

# Arsenik ve Yaşam

Doğada bulunan veya laboratuvarında üretilen elementlerin sayısı yüzden fazla.

Yaşamın temel elementlerinin sayısı ise sadece altı: Karbon, hidrojen, oksijen, azot, kükürt ve fosfor.

Diğer elementlerden bazılarının eser düzeyde bulunması yeterli iken, bazılarının en azından şimdiki bilgilere göre canlılara faydalı bir işlevi yok; aksine zararlı olabiliyorlar.

Yaşamla yıldızı pek barışmayan elementlerden biri de arsenik.

Acaba arseniğin temel element olduğu bir yaşam olabilir mi, hem de yeryüzünde?

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |       |     |  |  |  |    |    |    |   |   |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|--|--|--|----|----|----|---|---|----|----|
| H  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |       |     |  |  |  | He |    |    |   |   |    |    |
| Li | Be |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |       |     |  |  |  |    | B  | C  | N | O | F  | Ne |
| Na | Mg |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |       |     |  |  |  |    | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K  | Ca | Sc | Ti | V  | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn  | Ga  | Ge  | As  | Se  | Br    | Kr  |  |  |  |    |    |    |   |   |    |    |
| Rb | Sr | Y  | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd  | In  | Sn  | Sb  | Te  | I     | Xe  |  |  |  |    |    |    |   |   |    |    |
| Cs | Ba |    | Hf | Ta | W  | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg  | Tl  | Pb  | Bi  | Po  | At    | Rn  |  |  |  |    |    |    |   |   |    |    |
| Fr | Ra |    | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | Ds | Rg | Uub | Uut | Uuq | Jup | Juh | (Uus) | Juo |  |  |  |    |    |    |   |   |    |    |
|    |    |    | La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb  | Dy  | Ho  | Er  | Tm  | Yb    | Lu  |  |  |  |    |    |    |   |   |    |    |
|    |    |    | Ac | Th | Pa | U  | Np | Pu | Am | Cm | Bk  | Cf  | Es  | Fm  | Md  | No    | Lr  |  |  |  |    |    |    |   |   |    |    |

SPL

Elementlerin periyodik tablosu

**E**lementler belli özelliklerine ve aralarında ki benzerliklere göre bir tabloya yerleştirilebilir. Tablodaki her kutucuk ilgili elementin tapulu evidir. İki ayrı element aynı evi paylaşamaz, ancak komşu olabilir. Komşular rastgele elementlerden oluşmaz, aralarında ciddi benzerlikler vardır. Kimin kiminle komşu olacağı kurallarla belirlenir.

Tabloya bakarak bir elementin komşularının ne tür özelliklere sahip olduğunu kolaylıkla söyleyebiliriz. “Bana arkadaşını söyle, sana kim olduğunu söyleyeyim” atasözünü, elementler söz konusu olduğunda “bana komşunu söyle, sana kim olduğunu söyleyeyim” diye değiştirebiliriz. Elementlerin yerleştirildiği bu tabloya elementlerin periyodik tablosu denir.

Periyodik tabloda komşu elementlerin yaşam için oynadığı roller çok farklı olabiliyor. Biri yaşamın temel elementi iken onun komşusu yaşamla pek bağdaşmayabiliyor. Arsenik bunlardan biri. Yeri fosforun hemen altında ve onunla benzer kimyasal özellikleri var. Fosfor yaşamın temel elementi olduğu halde, arsenik pek çok hücrenin âdeta kâbusu. Yaşamın temel elementleri genellikle atom ağırlıkları daha küçük olanlardır. Şimdiki bilgilere göre yaşam için gerekli olan en ağır element, atom numarası 74 olan tungstendir (bazı bakterilerde bulunur). Atom ağırlığı daha büyük elementlerin de yaşam için gerekli olduğu belki bir gün ortaya koyulur. Yapılan çalışmalar insan vücudunda çok sayıda element bulunduğunu göstermiştir. Ancak bunların vücuda dışarıdan mı girmiş, yani bulaşmış mı olduğu yoksa işlevli mi olduğu henüz tam olarak bilinmiyor.

Yeryüzünde hidrojen, oksijen, azot ve karbon çok yaygın. Oysa fosfor, özellikle denizlerde, bu elementler kadar yaygın değil. Küçük de olsa bazı bölgelerde, bazı elementler daha fazladır. Özellikle okyanusların derin bölgelerinde ve jeotermal kaynakların olduğu yerlerde arsenik daha fazla bulunabilir. Ancak tüm yeryüzü düşünüldüğünde fosfor arseniğe göre çok yaygındır; genel olarak arsenikten on bin kat daha yaygın olduğunu söyleyebiliriz. Arsenik yaygın olduğu bölgelerde fosforun katıldığı tepkimelerde rol alabilir. Onun yerini almaya çalışır.

Fosfor, başta proteinler ve nükleik asitler olmak üzere, yaşamın temel moleküllerinin âdeta omurgasını oluşturan element olduğu gibi, başta hücre zarı olmak üzere pek çok yapısal oluşum için de vazgeçilmez. Sadece bu kadar değil: Organizmanın tüm enerji kaynakları fosfora dayalı bileşikler ve tepkimeler üzerine kurulu. Canlı organizmalarda, fosfor kadar farklı işlevlere sahip bir element yok. Fosfor yaşam için bu kadar önemli iken, kapı komşusu arsenik bir o kadar yaşamla bağdaşmayan bir element. Fosforla aralarındaki benzerlik, organizma için tam bir felaket. Neden mi? Birlikte inceleyelim.

## Arsenik Hücrenin Enerji Üretim Sistemlerine Büyük Zarar Veriyor

Arsenik atom numarası 33, kütle numarası 75 olan bir element. Yaşamın temel elementleri ile komşu. Fosforla benzerliği, fosfor taşıyıcılar ile hücre içine kolaylıkla geçmesini sağlıyor. Organizmada fosforun yer aldığı hemen hemen tüm tepkimeler arsenik için de potansiyel hedef. Enerji metabolizması bunların başında geliyor.

Hücrenin temel ihtiyaç listesinde kullanılabilir enerji her zaman ilk sıradadır. Enerji olmadan hücre hiçbir şey yapamaz, yok olmaya mahkûmdur. Arsenik kurbanını enerji sistemlerine darbe vurarak teslim alır. Bunu nasıl başardığını daha yakından inceleyelim. Organizmanın kullandığı temel enerji birimi ATP. İnsan vücudunu oluşturan yaklaşık yüz trilyon hücrenin tümü, birkaç istisna dışında, enerji gerektiren tepkimelerde ATP kullanır. Katrilyonlarca tepkimede ATP kullanılınca doğal olarak günlük ATP gereksinimi de hayli fazla olur: Yaklaşık olarak vücut ağırlığımız kadar. Bu miktar vücudun aktivitesine göre iki, üç kat ya da daha fazla olabilir. Yanlış okumadınız, sağlıklı bir insanın normal etkinlikler için bir günde harcadığı ATP 70 kg civarında.

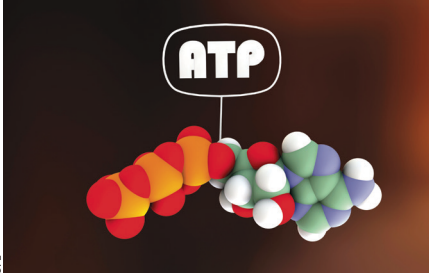
Eğer ATP üretmeyip dışarıdan alıyor olsaydık, her ay 2 ton civarında ATP almamız gerekirdi. Sadece insanların bir ayda tükettiği ATP toplam 15 milyar tondan fazla olurdu. Oysa vücudumuzda yaklaşık 100 gram civarında ATP var. Enerji gereksinimi olduğunda ATP kendisini oluşturan ADP ve  $P_i$ 'a (ADP, Adenozin difosfat;  $P_i$ , inorganik fosfat) yıkıyor ve bu arada enerji açığa çıkıyor. Ancak ATP'lerin yıkım ürünleri olan ADP ve  $P_i$  atılmıyor ve gereksinim olduğunda yeniden birleştirilerek tekrar ATP elde ediliyor. Bu yıkım ve yeniden yapım döngüsü sayesinde bir günde ağırlığımız kadar ya da daha fazla ATP sentezleyebiliyoruz. Hücrede ATP üretimini sağlayan, birbirleriyle bağlantılı üç yol var: Glikoliz, Krebs döngüsü ve elektron taşıma zinciri. Arsenik bu temel metabolik yolların işlevini çok olumsuz etkiler ve sonuçta ATP üretimi çok zarar görür. Arsenik sadece bununla da yetinmez. ATP'nin yapısına girer, organizmanın şeker (glikoz) üretimini olumsuz yönde etkiler. Proteinlere bağlanarak yapısını bozar. Yani nereden bakarsanız bakın tam bir kâbustur. Ancak tüm bunlara rağmen, günümüz tıbbında arseniğin sınırlı da olsa kullanım alanı var. Bu bir paradoks gibi görünüyor, ama değil.



Arsenik metali pek çok hücre için güçlü zehir etkisine sahiptir.

## Arseniğin Tıpta Kullanımı

Bu kadar tehlikeli ve öldürücü olan arsenik aynı zamanda bir ilaç. Yani bir tarafta zehir, diğer tarafta panzehir. Elekttron sayısındaki değişimler (iyonik durumu), hidrojen, oksijen, karbon ve diğer elementlerle veya gruplarla yaptığı bileşikler farklı arsenik türlerinin ortaya çıkmasına neden oluyor. Arseniğin türü, kullanım süresi ve dozu ona çok farklı kimlikler kazandırıyor. Böylece arsenik suikastlarda kullanılan etkin bir zehir, farklı kanser türlerine neden olan bir çevre kirletici olabildiği gibi bakterilere karşı kullanılan bir antibiyotik, bazı kanserleri tedavi etmek için kullanılan bir ilaç da olabiliyor.



ATP (Adenozin trifosfat). Tüm hücreler ATP'nin yıkımıyla açığa çıkan enerjiyi kullanır.

Arseniğin tıpta tedavi edici ilaç olarak kullanılması MÖ 2000'li yıllara dayanıyor. Hipokrat'ın bazı yaraları iyileştirmek için arsenik kullandığı bilinir. Ortaçağ'da tıbbi kayıtların yetersiz oluşu nedeniyle arseniğin ne kadar yaygın kullanıldığıyla ilgili bilgimiz yeterli değilse de, özellikle frenginin tedavisinde yaygın olarak kullanıldığı biliniyor. 18. ve 19. yüzyıllarda arsenik frenginin yanı sıra sıtma ve sefegibi bazı hastalıkların tedavisinde de kullanılmıştır. Penisilinin kullanılmaya başlandığı 1940'lı yıllara kadar arsenik içeren *Salvarsan* isimli ilaç frengi hastalığının tedavisinde kullanılıyordu.

Arsenik uzun yıllar kanser tedavisinde de kullanılmıştır. 19. yüzyılın ikinci yarısında arseniğin kan, cilt ve meme kanserinin tedavisinde kullanıldığı biliniyor. Arsenik günümüzde de bazı kan kanserlerinin tedavisinde kullanılıyor. 2000'de FDA (*Food and Drug Administration*, Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi) bazı ilaç-

lara dirençli ve akut promyelositik lösemi olarak bilinen bir tür kanserin tedavisinde kullanılmak üzere, arsenik içeren bir ilaca onay verdi. Tabii tüm bu uygulamalar ancak alanlarında uzman hekimler tarafından yapılabiliyor.



20. Yüzyılın ilk yarısına kadar frengi tedavisinde arsenik içeren *Salvarsan* isimli ilaç kullanılıyordu.

Tüm tıbbi uygulamalarda arseniğin zararlı etkisi daima ön planda tutulmuştur. Pek çok çalışma arseniğin yaşam dostu olmadığı yönünde. Acaba gerçekten öyle mi?

## Arseniğe Bağlı Yaşam!

Biz insanların arsenikle ciddi sorunları var, ancak bakteri dünyasında iş öyle değil. Arsenik tıpkı fosfor gibi çok farklı biyolojik tepkimelere girebiliyor. Arseniğe dirençli bakteriler olduğu gibi arseniğe gereksinim duyan bakteriler de var. Oksijensiz ortamda yaşayan bazı bakterilerin arseniği enerji üretim tepkimelerinde kullanması, dikkatleri arseniğe dayalı yaşam arayışına yöneltti. Acaba oksijenin az olduğu ya da hiç olmadığı gök cisimlerinde arseniğin enerji üretiminde rol aldığı bir yaşam türü olabilir mi? En azından bakteri düzeyinde. Bu soruyu "hayır" diye cevaplamak mümkün değil. Net bir cevap için bu gök cisimlerini ziyaret etmemiz veya bulaş olmadan materyal getirtip incelememiz lazım.

Biyolojik tepkimelerde arsenik-fosfor rekabeti yıllardan beri biliniyordu, özellikle son 20 yılda bu konuda birçok çalışma yapıldı. 2011 yılı tam bir dönüm noktası oldu. NASA astrobiyoloji grubu, çok önemli bir keşif yapıldığını ve elde edilen bilgilerin basın toplantısıyla duyurulacağını belirttiği zaman, şahsen çok farklı bir beklenti içine girmiştik. Açıklama-

yı astrobiyoloji grubunun yapacak olması bilim insanlarına Dünya dışında yaşam ipuçları elde edilmiş olabileceğini düşündürmüştü. Ancak beklenenin aksine konu Dünya dışı yaşamla değil Dünya'daki yaşamla ilgiliydi. ABD'li bir araştırma grubu Kaliforniya'daki Mono Gölü'nün dibinde arseniğe bağlı bir yaşam biçimi keşfedildiğini duyurdu.

NASA astrobiyoloji enstitüsünden Wolfe-Simon ve ekibine göre Mono Gölü'nde izole edilen bakteriler DNA'da, proteinlerde ve diğer biyomoleküllerde fosfor yerine arsenik kullanıyordu. Yaşamın bildiğimiz temel altı elementinden birinin, başka bir elementle yer değiştirebileceğini gösteren çalışma büyük ilgi gördü ve *Science*'ta yayımlandı. Bu aslında kuramsal olarak uzun süredir düşünülen bir konuydu, ancak ilk kez somut veri elde ediliyordu.

Protein ve nükleik asitlerde fosfor yerine arseniğin görev aldığını iddia eden araştırmacılar, hem alkali hem de tuz oranı hayli yüksek bir gölden elde ettikleri GFAJ-1 bakterisi üzerinde çalışmıştı. Bakterinin yaşadığı Mono Gölü'nde tuz ve arsenik oranı çok yüksekti. Özellikle arsenik oranının yüksek olması araştırmacıların dikkatini çekmişti. Gölden alınan bakteriler için özel bir ortam hazırlanmış ve ortama fosfor yerine arsenik koyulmuştu. Arsenik miktarı giderek artırıldığı halde bakterinin yaşayabildiği gösterilmişti. Araştırmacılara göre arsenik sadece protein ve nükleik asitlerde (DNA, RNA gibi) değil, hücre zarını oluşturan fosfolipitlerde (hücre zarını oluşturan bir yağ çeşidi) ve başka pek çok molekülde de yapısal element olarak bulunuyordu. GFAJ-1 bakterisi ilginç özellikler sergiliyordu. Yapılan detaylı çalışmalara göre bakterinin arsenikle hiç bir sorunu yok gibiydi. Ancak ortama fosfat eklendiğinde bakteri daha hızlı çoğalıyordu.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar pek çok yönüyle önemliydi. Bu verilere göre yaşamın altı temel elementi, bakteri düzeyinde bile olsa, değişebiliyordu. Dolayısıyla fiziksel koşulları farklı olan bölgelerde (örneğin gök cisimlerinde) farklı elementlere dayalı bir yaşam olabilirdi ve GFAJ-1 bakterisi bunun ilk somut örneği idi.

Eğer fiziksel şartları değiştirirseniz Dünya'dakine benzer bir yaşam türü oluşturmak çok zor. Örneğin sıcaklık 100 °C ya da -50 °C olursa Dünya'daki yaşamı sürdürmek pek de kolay olmaz. Yüksek sıcaklıklarda yaşayan tek hücreli canlılar (örneğin termofiller) hayatta kalabilir, ancak bitkisel ya da hayvansal yaşam gibi çok hücreli bir yaşamın olmasını beklemek zor. Eğer yaşamın üzerine kurulduğu moleküler yapıda değişiklik olursa bu mümkün olabilir. Örneğin suyun donduğu sıcaklıkta amonyak sıvı haldedir. O zaman düşük sıcaklıkta amonyağa dayalı bir yaşam olabilir, çünkü yaşamın suyun içinde olmasını zorunlu kılan bir yasa yok. Amonyakın sıvı halde olduğu düşük sıcaklıkta, amonyakta işlevsel olan moleküler organizasyona dayalı bir yaşam şekli olabilir, daha doğrusu olmaması için bir neden yok. Benzer şekilde çok yüksek sıcaklıklarda hidrokarbonlar yerine florokarbonlara dayalı bir yaşam olabilir, çünkü yüksek sıcaklıklarda florokarbonlar hidrokarbonlardan daha kararlıdır. Ancak bu tür yaklaşımlar (en azından şimdilik) kuramsal yaklaşımlar. Şimdiye kadar Dünya'da ya da başka bir gök cisminde suyun yerine amonyağın, hidrokarbonlar yerine florokarbonların kullanıldığı bir yaşam biçiminin var olduğu gösterilemedi.

Bilim insanları özellikle biyolojide sürprizlere alışık. En olmadık zamanlarda özellikle tek hücreli canlılarla ilgili araştırmalarda beklenmedik durumlarla karşılaşabiliyorlar. Yaşamın olmasını beklemediğimiz çok düşük ya da çok yüksek sıcaklıkların yanı sıra yaşamla bağdaşmayacağını düşündüğümüz, tuz ya da asit oranının çok yüksek olduğu ortamlarda tek hücreli canlılara rastlandı. Tüm bunlarda değişmeyen ortak nokta, canlılığı oluşturan temel moleküller. DNA ve RNA'yı oluşturan moleküllerde ya da proteinleri oluşturan temel amino asitlerde çok büyük farklılıklara rastlanmamıştır. Daha da önemlisi bu moleküllerde kullanılan temel elementler hep aynı.

Acaba arseniğe dayalı bir yaşam olabilir mi? Fosfor yerine arsenik kullanan ve fosforun zarar verdiği bir yaşam biçimi

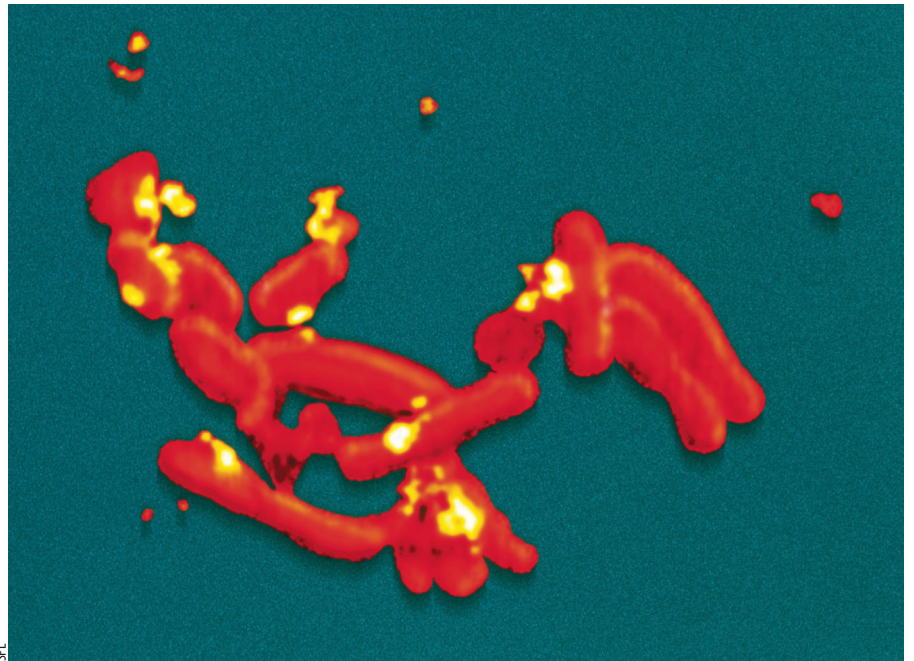
olamaz mı? Doğal olarak bu tür bir yaşam biçimini tespit etmemiz çok zor, çünkü kullanılan besi yerlerinde ve diğer ortamlarda bulunan fosfor, olası hücrelere zarar verip yok etmez mi? Arsenik nasıl canlılar için genel olarak zehirli bir elementse, acaba fosfor da arseniğe dayalı bir yaşam biçimi üzerinde benzer bir zehirli etki yapmaz mı? Tüm bu soruları hemen "olamaz" diye cevaplayamayız, hepsinin cevapları tartışmaya açıktır. Arseniğe dayalı bir yaşam var da acaba biz mi tespit edemiyoruz, bu yaşam ulaşamadığımız yerlerde mi? Wolfe-Simon ve ekibinin bulguları bu alandaki umutları iyice yeşertmişti. Ancak bu sevinç uzun sürmedi.

Çalışmanın yayımlanmasından yaklaşık 18 ay sonra durumun sanıldığı gibi olmadığı yine *Science*'ta yayımlanan iki çalışmayla gösterildi. Princeton Üniversitesi'nden Marshall Reaves ve Zürih ETH Mikrobiyoloji Enstitüsü'nden Tobias Erb ve ekpleri, yaptıkları çalışmalarla GFAJ-1 bakterisinin arseniğe bağlı yaşamadığını belirledi. Bakteriler fosfor yerine arsenik kullanmıyordu. Arseniğe dirençliyidiler, düşük fosfor ve yüksek arsenik düzeylerinde yaşamlarını sürdürebiliyorlardı. Kısacası GFAJ-1 bakterisi arseniğe dirençli, fakat fosfora bağ-

lı bir bakteriydi. Bu bakteriler moleküler yapılarında fosfor yerine arsenik kullanmıyordu. Fosfor temel element olarak yerini koruyordu ve bakterinin yaşamı için çok az da olsa ortamda mutlaka bulunması gerekiyordu.

Tobias Erb ve ekibi GFAJ-1 bakterisinin, düşük fosfor ve yüksek arsenik içeren ortamlarda yaşamını sürdürebilmesine rağmen çoğalmaya devam edebilmek için fosfora gereksinimi olduğunu ortaya koydu. GFAJ-1 bakterisinin bir özelliği de diğer arsenofil (yüksek arsenikli ortamlarda yaşayan) bakterilerden farklı olarak çok düşük fosfor düzeylerinde bile yaşayabilmesidir. Araştırmacılar arseniğin derişimini fosfora göre çok yüksek tuttıkları halde (40000/1,7) bakterinin yaşayabildiğini, ancak fosfat derişimi daha da düşürüldüğünde bakterinin çoğalamadığını gösterdi. Marshall Reaves ve arkadaşları da benzer şekilde arseniğin DNA'nın yapısına girmediğini gösterdi. Fosfor gibi, DNA ile bağ yapan arseniğe rastlamadılar.

Yani bakteriler bilim insanlarını yine şaşırttı. Çok düşük dozu bile insanlar için öldürücü olan arseniğe, bazı bakterilerin aldırmadığı bir kez daha görüldü. Tüm bunlar bakterileri tamamıyla yok etmenin pek mümkün olmadığını gösteriyor.



Nükleer atıkların bulunduğu bir bölgede yaşayan bir tür bakteri. Bu bakteri yüksek tuz seviyesinden ve radyoaktiviteden etkilenmez.



Arseniğe bağılı yaşadığı iddia edilen bakterilerin bulunduğu Mono Gölü, Kaliforniya, ABD.

Ortamı ne şekilde değiştirirseniz değiştiren bakteriler bir şekilde bunun üstesinden gelmeye çalışıyor. Bunun en tipik örneğini antibiyotiklerde gördük. 20. yüzyılın ilk yarısında antibiyotiklerin mutlak zaferi vardı. Çoğu bilim insanına göre bakteriler bir daha bellerini doğrultamayacaktı, ama onlar öyle düşünürken bakterilerde içten içe yeni yollara başvuruyordu. Bugün bakterilerin direnci neredeyse kırılmayacak gibi. Boşuna “kedi köşeye sıkıştırırsanız yüzünüzü tirmalar” dememişler. Bakterilerin kendilerini sıkıntıya sokan bir etkenin üstesinden gelmek için ihtiyaç duyduğu en önemli şey zaman. Eğer onlara yeterince zaman verirsiniz üstesinden gelemecekleri şey yok gibi.

Arseniğe dirençli bakterilerin (arsenofiller) varlığı ilk defa bu çalışmalarda gösterilmedi. Örneğin arsenik içeren veteriner ilaçlarının kullanıldığı hayvanlarda arseniğe dirençli bakteriler tespit edilmişti. Arsenofiller zincirin ilk halkası da değil. Kurşun, cıva gibi yaşamla yıldızi pek barışmayan ağır metallerin yük-

sek derişimde olduğu ortamlarda yaşayan bakteriler de var. Benzer bakterileri keşfetmenin belki de en kolay yolu farklı çevre koşullarında araştırma yapmak. Sanayi tesislerinin olduğu bölgelerde yapılacak araştırmalarda metale dirençli pek çok bakteri bulmak sürpriz olmaz. Pek çok bakterinin böyle ortamları yaşam alanı olarak seçtiği bile görülebilir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar, gıda-tın bu yönde olduğunu gösteriyor.

Aslında bu tür bakteriler bize eşsiz olanaklar sunuyor. Tıp, laboratuvar ve sanayi uygulamalarında yeni ufuklar açıyor. PCR’da (polimeraz zincirleme tepkimesi) olduğu gibi, yüksek sıcaklıklarda yaşayan bakterilerden alınan enzimler (biyolojik katalizörler) çok büyük bir engelin aşılmasını sağladı. Bu teknikle, ortamda çok az bulunan genetik materyali çoğaltarak erken dönemde bazı hastalıkları teşhis etmek mümkün. Hepatit B, Hepatit C, HIV gibi virüslerin varlığı, hastalığın erken dönemlerinde anlaşılabilir. PCR tekniğinin geliştirildiği ilk yıllarda yüksek sıcaklık nedeniyle testle-

ri sonuçlandırmak çok zaman alıyordu. Oysa termofil (yüksek sıcaklığa dayanıklı) bakterilerden alınan enzimle sorun kolayca çözüldü. Çünkü bu enzim 90 °C gibi yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve böyle ortamlarda işlev görebiliyor.

Sonuç olarak, dirençli bakterilere bakışımızı değiştirmemizde yarar var. Onlar tek bir hücrenin nasıl direnç geliştirerek hayatta kalabildiğinin somut örnekleri. Biz insanlar ise hastalıklara karşı daha çok tedavi yöntemleriyle savaşıyoruz. Bakterilerden öğreneceğimiz çok şey var.

#### Kaynaklar

- Wolfe-Simon, E., Switzer Blum, J., Kulp, T. R., Gordon, G. W., Hoefl, S. E., Pett-Ridge, J., Stolz, J. F., Webb, S. M., Weber, P. K., Davies, P. C. W., Anbar, A. D., Oremland, R. S., “A Bacterium That Can Grow by Using Arsenic Instead of Phosphorus”, *Science*, Sayı 332, s. 1163-1166, 2011.
- Oremland, R. S., Stolz, J. F., “The Ecology of Arsenic”, *Science*, Sayı 300, s. 939-943, 2003.
- Erb, T. J., Kiefer, P., Hattendorf, B., Günther, D., Vorholt, J. A., “GFAJ-1 Is an Arsenate-Resistant, Phosphate-Dependent Organism”, *Science*, Sayı 337, s. 467-470, 2012.
- Reaves, M. L., Sinha, S., Rabinowitz, J. D., Kruglyak, L., Redfield, R. J., “Absence of Detectable Arsenate in DNA from Arsenate-Grown GFAJ-1 Cells”, *Science*, Sayı 337, s. 470-473, 2012.
- Wolfe-Simon, E., Davies, P. C. W., Anbar, A. D., “Did nature also choose arsenic?”, *International Journal of Astrobiology*, Sayı 8, s. 69-74, 2009.