulan sayısal taşınım modelleri ile trityum ve karbon-14 gibi izotopların aktivitelerinin akış sistemi içindeki dağılımı hesaplanarak, akış sistemi içinde yeraltısuyu yaşı dağılımı belirlenebilir.

Bazı durumlarda ise aynı yaklaşım tersten uygulanarak bilinen yaş değerlerinden hareketle taşınım modeli ve/veya buna temel oluşturan akım modelinin parametreleri kalibre edilir.

Sağdaki şekilde GB Avustralya'da Murray Nehri Havzasında yeraltısuyunun karbon-14 yaşı dağılımı gösterilmektedir.

En büyük yaş değerlerinin derin yeraltısuyu dolaşımına ait olduğuna dikkat ediniz.



## DOYMAMIŞ ZONDA GEÇİRİLEN ZAMAN

Yüzeyden gerçekleşen beslenim doymamış (unsaturated) zonu geçerek zamanla doymuş (saturated) zona yani akifere ulaşır. Beslenimin akifere ulaşması su tablası derinliğine bağlı olarak dikate değer bir zaman alabilir.

Gaz izleyiciler ile belirlenen yeraltısuyu yaşları suyun su tablasından itibaren geçirdiği zamanı tanımlarken, su (örğ.  $^3\text{H}_2\text{O}$ ) ya da su da çözünmüş (örğ.  $\text{H}^{14}\text{CO}_3$ ) izleyiciler için bu zaman yeryüzeyinden itibaren başlar.

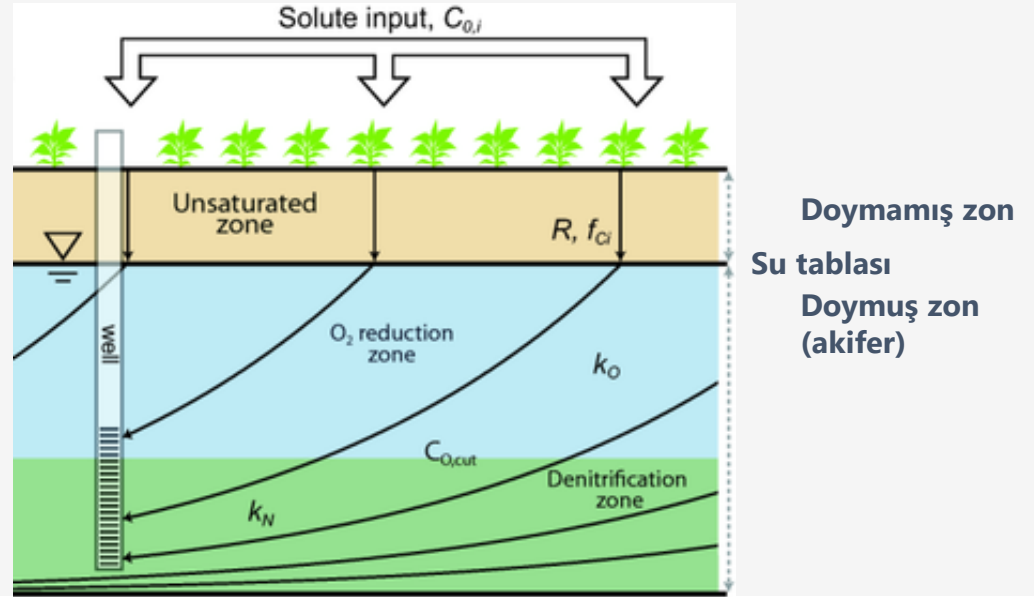
Suyun doymamış zondaki hareketi dikey yönlüdür. Aynı anda yer yüzeyine düşen yağış suyu molekülleri doymamış zonun gözenekleri (gözeneklilik, porozite) içinden farklı dolanıklıktaki (dolanıklık, turtosite) rotaları izleyerek su tablasına ulaşırlar. Her bir dolanık rotanın uzunluğu birbirinden farklı olduğundan, porozite ve tüm diğer faktörler aynı bile olsa, aynı anda gerçekleşen bir yağışa ait su molekülleri su tablasına farklı zamanlarda ulaşır. Moleküllerin su tablasına ulaşım azanları arasındaki farklılık su tablasının derinliği arttıkça artar.

Basit bir yaklaşımla yüzeyden sızan suyun su tablasına varış zamanı şu şekilde hesaplanabilir:

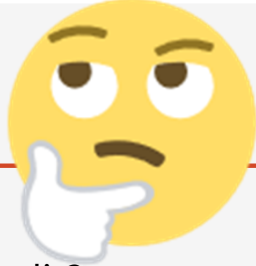
$$P_{\text{net}} = 1,000 \text{ mm/yıl}, n_e = \%10, H = 200 \text{ m}$$

$$V = P_{\text{net}}/n_e = 1,000 \text{ mm/yıl}/0.1 = 10,000 \text{ mm/yıl} = 10 \text{ m/yıl}$$

$$T_{\text{varış}} = H/V = 200 \text{ m}/10 \text{ m/yıl} = 20 \text{ yıl}$$



## Neler öğrendik ?



- Yeraltısuyu yaşı nedir?
- İnsan yaşı ile su molekülünün yaşı arasında nasıl bir benzeşim vardır?
- Türkiye bir akifer ise Türkiye'deki ortalama yaş ve Ankara'daki ortalama yaş yeraltısuyu sistemi açısından benzeştirerek açıklayınız.
- Yeraltısuyu yaşı ne gibi hidrojeolojik problemlerin çözümünde nasıl kullanılır?
- Beslenme alanı, boşalım alanı, akım çizgisi ve yeraltısuyu yaşı kavramlarını ilişkilendirerek açıklayınız.
- Yeraltısuyu yaş dağılımı nedir?
- Yeraltısuyu'nun yaşını belirlemede kullanılan NİTEL yaklaşımları açıklayınız.
- Yeraltısuyu'nun yaşını belirlemede kullanılan NİCEL yaklaşımları açıklayınız.
- Tritiyum izotopu ile yeraltısuyu yaş tayini nasıl yapılır?
- Karbon-14 izotopu ile yeraltısuyu yaş tayini nasıl yapılır?
- Atmosferik gazlarla yeraltısuyu yaş tayini nasıl yapılır?
- Tritiyum-Tritiyojenik Helyum-3 yaş tayini nasıl yapılır?
- Kinematik yeraltısuyu yaşı nasıl hesaplanır?
- Akım modeli ile yeraltısuyu yaşı nasıl hesaplanır?
- Akım/taşıyım modeli ile yeraltısuyu yaşı nasıl hesaplanır?

