

HİD481 İzotop Hidrolojisi

4. Hafta Hidrolojik Çevrim İçinde Duraylı İzotop İçeriğinin Değişimi

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

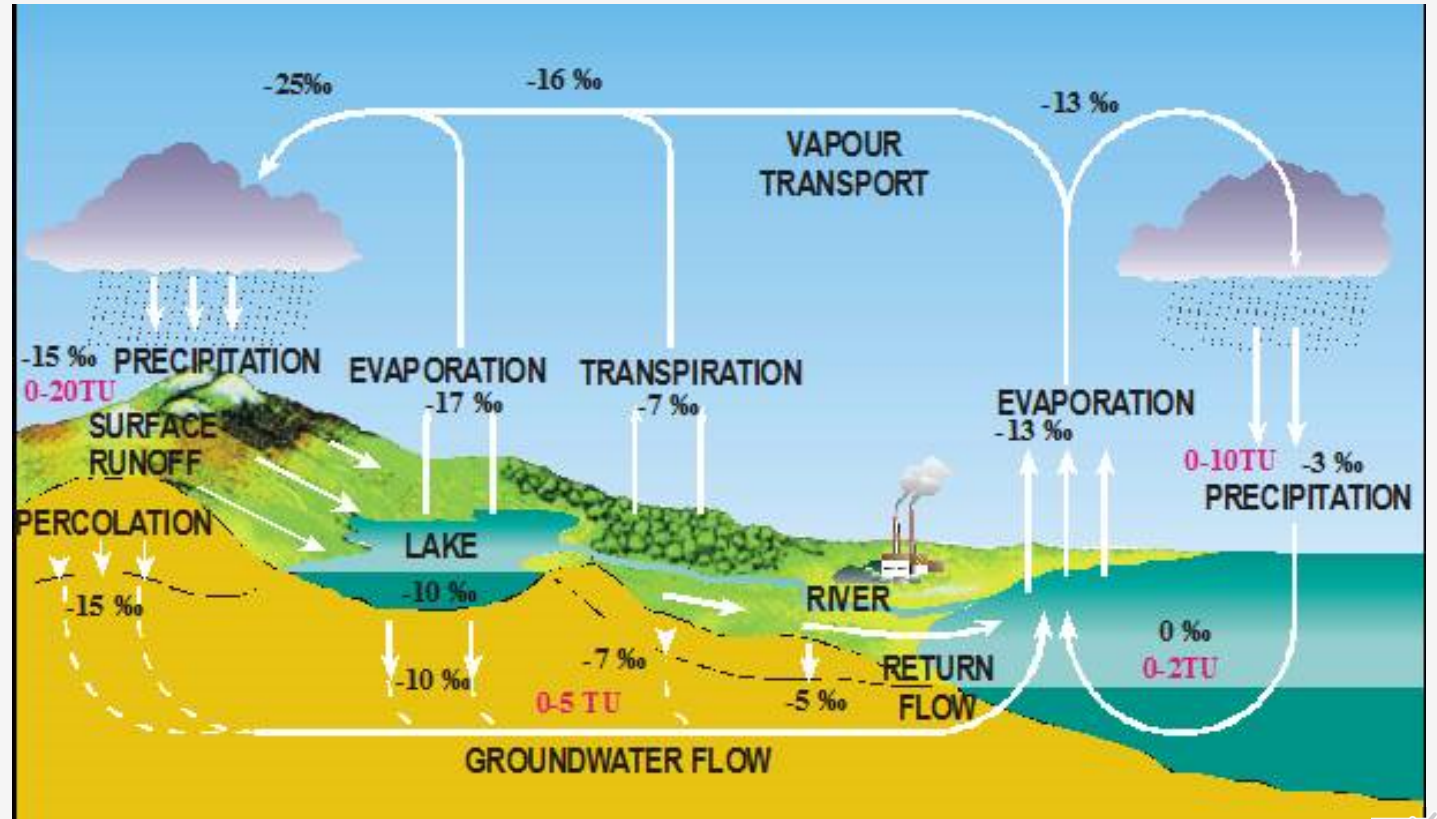


Kaynak kitap: Clark & Fritz, Environmental Isotopes in Hydrology



Hidrolojik Çevrim İçinde Duraylı İzotop İçeriğinin Değişimi (^{18}O ve ^3H)

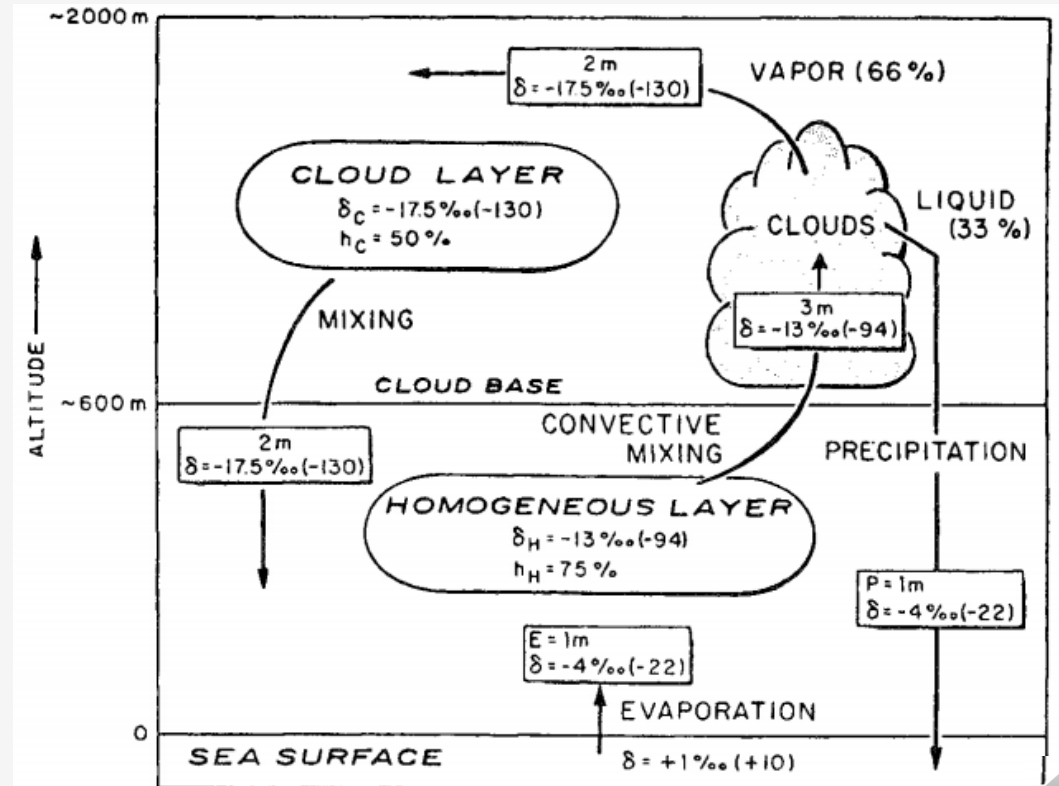
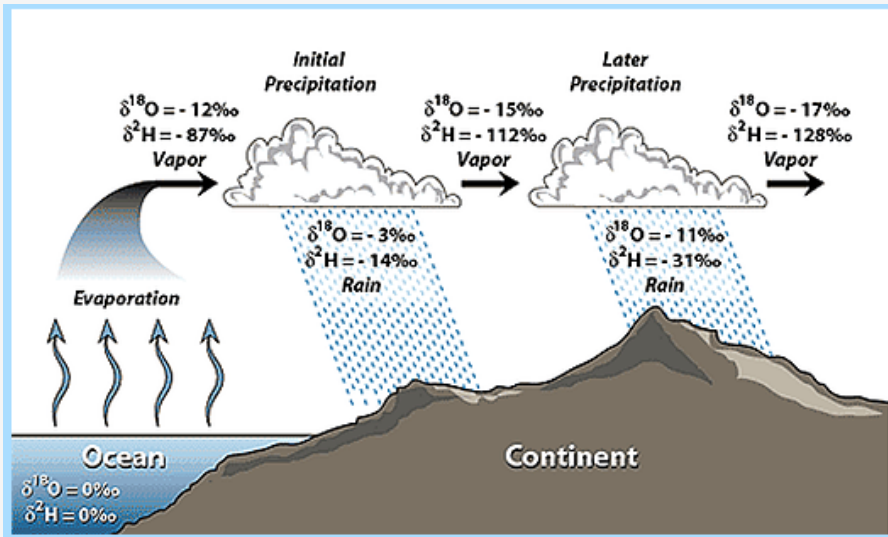
- Meteorik suların ^{18}O ve ^2H bileşimlerinin evrimi okyanuslardan buharlaşmayla başlar.
- Hidrolojik çevrim sırasındaki süreçler boyunca suyun izotopik bileşimi sürekli değişir.
- Genel bir Kabul olarak okyanus suyunun ortalama izotop bileşimi $\delta^{18}\text{O} = \delta^2\text{H} = 0 \text{‰}$ SMOW olarak tanımlanmıştır.
- Okyanus suyunun buharlaşması sırasındaki hava sıcaklığı ve bağıl nem su-buhar arasında izotopik ayrışmaya neden olur.
- Bulut taban sıcaklığı 0°C 'dir.
- Bulut izotopik bileşimi ikincil buharlaşma ve yağış süreçlerinden etkilenir.
- Bulut izotop bileşimi Rayleigh damıtma sürecinde farklı yağış izotop içeriklerinin oluşmasını sağlar.
- Yüzey ve yeraltısuyunun izotopik bileşimi buharlaşma ve karışım gibi süreçlerden etkilenir.



Craig-Gordon «Hidrolojik Çevrimde İzotopik Evrim Modeli»

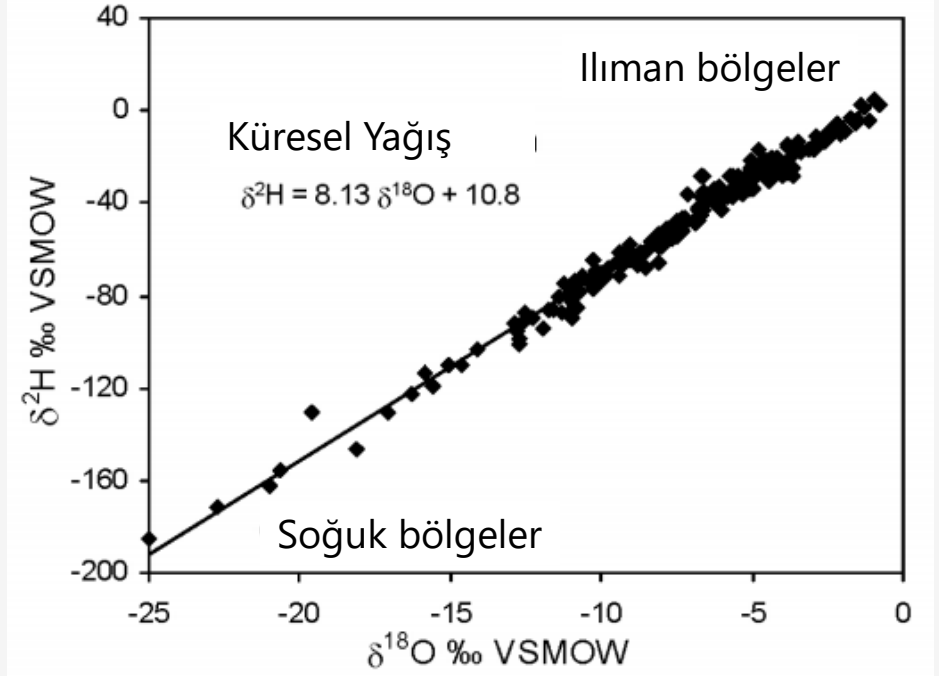
Okyanuslar üzerindeki atmosferik su buharının izotopik bileşiminin evrimini tanımlayan Craig ve Gordon (1965) modeli sağdaki şekilde gösterilmiştir.

- Şekildeki δ değerleri ^{18}O için verilmiştir (^2H parantez içinde). Buharlaştırma ve yağış miktarları metre su sütunu cinsinden verilmiştir.
- E = buharlaştırma, P = yağış, h = bağıl nem, H = Homojen katman, C = Bulut katmanı



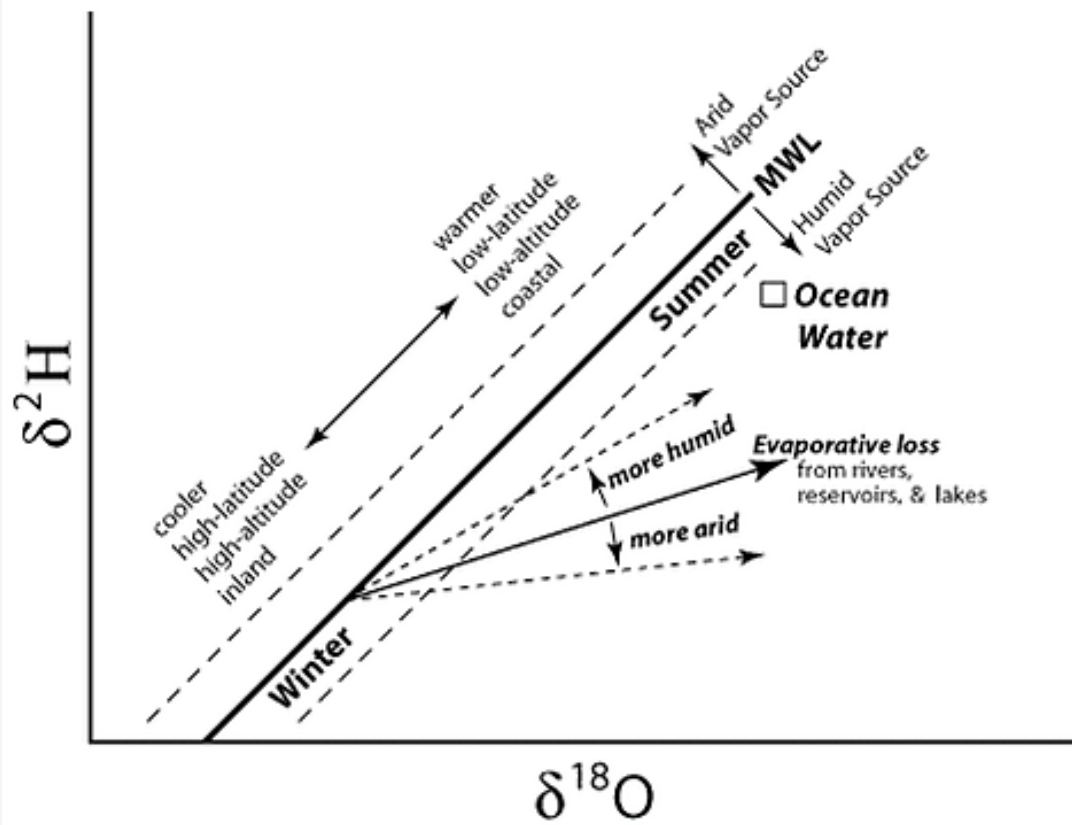
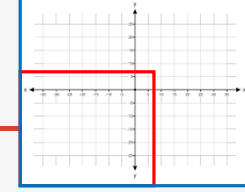
Hidrolojik Çevrim İçinde İzotop Sinyalinin Değişimi ($\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ İlişkisi)

- Sudaki kararlı izotoplar, yeraltısuyunun yaşadığı süreçlerin parmak izini taşırlar.
- 1961'de Harmon Craig, tatlı sularda $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ 'un küresel ölçekte ilişkili olduğu bulgusunu yayınladı. Craig'ın "küresel meteorik su doğrusu", dünya çapındaki yağışlarda ve tatlı sularda $\delta^{18}\text{O}$ ile $\delta^2\text{H}$ arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır:
- $\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10 \text{ ‰ SMOW}$
- $Y = Ax + b$ (A: doğrunun eğimi, B: döteryum fazlası)
- Yukarıdaki doğrusal eşitlik ile tanımlanan doğru Küresel Meteorik Su Doğrusu (KMDS) = Craig Meteorik Su Doğrusu = Global Meteoric Water Line (GWML) adlarıyla da anılmaktadır.
- Meteorik sözcüğünün meteorlarla bir ilişkisi olmayıp olasılıkla meteorolojik sözcüğünün kısaltılmış şeklidir. Meteoroloji, atmosfer kimyasını ve atmosfer fiziğini kapsayan ve hava tahminine odaklanan bir atmosferik bilim dalıdır.
- Craig tarafından yapılan önemli bir gözlem, izotopik olarak fakirleşmiş suların soğuk bölgelerle ilişkili olduğu ve sıcak bölgelerde ise izotopik olarak zenginleşmiş suların bulunduğu yönünde idi. Bu farklılık kısa süre sonra yeraltısuyu beslenme ortamlarını karakterize etmek için yaygın bir araç olarak kullanılmaya başlanmıştır.



^{18}O ve ^2H 'un meteorik ilişkisi, buhar kütlesinden yoğunlaşma sırasında oluşan ayrışmadan (fractionation) kaynaklanır. Bununla birlikte, sıcak ve soğuk bölgelerdeki yağış sırasında oluşan O ve H ayrışması da (Rayleigh (reyley okunur) damıtması olarak bilinir) önemli bir süreçtir.

$\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ Grafiği (kartezyen koordinat sisteminin sol alt bölümünü kullanır!)



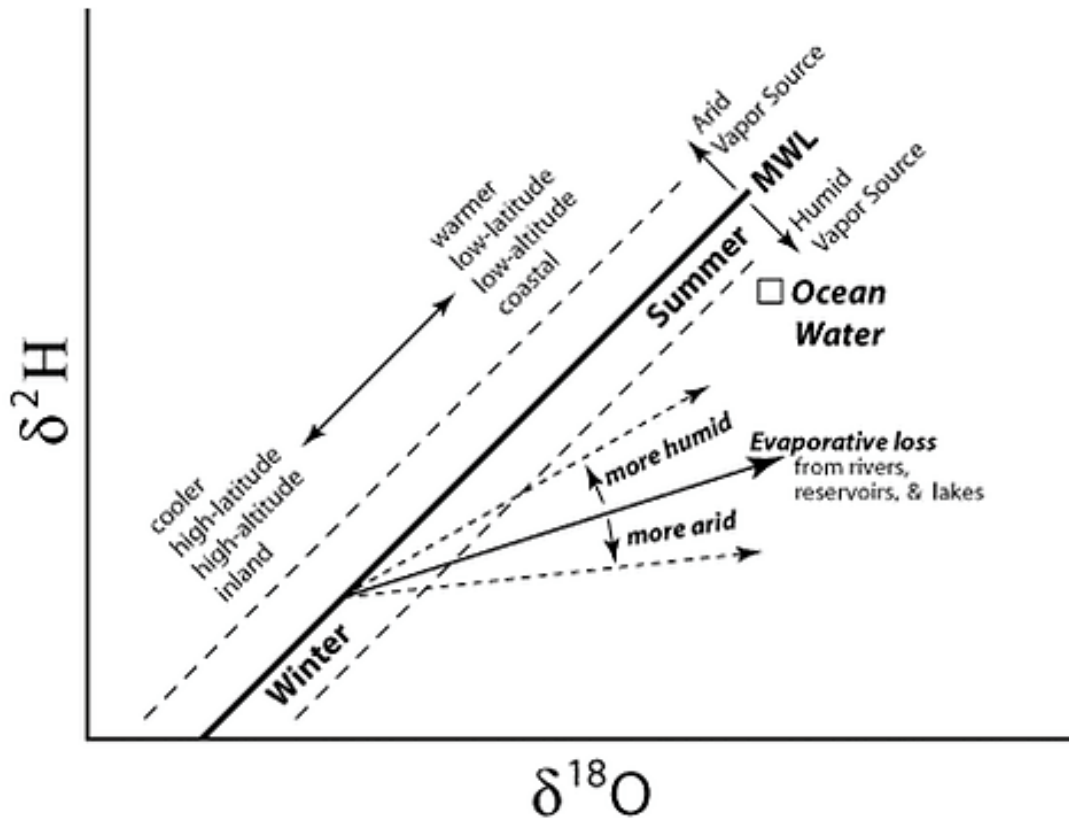
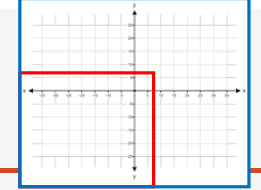
Yukarıdaki grafiğin gerekçeleriyle açıklanması sınav sorusudur!

Soldaki $^{18}\text{O}-^2\text{H}$ (oksijen 18- döteryum) grafiğinde grafiğin kullanımına ilişkin temel özellikleri gösterilmiştir:

- Diyagonal kalın sürekli çizgi Meteorik Su Doğrusu'dur (MSD, Meteoric Water Line, MWL). Çalışma alanımıza ait yerel veriler ile çizildiğinde bu doğruya Yerel MSD (YMSD) denir.
- Yağıştan buharlaşmanın yoğun olduğu bazı çöl iklimi bölgeleri dışında dünya genelinde MSD'lerinin eğimi 8'dir. Aslında bu genel bir kabuldür, gerçek ortalama değer 8.2 dolayındadır.
- Küresel Meteorik Su Doğrusu (KMSD, Global Meteoric Water Line, GMWL) +10 döteryum fazlası değerine sahiptir. YMSD'lerinin döteryum fazlası değeri yağışa kaynak oluşturan nemin rotasındaki iklim koşullarına bağlıdır. Ankara için +11, Antalya için +16, Adana için +20 değerleri söz konusudur.
- MSD'lerinde döteryum fazlası değeri yağış kaynak bölgesinin kurak olduğu yerlerde $>+10$, yağış kaynak bölgesinin nemli olduğu yerlerde $<+10$ değerlerini alırlar. Bütün MSD'leri KMSD'na paralel olur ve solunda ya da sağında uzanırlar.



$\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ Grafiği (kartezyen koordinat sisteminin sol alt bölümünü kullanır!)



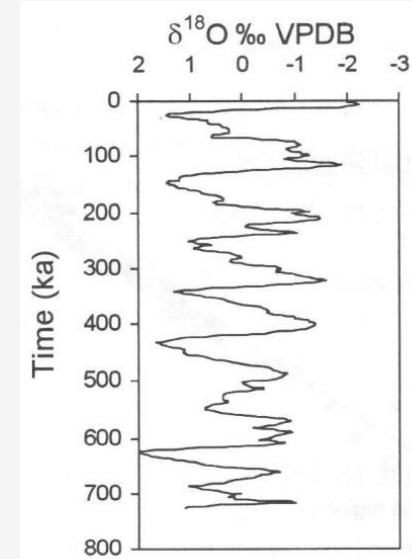
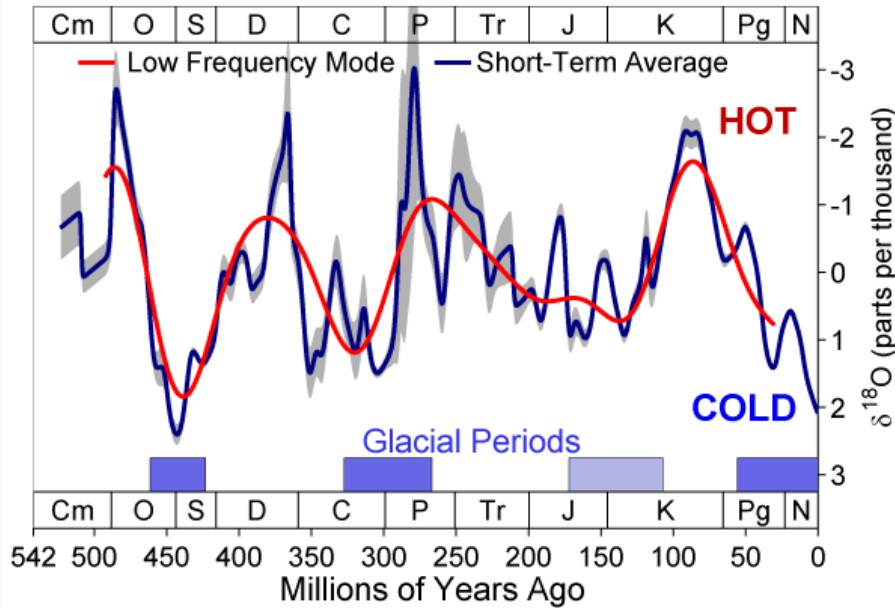
- Bir bölgede bağıl olarak daha soğuk aylarda (kışın), daha yüksek kotlarda, daha yüksek enlemlerde ve kara içlerinde gerçekleşen yağışlar MSD'nun sol alt kesiminde yer alırlar.
- Buna karşın, bağıl olarak daha ılıman aylarda (yazın), daha alçak kotlarda, daha alçak enlemlerde ve sahil kesiminde gerçekleşen yağışlar MSD'nun sağ üst kesiminde yer alırlar.
- Bu durumun nedeni yağışın gerçekleştiği ortamdaki hava sıcaklığını düşük ya da yüksek olmasıdır.
- Buharlaşımaya uğrayan akarsu, göl, baraj, yeraltısuyu vb örneklerde MSD'nun eğimi buharlaşma şiddetine bağlı olarak 7'den (az şiddetli) 4'e (çok şiddetli) doğru değişim gösterir.
- Doğrunun eğimi, buharlaşmanın nemli koşullarda gerçekleşmesi durumunda 7'ye, kurak koşullarda gerçekleşmesi durumunda 4'e yaklaşır.
- $^{18}\text{O}-^2\text{H}$ grafiğinin orijini VSMOW standardını temsil eder ($\delta^{18}\text{O} = 0 \text{ ‰ VSMOW}$, $\delta^2\text{H} = 0 \text{ ‰ VSMOW}$).



Okyanus Suyu $\delta^{18}\text{O}$ İçeriğinin Zamanla Değişimi

Yerkürenin güneş ve kendi etrafındaki dönüşünde gerçekleşen periyodik değişimler, volkanizma ve meteor çarpması gibi nedenler güneşten yerküreye ulaşan radyasyonu azaltmakta, bu durum sıcaklığın azalmasına ve iklimin değişmesine neden olmaktadır. Aşağıda, son 500 milyon yıl süresince iklimin nasıl değiştiği okyanus çökellerinden elde edilen ^{18}O verileri temelinde gösterilmiştir. Mavi bantlar buzul dönemleridir.

Kuvaterner Dönemi boyunca deniz suyu ^{18}O bileşiminin değişimi aşağıda gösterilmiştir. Pozitif yöndeki değişim meteorik dolaşımdaki suyun önemli bir bölümünün buzullarda kilitlenmesinden kaynaklanmaktadır. Buzullardaki suyun meteorik (hidrolojik) çevrime geri dönemeyişi deniz (okyanus) suyunun izotopik açıdan zenginleşmesine neden olmaktadır. Diğer bir deyişle buharlaşmada bağlı daha fazla ^{16}O 'lu suyun gaz faza geçmesinden dolayı deniz suyu ^{18}O açısından zenginleşmektedir. Günümüzde okyanus suyu ^{18}O ve ^2H içerikleri 0 ‰ VSMOW'dur.



Okyanus Suyu $\delta^{18}\text{O}$ İçeriğinin Buharlaştırma ile Değişimi

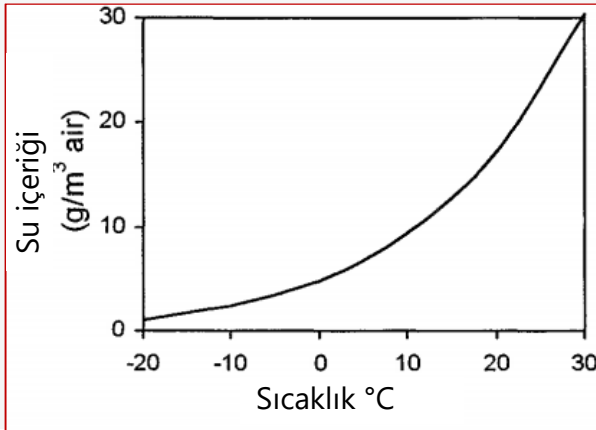
Okyanus suyunun troposfere buharlaşarak geçiş süreci esas olarak suyun sıcaklığı tarafından kontrol edilir ve bu da büyük oranda havanın nem (su içeriği) taşıma kapasitesini belirler.

Ortalama yıllık deniz yüzey suyu sıcaklıkları (SST, sea surface temperature) kutup bölgelerinde yaklaşık 0 °C'den Pasifik Okyanusu'nun doğu ekvator kısmında 29 °C'nin üzerine kadar değişir.

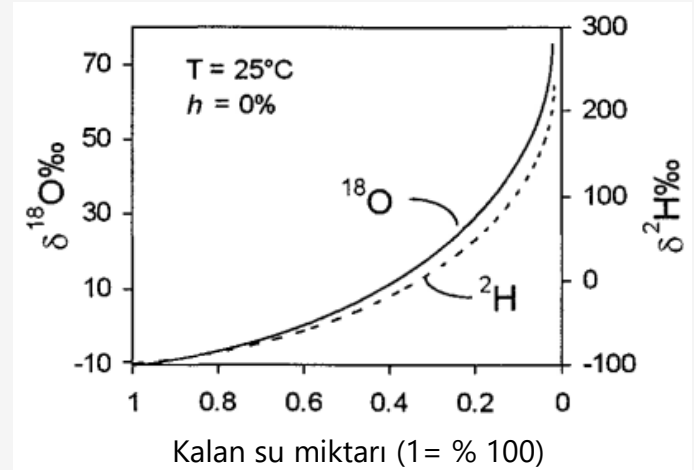
Troposferin en büyük nem kaynağı (>% 70), sıcak subtropikal denizlerdeki buharlaşmadır. Hidrolojik döngüdeki izotopik evrim bu bölgelerdeki buharlaşma ve buhar oluşumu ile başlar.

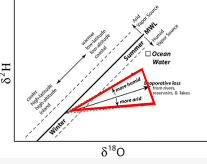
Buhara doymuş havanın nem taşıma kapasitesinin -20 °C'den 30 °C'ye üstel artışı aşağıda gösterilmiştir. Bu ilişki °C cinsinden T ile aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

Havanın su içeriği (g/m^3) = $0.0002 T^3 + 0.0111 T^2 + 0.321 T + 4.8$.



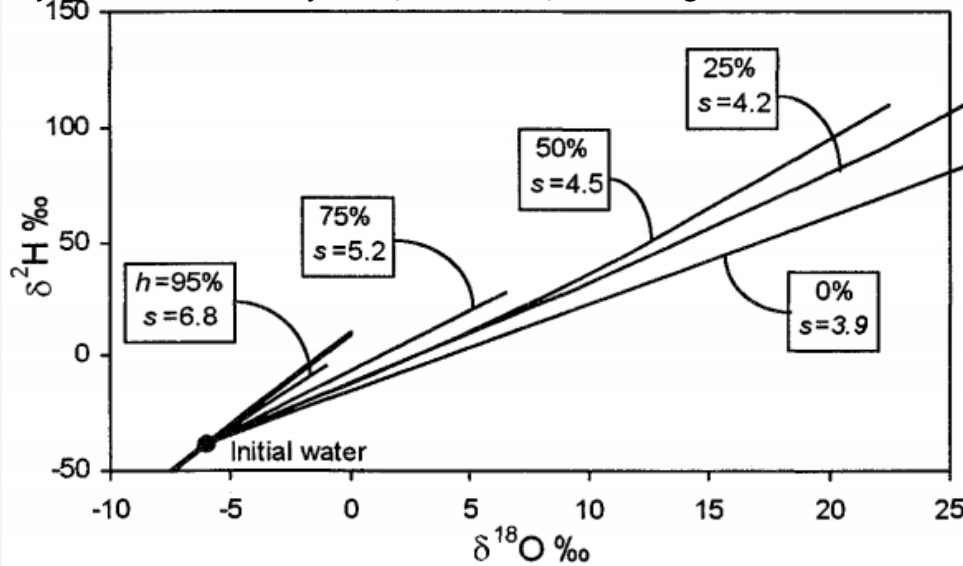
Kontrollü koşullar altında buharlaştırılan bir sudaki ^{18}O ve ^2H izotop içeriğinin buharlaşma ilerledikçe değişimi (Nem, $h = \% 0$, sıcaklık = 25 °C). Başlangıca göre kalan su miktarı 0'a yaklaştıkça, suyun ağır izotop içeriğinde üstel bir artış oluşur.





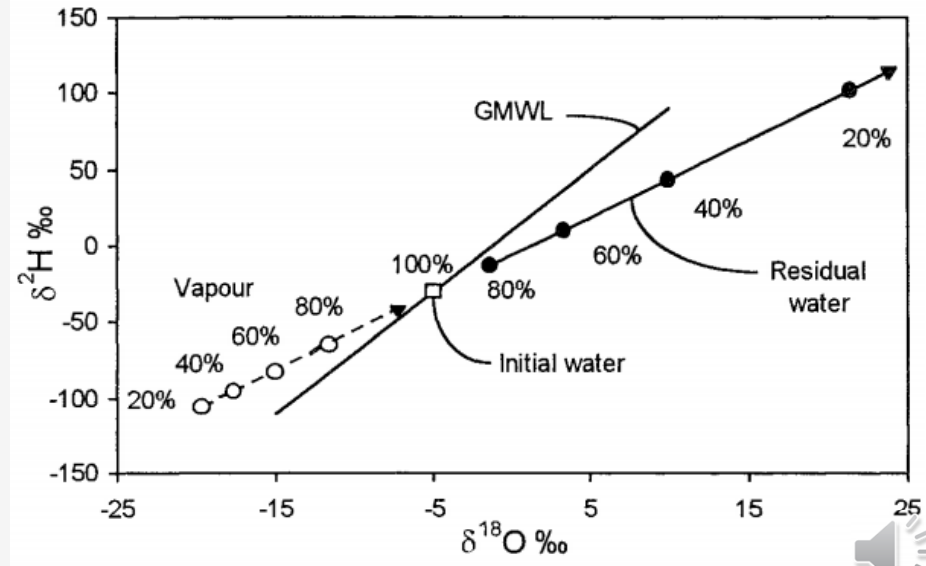
Buharlaşma Doğrusunun Eğimini Baēıl Nem İçeriēi Belirler

Meteorik su doğrusu üzerinde yer alan bir su buharlaşması sürecinde "Buharlaşma Doğrusu" üzerinde yol alır.
 Meteorik Su Doğrusunun eğimi 8 iken Buharlaşma Doğrusunun eğimi çoēunlukla 4 ile 7 arasında deēiřir.
 Buharlaşma Doğrusunun eğimi buharlaşma sırasındaki baēıl nem miktarına baēlıdır (% h, humidity, nemlilik).
 Baēıl nem içeriēi azaldıkça Buharlaşma Doğrusu'nun eğimi azalır.
 Kurumsal olarak en düşük eğim 4 civarında olup, bu durum yoēunkurak karasal ya da çöl iklim koşullarında gözlenir.



Baēıl nemin % 50 olduēu koşullarda buharlaşan suyun ve bu sudan itibaren oluşan nemin izotopik evrimi şekilde gösterilmiştir.

Dolu noktalar başlangıç anına göre (= % 100) buharlaşan suyun izotopik deēerini göstermektedir. Boř noktalar ise eř zamanlı olarak bu sudan oluşan nemin izotopik bileşimini göstermektedir. Yoēunlařma sürecinde nemin izotop içeriēi tersine rotayı izleyerek %100 noktasına doēru yaklaşır.



Döteryum Fazlası (DF) Neden Oluşur, Değerini Ne Belirler?

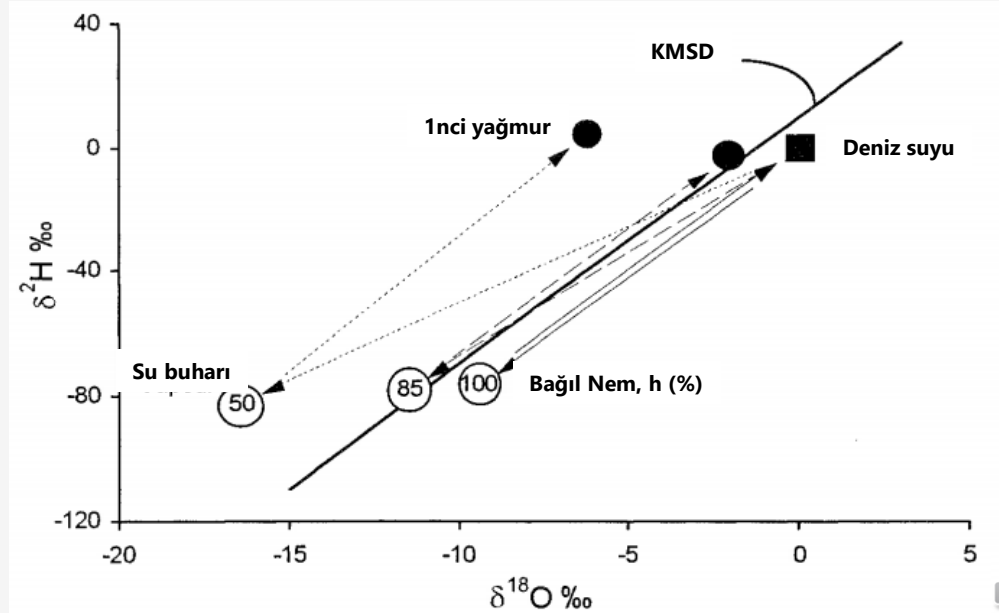
Yandaki şekilde deniz suyundan (siyah kare) çeşitli bağıl nemlilik düzeylerinde (daire içindeki sayılar) buharlaşan su buharının izotopik bileşiminin ^{18}O - ^2H diyagramında izleyeceği rotalar göstermektedir.

Diyagonal siyah çizgi Küresel Meteorik Su Doğrusu'nu (KMSD) göstermektedir. Bağıl nemin %100 olması durumunda deniz suyundan türeyen nemin izotopik kompozisyonu KMSD'na paralel olarak sol alta doğru uzanan hat üzerinde 100 dairesine doğru ilerleyecektir. Bağıl nemin %100 olması durumunda 100 dairesindeki nemden itibaren oluşan yağış ise sağ üste doğru ilerleyerek deniz suyunun izotopik bileşimine ulaşacaktır. Bu durumun nedeni % 100 bağıl nem koşullarında sıvı ve gaz fazlar arasında "izotopik dengenin" (equilibrium) kurulmasıdır. Buna karşın buharlaşma sırasında bağıl nemin % 100'den küçük olması durumunda izotopik ayrışma Dengesiz (non-equilibrium) koşullarda gerçekleşmekte izotopik ayrışmada kinetik etkiler egemen olmaktadır.

Bu durumda deniz suyunda itibaren oluşan nemin izotopik kompozisyonu bağıl nemin % 85 olması durumunda 85 dairesine uzanan hat üzerinde, bağıl nemin % 50 olması durumunda ise 50 dairesine uzanan hat üzerinde yer almaktadır. Bunlardan itibaren oluşacak yağışların izotopik bileşimi KMSD'na paralel olarak ilgili siyah dairelere doğru olacaktır.

KMSD'nun döteryum fazlası (DF) (Deuterium excess, DE) +10 iken, %85 ve % 50 bağıl nem koşullarında oluşan yağışlara ait meteorik su doğrularının döteryum fazlası değeri +10'dan daha büyüktür.

Diğer bir deyişle, döteryum fazlası değeri yağışa kaynak oluşturan buharlaşma koşullarındaki bağıl nem düzeyinin bir göstergesidir. Türkiye'ye Kuzey Afrika kıyı boyunca ulaşan yağışlarda DF +16-20 iken, Balkanlardan gelen yağışlarda DF +10-14 aralığındadır.



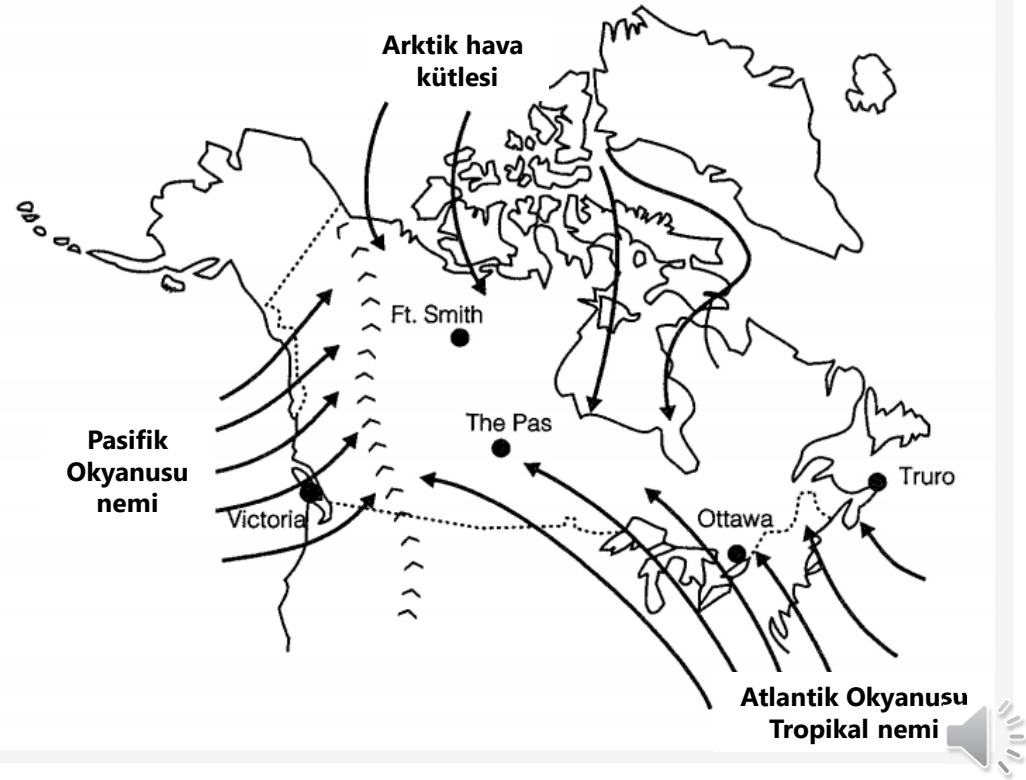
Döteryum Fazlası (DF) Değeri ve Yağış Neminin Kökeni

Kanada üzerinde farklı kökenli hava akımlarına bağlı yağışların kaynak bölgeleri sağdaki haritada gösterilmiştir. Bunlar a) Arktik hava kütlesi, b) Pasifik Okyanusu Nemi ve c) Atlantik Okyanusu Tropikal Nemi şeklindedir.

Aşağıdaki Tablodaki Yıllık (Year), Yaz (summer) ve Kış (winter) yağış verilerine ait ^{18}O - ^2H doğrularına ait eğim, kesişim ve döteryum fazlası (DF) değerleri yağışa kaynak oluşturan nemin geldiği bölgeye ve zaman göre değişim göstermektedir.

Sınav sorusu: Bu değişimlerin nedenini yorumlayınız.

İstasyon	İklim	Mevsim	$\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$		DF
			Eğim	Kesişim	
Victoria	Pacific marine	Year	7.8	2.9	3.6
		Summer	8.3	3.9	1.6
		Winter	7.5	-1.6	3.9
Le Pas	Western interior	Year	7.6	0.6	5.6
		Summer	7.4	-3.0	3.5
		Winter	8.0	11.3	10.4
Ottawa	Eastern interior	Year	7.6	6.5	12.2
		Summer	7.5	4.8	11.0
		Winter	7.9	11.0	14.7
Truro	Atlantic marine	Year	7.4	5.6	10.6
		Summer	7.8	8.3	8.2
		Winter	7.4	5.2	12.8
Fort Smith	Arctic continental	Year	7.5	-4.9	0.3



Meteorik Su Doğrusunun Eğimi - Sıcaklık İlişkisi

Bulutlardaki buhar ve nemin iyi karışımı, bu iki faz arasındaki izotopik dengenin sürdürülmesi yoluyla ^{18}O ile ^2H arasındaki meteorik ilişkinin korunmasını sağlar.

Bu nedenle, bulut içi sıcaklık düştükçe ve yağış devam ettikçe yağış suyu buhar fazıyla kurduğu dengeli izotopik ayrışma tarafından belirlenen bir izotopik bileşime sahip olacaktır.

Dengeli izotropik ayrışma sonucu belirlenen bu tür yağış suları eğimi 8 olan ^{18}O - ^2H meteoric doğrusu yakınlarında yer alırlar.

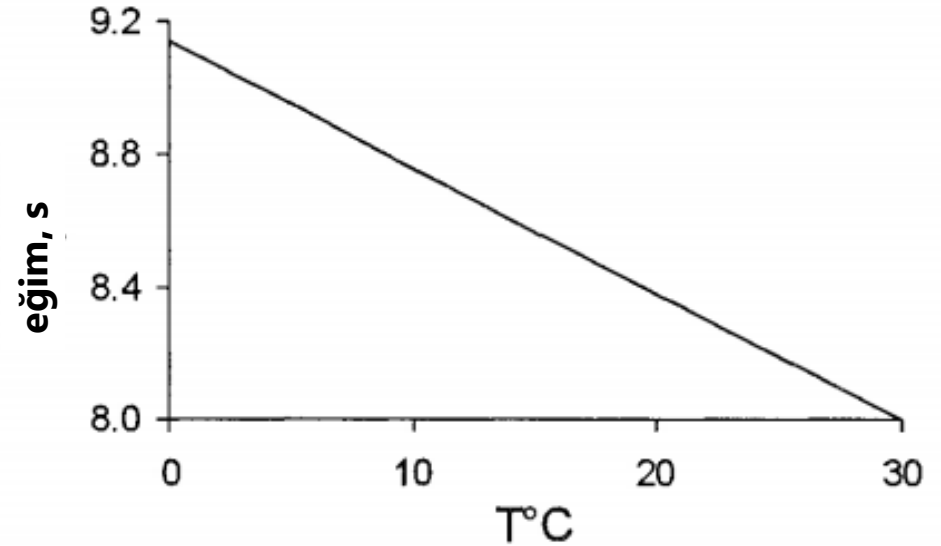
Eğimin ~8 olması, sağdaki eşitlikte gösterildiği gibi ^2H ve ^{18}O için $10^3 \ln \alpha$ şeklinde ifade edilen denge izotopik ayrışma faktörlerinin (equilibrium isotope fractionation factor) oranı ile ilgilidir.

Gerçek eğim değerini belirleyen etken ise, sağdaki grafikte gösterildiği gibi yağışı oluşturan nemin ortalama yoğunlaşma sıcaklığıdır.

Bununla birlikte, yoğunlaşma sonrası oluşabilecek buharlaşma ve tekrar yoğunlaşma süreçleri söz konusu eğim değerini değiştirebilirler.

Örneğin Suudi Arabistan üzerinde etkili yağışlara ait YMSD'nun eğimi yoğunlaşma sonrası oluşan buharlaşmadan dolayı 6 civarındadır..

$$s \approx \frac{10^3 \ln \alpha^{^2\text{H}}_{\text{l-v}}}{10^3 \ln \alpha^{^{18}\text{O}}_{\text{l-v}}} = 8.2 \quad \text{at } 25^\circ\text{C}$$



Rayleigh (reyley) modeline göre yağış süresince izotopik bileşimin değişimi

Yağışın gerçekleşmesi için iki temel şart atmosferde nemin (su buharının) olması ve sıcaklığın düşmesidir.

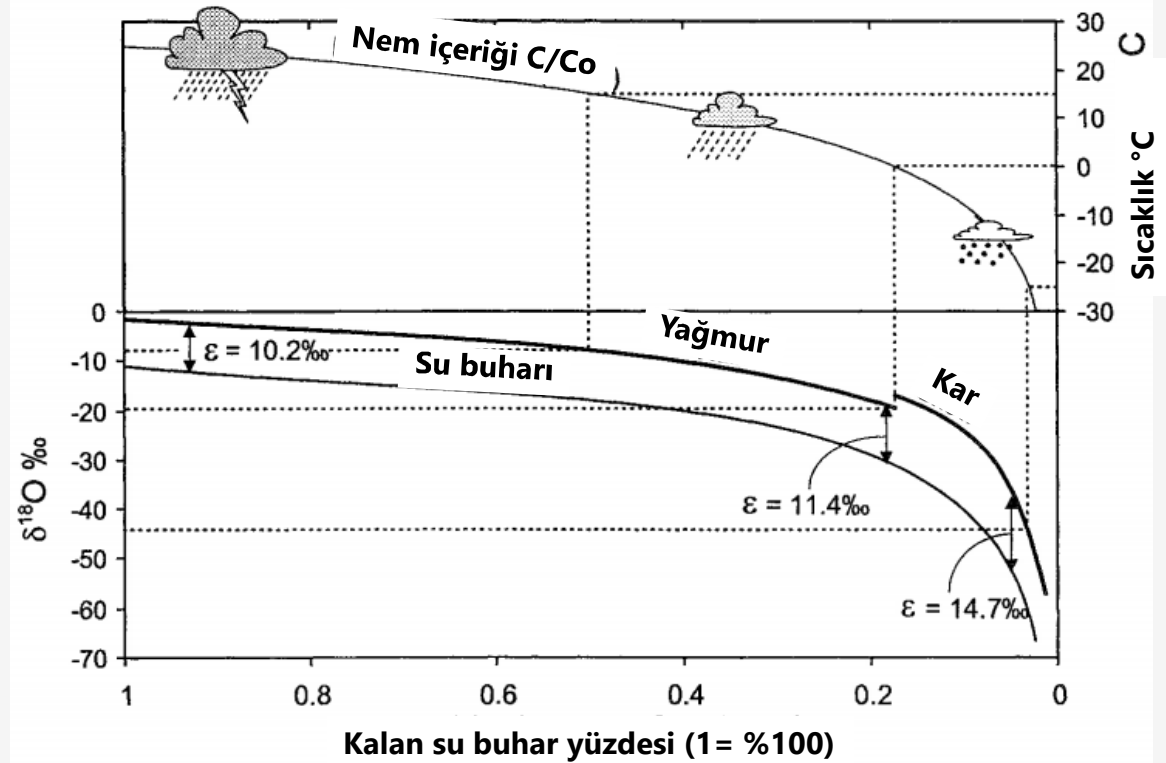
Yağış bir yoğunlaşma sürecidir.

Atmosferde yoğunlaşacak nem yok ise sıcaklık düşse bile yağış gerçekleşmez. Nitekim yer kürenin en kurak bölgeleri kutuplardır.

Diğer yandan atmosferde yüksek miktarda nem olsa bile, sıcaklık azalmaz ise yoğunlaşma/yağış gerçekleşmez.

Bağıl nem, o sıcaklıkta atmosferin taşıyabileceği maksimum nem (su içeriği) miktarına (% 100) göre mevcut nemin (su içeriğinin) % büyüklüğüdür. Bağıl nem % 100'ü geçemez.

Sağdaki şeklin adı Rayleigh /reyley okunur) Damıtım Grafiğidir.



Rayleigh (reyley) modeline göre yağış süresince izotopik bileşimin değişimi

Rayleigh eşitliği sağda gösterilmiştir.

Burada;

R_0 , su buharının başlangıç izotop oranıdır ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ veya $^2\text{H}/^1\text{H}$).

R su buharının belirli bir oranının yağışa dönüşmesinden sonraki izotop oranıdır.

Bulutta kalan su buharının başlangıçtaki miktarına oranı f ile gösterilir.

İzotopik ayrışma faktörü α , bulut içi sıcaklıktaki denge (equilibrium) su-buhar izotopik ayrışma faktörüdür.

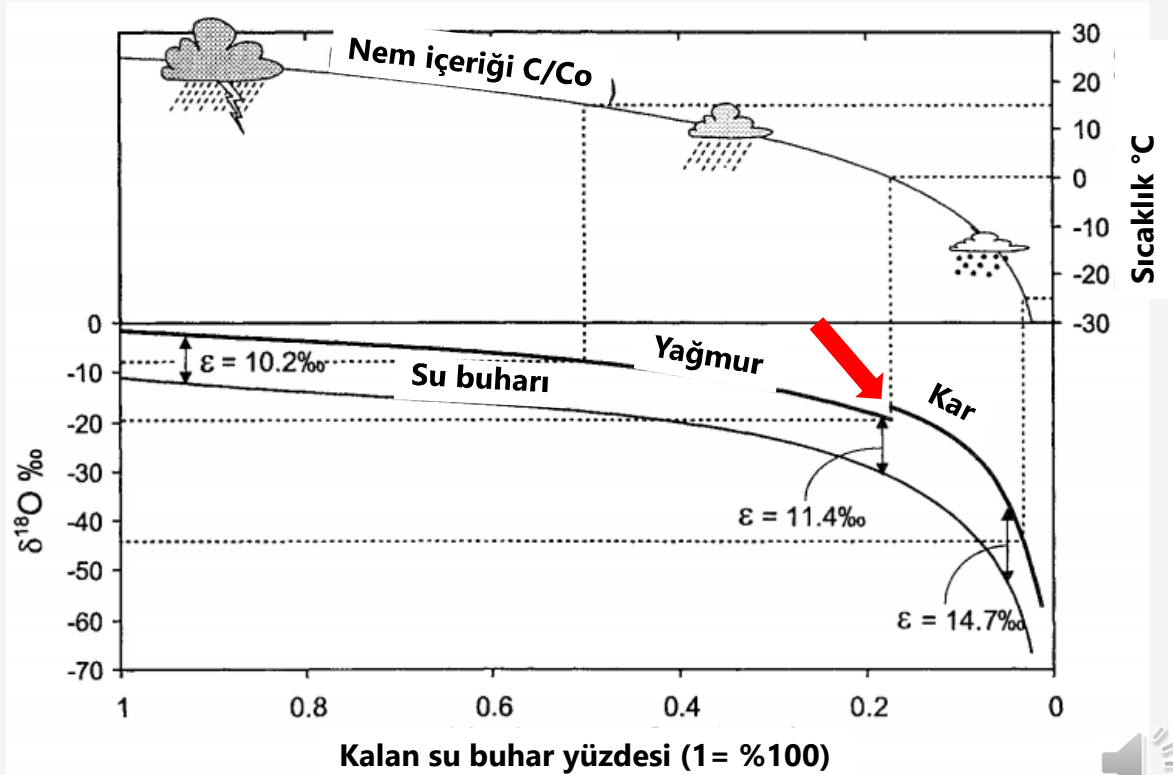
Sağdaki grafik Rayleigh (reyley) damıtım sürecinde yağışın ^{18}O içeriğindeki değişimi göstermektedir.

Başlangıç ^{18}O vapour = -11‰, sıcaklık = 25 °C ve son sıcaklık -30 °C'dir. 0 °C'de kar ve su buharı arasındaki izotopik ayrışmanın başlangıçtaki yağmur ve su buharı izotopik ayrışmasının yerini aldığına dikkate edin (kırmızı ok). Noktalı çizgiler yağışın ^{18}O içeriği ile ilgili yoğunlaşma sıcaklığı arasında bağlantıyı göstermektedir.

Grafikte yağış 25 °C'de başlamakta, sıcaklık -30 °C'ye azalana kadar devam etmektedir. Bir yağış olayının devam etmesi sıcaklığın sürekli olarak azalmasına bağlıdır. Sıcaklık azalmaz ise, atmosferde su buharı (nem) olsa bile yağış gerçekleşmez.

$$R = R_0 f^{(\alpha-1)}$$

$$\varepsilon_{^{18}\text{O}_{\text{su-buhar}}} = \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{su}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{buhar}}} - 1 \right) 1000$$



Devam Eden Yağış Süresince Duraylı İzotop İçeriğinin Değişimi

Sağdaki Grafikte yağış 25 °C'de başlamakta, sıcaklık -30 °C'ye azalana kadar devam etmektedir.

Bir yağış olayının devam edebilmesi sıcaklığın sürekli olarak azalmasına bağlıdır. Sıcaklık azalmaz ise, atmosferde su buharı (nem) olsa bile yağış gerçekleşmez.

Bu örnekte yağış süreci 25 ° C'de, % 85 nemde deniz suyundan (VSMOW) buharlaşan bir su buharıyla başlamaktadır.

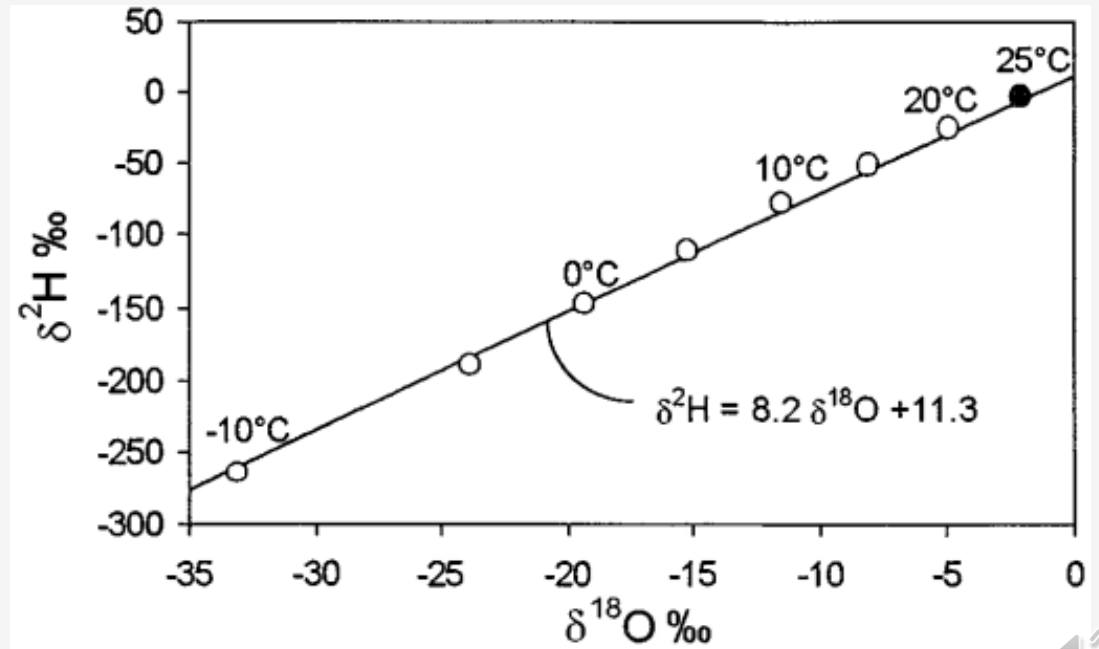
Yağış sıcaklık azaldıkça devam etmekte ve azalan sıcaklık sonucu oluşan her yeni yoğunlaşma sonucu gerçekleşen yağışın izotopik içeriği daha da negatifleşmektedir (yağış ^{18}O açısından fakirleşmektedir. Bu durum ^2H için de geçerlidir).

Yağışın devam etmesi için hava sıcaklığının sürekli olarak azalması gerekmektedir. Bu koşul iki şekilde sağlanabilir:

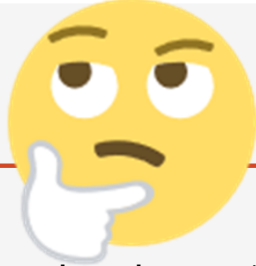
- 1) Hava kütlesi sürekli yükselerek daha da soğur (orografik yağış),
- 2) Soğuk bir hava kütlesi yağış oluşturan nemli hava kütlesini sürekli olarak soğutur (cephesel yağış).

Orografi: Yükselti, dağ, topografik engel

Soru: Akdenizden Toroslara doğru ilerleyen bir yağış cephesinin Antalya'ya (20 m) Kocaaliler'e (800 m) bıraktığı yağışın izotopik kompozisyonlarını aşağıdaki grafik üzerinde kabaca gösteriniz.



Sorular?



- Yağışı oluşturan nemin başlıca kaynağı nedir?
- Okyanus suyunun $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerleri nedir?
- Hidrolojik çevrim sırasında su buharının-nemin-yağışın izotopik bileşimi neden değişir?
- KMSD ve YMSD nedir, özellikleri nelerdir?
- Bir $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ grafiği çizip, bu grafikten ne gibi bilgiler edinilebileceğini açıklayınız?
- Buzul iklim koşullarında deniz suyunun izotop içeriği nasıl değişmiştir?
- Buharlaştıran suyun izotop içeriğini neden ve nasıl değiştirir?
- Buharlaşma doğrusunun eğimini ne belirler, nasıl?
- DF nedir, değerini ne belirler?
- MSD'nun eğimini ne belirler?
- Rayleigh damıtımı nedir, yağış süresince yağışın izotopik bileşimi nasıl değişir?

