

Dr. Mahir E. Ocak

TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Rosetta'nın Bize Öğrettikleri



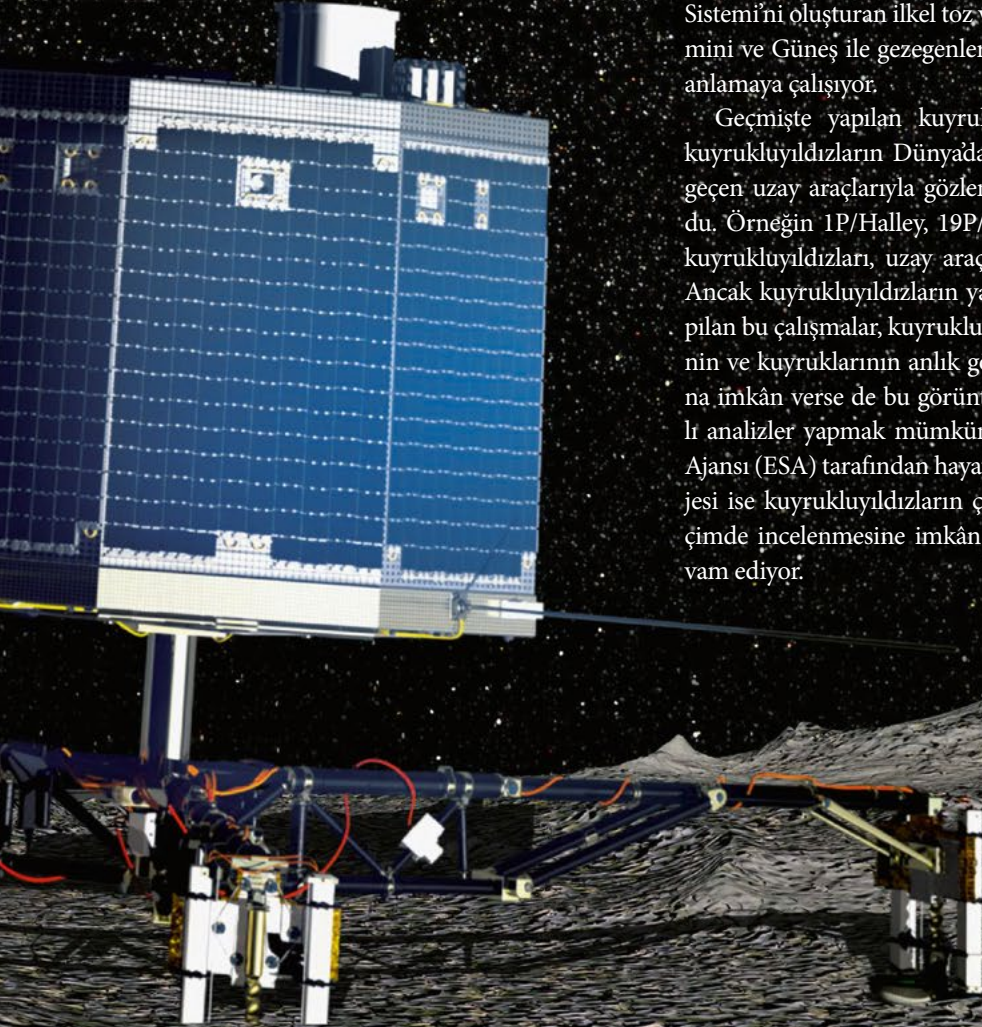
Kuyrukluysıldızlar buz, toz ve gazdan oluşan ve kütleçekimi ile Güneşe bağlı olan gök cisimleridir. Elips biçimli yörüngelerde dolanan bu cisimlerin Güneşe en yakın ve en uzak oldukları mesafeler arasında genellikle çok büyük farklar vardır. Çok küçük oldukları için Güneşe uzak bir konumdayken görülmeleri hayli zordur. Ancak kuyrukluysıldızlar Güneşe yaklaştıkça yüzeylerindeki katı maddeler süblimleşmeye (gaz haline geçmeye) başlar ve böylece kuyrukluysıldızın çekirdeğinin etrafında kuyruk biçiminde bir atmosfer oluşur. Kuyrukluysıldızların parlaklıkları Güneşe yaklaştıkça artar ve hatta bazı kuyrukluysıldızlar yeryüzünden çıplak gözle görülebilecek kadar parlaktır. Yakın zamanlarda bilimsel araştırmalara konu olan kuyrukluysıldızlardan biri de 1969 yılında K. I. Churyumov ve S. I. Gerasimenko isimli iki gökbilimci tarafından keşfedilen 67P/Churyumov-Gerasimenko. Yazının devamında bu kuyrukluysıldızdan kısaca 67P olarak bahsedilecektir.

Çapı 4 kilometre civarında olan 67P, Jüpiter ailesi olarak sınıflandırılan kuyrukluysıldızların bir örneği.

Bu kuyrukluysıldızların kaynağının Kuiper Kuşağı (Neptün'ün yörüngesinin dışında kalan bölge) olduğu ve yörüngelerinin Güneş Sistemi'ndeki dev gezegenlerin kütleçekimi sayesinde bugünkü hallerini aldığı düşünülüyor. 67P'nin Güneşe en yakın olduğu mesafe (günberi uzaklığı) 2,7 AU (1 AU = Dünya ile Güneş arasındaki ortalama mesafe), Güneş'in etrafındaki bir turunu tamamlama süresi ise yaklaşık 6,45 yıl. 67P'nin yörüngesinin 1959 yılında kuyrukluysıldızın Jüpiter'e çok yaklaşması sonucunda bugünkü halini aldığı biliniyor. Kendi etrafındaki bir turunu yaklaşık 12,4 saatte (bu süre 2009'dan beri 0,36 saat azalmış durumda) tamamlayan 67P'nin Güneş'in etrafındaki dönüş hızı saatte 135.000 kilometreye kadar çıkıyor.

Kuyrukluysıldızlar üzerine yapılan bilimsel çalışmaların en önemli amaçlarından biri, Güneş Sistemi'nin oluşumu ve evrimi hakkında bilgi edinmek. Güneş Sistemi'nin oluşumundan beri yapılarında önemli bir değişiklik olmadığı için, bu gök cisimleri oluşumlarına neden olan fiziksel süreçlerin izlerini hâlâ üzerlerinde taşıyor. Bu yüzden bilim insanları, kuyrukluysıldızların yapılarını inceleyerek Güneş Sistemi'ni oluşturan ilkel toz ve gaz bulutunun bileşimini ve Güneş ile gezegenlerin oluşumunu daha iyi anlamaya çalışıyor.

Geçmişte yapılan kuyrukluysıldız araştırmaları, kuyrukluysıldızların Dünyadan ya da yakınlarından geçen uzay araçlarıyla gözlemlenmesine dayanıyordu. Örneğin 1P/Halley, 19P/Borrelly ve 81P/Wild 2 kuyrukluysıldızları, uzay araçlarıyla gözlemlenmişti. Ancak kuyrukluysıldızların yakınından geçerken yapılan bu çalışmalar, kuyrukluysıldızların çekirdeklerinin ve kuyruklarının anlık görüntülerinin alınmasına imkân verse de bu görüntüleri kullanarak detaylı analizler yapmak mümkün değildi. Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından hayata geçirilen *Rosetta* projesi ise kuyrukluysıldızların çok daha detaylı bir biçimde incelenmesine imkân verdi, vermeye de devam ediyor.



Rosetta uzay aracı, ESA tarafından 2 Mart 2004'te uzaya fırlatılmıştı. Yaklaşık yedi milyar kilometre yol katettikten sonra 6 Ağustos 2014'te, Güneşe 3,7 AU mesafedeyken 67P ile buluşan *Rosetta*, kuyruklu yıldızın etrafında yörüngeye girdi. Daha sonra 12 Kasım 2014'te, Güneşe 3,0 AU mesafedeyken *Philea* adı verilen bir araç, kuyruklu yıldızın üzerine indirildi. İlk buluşma anında *Rosetta*, 67P'ye 100 kilometre mesafedeydi, ancak ilerleyen zamanlarda 10 kilometreye kadar yaklaştı. *Rosetta* ve *Philea*'nın gönderdiği veriler sayesinde 67P'nin yapısı, yüzey morfolojisi, çekirdeğinin ve kuyruğunun bileşimi hakkında çok önemli bilgiler edinildi. *Rosetta*'nın 67P'yi Ağustos 2015'te günberi konumuna ulaşana kadar ve daha sonrasında da takip etmesi planlanıyor. Böylece 67P'nin yapısında meydana gelen mevsimsel değişiklikler de incelenecek.

Rosetta'nın üzerindeki OSIRIS isimli görüntüleme sistemi, 23 Mart 2014'ten itibaren 67P'nin fotoğraflarını çekmeye başladı.

İlk görüntüler alınmaya başlandığında *Rosetta* kuyruklu yıldıza çok uzak (yaklaşık 192.000 kilometre mesafede) olduğu için çözünürlük çok düşüktü ve kuyruklu yıldızın çekirdeği görülemiyordu. Ancak uzay aracı kuyruklu yıldıza yaklaştıkça çözünürlük arttı ve çekirdek görülmeye başlandı. *Rosetta* 67P'ye 10 kilometre mesafedeyken çekilen görüntülerde ise her bir piksel 0,15 x 0,15 metre karelik bir alana karşılık geliyor.

OSIRIS'in çektiği görüntülerde 67P'nin biri kafa, biri gövde olarak adlandırılabilen iki lobu olduğu ve bu lobların bir boğaz ile birbirine bağlandığı görülüyor. Büyük lob, 4,1 x 3,3 x 1,8 km³, küçük lobsa 2,6 x 2,3 x 1,8 km³ boyutlarında. Kuyruklu yıldızın toplam hacmi yaklaşık olarak 21,4 km³. Bu bilgi kullanılarak, toplam kütlesi 1,0 x 10¹³ kg olan 67P'nin yoğunluğunun 470 kg/m³ olduğu hesaplanıyor. Bu değer suyun yoğunluğunun yaklaşık yarısı kadar. Yoğunluğun bu kadar düşük olması, 67P'nin boşluklu yapıya sahip olduğunu gösteriyor.

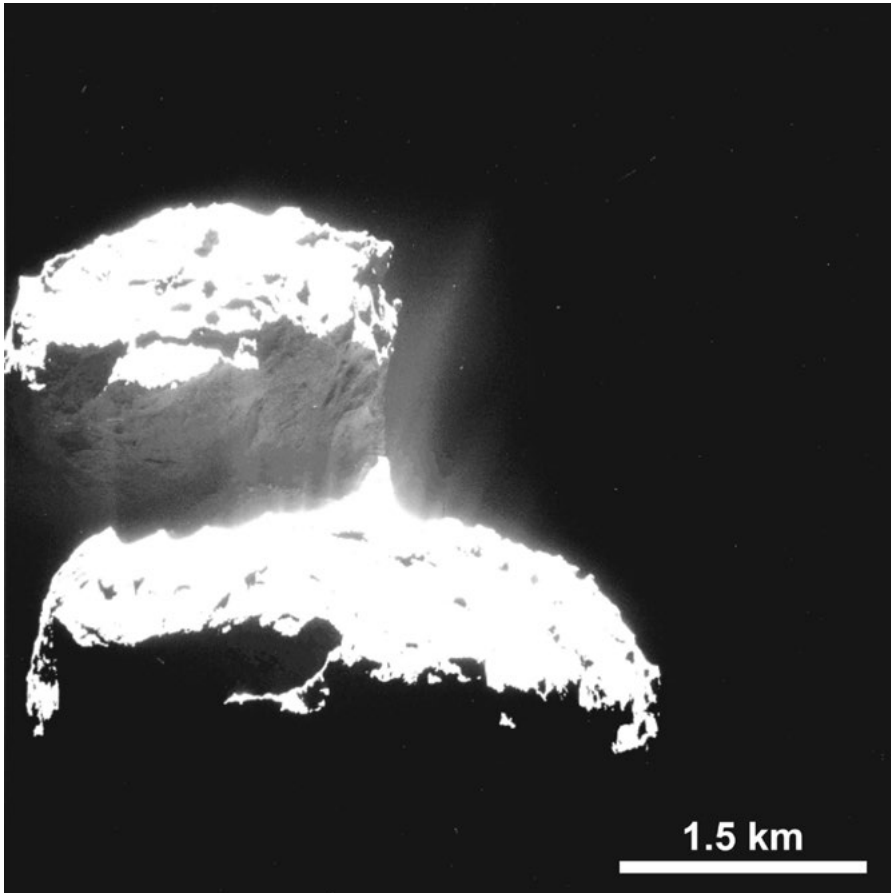
67P'nin yapısının biçimsiz ve kütle dağılımının düzensiz olması, yüzeydeki kütleçekim alanında büyük değişikliklere sebep oluyor (bkz. yandaki grafik). Yüzeydeki kütleçekim alanının sahip olduğu en büyük değer, en küçük değer neredeyse iki katı kadar.

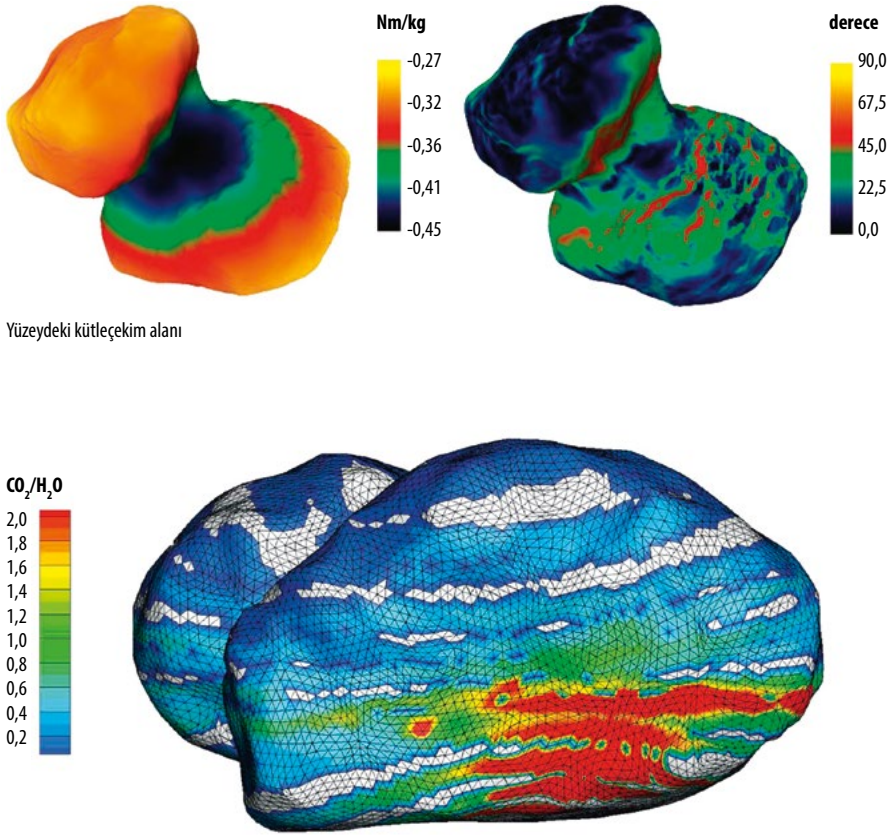
OSIRIS tarafından çekilen görüntülerde kuyruğun oluşmasına sebep olan buharlaşmaların kaynağının daha çok iki lob arasında kalan boğaz bölgesi olduğu görülüyor. 67P'nin morfolojik yapısı, buharlaşmaların yanı sıra yüzeyin altındaki yüksek gaz basıncının sebep olduğu patlamaların da çekirdeğin kütle kaybetmesine sebep olabileceğini düşündürüyor.

Rosetta'nın gönderdiği veriler kullanılarak boğaz bölgesinin zaman içinde aşınma sonucunda mı oluştuğu yoksa iki lobun sonradan bir araya gelmiş iki ayrı kuyruklu yıldız mı olduğu belirlenmeye çalışılıyor. Eğer iki lobun bileşimleri birbirinden çok farklıysa, bu durum iki lobun geçmişte ayrı kuyruklu yıldızlara olduğuna işaret eder. Ancak iki lobun bileşimleri birbirine benziyorsa, bir çıkarım yapmak zorlaşır. Çünkü bu durum, aynı zamanlarda ve yakın bölgelerde oluştuğu için bileşimleri birbirine benzeyen iki kuyruklu yıldızın sonradan bir araya gelmiş olması ihtimalini ortadan kaldırmaz. 67P'nin loblarının iki ayrı kuyruklu yıldız olup olmadığı sorusu hâlâ cevaplanmayı bekliyor.

Rosetta, 4,5 milyar yıl önce gezegenlerin oluştuğu bulutsudaki toz/gaz oranını belirlemek amacıyla çeşitli ölçümler yaptı. Güneşe 3,4 ila 3,6 AU mesafedeyken yapılan ölçümler sırasında kuyruklu yıldıza yayılan ve kütlesi 10⁻¹⁰ ila 10⁻⁷ kg olan 35, 10⁻⁵ ila 10⁻² olan 48 tanecik tespit edildi. *Rosetta*'nın üzerindeki MIRO ve ROSINA isimli cihazların yaptığı gaz ölçümü sonuçları kullanılarak toz/gaz oranının 4±2 olduğu hesaplandı. Ancak 67P Güneşe yaklaştıkça bu oran değişebilir.

Rosetta üzerindeki VIRTIS isimli cihaz kullanılarak 67P'nin yüzeyinin bileşimi de incelendi. Ağustos 2014 ile Eylül 2014 arasında, kuyruklu yıldız Güneşe 3,3 ila 3,6 AU mesafedeyken yapılan ölçümler organik maddelerin varlığına işaret ediyor.





Yüzeydeki kütleçekim alanı

Ayrıca yüzeyin güneş ışığı alan kısımlarında buz bakımından zengin bölgelerin olmadığı görülüyor. 67P'nin yüksek yüzey sıcaklığı da göz önüne alındığında, bu durum, kuyrukluysıldızın yüzeyinin en üst katmanlarının çoğunlukla ısıya dayanıklı, erimesi zor maddelerden oluştuğunu düşündürüyor. Elde edilen veriler, karbon-hidrojen ile oksijen-hidrojen grupları içeren, uçucu olmayan ve ışığı geçirmeyen organik maddelerin varlığıyla uyumlu.

67P'nin yüzeyindeki maddelerin yüzeye dağılımının homojen olması, Güneş etrafındaki hareket sırasında yaşanan değişikliklerin yüzeyin bileşiminde önemli bir etkisi olmadığını gösteriyor. Dolayısıyla kuyrukluysıldızın çekirdeğinin derinlerindeki katmanların bileşimi de yüzeyinkine benzer olmalı. VIRTIS'in 67P'nin yüzeyinin bileşimi ile ilgili elde ettiği tüm bu sonuçlar, 67P'nin bileşiminin diğer Jüpiter ailesi kuyrukluysıldızlardan farklı olduğunu gösteriyor.

Rosetta, 67P'yi takip ederken kuyrukluysıldızın manyetik atmosferinin do-

ğuşuna da tanıklık etti. Kuyrukluysıldızlar Güneşe yaklaştıkça buharlaşma yoluyla yüzeylerinden salınan maddelerin miktarı artar. Atmosferlerindeki yüksüz maddelerin çoğu su (H_2O), karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO_2). Atmosfer oluşmaya başladığında güneş rüzgârları (Güneş'ten yayılan ve yüklü parçacıklar içeren plazma) kolayca atmosferden geçebilir. Ancak zamanla güneş rüzgârı ve Güneş'ten yayılan morötesi ışık, atmosferdeki atomları ve molekülleri iyonlaştırır ve atmosfer iletken hale geçer. Bunun sonucunda kuyrukluysıldızın atmosferindeki yüklü parçacıklardan kaynaklanan elektromanyetik kuvvetler, güneş rüzgârını kuyrukluysıldızdan uzak tutmaya başlar.

Manyetik atmosferin Güneşe hangi mesafedeyken aktif hale geldiği, kuyrukluysıldızlar arasında çeşitlilik gösterir. *Rosetta* 67P ile ilk buluştuğunda, kuyrukluysıldızın etkinlik seviyesi düşüktü (kuyrukluysıldızın yüzeyinden buharlaşan madde miktarı azdı). Atmosfer henüz yeni oluşmaya başlamıştı. Ancak 21

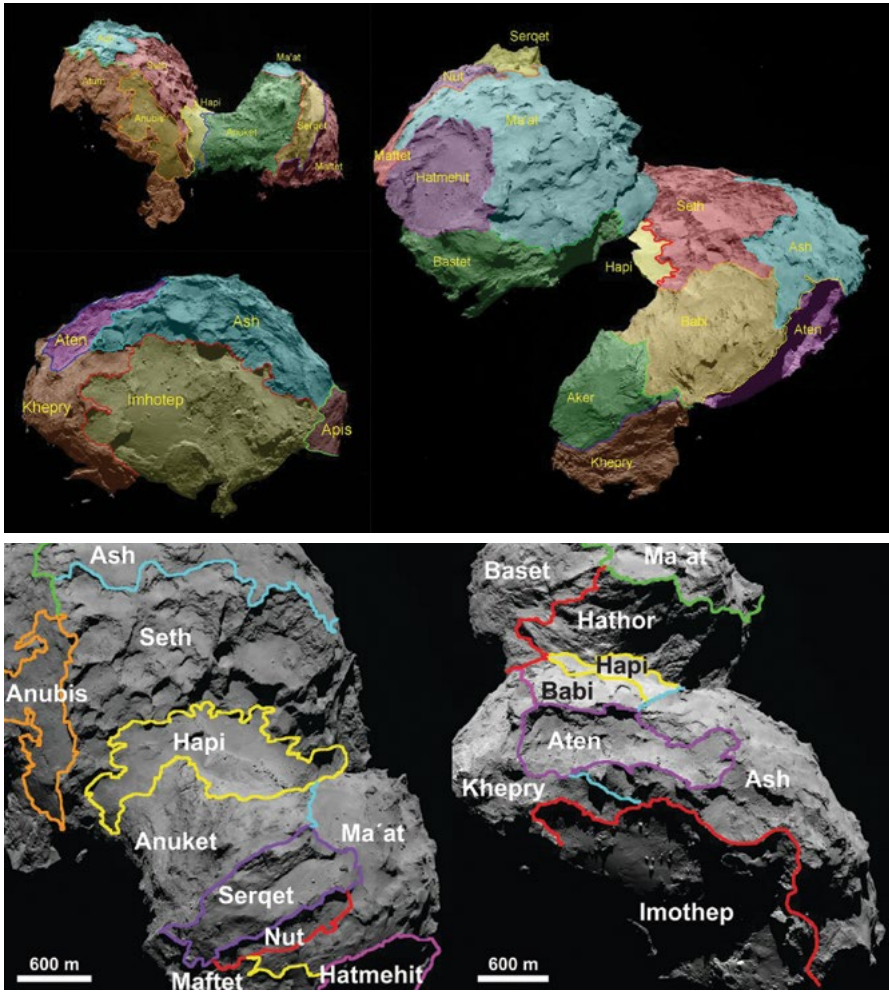
Eylül'e gelindiğinde etkinlik seviyesi hayli artmıştı. Ölçümler 67P'nin etrafında bir manyetik atmosferin oluştuğunu ve güneş rüzgârını saptırmaya başladığını gösteriyordu. Bu sırada *Rosetta*'nın kuyrukluysıldızın çekirdeğine olan uzaklığı 28 kilometreden azdı ve Güneşe olan mesafe yaklaşık 3,3 AU'ydü.

67P'nin morfolojisi incelendiğinde çok çeşitli yapılar göze çarpıyor. Araştırmacılar, *Rosetta*'nın çektiği fotoğrafları kullanarak, kuyrukluysıldızın güneş ışığı alan bölgelerinin modellerini yaptı. Bu kısımlar toplam yüzey alanının %70'ine karşılık geliyor. Şu an karanlıkta kalan %30'luk kısım ise kuyrukluysıldız günberi konumuna geldiğinde güneş ışığı alıyor olacak.

Her bir pikselin 0,8 m x 0,8 m'lik bir alana karşılık geldiği görüntüler kullanılarak, 67P'nin yüzeyindeki 19 bölgeye isim verildi. Bu bölgeler beş kategoride sınıflandırılıyor: toz kaplı bölgeler, kırılğan maddeler içeren çukurlar, büyük ölçekli çukurlar, yumuşak bölgeler ve korunmasız sağlam bölgeler.

Maat ve Ash isimli bölgeler, 67P'nin yumuşak ve tozla kaplı kısımlarından ikisi. Kuyrukluysıldızın yüzeyi ile ilgili dikkat çeken önemli noktalardan biri, yüzeyde çarpmalardan kaynaklanan belirgin izlere rastlanmaması. Ancak yüksek çözünürlüklü fotoğraflarda kum tepesi benzeri yapılar görülüyor. Bu tepelerin, rüzgârların kumları taşımasıyla oluştuğu düşünülüyor.

Seth, Imhotep ve bazı diğer bölgelerde kırılğan maddelerin olduğu görülüyor. Araştırmacılar, Maat ve Ash bölgelerinin derinlerinde de kırılğan maddelerin olduğunu belirtiyor. Yüzeyde görülen 1,0 kilometre çapındaki Hatmehit isimli çukur, genel özellikleri itibarıyla göktaş çarpması sonucu oluşan çukurlara benzemiyor. Aten ve Nut isimli çukurlar ise belirgin bir şekle sahip değil. 67P'nin Güneş etrafındaki her bir turu sırasında 3 ila 5 x 10⁹ kilogram kütle kaybettiği tahmin ediliyor. Eğer bu çukurların oluşmasının sebebinin sadece buharlaşmalar olduğu varsayılırsa, Aten büyüklüğünde bir çukurun oluşması için 67P'nin geçmişte Güneş etrafında 10 ila 20 tur atmış olması lazım.



Imhotep, Anubis ve Hapi bölgeleri, aşırı derecede yumuşak maddelerle kaplı ve bu bölgelerde göktaşı çarpması sonucunda oluşabilecek herhangi bir iz görülüyor. Hathor, Anuket ve bazı diğer bölgelerin ise çok daha kayalık bir yapıya sahip olduğu görülüyor. Ancak bu bölgelerin yoğunluğu Dünya'daki kayalarinkinin ancak beşte biri ya da onda biri kadar. Sağlam yapılı bölgelerdeki maddelerin büyük çoğunluğu çok ufak parçalar halinde. Bu parçalar Güneşe yaklaştıkça buharlaştığı için zaman içinde yüzeyin görünümünün değişeceği belirtiliyor. 67P'nin yüzeyindeki çok çeşitli yapıların oluşumunda farklı fiziksel süreçlerin etkili olduğu belirtiliyor. Ancak bu yapıların büyük çoğunluğunun yüzeydeki tozların taşınması sonucunda oluştuğu düşünülüyor.

Rosetta'nın yaptığı ölçümler uzun zamandır tartışılan bir konu hakkında da veriler sağlıyor. Dünya'daki suyun ve or-

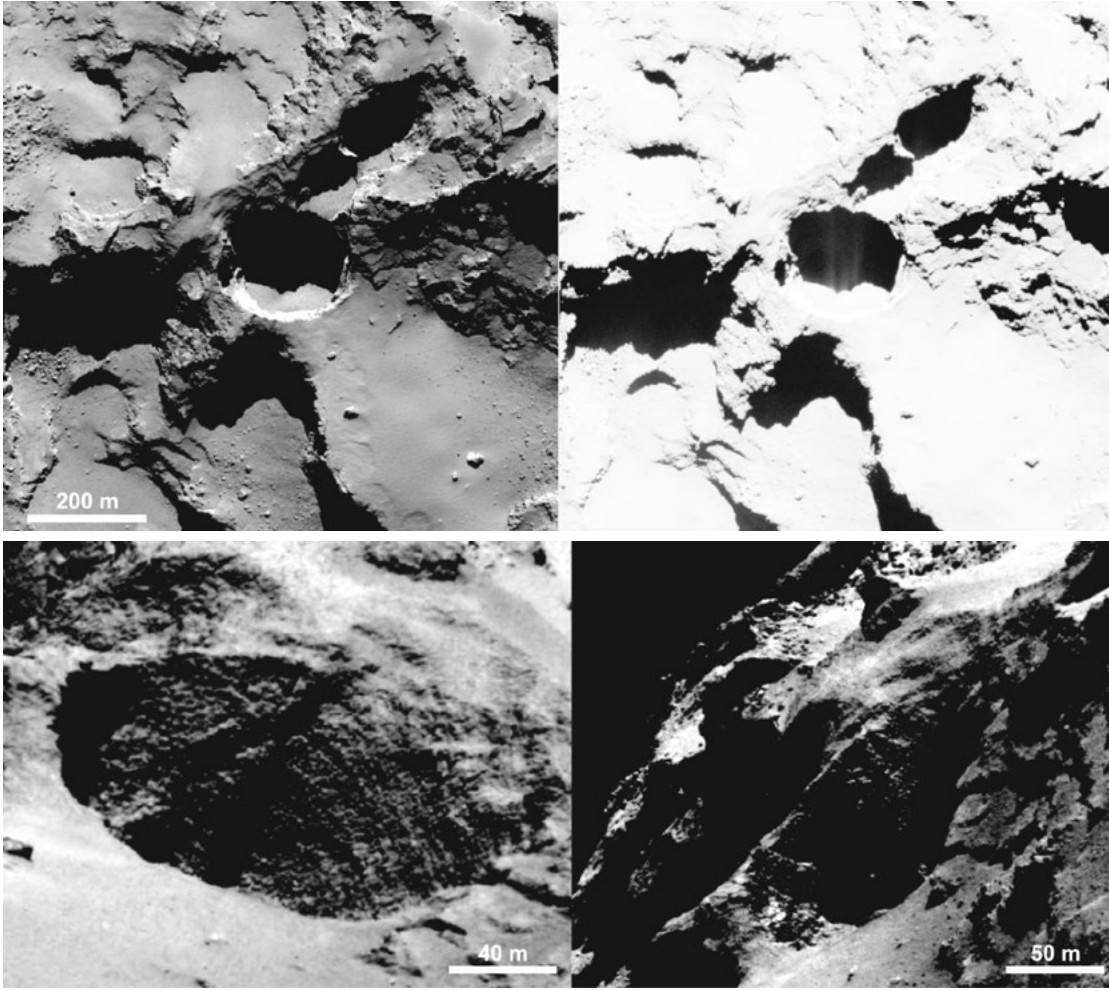
ganik maddelerin kökeninin ne olduğu hâlâ tam olarak bilinmiyor. Bugüne kadar ileri sürülen çok çeşitli görüşler var. Bu görüşlerin bazılarında Dünya'daki suyun bir kısmının ya da büyük bir çoğunluğunun kaynağının kuyrukluysıldızlar olduğu öne sürülüyor. Farklı senaryoların ne ölçüde doğru olduğunu sınamanın en iyi yollarından biri, kuyrukluysıldızlarda bulunan su moleküllerindeki döteryum/hidrojen (D/H) oranını ölçmek. Hidrojen atomlarının büyük bir kısmının çekirdeğinde sadece proton vardır. Çekirdeğinde protonunun yanı sıra bir tane nötron olan hidrojen atomlarına ise döteryum denir. Eğer Dünya'daki suyun kaynağının kuyrukluysıldızlar olduğu düşüncesi doğru ise kuyrukluysıldızlardaki ve Dünya'daki D/H oranı benzer olmalıdır.

Geçmişte kuyruklu yıldızlardaki D/H oranını ölçmek için sadece bir kez “yerrinde” ölçüm yapılmıştı: ESA’ya ait *Giotto*

uzay aracı yakınından geçerken 1P/Halley kuyrukluysıldızındaki D/H oranını ölçmüştü. *Rosetta*'nın yaptığı ölçümler yerinde yapılmış ikinci ölçümler oldu.

Rosetta'nın yaptığı ölçümlerin sonuçlarını değerlendirirken uzay aracının kendisinden yayılan gazları da dikkate almak gerekiyor. Çünkü yakıt tüketimi sonucunda uzaya salınan gazların içerisinde de su molekülleri var. *Rosetta*'nın etrafındaki parçacık yoğunluğu yaklaşık olarak 10^6 cm^{-3} . *Rosetta*'nın uzaya saldığı su moleküllerindeki D/H oranı ise $1,5 \times 10^{-4}$. Bu değer beklendiği gibi Dünya'daki D/H oranına eşit. Kuyruklu yıldızdan yayılan suyun uzay aracının civarındaki yoğunluğu, *Rosetta* 67P'ye 1000 kilometre mesafedeyken uzay aracının kendisinden yayılan suyun yoğunluğundan çok daha küçüktü. Ancak *Rosetta* 67P'ye 100 kilometreden daha yakinken, kuyruklu yıldızdan yayılan suyun *Rosetta*'nın civarındaki yoğunluğu, uzay aracının kendisinden yayılan suyun yoğunluğunun iki katından daha fazlaydı. Yapılan ölçümler 67P'den yayılan su moleküllerindeki D/H oranının Dünya'daki değerin üç katı kadar olduğunu gösterdi. Bu sonuç ve daha önceki araştırmalar sırasında yapılan ölçümler kuyruklu yıldızlardaki D/H oranlarının birbirlerinden çok farklı olduğunu gösteriyor. Dolayısıyla kuyruklu yıldızlardaki ve Dünya'daki su bileşimlerinin genel olarak birbirine benzediği söylenemez. Ancak D/H oranı Dünya'dakine yakın olan kuyruklu yıldızlar da var. Örneğin 103P/Hartley 2 kuyruklu yıldızındaki D/H oranı, diğer kuyruklu yıldızdakine göre, Dünya'dakine çok daha yakın.

Kuyruklu yıldızların oluşukları yerlere göre sınıflandırılması, yakın bölgelerde oluşan kuyruklu yıldızların benzer bileşimlere sahip olduğu varsayımına dayanıyor. Ancak bu varsayımı destekleyen bir “yerinde” ölçüm bugüne kadar yapılmamıştı. Geçmişte yapılan çeşitli çalışmalar kuyruklu yıldızların atmosferlerinin bileşiminin heterojen olduğunu gösteriyor. Bu heterojenlik, kuyruklu yıldızların çekirdeklerinin bileşimindeki heterojenlikten kaynaklanıyor olabilir.



Rosetta, 67P'nin kuyruğunun bileşiminde meydana gelen değişiklikleri inceledi. Çeşitli enlemlerde yapılan ve çekirdeğin kendi etrafında pek çok kez döndüğü uzun zamanlara yayılan ölçümler sonucunda, kuyruğun bileşiminde hem günlük hem de mevsimsel değişiklikler gözlemlendi. Bu durum çekirdek ile kuyruk arasında karmaşık bir ilişki olduğunu gösteriyor. Yaşanan mevsimsel değişiklikler, çekirdek yüzeyinin altındaki sıcaklık farklarından kaynaklanıyor olabilir.

Rosetta'nın üzerindeki MIRO cihazı kullanılarak, 67P'nin çekirdeğinin yüzeyinin sıcaklığı da ölçüldü. Bu sıcaklıkların da günlük ve mevsimlik olarak değiştiği görülüyor. MIRO'nun yaptığı bir diğer ölçüm ise yüzeyden yayılan su miktarı ile ilgili. Sonuçlar, çekirdekten buharlaşan su miktarının Haziran ayı başında 0,3 kg/s iken Ağustos sonunda 1,2 kg/s'ye çıktığını gösteriyor. Bu durum Güneşe yaklaştıkça çekirdeğin ısınmasının doğal bir sonucu.

Yüzey sıcaklığı ve çekirdekten yayılan gaz miktarı ile ilgili ölçümler, yüzeyin altındaki toz-buz karışımının sıcaklığının değişimi ile ilgili bilgiler de veri-

yor. Suyun buharlaşma miktarı çok kısa süreler içinde büyük değişiklikler gösteriyor. Çekirdeğin güneş ışığı alan ve almayan kısımları arasında çok büyük sıcaklık farkları var. Güneş ışığı almayan kısımların sıcaklığının düşük olması, bu kısımlardan yayılan su buharı miktarının da düşük olmasına neden oluyor.

Sonuç olarak, *Rosetta* projesi kapsamında yapılan çalışmalar sayesinde 67P kuyruklu yıldızı ve genel olarak kuyruklu yıldızlar hakkında çok şey öğrendiğimizi söyleyebiliriz. *Rosetta* hâlâ 67P'yi takip ediyor ve ölçüm yapıyor. Gelecekte yapılacak ölçümlerle kuyruklu yıldızlarda zaman içinde meydana gelen değişiklikler takip edilecek ve böylece Güneş Sistemi'nin oluşumu ve evrimi de daha iyi anlaşılmasına çalışılacak.

Kaynaklar

- Taylor, M. G. G. T., ve ark., "Rosetta begins its comet tale", *Science*, Cilt 347, s. 387, 2015.
- Sierks, H., ve ark., "On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko", *Science*, Cilt 347, aaa1044, 2015.
- Rotundi, A., ve ark., "Dust measurements in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko inbound to the Sun", *Science*, Cilt 347, aaa3905, 2015.
- Capaccioni, F., ve ark., "The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta", *Science*, Cilt 347, aaa0628, 2015.
- Nilsson, H., ve ark., "Birth of a comet magnetosphere: a spring of water ions", *Science*, Cilt 347, aaa0571, 2015.
- Thomas, N., "The morphological diversity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko", *Science*, Cilt 347, aaa0440, 2015.
- Hässig, M., ve ark., "Time variability and heterogeneity in the coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko", *Science*, Cilt 347, aaa0276, 2015.
- Gulkis, S., "Subsurface properties and early activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko", *Science*, Cilt 347, aaa0709, 2015.
- Altwegg, K., ve ark., "67P/Churyumov-Gerasimenko a Jupiter family comet with a high D/H ratio", *Science*, Cilt 347, 1261952, 2015.

