

# Omurgalıların Evrim Bilmecesi

Doğa tarihi müzelerinden birini gezerseniz omurgalı canlılara epeyce bir yer ayrıldığını görürsünüz. Omurgalı canlıların tarihi ta dinozorlardan, mağara ayılarına kadar fosil kayıtlarıyla gözümüzün önüne serilir. Buna karşın, omurgasız canlıların fosilleri küçük bir bölüme tıklmış, gözden ırak bir köşededir. Gerçekte omurgasızlar, milyonlarca türüyle dünya biyokütlesinin çok büyük bir kısmını oluşturur. Öyle ki omurgalıların yalnızca bilinen 42,000 türü vardır. Ama doğa tarihi müzelerini omurgalıların takımına ait insanlar gezer. İnsanlar da insana benzer canlılar görmekten hoşlanırlar: Omurgası, kafatası, büyük karmaşık beyni olan canlılar... Ancak yeni bulgular, dikkatleri omurgalıların evrimi süreci üzerine çekmeye başlamış bulunuyor.

Omurgalıların evrimi üzerine dikkatli ve özenli çalışmalar yapılmış olsa da, omurgalıların omurgasızlardan ne zaman ve nasıl evrimleştiği yanıtı olmayan bir soru olarak kalmış. 20. yüzyıl boyunca omurgalıların en ilkel türlerine ait fosiller, paleontologlar için kafa karıştırıcı bir yığın olmaktan ileri gidemedi. Bilim adamları bu canlılara ait, beyin ve kemiklerin ilk ortaya çıkışıyla ilgili ipuçlarını veren fosiller bulmada ve bunları korumada yeteri kadar şanslı olamadılar. Omurgalıların temel anatomilerine yakın anatomilere sahip, yaşayan yakın akrabalarının üzerindeki çalışmalara 70 yıl kadar önce başlandı. Bu çalışmaların amacıysa omurgalıların atalarının neye benzediğini anlamaktı. O zamandan bu yana ne yazık ki istenilen yere ulaşılamadı, yalnızca birkaç görüş elde edilmişti. Nitekim, ABD, Scripps Oşinografi Enstitüsü'nden Nicholas Holland geçmiş çalışmalar için "Bunlar çalışma alanının durgun bir alan olarak algılanmasına neden oldu." diyor.

Ama geçen birkaç yıl içinde, pek çok farklı bilim dallarında yapılan çalışmalarla, omurgasızlardan omurgalı-

lara geçişin tablosu şaşırtıcı bir biçimde belirmeye başladı. Bu resim, geçmiş 70 yılda öne sürülen bazı düşüncelerin yanlış olduğunu gösterdi. Değişik bilim dallarında yapılan çalışmalar işe yaramıştı. Örneğin, genetikçiler, omurgalıların hem beden planını oluşturan genleri hem de onların yaşayan omurgasız akrabalarının genlerini tanımlamaya başladılar. Nörobiyologlar da, bu basit görünen canlıların ayrıntılı nöral bağlantılarını keşfetmeye çalışıyorlar. Paleontologlar da boş durmuyor. Çinli paleontologlar geçen yılın sonlarında, 530 milyon yıl öncesine uzanan omurgalıların ve yakın akrabalarına ait şimdiye kadar elde edilen en eski fosilleri bulduklarını ilan ettiler.

Önceki çalışmalarda omurgalıların evriminde öncelik iskelet yapısına veriliyordu. Şimdiyse öncelik beyinde; çünkü bazı bulgular, omurgalıların için çok belirgin bir özellik olan mineral düzeyde iskelet oluşumundan çok önce, beynin evriminin omurgasız atalarla başladığını ortaya koyuyor. Dahası iskeletin hiç beklenmedik bir yapıyla ortaya çıktığı düşünülüyor: Dişler. Böyle bir değişim embriyonik dokularda de-

ğişim gerektiriyor. Böylesi bir dürtünün altında da duyu organlarını geliştirmek yatıyor olabilir. Gelişen duyu organları varsayımı Çin'de bulunan ilkel omurgalı fosilleriyle birleşince yeni bir avcı nesil ortaya çıkıyor. Anlaşıyor ki omurgalıların evrimi, bilim adamlarının şimdiye değin sandıklarından çok daha karmaşık; ama yeni bulgularla daha kolay anlaşılır bir süreç.

## Beyin ve Kemik

Omurgalıların evrimsel tarihini ortaya çıkarmanın bir yolu da onların yaşayan yakın akrabalarını incelemek. Anatomik ve moleküler araştırmalara konu olma onurunu da bu yakın akrabalarından "batrak" kazanıyor. Batrak latince ismi *Amphioxus* olan 5 cm uzunluğunda, kumda yaşayan ve sudan besinlerini süzen bir canlı. Omurgalıların takımına ait olmasının bazı nedenleri var. Öncelikle çok ilkel bir iskelet yapısına ve basit bir merkezi sinir sistemine sahip. Ayrıca sırtı boyunca duran bu merkezi sinir sistemini destekleyen bir kas dokusunun olması da önemli bir etken.

Bilim adamları, omurgalıların, 545 milyon yıl öncesine uzanan Kambriyen döneminde yaşayan batrak benzeri canlılardan evrimleştiğini düşünüyorlar. Bunun yanında, batraklar ve bugünün omurgalıları arasında yapılan moleküler çalışmalarda ortaya çıkan gen benzerlikleri bu ilişkinin 750 milyon yıl öncesine dayandığını söylüyor.



Gelişmekte olan bir batrak, omurgalılarla şaşırtıcı bir benzerlik gösteriyor. Batrak embriyosu (yukarıda sağda).

Ama fosil kayıtlarından bu bilgiyi edinmek henüz olanaksız; çünkü o yaşta hayvan fosilleri bulunmuyor ve bulunsa da fosilin ara bir türe ait olması gerekiyor. Bu çalışmalara kadar, en erken omurgalıların 475 milyon yıl öncesine tarihlendiği tartışmasız kabul ediliyordu. Bu küçük, çenesiz ve derisi kemik plakalarla kaplı canlıların deniz tabanındaki omurgasızlarla beslenip, sırtlarındaki zırhla da kendilerini avcılardan korudukları düşünülüyordu. Bu canlıya ait fosil kayıtları beynin bulunduğu bölgedeki izlerden yola çıkarak, beynin çağdaş omurgalı beyni özelliklerinden bazılarını taşıdığını, arka beyin, orta beyin ve ön beyin, yani zaten çoktan evrimleşmiş bir beyin olduğunu gösteriyordu. Bu gösterge, omurgalı evriminin daha öncelere dayandığının su götürmez bir kanıtıydı.

Bilim adamları "Eğer bu zırhlı balıklar en ilkel omurgalıları gösteriyorsa, beynin ve kemiklerin birlikte evrimleşmiş olduğunu da söyleyebiliriz" diyorlar. Günümüzde hâlâ fosil kayıtlarından daha basit, yılan balığına benzer çenesiz balıklar yaşıyor.

Belirgin bir aratür ne fosil olarak ne canlı olarak bulunmadığından bilim adamları omurgalı iskeleti ve sinir sisteminin kökenini açıklamakta güçlük çekiyorlardı. 1983'te iki araştırmacı, bu bulmacayı sıkıcı olmaktan çıkaran bir kuram sundular. Kanıtları embriyoloji bilimine dayanıyordu. Kaliforniya Üniversitesi'nden Glenn Northcutt ve Teksas Üniversitesi'nden Carl Gans, omurgalı evriminin anahtar bölümünün baş olabileceğini ve yeni tür bir embriyonik hücrenin evrimiyle başın oluşabileceğini savunuyorlar.

Yaşayan omurgalıların üzerinde yapılan çalışmalar, embriyo oluşurken, embriyo üzerindeki, "nöral taç" denen bir sıra hücrenin kıvrılarak tüp benzeri bir yapı oluşturduğunu ortaya çıkarıyor. Bu yapıya da nöral tüp deniyor ve embriyo geliştikçe yapı, beynin de içinde olduğu merkezi sinir sistemini oluşturuyor. Merkezi sinir sistemini oluşturacak nöral taç hücrelerinin köşelerinde kalan kısımlarsa embriyo etrafında gelişerek kafatası, kafa kasları, burun, sinirler ve göz gibi yapıların biçimlendirilmelerinde görev alıyor.

Gans ve Northcutt, yukarıda saydığımız duyu organlarının gelişmesini sağlayan bu özel hücrelerin, omurgalı-

Göz yeri. Batrağın sinir dokusunun üç boyutlu bilgisayar görüntüsü. Pembe ve turkuvaz renkli, şişe biçimli fotoreseptör hücreleri iki sıra halinde. Kırmızı bölgede ilkel omurgalı gözünü temsil eden pigment hücreleri görülüyor.



ların yeni tür bir beden, yani karmaşık duyu organları ve büyük beyinler oluşturabilmesinde esneklik kazandırdığı görüşündeler. Onlara göre yeni beden planlarıyla omurgalıları kendilerine yeni bir ekolojik alan da yaratmış oluyorlar. Edilgin, küçük bir besin filtresiyken, birden etkin, büyük avcılara dönüşüyorlar. "Eğer filtre ederek beslenen bir canlıysanız, çok da büyüyeemezsiniz. Gelişimdeki değişimler hayvanda yeni yapılanmalara yol açtı ve başka şeyler yapmasına olanak sağladı." diyor Northcutt.

Bu gelişimsel devrimin, ayrıca kemik dokusunun da kökenini oluşturduğunu savunuyor Gans ve Northcutt. Embriyo üzerinde bu gelişimi sağlayan nöral taç hücreleri, bir balık vücudunun hatlarını oluşturan elektreseptörleri meydana getirir. Araştırmacıların kuramlarına göre, bu reseptörler yani algılayıcılar bir kez evrimleşti mi, embriyoda bulunan özel hücreler, vücudun diğer kısımlarından ayrılmak için mineral düzeyindeki kemik dokusuyla kendilerini yalıtırlar. Daha sonra bu kemikler, ilkel kemikli balıklarda görüldüğü gibi vücut dışında birer kemiksi zırha dönüşürler.

Nicholas Holland bu anlaşılır model için "omurgalıların kökeni sorunu için yapılmış en önemli yardımlardan



Omurgalıların alçakgönüllü başlangıcı. Günümüzde de hâlâ yaşayan ilkel, dişsiz, yılanbalığına benzer bir balık türü.

birdir; çünkü farklı kanallarda bulunan kanıtların bir araya getirilerek bilim adamlarına bunu sınımaları için olanak sağlıyor." diyor. Ancak bilim adamlarının bu sınıama için gerekli araçlara kavuşmaları için on yılın geçmesi gerekecek. Çıkarılan model bu yeni araştırmalarla desteklense de, bazı beklenmedik ve model üzerinde şartıcı yenilikler yapmak gerekti.

## Batrakları Yetiştirmek

Araştırmacılar, Gans-Northcutt modelinin batraklarda işe yarayıp yaramadığını görmek istiyorlardı. Ama kimse batrakların laboratuvar ortamında nasıl yetiştirileceğini bilmiyordu. Sonunda 1990'ların başlarında Nicholas ve Linda Holland yaz akşamlarında Florida'nın sahillerinde ergin batrakları toplamanın bir yolunu buldular. Hollandlar elektrik akımı vererek, topladıkları batraklardan yumurta ve sperm örnekleri almayı başardılar ve sonra da embriyoları oluşturdular. Linda Holland yaptıkları işlem için, "Çalışma görece yavaş ilerliyordu; çünkü en şanslı olduğumuz zamanlarda bile embriyo elde edebildiğimiz gecelerin sayısı bir düzineyi geçmiyordu." diyor.

Hollandlar ve arkadaşları üretebildikleri az sayıda batrak embriyosu üzerinde çalışmaya başladılar. Bu genlerin gerçekten söylenen dokuların oluşumunda yer alıp almadıkları incelenecekti. Düzinelerce gen üzerinde çalışıldıktan sonra resim ortaya çıktı: İlkel omurgalı beyni. Batraklarda gerçek nöral taç yoktu ama aynı yerde nöral taç hücrelerine benzer hücreler vardı. Bu hücreler de tıpkı nöral taç hü-

releri gibi göç etmeye başlamadan önce aynı genleri kodluyorlardı. Bu genler, önemli bazı organların oluşumunda yardımcı oluyorlardı. Ayrıca göç yolları da farklıydı. Nöral taç hücreleri içeri doğru küçük yığınlar halinde hareket ederken, batrak embriyosunda bulunan hücreler embriyonun üzerinde bir örtü biçiminde hareket ediyorlardı. Linda Holland bu hücrelerin hareketi için, "Bunlar sürüden kopup kendi başlarına gezinmiyorlar." diyor. Ama tüm bunlara karşın Hollandların çalışmaları Gans ve Northcutt'ın nöral taçın önemi konusundaki düşüncelerini hem doğrulamış, hem de geliştirmiş oluyor. Linda Holland "Omurgalıların getirdikleri en önemli yeniliklerden biri, hiç kuşku yok ki işte bu gezinen nöral tacın icadı olmuştur." diyor.

Bundan başka Hollandlar ve arkadaşları gerçek bir nöral taçı olmadan dahi batrak sinir kordonunun ön tarafındaki şişkin topakçığın, bir omurgalı beyniyle olağanüstü benzerlik taşıdığını gösteren kanıtlar buldular. Omurgalı beyninin önemli ön, orta ve arka bölgelerini düzenleyen genlerin ayrıntılı yapısı, batrak sinir kordonundaki bu küçük hücre kümesinde de aynı örüntüyü sergiliyordu. Buradan yola çıkarak, örüntülerin omurgalı beyninin atlası olduğu çıkarımı yapmak zor değil. Ama Holland yine de sakıncılı davranarak "batrakların genleri aynı bölgede temsil ediliyor olsa da omurgalılarda bulunan genlerden farklı bir görev üstlenmiş olabilirler" diyor.

## Batrak Beynini İncelemek

Hollandlar batrakların gelişimini genetik açıdan incelerken, Saskatchewan Üniversitesi'nden biyolog Thurston Lacalli de paralel bir araştırmayla batrakların ayrıntılı sinir anatomisini ortaya çıkarmaya çalışıyordu. 1991'de başlayan çalışmada Lacalli'nin teknisyeni Jennifer West, batrak larvalarındaki sinir kordonunun ön ucundan 2000 kesit alarak bunları fotoğrafla-

mıştı. Lacalli yaklaşık 300 nöronun biçim ve bağlantılarının 3 boyutlu bilgisayar görüntüsünü oluşturmaya çalışıyordu. Bu iş oldukça yavaş ilerliyordu. Lacalli şimdiye kadar nöronların üçte ikisini tanımlayarak bunların da yarısının verisini yayınlayabildi. Diğer batrak araştırmacıları için bu bekleyiş dayanılır gibi değil. Nicholas Holland bu durumu "Sanki bu bir Boeing 747'yi milimetrik dilimlere bölmek gibi birşey." diye açıklıyor.

Ama şimdiden Lacalli'nin çalışması batrakların sinir dokusunun omurgalı beyni gibi bölümlere ayrıldığını doğruluyor. Batrak sinir kordonu üzerinde Hollandların ön ve orta beyin genleri belirledikleri bölgelerde nöronların yapılanması omurgalıların ön ve orta

gelerini algılayabildiğinden kuşkulanıyor. Ayrıca Lacalli, batrakların ağız çevresindeki tüysü yapıların, yiyeceği kabul ya da red eden alıcılar olduğunu, bu alıcıların sinir bağlantılarının omurgalıların tad alma duyusunu sağlayan hücrelerin bağlantılarıyla aynı olduğunu savunuyor.

*Acta Zoologica*'ya sunduğu bir makalesinde Lacalli, daha da heyecan verici bir benzerlik sunuyor: Batrakların ilkel yapıda bir limbik sistemi olduğunu savunuyor. Omurgalı limbik sistemi, örneğin hormonları ve sıcaklık seviyesini kontrol eden, vücudun içsel durumunu belirleyen hipotalamusun da içinde olduğu bir sistemdir. Bu sistem ayrıca ne zaman uyuyacağımıza, yemek yiyeceğimize ve ne zaman kava-

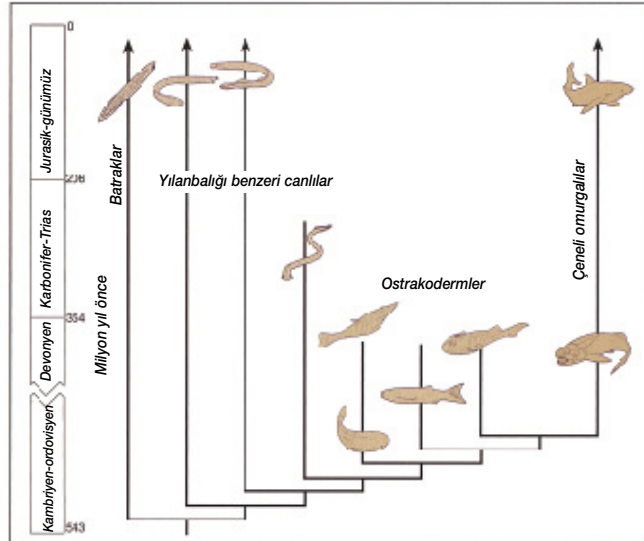
ga edeceğimize karar verir. Lacalli batrakların nöronlarının omurgalılardakine benzer biçimde yerleştiklerini buldu. Batraklar ve omurgalıların ortak atalarının yüzmek ya da beslenmeye karar vermeleri için ilkel bir limbik sistem kullandıklarını savunuyor Lacalli.

Lacalli, Holland ve diğerlerinin çalışmaları omurgalı başının yeni bir oluşum olmadığını gösterdi. Gezinen nöral taç, Gans ve Northcutt'ın savunduğu gibi omurgalı sinir sisteminin evriminde anahtar rolü oynamış olabilir; fakat baş, zamanla oluştuğu bakıyoz-

ruz ki omurgalı beyninin temel yapısı zaten oluşmuş bile. "Sizin ve benim düşünmemizi sağlayan beynin bazı kısımları bu canlılarda yoktu, ama koşmamız ya da yemek yememiz için bizi güdüleyen bölümlerin varlığı konusunda işaretler var." diyor Lacalli

## Avcılar Av Peşinde

Northcutt da batraklarla omurgalıların arasında tahmin edemeyeceğimiz kadar benzerliklerin çıkacağı konusunda iddialı. Ama ona göre omurgalıların sahip olduğu ve duyu organlarından gelen onca mesajı birleştirme yeteneğindeki baş, evrim sürecinde muazzam bir adım. Bu yüzden de batraklarla omurgalıların arasındaki benzerlik-



Omurgalıların ağacı sallandı. Yeni analizler conodontların tam bir omurgalı olduğunu ortaya çıkardı.

beyinlerindeki yapıyla uygunluk gösteriyor. Linda Holland bu durum için "İki kanıtta aynı noktayı gösterdiği zaman yaptığımız güvenimiz artıyor." diyor.

Lacalli, iddialarında daha da ileri gidiyor ve az sayıda da olsa batrak beynini oluşturan sinirlerin omurgalı beynindekilerle aynı işlevi gördüğünü söylüyor. Örneğin, batrakların tepesine yakın bölgedeki bir grup pigment hücreleri arasındaki bağlantı retina benzeri bir düzen oluşturuyor. Lacalli bu yığının tek bir göz olarak, omurgalıların çift gözlerinin benzeri olduğunu iddia ediyor. Batrak gözü, benzeri omurgalı çift göze göre, imge oluşturabilmek için fazla ilkel. Yine de Lacalli bu gözün avcılarının hareket eden göz-

lerden çok farklılıklar üzerinde durulması gerektiğini, böylece omurgalı evriminin çözülebileceğini söylüyor.

Örneğin batrakların herhangi bir biçimde koku alamadığı görünüyor. Omurgalı beyninin en önünde bulunan ve koku algılamayı sağlayan talen-sefolon adlı kısım batrakların sinir kordonunda eksik.

Bu gibi farklar terazide Gans ve Northcutt kefesinin yani, omurgalıların suyu süzerek beslenen canlılardan avcılara dönüştüğü düşüncesinin, ağır basmasını sağlıyor. Ama bölünmüş bir beyin yerine, ilkel omurgalıların basit bir koku alma organının olması anahtar buluşlardan biri olabilir. "Bir batrağın avını koklaması hiçbir zaman gerekli olmadı; ancak ilkel omurgalıların avcı haline gelmeleriyle koku önem kazandı!" diyor Nicholas Holland. Ayrıca avı görmek için gözlere ve onu yakalamak için bedenlerini etkili biçimde yönetebilme yeteneğine sahip olmaları gerekti.

Geçmiş altı ayda paleontologlar evrimin avcılığa atlama basamağını yakalamış olabilirler. Geçtiğimiz Kasım ayında, Çinli araştırmacılar *Haikouella* adlı bir yaratığa ait 300 örnek buldular. Bir açıdan bu taşlar içindeki örnekler batraklara benziyor ama, besin süzmek için yeterli olmayıp, omurgalıları ait bazı özellikler taşıyorlar: Gözler ve kas kütleleri. Bu ipuçları *Haikouella*'nın omurgalılarla omurgasızlar arasındaki eşikte, omurgalıları batraklardan daha yakın bir yerde olduklarını gösteriyor.

Yine de bazı araştırmacılar bu akrabalık ilişkisine şüpheyle bakıyor. Kas bloklarındaki benzerlikten fazlası olması gerektiğini düşünüyorlar. "Artıları, eksileriyle bu fosil bulgular küçük bir omurgalıya benziyorlar." diyor Linda Holland. Ayrıca fosillerdeki sinir kordonunun ucundaki şişkinlik batraktakilerden daha büyük. "Ön kısımda daha büyük bir kütle var. Bu canlıların bir beyni olduğunu söyleyebilirim." diyor Linda Holland. Eğer böyleyse omurgalı benzeri beyinlerin tarihini bu bulgular 530 milyon yıl öncesine itiyor. *Haikouella*, Gans ve Northcutt'ın 18 yıl önce öngördükleri gibi duyarlı gelişmiş bir ilkel omurgalı avcı örneği.

## Kemik Nasıl Doğdu?

Northcutt ve Gans'ın omurgalıların beyinlerinin kökeni konusundaki kuramlarının büyük başarısına karşın, kemik konusundaki düşünceleriyle ağır darbeler yiyor.

Araştırmacılar batraklarla omurgalıları arasında bir köprü kurmayı başardıktan sonra türsel dallanma diğer yılan balığı benzeri türlerle devam ediyor. Conodontlar omurgalıları, hatta yaşayan ilkel çeneli balıklara daha yakın duruyor. Conodontların yükselişinden hemen sonra bu ağaca göre zırlı dişsiz ostrakodermiler ve sonra da çeneli balıklar oluşmuş gibi görünüyor.

Evrim ağacına göre yaşayan yılanbalığı benzeri canlılar ilkel omurgalıların nasıl olduğuna dair bir örnek oluşturuyor: Mineral iskeleti olmayan ve zırlı canlılar. İlk kez conodontlarda mineralleşmiş iskelet yapısı görünüyor ve bu ilkel bir omurgalı iskeleti. Ama bu yapı Gans ve Northcutt'ın önerdiği yapı da değil. Kemiklerin oluşumu düşündükleri gibi conodontların derisinde değil, ağızlarında ve bu da onları daha korkunç avcılar haline getiriyor. Bu bulguları Birmingham ve Leicester Üniversiteleriyle Londra'daki Doğa Tarihi Müzesi'nde görevli bir grup paleontolog, omurgalıları için ilk kez conodont adlı garip bir grup hayvanı da içeren yeni bir evrim ağacı çiziyorlar. Bu yaratıklar geride yaklaşık 510 ile 220 milyon yıl arasında değişen, koni ve diken biçimli bir yığın esrarengiz fosil bırakmışlar. Uzun süre bu conodontlar akla gelen her takımla ilintilendirildi. Sonunda 1980'lerde bu diken ve konilerin yumuşak dokuya gö-



530 milyon yaşındaki *Haikouella*, omurgasızlardan omurgalıları geçişi temsil ediyor.

İlk dişler.

İlkel conodontlardan bir parça (solda), yılanbalığı benzeri canlılarda görülen ilk mineralleşmiş iskelet yapısı olabilir (sağda).

mülü olduğu yeni fosiller bulunmasıyla durum aydınlandı.

Şimdi araştırmacılar conodontların kocaman iki gözü ve dişe benzer kemiksi konilerle dolu koca bir ağız olan yılanbalığı biçimindeki avcılar olduklarını düşünüyorlar. Ağızlarındaki bu kemiksi yapılar, dentin ve omurgalı iskeletinin öteki malzemelerinden oluşuyor. Bulgular karşısında Northcutt, Gans'la birlikte hata yapmış olabileceklerini kabul ediyor.

Kemiklerin omurgalıların evriminden sonra oluştuğuna dair görüş henüz kesinleşmiş değil ama daha ilkel omurgalıları conodontların ağızındaki yapıların benzerlerinin öncüllerine sahip olabilirler. Yaşayan yılanbalığı benzeri canlılarda, ilerde başka minerallerle desteklenerek dişlere dönüşebilecek fosfat ve keratin bulunuyor. Çinli palaeontolog Jun-Yuan Chen ve çalışma arkadaşları *Haikouella*'nın gırtlakta mineralleşmiş gırtlak dişi olduğunu iddia ediyorlar. Bu dişi yapıların omurgalı evrimiyle bir ilişkisinin olup olmadığını anlayabilmek için, mikroskopik analizlerin sonuçlarını beklemek gerekiyor. Böylece tartışmalar sona erecek ve bu canlıların omurgalı olup olmadıkları belli olacak.

Şimdi omurgalı evriminin kökenleriyle ilgili veriler akmaya başladı. Bu alan sıkıcı ve durgun bir alan olmaktan çıktı, heyecan kazandı. Veri akışı da azalacakmış gibi görünmüyor. Doğa tarihi müzelerinde görmeye alıştığımız omurgalıların nasıl ortaya çıktığıyla ilgili resim daha da netleşmeye başlayacak.

Zimmer, C., "In Search of Vertebrate Origins: Beyond Brain and Bone", *Science*, 3 Mart 2000  
Çeviri: Özgür Ergin