Yağışın Parmak İzi ve Paleoklimatoloji'de Kullanımı

Precipitation's fingerprint and it's usage in paleoclimatology

Mesut Demircan[1†], Hakan Yiğitbaşioğlu [2]

[1]*Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.*

[2]*A.Ü. DTCF Fakültesi Coğrafya Bölümü, Ankara*

Öz: *Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA) ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO), şu anda yaklaşık 220 aktif izleme istasyonundan oluşan 1961'li yıllardan beri devam eden Yağışın İsotop İçeriği Küresel Şebekesi (GNIP) programını yürütmektedir. GNIP, Dünya genelinde, yağışın oksijen ($^{18}O/^{16}O$) ve hidrojen ($^{2}H/^{1}H$, $^{3}H/^{1}H$) içeriklerinin zamansal ve uzamsal kayıtlarını sağlamaktadır. İzotop içerikleri çoğunlukla aylık yağış örneklerinden ölçülmektedir. Su her yerde aynı görünüyor olsa da, kökeni ve yaşını belirlemek için kullanılan izotop "parmak izi" taşır. İzotoplar, aynı elementin farklı ağırlıklardaki atomlarıdır. Dünya genelinde, yağıştaki su moleküllerinin izotoplarının oranları, buharlaşma ve yoğunlaşmanın doğal aşamaları sonucunda, sıcaklık ve yükseklik etkileri nedeni ile değişir. Sonuç olarak, her yerel yağış kendi izotop "imzası" veya "parmak izi"ne sahiptir. Bu izotopik "parmak izi" yeraltı suyu içine taşınmaktadır ve yeraltı sularının akış hızlarını, dolma-boşalma oranlarını ve yaşını, belirlemek için kullanılabilir. Kutuplardaki buzulların, göl çökelleri ve yeraltı sularındaki izotopların "doğal arşivlerinin" çalışması sayesinde, geçmiş hidrolojik koşulları yeniden canlandırılabilir. Geçmiş hidrolojik ve iklim sistemlerinin zamanla nasıl değiştiğini anlamak gelecekteki değişimleri – geleceğe bakış için – tahmin etmek ve dünyanın değişen iklimin olumsuz etkilerini en aza indirme tedbirleri geliştirmek için bir anahtardır. Çalışmada Türkiye için izotop ölçümlerinin zamansal ve uzamsal dağılımları incelenecektir.*

Anahtar kelimeler: *İklim, Yağış, İzotop, ^{18}O, ^{16}O, ^{2}H, ^{1}H* **.**

Abstract: The Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) programme is operated by the IAEA in cooperation with the World Meteorological Organization (WMO), and currently is comprised of about 220 active monitoring stations since 1961. GNIP provides spatial and temporal records of oxygen ($^{18}O/^{16}O$) and hydrogen ($^{2}H/^{1}H$, $^{3}H/^{1}H$) contents in precipitation around the world. Isotope contents are mostly measured in composite samples of monthly precipitation. While water looks the same everywhere, it carries isotopic 'fingerprints' which can be used to determine its origin and age. Isotopes are atoms of the same element with different weights. Across the globe, proportions of isotopes in water molecules in precipitation vary as a result of natural processes of evaporation and condensation, and because of the effects of temperature and altitude. Consequently, precipitation in each location has its own isotopic 'signature' or 'fingerprint'. These isotopic 'fingerprints' are carried into groundwater and can be used to determine the age, recharge rates, and flow velocities of groundwater. Through study of water isotopes 'naturally archived' in polar ice caps, lake sediments, and groundwater, past hydrological conditions can be reconstructed. Understanding how past hydrological and climate systems have changed over time holds the key to predicting future change— looking 'back to the future' — to develop options for minimizing the adverse effects of the world's changing climate. In this study, isotope measurements for Turkey will be examined as temporal and spatial distributions.

Keywords: Climate, Precipitation, Isotop, ^{18}O, ^{16}O, ^{2}H, ^{1}H**.**

[†] *İletişim yazarı: M.Demircan , mdemircan@mgm.gov.tr*

1. GİRİŞ

Su, dünya hidrosferinde yer alır ve yenilenebilen kısıtlı bir kaynağa sahiptir. Bu suyun miktarı ise 1 400 000 km3 olarak tahmin edilmektedir. Dünyanın üçte ikisi sularla kaplı olmasına rağmen, tuzlu sular toplam su miktarının %97.5'ini, tatlı sular ise ancak %2.5'ini oluşturmaktadır. Su kaynakları, günümüzde dünya üzerindeki bazı bölgeler için yetersiz, bazı bölgelerde de ancak yetmektedir. Bununla birlikte nüfus artışı, su kaynaklarının kirletilmesi gibi sebepler göz önüne alındığında, su kaynaklarının zamanla tüm bölgelerde yetersiz kalacağı açıktır. Ülkemiz ise su kaynakları açısından küresel değerlendirmelere bakıldığında, su kıtlığı çeken ülkeler arasında gösterilmemektedir. Bununla birlikte nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme gibi nedenlerle artan su tüketimi, yenilenebilir tatlı su kaynaklarımızda miktar olarak bir azalmaya sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra su kaynaklarında aşırı çekim sonucu yeraltısuyu tuzlanması, tarımsal faaliyetlerde kullanılan kimyasallar ile evsel ve endüstriyel atıklar nedeniyle kirlenme yaşanmakta ve su kaynaklarının nitelik açısından korunması gereği ortaya çıkmış bulunmaktadır(Çifter, C. ve Sayın, M., 2002; Demircan, M., 2006). Bu çerçevede, sürekli artan endüstriyel gelişim ve artan nüfus baskısı altında kalan su kaynaklarının geliştirilerek verimli ve sürdürülebilir olarak kullanılabilmesi için pek çok projenin etüdünün gerekliliği ve bu etütlerde de klasik incelemelerin dışında ileri tekniklerin kullanılması zorunlu hale gelmeye başlamıştır. İzotop hidrolojisi çalışmaları bu tekniklerin başında gelmektedir.

Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA) ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) dünya üzerinde seçilmiş olan yağış istasyonlarından 60'lı yıllardan beri çevresel izotop içeriklerini belirlemek için örnekler toplamaktadır. Bu istasyonlardan elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucu Oksijen-18 ve Döteryum verileri arasındaki ilişki küresel ölçekte belirlenmiş ve $\delta D = 8\delta 18O + 10$ doğrusu Global Meteorik Su Doğrusu (GMWL) olarak verilmektedir. Ancak bu doğru küresel ölçekte yerel iklime ve topografya koşullarına göre farklılıklar göstermektedir (Schotterer, vd., 1996; Demircan, M., 2006).

IAEA ve WMO tarafından işbirliği içerisinde işletilen GNIP şebekesinde bulunan Ankara, Antalya ve Adana istasyonlarında 1960'lı yıllardan beri yağış örneği toplanarak analiz için Viyena'ya gönderilmiştir. Bunlardan başka Sinop ve Diyarbakır istasyonları da 1966-1967 yılları arasında bu şebekede görev yapmışlardır. GNIP şebekesinde çalışmayan eski istasyonların aktif hale getirilmiş ve şebekeye yeni istasyonların eklenmiştir. Şebekede yağış örneği toplanan istasyonlar şunlardır; Edirne, Sinop, Rize, İzmir, Ankara, Erzurum, Antalya, Adana ve Diyarbakır meteoroloji istasyonlarıdır (Demircan, M., 2006).

2. YAĞIŞIN İZOTOP İÇERİĞİ

2.1. İzotop Nedir?

Bir elementin atom numarası aynı fakat farklı kütle numarasına sahip atomlarına, diğer bir değişle proton sayıları aynı, ancak nötron sayıları farklı olan atom çekirdeklerine "izotop" denir. Bir elementin farklı sayılarda izotopları olabilir. Bu izotoplar, nötron sayıları farklı olduğundan, farklı kütle numaralarına sahiptirler. Örneğin, Hidrojen elementinin 3 izotopu vardır (Şekil 1.1). Oksijenin $_{16}O$, $_{17}O$ ve $_{18}O$ olmak üzere üç tane doğal izotopu vardır. Bir elementin bütün izotopları aynı kimyasal özellikleri gösterir. Ancak fiziksel özellikleri farklıdır.

Şekil 1. Hidrojen elementinin izotopları

İzotoplar kararlı ve radyoaktif izotoplar olmak üzere olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kararlı izotoplar kararlı bir çekirdek yapısına sahiptirler, kapalı bir sistemde kararlı izotopların atomik konsantrasyonlarında hiçbir değişiklik olmaz. Radyoaktif izotopların çekirdekleri ise kararsız bir yapıya sahiptir ve zamanla parçalanarak başka elementlerin izotoplarına dönüşürler(Çifter, C. ve Sayın, M., 2002; Demircan, M., 2006).

2.2. Kararlı İzotoplar

Hidrolojide kullanılan başlıca izotoplar suyun yapısında bulunan oksijen ve hidrojenin izotoplarıdır. Ayrıca azot, klorür, kükürt, asal gazlar, uranyum ve toryum ve benzeri elementlerin izotoptarı da yüzey ve yeraltısuyu sistemlerinde kirleticinin kökenlerinin belirlenmesi, hareketinin saptanması ve benzeri çalışmalarda etkin olarak kullanılmaktadır.

H elementinin kütle numarası 1 olan ^{1}H-hidrojen izotopu %99.985 ile doğada en fazla bulunma oranına sahiptir. Hidrojen elementinin kütle numarası 2 olan ağır izotopu ^{2}H-döteryum ise daha az bulunmaktadır. Oksijen elementinin üç adet kararlı izotopu (^{16}O , ^{17}O, ^{18}O) mevcuttur.

Oksijen ve hidrojenin karalı izotopları hidrolojik çalışmalarda genellikle izleyici olarak kullanılmaktadır. Su numunesi içerisindeki izotopların bolluğu onların ^{2}H/^{1}H veya ^{18}O/^{16}O gibi izotopik bolluk oranlarıyla verilebilir. Oranlardaki bu değişimler ancak kütle spektrometreleriyle saptanabilir.

Hidrolojik çevrim içerisinde deniz ve okyanuslardan oluşan su buharının bir kısmı daha düşük sıcaklığa sahip kara içlerine geldiğinde yoğunlaşma nedeniyle yağmur haline dönüşür. Geri kalan su buharı kara içlerine doğru hareketlerine devam ederken yer yer soğuyarak yoğunlaşır(Sayın, M. ve Eyüpoğlu, S.Ö., 2005; Demircan, M., 2006).

Yeraltısularının izotopik kompozisyonu hidrolojik çevrimin başlangıcı olan yağışların izotopik kompozisyonu ile ilgilidir. Hidrolojik çevrimdeki tabii sular farklı oranlarda Oksijen-18 (^{18}O) ve Döteryum ihtiva etmektedir. İzotopik çevrimde yeraltısuyunun en büyük kaynağı okyanuslar olup kararlı izotop konsantrasyonu sabittir. Diğer bütün suların izotop değerleri, δ değeri sıfır kabul edilen SMOW (Standard Mean Ocean Water)'a göre ölçülmektedir. Numunenin ağır izotop içeriği, bir referansın ağır izotop içeriğinden olan bağıl farkla, yani numunenin referansa göre izotopik konsantrasyonunu ifade eden δ değeri ile gösterilmektedir. Matematiksel olarak gösterecek olursak;

$$\delta\,(‰) = \frac{R_{numune} - R_{standart}}{R_{standart}} \times 1000$$

Bilindiği gibi doğal sularda ^{18}O/^{16}O ve D/H izotopik oranlarının değişimi buharlaşma ve yoğunlaşma sonucu olur. Su, yoğunlaşma ve buharlaşma durumuna geçtiği zaman suyun farklı izotopik gruplarında hava içerisindeki buhar basınçları ve diffüzyon hızlarındaki farklılık nedeni ile izotopik ayrışma meydana gelir. Sıcaklık yağışlardaki izotopik ayrışmayı kontrol eder. Su molekülünde bulunan hidrojen ve oksijen izotopları, küresel döngü içinde hem geçmişteki değişiklikleri hem de gelecekteki davranışları anlamak açısından mükemmel bir izleyicilerdir. Meteorik suların izotopik kompozisyonundaki en önemli değişiklikler troposferde gerçekleşir. Meteorik sularda kararlı izotop dağılımının karakterize edilmesi yeraltısularının incelenmesi açısından çok önemlidir.

Atmosferik buharın yoğunlaşması ve soğuması sonucu ardı ardına meydana gelen yağışın ağır izotop kompozisyonu, meydana geldiği buhar fazının ağır izotop kompozisyonuna göre zenginleşmiş ancak kendisinden önceki yağışın ağır izotop içeriğine göre fakirleşmiştir. Buhar ve sıvı dönüşümleri sırasında oluşan izotopik ayrımın derecesi sıcaklık faktörü ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle sıcaklık ile izotopik kompozisyon arasında pozitif bir ilişki vardır.

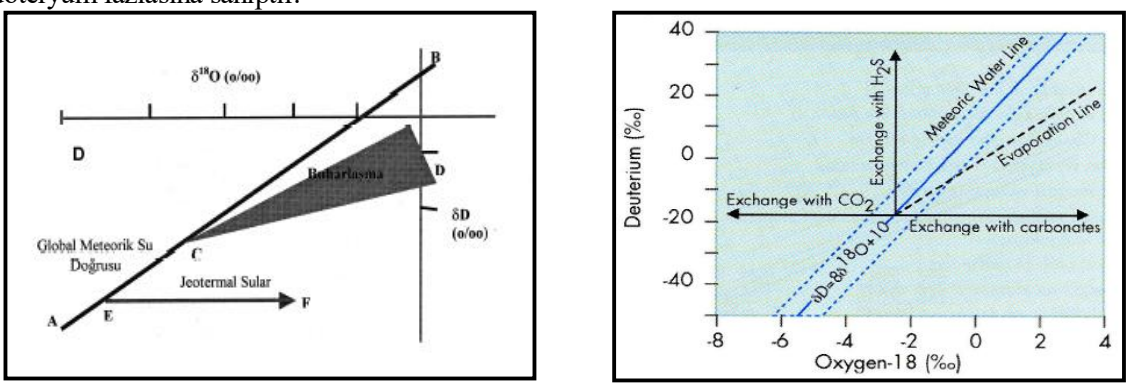
Okyanuslardan meydana gelen atmosferik su buharı O-18 için -12 ve -15, döteryum için -90 ile -110 aralığında değişen δ‰ izotop kompozisyonuna sahiptir. Tersi olarak yağışlar geniş bir aralıkta kararlı izotop değişimi gösterir. Okyanuslardan oluşan su buharı O-18 ve D ağır izotopları bakımından dar bir limit içinde değerlere sahip olmalarına karşılık yoğunlaşma prosesi ile oluşan yağışlar geniş bir limit içerisinde kararlı izotop değişimleri göstermektedir.

IAEA ve WMO tarafından organize edilen şebeke istasyonlarına ait yağışların kararlı izotop içerikleri periyodik olarak ortalama ve ağırlıklı ortalama δ değerleri alınarak yayınlanmaktadır. Ortalama değerler aritmetik ortalama alınarak hesaplanmıştır. Ağırlıklı ortalama değerler ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{\delta}_W = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i \delta_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i}$$

Bu eşitlikte P_i aylık yağış miktarını, δ_i ise ait olduğu yağışın ağır izotop içeriğini göstermektedir. Şebeke istasyonlarına ait yağışlar ağırlıklı ortalama değerleri olarak ^{18}O için -1.2 ‰ ile -25.17 ‰ değerleri arasında döteryum için +l ‰ ile 185.9 ‰ değerleri arasında ağır, izotop içeriği göstermektedirler.

Meteorik sularda D ile ^{18}O arasındaki ilişki birçok hidrolojik ve klimatolojik uygulamalarda temel oluşturmaktadır. $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ doğrusu Global Meteorik Su Doğrusu (GMWL) olarak bilinmektedir. GMWL'dan sapmalar yağış kaynak bölgesinin özel atmosferik koşullarını işaret eder. Döteryum fazlası kavramı ilk olarak Dansgaard tarafından **$d = 8D - 8*\delta^{18}O$** şeklinde tanımlanmıştır. Döteryum fazlalığı (d) rüzgar hızı ve buharlaşma boyunca deniz yüzeyi sıcaklığının yanında en fazla yerel nemden etkilenir. Bu ilişki şu anda çok iyi anlaşılmış ve Raighleigh yaklaşımına dayalı olarak açıklık kazanmıştır. Denge koşullarında faz değişimine ek olarak, kinetik etki havadaki su moleküllerin izotopik farklılığı sonucu farklı difüzyon hızlarına sahip olmalarından kaynaklanır. $H^{16}O$'nun difüzyon hızının $H^{18}O$'dan fazla olması sonucu daha fazla döteryum fazlasına sahip olacaktır. Ortalama 85% nem ile GMWL değeri 10 olan döteryum fazlasına sahiptir.



Şekil 2. Global Meteorik Su Doğrusu

2.3. Radyoaktif İzotoplar

İzotop hidrolojisi çalışmalarında kullanılan radyoaktif izotopların başında hidrojen elementinin kütle numarası 3 olan Trityum (^{3}H) ve karbon elementinin kütle numarası 14 olan Karbon-14 (^{14}C) izotopları gelmektedir(Çifter, C. ve Sayın, M., 2002; Demircan, M., 2006).

Yarı ömrü 12.32 yıl (4500±8 gün) olan ve beta bozunması veren trityum, atmosferin üst tabakalarındaki azot atomlarıyla kozmik nötronların etkileşmesinden doğal olarak oluştuğu gibi, termonükleer denemeler sonucunda da oluşmaktadır. Trityum atomları doğada 1.10^{-15} oranında bulunur. Su içerisindeki trityum konsantrasyonu trityum birimi (TU) olarak verilmektedir. Yani 10^{18} hidrojen atomuna karşı bir trityum atomunun bulunması "1 Trityum Birimi (TU)" olarak tanımlanır. Radyoaktif olmasından dolayı uğradığı zamansal değişim nedeniyle yeraltı sularının bağıl yaşının (eskilik derecesi) belirlenmesi çalışmalarında kullanılmaktadır. Ayrıca yeraltı sularının rezervuarda yenilenme sürelerinin tahmini yapılmaktadır. Yenilenme süresinin tahmini yeraltı suyu hareket hızının belirlenmesinde rol oynamaktadır.

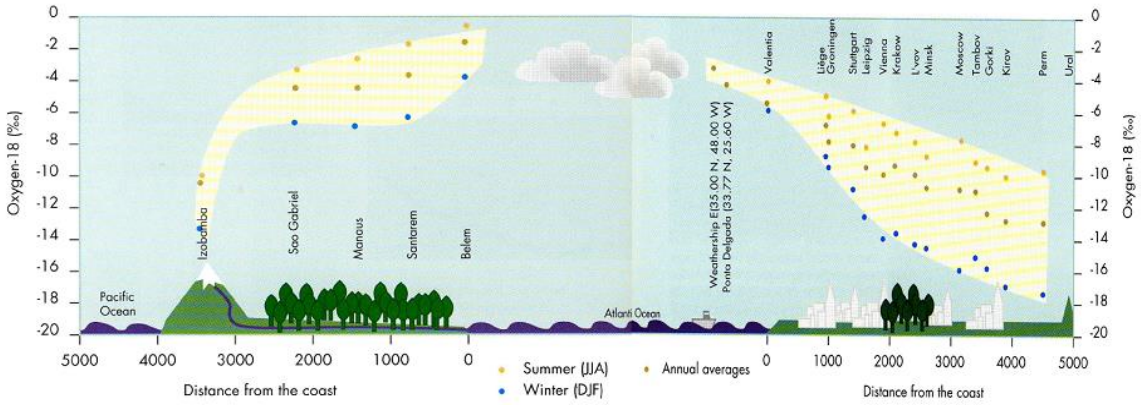
Radyoaktif izotopların bir başkası ise karbon-14' dür. Karbon -14, 5730 yıl yarı ömre sahiptir ve 156 keV maksimum beta enerjisi verir. Doğada 1.10^{-12} bolluğunda bulunan bu izotop da trityum izotopu gibi atmosferde doğal olarak ve nükleer denemelerle oluşarak hidrolojik çevrime girer. Karbon-14 genelde yeraltı suyu yaşının belirlenmesi amacıyla kullanılır.

2.4. Yağışların Kararlı İzotop İçeriğini Etkileyen Faktörler

2.4.1. Karasal etki

Yağışların kararlı izotop içerikleri üzerine etki eden faktörlerden biri de yağışların ait oldukları istasyonların okyanusa olan mesafeleridir. Benzer enlemlerde bulunan kıyı ve ada istasyonları yağışları ile

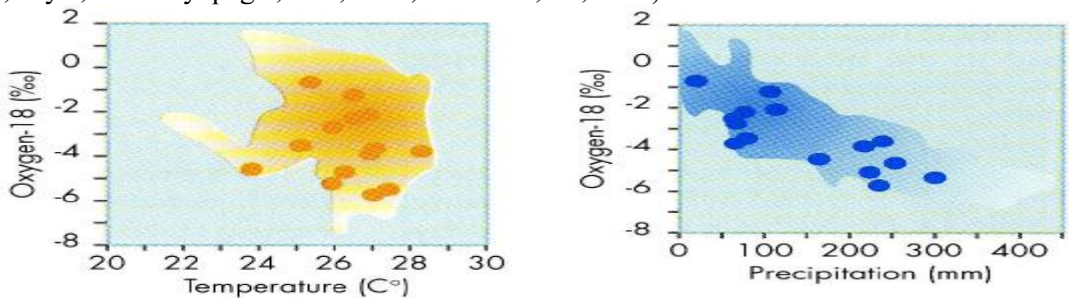
kara istasyonlarına ait yağışların kararlı izotop değerleri karşılaştırıldığı zaman kıyı ve ada istasyonlarının ağır izotop bakımından daha zengin olduğu görülmektedir. Bu etkinin nedeni daha önce açıklandığı gibi okyanuslardan oluşan su buharının daha soğuk olan kara üzerine hareketleri esnasında ardı ardına yoğunlaşması sonucu oluşan yağmurların ağır izotop içeriklerinin kendini oluşturan atmosferik buhara göre zenginleşmesine karşılık kendisinden önceki yağışa göre ağır izotop içeriği bakımından fakirleşmesidir(Schotterer, vd., 1996; Sayın, M. ve Eyüpoğlu, S.Ö., 2005; Demircan, M., 2006).



Şekil 3. Oksijen-18 değerlerinin karasallığa bağlı olarak değişimi.

2.4.2. Sıcaklık etkisi

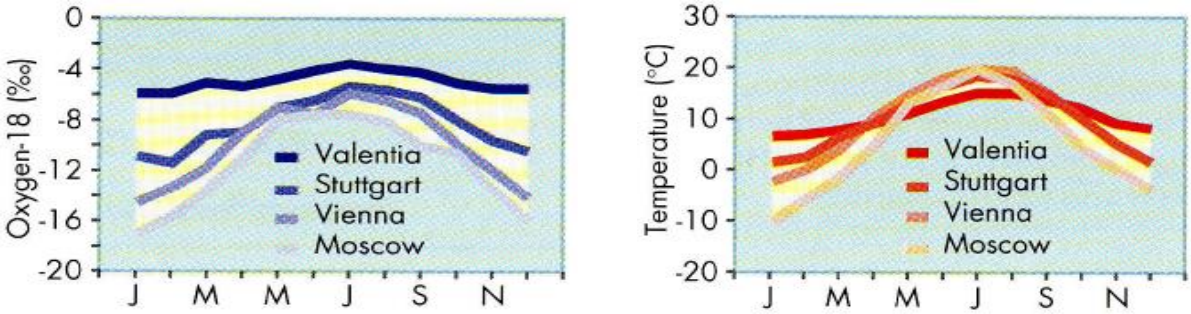
1964 yılında Dansgaard global olarak yıllık ortalama yağışın $\delta^{18}O$ değerleri ile sıcaklık arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermiştir. İzotopik ayrımın derecesi doğrudan sıcaklık ile orantılıdır. Sıcaklık gradyentinin olduğu yerde $\delta^{18}O$ ve $\delta^{2}H$ gradyenti de olacaktır. Sıcaklık değişiminin az olduğu bölgelerde (tropik bölgeler) $\delta^{18}O$ ve $\delta^{2}H$ değişiminin de az olduğu çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir(Schotterer, vd., 1996; Sayın, M. ve Eyüpoğlu, S.Ö., 2005; Demircan, M., 2006).



Şekil 4. Tropik ada istasyonları için yağışın oksijen-18 içeriğinin aylık uzun dönem (gölgeli) ve yıllık ortalama (noktalı) değerlerinin sıcaklık ve yağış (yıllık ortalamalar 12'ye bölünmüştür) ile karşılaştırılması. Dışarıdaki yağışlar sıcaklık etkisini maskeler.

2.4.3. Mevsim etkisi

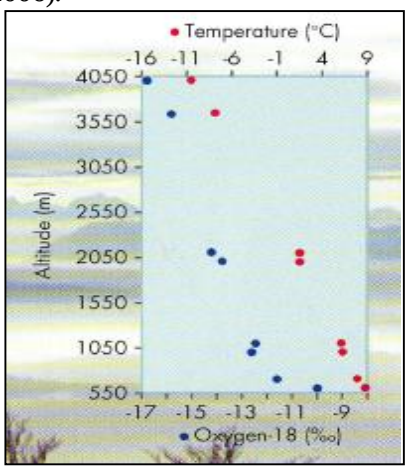
Sıcaklıktaki aşırı mevsimsel etki yağışın izotopik içeriğinin değişmesine neden olur. Yani, izotopik ayrımın derecesi doğrudan sıcaklıkla orantılıdır. Zenginleşmenin derecesi sıcaklığa olduğu kadar atmosferin rölatif nemine ve yüzey su büyüklüğünün hidrolojik dengesine de bağlıdır. Bu nedenle yağışların izotopik kompozisyonunda mevsimsel bir değişim vardır. Yapılan çalışmalar yaz yağmurlarının kış yağmurlarından daha fazla ağır izotop içeriğine sahip olduğunu göstermiştir. Yağışların ağır izotop içerikleri meydana geldikleri buharın ağır izotop içeriğine göre yüksektir. Sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda ağır izotop zenginleşmesi daha fazladır. Sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda yağmur damlalarının yeryüzüne düşme esnasında yeniden buharlaşması söz konusu olacaktır. Buharlaşma esnasında hafif izotopik grupların öncelikle buharlaşması, düşen yağmur damlalarının ağır izotop zenginleşmesini artırır. Bu nedenle kış aylarındaki yağışlar, yaz aylarındaki yağışlara göre ağır izotop bakımından fakirdir. Bu etki kış ve yaz aylarının sıcaklıkları arasındaki farkın yüksek olduğu yerlerde yağışların ağır izotop içeriklerini etkileyen bir faktördür(Schotterer, vd., 1996; Sayın, M. ve Eyüpoğlu, S.Ö., 2005; Demircan, M., 2006).



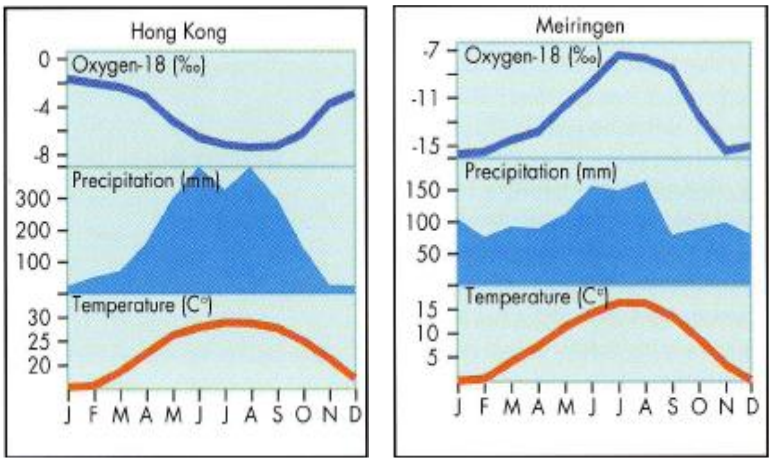
Şekil 5. Oksijen-18 ve sıcaklığın bazı istasyonlar için aylık değişimi

2.4.4. Yükseklik etkisi

Verilen bir bölgede ağır izotop içeriğinin yükseklikle değiştiğini, şebeke istasyonları yağışlarının kararlı izotop değerlerinden de görülebileceğini yapılan çalışmalar göstermiştir. Daha yüksek yerlere düşen yağışlar, alçak yerlere düşen yağışlara nazaran ağır izotop içeriği bakımından daha fakirdir. Yükseklik arttıkça yağışlardaki ağır izotop içeriği azalmaktadır. Daha düşük kotlara düşen yağış daha yüksek kotlara düşen yağışa göre daha uzun mesafe kat ederlerken daha fazla buharlaşma etkisine maruz kalırlar. Daha uzun süre buharlaşmaya maruz kalan yağmur ağır izotop içeriği bakımından zenginleşir. Bu zenginleşmenin derecesi sıcaklık ile yakın ilişki göstermektedir. Sıcaklığın düşük olduğu yüksek bölgelerde yağışlar izotopik olarak fakir olacaktır. Örneğin ^{18}O için bu değişim yerel iklim ve topografyaya bağlı olarak her 100 m için -0.15 ve -0.5 ‰ orasında, ^{2}H için ise bu azalma -1 ve -4 ‰ arasında olacaktır. Herhangi bir yeraltısuyunun hangi kottan beslendiğini bilmek açısından yükseklik etkisi önem kazanır. Yükseklik etkisine en güzel örnek Bortolami ve arkadaşlarının 1979 yılında İtalyan Alplerinde yaptıkları çalışmadır. İki farklı dönemde yedi farklı yükseklikten yağış numuneleri alınmış ve yükseklik arttıkça $\delta^{18}O$'nun daha negatif değerler aldığını göstermişlerdir(Schotterer, vd., 1996; Sayın, M. ve Eyüpoğlu, S.Ö., 2005; Demircan, M., 2006).



Şekil 6. Sıcaklık ve Oksiyen-18'in yükseklikle değişimi



Şekil 7. Hon Kong ve Meiringen: farklı enlemler ve iklimlerde, farklı oksijen-18 ve sıcaklık ilişkisi gözlemlenir.

2.4.5. Enlem etkisi

Şebeke istasyonları incelendiği zaman her iki yarımkürede ekvatora yakın istasyonlara ait yağışların, yüksek enlemlerde yer alan istasyon yağışlarına göre daha pozitif kararlı izotop içeriğine sahip oldukları görülmektedir. Yapılan çalışmalar sonucu yüksek enlemlere gidildikçe $\delta^{18}O$ değerlerinin daha negatif olacağı gösterilmiştir. Bununla birlikte kutup bölgelerine gidildikçe T - $\delta^{18}O$ değişimi çok daha hızlı olacaktır. Bu değişimin nedeni sıcaklık farklılıkları ile açıklanmaktadır. Örneğin; Kuzey Amerika kıtası yağışları için bu etkinin enlem derecesi başına -0.5 ‰ olduğu saptanmıştır (Schotterer, vd., 1996; Sayın, M. ve Eyüpoğlu, S.Ö., 2005; Demircan, M., 2006).

2.4.6. Miktar etkisi

Yağışların izotopik kompozisyonu üzerindeki etkilerden bir diğeri de miktar etkisidir. Yoğun yağışlar daha hafif olan yağışlara göre daha az ağır izotop içeriğine sahiptir. Özellikle kuvvetli yağışlar tropikal kuşakta ve orta enlem bölgelerinde görülmektedir (Şekil 1.4). Yoğun yağışlar esnasında bu yağışların meydana geldiği atmosferik buharın büyük bir kısmının yağışa dönüşmesi, yağışların düşme esnasında yeniden buharlaşması ve atmosferik buhar ile oluşan izotopik yer değiştirme bu etkinin oluşumuna neden olan etkenlerdir. Özellikle yoğun olmayan yağışların görüldüğü kurak ve yarı kurak alanlarda yağışların ağır izotop içerikleri üzerinde etkili olmaktadır. Şebeke istasyonlarından alınan yağışların kararlı izotop analiz sonuçları ile coğrafi ve iklimsel parametreler arasındaki ilişki çeşitli çalışmalar ile araştırılmıştır(Schotterer, vd., 1996; Sayın, M. ve Eyüpoğlu, S.Ö., 2005; Demircan, M., 2006).

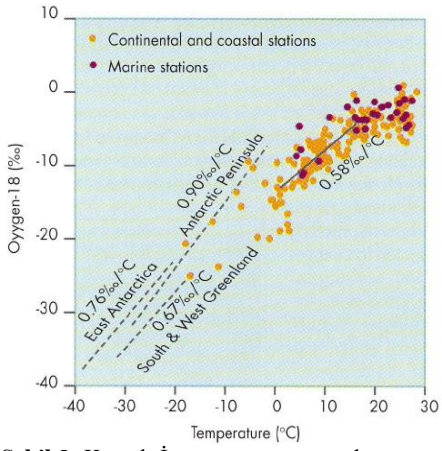
Kararlı izotop içeriklerini etkileyen bu faktörlerin büyüklüğü yerel iklime ve topografyaya bağlıdır. Yağışların ortalama izotopik kompozisyonu ile coğrafi ve iklimsel parametreler arasındaki ilişki çoklu regresyon analizi ile belirlenmiştir.

$$\delta^{18}O = a_0 + a_1T + a_2P + a_3L + a_4A$$

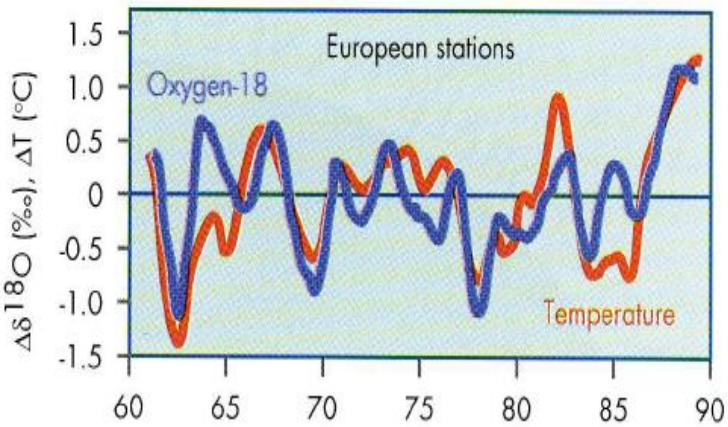
T_0; Ortalama aylık sıcaklık (°C), P; Ortalama aylık yağış (mm), L; Enlem derecesi (derece), A;Deniz seviyesinden yükseklik (m) ve a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 regresyon sabitleri olmak üzere bu denklem genel bir denklemdir. Bu etkiler yağışlardaki izotop içeriğini bazen aynı doğrultuda, bazen de ters doğrultuda etkilerler. Bazı durumlarda da yerel iklim ve topografyaya bağlı olarak bir veya daha fazla etki önem kazanabilir. Mevsimsel etkinin miktar etkisinden baskın olması daha çok karasal istasyonlarda görülmektedir. Tropikal olan okyanus istasyonlarında ise yağışların izotopik kompozisyon değişimlerini miktar etkisi belirler Bunun nedeni ise okyanus istasyonlarında yıl boyunca ısı değişiminin olmamasıdır.

2.5. İzotop Termometre

Bir yerde yüzey hava sıcaklığı ve yağışların izotop içeriklerindeki uzun dönem değişiklikleri arasındaki bağlantı, paleo-klimatolojik uygulamalara göre muhtemelen çok önemli bir ilişkidir. GNIP işletimsel olduktan hemen sonra, yarı-deneysel sıcaklık/kararlı izotop ilişkisi, orta ve yüksek kuzey enlemlerindeki karasal istasyonlar için kuruldu. Santigrad derece (°C) başına 0.69‰ eğimi, geçmiş sıcaklıkları canlandırmak için pek çok iklim çalışmasında kullanılmıştır. Buradan gördüğümüz, bu ilişki geniş bir aralık üzerinde değişebilir şöyle ki; yerel sıcaklık, verilen yerdeki yağışın izotopik içeriği için her zaman en iyi ölçüt değildir (Schotterer, vd., 1996; Demircan, M.,2006).



Şekil 8. Kararlı İzotop termometre dünyanın değişik bölgelerinde farklı gösterir.



Şekil 9. Seçilmiş Avrupa GNIP istasyonlarından oksijen-18 ve atmosferik sıcaklık bileşik trend grafiği (mevsimlik trend ayrıldıktan sonraki uzun yıllık ortalamalardan sapmaları ifade eder). Grafikdeki yakın ilişki, mevsimselliğin veya yağış paternlerindeki değişikliğin az öneminli olduğunu gösteriyor.

Sıcaklığın etkin olduğu rejimlerde, üç farklı izotop/sıcaklık ilişkisi GNIP veri tabanından kurulabilir. Birincisi sıcaklığın ve kararlı izotopların uzun dönem yıllık ortalamaları arasındaki konumsal tutarlı ilişki, ikincisi bunların arasındaki daha çok yerel zamansal ilişki ve sonuncusu yerel

veya daha çok bölgesel ölçekte, sıcaklık ve kararlı izotoplardaki mevsimsel değişiklikler arasındaki kısa dönemli zamansal bağlantıdır.

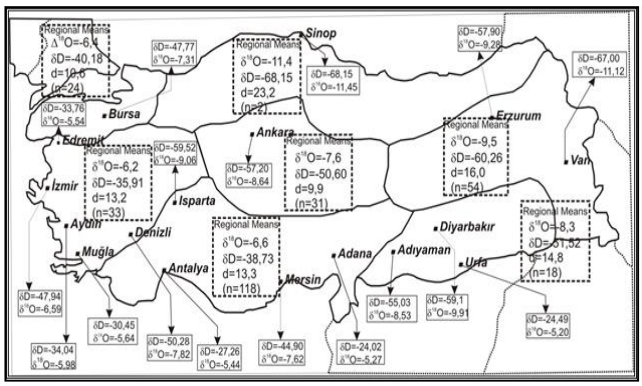
Veri nerede bir ilişki eksikliği veya $\delta^{18}O/T$ gradyentindeki kuvvetli değişim gösteriyorsa, bu izotop yaklaşımını geçersiz kılmaz. Bunun sebebi yağış, yağış miktarı ve kaynağı veya karasallık göz önüne alınmadan termometre ile yapılan ölçümlerin direkt olarak değerlendirilmesinden kaynaklanabilir.

Yağış içerisindeki kararlı izotopların günümüzdeki davranışlarının modellenmesi, paleo-verinin yorumuna yardım etmek ve geçmiş izotop dağılımlarını canlandırmak için temelleri açıklar. Küresel sirkülasyon modelleri, genellikle, küresel ölçekteki izotopların ana karakteristiklerini doğru üretir. Yerel ve bölgesel ölçekte farklılıklar gösterebilir. Konvektif süreç gösteren tropikler buna güzel bir örnektir. Özel yerlerdeki deneysel canlandırmalarla türetilen paleo-veriler, model testleri için yer doğruluğu ile ilgili katkı sağlar. Bu bağlamda, İzotop verileri, tamamen göze çarpan önemi olduğunu ispatlar.

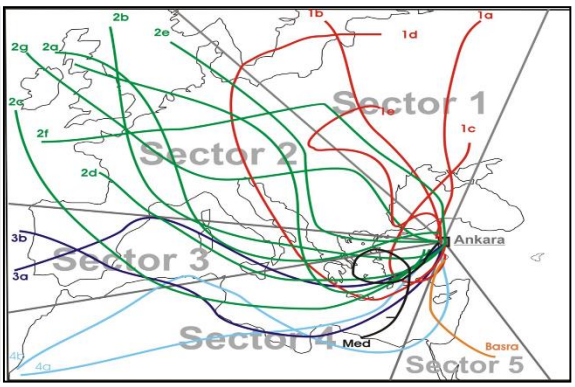
4. TÜRKİYE'DE YAĞIŞIN İZOTOP İÇERİĞİ ANALİZLERİ

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), IAEA ve WMO arasındaki işbirliği dahilinde düzenlenen protokolle yağışların kararlı izotop içeriklerinin belirlenmesi çalışmalarına 1960'lı yıllardan beri Ankara, Adana ve Antalya istasyonlarında toplanan yağış örnekleri ile destek vermektedir. Halen bu üç istasyonumuz GNIP şebekesi içerisinde yer almaktadır. 1960'lı yılların sonlarında Sinop ve Diyarbakır istasyonumuzda bu şebeke içerisinde görev yapmıştır. GNIP şebekesi genişletme çalışmaları sonucunda; Edirne, Sinop, Rize, İzmir, Erzurum ve Diyarbakır istasyonları da GNIP şebekesine katılmış olup 2008 Temmuz ayından itibaren yağış örnekleri toplamaya başlamıştır (Demircan, M., 2006). Türkiye, GNIP şebekesinde 9 istasyon ile yer almaktadır.

Türkiye'de 26 istasyonda, değişik zaman aralıklarında (bir aydan 38 yıla kadar değişen periyotlarda) aylık yağış örnekleri toplanmıştır (Dirican, A., vd., 2005). Bu verilerden Türkiye'nin değişik bölgelerine ait yağışlardan elde edilen izotop değerlerine (^{18}O ve ^{2}H) ait ortalamalar çıkarılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Türkiye'deki yağışların kararlı izotopik kompozisyonu (Dirican,A., vd., 2005)



Şekil 11. Günlük yağışın, izotopik içeriklerine ve geliş istikametlerine (hava akımı yörüngelerine) göre sınıflandırılması (Dirican,A., vd., 2005)

2001 yılında MGM ve Türkiye Atom Enerji Kurumu ile birlikte IAEA'nın Koordineli Araştırma Projeleri (CRP) kapsamında "Akdeniz Havzasın Hava Sirkülasyon Modelleri ve İklim ile İlişkili Yağışın İzotopik Bileşimi" projesinin bir parçası olarak hazırlanan "Ankara'da Günlük/Olay bazlı Yağışın ve Su Buharının İzotopik Bileşenlerinin Saptanması" isimli projeyi gerçekleştirmiştir. 2003 yılı sonu ile proje sonlandırılmış ve Ekim 2005 yılında IAEA tarafından sonuçlar teknik doküman olarak yayınlanmıştır. Bu proje kapsamında olay bazlı yağışların geliş yörüngesi ve yağışın izotopik içeriği sınıflandırılmıştır (Şekil 11, Tablo 1). Yağışın izotopik değerlerinin sıcaklık ile ilişkisi incelendiğinde; aylık yağışın izotopik değerlerinin olay bazlı yağışın izotopik değerlerine, ^{18}O izotopunun ^{2}H izotopuna ve karasal istasyonların denizel istasyonlara göre daha iyi bir ilişki gösterdiği görülmektedir (Tablo 2).

MGM'ye ait 9 istasyonun IAEA veri tabanından alınan izotop, sıcaklık ve yağış miktarı verilerinden 2009 yılı için haritalar üretilmiştir (Şekil 12).

Tablo 1. Günlük yağışın sektörlere göre izotopik değerleri,

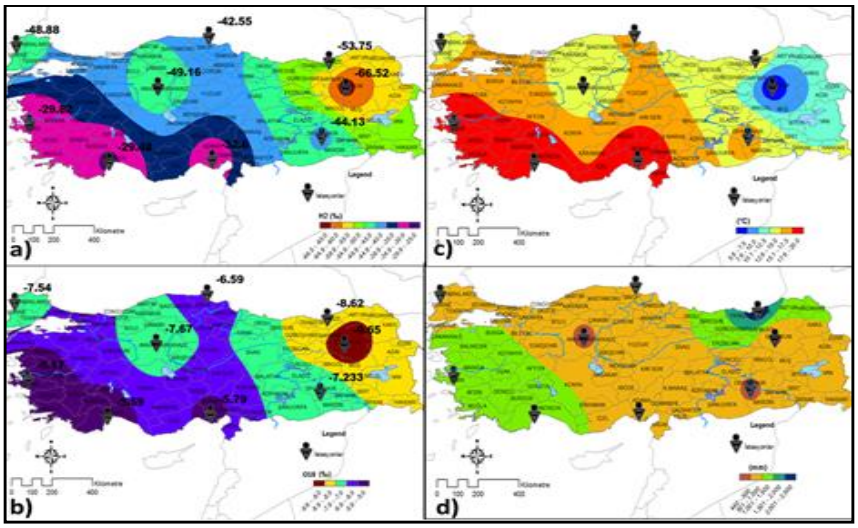
Sektörler	$d^{18}O_{ortalama}$ (‰)	$d^{2}H_{ortalama}$ (‰)	Örnek		
			Toplam Sayısı	2001 (%)	2002 (%)
Sektör 1	**-8,14**	**-56,77**	**27**	**25**	**26,2**
Sektör 2	-9,14	-63,13	51	55	36,9
Sektör 3	-7,27	-51,68	14	5	16,9
Sektör 4	-8,12	-53,52	12	10	12,3
Sektör 5	-4,58	-33,38	5	0	7,7
Sektör 6	-13,92	-96,87	3	5	36,9

(Dirican,A., vd., 2005) düzenlenerek.

Tablo 2. Yağışın izotopik değerleri ve sıcaklık (T) arasındaki ilişki,

İstasyonlar	Aylık Yağış	Günlük Yağış	Olay Bazlı Yağış
Ankara	$d^{18}O$=0,357T-11,565 (r=0,798) $d^{2}H$=2,527T-79,503 (r=0,776)	$d^{18}O$=0,377T-12,95 (r=0,636) $d^{2}H$=2,740T-90,751 (r=0,635)	$d^{18}O$= -0,284T-5,43 (r=0,544) $d^{2}H$=-2,183T-33,008 (r=0,549)
Antalya	$d^{18}O$=0,164T-7,511 (r=0,3945) $d^{2}H$=0,707T-36,746 (r=0,237)		
Adana	$d^{18}O$=0,222T-8,466 (r=0,606) $d^{2}H$=1,223T-43,296 (r=0,497)		

(Dirican,A., vd., 2005) düzenlenerek.



Şekil 12. Yağışın izotopik içeriği ve meteorolojik parametrelerinin (9 istasyondan) 2009 yılı değerlerinin dağılımı; a) Dötoryum (^{2}H), b) ^{18}Oksijen, c) sıcaklık ve d)yağış miktarı.

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Günümüzde, Meteoroloji Genel Müdürlüğü Ankara, Antalya, Adana, Edirne, Sinop, Rize, İzmir, Erzurum ve Diyarbakır istasyonları tarafından toplanan yağış örneklerini toplam yağış miktarı ve cinsi, aylık ortalama sıcaklık ve atmosferik su buharı basıncı bilgileri ile birlikte Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA)'nın laboratuvarlarında analiz yapılmak üzere Viyena'ya göndermektedir. Bu güne kadar yapılan analiz sonuçları IAEA'nın teknik rapor serileri olarak yayınlanmıştır. Ayrıca Yağışın İsotop İçeriği Küresel Ağı (GNIP)'ndan gelen ve tüm dünyadan toplanıp analiz edilen verileri "http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_isohis.html" adresinde tüm kullanıcılara sunmaktadır. Bu veriler üretildiği istasyon ve bölge için Meteorik su denklemini ve grafiğini oluşturmak için kullanıldığı için çok önemlidir. MGM'nin toplayıp IAEA'nın analiz ettiği bu veriler DSİ ve üniversiteler başta olmak üzere diğer kuruluşlar tarafından kullanılmaktadır. Yine bu konuda çalışan kuruluşlar, uzun yıllık verilerin olmadığı diğer bölgelerde, kısa süreli örnek toplayarak çalışmalarını sürdürmektedirler.

Başlıca çalışma alanları; jeoloji, hidroloji, yeraltı suları, termal sular, yağış paternlerinin belirlenmesi, geçmiş iklim verilerinin canlandırılması ve benzerleridir. Sayılan bu çalışmaların yapılabilmesi için bu çalışmalar için elde edilen izotop verilerinin genel anlamda küresel, daha doğru anlamda bölgesel meteorik su denklemleri ile değerlendirilmesi gerekmektedir.

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin her ortamda konuşulduğu günümüzde, izotop verileri geçmiş sıcaklık verilerinin canlandırılmasında ve iklim değişikliği çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Yeraltı sularının, buz çekirdeklerinin, göl ve okyanus sedimentlerinin, mercanların vb. yaşları karbon-14 izotopu ve oluştukları dönemdeki sıcaklılar Oksijen-18 yada Döteryum izotopu ile belirlenmektedir.

Kararlı izotop verileri iklim değişikliği modellerinde girdi olarak kullanılmaktadır.

Ülkemizde gerek yağışın doğal izotop verilerine, gerekse paleo-coğrafya/hidroloji/klimatoloji çalışmalarından elde edilen verilere ulaşımın zor olduğu düşünülürse paleo çalışmaları yaygınlaştırabilmek ve bu konuda çalışan araştırmacıların sayısını artırabilmek için ülkemizde yapılan bu çalışmaların ve verilerin sunulduğu, desteklendiği bir veri bankasına ihtiyaç vardır.

Anadolu'nun geçmişte geçirdiği değişimleri, iklimde meydana gelen değişikliklere verdiği tepkiyi anlamadan geleceği modellemek ve gelecekte meydana gelmesi olası değişiklikleri doğru anlamak ve doğru çözümler üretmek zor olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Çifter, C. ve Sayın, M., "İzotopların hidrolojide kullanılması", Hidrolojide İzotop Tekniklerinin Kullanılması Sempozyumu, Adana, 2002
2. Demircan, M,. Yağışın İzotop İiçeriğinin Gözlemlenmesi için Ulusal Şebekenin Kurulması Danışma Toplantısı Raporu, Ankara, 2006
3. Sayın, M. ve Eyüpoğlu, Ö., S., "Türkiye'deki yağışların kararlı izotop içeriklerini kullanarak yerel meteorik doğruların belirlenmesi", II. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu, Gümüldür – İzmir, 2005
4. Schotterer, U., Oldfield, F. ve Frohlich, "Global Network for Isotopes in Precipitation", IAEA – WMO, Bern – İsviçre, 1996
5. CRP, "Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate", IAEA – TECDOC – 1453, Avusturya, 2005
6. Dirican, A., Ünal, S., Acar, Y., Demircan, M., "The temporal and seasonal variation of H-2 and O-18 in atmospheric water vapour and precipitation from Ankara, Turkey in relation to air mass trajectories at Mediterranean Basin",2005, IAEA-TECDOC-1453
7. R.S.ÇELİK, M.ALİŞAN, M.SAYIN, "Doğubeyazıt ve Çevresi Hidrojeolojisinin Çevresel İzotoplarla İncelenmesi", DSİ Yayınları (Y.No: İZ-961), Ankara, 2003
8. KURTTAŞ, T., Hidrolojik çalışmalarda İzotop Hidroloji Uygulamaları", III. ULUSAL HİDROLOJİDE İZOTOP TEKNİKLERİ SEMPOZYUMU, İSTANBUL, 2008
9. http://www.iaea.org/water