

Uç Koşulların Minik Süper Kahramanları

SU AYILARI

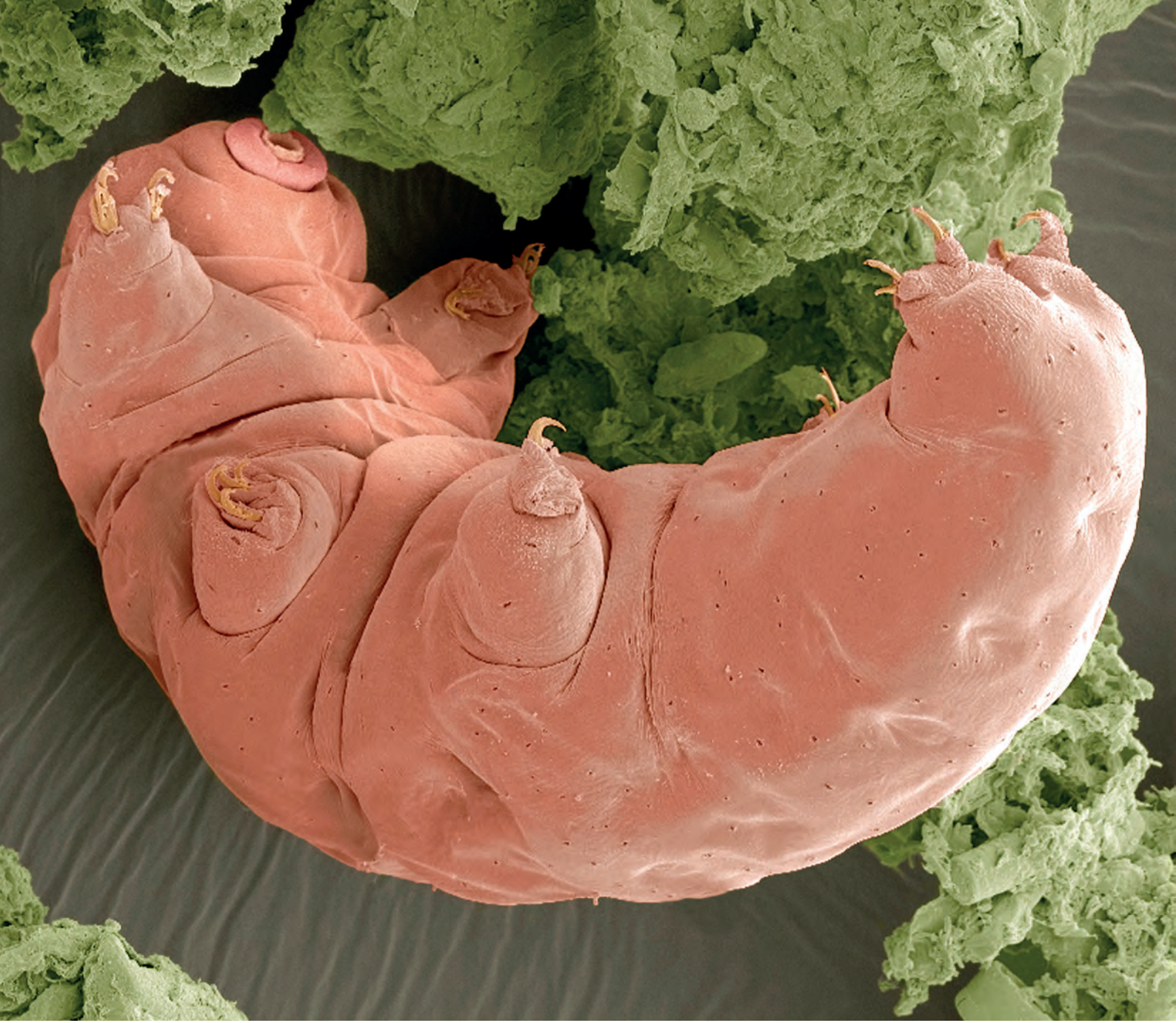
İlay Çelik Sezer [*Bilim ve Teknik Dergisi*]

Su ayıları, daha bilimsel adıyla tardigradlar, dünyanın hemen her yerinde sessiz sedasız yaşayıp, elektron mikroskoplarıyla elde edilen sevimli mi korkutucu mu olduğuna karar vermesi zor görüntülerinin yanı sıra uç koşullara karşı sıra dışı dayanıklılıkları ve bunun hücre düzeyindeki temelleri hakkında sundukları yeni bilgilerle özellikle son yıllarda popüler bilim gündeminde hayli ses getiren mikroskobik hayvanlar. İlk görüşte kurgu ürünüymüş izlenimi bile uyandırabilen bu tuhaf canlılar son yıllarda bilim dünyasının belki de en popüler maskotu olmakla kalmayıp giderek daha fazla araştırmaya konu oluyor.

Gelin onların gizemli dünyasına daha yakından bakalım.



Bir karayosununda bulunan
Paramacrobotus craterlaki türü bir su ayısının
elektron mikroskobu görüntüsü



Macrobiotus cinsi bir su ayısının elektron mikroskobu görüntüsü

Su ayılarını popüler bilim gündeminde ön plana çıkaran en önemli özellikleri çok çeşitli uç koşullara karşı sıra dışı biçimde dayanıklılık göstermeleri. Bu aynı zamanda dünya üzerinde çok geniş bir yayılım göstermelerinin de bir sebebi. Bilinen 1100'ün üzerinde su ayısı türü var. Çoğu tür karayosunlarının, likenlerin ve alglerin özsularını emerek beslenirken bazı türler omnivor, yani hem bitkileri hem de başka hayvanları yiyerek besleniyor. Başka su ayılarını avlayan türler bile var. Su ayılarının önemli bir bölümü karasal ortamlarda yaşıyor. Su ayısı olarak adlandırılmalarının sebebiyse yaşamsal etkin-

liklerini sürdürmek için vücutlarını çevreleyen ince bir su tabakasına ihtiyaç duymaları. Öte yandan suda yaşayan su ayısı türleri de var ki bunlar karadaki akrabaları gibi uç koşullara dayanıklılık özelliği göstermiyor. Su ayıları canlı sınıflandırmasında hayvanlar aleminin Tardigrada şubesini oluşturuyor. Aynı bir şube oluşturmaları da başka hayvanlarda görülmeyen sıra dışı özellikleriyle uyumlu bir durum. Su ayılarının geçmişi hayli geriye uzanıyor. Yaşı en az 500 milyon yıl öncesine tarihlenen fosiller bile var. Bu da dünyadaki beş toplu tür yok oluşunu atlatan az sayıdaki canlı grubundan biri oldukları anlamına geliyor.

Kuruduktan Sonra Canlanan Hayvancıklar



Johann August Ephraim Goeze, Alman zoolog
28 Mayıs 1731- 27 Haziran 1793

Keşiflerinden bu yana su ayıları hakkında elde edilen çoğu bilgi onların çok özel canlılar olduğunu gösteriyor. Su ayıları 1773 yılında Johann August Ephraim Goeze adlı bir Alman zoolog tarafından keşfedildi. Bundan üç yıl sonra ise İtalyan vaiz ve bilim insanı Lazzaro Spallanzani su ayılarının üstün yetenekleri olduğunu keşfetti.

Spallanzani bir yağmur oluşundan elde ettiği kuru yağmur suyu çöktürmesini sulandırıp mikroskopta incelediğinde biçimleri bir ayıyı andıran yüzlerce küçük canlıların suda yüzdüğünü gördü. *Opuscoli di Fisica Animale, e Vegetable* adlı kitabında yavaş hareketlerinden esinlenerek bu canlılara “yavaş yürüyen” anlamında “il Tardigrado” adını verdi. Dilimize tardigrad olarak geçen bu sözcük su ayılarının yaygın bilimsel ismi haline geldi.

Aslında kuru bir çökeltinin sulandırılmasıyla canlandırıldığı gözlemlenen ilk canlılar su ayıları değildi. 1702’de Hollandalı bilim insanı Anton van Leeuwenhoek kendi geliştirdiği mikroskopla yine yağmur oluklarından aldığı çöktürtilere su eklediğinde bazı “hayvancıkların” etkin hale gelerek yüzmeye ve yürümeye başladığını gözlemlemişti. Van Leeuwenhoek’un gözlemlediği canlılar tekerlekli hayvan olarak bilinen Rotifera şubesine ait hayvanlardı. Bunlar görünüşe göre aylarca susuz kalabiliyorlardı. Su ayılarının susuzluğa dayanma süresi ise yıllarla ölçülebiliyor.

1948 yılında İtalyan zoolog Tina Franceschi bir müze koleksiyonundaki 120 yıllık kurumuş yosunlar üzerinde bulunan su ayılarının canlandırılabilirliğini iddia etti. Suyu koyduğu su ayılarından birinin ön ayaklarından birini kıpırdattığını gözlemledi. Ancak bu gözleme ilişkin kayıtlar hayli tartışmalı kabul ediliyor. Ayrıca bir canlanma gözlemlendiyse bile söz konusu kayıtlarda tam olarak normal hayata dönebildiklerine ilişkin bilgi yok. K. Ingemar Jönsson ve Roberto Bertolani adlı araştırmacılar bu kayıtları 2001 yılında tekrar değerlendirdiklerinde 120 yıl gibi uzun bir sürenin ardından görülen belli belirsiz bir canlanmanın en iyi ihtimalle nadir bir durum olabileceği, kuruyan bir su ayısının hayatta kalabilmesi için on yıl civarındaki bir sürenin daha gerçekçi olacağı yönünde bir öngöründe bulundu. Örneğin 1995 yılında yapılan bir deneyde kurumuş haldeki su ayılarının 8 yıl sonra hayatta döndüğü gözlemlendi.



Tun Halinin Keşfi

Hayvanların çoğu için su olmadan yaşamak imkansızdır. Chapel Hill’deki (ABD) North Carolina Üniversitesi’nde uç koşullarda yaşam konusunda araştırmalar yapan Thomas Boothby, kuruduğu zaman tipik bir hücrenin parçalandığını, içindekilerin dışarı aktığını, ayrıca proteinlerinin özel üç boyutlu yapılarını kaybedip bir arada topaklaşarak işlevsiz hale geldiğini söylüyor. İtalya’daki Modena and Reggio Emilia Üniversitesi’nden profesör Roberto Guidetti’ye göre, su ayılarının öldürücü olan su kaybına karşı direnci moleküler, fizyolojik ve yapısal düzeylerde etki gösteren karmaşık bir dizi etmene bağlı.

Su ayılarının su olmadan nasıl hayatta kalabildiğine ilişkin ilk keşif 1922’de Alman bilim insanı H. Baumann tarafından yapıldı. Baumann su ayılarının kurudukları zaman kafalarını ve sekiz bacaklarını içeri çektiklerini, sonra da ölüme benzeyen durağan bir hal aldıklarını gözlemledi. Su ayıları bu haldeyken vücutlarındaki suyun büyük kısmını dışarı atarak kuru bir kabuk içinde kıvrılıyordu. Baumann’ın “Tönnchenform” olarak adlandırdığı bu hale bugün *tun* hali adı veriliyor. Bu haldeyken metabolizmaları aşırı derecede yavaşlıyor. Bu şekilde yıllarca bekleyebilir ve ancak suyla temas ederlerse canlanabiliyorlar.

Uç Koşulları Atlatma Ustası

Tun halinin su ayılarının kurumaya karşı dayanıklılık göstermesi için elzem olduğu biliniyor. Ancak Baumann bu özel hali tanımlamadan çok önce su ayılarının başka üstün özellikleri fark edilmeye başlanmıştı. 1842'de Fransız bilim insanı Doyere *tun* halindeki bir su ayısının 125°C sıcaklıkta birkaç dakika tutulduğunda hayatta kalabildiğini göstermişti. 1920'lerde de Gilbert Franz Rahm adlı bir rahip su ayılarını 151°C sıcaklığa maruz bıraktıktan sonra hayata döndürmeyi başarmıştı. Rahm su ayılarının soğuğa dayanıklılığını da sınamış, onları 21 aylığına -200°C'deki sıvı havada, 26 saatliğine -253°C'deki sıvı azotta ve 8 saatliğine -272°C'deki sıvı helyumda tutmuş, su ayıları suyla temas eder etmez canlanmıştı.

Bugün su ayılarının mutlak sıfır olarak adlandırılan sıcaklığın (-273°C) çok az üstündeki -272,8°C'ye dayanabildiği biliniyor. Bir karşılaştırma yapmak gerekirse dünya üzerinde kaydedilmiş en düşük sıcaklık -89°C. Yani aslında su ayıları doğada görülmeyen ve ancak laboratuvar ortamında oluşturulabilen çok düşük sıcaklıklara dayanabiliyor. *Tun* halindeki su ayıları 570.000 Rad'ı (500 Rad insanı öldürmek için yeterli) bulabilen şiddette X ışınlarına karşı da dayanıklılık gösteriyor. Yapılan deneyler su ayılarının, *tun* halinde olmasalar bile yüksek dozda alfa, gama ve morötesi ışınımına da dayanabildiklerini gösterdi.

2007 yılında binlerce su ayısı bir uydunun dış yüzeyine yerleştirildi ve bu şekilde uzaya gönderildi. Uydu dünyaya döndükten sonra bilim insanları su ayılarının çoğunun hayatta kaldığını gördü. Hatta dişilerden bazıları yumurtlamış, yumurtalardan sağlıklı yavrular çıkmıştı. Uzaya gönderilen su ayılarının karşılaştığı en büyük tehlike radyasyondur. Su ayılarının bir kısmı daha yüksek radyasyona maruz kalacak şekilde bir kısmı ise daha korunaklı biçimde yerleştirilmişti. Daha yüksek dozda radyasyona maruz kalanlar korunanlara göre daha fazla zarar gördüyse de ölüm oranları %100 değildi. Öte yandan uzaya gönderilen su ayılarının bir kısmının Dünya'ya dönüp yeniden suya bırakıldıklarındaki hayata dönme oranları Dünya'yı hiç terk etmemiş su ayılarınınkinden yakındı. Uzay yolculuğu su ayılarının çok güçlü vakuma dayanıklılıklarını da sınamış oldu.

Japonya'daki Kanawaga Üniversitesi'nden Kunihiro Seki ve Masato Toyoshima 1998'de yayımladıkları çalışmada su ayılarının aynı zamanda çoğu hayvanı yamyası hale getirecek çok yüksek fiziksel basınçlara da dayanabildiğini gösterdi. Araştırmacılar *tun* halinde iken su ayılarının 600 megapaskal (MPa) düzeyinde basınca dayanabildiğini gözlemledi. Bu basınç doğada karşılaşılabilecekleri herhangi bir basıncın çok üzerinde. Okyanusların en derin yeri, Pasifik Okyanusu'ndaki Mariana Çukuru'nun 10.994 metre derinlikteki "Challenger Deep" adlı kısmı. Burada bile su basıncı 100 MPa civarında. Yani su ayıları buradaki basıncın altı katına dayanabiliyor. Normalde bu kadar şiddetli basınçlar altında proteinler ve DNA yırtılıp parçalanır. Yağ yapılı hücre zarlarıysa buzdolabına konan tereyağına benzer biçimde katılaşır. Çoğu mikroorganizmanın metabolizması 30 MPa'da durur. 300 MPa'nın üzerindeki basınçlarda bakteriler ölür.

Dünya üzerinde bulunmayan pek çok uç koşuldansa sağ çıkabilen su ayılarının Dünya'nın her kıtasında, yer yüzünün en çetin koşullara sahip bazı yerlerinde bile yaşayabilme becerisini göstermesi pek de şaşırtıcı değil. Örneğin Himalayalar'daki bir dağın 5546 metre yükseklikteki bir noktasında, Japonya'daki bir termal su kaynağında, okyanusun dibinde ve Antarktika'da su ayılarına rastlandı. Tüm su ayıları aktif haldeyken suya ihtiyaç duysa da karasal ortamlarda yaşayabiliyorlar. Sıvı suya sadece mevsimsel olarak erişmeleri yeterli olduğu için örneğin yosunların ve likenlerin üzerinde, toprakta ve hatta buzlu yüzeylerde bile yaşayabiliyorlar.



Neden Dayanıklılar?

Bu kadar sıra dışı özelliklere sahip su ayılarının rutin yaşamlarına baktığımızda aslında şaşırtıcı derecede “mütevazı” ve belki de “sıkıcı” hayatlar yaşadıklarını söyleyebiliriz. Çoğu su ayısı, örneğin termal bacalarda ya da başka uç koşullarda yaşayan bakterilerin aksine hayli sıradan yerlerde yaşar. Sulak ya da suya yakın yerleri tercih ederler. Bir parça yosun ya da liken bulduklarındaysa keyiflerine diyecek yoktur. Üstelik onların boyutlarındaki çoğu canlının aksine hayli yavaş hareket ederler. Öyleyse su ayıları dünya üzerinde bulunmayan uç koşullara bile dayanmalarını sağlayacak direnci nasıl kazanmış olabilir?

Aslında bu sorunun yanıtı su ayılarının söz konusu dirençliliğe sahip olmayan bir alt grubunda yatıyor. Su ayılarının en eski ve en ilkel grubu olan Arthrotardigrada uç koşullarda hayatta kalamıyor ve metabolizmasını askıya alamıyor. İşte bu gruptaki su ayıları diğerlerinin neden o kadar dayanıklı hale geldiği konusunda ipuçları barındırıyor. Arthrotardigrada türleri sadece okyanuslarda yaşıyor. Uç koşullarda hayatta kalabilen su ayılarıysa karada ve tatlı sularda yaşayanlar. Bu da uç koşullara karşı dayanıklılığın karasal ortamlara yönelik uyum sağlamakla bir ilişkisi olduğunu düşündürüyor.

Boothby’ya göre denizdeki su ayılarının uç koşullara karşı dayanıksız olmasının sebebi çok basit: Buna ihtiyaçları olmaması. Boothby okyanusların, sıcaklık ve tuzluluk açısından hızlı değişimler geçirmeyecek kadar büyük olduğu ve kuruma tehdidi barındırmadığını belirtiyor.

Oysa karasal ortamlar sürekli tehlikeli değişimlere sahne olur. Su ayıları soluk almak, beslenmek, çiftleşmek ve yer değiştirmek için vücutlarının etrafını kaplayan ince bir su tabakasına ihtiyaç duyar. Oysa karadaki pek çok yerde kuraklık riski vardır. Boothby karasal ortamlarda yaşayan su ayılarının çevresel koşullardaki ani değişimlerle baş edebilmesi gerektiğini söylüyor. Dolayısıyla karada yaşayan su ayılarının aniden susuz kalmaya karşı birtakım direnç mekanizmaları kazanmış olması akla yatkın. Üstelik bu direnç mekanizmaları su ayılarının çok farklı habitatlara yayılmasını da sağlamış. Su ayılarına başka hayvanların yaşayamadığı en kurak yerlerin bazılarında rastlanabiliyor.

Uzunluğu olgun haldeyken yarım milimetreyi bulabilen su ayısının vücudu gelişmiş bir baş bölgesi, birleşik haldeki dört bölmeden oluşan kısa ve tombul bir gövde ve uçlarında genellikle pençemsî çıkıntılar bulunan dört çift eklemsiz bacadan oluşuyor. Vücudunu saran kitin ve protein yapılı, pürüzlü ancak esnek kabuğunu büyüdükçe yenisiyle değiştirmesi gerekiyor. Dolaşım ve solunum için özelleşmiş bir organı bulunmuyor. Zooloji terminolojisinde hemosöl adı verilen vücut boşluğunda kanı ve oksijeni taşıyan bir sıvı bulunuyor. Oksijen hayvanın dış yüzeyinden difüzyonla vücuduna giriyor ve hemosöldeki hücrelerde tutuluyor. Sindirim kanalı hayvanın vücudunda bir uçtan bir uca uzanıyor. Hortumsu ağzının kenarlarında stilet adı verilen kesici yapılar bulunuyor. Bu yapıları besin kaynağı olarak kullandığı bitki ve hayvan hücreleri ile avladığı omurgasız hayvanları parçalamakta kullanıyor. Elde ettiği besinleri emerek yutuyor.



Kriptobiyoz

Su ayılarının çeşitli uç koşullara karşı hayatta kalma becerisi aslında genel olarak kriptobiyoz olarak adlandırılan, metabolizmanın aşırı derecede yavaşladığı hatta bir nevi askıya alındığı pasif bir hale geçebilmesine dayanıyor. Dış ortamda geçerli olabilecek kuraklık, aşırı soğuk, aşırı tuzluluk ve oksijen yetersizliği gibi farklı uç koşullarda farklı kriptobiyotik durumlar görülüyor:

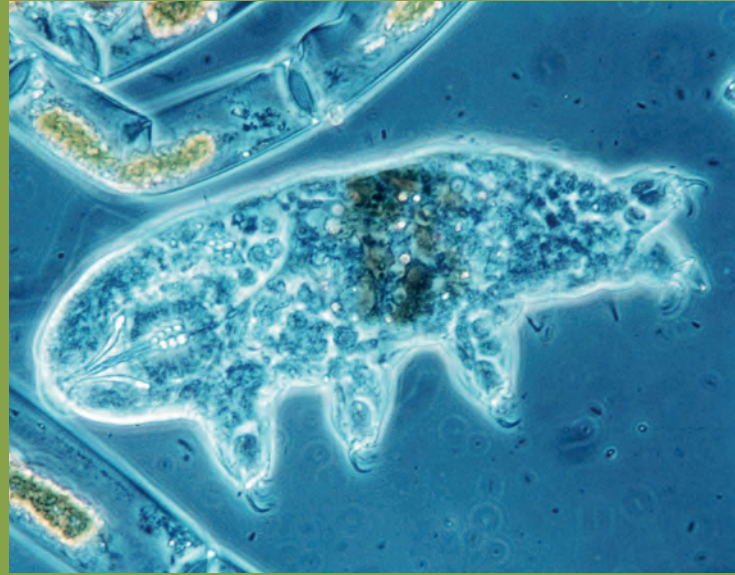
- Anhidrobiyoz (kuraklığın tetiklediği durum)
- Kriyobiyoz (düşük sıcaklıkların tetiklediği durum)
- Anoksibiyoz (yetersiz oksijen koşullarının tetiklediği durum)
- Ozmobiyoz (dış ortamdaki yüksek tuz derişiminden kaynaklı su kaybının tetiklediği durum)

Su ayıları kriptobiyoz girince vücutlarındaki suyu büyük ölçüde dışarı atarak, dolayısıyla kuruyarak, metabolizmalarını da aşırı derecede yavaşlatarak *tun* haline bürünüyor. *Tun* hali gerçek kriptobiyoz sayılan anhidrobiyoz, kriyobiyoz ve ozmobiyoz durumlarında gözlemlenirken anoksibiyozda görülüyor. Bu anlamda anoksibiyoz gerçek bir kriptobiyoz sayılmıyor. Anhidrobiyoz, kriyobiyoz ve ozmobiyoz durumlarının her birinde uyarıcı farklı olduğu halde vücuttan %95'in üzerinde su atımı gerçekleştirilerek *tun* oluşturuluyor. Vücut kıvrılıyor ve bacıklar içeri çekiliyor.

Kriptobiyozun su ayılarında en yaygın görülen çeşidi yetersiz nem koşullarının tetiklediği anhidrobiyoz. Örnek vermek gerekirse bir insan, vücudundaki su kaybı %5'i geçtiğinde sersemlik ve baş ağrısı, %10'u geçtiğinde fiziksel ve zihinsel performansta azalma yaşarken %15-25'i bulduğunda hayatını kaybeder. Anhidrobiyoz sürecine giren su ayılarıysa vücutlarındaki suyun neredeyse tamamını atıyor, korunaklı bir top biçiminde kıvrılıyor ve metabolizma hızını normalin %0,01'inden daha düşük bir hıza getiriyor. Su ayıları *tun* halindeyken sıfır nem koşuluna bile dayanabiliyor. Ancak *tun* oluşumunun tetiklenebilmesi için nemliliğin bir süre %70-95 arasında seyretmesi gerekiyor. Nemlilik çok düşükse ve oksijen yetersizse su ayıları *tun* oluşturamıyor. *Tun* oluşturabilmek için yeterli enerjiye (dolayısıyla oksijene), neme ve zamana ihtiyaç duyuyorlar.

Görünüşe göre, su ayıları kurumaya başladıklarında bol miktarda antioksidan üretiliyor. Antioksidanlar tehlikeli biçimde tepkimeye girme potansiyeli gösteren, reaktif oksijen türleri adı verilen kimyasal maddeleri bertaraf eden maddeler. Antioksidanların su ayılarının hücrelerindeki zararlı kimyasalları temizlediği düşünülüyor. Reaktif oksijen türleri su ayılarının karşılaştığı önemli tehlikelerden birini oluşturuyor. Bu maddeler her ne kadar normal hücre işlevi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkıyorsa da çevresel strese, örneğin su ayıları gibi kuraklığa, maruz kalan canlılarda miktarları artıyor. Su ayıları kriptobiyoz girerek zor koşulları atlatsa bile bu bekleme sürecinde DNA'larında bir miktar hasar birikiyor. Bu yüzden kriptobiyoz sonrasında hayata dönmelerinde etkin bir DNA onarımının önemli bir rolü olduğu düşünülüyor.

Derin Dondurucuda 30 Yıl



Su ayılarının kuruduktan ya da dondurulduktan sonra hayata dönme yeteneği çok kez sınanmasına rağmen birkaç yıl öncesine kadar dondurulmuş halde on yılları bulan uzun sürelerde saklandıktan sonra hayata dönme başarılarını sınanan pek olmamıştı.

Su ayılarından başka bazı nematod solucanları, maya mantarları ve bakteriler de kuruyunca hayatta kalabiliyor. Bunu trehaloz adlı bir şekeri çok miktarda üreterek başarıyorlar. Bu şeker hücrelerinde camsı bir yapı oluşturarak hücredeki önemli bileşenleri, örneğin proteinleri ve hücre zarını sabitleyerek öteki türlü maruz kalacakları yıkımdan koruyor. Su ayılarının da aynı mekanizmayı kullandığı düşünülüyordu ancak su ayılarının sadece bazı türlerinin trehaloz ürettiği görüldü. Üstelik trehaloz yardımıyla kuraklığa dayanan diğer canlılar vücut ağırlıklarının %20'sini bulan miktarlarda trehaloz üretirken su ayılarında bu oran sadece %2 civarında.



Elektron mikroskobu görüntüleri elde edilirken örneğin üzeri metal bir filmle kaplanıyor. Bu yüzden de su ayıları elektron mikroskobu görüntülerinde opakmış (ışık geçirmeyen) gibi görünüyor. Oysa ışık mikroskobu görüntülerinden anlaşılacağı üzere su ayıları şeffaf canlılar. Ayrıca suda yaşayan su ayıları beyaz renkliken karada yaşayanlar beyaz, yeşil, turuncu ve kırmızı gibi farklı renkleri sergileyebiliyor. Farklı renklerin morötesi (UV) ışığa karşı koruyucu bir adaptasyon olabileceği düşünülüyor.



Japonya'dan araştırmacılar 7 Mayıs 2014'te, o tarihten 31 yıl önce Antarktika'daki bir karayosununun üzerinden alınıp -20 °C'de dondurulan su ayısı örneklerini çözdürdü. Önce 24 saat süreyle 3°C'de bekletilip sonraki 24 saatte de suda bekletilen su ayıları bir stereomikroskop altında incelenip izole edildikten sonra uygun besi ortamlarında tutulup düzenli olarak gözlemlendi. Üç su ayısından ikisi yaşamaya devam edip, bir kısmı yumurtadan çıkıp sağlıklı şekilde yaşayan yavrular üretebildi. Öte yandan su ayılarının normalden biraz daha uzun sürede canlanması, üç bireyden birinin canlandıktan kısa bir süre sonra ölmesi gibi bulgular derin dondurucudaki 31 yılın su ayılarına bir miktar hasar vermiş olabileceğini düşündürdü. Canlanma süresindeki uzamanın uç koşullarda geçen zamanda biriken hücresel hasarın sonucu olabileceği düşünüldü. Araştırmacılar su ayılarından birinin yavrularının yumurtadan normalden uzun sürede çıkmasının ve diğerinin yavrularının yumurtadan çıkma oranının normalden düşük olmasının da aynı sebebe dayandığı kanısına vardı.

Su ayılarının oksijen yetersizliğine karşı çok hassas olduğu biliniyor. Uzun süren oksijen yetersizliğinde ozmotik düzenleme mekanizmaları (hücrelerdeki ve vücut sıvılarındaki su içeriğini dengede tutan mekanizmalar) sekteye uğruyor. Su ayıları bu durumu anoksibiyoz süreciyle atlatabiliyor. Gerçek kriptobiyoz hallerinden farklı olarak anoksibiyozda su ayıları vücuduna bol su alarak şişkin bir hale geliyor. Su ayısının kendine gelme süresi bu koşulda ne kadar kaldığına bağlı olarak değişiyor. Ancak su ayılarının anoksibiyozda ne kadar uzun süre kalabildiği konusundaki farklı araştırmalara ait sonuçlar biraz çelişkili.

Su ayılarının soğukta karşılaştığı en büyük tehlike buzlanma. Eğer hücrelerinde buz kristalleri oluşursa bu kristaller DNA gibi çok önemli moleküllerin parçalanmasına neden olabiliyor. Bazı canlılar, örneğin bazı balıklar hücrelerindeki suyun donma derecesini düşürmek için antifriz proteinleri üreterek buz oluşumunu engelliyor. Ancak su ayılarında bu proteinlere rastlanmıyor.

Görünüşe göre su ayıları hücrelerindeki buz oluşumunu engellemek yerine hücrelerindeki suyun düzenli bir biçimde donmasını sağlıyor. Su ayılarının çekirdeklerindeki adı verilen kimyasallar yardımıyla buz kristallerinin hücrelerinin içinde değil daha çok dışında oluşmasını tetikleyebildiği, öte yandan düşük sıcaklıklarda hücrelerden su atarak hücre içi buz oluşumunu en aza indiriyor olabileceği düşünülüyor. Yine de kriyobiyoz sürecinin ayrıntıları büyük ölçüde gizemini koruyor.

Dayanıklılık Genleri Büyük Ölçüde Kendilerine Özgü

Thomas Boothby ve ekibinin 2015'te yayımladığı bir araştırmada uç koşullara dayanıklı bir su ayısı türü olan *H. dujardini*'nin DNA'sının yaklaşık altıda birinin bakteri, bitki, mantar ve arkea kökenli olduğu yönünde sonuçlar elde edilmiş, bu durum yatay gen geçişi adı verilen sürecin sıra dışı ölçüde yüksek oranda gerçekleştiği bir örnek olarak kabul edilmişti. Araştırmacılar ayrıca su ayılarının uç koşullardaki sıra dışı hayatta kalma yeteneklerinin hatırı sayılır ölçüde yatay gen geçişine dayanıyor olabileceğini iddia etmişlerdi. Ancak 2016'da Tokyo Üniversitesi'nden Takuma Hashimoto ve Daiki Horiwaka tarafından yayımlanan bir araştırmada yabancı genlerin oranının çok daha düşük (%1,2'den az) olduğu tespit edildi. Bu da su ayılarının sıra dışı dayanıklılıklarının daha çok özgün genlerine dayandığını düşündürdü. Bu iki araştırmanın ardından Japonya'daki Keio Üniversitesi'nden Yuki Yoshida önderliğindeki bir araştırma ekibi *H. dujardini*'nin genom dizilimini yeniden belirledi. Yoshida ve ekibi de yatay gen geçişi kaynaklı gen oranının Boothby ve ekibinin bulduğu oranın çok altında olduğu, öte yandan yatay gen geçişi kaynaklı genlerin bazılarının anhidrobiyoz sürecinde etkili olduğu sonucuna vardılar.

Yoshida ve ekibinin çalışmasında genom dizilimleri belirlenen iki su ayısı türünden *R. varieronatus* uç koşullara daha dayanıklı bir tür. *R. varieronatus* %30 bağıl nem koşulunda 30 dakika içinde anhidrobiyozla girebiliyor. *H. dujardini* ise hayatta kalma şansının yüksek olabilmesi için anhidrobiyozla girmeden önce, %85 bağıl nem koşulunda 48 saat süreli bir ön koşullanmanın ardından %30 bağıl nem koşulunda 24 saatlik bir süre geçirmeye ihtiyaç duyuyor.

Yoshida ve ekibi anhidrobiyoz sürecinde etkili olan, su ayılarına özgü birkaç gen ailesi belirledi. Isıyla çözünen "Sitoplazmada bol/ısıyla çözünen" (CAHS: cytoplasmic abundant heat soluble) proteinler, "salgılarda bol/ısıyla çözünen" (SAHS: secretory abundant heat soluble) proteinler, "embriyogenezin geç safhasında bol/mitokondriyel" (RvLEAM: late embryogenesis abundant mitochondrial) proteinler ve hasar baskılayıcı (Dsup) proteinler bunlar arasında.

Yeni Oluşan Ekosistemlerin İlk Sakinlerinden

Su ayıları *tun* halindeyken bir toz tanesinden pek de farklı olmadıkları için rüzgârla kolayca taşınabiliyorlar. Dünya üzerindeki geniş yayılımlarında bunun etkisi olduğu düşünülüyor. Bilim insanlarına göre geniş yayılımlarına katkısı olan bir özellikleri de partenogenetik olmaları, yani eşeysiz olarak yumurtlayabilmeleri ve nadiren de hermafrodit olmaları, yani kendi kendilerini dölleyebilmeleri. Dolayısıyla rüzgârla tek başına uygun bir ortama taşınan bir su ayısının bir popülasyon oluşturabilmesi mümkün. ABD'deki Brigham Young Üniversitesi'nden biyolog Byron Adams su ayılarının yeni ve zorlu ortamları, örneğin bir volkan patlamasından geride kalan bir araziye ilk kolonize eden canlılar arasında olduğunu, bu yüzden de yeni oluşan ekosistemde besin zincirleri arasında bağlantılar oluşturduğunu belirtiyor.

R. varieronatus'ta ayrıca stresle ilgili sinyal yollarında şaşırtıcı miktarda gen kaybına rastlandı. Sinyal yolları gen anlatımını etkileyen etkileşimler silsilelerine verilen ad. Araştırmacılar normalde bu yolların kaybı bir canlıda öldürücü olabileceken su ayılarında bu direnç yollarının eksikliğinin anhidrobiyoz süreciyle ilgili olabileceğini düşünüyor. Yoshida ve ekibinin bulgularına göre anhidrobiyozla ilintili işlevlerde etkili olan az sayıda gen de yatay gen geçişi yoluyla elde edilmiş görünüyor. Bunlardan biri, hem bitkilerde hem de hayvanlarda görülebilen, hücre organellerinin zarar görmesini engelleyen koruyucu bir jel vazifesi gören trehaloz şekerini sentezleyen bir proteinin geni.

Su ayılarını eşsiz kılan özelliklere ilişkin elde edilen tüm bu genetik bulgulara rağmen gizemini koruyan sorulardan biri su ayılarının hayvanlar alemindeki en yakın akrabasının kim olduğu. Sekiz uzuvları, bölmeli gövdeleri ve merkezi ve çevresel sinir sistemleriyle morfolojik açıdan eklem bacaklılara benzeseler de genomik sınıflandırma çalışmaları vücutları bölmesiz olan, yan uzuvları bulunmayan ve basit bir sinir sistemine sahip nematodlara daha yakın oldukları yönünde bulgular ortaya koyuyor. Yoshida ve ekibi *PLOS Biology*'de yayımlanan makalelerinde morfolojik ve genetik veriler arasındaki bu çelişkinin çözülmesinin önemli bilgiler sağlayacağını da vurguluyor.



Karayosunları ve likenler su ayılları için hayli uygun yaşama ortamları sunuyor.

İçsel Olarak Bozulmuş Proteinler

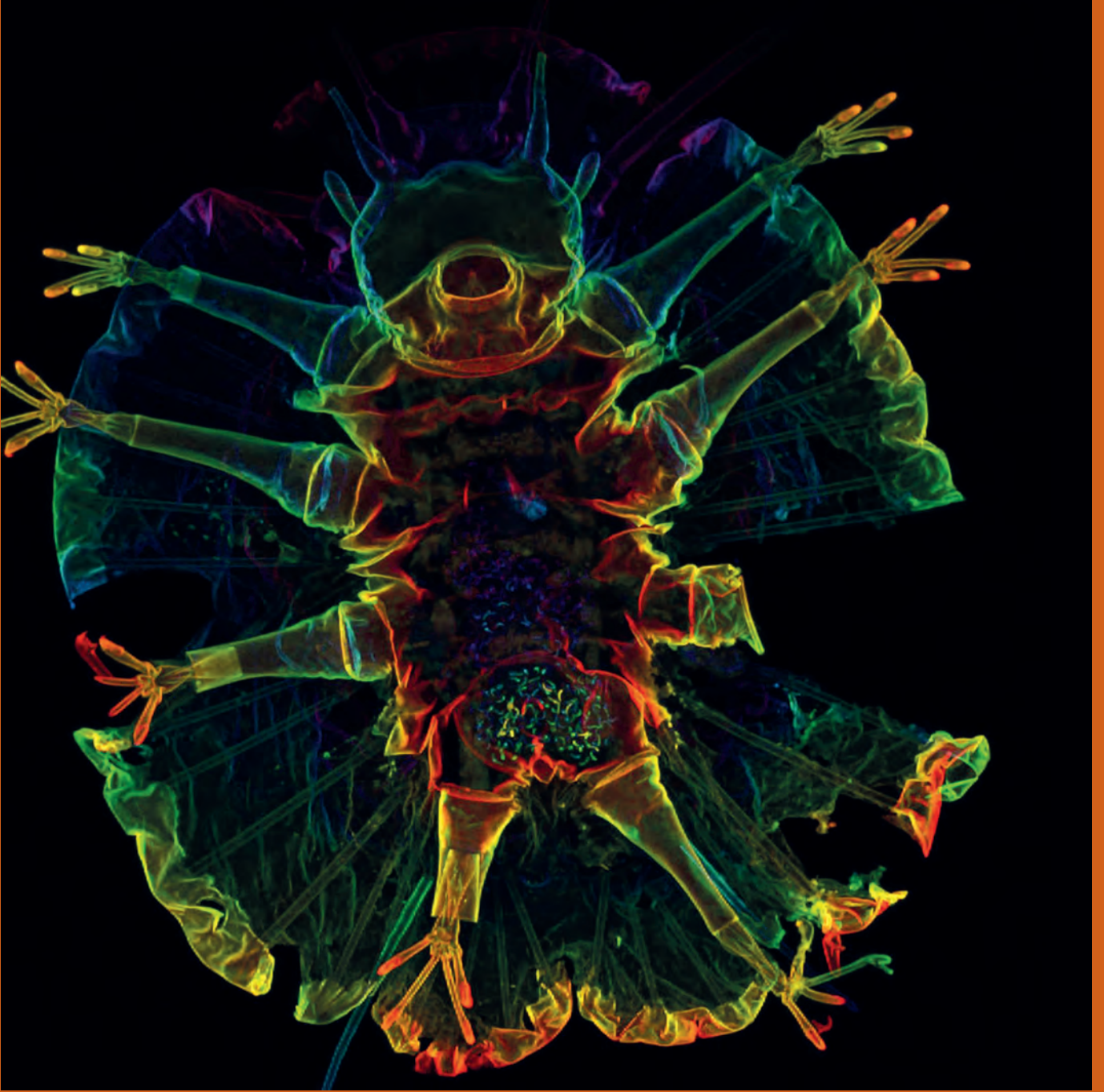
Boothby'nin da yer aldığı, 2017'de *Molecular Cell*'de yayımlanan bir araştırmada kurudukları zaman su ayıllarında etkinleşen genler incelendi. Listenin başında içsel olarak bozulmuş proteinler olarak adlandırılan proteinleri kodlayan genler vardı. Bu proteinler tipik bir proteinin sahip olduğu belirli üç boyutlu yapıdan yoksundur. Normalde proteinler aminoasit zincirlerinin belirli bir işlevi yerine getirmeyi sağlayan özel üç boyutlu yapılar biçiminde kıvrılmasıyla oluşur. İşte içsel olarak bozulmuş proteinlerde aminoasit zinciri böyle belirgin üç boyutlu bir yapıya bürünmeyip daha gevşek bir halde kalıyor. Bu proteinlerin üç boyutlu belirli bir şekilleri olmadan nasıl işlev gösterebildikleri tam olarak anlaşılammış olsa da Boothby ve ekibinin araştırması bunların su ayıllarının kurumaya karşı dayanıklılığı açısından kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koydu. Araştırmacılar su ayıllarında bu proteinleri kodlayan genlerin ifadesini, yani sonuç olarak proteinlerin üretimini azalttıklarında su ayıllarının kurumaya karşı dirençlerinin azaldığını, ancak aşırı soğuğa karşı dirençlerinin değişmediğini gördüler.

Bu da su ayıllarının soğuğa karşı korunmaya yönelik başka proteinlere sahip olduğunu düşündürdü. Araştırmacılar ayrıca içsel olarak bozulmuş protein genlerini bakteri ve maya mantarı gibi organizmalara aktardıklarında bu canlıların kurumaya karşı dayanıklılıklarının 100 kata kadar arttığını gördüler.

Görünüşe göre, içsel olarak bozulmuş proteinlerin işleyiş mekanizması, nematod solucanlarındaki gibi, canlıları kurumaya karşı koruyan trelahoz şekerininkine benziyor. Bu proteinler su ayıllarını camlaşma adı verilen bir süreçle bir anlamda donduruyor. Normalde kuruma canlı hücreleri kristalize eder ve bu da proteinlerin keşilip parçalanmasına neden olur. Ancak daha hassas bir süreç olan camlaşma sayesinde su ayılları kurumamanın üstesinden gelip yıllar sonra suyla temas ettiklerinde tekrar canlanabilirler. İçsel olarak bozulmuş proteinlerin, hücredeki proteinleri ve normalde kuruma sonucunda hasar görecektir başka molekülleri bir nevi sarmalayarak koruduğu, su eklendiğinde de çözündüğü düşünülüyor.

İçsel olarak bozulmuş proteinlerin faydalı uygulamalarda, örneğin faydalı proteinlerin kuru halde saklanabilmesi için kullanılabileceği düşünülüyor. Laktat dehidrojenazla yapılan bazı deneylerde bunu destekler yönde sonuçlar elde edildi. Normalde bu protein kuruduğu zaman etkinliğini kaybediyor. Araştırmacılar bu proteini önce içsel olarak bozulmuş proteinlerle karıştırıp sonra da kuruttu. Protein tekrar su ortamına alındığında normal etkinliğini geri kazandı. Ancak protein kuruduktan sonra onu içsel olarak bozulmuş proteinlerle karıştırmak işe yaramadı. Bu da içsel olarak bozulmuş proteinlerin diğer proteinleri korumak için onları çepeçevre sarması gerektiğini düşündürdü.

İçsel olarak bozulmuş proteinlerin bu koruma mekanizması, saklanması için soğuk ortam gerekmeyen kuru aşuların geliştirilmesine temel olabilir. Aşular aşırı derecede hassas biyolojik moleküller içeriyor ve bu yüzden buzdolabında saklanmaları gerekiyor. Bu hem aşuların dünyanın farklı yerlerine taşınma maliyetini çok yükseltiyor hem de aşuların ihtiyaç duyulan yerlere sağlam şekilde ulaştırılmasını riske sokuyor. Su ayıllarını kurumaya karşı koruyan proteinlerin, aşuları ve hassas ilaçları oda sıcaklığında saklanabilecek kuru bir hale getirmek için kullanılmasıyla soğuk zincir gereksiniminin ortadan kaldırılacağı düşünülüyor.



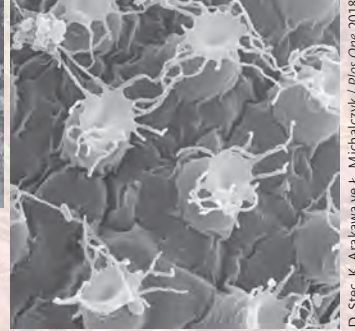
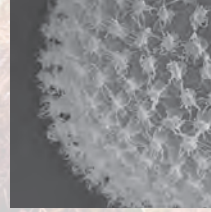
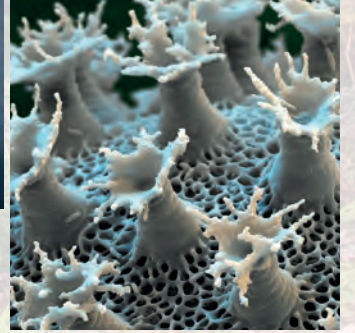
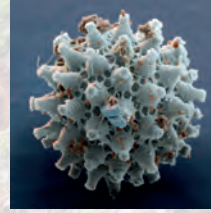
Hamburg Üniversitesi ile Hamburg Zooloji Müzesi'nden araştırmacılar 2014'te su ayıllarının canlı sınıflandırmasındaki yerini belirlemeye yönelik araştırmaları kapsamında bu hayvanların sinir sistemi ve kas yapısını ayrıntılı şekilde görüntülemek üzere özel bir teknik kullandı. O zamana kadar anatomiye dayalı olarak yapılan sınıflandırma çalışmalarında sadece dış görünüm ele alınmıştı. Araştırmacılar en iyi görüntüyü oluşturmak amacıyla çok dar bir net alan derinliğiyle çok net fotoğraflar çekebilen konfokal lazer taramalı mikroskobundan faydalandı. Her birine farklı bir renk atanan farklı fotoğraf katmanlarını bir araya getirdiklerinde hayvanın iç yapılarını ortaya çıkaran bu ayrıntılı görüntüyü elde ettiler. Araştırmacılar bu görüntüyle 2013'te Nikon tarafından düzenlenen Fotomikrografi Yarışması'nda ödöl aldı.

Farklı Uç Koşullar, Ortak Sorunlar

Aşırı sıcak ve soğğun, aşırı radyasyonun ve yüksek basıncın ortak noktası su ayılarının DNA'sına ve hücrelerinin başka kısımlarına zarar vermesi. Hem aşırı sıcak hem de aşırı soğuk, proteinlerin özel üç boyutlu yapılarını kaybetmesine ve birbirlerine yapışıp işlevsiz hale gelmesine neden oluyor. Radyasyon DNA'yı ve yaşamsal öneme sahip başka molekülleri parçalıyor. Yüksek basınç ise yağ yapılı hücre zarını katılaştırıyor.

Farklı baskı unsurları benzer sorunlara yol açtığı için de aslında su ayılarının birkaç stratejiyle bunların üstesinden geldiği düşünülüyor. Örneğin Boothby, hem kurumak hem de radyasyona maruz kalmak su ayılarının DNA'sına zarar verdiği için su ayılarının bu iki duruma karşı benzer tepkiler göstermesinin mantıklı olduğunu düşünüyor. Eğer durum böyleyse su ayılarının radyasyona olan direnci ani kuraklığa karşı geliştirdikleri direncin şanslı bir yan etkisi olabilir. Benzer biçimde bir su ayısının donması ve kuruması hücrelerde yeterli su kalmaması gibi ortak bir soruna neden oluyor.

İşin en tuhaf yanlarından biri de aslında su ayılarının o meşhur *tun* halinin o kadar da genel geçer bir strateji olmaması. Boothby su ayılarının donmayı, yüksek radyasyon ve düşük oksijen koşullarını *tun* haline geçmeden de atlatabildiğini, dolayısıyla *tun* halinin muhtemelen özellikle su kaybına yönelik olarak gelişmiş özel bir uyum stratejisi olduğunu, yine de bu stratejinin aynı zamanda aşırı basınca dayanmalarını da sağladığını düşünüyor.



D. Stec, K. Arakawa ve L. Michalczuk / Plos One 2018

Geçtiğimiz yılın Mart ayında Japonya'daki bir otoparkta yeni bir su ayısı türü keşfedildi.

Karada yaşayan çoğu su ayısı türünün yumurtasının yüzeyi yumru biçiminde, dikensi ya da iplikli çıkıntılar ve porlarla kaplıyken (yukarıda) bu türün yumurtası nispeten daha sade bir yapıdaydı (altta). Bulunan su ayılarının yeni bir türe ait olduğunu ilk düşündüren şey de bu fark oldu.

Güneş Var Oldukça Yaşayacaklar

Oxford Üniversitesi ve Harvard-Smithsonian Astrofizik Merkezi'nden araştırmacılar 2017'de *Scientific Reports*'da yayımladıkları bir araştırmada olası kozmik felaketlerin Dünya üzerindeki yaşam üzerine potansiyel etkileri ile ilgili bir analiz yaptı. Asteroid çarpmaları, gama ışını patlamaları ve süpernova biçimindeki yıldız patlamaları olmak üzere üç potansiyel astrofizik olayına odaklanan araştırmacılar su aylarının Güneş var oldukça, yani yaklaşık 5 milyar yıl daha yaşamaya devam edebileceği öngörüsünde bulundu. Araştırmacılar su aylarının sıra dışı dayanıklılık özelliklerini değerlendirip onları yok etmek için Dünya'daki okyanusları buharlaştıracak kadar etkili bir astrofizik olayı gerektiği yönünde çıkarım yaptı. Bu da çok büyük bir asteroid çarpması, Dünya'ya en fazla 0,14 ışık yılı uzaklıkta bir süpernova patlaması ya da en fazla 40 ışık yılı uzaklıkta bir gama ışını patlaması gerçekleşmesi anlamına geliyor. Bunların hiçbiri ciddi bir olasılığa sahip olmadığı için araştırmacılar su aylarının Dünya'yı etkileme ihtimali olan her türlü büyük astrofizik olayını atlatabileceği ve dolayısıyla insan soyu tükense bile yeryüzünde yaşamın Güneş var oldukça bir şekilde devam edeceği sonucuna vardılar.



Herkes Gözlemleyebilir

Su ayları düşük büyütme kapasiteli bir mikroskopla bile görülebildikleri için öğrenciler ve amatör bilimcilerin kolayca inceleyebilecekleri canlılar.

ABD'deki Carleton Koleji mikroskoba erişimi bulunan herkesin kullanabileceği aşağıdaki basit prosedürü hazırlamış. Hatta bu prosedürü kullanarak cep telefonlarına ilıştırilebilen cep tipi mikroskoplarla bile su aylarını görmek mümkün.

Sırayla:

Islak ya da kuru halde bir miktar kara yosunu ya da liken toplayın ve siğ bir kaba, örneğin bir petri kabına koyun.

Topladığınız örnekleri 3-24 saat süreyle suda bekletin.
(tercihen yağmur suyu ya da saf su)

Suyun fazlasını dökün.

Yosunları ya da likenleri başka şeffaf bir kabın üstünde silkeleyerek ya da elinizle sıkarak çıkan suyu bu kaptaki toplayın.

Kaptaki suyu bir stereomikroskopta düşük büyütme gücünden başlayarak incelemeyi sürdürün.

Bir pipetle su aylarını bir mikroskop lamına aktarın ve sonra da bir ışık mikroskobunda daha büyük büyütme gücüyle inceleyin.

Büyük Resim Gizemini Koruyor

Son yıllarda su ayıları konusunda yapılan çok sayıda araştırmaya ve önemli keşiflere rağmen bu minik süper kahramanların çok çeşitli uç koşulları nasıl atlatabildiğine ilişkin bilgi birikimi hâla başlangıç düzeyinde. Örneğin, onlara dayanıklılık sağlayan kendilerine özgü genlerin tam olarak nasıl işlev gördüğü, dahası dayanıklılıkla ilgili tüm genlerin bir arada nasıl bütüncül bir mekanizma oluşturduğu gizemini koruyan sorular arasında. Yani su ayılarının üstün dayanıklılığına ilişkin büyük resim hâla gizemini koruyor.

Bu bilginin ortaya çıkarılması temel bilimsel bir problem olduğu kadar geleceğe yönelik uygulamalar için de ümit vaat ediyor. Su ayılarına dayanıklılık sağlayan proteinlerin gelecekte biyoteknoloji ve tıp uygulamalarında faydalı olabileceği umuluyor. Kuru aşılarda üretimi akla gelen ilk uygulamalar arasında. Şu anda kulağa bilim kurgu gibi gelse de araştırmacılar laboratuvar ortamındaki insan hücrelerine aktarıldığında onları X ışınlarına karşı dayanıklı hale getiren su ayısına özgü Dsup proteininin, gelecekte insan vücudunu uzay yolculuklarında kozmik radyasyona karşı dirençli hale getirmek üzere kullanılabileceğini bile hayal ediyor. Kim bilir, neden olmasın? ■

Kaynaklar

- Glime, J. M., *Bryophyte Ecology*, Cilt 2: Bryological Interaction, Bölüm 5-1: "Tardigrade Survival, Michigan Technological University ve International Association of Bryologists" sponsorlu e-kitap, 2017. <https://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1083&context=bryo-ecol-subchapters>
- https://sun.iwu.edu/~tardisp/tardigrade_facts.html
- <https://www.wired.com/2017/03/secret-crazy-tough-water-bear-finally-revealed/>
- <https://blogs.scientificamerican.com/artful-amoeba/water-bears-frozen-during-the-reagan-administration-wake-up-and-lay-eggs/>
- <https://cosmosmagazine.com/biology/tardigrade-genetic-secrets-unveiled>
- <http://www.tardigrada.net/newsletter/index.htm>
- <http://www.bbc.com/earth/story/20150313-the-toughest-animals-on-earth>
- <https://www.americanscientist.org/article/tardigrades>
- <https://www.britannica.com/animal/tardigrade>
- https://www.sciencenews.org/article/new-species-tardigrade-lays-eggs-covered-doodads-and-streamersretmen_el_kitab_.pdf

