

# Müografi: Kozmik Müonlarla Doğayı Gözlemlemek

Dr. Mahir E. Ocak [ TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Gökyüzünden yağan müonlar üzerinde ölçümler yapılmasına dayalı müografi yöntemiyle, volkan patlamaları ve kasırgalar gibi doğal afetler incelenebiliyor. Müonlarla doğayı gözlemek gelecekte doğal afetleri öngörmenin ve zamanında önlemler alınmanın bir yolu olabilir.



## Müonlar

Bugün bilinen temel madde parçacıkları üç nesil içinde gruplandırılıyor. İlk nesilde protonlar, nötronlar ve elektronlar gibi iyi bilinen parçacıklar var. İkinci ve üçüncü nesildeyse birinci nesildekilerle kütleleri hariç tamamen aynı fiziksel özelliklere sahip başka parçacıklar yer alıyor. İkinci ve üçüncü nesildeki parçacıklar aşırı derecede kararsızdır, kısa süre içinde bozunarak birinci nesildeki parçacıkları ortaya çıkarırlar. Bu yüzden çevremizdeki maddeler çok büyük oranda birinci nesil parçacıklardan oluşur.

Müonlar ikinci nesilde yer alan parçacıklardan biridir. Bu temel parçacıkların kütlesi elektronlarınkinin 200 katı civarındadır. Bunun dışındaki tüm fiziksel özellikleri ise elektronlarınkiyle aynıdır.

Dünya'nın atmosferi sürekli olarak uzaydan gelen kozmik ışınlar tarafından bombardıman edilir. Atmosferdeki gazlar ile kozmik ışınlar arasındaki bu etkileşimler aralarında müonlar, pionlar ve nötrinolarında bulunduğu çeşitli parçacıklar üretir. Ortaya çıkan bu parçacıkların bir kısmı yeryüzüne yağar. Müonlar yüksek kütleleri nedeniyle yoğun madde içinde elektronlara kıyasla daha uzun mesafe katedebilir. Her dakika yeryüzünün her bir metrekaresine kozmik ışınlar tarafından atmosferin üst katmanlarında üretilmiş 10.000 civarı müon düşer.

## Müografi

Müonlar bir ortamın içinden geçerken etraftaki parçacıklarla etkileşerek soğurulur ve saçılır. Ortam yoğunluğu yükseldikçe müonların soğurulma veya saçılma oranı artar. Dolayısıyla çeşitli yönlerden gelen müon miktarının ölçülerek müonların içinden geçtiği ortamların yoğunluğu hakkında bir fikir edinilebilir. Belirli bir yönden gelen müon miktarı ne kadar yüksekse o yöndeki madde yoğunluğu o

kadar düşük, belirli bir yönden gelen müon miktarı ne kadar düşükse o yöndeki madde yoğunluğu o kadar yüksektir.

Müon miktarının ölçülmesiyle çeşitli ortamların yoğunluğunun tahmin edilmesi yöntemi müografi olarak adlandırılır. Müografinin X ışını görüntülemeye (röntgen) benzediği söylenebilir. Röntgenlerin vücudun iç yapısının fotoğrafını çekmesine imkân veren şey, X ışınların düşük yoğunluklu yumuşak dokulardan ve yüksek yoğunluklu kemiklerden geçerken farklı oranlarda soğurulması ve saçılmasıdır.

Müonları tespit etmek için kullanılan çeşitli dedektörler bulunuyor. Söz konusu müografi olduğundaysa katmanlar hâlinde sıralanmış ışıdayıcılardan oluşan dedektörler daha çok tercih ediliyor. Müonlar bu dedektörlerin içinden geçerken her bir katmandaki ışıdayıcılar parlıyor. Ortaya çıkan fotonlar tespit edilerek müonların detektöre gelirken takip ettiği rota hakkında çıkarımlar yapılıyor.

## Volkanlar

Müografinin uygulama alanlarından biri volkanlar. Müografiyle volkanlar üzerine çalışmalar yapan araştırmacılar müon dedektörlerini dağların



eteklerine yerleştiriyor. Volkanların içinden geçerek dedektöre ulaşan müonlar hem volkanların iç yapısının belirlenmesine hem de volkanların içindeki değişimlerin takip edilmesine imkân veriyor.

Müografinin volkanlar hakkında sağladığı önemli bilgilerden biri volkanların detaylı iç yapısı. Müon dedektörlerinin topladığı verilerden geçmişte yaşanan patlamalar sırasında magmanın hangi yolları takip ettiği tespit edilebiliyor. Bu bilgi, gelecekte yaşanacak muhtemel patlamalar hakkında fikir edinilmesine de yardımcı oluyor. Örneğin volkanın iç geometrisinden yola çıkılarak bir sonraki patlamanın yanardağ konisinin hangi bölgesinde meydana geleceği ve ne kadar güçlü olacağı hakkında tahmin yürütülebiliyor.

Tüm volkanik patlamalarda magma boşalması yaşanmaz. Bazı patlamalarda sadece aşırı sıcak sıvılar ve gazlar yer alır. Freatik patlama diye adlandırılan bu patlamalar, magmanın volkandaki sıvıları ve gazları ısıtmasının sonucudur. Basıncı aşırı derecede yükselen sıvılar ve gazlar volkanın patlamasına neden olur. Freatik patlamalar sıradan yanardağ patlamaları kadar bilinmez ancak onlar da çok tehlikeli olabilir. Örneğin 2014 yılında Japonya'daki Ontake yanardağında yaşanan patlama 63 insanın ölmesine neden olmuştu. Patlama sırasında yayılan buhar atmosferde 11 kilometre yüksekliğe ulaşmıştı.

Müografi yanardağlardaki akışkan dinamiklerini gerçek zamanlı takip etmek için de kullanılabilir. Örneğin yanardağın içindeki kanallardan birindeki sıvılar buharlaştığında ortam yoğunluğu değişiyor. Bu değişim o kanaldan geçerek dedektöre ulaşan müon miktarına da yansıyor.

Bugüne kadar müografi kullanılarak yanardağlar üzerine yapılan araştırmalar arasında Dr. Giovanni Macedonio ve arkadaşlarının İtalya'daki Vezüv Yanardağı'nda ve Sicilya'nın kuzeyindeki Eolie Adaları'nda yer alan Stromboli

Yanardağı'nda yaptığı çalışmalar, Dr. Jacques Marteu ve arkadaşlarının Karayipler'deki Basse-Terre Adası'ndaki La Soufrière Yanardağı'nda yaptığı çalışmalar ile Dr. Hiroyuki Takanaki ve arkadaşlarının Japonya'daki Skurajima Yanardağı'nda yaptığı çalışmalar sayılabilir.

## Fırtınalar

Tropik okyanuslarda ortaya çıkan kasırgalar çok büyük yıkımlara sebep olabilir. Ilık okyanus suları, üzerlerindeki düşük basınçlı havayı ısıtır. Böylece hızla yükselen, ılık ve nemli bir hava akımı oluşur. Bu hava akımları zamanla giderek güçlenir ve kendi etrafına hızla dönen bir fırtınaya dönüşür. Tropik kasırgaların hızı bazen saatte 120 kilometreye kadar ulaşır.



Günümüzde tropik fırtınaları tahmin ve takip etmek için uydular, radarlar ve hava durumu verileri kullanılıyor. Müografi de kasırgaları takip etmek için yararlanılabilecek başka bir yöntem. Yoğun hava müonları daha çok soğurur ve saçar. Dolayısıyla müon dedektörlerinin topladığı verilerden kasırgaların farklı bölgelerinin yoğunluğu tahmin edilebilir. Bu ölçümlerden basınç ve sıcaklık hakkında çıkarımlar yapılabilir. Böylece fırtınanın içindeki rüzgârın yatay ve dikey hızları belirlenebilir.

Kyushu Adası, Japonya'yı meydana getiren beş büyük adanın en güneyde olanıdır. Kyushu Adası civarında her yıl çok sayıda kasırga ortaya çıkar. Hiroyuki Tanaka ve arkadaşları geçmişte müon dedektörleri kullanarak Kagoshima şehrine yaklaşmakta olan sekiz kasırgayı incelediler. Toplanan verileri kullanarak kasırgaların iki boyutlu basınç haritalarını çıkarmayı başardılar. Araştırmacılar daha fazla müon dedektörü kullanılarak daha detaylı üç boyutlu haritalar elde etmenin de mümkün olacağını düşünüyor. Atmosferin üst katmanlarında ortaya çıkan müonlar bazen yataya çok yakın açılarda yol alır ve yere düşmeden önce atmosfer içinde 300 kilometre kateder. Araştırmacılar müon dedektörleriyle bir kasırganın 150 kilometre mesafeden incelenmesinin mümkün olabileceğini ve

elde edilen bilgilerden yararlanarak bir kasırganın ne kadar güçlü olacağını ve ne kadar yağış getireceğinin hesaplanabileceğini düşünüyor. Bu sayede tehlikeli kasırgaları haber veren erken uyarı sistemleri oluşturulabilir.

## Meteorolojik Tsunamiler

Meteorolojik tsunamiler ya da kısaca meteotsunamiler sıradan tsunamilere benzer dalga olaylarıdır. Sıradan tsunamiler depremler tarafından tetiklenir. Meteotsunamilere ise kasırgalar gibi hava olaylarının sebep olduğu ani atmosferik basınç değişimleri yol açar. Göller ya da koylar gibi yarı kapalı sularda meydana gelen bu doğa olayları birkaç dakika ile birkaç saat arası sürer. Meteotsunamiler de tsunamiler gibi büyük yıkımlara yol açabilir. Örneğin 1992 yılında Florida'da meydana gelen bir meteotsunamide yüksekliği üç metreye varan dalgalar oluşmuş, 75 kişi yaralanmıştı.

Tokyo kıyılarının altında kısaca TS-HKMSDD diye adlandırılan bir müon dedektörleri dizisi var. Dedektörler üzerlerindeki suyun içinden geçerek gelen müonları tespit ediyor. Eylül 2021'de Tokyo koyununun 400 kilometre güneyinde, Pasifik Okyanusu'nda bir kasırga meydana geldi. Kasırga Tokyo Körfezi'nde suların



Jim Eddis / SPL



kabarmasına neden oldu ve bu sırada TS-HKMSDD dedektörlerinin yaptığı ölçümlerde dalgalanmalar yaşandı. Tanaka ve arkadaşları müon dedektörlerinin topladığı verileri analiz ettiklerinde gelgit ölçerlerin topladığı verilerle uyum içinde olduğunu gördüler.

Sulardaki kabarmaları ölçmek için dedektörlerin su tabanının altına gömülmesi gerekmiyor. Kıyıya yakın herhangi bir yer altı mekânında da konumlandırılabilirler. Örneğin kıyıya yakın altgeçitlere müon dedektörleri yerleştirilebilir. Bu dedektörler sayesinde atmosferde yataya yakın açılarla yol aldıktan sonra suların ve sahil topraklarının içinden geçen müonlar tespit edilebilir. Araştırmacılar müografiyle sahilin 5 kilometre açığındaki su seviyelerinin tespit edilebileceğini düşünüyor. Bu sistemler sadece meteotsunamiler için değil, gelgit olaylarının takibi için de kullanılabilir.

**Doğal afetler her yıl çok sayıda can alıyor ve çok büyük yıkımlara neden oluyor. Gelişmekte olan müografi tekniği sayesinde gelecekte volkan patlamalarının, kasırgaların ve meteotsunamilerin sebep olacağı afetleri öngörmek ve zamanında önlemler almak mümkün olabilir. ■**

#### **Kaynak**

Allen, Michael, "Earth, wind and water: how cosmic muons are helping to study volcanoes, cyclones and more", *Physics World*, <https://physicsworld.com/a/earth-wind-and-water-how-cosmic-muons-are-helping-to-study-volcanoes-cyclones-and-more/>, 25 Temmuz 2023.

Tanaka, H. K. M. ve ark., "High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan", *Earth and Planetary Science Letters*, Cilt 263, s. 104, 2007.

Nomura, Y. ve ark., "Pilot study of eruption forecasting with muography using convolutional neural network", *Scientific Reports*, Cilt 10, Makale No: 5272, 2020.

D'Errico, M. ve ark., "Muon radiography applied to volcanoes imaging: the MURAVES experiment at Mt. Vesuvius", *Journal of Instrumentation*, Cilt 15, Makale No: C03014, 2020.

D'Errico, M. ve ark., "The MURAVES Experiment: A Study of the Vesuvius Great Cone with Muon Radiography", *Journal of Advanced Instrumentation in Science*, Cilt 2022, 2022.

Gonidec, Y. L. ve ark., "Abrupt changes of hydrothermal activity in a lava dome detected by combined seismic and muon monitoring", *Scientific Reports*, Cilt 9, Makale No: 3079, 2019

Tanaka, H. K. M., ve ark., "Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones", *Scientific Reports*, Cilt 12, Makale No: 16710, 2022.

Tanaka, H. K. M. ve ark., "Periodic sea-level oscillation in Tokyo Bay detected with the Tokyo-Bay seafloor hyper-kilometric submarine deep detector (TS-HKMSDD)", *Scientific Reports*, Cilt 12, Makale No: 6097, 2022.