3

Düzenden Doğan Kaos

Şu anda bahsettiğimiz kaos türü, diğer bir deyişle yirmi birinci yüzyıl bilim insanlarının kaostan kastı, antik düşünürlerin sözünü ettikleri kaostan veya gündelik hayatımızda kullandığımız kaosun anlamından farklıdır. Bu ikinci tür kaos prensipte bile tamamen rastlantısal ve öngörülemezdir. Bizim burada değindiğimiz kaos ise tamamen düzenli ve belirlenimcidir. Her evresi –prensipte– tamamen öngörülebilen kesintisiz bir neden-sonuç zincirinde birbirini takip eden aşamalardan meydana gelir. Pratikte tek sorun ne olacağını, gerçek zamanda olayların meydana gelişinden evvel detaylı olarak tahmin etmenin imkânsızlığıdır. Buna dair klâsik bir örnek türbülans üzerine yapılan çalışmalardan verilebilir. Türbülans birçok yerde karşımıza çıkar; ancak en basit örneklerden biri olan "debinin[1] artması sonucu suyun akışının değişme şekliyle" bu konunun önemine değinmek mümkündür.

Basit modelimizi, yüzeyinden büyük bir kaya parçasının yükseldiği, usulca akan bir nehri hayal ederek oluşturabiliriz. Nehirde akan su bölünerek kayanın etrafından dolanır ve diğer tarafta sorunsuzca tekrar bir araya gelir. Böylece suda yüzen

---

[1] Akarsu yatağının herhangi bir kesitinden 1 saniyede geçen su miktarı –çn.

ufak dal parçalarının bu "akış çizgileri"ni izlediğini görürüz. Nehrin yukarı kısmında yağmur söz konusuysa akış hızı artar ve bu sırada en az üç belirgin değişim yaşanır. Daha önce muhtemelen bunlara şahit olmuş, ama önemleri hakkında hiç kafa patlatmamışsınızdır. İlk olarak akış güçlendikçe kayanın arkasında küçük girdaplar oluşur. Bu anaforlar yerlerinde kalır ve akıntı boyunca sürüklenen küçük bir dal parçası bunlardan birinin içinde hapsolup uzun süre dönüp durabilir. Bu, –bir sistemin, bir çeşit girdabın çevresini uzun bir süre dolaştığı– Lorenz çekicisi örneğindeki faz uzayında görülen davranış şekline çok benzer. Faz uzayında bu tip çekiciler limit çevrimi olarak bilinir; çünkü sistem başlangıcını nerede yapmış olursa olsun bir limit dahilinde tekrarlayan belirli davranış örüntüsüne çekimsenecektir.[2] Yaklaşık olarak (ancak açıklayıcı) bir şekilde, kayanın arkasındaki her anaforu bir "limit çevrimi" olarak adlandırabiliriz.

Bir sonraki aşamada akıntı boyunca akan suyun hızı arttıkça, kayanın arkasında anaforlar oluşur, ancak yerlerinde kalmazlar. Kendiliklerinden (ya da akış tarafından) bulundukları yerlerden ayrılarak akıntı yönünde uzaklaşırlar ve kısa bir süre boyunca akışın içinde çözünene dek varlıklarını sürdürürler. Bu esnada kayanın arkasında yeni anaforlar oluşur ve akabinde bunlar da yerlerinden ayrılarak kendi sıralarını savmış olurlar. Bu kez de bir dal çırpısı, bu burgaçların birisine kapılabilir ve anafor yok olana dek dönüp durarak akıntı boyunca sürüklenebilir.

Suyun akışı, akış hızı artmaya devam ettiğindeyse, kayanın arkasında anaforların oluştuğu bölge giderek küçülür ve anaforlar neredeyse oluşur oluşmaz dağılarak görünüşte sadece düzensiz dalgalanmaların, diğer bir deyişle türbülansın meydana geldiği hafif dalgalı bir yüzeye sebep olur. Son olarak akış yeterli hıza ulaştığında, kayanın arkasındaki bölgede düzene dair hiçbir ize rastlanmaz. Anafor oluşumu ortadan kalkar ve kayanın arkasında kalan suyun yüzeyinin

---

2 Doğrusunu söylemek gerekirse bir limit çevrimi, faz uzayında kapalı bir döngüye karşılık gelir. Bizse bunu, işimizi kolaylaştırması açısından Lorenz çekicisinin tek bir lobu olarak düşüneceğiz.

tamamı bozulur. Düzen de yerini öngörülemeyen kaotik harekete bırakır.

Ayrıntılarıyla açıklayacak olursak türbülans, düzenden kaosa doğru giden rotanın iki kritik özellik içerdiğini belirtir. İlk söylememiz gereken şey, bir şeylerin değişmekte olduğudur. Bahsini açmaya gerek bıraktırmayacak denli aşikâr gözükse de bunun, tüm hikâyenin merkezinde yer aldığını belirtmeliyiz. Buna benzer bir sistem kimi koşullar altında basit yollarla açıklanabilirken, kimi diğer koşullar altında kaos çerçevesinde açıklanabilir ve bu ikisinin arasında da ilginç şeylerin (bu durumda, anaforların "doğuşu"nun) meydana geldiği karmaşık bir bölge mevcuttur. Bu sistemde tek bir şey –bir parametre– değişim gösterir; o da suyun aktığı hızdır. Bu tek bir parametrenin değerini kritik bir noktanın üstüne taşımak kaosun başlamasını da beraberinde getirmeye yeter. İkinci olarak da kaosla düzen arasındaki karmaşık ara evre süresince anaforların kayanın arkasında yok oluşunu ayrıntılı olarak ele aldığınızda çok ilginç bir şeyle karşılaşırsınız. Bu keşif ayrıntıya yönelik itinalı bir dikkati gerektirse bile olup bitenlere dair örüntüyü etraflıca görme niyetinde değilseniz yüksek düzeyde teknik araç gerece de ihtiyaç duymazsınız. Leonardo da Vinci bu konuya yarım bin yıl önce dikkat çekmişti. Kayadan ayrılıp akıntı yönünde ilerleyen bir girdabın öylece kaybolmadığına işaret eden da Vinci, onun daha küçük girdaplara, ardından daha da küçük girdaplara ayrıştığını söylüyordu. Ona göre bu adeta sonsuz bir çatallanma süreciydi. Kaosa giden yolda, sonsuz küçük bir ölçekte işleyen sonsuz sayıda tercih yer alıyor gibidir. (En azından konu türbülans olduğunda bu böyledir.) Benzer herhangi bir şeyi başka bir yerde de iş başında görmemiz mümkün müdür?

Yanıt elbette "evet"tir. Benzer bir şeyi iş başında gördüğümüz bir diğer yer –yine su akışının söz konusu olduğu– musluktan su damlaması olayıdır. Musluk kapalı olarak başlanıp ardından hafifçe açıldığında alttaki lavaboda –sıkıcı bir davulcunun monoton temposuyla yankı yapan– istikrarlı bir damlama sağlamak kolay olacaktır: Tıp, tıp, tıp, tıp… Bu, bir periyotlu bir ritimdir. Musluğu biraz daha açtığınızda sistemin iki periyotlu bir ritme büründüğünü görmek ve işitmek hâlâ oldukça basittir. (Bunu ben bile yapabilirim.) Bu sefer kısmen daha yetenekli bir davulcuyu dinliyormuş gibi olursunuz: Tıp-tıp, tıp-tıp, tıp-tıp, tıp-tıp… Musluğu daha da açtığınızdaysa işler giderek ilginçleşmeye başlar ve ardından tamamen karman çorman olur. İkinci periyodun ardından gerçekleşen ilginçlikleri tespit etmek oldukça zordur. Evimdeki bir musluğu, dört-zamanlı bir vuruş işittiğime kendimi ikna edebileceğim bir noktaya kadar açabiliyorum: Tıp-ı-tı-*tıp,* tıp-ı-tı-*tıp,* tıp-ı-tı-*tıp,* tıp-ı-tı-*tıp…* Bu, dört periyotlu bir ritimdir. Ne var ki dürüst olmak gerekirse bu ritmin sırf duymak istediğim şeyin o ritim olmasından kaynaklanıp kaynaklanmadığı konusunda emin değilim; çünkü kontrolü dikkatlice sağlanan koşullar altında yapılan deneylerin bu sonucu ortaya koyduğunu önceden de biliyorum.[3] Söz konusu süreç periyot katlama olarak adlandırılır ki bunun sebebini tahmin etmek güç değildir. Yine de bu süreç sonsuza kadar süremez. Kritik bir noktada (musluğun açılması ele alınırsa, çok yakın bir zamanda) sistem kaotikleştikçe, yinelenen periyot katlamalar (yinelenen çatallanmalar) çözülmesi güç ve görünürde rastlantısal olan bir damlama örüntüsü ortaya çıkarır. Musluğu daha da açtığımızda damlalar birleşerek düzgün bir akış oluşturur. Biraz daha açtığımızdaysa akış, türbülanslı ve dağınık bir görüntü çizer. Şu an için buradan daha ileri gitmeyelim; ancak türbülans konusuna tekrar döneceğiz.

Kaosa giden periyot katlamalı rotaya yönelik en iyi örnek, bilimin tamamen farklı bir alanından gelir ve kaosa yönelik çıkarımların ne kadar temel ve yaygın olduğu hakkında bize ipucu sunar. Lojistik denklem olarak adlandırılan çok basit bir denklem bulunur. Bu denklem bir canlı türü popülasyonunun bir nesilden diğerine nasıl değiştiğini açıklamak konusunda

---

3 Bu bölümü yazıya döktükten hemen sonra, sağanak yağmur diner dinmez alışverişe çıktım ve nalbur dükkânında kuyrukta beklediğim sırada, pencerenin dışındaki bir yağmur oluğundan su damladığını fark ettim. Dörtlü kümeler halinde düştüğünü apaçık görebildiğim damlalar kaldırıma çarptıklarında şaşırtıcı bir şekilde tam olarak tıp-ı-tı-tıp ritmini tutturuyordu.

işe yarar. Gayet basit biçimde bu konuya değinebiliriz. Sonraki bahara yeni bir nesil dünyaya getirmek amacıyla yumurtalarını bıraktıktan sonra tüm yetişkin popülasyonunun kış ayında öldüğü bir böcek türünü ele aldığımızı varsayalım ve x sayıda birey içeren bir popülasyonla başlayalım. Yeni nesildeki bireylerin sayısının (hayatta kalarak sırası geldiğinde üreyecek bireylerin sayısının), açılacak yumurtalara ve açılacak bu yumurtaların sayısının (doğum oranının) da kaç adet yumurtlamanın gerçekleşmiş olduğuna bağlı olduğu apaçık ortadadır. Dolayısıyla ortalama olarak her böcek B kadar yumurtlarsa yeni nüfus Bx kadar olacaktır. Yemek bulamayıp açlıktan ölmüş ve yavrulayamamış olan böceklerin bu hesaba katılmadığını da söyleyelim. Bu ölüm oranı popülasyonun ilk büyüklüğüne bağlıdır. (Birey sayısı ne kadar fazlaysa her bireyin yeterli besin bulması da o kadar zor olacaktır.) İşi daha da basite indirgemek adına nüfus için bir üst limit belirleyip (bir gül ağacının yaşam alanı sağlayabileceği yeşil sinek sayısı açısından düşünüldüğünde bu gayet mantıklıdır) asıl nüfusu bu sayıya bölersek x'in tanımladığı değerin her zaman 0 ile 1 arasında kalmasını sağlamış oluruz. Yapılan bu işleme yeniden normalleştirme adı verilir. Şimdi prematüre ölüm oranını hesaba katmak için Bx büyüme faktörünü yeni bir terimle çarpabiliriz: (1-x). Nüfus çok düşükse (sıfıra ne kadar yakın olursa olsun) neredeyse tüm bireyler hayatta kalır ve besine ulaşır. Dolayısıyla büyüme oranı (1-x) de neredeyse tam olarak Bx'e eşittir. Öte yandan nüfus çok yüksekse x 1'e, (1-x) ise 0'a çok yakındır. Bu durumda çoğu birey açlıktan ölmekten veya avcılara yem olmaktan kurtulamaz. Bu iki uç ihtimal arasında, doğum oranını temsil eden B'nin kesin değerine bağlı olarak nüfus –bir nesilden sonrakine– artabilir ya da azalabilir. B'nin farklı değerleri için nüfusun nasıl değiştiğini aşağıdaki ifadenin iterasyonuyla görebiliriz:

x (sonraki) = B$x(1 - x)$

x(sonraki) burada bir sonraki neslin nüfusuna karşılık gelir. Denklemin sağ tarafının çarpımını aldığımız takdirde Bx - Bx^2 ifadesini elde ederiz. Bu ifadedeki x^2 teriminden dolayı bu sürecin doğrusal olmadığı ve iterasyon yoluyla geri-bildirim içerdiği kanısına varırız.

B'nin 1'den küçük olması, popülasyonun bir nesilden sonrakine kendisini yeniden üretemeyeceği anlamına gelir. Her erişkin birey, ortalama olarak 1'in altında yavru bırakarak evrimsel bir felakete davetiye çıkartır ve başladığınız x değeri ne olursa olsun eninde sonunda popülasyonun nesli tükenecektir. B'nin 1'den büyük olması durumunda ilgi çekici birtakım şeyler meydana gelir ve bir bilgisayar, hesap makinesi, hatta kâğıt kalem kullanarak B ile x'in farklı değerleri için bu ilginç şeyleri araştırabilirsiniz. 1950'lerden itibaren çevrebilimciler de tam olarak aynı şeyi yaptı. Çevrebilimciler lojistik denklemin farklı versiyonlarını kullanarak çeşitli canlı türlerinin gerçek popülasyonlarının davranışına ışık tutabilecek modeller bulmaya çalıştı. (Lojistik denklemin bu versiyonları, popülasyonun avlanmaya maruz kalmasını veya iki farklı popülasyonun besin için birbirleriyle girdikleri rekabeti kapsayacak yönde kolaylıkla uyarlanabilir versiyonlardı.) Oysaki büyük oranda halihazırdaki hesaplama imkânlarının yetersizliğinin getirdiği sınırlamadan ötürü çevrebilimciler, en ilginç ihtimalleri derinlemesine incelemek yerine denklemden yapılabilecek daha çok düzenlilik içeren çıkarımlar üzerinde yoğunlaşmayı yeğlediler. (Tıpkı hidrodinamikçilerin türbülansı görmezden gelmeleri ve küçük burgaçlar düzenli biçimde kayanın arkasında oluştukları ve oradan ayrıldıkları zaman nehrin bulunduğu hale yoğunlaşmaları gibi.)

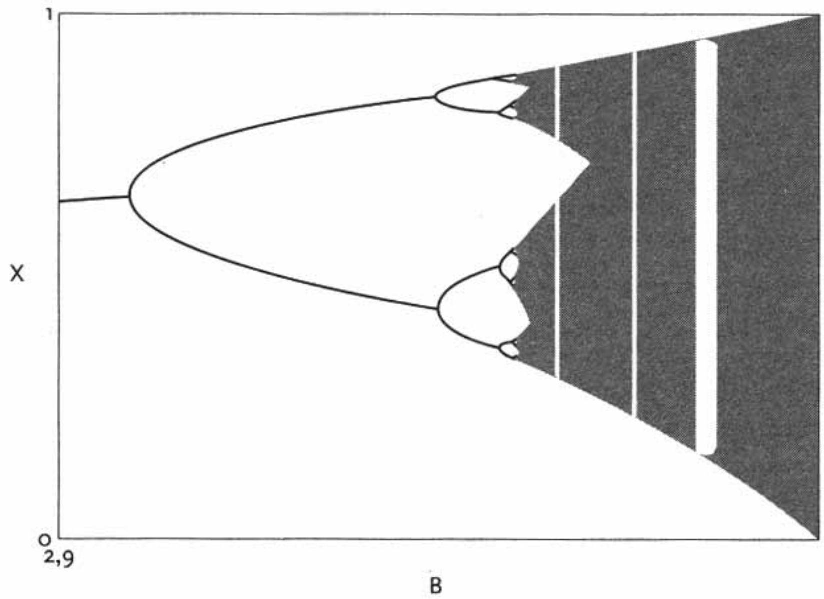
B 1'den büyük ve 3'ten küçük olursa bu basit lojistik denklemde bir çekici yer alır. Başladığınız popülasyonun sahip olduğu x değeri ne olursa olsun (x için 0 ile 1 arasında herhangi bir değer) yeterli sayıda nesil sonrasında bu değer, sabit bir nüfus teşkil edecek biçimde dengeli bir düzeye yerleşecektir. B artırıldığında yerleşilmiş olunan bu tam değer hafifçe yükselir. B'nin 3'e yakın (ancak 3'ten küçük) değerleri içinse muhtemel olan maksimum nüfusun $\frac{2}{3}$'üne karşılık gelecek şekilde değer 0,66'ya yerleşir. Aynı değer düşük bir düzeyden başlayıp yükselerek 0,66'nın üstüne çıkabilir ve birbirini izleyen nesiller için çekiciye gittikçe yaklaşarak 0,66'nın iki tarafında zikzaklar çizebilir. (Kitabımızın ikinci bölümünün başında bahsedilen, π için yapılan kestirim gibi). Diğer yandan bu değer yüksek düzeyde başlayıp 0,66'ya doğru alçalabilir ve aynı şekilde zikzaklar sergileyebilir. Yine de yeteri kadar iterasyon uygularsanız daima 0,66'ya yerleşir. B'yi daha da büyüttüğünüzde iniş çıkışlar daha şiddetli olur ve çekiciye yerleşilmesi de uzun sürer; ancak B, 3'ten küçük olduğu sürece en nihayetinde çekiciye yakınsayacaktır. Öte yandan B 3'e eriştiğindeyse farklı şeyler meydana gelir.

B 3'ten büyük bir değere ulaşır ulaşmaz örüntü değişime uğrar. Bu sefer yeteri kadar iterasyon yapıldığında popülasyon –birbirini takip eden nesillerde– iki farklı sabit düzey arasında gidip gelir. Tek bir çekici ikiye ayrılmış (çatallanmış) ve periyot, 1'den 2'ye katlanmıştır. Gerçek popülasyonları ele alarak bunu kavramak mümkündür. Bir yıl içerisinde bütün besinini tüketen büyük bir popülasyon söz konusudur. Bunun sonucunda birçok birey yavrulayamadan açlıktan ölür. Dolayısıyla yeni neslin popülasyonu küçük olacak ve her birey bolca besin bularak yumurtlayabilecektir vs. Tüm bunları, B'nin 3'ün altından başlayarak 3'ün üzerine çıkan değerlerini ele alan bir grafikte göstermek istediğinizde, tek olan çekicinin çatallanması sonucunda diyapazona (ses çatalına) benzer bir şekille karşı karşıya kalırsınız.

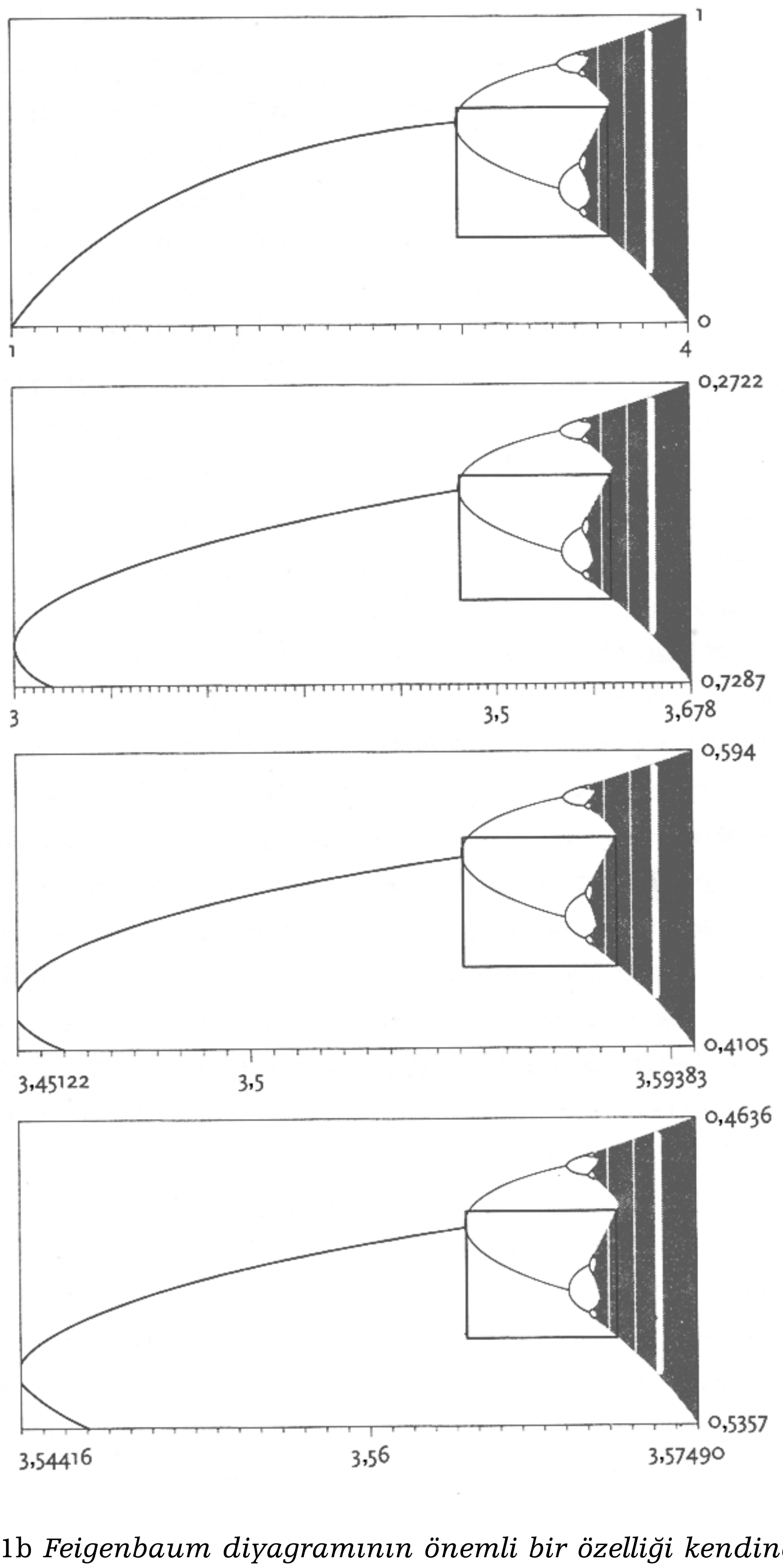
Hesaplamalar yapıldıktan sonra bu süreç sözle veya şekillerle anlatılacak denli kolay bir hale gelmiş olur. Asıl zahmet gerektiren hesaplamaların yapılmasıdır. B'nin yalnızca tek bir değeri için tüm iterasyonların hesaplamasını yapmak bile fazlasıyla sıkıcıdır. Üstelik kritik değer olan 3'ün civarında olup biteni yakından incelemek istiyorsanız B'nin biraz farklı çok sayıda değeri için yine çok sayıda iterasyon yapmanız gerekir. B artırıldıkça genel davranış örüntüsünün nasıl değiştiği detayı açısından lojistik denklemi ilk incelemeye alan kişi Avustralya doğumlu ve sonradan bir çevrebilimci olan fizikçi Robert May'dir. 1970'lerin başında Princeton'da çalışan May, 30'lu yaşlarının sonlarında, artık fikirlerini fizik ve matematikten biyolojiye uyarlamasına yetecek çok doğru bir birikime sahip hale gelmişti. Elektronik bilgisayarların yükselen hız ve gücünü kullanmanın da tam yeri ve tam zamanıydı. B 3'e eşit olduğunda meydana gelen çatallanmanın keşfedilmiş olmasından hareketle, atılması gereken bir sonraki adım aşikâr biçimde B daha da artırıldığında ne olacağını görmekti. Sonuç hayrete düşürücüydü. 3,4495 değerinde diyapazonun her iki ucu da çatallanıyor ve dört farklı nüfus arasında inip çıkan (dört periyotlu) bir sistem üretmiş oluyordu. B 3,56'ya eşit olduğunda her bir çekici ikiye ayrılıyor ve nüfus sekiz farklı düzey arasında gidip geliyordu. 3,596'da bir diğer katlanma on altı muhtemel nüfus düzeyi ortaya çıkartıyordu. Bu noktada, bu basit belirlenimci kurala tâbi olan gerçek bir canlı popülasyonunu incelemekte olan herhangi bir biyolog, bir nesilden diğerine bu düzeylerde sıçramalar yapan nüfusların görünürdeki kaotik dalgalanmalarının içerisinde bir düzen görmekte hayli zorlanırdı. Fark etmişsinizdir ki B'nin değeri artırıldıkça çatallanmalar birbirlerine giderek yaklaşmaktadır ve May'in ilk çalışmasının geliştirilmesiyle ortaya çıkana göre 3,56999'da nüfusta mevcut çekici sayısı sonsuza ulaşır. Bunun anlamı şudur: Nüfusun yıldan yıla nasıl değiştiğini inceleyen bir kimse, tam belirlenimci bir kaosla karşı karşıya kalır.

Hatta mesele bu kadarla da sınırlı kalmaz. B'nin 3,56999'dan büyük değerleri için çoğu zaman kaos söz konusu olsa da kaosun yarattığı kafa karışıklığı içerisinde net bir pencere gibi açılan, düzenin tekrar sağlandığı, B'nin değerlerine ait küçük bir yelpaze bulunur. Örneğin B 3,8'den birazcık büyük veya 3,9'dan birazcık küçük olduğunda sistem, B 3'ten küçük olduğunda görülen davranışa benzer şekilde kararlı bir hale yerleşir. Öte yandan B yavaşça artırıldığında, tıpkı B'nin 3'ün hemen üzerindeki değerleri için görülen örüntüdeki gibi yine tekrarlanan çatallanmalar (periyot katlamaları) görürüz. Bir süre sonra, önceki tüm aşamaların aynılarından geçeriz ve kaosla yeniden karşılaşırız. Ne var ki karşılaştığımız örüntü ilk örüntüye gerçekten de çok benzerdir ve ondan tek farkı daha küçük bir ölçekte yer almasıdır. Kaosun bu yeni ve daha küçük ölçekli versiyonu içerisinde, tıpkı 3,8 ve 3,9 arasında bulduğumuz düzenin açtığına benzer bir pencere vardır. Bu pencere içerisinde de bütün bu örüntü yine tekrar eder. Giderek küçülen ölçeklerde aynı davranış örüntüsü devam eder ve bu tekrarlanma, adeta iç içe geçmiş sonsuz sayıdaki Rus matruşka bebeği gibi sonsuza dek sürer. Bu "örüntü içinde örüntüler" açık bir sebeple kendine benzer olarak değerlendirilir. Düzenin orta yerinde kaos, öte yandan kaosun orta yerindeyse düzen vardır. Bütün bunların, çevrebilimi ve biyolojinin çok ötesinde çıkarımları olduğunun farkına varan May, disiplinler arası bilimsel bir dergi olan (ve yaygınca okunan) *Nature*'da 1976'da yayımladığı makaleyle yaptığı keşiflere dikkat çekti. Bu, tam da farklı bilim insanlarının yürüttüğü, çeşitli olgular üzerindeki bağımsız çalışmaların bir araya gelerek kaos teorisini yarattığı döneme denk geliyordu.

Biz "kaos" terimini, sözünü ettiğimiz davranışı tanımlamak için kullandık; ama sözcüğün kullanılışı söz konusu dönemden hemen sonra başladı. (Gerçekten de tüm bunlar meydana gelirken kaos, kendi anlamını buldu ve yaygın olarak kullanılmaya başlandı.) Edward Lorenz 1960'ların başında kendine ait kaos keşfini gerçekleştirdiği sırada, meteoroloji bağlamında çalışmalar yürütüyordu. Keşfini gayet doğal olarak, meteorologların katıldığı toplantılarda açıkladı ve meteoroloji dergilerinde yayımladı. (Ana makalesi "Deterministic Nonperiodic Flow" ["Periyodik Olmayan Belirlenimci Akış"] 1963'te *Journal of the Atmospheric Sciences*'da yer buldu.) Ne var ki keşfi çabucak kavrayabilecek matematikçiler, fizikçiler ve hatta biyologlar



Şekil 3.1a *Feigenbaum diyagramı, kaosa giden periyot katlama rotasına dair açıklayıcı bir örnek oluşturur.*

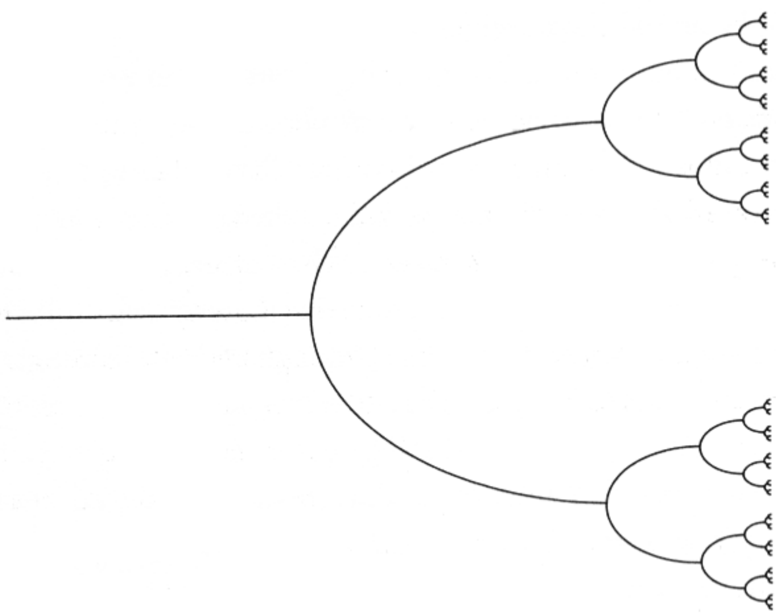


Şekil 3.1b *Feigenbaum diyagramının önemli bir özelliği kendine-benzer olmasıdır. Diyagramın küçük bir kısmının doğru oranda büyütülmüş ölçeği, orijinal diyagramla tamı tamına aynı görünüşe sahiptir.*

meteoroloji dergilerini okumuyorlardı ve bu dergileri okuyan meteorologlarsa düzenden nasıl kaos yaratıldığından ziyade havadaki kaosun (günlük anlamıyla) içinde nasıl düzen bulunabileceğiyle çok daha ilgiliydiler. Şimdi bundan on yıl sonrasına gidelim. 1941 doğumlu bir matematikçi olan James Yorke aynı günlerde, Maryland Üniversitesinde bilim insanlarının farklı bölümlere ayrışmasına yol açan engelleri kısmen de olsa kırmaya çalışmak için özellikle kurulmuş olan Fizik Bilimi ve Teknoloji Enstitüsü adlı disiplinler arası bir kurumda çalışıyordu. Yorke'un Maryland Üniversitesindeki meslektaşlarından birisi olan Alan Faller meteoroloji departmanında görev yapıyordu ve Lorenz'in 1963 tarihli makalesini okumuştu. Yorke'un, Faller ile sohbetlerinden birinde ona periyodik-olmama hakkındaki kendi çalışmasından bahsetmesi üzerine, Faller ona makaleyi gösterdi ve daha sonra Yorke'un enstitünün içinde dağıtacağı kopyalarını çıkarttı. Makalenin hem meteoroloji alanı dışında da geçerlilikleri olması gereken derin bir gerçeği içermesinden hem de bunu gerçek, fiziksel bir sistemin davranışı açısından ifade ediyor oluşunun temeldeki matematiği fizikçilere daha erişilebilir kılmasından dolayı Yorke makaleyi okur okumaz değerinin farkına vardı. Matematikçiler Lorenz'in basit bilgisayar programındaki sayıların davranışını çağrıştıracakları biçimde sayılarla on yıllarca oynamışlardı; ama Lorenz'den önce kimse bu tip matematiksel soyutlamalar ile gerçek dünya arasında bir bağ kurmamıştı. O dönemde Lorenz'in kendisinin de, bu anlayışla fiziksel terimlere çevrilebilecek, soyut gözüken ne kadar matematiksel çalışma yürütülmüş olduğundan haberi yoktu. Oysa Yorke bunu yapan birini tanıyordu. Berkeley California Üniversitesine yaptığı bir ziyareti sırasında 1963 tarihli makalenin bir kopyasını, uzmanlık alanında ödüllü çalışmalara imza atan bir topolog olan ve aynı zamanda dinamik sistemlerle de ilgilenen Stephen Smale'a verdi. Ardından Smale, matematik topluluğuna yaymak üzere makalenin birçok kopyasını çıkardı. Sır su yüzüne çıkmıştı; ama hâlâ adı da konulmamıştı. Bu esnada tarih, Yorke ve meslektaşı Tien Yien Li'nin "Period Three Implies Chaos" ["Periyot Üç Kaos İçerir"] başlıklı makalesinin yayımlandığı 1975'ti.

Li ve Yorke'un ortaya koyduğu şuydu: Diferansiyel denklemlerin belirli aileleri için, periyodu üç olan yalnızca bir çözüm bulunuyorsa, hem tüm muhtemel periyotları içeren sonsuz sayıda periyodik çözüm hem de sonsuz sayıda periyodik olmayan çözüm bulunmak zorundadır. Bugün kaos dediğimizde kastettiğimiz şey tam olarak bu değildir. Lorenz'in kendisi de Li ve Yorke'un keşfini, denklemlerde kaotik olmayan periyodik çözümlerin de yer almasından dolayı "kısıtlı kaos" olarak adlandırmayı tercih eder. Bu tür bir sistemin periyodik bir halde olması kuvvetle muhtemeldir. Diğer taraftaysa, Lorenz'in "tam kaos", çoğu fizikçinin yalnızca "kaos" olarak adlandırdığı durumlarda, periyodik çözümler bulunmasına rağmen sistem çok büyük ihtimalle kaotik rejime girecektir. Yine de terminoloji 1975'ten sonra evrilmiş olmasına rağmen, Li ve York'un makalesinin, modern anlamıyla bilimsel bir terim olarak "kaos"u –bilmeyerek de olsa– tanıtan ilk örnek olduğu yaygınca kabul edilir.

Dolayısıyla 1970'lerin ikinci yarısında, May'in lojistik denklemi araştırdığı sırada bulduğu davranış çeşidini tanımlamak için kullanılacak bir sözcük mevcuttu. Bütün bunlar büyüleyici görünebilir; ancak bu davranış çeşidinin tek bir biyolojik tür için dahi zar zor gerçekçi bir temsil oluşturan basit bir lojistik denklemde geçerli olmakla kalması dürüst olmak gerekirse matematikçiler dışındakilerin pek de ilgisini çekmeyecekti. Öte yandan May'in çığır açan buluşunu takip eden birkaç yıl içinde, New Mexico'da Los Alamos Ulusal Laboratuvarında çalışmakta olan Mitchell Feigenbaum 1970'lerin ortalarında buradan yapılabilecek çok daha geniş çıkarımlar olduğunu ortaya koymuştu. Feigenbaum (1945–) kaosa giden periyot katlama rotasının lojistik denkleme özgü bir özellik olmadığını, iterasyona ilişkin sürecin bir ürünü olduğunu ve sistemin de bu ürün aracılığıyla kendisine geri-bildirim uyguladığını ortaya koydu. (Bu sistem; bir hayvan nüfusu, elektrik devresindeki bir osilatör, salınımlı bir kimyasal tepkime veya [prensipte] ekonomideki iş çevrimi bile olabilir.) Önemli olan şey, sistemlerin "özgönderimsel" olması gerektiğiydi ve böyle olmaları durumunda kaosa giden rotanın aynısını –aşağı yukarı değil, *tam olarak*– takip ediyordu. Feigenbaum, May'in çalışmasını ele alarak periyot katlamaları arasındaki mesafelerin B'nin kaosa giden rota boyunca artması esnasında nasıl giderek kısaldığına göz attı ve bunun sonucunda bir adımın büyüklüğüyle bir sonrakinin arasında sabit bir oran olduğunu buldu. Oranın üç ondalık haneli değeri 4,669:1'dir ve hangi ardışık adımlar arasında olduğu gözetilmeksizin sabittir. Sizi kritik bir noktaya git gide yaklaştırdığı ama ona hiçbir zaman ulaştırmadığından bu davranış örüntüsü geometrik yakınsama olarak adlandırılır. Feigenbaum, baktığı tüm özgöndermsel sistemlerde periyot katlanması, çatallanma ve aynı geometrik yakınsamayla karşılaştı. Üstelik bu yalnızca aynı yakınsama çeşidi olmanın da ötesinde, –aynı 4,669:1 oranını içeren– tam olarak aynı geometrik yakınsamaydı. Feigenbaum, evrensel bir gerçeklik bulmuş ve bu hesaplamalardan çıkan gizemli 4,669 sayısına kendi ismini verme şerefine erişmişti.[4]



Şekil 3.2a *Feigenbaum diyagramında görülen kendine-benzer dallanma türünün basitleştirilmiş gösterimi.*

4 Feigenbaum sayısı aslında π ve diğer birçok sayı gibi irrasyoneldir ve birkaç tane daha ondalık hane ilave edilip 4,6692016090 şeklinde yazılabilir.

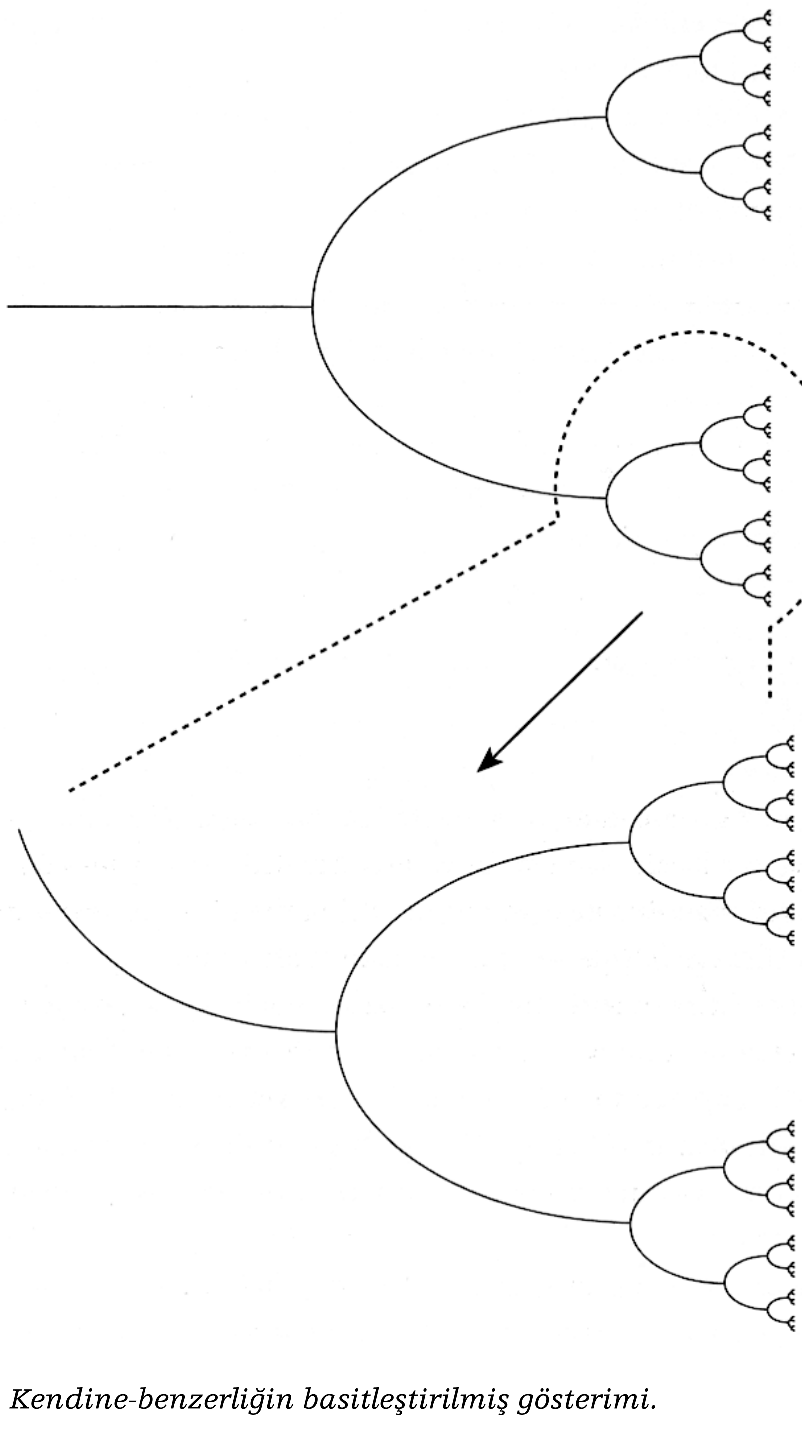
Tam da basitlikten kaosa geçiş sırasında bütün o ilginçliklerin meydana geldiği, kaosa giden periyot katlama rotasına dair verilebilecek daha birçok örnek olsa da burada fazla derine inmemize gerek yok. Bunun yerine, damlayan musluk ve nehirdeki girdaplara geri dönerek neler döndüğünü görmeye başlayabiliriz. Girdaplar da çatallanmaların etkilerini barındırır. Neler olup bittiğine Leonardo'nun baktığından çok daha detaylı bir biçimde bakacak olursak türbülansı, birbirine eklenen düzenli periyodik çevrimlerin giderek artan sayısının bir sonucu olarak düşünebiliriz. (Bunu ilk olarak 1940'larda yapan kişi Rus fizikçi Lev Landau'ydu.) Basit bir girdabın içerisinde hareket, basit bir çekicinin etrafındaki bir döngüye benzer; diğer bir deyişle limit çevrimine karşılık gelir. Atılması gereken bir sonraki adım, faz uzayında bir noktanın bir çemberi izlediğini, bu çemberin merkezininse daha büyük bir çemberi izlediğini göz önüne getirmektir.

Bunun sonucunda ortaya çıkan çekici bir torus[5] olacaktır. Bu, bir bisiklet lastiğinin iç lastiğine veya eski tarz bir can yeleğine benzer bir şekildir. Nokta, küçük çemberin çevresinde düzenli biçimde döndüğü sırada küçük çember de büyük çemberin çevresini düzenli biçimde izlediğinde sistemin halini temsil eden noktanın düzenli ve tahmin edilebilir şekilde izleyeceği yol, tıpkı kıvrık bir yayınkine benzer. Tipik biçimde, faz uzayındaki iki periyodik hareket birbirleriyle etkileşime girer ve tekrar eden bir ritmin içinde hapsolurlar.

Türbülansa giden yolda giderek karmaşıklaşan ilerideki davranış aşamalarını çok sayıda boyutu olan "toruslar" bağlamında açıklamak matematiksel açıdan anlaşılır olacaktır. Bir limit çevrimi iki boyutta yer alan tek boyutlu bir çekicidir. Bir yüzeyse üç boyutlu bir faz uzayı içerisinde yerleşik iki boyutlu bir çekicidir. Mantıklı olarak sıradaki adımda, dört boyutlu bir faz uzayında yerleşik üç boyutlu bir çekici vasıtasıyla açıklanan bir davranış örüntüsü yer alması gerekliyse de gerçek dünya bu rotada daha ileri gitmez. Hemen sonraki adımda

---

5 Üç boyutlu uzayda bir çemberin, aynı düzlemde yatan ama çembere değmeyen bir doğru etrafında döndürülmesiyle elde edilen torus, bir yüzeydir –çn.



Şekil 3.2b *Kendine-benzerliğin basitleştirilmiş gösterimi.*

türbülans oluşur. Burada sistemin halini temsil eden nokta torusun iki boyutlu yüzeyinde kalmakta, ancak torusun yüzeyinde çok daha karışık biçimde, faz uzayındaki bir noktadan ikinci bir defa asla geçemeyecek bir yolu izleyerek dolanmaktadır. (Çünkü geçseydi, sistem periyodik olacak ve davranış tekrarlanacaktı.) Dolayısıyla temsili nokta da kendi üzerinden geçmeyecektir. Tipik biçimde, orijinal üç cisim probleminde de aksettiği gibi, faz uzayındaki üç veya daha fazla periyot, tekrarlayan bir ritme hapsolmaz ve bunların birleşik etkisi, kısıtlı üç cisim problemindeki küçük parçacığın yörüngesinden daha öngörülebilir değildir. (Buna rağmen, *tamamen belirlenimci* olduğunu üstüne basarak veya çok sık söyleyemeyiz.) Sistemi tanımlayan noktanın faz uzayındaki güzergâhı, sonlu bir yüzeyin etrafında kendi üzerinden bir daha geçmeyen ve karmaşık bir biçimde sarmalanmış sonsuz uzun bir çizgiye karşılık gelecekti. (Burada, daha sonra kısaca ele alacağımız bir güçlük daha söz konusudur.) Paris'te çalışan Belçikalı David Ruelle ve Hollandalı meslektaşı Floris Takens, 1971'de yayımladıkları bir makalede bu varlığı "tuhaf çekici" olarak adlandırdı.

Fraktallerin hikâyeye dahil olduğu yer işte burasıdır. İleride de göreceğiz ki bunlar da isimlerini kaos gibi 1975'te almış ve yine kaos gibi, bu tarihten önce de kıymetleri yeterince bilinmeden uzun süre bilim camiasında gözükmüşlerdir. Şimdi fraktaller olarak adlandırdığımız varlıklar on dokuzuncu yüzyıl sonlarında matematikçilerin şaşkınlığı (ve hatta korkusu) eşliğinde keşfedildi. O dönemde fraktaller, anormal sapkınlıklar, –ana akım matematiğin düzenli dünyasına uymayan "canavarlar"– olarak değerlendiriliyordu. Onların tuhaflıklarını tüm ayrıntılarıyla ortaya koyan bir örneğe bakarak bunun nedenini anlamak mümkündür.

1890'da Giuseppe Peano (1858-1932), bir düzlemi tamamen dolduracak bir eğrinin nasıl oluşturulduğunu açıkladığı bir makale yayımladı.[6] Bu, matematikçi olmayan biri için çok da dehşet verici değildir. Yine de bir düşünün: Bir düzlem iki boyutludur; uzunluğu ve genişliği vardır. Bir çizgiyse tek boyutlu bir varlıktır. Uzunluğu vardır; ama genişliği yoktur. Peano, bir çizginin eğilip bükülerek, kendisini hiç kesmeden düzlemin her noktasından nasıl geçirilebileceğini gösterdi. Tek boyutlu bir çizgi, iki boyutlu bir düzlemi tamamen dolduruyordu! Düzlem üzerindeki tüm noktalar tek bir çizgi üzerinde yer alıyorsa düzlem nasıl "gerçekten" iki boyutlu olabilir? Dahası da

---

6 Sadece bir yıl sonra David Hilbert (1862-1943) da aynı keşfi gerçekleştirdi.

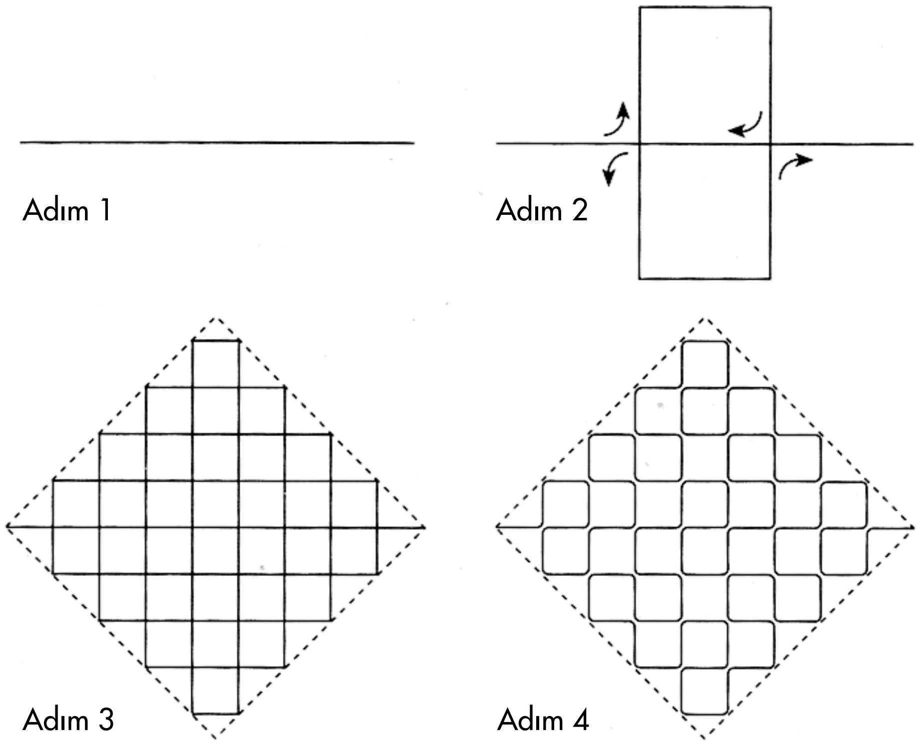
var: Düzlemi kare olarak ele aldığınızda Peano Eğrisi, düzlemi tuğlalar gibi dolduran bir küçük kareler kümesinin ana hatlarını takip eder. Her bir küçük karenin içinde eğri, benzer bir "tuğlalar" kümesini takip eder vs. Örüntü kendine-benzerdir ve sonsuza dek sürer. Peano Eğrisi sonsuz uzundur; ancak içinde bulunduğu sonlu bir alan ile sınırlıdır. Bu "boşluk dolduran" eğriyle ilişkili açık bir benzetme, türbülanslı bir sistemi tanımlayan, faz uzayındaki torusun çevresine sarmalanmış çekicidir. Oysaki 1890'lı yıllarda bunlar bilinmiyordu. Bu tip varlıkları açıklamada kullandığımız dil, New York'taki Yorktown Heights'ta, IBM'in Thomas J. Watson Araştırma Merkezinde çalışan Benoit Mandelbrot tarafından en nihayetinde 1970'lerde geliştirilecekti.

1924 Varşova doğumlu Mandelbrot, yeni bir bilim dalının kurucusu olmasını sağlayan çok zengin bir özgeçmişe sahipti. Ailesiyle birlikte Fransa'ya taşındı ve 1944'teki Kurtuluşun ardından Paris'te çalıştı. Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü ve Caltech'teki deneyimleri sonrasında 1955'te Fransa'ya dönen Mandelbrot, artık yerleşeceği Yorktown Heights'a taşınmak üzere 1958'de ABD'ye geçti. Mandelbrot, Peano Eğrisi gibi bir cismin –bu durumda 1 ile 2 arasında bir yerde bulunan– ara boyuta sahip olduğu tanımlamasının yapılabileceğinin farkına vardı. Düzgün bir çizgi hâlâ tek boyutlu, bir düzlemse hâlâ iki boyutlu bir cisimdi. Ne var ki matematik, tıpkı her rasyonel sayı arasında sonsuz sayı olduğu fikrini kabul etmek zorunda kaldığı gibi, tam sayı boyutlu olmayan, ara boyutlu varlıkların var olduğu fikrini de kabul etmek durumunda olacaktı. Bu tip bir varlığın boyutu tam sayı değilse kesirli olmak zorundadır. Mandelbrot bu varlıkları tanımlayacak sözcükle ilgili olarak, "Fraktal sözcüğünü 1975'te, Latin dilinde kırık (parçalanmış ve düzgünsüz) bir taşı tanımlayan *fractus* sözcüğünden türettim" demiştir.[7] Bunu dilerseniz aynı Latince kökene sahip "*fractional*"[8] sözcüğünün bir kısaltması olarak düşünebilirsiniz.

---

7 Mandelbrot'nun bu katkısını Nina Hall tarafından derlenmiş *The New Scientist Guide to Chaos*'ta görebilirsiniz.

8 *Fractional* sözcüğü İngilizce'de kesirli anlamına gelir –çn.



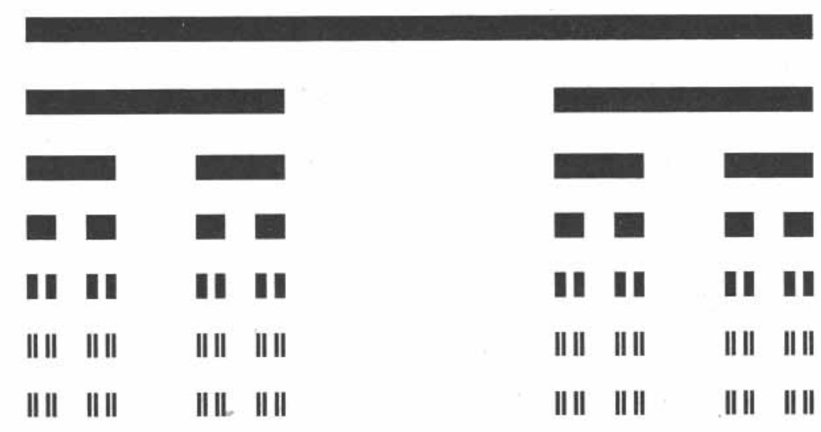
Şekil 3.3 *Peano Eğrisi: Kendisinin bir yüzey olduğunu düşünen bir çizgi.*

1975 öncesinde on yıllar boyunca korkunç matematiksel canavarlar olarak bilinen başka üç fraktal daha mevcuttur ki tüm bunların kaosla olan ilişkisine geçmeden önce bunlarla ilgili bilgi edinmek daha doğru olur. Bu üç fraktalin en eskisi (diğer bir deyişle bunların matematikçiler tarafından ilk keşfedileni) 1883'te Alman matematikçi Georg Cantor'un (1845-1918) keşfettiği Cantor Kümesidir.[9] Peano Eğrisi, bir çizgiden de öte ve bir düzlem "olmaya çalışan" bir çizgidir. Cantor Kümesiyse bir çizgiden daha azı ve bir nokta "olmaya çalışan" bir çizgidir. Bir Cantor Kümesinin nasıl oluşturulacağını açıklamak basittir. Üç eşit parçaya bölünmüş düz bir çizginin 3'te 1'lik parçalarından ortadakini silin. Bunu yaparken çizgi üzerindeki tam üçte bir ve üçte ikilik mesafede bulunan noktaları silmeme-

9 Bu küme, zeki ancak geri planda kalmayı tercih eden Dublin doğumlu matematikçi Henry Smith (1826-1918) tarafından evvelce keşfedilmişti ve Cantor'un bundan haberi yoktu. Smith'in vefatının ardından keşfin üstünün örtülü kalması, kümeye Cantor'un adının konması sonucunu doğurdu.

ye dikkat edin. Şimdi elinizde, her biri başlangıçtaki çizginin üçte biri uzunlukta olmak üzere, çizgilerle eşit uzunluktaki bir boşluk tarafından ayrılmış iki çizgi kalmış oldu. Tüm çizgiler silinip düzgün bir örüntü içerisinde yerleşmiş ve aralarında boşluklar bulunan sonsuz sayıda nokta kalana dek bu yönteme iterasyon uygulayın. Karşı karşıya kaldığınız şey 0 ile 1 arasında ara boyuta sahip bir fraktal olan Cantor Kümesidir. Bu, tıpkı *Alice Harikalar Diyarında* adlı masaldaki Cheshire kedisinin giderek kaybolan sırıtışı gibi, ilk çizginin bir tür hayaletidir. Ne kadar basit (ve görsel olarak etkileyicilikten uzak) olsa da Cantor Kümesinin öne çıkan özellikleri onu kaos meselesinde önemli bir yere oturtur. Bu özelliklerden biri, kaosun kilit öğelerinden biri olan iterasyon (geri-bildirim) sayesinde ortaya çıktığıdır; diğeriyse kendine-benzer olduğudur. İterasyon aşamamızdan (elimizde dört çizgi kaldığı andan) itibaren her aşamada Cantor Kümesi, kendisinin tamı tamına aynı, üçte bir oranında küçültülmüş iki kopyasından oluşur. Cantor Kümesiyle ilgili söylenmesi gereken bir şey daha vardır: Kaosa giden periyot katlama rotasını temsil eden çatallanma şemasına geri dönersek, kaosun devreye girdiği tam o noktada (kimi zaman Feigenbaum Noktası olarak adlandırılan, çatallanmalar arasındaki daima-azalan aralıkların yöneldiği limitte), kaos devreye girmeden önceki sürecin son adımında, çatallanma ağacının tüm dallarına ait uçların tamamı bir Cantor Kümesi meydana getirir. Bu, fraktaller ve kaos arasındaki derin ilişkinin varlığına dair ipucu teşkil etmekten de öte bu ilişkiye tamamıyla ışık tutar.

Cantor Kümesi Benoit Mandelbrot'nun kendisine ün kazandıran çalışmasında izlediği yollardan biri olduğundan, fraktallerin tarihinde de önemli bir yere sahiptir. Mandelbrot, sözcüklerin bir metnin içindeki dağılımı, büyük ve küçük şehirlerin ülke çapında dağılımı ve borsadaki iniş çıkışlar gibi her çeşit zaman-değişimli ve mekân-değişimli olgu ve örüntüye ilgi duyuyordu. IBM'de araştırmacı olarak çalışmaya başladıktan kısa bir süre sonra Mandelbrot, şirket için pratik anlamda büyük önem taşıyan bir problemle uğraşmaya koyuldu. Şimdiki gibi o zaman da veriler bilgisayarlar arasında telefon



Şekil 3.4 *Cantor Kümesi. Metinde anlatıldığı gibi her çizginin üçte birlik parçalarından ortadakinin silinmesiyle, sonsuz sayıda nokta içeren ancak toplam sıfır uzunluktaki bir toz kümesiyle karşılaşırsınız.*

hatları vasıtasıyla iletiliyordu ve bu işle ilgilenen mühendisler, hatlardan çıkan gürültülerden, bazı verilerde bozukluk yaratmaları nedeniyle rahatsızlık duyuyordu. Telefon hatlarının asıl icat edilme amacı olan konuşma sesleri için bu sorun oluşturmasa da (konuşma esnasında bir cızırtı meydana geldiği takdirde sesinizi yükseltebilir veya söylediğinizi tekrarlayabilirsiniz) o erken dönemde veri iletimi önemli ölçüde hasara uğruyordu.[10] Mühendislerin verdikleri ani tepki aslına bakılırsa gürültüyü bastırmak amacıyla bağırmaya benzer biçimde, sinyalin gücünü artırmak oldu; yine de hâlâ zaman zaman meydana gelen rastlantısal bir gürültü patlamasının bir parça verinin silinmesine şahit olunmuyor değildi.

Rastlantısal ve öngörülemez olmasına rağmen bu gürültünün patlamalar şeklinde ortaya çıkıyor gibi gözükmesi tuhaftı. Aktarımların hatasız olarak gerçekleştiği oldukça uzun zaman aralıkları olabiliyor ve bunları, tekrarlı gürültü patlamaları içeren aralıklar öngörülemeyecek biçimde takip edebiliyordu. Mandelbrot problemi incelediğinde, örüntünün kendinebenzer olduğunun farkına vardı. Sessiz bir aralık hiç gürültü içermezken, gürültülü bir aralıkta her zaman biri sessiz, diğeri gürültü patlamaları içeren daha kısa aralıklar yer alıyordu. Bu

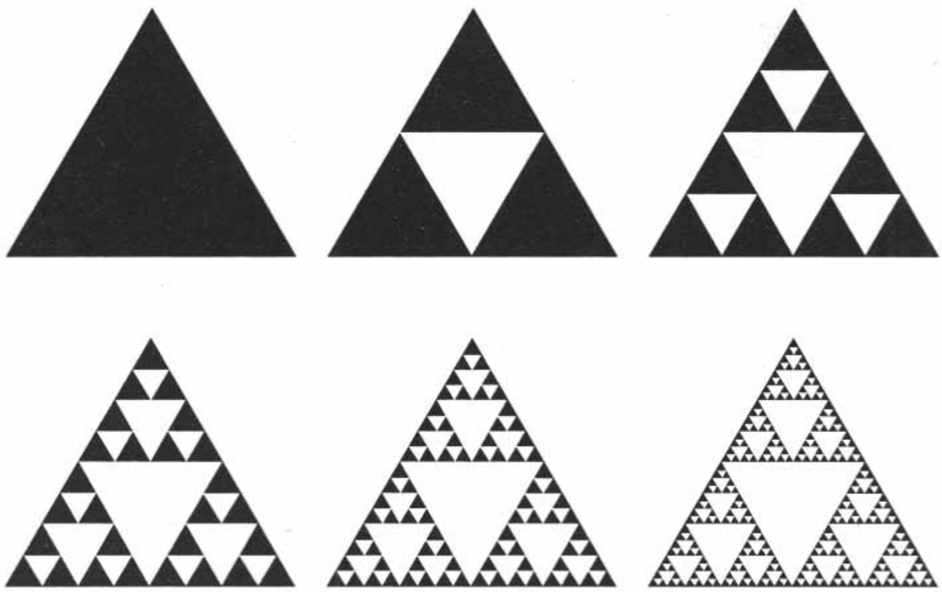
10 Bu tür bir problem dijital veri iletimi yoluyla büyük ölçüde giderilse de söz konusu dönemde henüz analog sinyaller kullanılıyordu.

daha kısa gürültülü aralıklar içerisinde de örüntünün tümü –Mandelbrot'nun söyleyebildiği kadarıyla, sonsuza dek– yineleniyordu. Bununla beraber Mandelbrot, gürültülü aralığın uzunluğunun sessiz aralığın uzunluğuna oranının her ölçek için aynı olduğunun farkına vardı. Aslında aktarım sistemindeki gürültü patlamalarının dağılımı Cantor Kümesindeki noktaların dağılımıyla aynıydı. Bu, IBM'deki mühendisler için pratik çıkarımların belirmesi anlamına geliyordu. Keşif, sistem daima gürültülü olacağından, sinyallere takviye yapmak için daha da para sarf etmek yerine, hataları tespit ederek mesajların bozuk kısımlarını tekrarlamaya yarayacak teknikler geliştirmeye ağırlık vermenin daha anlamlı olacağına işaret ediyordu. Aynı zamanda, esasında rastlantısal olan hatalara, verimsizce (tellere sürtünen ağaç dalı gibi) fiziksel bir sebep arama görevinden kurtulan insanlar (örüntüye uymayan, dolayısıyla muhtemelen sahiden de fiziksel bir sebepten doğmuş olan gürültülerin kaynağını bulmak da dahil olmak üzere) daha üretken işlere koyulabilecekti. Mandelbrot, bir insan teknolojisi içinde kaosun iş başında olduğunun farkına varılan ilk örneklerden birini bulmuş ve onu en başından, henüz ne kaos ne de fraktallerin adı konmuşken fraktallerle ilişkilendirmişti.

Bu kitabı hazırlarken yerel bir haber gözümüze çarptı. Habere göre, Mandelbrot'nun dikkatini kaosa yönelten sürecin bir benzeri, civardaki bir köyde gerçekleşiyor olabilirdi. Köylüler bir önceki yıl tekrar tekrar meydana gelmiş güç kesintilerinden dert yanıyordu. Elektrik tedarikçisi şirketinse her güç kesintisi için kusursuz derecede mantıklı birer açıklaması bulunuyordu. Bunlar, bir kuğunun enerji hava hattına dalması, fırtına sebebiyle ağaçların tellere dolanması, yıldırım düşmesi gibi gerekçelerdi. Yine de köylüler sistemde bir hata olduğu konusunda diretiyordu. Güç dağıtım ağında bir yerlerde böyle birtakım yerel afetlerin zaman zaman gerçekleşmek zorunda olduğunu şimdi kaos teoremi bize söyleyebilse de bunların nerede ve ne zaman gerçekleşeceğini söyleyemez. Bu da kesintilerden etkilenen insanları yeterince tatmin etmeyecektir.

Rastlantısal süreçler, kaos ve fraktaller arasındaki bağlantılara açıklık getirmek için bir başka matematiksel canavara bakabiliriz. Bu seferki canavarımız, Polonyalı matematikçi Waclaw Sierpinski (1882-1969) tarafından matematik dünyasına 1916'da tanıtılan ve Sierpinski Contası olarak bilinen yapıdır. Bir Sierpinski Contası oluşturmaya yönelik talimatlar basit ve tekrarlanan bir iterasyon içerir. Bir kâğıt parçası üzerine çizili (ya da günümüzdeki gibi bir bilgisayar ekranında temsil edilmiş) olan içi karalanmış bir eşkenar üçgeni ele alın. İşin doğrusu bu üçgen *eşkenar* olmak zorunda değildir; ama gözünüzde canlanması açısından böylesi daha faydalıdır. Şimdi, üçgenin kenarlarının orta noktalarını birleştirerek üçgenin ortasında ters şekilde duracak başka bir üçgen oluşturun. Sonra bu yeni üçgeni silin ve etrafı üç adet düz siyah üçgenle çevrili ters bir beyaz üçgen oluşturun. Atılacak sıradaki adımı tahmin ediyorsunuzdur: İşlemi her küçük siyah üçgen ve bundan sonra oluşacak daha da küçük dokuz siyah üçgen için (prensipte sonsuza dek) tekrarlayarak devam edin. Karşı karşıya kalacağınız şey, kendine-benzer olduğu açıkça görülen bir varlık ve yine 1'le 2 arasında bir boyuta sahip bir fraktal olan Sierpinski Contasıdır. (Fraktal boyutların nasıl ölçüldüğüne az sonra değineceğiz.)

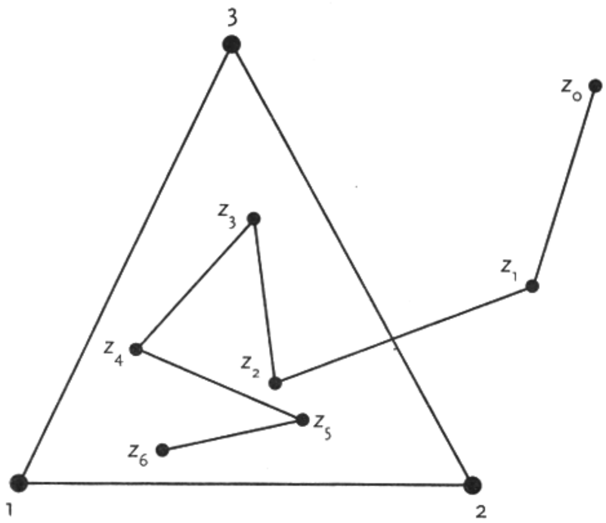
Sierpinski Contasını oluşturmak için uygulayabileceğiniz aynı basitlikte ancak sabır gerektiren bir yöntem daha vardır. Bunun için tüm yapmanız gereken, bir kalem kuşanıp bir kâğıt parçası üzerine bir eşkenar üçgenin köşelerini temsil eden üç nokta işaretlemek ve sonrasında dürüst ve basit bir zar atışıyla 1, 2 veya 3 sayılarından birisini rastgele seçmek. Zarın altı yüzü olduğundan 4'ün 1'i, 5'in 2'yi, 6'nınsa 3'ü temsil ettiğini kabul edebilirsiniz. Üçgeninizin köşelerini 1, 2 ve 3 diye tanımlayın. Şimdi kâğıdınızın üzerinde seçeceğiniz herhangi bir noktayı başlangıç noktası olarak işaretleyin ve zarı atın. 1 ya da 4 gelirse başlangıç noktanız ile 1 olarak tanımlamış olduğunuz nokta arasındaki mesafenin tam ortasına bir nokta yerleştirin. Zar 2 ya da 5 gelirse başlangıç noktanız ile 2 olarak tanımlamış olduğunuz nokta arasındaki mesafenin tam ortasını işaretleyin. 3 ya da 6 gelirse aynı işlemi başlangıç noktanız ve 3 olarak tanımlamış olduğunuz nokta için uygulayın.



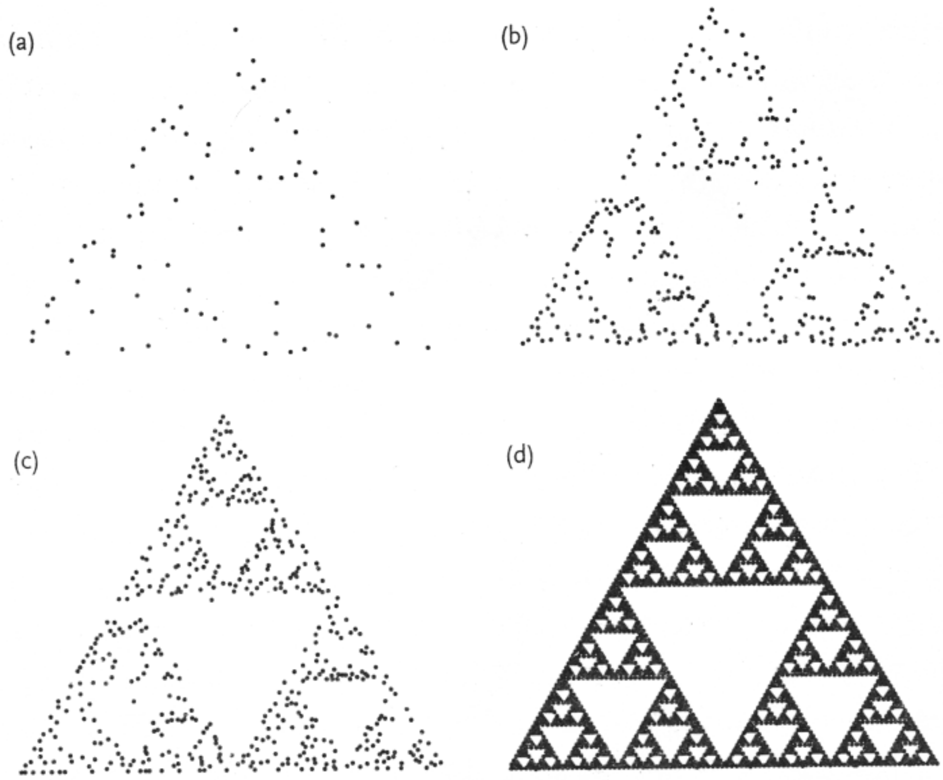
Şekil 3.5 *Sierpinski Contası.*

İşaretlemiş olduğunuz yeni noktayı yeni başlangıç noktanız olarak kabul edip yeniden zar atın ve bunu tekrarlayın ve tekrarlayın, tekrarlayın, tekrarlayın. İlk birkaç noktadan sonra kâğıt parçası üzerinde oluşan noktalar örüntüsü, bir Sierpinski Contası şeklini çok yavaşça ortaya çıkarır. Çok basit bir kurala dayanan tamamen rastlantısal bir iterasyon işlemi, fraktal bir örüntü oluşturmuş oldu. Bu özel işlem için çekici görevini sahiden de Sierpinski Contası üstlenir. Oysa iterasyondaki ilk adımlar tam olarak contanın üzerinde değildir; contanın üzerinde olmayan bir yerde başlayıp conta tarafından çekildikçe ona doğru hareket eder. Çekicinin bir fraktal olması, Ruelle ve Takens'ın diliyle onu "tuhaf çekici" yapar. Bu fraktaller günlük yaşantımızda karşılaştığımız (üçgen, elastik bant gibi) nesnelerden belirgin biçimde farklıdır. Yine de, bu birkaç başlangıç noktası haricinde, oyuna nereden başlarsanız başlayın Sierpinski Contasıyla karşılaşırsınız. Oysa bu oyunu (benzer biçimde basit iterasyon kurallarından birçok ilginç örüntünün üretilebildiği ve kimi zaman kaos oyunu olarak adlandırılan oyunun basit bir versiyonunu) oynamaya niyetiniz varsa size iki uyarımız olacak. Bunlardan ilki, Sierpinski Contasına benzer bir şeyi görene dek atmanız gereken birkaç yüz adım olduğundan, sabırlı olmanızdır. İkinciyse rastlantısallıktan ödün vermemenizdir; ancak yalnızca rastlantısal sayılar kullandığınızdan emin olacak kadar iyi bir programcıya sahip değilseniz bilgisayar kullanmak konusunda ısrarcı olmayın. Maalesef, bilgisayarlardaki rastlantısal sayı üreticileri her zaman gerçekten de rastlantısal olmayabilmektedir; ama elbette yeterince becerikliyseniz bu sorunun da üstesinden gelebilirsiniz.

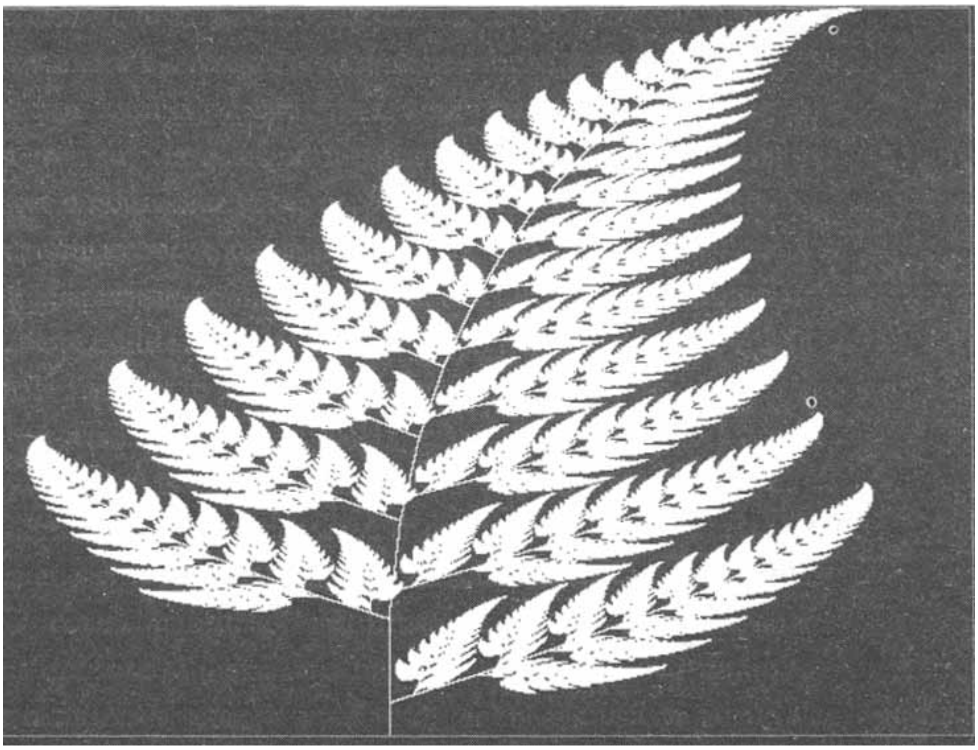
Bu tür basit bir kural doğrultusunda bir kâğıt üzerinde (sayılarınızın rastlantısal olduğundan eminseniz bir bilgisayar ekranında) rastlantısal biçimde tekrarlayan nokta işaretleme fikrine dayandığı sürece, kaos oyununda değişiklikler yaparak eğrelti otu ve ağaç gibi canlılara hayret verici derecede benzeyen fraktal görüntüler elde edebilirsiniz. İlginizi çekiyorsa, buna ilişkin matematiksel içeriği Heinz-Otto Peitgen, Hartmut Jürgens ve Dietmar Saupe'nin *Chaos and Fractals* adlı kitabında bulabilirsiniz. Canlıların gelişerek karmaşık biçimlere aynı bu yolla ulaştığını söylemiyoruz; ancak burada bizi bağlayan nokta, çok basit bir kuralın tekrarlanarak uygulanışıyla bu denli karmaşık gözüken sistemlerin üretilebilmesinin veya açıklanabilmesinin mümkün olduğudur. Her canlı varlığın her bir hücresindeki DNA'da saklanan bilginin, o bireyin nasıl inşa edildiğini tanımlayan bir "taslak" içerdiğine dair genel bir kanı mevcuttur. Ne var ki bu aslında zayıf bir benzetmedir. Gerçek bir taslak, canlının sisteminin içindeki her şeyi ve bunların nasıl bir araya geldiğini detaylı biçimde tasvir eden bir çizim manasına geleceğinden, çok karışık olacaktır. Bir kek tarifi daha iyi bir benzetme teşkil eder. Tarif (pişmiş kekteki her kuru üzüm tanesinin kesin konumu bir yana) kekin son halinin nasıl görüneceğini söylemez. Onun yerine "Şu malzemeleri alın, güzelce karıştırın ve şu kadar dakika boyunca şu sıcaklıkta pişirin" der.



Şekil 3.6a *Kaos oyunuyla Sierpinski Contasının oluşturulması. Oyundaki ilk altı adım.*



Şekil 3.6b *Oyunun 100, 500, 1000 ve 10.000'inci adımlarından sonraki halleri.*



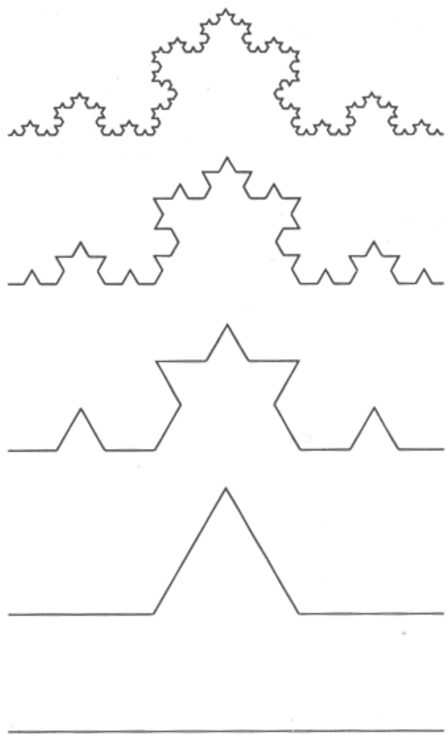
Şekil 3.7 *Kaos oyununda yapılan bir değişiklik eğrelti otuna benzer bir örüntü meydana getirir.*

Böyle bir tarif, kaos oyunundaki bir adıma benzer. Gelişip bir insanı, bir çam ağacını veya diğer herhangi bir canlıyı oluşturacak olan tek bir hücrede bulunan DNA'nın zenginliğinde dahi, canlının son erişkin biçiminin içereceği tüm karmaşık yapılara dair nasıl hakiki bir taslak saklanabildiğini kavramak zordur. Diğer tarafta, "n adım boyunca her adımda boyutunu ikiye katla, sonra ikiye bölün ve aynı şeyi her dal için tekrarla" gibi basit talimatların o DNA'da nasıl saklanabileceğini kavramak çok daha kolaydır. Kaos oyununda yer verilecek biraz daha çetrefilli talimatlar iterasyon vasıtasıyla eğrelti otu gibi karmaşık yapılar meydana getirir. Eğrelti otu için bir çekici bulunuyorsa, sözünü ettiğimiz basit kural türünü temel alarak, bazı bitkilerin büyüyüp eğrelti otu haline gelmesi hiç de şaşırtıcı olmayacaktır. Kaldı ki tek bir zar nasıl Sierpinski Contasını oluşturmaya programlanmış değilse bu bitkilerin de o şekle girmeye programlanmış olma zorunluluğu yoktur. Dünyanın karmaşasına sebep olan, rastlantısallıkla beraber basit bir iterasyon kuralı veya kurallarıdır.

Karmaşık dünyamızın doğasına daha yakından göz atmadan önce fraktaller ve çekiciler hakkında hâlâ bahsedilmeye değer birkaç şey daha var. Hiç şüphesiz merak ettiğiniz, bir kesirli boyutun nasıl ölçüldüğü konusu da bunlardan biri. İşimizi kolaylaştırmak amacıyla detaylı olarak bahsedeceğimiz, on dokuzuncu yüzyıl sonları ve yirminci yüzyıl başlarındaki son matematik canavarı olan Koch Eğrisini ele alalım. İlginç olması bir yana, Koch Eğrisi 1960'larda Mandelbrot'nun fraktallere olan ilgisini körüklemeye yardımcı olmasından ve değinmiş olduğumuz bir adamın, Lewis Fry Richardson'un hayatına mecazi anlamda teğet geçmesinden dolayı hikâyemizde önemli bir yer tutar. Koch Eğrisiyle ilgili sıra dışı şeylerden biri, onun gerçekten de bir eğri olmasına rağmen herhangi bir şeye teğet olarak temas etmesinin yalnızca mecazi anlamda mümkün olmasıdır. Bu, Koch Eğrisinin hiçbir teğetinin olmamasından ve günlük dildeki anlamıyla, tamamen köşelerden oluşmasından kaynaklanır.

İsveçli matematikçi Helge von Koch (1870-1924) bu eğriyi keşfederek (ya da icat ederek) 1904'te yayımladığı bir makaleyle dünyaya tanıttı. Koch Eğrisinin inşa edilişini kafanızda canlandırmak zor değildir. Düz bir çizgiyle başlayın ve onu üç eşit parçaya bölün. Çizginin ortasındaki üçte birlik parçanın üzerinde bir eşkenar üçgen (bu sefer gerçekten eşkenar olmak zorunda) oluşturduktan sonra bu üçgenin tabanını silin ve bu işlemi sonsuz bir iterasyonla tekrarlamaya devam edin. Böylelikle tamamen sonsuz küçüklükte V-biçimli köşelerden oluşan Koch Eğrisini meydana getirmiş olacaksınız. Koch Eğrisi, orijinal düz çizgiyle aynı uç noktaları paylaşır ve yüksekliği orijinal çizgiye çok yakın bir mesafededir. Tüm bunlara rağmen aynı zamanda sonsuz uzundur.

İşlemin içeriğinde küçük değişiklikler de yapabilirsiniz. Eğriyi oluşturma aşamasında –elbette ki aynı boyuttaki– üç orijinal üreteci alıp eşkenar bir üçgenin kenarlarına yerleştirirseniz altı-uçlu Davut Yıldızını meydana getirebilirsiniz. Birkaç iterasyon sonrasında karşınıza çıkan eğrinin pürüzlü iskeleti, bir kar tanesininkini andırdığından bu yapı kimi zaman Koch Kar Tanesi olarak adlandırılır. Ne var ki iterasyonlar



Şekil 3.8 *Koch Eğrisi. İngiltere veya Norveç'teki gibi tırtıllı bir kıyı şeridi ile bu eğri aşağı yukarı aynı fraktal yapıya sahiptir.*

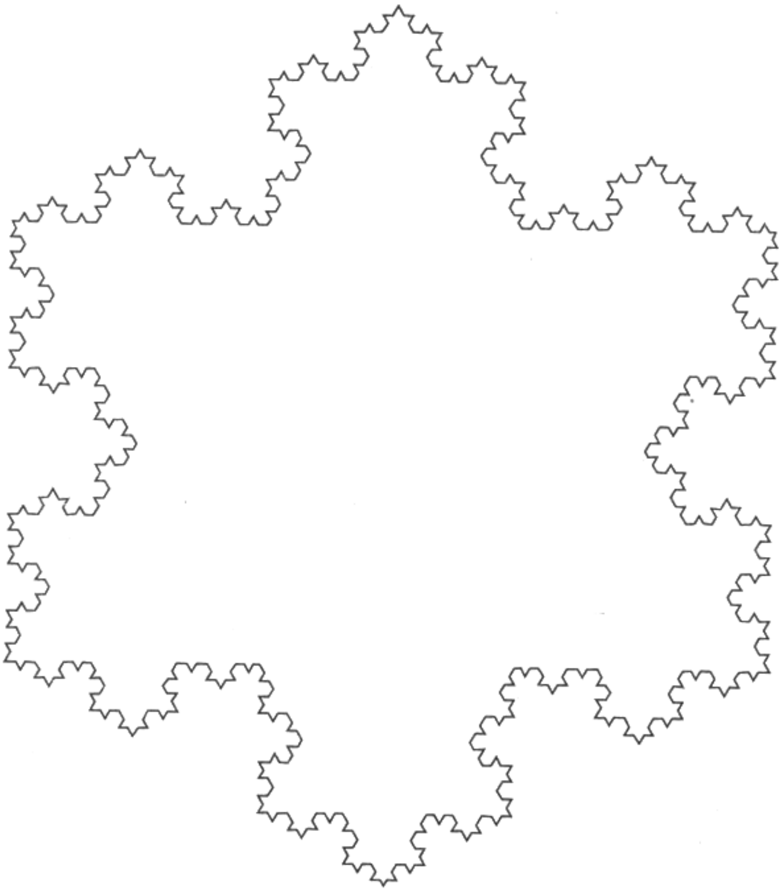
ilerledikçe kırışık, eğri, tırtıllı bir kıyı şeridine benzemeye başlar ve böylece bu özel fraktalin son sınır durumuna, diğer bir deyişle Koch Adasına erişilmiş olur.

Koch Adası, orijinal Davut Yıldızının üreticisinin uç noktalarının dokunduğu bir çember tarafından tamamen çevrili olmasına rağmen, sonsuz uzunlukta bir "kıyı şeridine" sahiptir.

Peki gerçek kıyı şeritleri fraktal midir? Koch Adasının gerçek bir adaya olan benzerliği yalnızca bir benzetmeden mi ibarettir? Mandelbrot'nun fraktalleri araştırmasının fitilini ateşleyen aslında bu çeşit sorulardı ve onun söylediğine göre,[11] Richardson'un İspanya ile Portekiz ve Belçika ile Hollanda arasındaki sınırların uzunluğunun nasıl hesaplanacağı üzerinde kafa patlattığı, pek duyulmamış bir makalesini okumasıyla tetik çekilmişti. Farklı kaynaklardan aynı sınır için alıntı yapılmış uzunluklardaki yüzde 20'lik bir fark Richardson'un gözüne çarpmıştı. Bu farkın ortaya çıkmasının sebebi, böyle

---

11 *Chaos* [*Kaos*] adlı kitapta James Gleick tarafından alıntılanmıştır.



Şekil 3.9 *Koch Kar Tanesi.*

kıvrımlı bir çizginin ölçtüğünüz uzunluğunun onu ölçerken kullandığınız ölçeğe bağlı olmasıdır. Bu sınırlar boyunca düz bölümlerin de bulunması mümkün olsa da çoğu zaman bunlar nehir ve sıradağlar gibi doğal yer şekillerini izler.

Böyle bir sınırın ölçülmesi, arazi ölçüm aletleri ve tüm alelade yer ölçüm aygıtları vasıtasıyla, ölçüm noktalarının yüzer metre aralıklarla yerleştirilip kırsal alan boyunca zikzaklar çizerek uzanan 100 metrelik düz çizgilerin ölçülmesi sayesinde gerçekleştirilebilir. Sınırı adımlarınızla ölçmek istediğinizdeyse, bu ölçüm noktaları arasındaki bazı kıvrımları takip edeceğiniz için sınırın uzunluğuna yönelik daha farklı ve büyük bir değer elde edersiniz. Devir sayısını kaydetmeye yarayan sayaçlı bir tekerleği sınır boyunca itekleyerek ölçüm yaptığınızda, adım atarken atlamış olduğunuz küçük kıvrımları didiklemek zorunda kalacağınızdan daha büyük bir değere ulaşırsınız.

Çok uzun bir ip alıp sınır boyunca özenle yerleştirdiğinizdeyse daha da yüksek bir değer karşınıza çıkar vs. Burada anlatmak istenilen, sınırın tüm ölçeklerde (en azından, atomların düzeyine dek) prensipte düzensiz olabileceğidir. Diğer bir deyişle, çalıştığınız ölçek küçüldükçe daha fazla kıvrımla karşılaşırsınız ve sonuç olarak hesapladığınız sınırın boyu da daha uzun gözükür. Mandelbrot, 1967'de *Science* dergisinde yayımlanan "How Long is the Coast of Britain?" [İngiltere Kıyıları Ne Kadar Uzundur?] başlıklı makalesinde bu fikirleri ayrıntısıyla inceliyordu. Bir adanın kıyısına bu tartışmada yer vermek, kıyının özünde doğal olması ve insan eliyle çizilmiş bir sınırda görülebilecek (ABD'nin çoğu eyaletini ayıran sınırlardaki gibi) uzun düz çizgiler bulundurmaması sebebiyle daha uygundur. Mandelbrot'nun sorusunun –makalede ayrıntılı olarak verilen– cevabı şuydu: Sonuç, kıyının ölçümünü hangi ölçekte yaptığınıza bağlıdır ve yeterince hassas ölçeklere indiğinizde, ölçtüğünüz uzunluk gittikçe sonsuza yaklaşır. (Sonsuza sadece "yaklaşır"; çünkü atomların ölçeğine indiğinizde işler değişir). İngiltere'nin kıyı şeridi tam olarak Mandelbrot'nun ileride fraktal olarak adlandıracağı yapıya sahip olmasa da, onun 1 ile 2 arasında bir ara boyutu olan bir fraktale benzediği sonucu karşımıza çıkar.

Peki fraktal boyutu nasıl ölçeriz? Koch Eğrisi bu sorunun cevabına yönelik bir ipucu sağlar. Kendine-benzer Koch Eğrisinin dört bölümünden herhangi birini alıp 3 kat büyüttüğünüzde (üç ile "ölçekleme" yaptığınızda) orijinal Koch Eğrisine özdeş bir eğri elde edersiniz. Ne var ki bir şeyin kendine benzer olması, onun mutlaka fraktal olacağı anlamına gelmez. Sıradan bir küp de kendine-benzerdir. Küpün içerisinden kesip çıkarttığınız küçük bir küpü uygun çarpanla ölçeklediğinizde bu küp tıpkı orijinal küpe benzeyecektir. Kaldı ki bu *her* küçük küp için geçerli olacaktır. Kendine-benzerlik, küp gibi çoğu sıradan cisim için her ölçekte işlerken, fraktaller için sadece belirli ölçeklerde işler. Koch Eğrisi için orijinal eğrinin tam olarak dörtte birini (hem de öylesine dörtte birlik bir kısmını değil) almak *zorundasınız* ki aldığınız kısmı 3 ile ölçekleyerek orijinal eğriyi yeniden üretebilesiniz. Ayrımı belirginleştirmek adına, sıradan birkaç şey seçip aynı 3 çarpanıyla ölçekleyelim. Düz bir çizgiyi üç eşit parçaya bölüp bunlardan birini 3 çarpanıyla ölçeklerseniz ilk çizgiye özdeş bir çizgi elde edersiniz. Yaptığımız ölçekleme ile uzunluğun azaltılma oranı aynıdır; 3'e böler, 3'le ölçekleme yaparız. Dolayısıyla çizginin boyutu 1'dir. Bir kareyi alıp her kenarını 3'e böldüğünüzde dokuz küçük kareden oluşan bir örgü ortaya çıkar. Dolayısıyla, ilk karenin özdeşini oluşturmak için orijinal karenin dokuzda birini aldıktan sonra 3'le ölçeklemeniz gerekir. 9'a bölüp 3'le ölçekleme yaparız. 9, 3^2'ye eşit olduğundan bir karenin boyutu 2'dir. Bir küpün her kenarını üçe böldüğünüzdeyse, her biri 3 çarpanıyla ölçeklendiğinde orijinal küpün aynısı gibi gözüken 27 adet küçük küp elde edersiniz. 27, 3^3'e eşit olduğundan, bir küpün boyutu da 3'tür. 27'ye bölüp, 3'le ölçekleme yaparız.

Şimdi, Koch Eğrisine tekrar bakın. Bu kez, uzunluğu 4'e böldükten sonra 3 çarpanıyla ölçekleme yapıyoruz. 3^1'in 3 olduğunu, 3^2'nin 9 olduğunu biliyoruz; ama 3'ün kaçıncı kuvveti 4'e eşittir? $3^n=4$ ise *n* kaçtır? Cevap, bir hesap makinesiyle (dört ondalık haneyle) 1,2619 olarak basitçe bulunabilir. Diğer bir deyişle, Koch Eğrisinin boyutu 1,2619'dur ve beklenildiği gibi 1 ile 2 arasındadır; ancak bir düzlemdense daha çok bir çizgi gibidir. Diğer fraktallerin, hatta aşağı yukarı fraktal olan şeylerin boyutlarını hesaplamak için de aynı mantık yürütülebilir. Örneğin İngiltere'nin kıyısının boyutu kabaca 1,3'tür ve bu da onun bir çizgiye, Koch Eğrisinin olduğundan biraz daha uzak olduğunu söyler.[12]

Fraktaller başlı başına büyüleyicidir. Mandelbrot'yu üne kavuşturan şey de, basit bir matematiksel ifadenin iterasyonu sonucunda fraktal yapıya sahip olduğu ortaya çıkan ve onun kendi adını taşıyan bir kümeyi keşfetmesiydi. Bunun, konu

[12] Fraktal boyut ölçmeye yönelik birbirinden çok az farkı olan ve çok az farklılıkta "cevaplar" veren yöntemler bulunur. Dolayısıyla başka bir yerde bu değere de çok az farklı bir haliyle rastlayabilirsiniz. Yine de burada ayrıntılara girmek istemiyoruz. Bırakalım da bununla matematikçiler ilgilensin. Bizim için önem taşıyan şey, fraktal boyutları ölçmeye dair en azından bir tane apaçık yöntemin bulunduğudur.

almış olduğumuz küme ve fraktallerden farkı şuydu: İfade, matematikçilerin karmaşık sayılar olarak adlandırdığı, -1'in karekökünü içeren sayılar barındırıyordu. Karmaşık sayılarla ilgili kilit nokta, sıradan sayılar bir-boyutluyken, onların bir anlamda iki-boyutlu olmalarıdır. Örneğin bir noktanın, bir çizgi üzerindeki konumunu belirlemek için tüm ihtiyacınız olan şey sıradan tek bir sayıdır. Bir noktanın karmaşık düzlem adı verilen bir düzlem üzerindeki konumunu (düzlemin her iki kenarına olan uzaklığı vasıtasıyla) belirlemek içinse, en az tek bir karmaşık sayıya ihtiyacınız vardır. Bir karmaşık sayı iki adet bilgi içerir. Mandelbrot Kümesini üreten iterasyonda, *Z*'nin değişken, *C*'ninse sabit bir karmaşık sayı olduğu (Z^2+C) ifadesi yer alır. İterasyon işlemini her zamanki yolla uygularız. Z için seçtiğimiz bir değeri ifadeye yerleştirdikten sonra, hesaplamadan çıkan sonucu bir sonraki iterasyon adımında Z'nin değeri olarak belirleriz. Z'nin değerlerinin karmaşık düzlem üzerindeki yerlerinin belirlenmesi sonucunda fraktal örüntü ortaya çıkar. Lojistik denkleminin iterasyonu gibi bunun da çok basit (ancak doğrusal olmayan) bir süreç olduğuna ikna olmanız için karmaşık sayılar hakkında hiçbir şey bilmenize gerek yoktur. Buna rağmen ortaya çıkan fraktal, insanoğlu tarafından şimdiye kadar incelenmiş muhtemelen en karmaşık varlıktır. Karmaşık olması bir yana, güzelliği nedeniyle, büyütülerek sergilendiği posterlerle ölümsüzleştirilmiş ve sayısız kitaba konu olmuştur. Ne var ki bunları incelemeye devam etmek, bizi, bu kitabın geri kalan kısmında gitmek istediğimiz yönün tam tersine (dışarıdaki canlıların dünyasına değil de, matematik dünyasının içine) yönlendirir. Mandelbrot Kümesi hakkında bir kez daha vurgulamak istediğimiz tek şey, bu olağanüstü karmaşık cismin, gerçekten de çok basit bir ifadeden iterasyon vasıtasıyla üretilmiş olduğudur. Bu açıdan bakıldığında insanoğlu tarafından incelenmiş şimdiye kadarki en basit şeylerden biridir. (Ancak, ileride göreceğimiz gibi, bu açıdan bakıldığında her şey öyledir.)

Burada irdelediğimiz kilit soru, karmaşanın basitlikten nasıl meydana geldiğidir. Bu ve kaos ile fraktaller arasındaki bağlantı, eski dostumuz lojistik denkleme dönüp onun etkilerini, daha önce bahsettiğimiz bir diğer karmaşa katmanını ortaya koyan topoloji bağlamında yorumladığımızda açıkça görülür. Lojistik denklemin (ve şimdiye dek bahsettiğimiz benzer türdeki iterasyon işlemlerinin) yaptığı, bir sayı kümesini başka bir sayı kümesine dönüştürmektir. Orijinal sayıları bir düzlem üzerindeki, bir kürenin yüzeyindeki veya diğer herhangi bir yüzeydeki noktalar olduğunu farz edersek bunların her biri, düzlemin başka bir yerindeki veya başka bir düzlemdeki, hatta diğer herhangi bir yüzeydeki noktalara dönüştürülebilir. Bu işlem türüne her ne kadar aşina olsak da ne olup bittiği hakkında nadiren kafa yorduğumuz bilinen bir gerçektir. Bu işleme eşleştirme adı verilir. Bir şehirde yönümüzü bulmak ya da coğrafi inceleme yapmak için kullandığımız harita çeşitlerinde gerçek dünyadaki bütün noktalar kopya edilmiş değildir. Diğer yandan bir sokak planı, aslında şehrin sokaklarının güvenilir ve bir kâğıt parçasına sığan minyatür bir kopyasıdır. Bir yerküre atlası prensipte (hemen hemen) küresel olan dünyanın hiçbir çarpıklık içermeyen güvenilir bir haritası olarak kullanılabilir. Oysa bir harita, güvenilir bir kopya olmasına rağmen aynı zamanda çarpıklık *da* içerebilir. Londra Metrosu haritası buna verilebilecek güzel bir örnektir. Her durağı temsil eden noktalar ve tüm tren hatlarını temsil eden çizgiler bulunur ve haritada bu çizgiler ile noktalar arasındaki ilişkinin temeli muhafaza edilse de daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla harita çarpıtılmıştır.

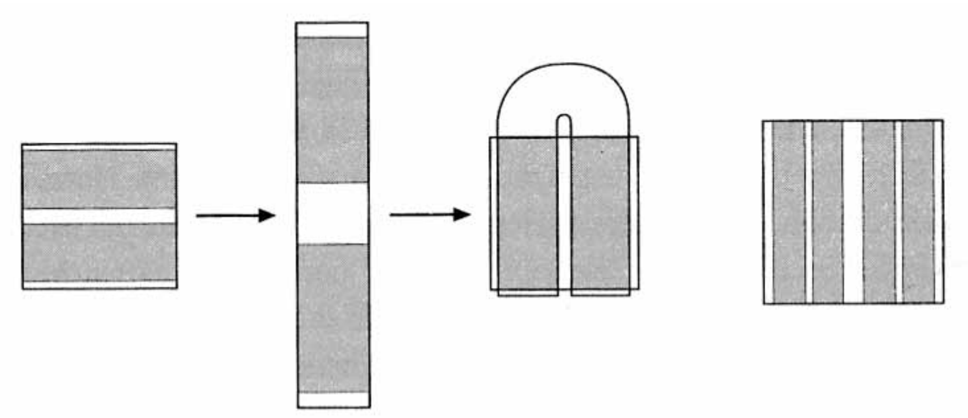
Metro haritasında yapılan çarpıtmalar bir ölçüde tercih meselesidir. Londra Metrosunun, hatlardaki tüm kıvrımları temsil eden çok daha güvenilir kopyalarını çıkartabilirsiniz. Oysaki düz bir kâğıt üzerine çizilecek bir dünya haritası çarpıtılmak *zorundadır;* çünkü yaptığınız şey bir kürenin yüzeyini bir düzlem üzerinde temsil etmeye çalışmaktır. Bu yüzden, (bu sorunu çözmede kullanılan iki farklı yöntem olan) bilindik Mercator projeksiyonu ve ünlü Peters projeksiyonundaki kıtaların şekilleri ne birbirleriyle ne de dünyanın yüzeyindeki kıtaların şekilleriyle tamı tamına aynıdır. Yine de, bunların her ikisinde de, dünyanın yüzeyindeki noktaların her biri, harita üzerinde tek bir nokta aracılığıyla temsil edilebilir. Mercator projeksiyonu ve Peters projeksiyonu aynı zamanda birbirlerinin de birer haritalarıdır. İkisi de doğaları gereği birbirinden "üstün" değildir.

Lojistik denklemin tarif ettiği işlem de bir eşleştirmedir. Düz bir çizgiyi tanımlayan bir sayı kümesine denklemin nasıl etki ettiğine bakarak bunu görebiliriz. Denklemin, aşağıdaki dönüşümü kullanarak *x*'in bir değerini yeni bir değere dönüştürdüğünü hatırlayınız:

x(sonraki) = Bx(1 – x)

Yeniden normalleştirme sayesinde *x*'in sadece 0 ile 1 arasındaki başlangıç değerlerini dikkate almamız yeterlidir. Bu başlangıç değerleri düz bir çizgiyi temsil edebilir. Dilerseniz bir metrelik bir çubuk hayal edebilirsiniz. İşimizi zorlaştırmamak adına, B için bir tamsayı olan 3 değerini seçip çizginin denklem tarafından nasıl dönüştürüldüğüne –diğer bir deyişle nasıl farklı bir noktalar düzenlemesine eşleştirildiğine– bakalım. Eşleştirmenin, orijinal çizginin onda birlik kısmı tarafından ayrılan noktalarda nasıl işlediğine bakarak olup biteni görebiliriz. *x* = 0 noktası açık şekilde 0 noktasıyla eşleşir. *x*'in 0,1 değeri –diğer bir deyişle çizginin bir ucundan onda birlik mesafe kadar içerisi– için, *x*(sıradaki) 3x0,1x0,9 veya 0,27 değerini alır. Dolayısıyla *x* = 0,1 noktası, *x* = 0,27 noktasıyla eşleşir. Benzer şekilde *x* = 0,2 noktası 0,48 noktasıyla, 0,3 noktası 0,63'le, 0,4 noktası 0,72'yle, 0,5 de 0,75'le eşleşir. Çizginin 0'dan 0,5'e kadarki bu yarısı şimdi uzamış ve 0'dan 0,75'e dek uzanan düz bir çizgi haline gelmiş oldu. Bu, sonsuzluğun başka bir tuhaf yönünü ortaya koyar: Her iki çizgide sonsuz sayıda nokta ve bu iki çizgideki noktalar arasında 1'e 1'lik bir bağıntı olmasına rağmen, çizgilerden biri diğerinin bir buçuk katıdır.

Siz de çabucak doğrulayacaksınızdır ki 0,5 ile 1 arasında aynı şey zıt yönde gerçekleşir. 0,6 noktası 0,72'yle, 0,7 noktası 0,63'le, 0,8 noktası 0,48'le, 0,9 noktası 0,27'yle eşleşir. Ayrıca (1-1) 0'a eşit olduğundan *x* = 1 noktası da 0 noktasıyla eşleşir. Çizginin bu yarısı yalnızca uzamış olmakla kalmadı ve aynı zamanda ters çevrilip çizginin ilk yarısının eşleştirmesi üzerine yatırılmış oldu. Çizgi topolojik bir dönüşüme uğrayarak, uzama ve katlanmaya maruz kaldı. Dolayısıyla çizgi şimdi yüzde 50



Şekil 3.10 *Fırıncı Dönüşümüyle üretilen, Smale'ın At Nalı. Bu basit uzatma ve katlama işlemini sonsuz defa tekrar etmek, katmanları Cantor Kümesindeki noktalar gibi yerleşmiş çok-katmanlı bir yapı meydana getirir.*

daha uzun olmasına karşın katlanma sayesinde orijinal çizginin uzunluğunun yüzde 75'ine sığmış oldu. Tıpkı $y = x^2$ gibi bir cebirsel denklemin, kâğıt üzerinde bir çizgi veya uzay içerisinde bir güzergâh –söz konusu durumda bir parabol– vasıtasıyla grafiksel olarak temsil edilebildiğinin kavrayışı gibi, cebir ile topoloji arasındaki bağlantı da temel bir kavrayıştır. Yine de ilgilendiğimiz topolojik dönüşümlerin gerçek uzayda değil, faz uzayında gerçekleştiğini akıldan çıkarmamamız gerekir.

Soyut matematiksel çizgiler yerine fiziksel bağlamda düşündüğünüzde lojistik denklem tarafından tanımlanan uzama ve katlanma işlemi, orijinal bir silindirden at nalı gibi bir şekil meydana getirir. Şeklin ucundaki büküm gerçek bir at nalındaki gibi yumuşak, yuvarlanmış bir kavis değil de 180 derecelik keskin bir dönemeç olmasına rağmen, kimi zaman buna At Nalı Dönüşümü denir. Peki neden At Nalı Dönüşümüyle yetinelim ki? Basit yasalardan karmaşık yapılar oluşturmanın yolunun yinelemeden geçtiğini biliyoruz. Dolayısıyla bütün işleme iterasyon uygulayın. At nalını aynı yöntemle dönüştürün, daha sonra dönüştürülmüş at nalını da dönüştürün ve sonsuza dek bunu tekrarlayın. Bu işlem bir fırıncının hamur yoğurmasına az da olsa benzer. Fırıncı hamuru yayar, tekrar üstüne katlar, düzleştirinceye kadar döver, yayar, tekrar katlar ve bu döngüyü sürdürür. Dolayısıyla bu işleme Fırıncı Dönüşümü de denir. Hangi ismi tercih ederseniz edin, Robert May gibileri 1970'li yıllarda kaosa giden periyot katlama rotası araştırmalarına koyulduğunda, At Nalı Dönüşümünün topoloji bağlamındaki özellikleri halihazırda araştırılmıştı. Bu, kaosa yönelik çalışmaların lehine bir gelişmeydi. At Nalı Dönüşümünü, sırf özündeki topolojinin cazibesine kapılıp araştıran kişi daha önce de sözünü ettiğimiz –Robert Yorke'la olan irtibatı sayesinde kaosla yakından tanışan– parlak teorisyen Stephen Smale'dı. İşin matematiğiyle cebelleşmemize gerek yok; çünkü Smale zaten bunu bizim için yaptı. Yine de şunu söylememiz gerekir: At Nalı Dönüşümünü sonsuza dek yürüttüğünüzde faz uzayında meydana gelenlerin fiziksel görüntüsü matematiğin tüm ağırlığıyla desteklenmiştir ve ne olup bittiğine dair gerçek bir kavrayış sağlar.

Şimdi orijinal çizgiyi faz uzayındaki bir çekici olarak hayal edin ve At Nalı Dönüşümü'nün tekrarlanarak uygulanmasıyla ona ne olduğunu gözünüzde canlandırmaya çalışın. Çizginin uzunluğu her aşamada artar; ancak kendi üzerine katlandığı için "yatay olarak" daha az yer kaplar. İlk aşamanın ardından elinizde tek büküme sahip üst üste iki çizgi vardır (ancak çizgilerin eni olmadığından bunlar dikeyde yer kaplamazlar). Bir sonraki aşamada üç bükümlü dört katman bulunur. Sıradaki aşamadaysa yedi bükümlü sekiz katman vs. Katman sayısı her seferinde iki katına çıkarken, büküm sayısıysa bir önceki büküm sayısının 2 katının 1 fazlasına eşittir. En sonunda elinizde, sonsuz katmandan oluşan, sonsuz kıvrımlı (bu kıvrımlar kendine özgü bir biçimde, iç içe geçmiş bükümlerin oluşturduğu kendine benzer bir küme halinde düzenlenmiştir) ancak ne dikey ne de yatay doğrultuda hiç yer kaplamayan bir eğri kalır. Bu sonsuz katmanlı yapı yığınının dikey doğrultudaki bir kesiti alındığında noktaların, Cantor Kümesindeki noktalarınkine benzer bir dağılıma sahip olduğunu görürsünüz. Peki bu katmanların içindeki yan yana yerleşmiş noktalar nereden geldi? Uzama ve katlanma işleminin tekrarlanarak gerçekleşmesinden dolayı, orijinal çizgide birbirine yakın başlamış olan iki nokta bu kümede son eğri üzerinde birbirine uzak düşebilirken, orijinal çizginin neredeyse zıt uçlarında bulunan iki nokta son aşamada birbirlerine çok yakın düşebilir. Bir sistemin hali orijinal çizginin üzerinde tek bir doğrultuda, sırayla her noktadan geçerek düzgünce ilerliyorsa, Cantor Kümesindeki noktaların arasında da rastlantısal biçimde oradan oraya sıçrıyormuş gibi gözükür. İşte bu, periyot katlama vasıtasıyla üretilmiş olan kaosun başlangıcıyla ilişkili topolojidir.

Katmer yemeğini andıran bu sonsuz katmanlamaya Lorenz çekicisinde de rastlanır. Yukarıda da gösterildiği üzere, Lorenz çekicisini faz uzayında temsil eden çizginin birçok sefer (hatta sonsuz defa) kendi üzerinden geçtiği görülür. Faz uzayında aslında gerçekleşen şudur: Çekici; bu kendi üzerinden geçişlerin her birinde, faz uzayının başka bir katmanına, diğer bir deyişle başka bir düzleme "seyahat etmektedir." Bunu gözünüzde canlandırmanın bir yolu, sonsuz sayıdaki sonsuz ince sayfalardan oluşan bir kitap düşünmek ve bu kitabı ortasından açarak düz bir hale getirmektir. Ardından Lorenz çekicisinin bir lobu soldaki sayfaya, diğer lobuysa sağdakine çizilir. Böylelikle kitabın her sayfasında, ilgili lobun çevresinde bir halka veya halkalar silsilesi oluşur; ancak faz uzayındaki çekicinin güzergâhı kitabın ortasından arka tarafına her geçişinde başka bir sayfaya ilerler. Sonsuz sayıda geçiş yeri olmasına karşın çekiciyi temsil eden çizgi asla kendisini kesmez.

Her iki durumda da (At Nalı çekicisi ve Lorenz çekicisinde) sonsuz sayıda faz uzayı katmanı, sonlu bir faz uzayı hacmiyle sınırlıdır. İki çekici de fraktaldir ve tuhaf çekicidir. Üstelik bu sadece başlangıçtır; faz uzayında düz bir çizgi olarak yola koyulmayan –faz uzayında bir torusun etrafına sarmalanmış bir çekici gibi– çekicilere aynı tür uzatma ve katlamayı uyguladığınızda, anlaşılması daha da güç ama yine basit bir kural kümesini temel alan bir fraktal kaos örüntüsü ile karşılaşırsınız. Dünyanın temelinde yatan basitliğin nasıl karmaşık yapılar ürettiği hakkında bilmemiz gereken tüm bilgiyi nihayet edinmiş olduk. Şimdi de bu anlayışı yaşamın ortaya çıkışına uyarlama hedefiyle karmaşa katmanlarında yukarı doğru ilerlemeye koyulabiliriz. Yolumuzun üzerinde hâlâ birkaç basamak daha olsa da iştahınızı kabartmak için, bütün bunların nasıl sadece genel anlamdaki yaşamla değil, aynı zamanda bilhassa insan yaşamıyla da ilişkili olabileceğine dair size bir ipucu verelim.

Koch Eğrisinin fraktal boyutunu ölçekleme yasasındaki kuvvet –veya üs– bağlamında nasıl açıkladığımızı hatırlayın. Bu tür ilişkiye kuvvet yasası adı verilir (3'ün 2'nci kuvveti 3^2, 3'ün 3'üncü kuvveti 3^3'tür vs). Biz de, eğrinin temel birimini oluşturan parçaların sayısı olan 4'ü elde etmek üzere 3'ün 1,2619'uncu kuvvetini almıştık. Bir cismin hacmi gibi basit bir şey de kuvvet yasasına tâbidir. Kenarları l uzunluğunda bir küpünüz varsa, hacim l'nin değeri ne olursa olsun l^3 ile doğru orantılıdır. Yarıçapı r olan bir küreniz varsa, hacim r'nin değeri ne olursa olsun r^3 ile doğru orantılıdır. Hacim veya ebat 3 üslü kuvvet yasasına[13] tâbidir. 1980'lerin ortalarında farklı ebatlardaki hayvanların metabolizma hızlarını inceleyen araştırmacılar bu hızların da bir kuvvet yasasına itaat ettiğini, ancak bu yasanın hayvan ebatları ölçeğinden bekleyebileceğiniz basit 3 üssü yasası olmadığının farkına vardıklarında şaşkına döndüler. Araştırmacılar sıçanlar, insanlar, köpekler ve atlar gibi çeşitli memelilerin metabolizma hızlarını, vücut kütleleriyle karşılaştırdılar. Bir hayvanın vücut kütlesi hacmiyle doğru orantılıdır ve tahmin edeceğiniz gibi kütle arttıkça metabolizma hızı da artar; çünkü besin yakıp enerji açığa çıkaran daha büyük bir vücut söz konusudur. Oysa kütle 3 üslü kuvvet yasasına göre artarken, metabolizma hızı 2,25 üslü kuvvet yasasını izleyerek ölçek değiştirir. Bu bakımdan hayvanlar, ebatları üç-boyutlu bir hacimdense, sanki bir hacimle iki-boyutlu bir yüzey arasındaki bir şey (özellikle de fazlasıyla buruşturulmuş bir fraktal yüzey) gibi ölçek değiştirmiyormuşçasına davranış gösterir. Bir matematikçi (an azından bir topoloji uzmanı) hiç zaman kaybetmeden bu kuvvet yasasının, söz konusu cisimlerin sonlu hacimler dahilinde yer alan buruşturulmuş fraktal yüzeyler olduğuna işaret ettiği yorumunda bulunacaktır.

Vücutlar konusuna daha detaylı olarak yaklaşacak olursak canlı sistemlerin fraktallere benzeyen birçok özellik daha içerdiğini görürüz. Örneğin damar ve arterlerin dallanış tarzının esas itibariyle fraktal olduğu ortaya çıkar. Damar ve arterler,

---

13 *Power law* –çn.

kanı vücudun dört bir yanına ulaştırıp geri getirir ve bu görevi gerçekleştirmesi için başka hiçbir şeye yer bırakmayacak kadar büyük bir alan kaplamasına gerek yoktur. Bahsettiğimiz şey, sıvı değişimi gerçekleştirmek üzere son derece karmaşık biçimde iç içe geçmiş damar ve arterlerin bulunduğu böbreklerde özellikle daha belirgindir. Böbrek tam anlamıyla sonlu ve üç-boyutlu bir cisimdir; ancak böbreğin içindeki damar ve arterler hakiki bir fraktalin sonsuz uzunluğuna yönelir.

Benzetme elbette ki uç noktalarda geçerliliğini yitirir. İnsan böbreğinin içindeki sistemler aslında sonsuz defa değil, sadece defalarca dallanırlar; aksi doğrultuda ilerlediğimizde de sonsuza kadar devam eden, süper-böbrekler içinde gömülü böbreklerle karşılaşmayız ve her sistemin kendine-yeter olduğunu görürüz. Buna rağmen çoğu canlı sistem ile fraktaller arasındaki benzerlik yalnızca bir benzetmeden ibaret olmanın ötesindedir. Örneğin akciğerler oldukça küçük bir hacimle sınırlı olmasına rağmen, onların iki-boyutlu yüzeyinde, sizi hayatta tutacak çabuklukta karbondioksit ve oksijen değişimine yetecek kadar geniş bir alanın nasıl bulunabildiğine açıklık getirir. Fraktale-yakın kendine-benzerlik, canlı organizma vücutları için yaygın bir özelliktir. Bu işleyişin etkin olduğu gerçeğine ilaveten hatırlayınız ki böyle bir sistemi meydana getirmek için kodlanması gereken DNA miktarı, gerçek anlamdaki bir taslakta saklı olması gereken, böbrek gibi karmaşık bir yapıya dair bilgi miktarıyla karşılaştırıldığında çok basit kalır. Evrim geçiren dünyanın doğasıyla ilgili sorular sorma yetisine sahip varlıkların, canlıları anlamasını oldukça güç kılan şey fraktallerin yapısının temelinde yatan kuralların basitliğidir.

Tıpkı bir periyotlu, sabit bir hızla su damlatan bir musluk gibi, ilginç hiçbir şeyin gerçekleşmediği çok basit sistemler bulunduğunu görmüş olduk. Diğer yandan esas itibarıyla rastlantısal iniş çıkışlar içeren, dolayısıyla bir düzenin olmadığı ve yapının ortadan kalktığı kaotik sistemler de mevcuttur. Bu ikisinin arasındaysa tayfın sıkıcı olan ucundan başlayıp giderek artan bir karmaşıklık düzeyi vardır; periyot-1 ile su damlatan bir musluktan sonra işler giderek ilginçleşir ve aniden kaos devreye girer. Dolayısıyla evrendeki en karmaşık ve en ilginç şeyler tam da kaosun sonunda, düzen ortadan kalkmadan hemen önce meydana gelir. Burada karşılaştıklarımız, garip ve egzotik ritimlerle damlayan musluklar (veya su sızdıran oluklar), muhteşem örüntülerle dönüp dolaşan girdaplar içinde girdaplar ve böbreğin sıra dışı karmaşıklığı veya insan beyninin defalarca katlanmış beyin zarının fraktale-yakın yüzeyiydi. Şimdiye dek düzene ve kaosa göz attık. Şimdiyse karmaşanın sahne aldığı kaosun eşiğini incelemenin vakti geldi.

4

Kaosun Eşiğinde

Klâsik termodinamik, bir anlamda zaman yokmuş gibi davranır. Bu başlık altında sistemler, onları bir durumdan diğerine geçirmesi sonsuz zaman alacak sonsuz küçüklükteki değişimler bağlamında açıklanır. Aynı zamanda klâsik termodinamik, bir sistemin içerisinde hiç enerji (özellikle de ısı) akışı yer almadığını da varsayar. Oysa ısı difüzyonu vasıtasıyla hidrojen sülfit gazından hidrojen gazının ayrıştırıldığı basit örnekte daha önce de gördüğümüz gibi, bir sistemin içinde enerji akışı cereyan ettiğinde hemen ilginç şeyler meydana gelmeye başlar. Cansız bir bedenin içerisinde kayda değer miktarda enerji akışı olmazken, vücudunuzun içerisinde gerçekleşen enerji akışı oldukça yüksek miktardadır. Aldığınız besinin metabolizmasından kaynaklanan kimyasal enerji, kaslarınız ve diğer bedensel aktivitelerinize güç sağlar ve en nihayetinde ısı olarak yitirilir. Enerji yitimi dengede olmayan termodinamiğin temel özelliklerinden biridir ve bir sistemin içerisindeki enerji akışını farklı bir yolla, kayıp bir süreç olarak tanımlamamızı sağlar. Bu sistemler aynı zamanda –on dokuzuncu yüzyılın öncü termodinamikçilerinin çok sevdikleri varsayımsal kapalı gaz kutusunun aksine– dünyanın tümünden yalıtılmış olmadığı için açık sistemler olarak bilinir. Poincaré yinelemeleri ve zamanın tersinirliği kapalı sistemlerde karşımıza çıkarken, açık sistemlerde tersinmezlik ve zaman okuyla karşılaşırız.

2. Bölümde gördüğümüz gibi, klâsik terminoloji bir çelişkiye dayanır. "Dinamik" terimi bize, amacının sistemlerin nasıl değiştiğini tanımlamak olduğunu söyler; öte yandan entropi gibi fikirlerse hiçbir şeyin meydana gelmediği, dengedeki sistemlerle ilişkili hesaplamalardan türetilmiştir. Denge halinde hiçbir şey gerçekleşmez. Bu yüzden bu durumun yapısal hiçbir ilgi çekiciliği yoktur. Oysaki denge durumuna doğru ilerlenen süreçte olup bitenler çok ilginç olabilir. Bir canlı ancak öldüğünde denge haline çok yaklaşmış olur. Bir şeyin ölmüş olduğu gerçeği, onun nasıl öldüğünün yanında hiç de ilgi çekici değildir. (Gizemli cinayetleri konu alan polisiye roman türünün başarısı da tamamen buna dayanır.)

İnsanlar kayıp süreçleri incelemeye başladıklarında, doğal olarak denge haline yakın sistemleri ve ısı difüzyonu gibi süreçleri incelemekle yola koyulmaları gerekiyordu. Sistemler denge haline yakın olduğunda, çevrelerindeki değişimlere genellikle doğrusal bir biçimde karşılık verir. Örneğin ısı difüzyonu süreci esnasında sıcaklık eğiminde ufak bir miktarda değişiklik yaparsanız sistem de doğrusal bir biçimde, ufak miktarda değişerek karşılık verir. Doğrusal termodinamiğe yönelik çalışmaların temeli 1930'lu yılların başında Brown Üniversitesinde çalışan (ardından 1933'te York'a taşınan) Norveçli kimyacı Lars Onsager (1903-1976) tarafından atıldı. Onsager'in, 1968'de layık görüldüğü Nobel Ödülü için yapılan atıfta da özel olarak değinilen en önemli katkısı, ters bağıntı olarak bilinen kavramı keşfetmesiydi. Ters bağıntılar bu tür sistemlerde bir simetri olduğunu söylüyordu. Isı difüzyonu örneğiyle açıklamak gerekirse bir sıcaklık eğimi, gazların karışımının yoğunluğunda nasıl eğim oluşturuyorsa, Onsager'in teorisine göre de bir yoğunluk eğiminin düzenlenip korunmasının da sonuç olarak bir ısı akışı meydana getirecek bir sıcaklık eğimine neden olması gerekiyordu. Bu, daha sonra yapılan deneyler tarafından onaylandı ve ters bağıntılar aynı zamanda termodinamiğin dördüncü yasası olarak da bilinir hale geldi.

Onsager; kayıp sistemlerde –en azından doğrusal kuralların uygulandığı (doğrusal rejimdeki) sistemlerde– yer alan tersinmez olguların araştırılması için gerekli araç gereçleri kimyacılara sağlamıştı. Bu araç gereçleri en etkili şekilde kullanan kişi, 1917'de Moskova'da dünyaya gelen Ilya Prigogine'ydi. 12 yaşındayken ailesiyle birlikte Belçika'ya göç eden Prigogine 1945'te Brüksel Üniversitesinde görev yapıyordu. Doğrusal rejimdeki kayıp bir sistemin (tıpkı denge halinde görüldüğü gibi) maksimum entropiye karşılık gelen ölüm hali yerine, entropinin mümkün olan en düşük hızla üretildiği ve kayıp faaliyetin minimum düzeyde seyrettiği bir hale yerleştiğini ortaya koyan, kitabın 1. Bölümünde de bahsedildiği gibi Prigogine'ydi. Bu, ısı difüzyonunda belirli bir sıcaklık eğimi için gazların yoğunluğunun eğiminin dengelendiği duruma karşılık gelir; ama Prigogine bunun genel olarak doğrusal termodinamikle açıklanan sistemler için geçerli olduğunu gösterdi. Şeyler, doğrusal rejimde istikrarlı bir halde varlıklarını sürdürürler. Örneğin bir insan, bütünlüğünü vücudundaki enerji akışı (ve besin) sayesinde yıllarca sürdürebilse de, hâlâ anlaşılamamış sebeplerden dolayı istikrarlı durum en nihayetinde ortadan kalkar. Öte yandan erişkin bir insanın istikrarlı hali, döllenmiş bir yumurtanın tek bir hücresinden yeni bir insanın (doğrusal olmayan bir süreç olduğu aşikâr olan) gelişmesi esnasında meydana gelen büyük değişimlerden şaşırtıcı derecede farklıdır. Bu konuya az sonra yeniden değineceğiz.

Sonraki yirmi yıl içerisinde, –ileride "Brüksel Okulu" olarak adlandırılacak olan– Brüksel'deki Prigogine ve meslektaşları, denge halinden uzak, dış ortamdaki küçük değişikliklerin sistemde büyük değişimlere yol açabileceği doğrusal olmayan rejimdeki sistemlerle ilgili termodinamiğe yönelik matematiksel bir tanım sağlama girişimi üzerinde yoğunlaştı. Eksiksiz bir teoriden çok uzak olmasından dolayı buna belki de –şimdi bile–devam etmekte olan bir çalışma olarak bakılmalıdır. Neyse ki önemli ve yaygın olarak kabul gören durumlar, basit fiziksel ve kimyasal sistemlerin davranışları bağlamında anlaşılabilir olduğundan ayrıntıya girmemize ya da bu çalışmanın etrafını saran tartışmaları dert edinmemize gerek yok. Yine de dikkate almamız gereken kilit bir nokta var: Bu tür sistemler, geri-bildirimin önem teşkil ettiği durumlarda doğrusal olmayan denklemler vasıtasıyla açıklanır.

Aynı esnada Prigogine, hem zamanın doğası hem de termodinamik ile zaman oku arasındaki ilişki hakkında da kendi fikirlerini geliştirmişti. İşte bu fikirleri sayesinde Prigogine muhtemelen en yaygın anlamda mesleki bilim camiasının dışında tanınır. Bizim de bu fikirlerden söz etmemiz bu yüzdendir. Prigogine'nin bu çalışmada çözmek üzere yola koyulduğu yap-boz, düzenin (bizim gibi şeylerin) kaostan nasıl doğmuş olabileceğiydi. Burada kaos ile ifade edilmek istenen belirlenimci kaos *değil*, aslında Antik Yunanların kast ettiği kaos olan, evrenin genç dönemindeki gazların düzgün dağılımıdır. Ne var ki Prigogine'nin çalışmasının, çoğu fizikçinin çıkmaz sokak olarak nitelendirdiği bu yönünü incelemeyeceğiz. Çoğu fizikçinin böyle düşünmesinin sebebi, evrende neden zamanın bir yönü olduğunun ve bilhassa (birazdan açıklayacağımız) bizim gibi düzenli sistemlerin, Büyük Patlamayla meydana gelen neredeyse eş dağılımlı düzensizlik halinden nasıl ortaya çıkmış olabileceğinin doğal bir yöntemle açıklanabiliyor oluşudur.

Doğrusal olmayan rejimdeki, dengeden uzak, açık sistemlerde gerçekleşebilecek ilginç şeylere yönelik bir anlayış geliştirmeye başlamak için, tanımlaması ilk olarak Fransız Henri Bénard tarafından 1900'de yapılan olguyu ele almak en doğrusudur. Daha sonra İngiliz fizikçi Lord Rayleigh tarafından da incelenmiş olduğundan buna Bénard Kararsızlığının yanı sıra Rayleigh-Bénard Kararsızlığı da denir. Ne olup bittiğini görmek adına izlenebilecek en etkili yöntem, dibinde ince bir silikon yağı tabakası bulunan düz bir tavanın kontrollü laboratuvar koşulları altında dikkatlice alttan ısıtılmasıdır. Yağ tabakasının yalnızca yaklaşık bir milimetre derinliğinde olması ve ısıtmanın, kabın düz tabanının her tarafında eş dağılımlı olması gerekir. Bu işlem sıradan bir mutfak ocağında bir sos tenceresi kullanılarak da yapılabilse de ince yağ tabakasını bu yöntemle ısıtmayı tavsiye etmeyiz. Onun yerine bir tencerede kıvamlı bir çorbayı yavaşça kaynama noktasına getirerek benzer şeylerin meydana geldiğine şahit olabilirsiniz. Gelgelelim birazdan açıklayacağımız deneydeki asıl amacımız, yağın kaotik ve dağınık bir şekilde kaynamasına neden olacak kadar ısıtılması değildir. Biz kaosun başlangıcından hemen önce ne olup bittiğiyle ilgileniyoruz. Bu olup bitenleri daha belirgin hale getirmek içinse berrak olan yağa çoğunlukla alüminyum tozu serpilir; ancak bunu çorba için yapmanızı kesinlikle önermiyoruz.

Meydana gelen elbette ki konvenksiyondur.[1] Tabakanın altında kalan sıcak sıvı genleşip seyrelerek üzerinde bulunan daha soğuk ve daha yoğun sıvının arasından yükselmeye çalışır. Isıtma eş dağılımlı olmadığı takdirde bir yap-boz ortaya çıkmaz; sıvı en sıcak olduğu yerden kolayca yükseldikten sonra başka bir yere çöker ve ardından tekrar o sıcak noktaya geri dönerek kendini tekrarlayan bir konveksiyon hücresi oluşturur. Sıvı eş dağılımlı biçimde ısıtıldığındaysa bu sürecin başlayabileceği özel bir yerden söz edilemez. Sıvının tabanı boyunca eş dağılımlı bir simetri vardır ve sıvı bir bütün olarak aynı anda yükselmek "ister." İlk etapta hiçbir şey gerçekleşmezken, daha sonra üst kısım soğuk tutulup sıcaklığın alttan aşamalı olarak artırılmasıyla (bu sayede sıcaklık eğimi dikleşir) kritik bir noktada simetri ortadan kalkar ve sıvının eş dağılımlı yüzeyi aniden bozularak altıgen biçimli ufak konveksiyon hücrelerinden oluşan bir örüntüye bürünür. Bu gerçekleşenlerin başlangıç noktası sıvının üstü ile altı arasındaki sıcaklık farkına (sıcaklık eğimine) göre değişir. Bahsettiğimiz yolla oluşan hücrelerin genişliğiyse yağın derinliğiyle doğru orantılı olarak artar veya azalır. Her hücre içerisinde sıcak sıvı merkezde yükselip kenarlara yönelir ve komşu hücreyle olan sınıra eriştiğinde alçalır. Sıvı yüzeyinin havayla temas halinde olması yüzey gerilimi etkilerinin önem kazanması manasına gelir. Bu etkiler, her hücrede sıvının merkezden çekilip ayrılarak yüzeyde dışa doğru hareket etmesine neden olur. Sonuç olarak da sıvı hücrenin merkezinde yükseliyor olmasına rağmen burası kenarlardan daha alçak kalır ve çukurlu bir gö-

[1] Sıvılarda ısı konveksiyonla, diğer bir deyişle ısınan maddenin hareketi vasıtasıyla yayılır –çn.

rüntü ortaya çıkar. Rayleigh'in incelediği durum bundan biraz daha farklı biçimde alttaki sıcak, üstteki soğuk olmak üzere iki levha ve bunlar tarafından kıstırılmış ince bir sıvı tabakasından oluşuyordu. Bu yöntem işin hem fiziğini hem de matematiğini çok daha basit kılar; yüzey gerilimini hesaba katma zorunluluğundan kurtulmanın yanı sıra, açığa çıkan davranış örüntüsü Rayleigh-Bénard Kararsızlığı ile belirlenimci kaosun başlangıcı arasında düzgün bir bağlantı kurar.

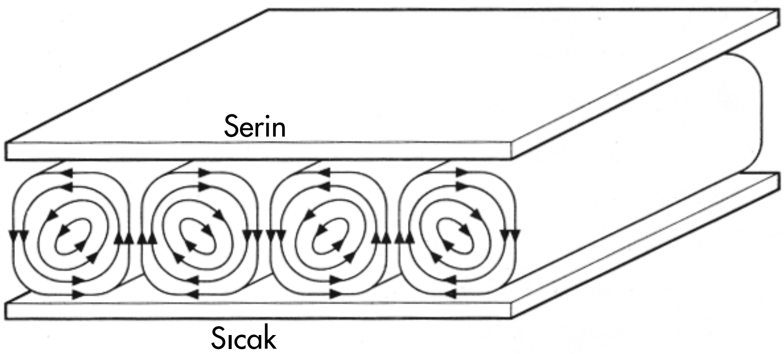
Bu basitleştirilmiş Bénard konveksiyonu versiyonunda, kaosa giden yoldaki aşamaların birkaçı görülebilir. Başlangıçta konveksiyon uzun sosisler biçiminde gerçekleşir ve böylelikle sıvının yüzeyi çizgili bir görüntü edinir. Bu sosisler kareye yakın kesitlere sahiptir ve konveksiyon, komşu ruloların [sosislerin] birinde saat yönünde gerçekleşiyorken diğerinde ters yönde gerçekleşir. Ne var ki sıvı içerisindeki belirli bir noktanın, saat yönündeki bir konvektif rulonun mu yoksa ters yöndeki bir konvektif rulonun mu parçası olacağını peşinen söylemek imkânsızdır. Kesin diziliş rastlantısal olarak belirlenir. Burada, sistemin tek bir halden bir çift hale geçtiği bir çatallanma söz konusudur. Sıcaklık eğiminin artmasıyla[2] bir diğer kritik noktada örüntü ansızın iki konvektif rulo kümesinin birbirlerine dik konumda eşzamanlı olarak çalıştığı iki-şekilli denilen bir biçime dönüşür. Bu, yukarıda olduğu gibi aşağı yukarı kare şeklindeki konvektif rulolardan oluşan ve kareli bir gömleğe benzeyen bir örüntü ortaya çıkmasına neden olur. Böylelikle sıvının bileşenlerinin muhtemel hal sayısı yine ikiye katlanarak 2'den 4'e çıkmış oldu. Bu, iş başındaki çatallanmaya dair bir diğer örnektir ve kaosa giden periyot katlama rotası konusunun bir çeşitlendirmesidir. (Üstelik Rayleigh'in bunların hiçbirinden haberi yoktu.) Bununla birlikte sıcaklık eğimi (veya Rayleigh Sayısı) yeteri kadar artırıldığında, içerisinde kısa ömürlü örüntülerin durmadan belirip yok olduğu ve tekrar şekillendiği, konveksiyonun türbülanslı biçimiyle karşı karşıya kalırsınız. Ne var ki en ilginç kararlı örüntüler tam

[2] Rayleigh Sayısı denilen parametrenin değerinin artmasıyla demek daha doğru olur. Bu sayı hem sıcaklık eğimine hem de sıvının özeliklerine bağlıdır.

da kaosun eşiğinde gerçekleşir. Bu, üstü açık bir tavada ince yağ tabakasının ısıtılması örneğinde, yüzey gerilimi sebebiyle ortaya çıkan, bal peteği düzeninde yerleşmiş altıgenler olarak tezahür eder. Açık bir sistem içerisinde enerjinin akması ve sonrasında yitirilmesi nedeniyle tüm bu olanlar dengeden uzakta gerçekleşir. Bu, düzenin evrendeki varoluşunun ve özellikle de yaşamın sırrıdır. Her ne zaman düzenin ve özellikle de yaşamın varoluşuyla karşılaşır ve dünyanın nasıl böyle bir hale geldiğini düşünürseniz, kendi kendinize "Bénard konveksiyonundaki altıgen hücreleri hatırladın mı? İşte bunlar aynı şeyler" diyebilirsiniz.

Bir sistemin, dengeden uzaktaki ilgi çekici bir halde tutulması onun ancak kayıp bir sistem halinde çevreye açık olmasıyla mümkündür. Diğer bir deyişle dış bir enerji kaynağının bulunması gerekir. Dünyadaki bu enerjinin kaynağı güneştir. Düzenin neden kaostan doğmuş olduğunu ve nasıl olup da evrende zamanın bir yönü olduğunu açıklığa kavuşturmak, güneşin neden parladığını anlamaktan geçer.

Tüm bunlar kütleçekim sayesinde olur. Kütleçekim çok tuhaf bir özelliğe sahiptir: Kütlesi olan herhangi bir cismin kütleçekimsel enerjisi negatiftir. Kelimenin tam anlamıyla sıfırdan az olan bu kütleçekimsel enerji, cismin kompaktlığı arttıkça sıfırdan giderek uzaklaşır. Böyle yalın bir ifade üzerinden bu gerçekliği kabullenmek güç olsa da olup bitenleri kavramak kütleçekimin iki farklı durumda ele alınması halinde



Şekil 4.1 *Rayleigh'in çalışmasını yürüttüğü Bénard konveksiyonu versiyonunda (basık bir İsviçre pastası gibi) kareye yakın kesitlere sahip konveksiyon ruloları oluş*ur.

kolaylaşır. Bunlardan ilkinde iki cisim birbirinden uzaklaştıkça aralarındaki kütleçekimsel kuvvetin de azaldığını görürüz. Newton'un ispatına göre bu azalma ters kare yasasıyla uyumlu olarak gerçekleşir. Bir cisimler kümesinde (bunlar atomlar, yıldızlar, beton yığınları veya Van Gogh tabloları olabilir) depolanan kütleçekimsel enerji miktarı, o cisimlerin arasındaki kuvvete bağlıdır. Bu durum yalnızca kütleçekim için geçerli değildir; bir lastik parçasını gerdiğinizde, onu daha da fazla germeniz için giderek daha kuvvetlice çekmek zorundasınızdır ve lastiğin içinde depolanan enerji, lastiği ne kadar kuvvetli çektiğinizle ilintilidir. Oysa birbirlerinin kütleçekim etkisi altında bulunan iki (veya daha fazla) cisim arasındaki mesafeyi "germeniz" için, cisimler birbirlerinden uzaklaştıkça giderek daha az çekmeniz yeterli olacaktır. Bir uyduyu dünyanın yörüngesine oturtmak için devasa bir itici rokete ihtiyaç olmasına karşın uydu yörüngeye yerleştiğinde, onu ay veya Mars'a göndermek için yalnızca küçük bir roketin yeterli olmasının da sebebi budur. Diğer yandan cisimler birbirinden sonsuz uzaklıkta olsaydı, onları birbirine bağlayan kütleçekimsel alanda depolanan toplam enerji sıfır olurdu. Bunun asıl nedeni kuvvetin, 1'in sonsuzun karesine bölümüyle doğru orantılı olmasıdır.

Şimdi, birbirlerinden sonsuz uzaklıkta olacak şekilde yayılmış bir parçacıklar kümesini (atomlar, tuğlalar veya her neyse) gözünüzün önüne getirin ve ufacık bir dürtmeyle, kütleçekim etkisi altında birlikte hareket etmeye başladıklarını farz edin. Bu esnada her bir parçacık kinetik enerji kazanır ve düştükçe giderek hızlanır. Tıpkı bir lastiğin iki ucuna bağlı iki çakıl taşının iki yana çekilip bırakılmasının ardından lastikte depolanan enerjinin hareket enerjisine (kinetik enerjiye) dönüşmesiyle taşların birbirine doğru hücum etmesinde olduğu gibi, birlikte düşen parçacıkların kinetik enerjisi de benzer şekilde kütleçekimsel alandan kaynaklanır. Oysa kütleçekimsel alan başlangıçta sıfır enerjiye sahipti; şimdiyse sıfırın altında enerjiye (negatif enerjiye) sahip. Parçacıklar bir yıldız oluşturmak için bir araya geldiği sırada, o yıldızla ilişkili kütleçekimsel alanda yüksek miktarda negatif enerji bulunur. Peki ne kadar? Çoğu kişiye olduğu gibi, cevap size de şaşırtıcı gelebilir.

Şimdi değineceğim anekdotu daha önce de kullanmıştım;[3] ama konuyu görselleştirmenin daha iyi bir yolu olmadığı gibi, bu kitabı okuyan herkesin önceki tüm kitaplarımı okumuş olmaları varsayımında bulunmam da budalaca olur. Hikâye, fizikçilerin kütleçekimin negatifliği olarak adlandırılabilecek şeyden haberdar olmalarına rağmen, çoğunun savaşla alakalı işlerle (özellikle de ABD'deki Manhattan Projesiyle) meşgul olduğu 1940'lara kadar uzanır. Amerika'da yaşayan ancak Rusya doğumlu olduğu için en gizli projelerde çalışmasına izin verilmeyen bir fizikçi olan George Gamow (1904-68) coşkulu bir karakterin yanı sıra geniş bir ilgi alanı yelpazesine sahipti. Evrenin Büyük Patlama kökenine ait ilk modelini geliştiren Gamow, Washington DC'deki ABD Deniz Kuvvetleri Bakanlığının Ordu Donatım Bürosunda danışmanlık görevi yaparak savaşa yönelik çabalara katkı verdi. Gamow'un buradaki görevlerinden biri Albert Einstein için hazırlanmış evrak dolu bir çantayı iki haftada bir Princeton'a götürmekti. Evraklar çok gizli bilgiler içermiyordu. İyi niyetli, ama çoğunluğu yanlış yönlendirilmiş insanlar, savaşın kazanılmasına yardımcı olabileceğini düşündükleri icatlarına dair fikirlere yer verdiği bu evrakları Deniz Kuvvetlerine yolluyor, Deniz Kuvvetleri de bunların itibar edilebilir olup olmadığına dair Einstein'ın tavsiyesini istiyordu. Evraklar denizaltıların faaliyetini engellemek amacıyla Atlantik Okyanusunun dondurulabileceği önerisi gibi fikirler içeriyordu. Dolayısıyla Einstein'ın sapı samandan ayırma becerisi gereksiz yere ölçülmüyordu. Yine de Einstein İsviçre'de patent memuru olarak çalıştığı dönemde, pratikte uygulanamayacak sinsi tasarıların içerdiği hataları tespit etmekte nispeten daha iyiydi.

Bir gün Princeton'daki evinden İleri Çalışmalar Enstitüsüne doğru Einstein'la birlikte yürürken Gamow, iş arkadaşı kuantum fizikçisi Pascual Jordan'ın bir süre önce başından savmış olduğu bir fikirden söz etti. Jordan'ın bu fikri, sadece bir kahve sohbetine veya Princeton'daki bir yürüyüşe renk katmak üzere ortaya atılan türden çılgın bir fikirdi. Jordan herhangi bir maddesel cismin kütlesinin bir noktada toplanması

[3] *bkz. In Search of the Big Bang [Büyük Patlamanın Peşinde].*

halinde, ilgili kütleçekimsel alanın negatif enerjisinin *-mc*^{2} olacağını, böylece bu negatif enerjinin de yıldızın pozitif kütle-enerjisini tam olarak sıfırlayacağını hesaplamıştı. Gamow'un Einstein'a söyledikleri, diğer bir deyişle bir yıldızın hiç yoktan var edilebileceğiydi. Gamow arkadaşının tepkisini şöyle dile getiriyordu:[4] "Karşıdan karşıya geçtiğimiz o esnada Einstein'ın öylece kalakalmasıyla birkaç arabanın bizi ezmemek için durması gerekti."

Bunun, sıradan bir benzetme veya enerji gibi şeyleri ölçmek için izlediğimiz yöntemin bir sonucu olmadığının altını çizmek gerekir. Bu, evrenin işleyiş biçimiyle ilgili temel bir gerçekliktir: Kütleçekimsel alanlar negatif enerjiye sahiptir ve konu bir noktada yoğunlaşmış bir madde olduğunda söz konusu negatif enerji o maddenin kütle-enerjisini tam olarak sıfırlar. Karşıdan karşıya geçerken Einstein'ın olduğu yerde donup kalmasına neden olan fikir o zaman az bir etki yarattıysa da kırk yıl sonra tüm evrenin hiç yoktan ortaya çıkmış olabileceği fikrinin köşe taşı haline gelecekti. Fikre göre bu ortaya çıkışın sonucunda evren ilk olarak eşit ve zıt miktarda enerji taşıyan (dolayısıyla toplam enerjisi sıfır olan) kütleçekimsel alana sahip bir kütle-enerji kabarcığı halindeydi. Sonrasındaysa ufak kabarcık, şişme olarak adlandırılan bir süreç vasıtasıyla genişleyerek şu an etrafımızda gördüğümüz evreni oluşturmuştu. Tüm bunları *In Search of the Big Bang [Büyük Patlamanın Peşinde]* adlı kitabımda ele almış olsam da burada önemsememiz gereken tek husus, evrenin Büyük Patlamadan, yola gayet eş dağılımlı bir halden çıktığını biliyor olduğumuzdur. Büyük Patlamada ne olup bittiğinin ayrıntıları hâlâ tartışma konusu olmasına rağmen evrene yönelik doğrudan gözlemler, başlangıçtan hemen sonrasının neye benzediğini bize söylemektedir.

Bugün evren hakkındaki en önemli gerçeklik, onun genişlemekte olduğudur. Geceleri gökyüzünde gördüğümüz tüm yıldızlar disk-şekilli bir sistemin parçasıdır. Bu sistem Samanyolu adı verilen ve yüz milyarlarca yıldızdan oluşan bir galaksidir. Samanyolu da yüz milyarlarca galaksiden sadece bir tanesidir. Galaksilerse bir araya gelerek Evren genişledikçe

---

4 *bkz.* Gamow, *My World Line.*

birbirlerinden uzaklaşan (ve kütleçekim tarafından bir arada tutulan) kümeleri oluştururlar. Genişleme uzay içerisinde hareket eden galaksi kümelerinden değil, uzayın kendisinin kümeler arasında gerilmesinden kaynaklanır. Einstein'ın genel görelilik teorisi bunu tüm ayrıntılarıyla anlatır (Bu tahminler aslında bu teoriden yola çıkarak yapılmıştır). Cisimler şu an birbirlerinden uzaklaşmaktaysa, o zaman geçmişte birbirlerine daha yakın oldukları aşikârdır ve geçmişte yeteri kadar geri gittiğimizde her şeyin üst üste olduğu bir yığınla, diğer bir deyişle Büyük Patlamayla karşılaşırız. Evrenin şu anki genişleme katsayısını ölçerek ve genel görelilik teorisini kullanarak Büyük Patlamadan şimdiye kadar yaklaşık on dört milyar yıl geçmiş olduğunu saptayabiliriz.

Astronomiyle ilgili en harika şeylerden biri, ışığın uzaydaki seyahatinin sonlu bir zamanla sınırlandırılmış olması nedeniyle cisimleri çok eskiden bulundukları uzaklıkta görüyor oluşumuzdur. On milyon ışık yılı uzaklıktaki bir galaksinin, onu on milyon yıl önce terk etmiş olan ışığın vasıtasıyla görülmesi buna örnek verilebilir. Ayrıca "başlangıç" sıfırıncı an olarak belirlenip zaman ileri yönde çalıştırılırsa, detektörlerimiz aracılığıyla "görebildiğimiz" geçmişteki en uzak zaman, evrenin yaklaşık 300.000 yaşında olduğu bir çağa karşılık gelir. Bu çağda evren, neredeyse eş dağılımlı ve sıcaklığı güneşin yüzeyinin bugünkü sıcaklığının civarında –aşağı yukarı 6000 °C– olan bir sıcak gaz denizinden (daha doğrusu, bir plazmadan) oluşuyordu.

Bu ateş topundan kaynaklanan radyasyon –tıpkı kapalı bir kutunun genişlemesiyle içindeki gazın soğuması gibi– zaman geçtikçe ve evren genişledikçe soğudu. Bu radyasyon bugün belli belirsiz bir radyo hışırtısı şeklinde, elektromanyetik tayfın mikrodalga kesiminde ve sıcaklığı *eksi* 270 °C'nin hemen altında (ya da mutlak sıfırın 2,7 derece üzerinde) olarak saptanır. Gökyüzünün farklı yerlerinden bize ulaşan bu "kozmik mikrodalga ardalan ışınımı"nın sıcaklığındaki oldukça küçük çaplı farklılıklar, yıldızları ve galaksileri oluşturmuş olan sıcak gazın o dönemde uzaydaki dağılımının tam olmasa da neredeyse eş dağılımlı olduğuna işaret eder. Gaz bazı yerlerde biraz daha yoğundu ve bu yüzden bu daha yoğun bölgeler kendilerine daha fazla madde çekerek evrenin düzensizliğinin artmasına neden olacaktı. Bu da sonuç olarak bugün içinde bulunduğumuz duruma, maddelerin, aralarında yüksek miktarda karanlık uzayın bulunduğu parlak yıldızlar olarak galaksilerde yoğunlaşmasına yol açacaktı.

Bu, dünyada gerçekleştirdiğimiz gaz dolu kutu incelemesinin bize sağladığı kavrayıştan önemli ölçüde farklıdır. Kütleçekim etkilerinin ihmal edilebildiği durumlarda (bu, kutudaki parçacıkların birbirlerine uyguladıkları kütleçekimsel kuvvetlerin etkilerinin ihmal edilebildiği anlamına gelir); gaz dolu bir kutu için maksimum entropi hali, gazın eş dağılımlı bir sıcaklık altında kutu içerisinde eş dağılımlı biçimde yayılmış olduğu duruma karşılık gelir. Öte yandan gazı oluşturan parçacıklar arasındaki kütleçekimsel kuvvetlerin ihmal edilemediği durumlarda (bu uzaydaki iri toz ve gaz bulutları için geçerlidir) kütleçekim, cisimleri yığınlar halinde bir araya toplayabilir ve böylece daha fazla düzen oluşturarak *aynı zamanda* entropiyi de azaltabilir. Paul Davies'in de söylediği gibi, "kütleçekim kaynaklı kararsızlık bir bilgi kaynağıdır."[5] Daha fazla bilgi daha az entropi anlamına gelir. Dolayısıyla buradan çöken bir gaz bulutunun kütleçekimsel alanından bilgi "dışarı çıktığında" kütleçekimsel alanın, negatif enerjisine eşlik etmesi amacıyla entropi yuttuğu çıkarımı yapılabilir. Kütleçekimsel alanın bu şekilde entropi yutmasını mümkün kılan, sahip olduğu negatif enerjidir ve bu da evrenin bugün neden termodinamik dengede olmadığını açıklar.

Şimdi, evrenin tamamını konu alan büyük resmi bir kenara bırakıp dünyada yaşamın ortaya çıkışına tekrar odaklanalım. Burada önem taşıyan, kütleçekimin bir tür domino etkisinden sorumlu olduğudur. Bu domino etkisi küçük çapta olmaktan ziyade, rekor kırma veya yardım kuruluşları için bağış toplama maksadıyla muazzam dizilimli dominoların devrilmesine benzetilebilir. Söz konusu etki, adım adım ilerleyen bir süreç halinde evrende, her şeyin nasıl meydana geldiği hakkında kafa yoracak denli zeki varlıklar düzeyine kadar inen (veya çı-

5 *bkz.* Paul Davies, *The Fifth Miracle.*

kan) ve miktarı giderek artan düzenlemeler yaratmıştır. Yıldızların işleyişinin ayrıntılarına inmeden önce[6] onların sadece, gaz yığınlarının kütleçekimle bir araya gelip (onları oluşturan parçacıkların kütleçekimsel alandan edindiği kinetik enerji sayesinde) ısınması, böylelikle de nükleer füzyon tepkimelerinin cereyan etmesiyle meydana gelmiş olduğunu söyleyebiliriz. Tüm bunlar yıldızların ve onların etrafındakilerin termodinamik dengede olmadığı bir duruma yol açar. Tam aksine, soğuk uzayda duran sıcak bir yıldız söz konusudur ve bu yüzden enerji yıldızın dışına akarak iç ve dış sıcaklığı dengelemeye çalışır. Zamanın termodinamik yönü, yıldızdan dışarı akmakta olan enerjinin tekabül ettiği, geleceğin doğrultusuna dönüktür. Ayrıca, kütleçekimin tüm bunlardaki rolü sebebiyle, termodinamik geleceğin aynı zamanda Büyük Patlamadan uzaklaşan zamanın yönü olması tesadüf değildir. Zaman okuna ne tarafı işaret edeceğini söyleyen en nihayetinde kütleçekimdir.

Dünyamız gibi bir gezegen, yıldızdan çıkan enerji akışıyla yıkanır ve bu da gezegenin, tüm yüzeyi açık ve kayıp bir sistem olmasına yol açar. Dünya yüzeyindeki yaşamın tümü, kendisini dengeden uzakta, kaosun eşiğinde tutma maksadıyla bu enerjiden faydalanır.[7] Bitkiler enerjilerini doğrudan güneş ışığından fotosentez yoluyla sağlarken, otçullar enerjilerini bitkilerden, etçillerse diğer hayvanlardan edinir. Yine de tüm bunların kökeni güneştir ve tüm bunlar kütleçekim sayesinde olur. Gelgelelim sistemlerin bu enerji akışını kullanarak kendilerini karmaşık gibi gözüken biçimlere düzenleme yöntemleri gerçekten de oldukça basittir. Parlak matematikçi Alan Turing'in

---

6 *Stardust* adlı kitabımda ele aldığım bir konu.

7 Enerji dünyanın içerisinden de gelir. Dünyanın çekirdeğinde yer alan radyoaktif elementlerin bozunması bu enerjinin başlıca kaynağıdır. Söz konusu radyoaktif maddeler, yıldızların önceki nesillerinde üretilmiş ve bu yıldızların patlamasıyla uzayın derinliklerine yayılıp Güneş Sistemini meydana getirecek yıldızlar arası bulutun bir parçası haline gelmişti. Dolayısıyla bu enerji kaynağı da varlığını en nihayetinde kütleçekime borçludur. Okyanus tabanındaki sıcak su ağızlarından kaçan bu enerjiden faydalanan yaşam biçimleri bunu güneş ışığından bağımsız bir şekilde gerçekleştirebilse de onlar da bizim kadar birer kütleçekim ürünüdür.

(1912-1954) açtığı yolu takip ederek bunu tüm açıklığıyla görebiliriz. Yarım yüzyıldan fazla bir süre önce, bildiğimiz en karmaşık süreçte yer alan, tek bir yaşayan hücreden embriyo gelişimini açıklamaya yeltenme cüretinde bulunan Turing, döneminin çok ilerisindeydi ve bu alandaki çalışmasının önemi ölümünden yıllar sonra fark edildi. Yine de şimdi bakıldığında, hikâyemizin bir sonraki aşamasına başlangıç noktası olarak seçilecek en mantıklı yer burasıdır.

23 Haziran 1912'de Londra'daki Paddington'da doğan Turing İkinci Dünya Savaşı esnasında (meşhur Enigma şifreleri de dahil olmak üzere) Alman şifrelerini kıran ve Buckinghamshire'daki Bletchley Park'ta yer alan ekibin önderliğini yapmış bir kriptocu olarak bilinir. Turing o sıralarda, her problemi çözebilen bir yapay zekâ olan (günümüzde kimi zaman bir Turing makinesi olarak da adlandırılan) "bir evrensel bilgisayar" yaratma çabasıyla yakından ilgiliydi. İnsan zekâsının nasıl geliştiğine yönelik merakı da onu embriyonik gelişme hakkında kafa yormaya itti. Ne yazık ki erken ölümü, Turing'in başarılarına yenilerini katmasına engel oldu. Otoriteler tarafından (söz konusu dönemde halen suç kabul edilen) eşcinsel olduğu gerekçesiyle taciz edilmesi sonucunda Turing, kırk ikinci doğum gününden iki hafta önce 7 Haziran 1954'te siyanür enjekte ettiği bir elmayı yiyerek intihar etti. Turing 1934 yılında mezun olduğu Cambridge'deki King's Kolejinde iki sene çalıştıktan sonra doktora çalışmasını Princeton'da tamamlamış ve 1938'de King's Kolejine geri dönmüştü. 1936'da Turing makinesi fikrini sunan makalesi "On Computable Numbers"ı [Hesaplanabilen Sayılar Üzerine] yayınlamıştı. O dönem için tamamen hayali bir üründen ibaret olan bu makine, varsayımsal bir evrensel bilgisayarın mantıksal yapısını açıklama maksadıyla tasarlanmış bir "düşünce deneyi"ydi. Oysaki Turing'in makalesinde ayrıntılarıyla açıkladığı ilkeler tüm modern bilgisayarların temelini oluşturmanın yanı sıra, kendini-düzenleyen karmaşık sistemlere yönelik kavrayış sağlıyordu.

Turing'in hayali makinesi, karelere bölünmüş uzun (prensipte sonsuz uzun) bir kâğıt şerit içeriyordu. Bu karelerde de okunabilen, yeri geldiğinde silinebilen veya birbirleriyle değiştirilebilen sembol ya da sayılar bulunuyordu. Turing'in aklında canlandırdığı, üzerine kurşun kalemle yazılabilen kâğıt şerit gerektiğinde silinebiliyor ve üzerine yeniden yazı yazılabiliyordu. Hayali kurulan bu tasvir günümüzde bir manyetik şeride aittir. Bir ses kasetinin içindeki şerit, hatta bir sabit disk veya onun içindeki katıhal malzemeden oluşan okuma/yazma ünitesi rastgele erişimli bellek (RAM) buna birer örnektir ve bunların hepsi de kullanılış amaçları doğrultusunda mantıksal açıdan birbirleriyle denktir. Bir karedeki sayının okunmasıyla makineye, şerit üzerinde (bellek içerisinde) ileri veya geri gitmesi, şeridin üzerindeki bilgiden nasıl yeni bir sayı hesaplanacağı ve bir karenin içeriğinin ne zaman yeniden yazılacağı komutu verilecekti. Örneğin bir karedeki sembol, sıradaki iki kare içerisindeki sayıları toplayıp çıkan sonucu bu karelerden ikincisinin içine yazması için makineye komut verebilirdi. Şerit üzerindeki komutlar yeteri kadarı belirgin olduğu takdirde, bu yöntemle makine herhangi bir şeyi hesaplayabilirdi. Makine, şeridin bir ucundan veya belirli bir karesinden başlayıp kendi çizgisi üzerinde çalışarak ilerleyecekti. Bu esnada kimi zaman şeridin aynı bölümünde ileri geri gidecek, karelerdeki sayıları yazarak (veya yeniden yazarak) onların içeriğini, okuduğu komutlar doğrultusunda (örneğin "topla"dan "böl"e) değiştirecekti. En sonunda da orijinal mesaj tarafından yöneltilmiş soruya kendi vermiş olduğu cevabını yazmış olarak, şeridin diğer ucunda ya da komutlar tarafından belirlenmiş bir karede duracaktı. Makine belirli bir karede hangi sembolün bulunduğuna bağlı olarak, bir adım sonrasında ne yapacağını her zaman bilirdi. Turing, uygun sembolik dilde ifade edilebilen herhangi bir problemi çözebilecek (şimdi bir evrensel Turing Makinesi olarak bilinen) bu tür bir *evrensel makinenin* var olabileceğini ispatladı.[8] Turing'in deyişiyle bu makinenin:

---

8 Turing teknik açıdan, bu tür bir makinenin, hesaplanabilir olan, diğer bir deyişle doğru algoritmanın kullanılması halinde belirlenebilir olan her problemi çözebileceğini ispatladı. Bununlar beraber Turing, bazı problemlerin hesaplanamaz olduğunu da ispatladı. Matematikçilerin derin ilgi duyduğu bu hesaplanamazlık, aynı zamanda bazı şeylerin algoritmik olarak sıkıştırılabilir olmadığı fikriyle ilişkilidir.

> ... içerisine uygun "komutlar"ı taşıyan bir şeridin yerleştirilmesi halinde, özel-maksatlı herhangi bir makinenin işini yapması, bir başka deyişle herhangi bir hesaplama işini yürütmesi sağlanabilirdi.

Şeridin belirli kısmını yürüten, bilgisayarın hafızasındaki programlanmış yazılım ile birlikte Turing'in makinesini temsil eden donanım, bilgisayarların nasıl çalıştığının tanımı olarak günümüzde en çaylak bilgisayar kullanıcısına dahi o kadar bildiktir ki 1936'da gerçekleşen bu atılımın ne kadar asli olduğunu kavramak çok güçtür. Bu fikirlerin, savaş zamanının getirdiği acil durumun baskısıyla yakın zaman sonra farkına varılacak olan pratik değerini bir kenara bırakacak olursak Turing'in makalesi, yaşam ve diğer karmaşık sistemlere yönelik anlayışla ilişkili derin meselelerin ortaya çıkmasını sağladı. Birçok durum için, Turing makinesinin avantajı, ona bir hesaplamanın nasıl yürütüleceğini söyleyen komutların (algoritmanın) o hesaplamanın ürünlerinden çok daha kompakt olmasıdır. Örneğin π'yi temsil eden sonsuz rakamlar zincirini yazmaya gerek kalmadan π'nin nasıl hesaplandığını belirleyen epey kısa bir algoritma vardır. Çoğu amaç için bu algoritma π'dir. Daha alelade bir örnek verelim: Her ne kadar günlük koşullarda 6x9'un 54'ü tanımlamanın kısa bir yolu olduğunu söyleyemesek de bildik "çarpma" tekniği bir algoritmadır. Turing algoritmik olarak sıkıştırılamayan, dolayısıyla kompakt gösterimlerinin kendileri olduğu sistemlerin var olduğunu gösterdi. Bu kilit kavramla daha önceki kaos tartışmamıza başka bir açıdan bakarken karşılaşmış, bilhassa da evrenin en kısa tanımının yine evrenin kendisi olduğunu görmüştük.

II. Dünya Savaşı patlak verdiğinde Turing halihazırda bu prensiplerin işleyişini gösterebilecek gerçek makineler üretmeye çalışıyordu. Ne var ki bunlar evrensel hesaplama makinelerinin oldukça uzağında kalırdı. Bletchley Park'ta yürütülen şifre kırma çalışmaları sırasında İngiltere kökenli bir proje, tam anlamıyla programlanabilir ilk dijital bilgisayarı geliştirmeyi başardı. Savaşın sonunu izleyen ilk yıllarda Turing, bilgisayarların tasarımı üzerindeki çalışmalarına önce Ulusal

Fizik Laboratuvarında (NPL), ardından da (1948'den itibaren) Manchester Üniversitesinde devam etti. Bu şifre kırma çalışmaları ve bilhassa Turing'in katkısı tarafından sağlanan bilgisayar gelişimine yönelik itici güç, Lewis Fry Richardson'un sayısal hava tahmini hayalini o neredeyse hayattayken gerçeğe dönüştürecek ve bu sayede de Edwars Lorenz'in kaosu yeniden keşfedişinin yolu açılacaktı.

Öte yandan, Turing'in vizyonu halihazırda hızlı bir şekilde genişlemeye devam ediyordu. NPL'de çalıştığı sırada 1947-1948 akademik yılını Cambridge'de geçici görev yaparak geçiren Turing, günümüzde nöral ağlar denilen konu üzerine –yaşadığı günlerde yayımlanmayan– bir makale yazdı. Turing'in bu makaleyi yazmaktaki amacı, yeterli ölçüde karmaşık olan herhangi bir mekanik sistemin, harici bir zekâ tarafından bilfiil programlanmadan da deneyim yoluyla öğrenebileceğini göstermekti. 1950'de Manchester'a yerleşen Turing, mekanik sistemler ve elektronik sistemlerle ilgili edindiği bilgileri biyolojik sistemlere ve insan beynine uyarlamaya hazırdı. Turing'in buradan, embriyoların nasıl geliştiği hakkındaki çalışmasına yaptığı atlama gözüktüğü kadar harika olmadı; çünkü kendisinin ilgi alanı sadece beyinlerin nasıl büyüdüğü ve bağlantılar oluşturduğuyla sınırlı değildi. Canlıların çeşitliliğinin basit başlangıçlardan nasıl geliştiğine yönelik ilgisini, gençliğinde okumuş olduğu D'Arcy Thompson'ın klâsik kitabı *On Growth and Form* [*Büyüme ve Biçim*] tetiklemişti. 1951'de Turing, bilgisayar bilimine katkılarından dolayı Royal Society üyeliğine seçildiğinde bilgisayar üzerine çalışmalarını sürdürüyordu ve yaşasaydı bu çalışmalar, muhtemelen bilgisayar bilimine daha da büyük bir katkı olarak tarihe geçecekti.

Turing bile 1950'lerin başındaki biyoloji anlayışından, beynin kendi ağ örgüsü bağlantılarını nasıl geliştirdiğine dair bir modele doğrudan geçiş yapamadı; ne de olsa DNA'nın çift sarmallı yapısı, diğer bir deyişle yaşam molekülü Cambridge'te çalışan Francis Crick ve James Watson tarafından 1953'e kadar belirlenememişti. Bunun yerine Turing, gelişmekte olan embriyo içerisinde, başlangıçta neredeyse küresel ve neredeyse özelliksiz bir hücreler damlasından nasıl bir yapının ortaya çıktığı, diğer bir deyişle döllenmiş bir yumurtadan bir blastulanın nasıl meydana geldiği temel problemiyle uğraşmaya karar verdi. Bu, matematiksel açıdan fizikçilerin (özellikle Bénard konveksiyonu gibi) farklı bağlamlarda aşina oldukları simetri kırılması olgusuna ilişkin bir problemdi. Simetri kırılmasına, belirli manyetik madde türlerinin ısıtılmasının ardından sonra soğutulması güzel bir örnek teşkil eder. Demir gibi manyetik malzemeler, küçük çubuk mıknatıslar gibi ufak çift kutupların bir araya gelmiş hali olarak da değerlendirilebilir. (Keşfini 1895'te gerçekleştiren Pierre Curie'nin ismini almış) Curie Noktası olarak bilinen kritik bir sıcaklığın üzerinde, bu çift kutuplar arasındaki her manyetik bağı kırabilecek bir ısı enerjisi mevcuttur. Bu sebeple bu çift kutuplar rastlantısal biçimde sağa sola dönüp karmakarışık bir hal alır; dolayısıyla sonuç olarak toplam bir manyetik alandan söz edilemez. Manyetik açıdan, malzemenin küresel simetrik olduğu söylenebilir; çünkü tercihi bir manyetik yön yoktur. Sıcaklık Curie noktasının (demir için 760 °C'nin) altına düştüğünde, birbirine komşu çift kutupların arasındaki manyetik kuvvetler, azalmakta olan ısı enerjisinin neden olduğu, çift kutupların birbirleriyle karışma eğilimine baskın çıkar. Böylelikle çift kutuplar kuzey kutupları bir yöne, güney kutupları diğer yöne bakacak şekilde dizilerek bir toplam manyetik alan oluşturur ve de orijinal simetri bozulmuş olur. Bu tür bir değişim, faz geçişi olarak adlandırılır ve suyun 0 °C'de bir faz geçişiyle donarak buz haline gelmesine benzer. Faz geçişi kavramının parçacık fiziği için de önem içeren uygulamaları olsa da burada ayrıntılarına inmeyeceğiz. Burada bizi ilgilendiren nokta şudur: Bu tür fikirler 1950'lere dek biyolojide yaygın ölçüde geçerlilik kazanmamış olmasına rağmen o dönemde biyolojik gelişime el atan bir matematikçi için, simetri kırılması bağlamında düşünmek ve mevcut bu tür geçişlerin genel doğasını açıklayan matematiksel araç gereçlere sahip olmak doğaldı.

1952'de Turing, başlangıçta eş dağılımlı olan bir kimyasallar karışımının simetrisinin, farklı kimyasalların söz konusu karışım içerisindeki difüzyonu yoluyla nasıl kendiliğinden kırılabileceğini prensipte açıklayan bir makale yayımladı.

Bunun biyolojiyle olan ilişkisi, makalenin "The Chemical Basis of Morphogenesis"[9] başlığından açıkça görülebiliyordu. Turing'in önermesine göre, matematiksel olarak açıkladığı sürecin bir benzeri, gelişmekte olan embriyonun içerisinde yer alarak başlangıçta örüntü var olmayan yerlerde örüntüler oluşturabilirdi.

Turing'in önermesi ilk bakışta hiç akla yatkın değilmiş gibi göze çarpar. Bizim difüzyondan beklediğimiz, başlangıçta örüntü bulunmayan yerlerde örüntüler yaratması değil, şeyleri birbirine karıştırması ve örüntüleri yok etmesidir. Bir bardak suyun içine bırakılan bir damla mürekkebin eş dağılımlı bir su ve mürekkep karışımı oluşturmak amacıyla bardağın tamamına yayılması buna dair bariz bir örnektir. Oysa Turing neredeyse, bu ölçekte işleyen termodinamik süreçlerin tam tersini, başka bir deyişle zamanın ters yönde işlemesiyle eş dağılımlı su ve mürekkep karışımının tek bir mürekkep damlasıyla onu saran suya ayrıştığını öneriyormuş gibi gözükür. Ne var ki konu bundan ibaret değildi; Turing'in kavrayışının kilit noktası, tanımladığı örüntü-oluşturan sürecin, birbiriyle etkileşim içerisinde olan en az iki kimyasal içerdiğiydi.

Tüm bunlar, kataliz olarak bilinen ve belirli bir kimyasal maddenin (katalizörün) varlığının belirli bir kimyasal tepkimenin gerçekleşmesini teşvik ettiği bir sürece bağlıdır. Bazı durumlarda (A harfiyle temsil edebileceğimiz) bir kimyasal bileşiğin bir kimyasallar karışımındaki varlığı, ondan daha fazlasını oluşturmaya yarayan tepkimeleri teşvik eder. Buna otokatalitik tepkime denir ve daha fazla A bulunmasıyla daha da fazla A üretildiği için bunun, pozitif geri-bildirimin doğrusal olmayan bir süreçte iş başında görüldüğü bir diğer örnek olduğunu söyleyebiliriz. Öte yandan zıt yönde davranış göstererek belirli kimyasal tepkimelerin gerçekleşmesinin önüne geçen kimyasallar da vardır ve inhibitör olarak adlandırılır. Bunlara ilaveten tek bir maddenin aynı anda birden fazla kimyasal tepkimeyi teşvik edemeyeceğini söylemek yanlış olur. A

---

9 *Philosophical Transactions of the Royal Society,* 1952, cilt B237, s.37. Bu makale günümüzde kuramsal biyoloji alanındaki en itibarlı makalelerden biri olarak görülür.

katalizörünün daha fazla A üretilmesini teşvik etmekle kalmayıp A'nın üretim hızını düşürme davranışı sergileyen bir başka bileşik olan B'nin oluşumunu da teşvik etmesi halinde Turing, bu kimyasallar karışımında örüntülerin ortaya çıkabileceğini hesapladı. Turing'in büyük önem taşıyan önermesine göre A ile B'nin oluşmasıyla birlikte, bunların kimyasallar karışımı içerisindeki difüzyonu farklı hızlarda gerçekleşecek ve böylelikle karışımın bazı kısımlarında A'nın miktarı B'ninkinden fazla, diğer kısımlarında da B'nin miktarı A'nınkinden fazla olacaktı. Farklı kısımlarda ne miktarda A ve B bulunacağını hesaplayabilmek için Turing kullanabileceği en basit denklemleri kullanmak zorunda kaldı; çünkü elektronik bilgisayarların hâlâ son derece sınırlı yeterlikte olmasının yanı sıra erişimleri de kolay değildi. Dolayısıyla Turing her şeyi kâğıda dökmek zorunda kaldı ve bu da –durumu tanımlayan– doğrusal olmayan gerçek denklemlere, doğrusal kestirimler yapmayla uğraşmak anlamına geliyordu. Üstelik bu denklemler oldukça kararsızdır; çünkü hesaplamaların bir kısmında yapacağınız küçük bir hata ileride büyük bir hataya dönüşür. Sonuç olarak Turing sadece en basit sistemler için ne olup bittiğini hesaplayabilse de bu, mevcut ihtimaller hakkında ipucu oluşturmak için yeterliydi. Fikirlerinin iyiden iyiye araştırılmasının, daha güçlü dijital bilgisayarlar geliştirilinceye dek rafa kalkması gerektiğini kabullenen Turing, buna rağmen fikirlerini 1952 tarihli makalesindekilerin ötesine taşımak için elinden geleni yapmak adına, A ve B arasındaki rekabetin örüntü oluşumunda nasıl kritik bir rol oynadığını gösterdi. Bununla birlikte B'nin karışım içerisindeki difüzyonunun A'nınkinden daha hızlı olma zorunluluğuna dikkat çekti; otokatalitik geri-bildirim süreci vasıtasıyla gerçekleşen A'nın kontrol dışı üretimi her zaman yerel bir olguyken, A'nın B tarafından engellenmesiyse yaygın bir olguydu. Ayrıca, B'nin üretildiği yerden uzağa doğru hızlıca yayılması, onun A'nın kendi kaynağındaki üretimine tamamıyla engel olmadığı anlamına geliyordu.

Gerçekleşenleri gözünüzde canlandırabilmek için, cam bir kavanozda usulca bekleyen bir kimyasallar karışımı hayal edin. Rastlantısal dalgalanmalar nedeniyle, sıvıda A'nın konsantrasyonunun biraz daha fazla olduğu bazı noktalar olacak ve bu yüzden bu noktalarda hem A hem de B'nin üretimi teşvik edilecektir. B'nin çoğu bu noktalardan uzağa yayılıp noktalar arasındaki yerlerde A'nın oluşmasına engel olurken, diğer yandan otokatalitik süreç A'nın (ve B'nin) noktalardaki üretiminin devamını sağlar. (Orijinal karışımda rastlantısal dalgalanmaların başlangıçta aşırı miktarda B oluşturduğu yerler de olacaktır; ancak tabii ki buralarda ilginç şeyler meydana gelmez.) Şimdi A kimyasalının kırmızı, B kimyasalınınsa yeşil renkli olduğunu farz edin. Sonuç olarak, başlangıçta eş dağılımlı ve özelliksiz olan sıvı kavanozunun, kendisini (sıvı karıştırılmadığı veya çalkalanmadığı sürece) sıvının içerisinde konumlarını koruyan kırmızı noktalarla bezenmiş yeşil bir denize aniden dönüştürmesiyle karşılaşırsınız. Örüntü kararlıdır; ancak bu belirli örnekte, kimyasalların üretimlerini mümkün kılan bir kaynak ve son ürünlerin uzaklaştırılabileceği bir "musluk" olduğu sürece yeni A ve B'nin oluştuğu dinamik bir süreç söz konusudur. Artık alışıyor olmamız gereken terminolojiyle açıklarsak, ele aldığımız sistemin denge dışı bir halde tutulan, açık ve kayıp bir sistem olması şartıyla, örüntü kararlı ve devamlıdır. Turing, içerisinde gerçekleşen dinamik sürecin (bu tür sistemler gerçek deneylerde yapılabilseydi) her gözlemci tarafından daha da açıkça görülebileceği, değişen bir renk örüntüsünün sıvı içerisinde yayıldığı sistemlerin de matematiksel açıklamasını yaptı. Günümüzde, A gibi otokatalitik bir bileşik çalıştırıcı, B ise inhibitör olarak adlandırılsa da Turing bu terimleri kullanmadı ve B'yi, kendi ölümünün tüyler ürpertici yankılarını barındıran "zehir"[10] olarak tanımladı. Turing'in keşfi bırakın bir beyni, bir embriyonun gelişimini dahi açıklamaktan her ne kadar çok uzakmış gibi gözükse de başlangıçta eş dağılımlı olan bir sistemde (bu şekilde davranan gerçek

10 Zehirle takıntılıymış gibi görünen Turing'in yaşam öyküsünü yazan Hodges, *Pamuk Prenses ve Yedi Cüceler*'i izlediğinde Turing'in, Kötü Cadı'nın ipe bağlı elmayı kaynayan zehir kazanının içine sarkıtıp "Elmayı zehir dolu suya yatır ki uyutan ölüm içine sızsın" diye mırıldandığı sahneden nasıl etkilendiğini anlatır. Anlaşılan Turing, kafiyeye uydurduğu eylemini gerçekleştirmesinden çok önce de bu kupleyi sayıklamaya bir hayli düşkünmüş.

sistemler olsaydı) simetrinin kırılarak kendiliğinden örüntüler yaratıldığı doğal bir kimyasal yöntem sunuyor olması açısından son derece önemliydi.

Turing'in fikirleri merak uyandırıcıydı. Gelgelelim makalesi bugün kuramsal biyolojide çığır açıcı olarak değerlendirilmesine karşın 1950'lerde ve 1960'ların büyük bölümünde kimyacılar ve biyologlar tarafından çok az rağbet gördü; çünkü onun matematiksel modelinin tanımladığı davranışı gösteren gerçek bir kimyasal sistemle daha önce kimse karşılaşmamıştı. Rus biyokimyacı Boris Belousov hariç kimse demek daha doğru olur. Belousov, bir *Royal Society's Philosophical Transactions* okuyucusu olmadığından Turing'in çalışmasından haberdar değildi; tıpkı Turing'in de kendisinin vakitsiz ölümünden önce Belousov'un çalışmasından haberdar olmadığı gibi. 1950'li yılların başında Belousov, Sovyet Sağlık Bakanlığında çalışmaktaydı ve glikozun vücutta nasıl parçalanarak enerji açığa çıkardığıyla ilgileniyordu. Artık ellili yaşlarının başındaydı ki bu, herhangi bir bilim insanının büyük ve yeni bir keşif gerçekleştirmesi için alışılmadık ölçüde ilerlemiş bir yaştı; özellikle de geçmişinde ordu laboratuvarında çalışmış bir bilim insanı için. Bir kimyacı için oldukça ayırt edici bir unvan olan (aşağı yukarı albaylığa karşılık gelen) *Combrig* rütbesine eriştikten sonra II. Dünya Savaşının sona ermesiyle emekliye ayrılan Belousov'un ordudaki geçmişi hakkında bilinenler bu kadarla sınırlıdır. Onun ilgilendiği glikoz parçalanması, diğer tüm metabolik süreçler gibi enzimlerin faaliyetleri yardımıyla gerçekleşir. Enzimler farklı türde protein molekülleridir ve uygun kurgudaki kimyasal tepkimelerin farklı adımları için katalizör görevi görür. Belousov, bu sürecin en azından birkaç özelliğini taklit edeceğini düşündüğü bir kimyasallar karışımı hazırladı ve önündeki çözeltinin sonuç olarak berraklık ve renksizlikten sarıya, ardından tekrar eski haline düzenli ve tekrarlayan bir ritimle değiştiğini görünce hayrete düştü. Sanki bir kadeh kırmızı şarabın karşısına geçmiş, renginin sihirli biçimde defalarca kaybolup geri gelişini izliyormuş gibiydi. O zaman anlaşıldığı kadarıyla bu, termodinamiğin ikinci yasasıyla zıt düşüyordu. Sarı, daha yüksek entropiye sahip daha kararlı bir hali temsil ediyor olsaydı sıvının berraktan sarıya dönmesi tam anlamıyla mantıklı olacaktı. Berrak daha yüksek entropiye sahip daha kararlı bir hali temsil ediyor olsaydı sıvının sarıdan berrağa dönmesi tam anlamıyla mantıklı olacaktı. Oysa *her iki* hal de diğerinden daha yüksek entropide olamazdı! Bu sanki zaman ile termodinamik arasındaki ilişkinin anlaşılmasında on dokuzuncu yüzyıla has fikirlerin kullanılması gibi bir şeydi: Zaman oku sıvının içerisinde bir ileri bir geri dönüp duruyordu.

Belousov, hem kendi deneylerinin hem de Turing'in matematiksel modellerinin bir nebze de olsa habercisi olan evvelki bir çalışmadan haberdar olsaydı belki de bu kadar şaşırmayacaktı. Bir diğer matematiksel modelci Avusturyalı Alfred Lotka (1880-1949) varsayımsal bir kimyasal sistemin matematiksel bir tanımını 1910'da yapmıştı. Bu sistem de tıpkı Belousov'u şaşkına uğratan sistem gibi aynı biçimde salınıyordu: İlk olarak bir bileşikten bir miktar üretiyor, ardından tersine dönerek diğer bileşikten bir miktar üretiyordu vs.[11] İtalyan Vito Volterra (1860-1940) ise 1930'lu yıllarda ilk bakışta çok farklıymış gibi gözükebilecek şartlar altında, geri-bildirimin söz konusu olduğu basit süreçlerin nasıl çoğu zaman aynı yasalarla açıklanabileceğine dair sade bir örneği ele almıştı. Örnekte, bir ani yükseliş ve düşüş döngüsünü izleyerek sırayla serpilen bir av, bir de avcı türünden ibaret bir balık popülasyonu yer alıyordu. Volterra, etkileşimin bu şekilde gerçekleşmesi durumunda, Lotka'nın denklemlerinin balık popülasyonlarının nasıl değiştiğini açıklamakta oldukça iyi iş çıkardığını gösterdi. Bunun yanı sıra, Kanada doğumlu bir kimyacı olan ve Berkeley'deki California Üniversitesinde çalışan William Bray (1879-1946) henüz 1921'de, hidrojen peroksit ve iyodat içeren bir kimyasal tepkimenin, bir iyot ve oksijen karışımı ürettiğini ve bu ürünlerin karışımdaki oranlarının aşağı yukarı Lotka'nın belirttiği biçimde salındığını bulmuştu. Bray, keşfini duyurduğunda

[11] Bu şekilde salınan sistemler günümüzde, ritimlerinin düzenliliğinden ötürü "kimyasal saatler" olarak adlandırılır. Yine de bu düzenlilik göreli olmaktan öteye gitmediğinden, bu sistemler gerçek saat olarak kullanılacak kadar hassas değildir.

Lotka'nın modeline atıfta bulunmuş olsa da meslektaşlarının tepkisi temel olarak, bulduğu sonuçların termodinamiğin ikinci yasasını ihlal ettiğinden deneyde bir yanlışlık olması gerektiği yönündeydi. Dolayısıyla Bray'in "keşfi", karışımı oluşturan maddelerin karıştırılırken ve kayıtları tutulurken yapılan dikkatsizlikten ortaya çıkmış bir insan ürünüydü. Belousov da buluşlarını açıklayan bir makaleyi –Turing'in çığır açan makalesini yayımlamasından bir yıl önce– 1951'de yayımlamaya çalışıp neredeyse aynı tepkiyle karşılaştığı sırada Lotka, Volterra ve Bray'in hiçbiri hayatta değildi. Makalesini gönderdiği derginin editörü,[12] Belousov'un sonuçlarının termodinamiğin ikinci yasasıyla çeliştiğini ve deneyinin usulünün hatalı olması gerektiğini ifade etti.

İngiliz astrofizikçi Arthur Eddington'dan yapılacak ünlü bir alıntı sayesinde ikinci yasanın o dönemdeki, kutsal kitap mertebesine yaklaşan konumu hakkında bir fikir edinebiliriz. 1928'de Cambridge University Press tarafından basılan *The Nature of the Physical World [Fiziksel Dünyanın Doğası]* adlı kitabında Eddington şöyle yazmıştır:

> Entropinin daima yükselmekte olduğunu söyleyen termodinamiğin ikinci yasası, Doğa'nın yasaları arasında en yüksek mertebede olanıdır. Birisi kalkıp da kendi teorinizin Maxwell'in denklemleriyle ters düştüğünü söylüyorsa bu, Maxwell'in denklemleri için kötü haberdir. Gözlemle çeliştiği söyleniyorsa deneycilerin kimi zaman beceriksizlikler yaptığı bahanesini öne sürebilirsiniz. Ancak termodinamiğin ikinci yasasına aykırı olması halinde hiçbir ümidiniz yok demektir; teorinizin sizi utanç verici biçimde başarısızlığa uğratmaktan başka şansı yoktur.

Son cümledeki "teori"yi, "deney" ile değiştirdiğinizde Belousov'un aldığı tepkinin aslıyla karşılaşırsınız: O beceriksiz bir deneyciydi ve başarısızlığından ötürü utanç duyma-

---

12 Çoğu bültende olduğu gibi burada da, makalelerin yayımlanmaya uygun olup olmadığının incelenmesi için dışarıdan yardımı alınan bir uzmanın (bir "hakem"in) tavsiyesi üzerine hareket edilmiştir.

lıydı. Eddington'un bu yorumunu daha önce onaylayıp alıntı yaptığımı itiraf ediyorum. Bunu yaparken ikinci yasa aslında doğru olmasına karşın, orijinal formülasyonunun kendisinin düşündüğü gibi son gerçeklik olmadığını, dengede olmayan durumlarda ve kütleçekimin söz konusu olduğu yerlerde tekrar gözden geçirilmesi gerektiğini de belirtmiştim. Ne var ki bu, 1951'de yaygın ölçüde anlaşılabilir olmaktan epey uzaktı.

Belousov'un makalesinin reddedilmesine tepkisi, onun yaşına ve geçmişine sahip bir adamdan belki de beklenebilecek ölçüdeydi. Bir deneyci olarak mesleki becerisine leke sürülmesiyle kişisel anlamda hakarete uğramış hisseti ve sonuçları bu şekilde geri çevrilecekse bu alanda bir daha çalışma yapmamak üzere kesin karar aldı. Kendisinden genç bir meslektaşı S. E. Shnoll'un, kendisini direnmeye teşvik etmeye çalışması da işe yaramadı. Çalışmasını yıllarca yayımlatmak adına verdiği uğraşlarının boşa çıkmasından sonra Belousov, bir önceki sene Moskova'da tıbbi radyasyon üzerine düzenlenmiş bir sempozyum için vermiş olduğu tamamen farklı konulu bir raporun basılmış versiyonuna, buluşlarının iki sayfalık özetini iliştirip 1959'da kaçak olarak basılmasını sağladı. Sonrasındaysa Belousov bu çalışmadan elini eteğini çekti.[13] Herhangi bir hakemlik sürecine veya editör onayına tâbi olmayan konferansın yalnızca Rusçada gerçekleşmesi nedeniyle rapor, Sovyetler Birliği dışında neredeyse kimse tarafından okunmadığı gibi, S.S.C.B dahilinde de tam anlamıyla yaygın olarak okunmamıştı. Her şeye karşın Shnoll, Belousov'un çalışmasına olan ilgisini yitirmedi ve 1960'lı yıllarda bir lisansüstü öğrencisi olan Anatoly Zhabotinsky'i bu çalışmaya yönlendirerek onu Belousov'un izinden gitmeye teşvik etti. Bir sonraki kimyacı neslinden yalnızca bir kişi Belousov'un iki sayfalık özetinin peşinden gitmeye cesaretlendirilmişse de bu bir kişi bilim dünyasının dikkatini keşfin üzerine çekmeye yeter de artardı.

---

13 Reddedilen makalenin orijinalinin İngilizcedeki bir versiyonu nihayet 1985'te yayımlandı: *bkz. Oscillations and Travelling Waves in Chemical Systems*, der. R.J. Field ve M. Burger, Wiley, New York.

Zhabotinsky, Belousov'un keşfiyle tanıştığı sırada Moskova Devlet Üniversitesinde lisans öğrenimi görüyordu ve keşif o kadar ilgisini çekmişti ki tepkimeyi kendisi denemeye karar verdi. (Danışmanınız size belirli bir araştırma problemini incelemenizi "önerdiğinde" bunun ilginizi çekmemesi güçtür.) Tepkimenin Belousov'un tarif ettiği biçimde işlediğini doğruladıktan sonra Zhabotinsky, kırmızı ile mavi arasında gidip gelerek çok daha çarpıcı renk değişimi sergileyen bir karışım üretene dek bileşenleri kurcaladı. Fikri devralanın bir öğrenci olması sürpriz olmamalı; çünkü genç araştırmacılar genellikle büyükleri kadar sabit fikirli olmamalarının yanında, dokunulmaz yasaların altüst edilebileceği ihtimalini göz önünde bulundurmak konusunda daha heveslidir. (Yine de yasalar çoğu kez bu baskıya direnir.) Zhabotinsky'nin 1968'de Prag'da düzenlenen uluslararası bir toplantıda deneyinin sonuçlarını açıklamasıyla, Batılı bilim insanları, artık Belousov-Zhabotinsky veya BZ tepkimesi olarak bilinecek tepkimenin merak uyandırıcı davranışını ilk kez duymuş oldu. Bu eskisinden daha fazla ses getirdi; çünkü bu bilim insanlarından bazıları, görmüş olduğumuz gibi, gerçek kimyasal sistemlerle ilişkili olabileceğini asla düşünmemiş olsalar da Turing'in çalışmasından zaten haberdarlardı. Belousov, Turing'in aksine, keşfinin devralındığını görebilecek kadar uzun yaşamasına rağmen bu tür tepkimelerin önemi tam olarak anlaşılamadan 1970'te hayata gözlerini yumdu.

Şaşırtıcı olmayan biçimde, Zhabotinsky'nin çalışmasını alıp BZ tepkimesinde görülen türdeki salınımları açıklamaya yönelik bir teorik model geliştiren ilk bilim insanlarından biri Ilya Prigogine'ydi. Prigogine'yle Turing'in 1952'de İngiltere'deki tanışmalarında kısa bir süre önce örüntü oluşturmanın kimyası üzerine bir makale yazmış olan Turing, onunla bu çalışmasını tartışmıştı. İlerleyen yıllarda Brüksel'de meslektaşı René Lefever ile çalışmakta olan Prigogine, Turing'in çalışmasını bir kenara bıraktıktan sonra, 1968'in sonlarına doğru, iki kısa-ömürlü ara ürünün yer aldığı çok-aşamalı bir süreç içerisinde iki kimyasal maddenin diğer iki kimyasal maddeye dönüştürüldüğü bir model ileri sürdü. Turing'in nasıl nokta oluşturulduğunu açıklayan modelinden sadece biraz daha karışık olsa da, Brusselator[14] olarak tanınan bu modelin işleyişinin ayrıntılarına girmemize gerek yok. Yine de, önem taşıyan nokta olan, tepkimelerde geri-bildirim ve doğrusal-olmamanın rol oynadığını söylemekte fayda var. Tepkimeler zincirinin ürünlerinin sırayla kırmızı ve mavi olduğunu hayal edersek, karışım kayıp bir halde dengeden yeterince uzakta tutulduğu, eklenen hammaddeler sabit şekilde beslendiği ve son-ürünler uzaklaştırıldığı sürece, Brusselator bize sistemin, termodinamiğin ikinci yasasına körü körüne inanan birinin bekleyeceği yönde eş dağılımlı mor rengine yerleşmek yerine düzenli olarak kırmızı ile mavi arasında gidip geleceğini söyler. Tüm süreç, Prigogine ve meslektaşları tarafından halihazırda geliştirilmiş, ikinci yasanın dengeden uzak koşullarda nasıl düzeltilmesi gerektiği anlayışıyla gerçekten de uyuşur.

1970'lerde, kendini-düzenleme vasıtasıyla kendiliğinden oluşturulmuş yapıya sahip gerçek kimyasal sistemlerin hem araştırılması hem de modellenmesi açısından ilerleme kaydedildi. İşin deneysel tarafındaysa, kimyacılar kısa bir süre sonra kimyasal karışımlar içerisinde renk dalgalarının ilerlemesini sağlayan yöntemler buldular. BZ tepkimesini örnek verecek olursak, uygun kimyasal karışımın sığ bir kapta ısıtılmasıyla, kaynaklarından dışa doğru ilerleyen eşmerkezli kırmızı ve mavi renkli çember ve spiraller yaratmak mümkündür. Bunu takip eden yaklaşık yirmi yıllık süreç içerisinde gerçekleştirilen benzer deneylerde geliştirilmiş muazzam örüntüler çeşitliliği arasında, kimyacılar nihayet 1990'larda, tıpkı Turing'in orijinal tanımındaki gibi *hareketsiz* nokta örüntüleri üretmenin bir yolunu buldular. BZ tepkimesinin ayrıntılı kimyası 1970'li yılların başında Oregon Üniversitesindeki bir ekip tarafından araştırıldı. Bu ekip aynı zamanda, Brusselator'daki gibi bazı kısa-ömürlü aracılar da dahil olmak üzere, tüm renk değişimlerini meydana getiren birbiriyle kenetli kimyasal zincirlerde yer alan en az otuz farklı kimyasal türünü tanımlayan ekipti. Bu çalışmalar sonucunda 1974'te, BZ sürecindeki kilit aşamaları, otokatalizin hayati önem taşıyan etkisini de dahil

[14] Brusselator, Brussels [Brüksel] sözcüğünden türetilmiştir –çn.

ederek, beş farklı bağımsız aşamada birbirleriyle etkileşim içerisinde olan sadece altı çeşit kimyasal bağlamında açıklayan bir model ileri sürdü. Bu model ile hem Turing'in modeli hem de Brusselator'un modeli arasındaki fark şuydu: Sonrakiler A, B vs diye etiketlenmiş varsayımsal maddelerle ilgilenirken, Oregon ekibinin modeli fiili kimyasal tepkimelerde yer alan gerçek kimyasal bileşenlerle ilgileniyordu. Model, Oregonator olarak tanındı. Dediğimiz gibi, derinlere inmemize gerek yok; ancak şunu söyleyebiliriz ki buradaki ana fikir, anlaşılması güç bir kendini-düzenleme örüntüsü gibi gözüken bir şeyin, birkaç basit etkileşim bağlamında açıklanabildiğidir.

Konu bu kadarıyla sınırlı değildir. BZ karışımını değişmeyen, eş dağılımlı bir hale geleceği biçimde düzenlemek sahiden de mümkündür. Yeni hiçbir bileşen eklemeden yeteri kadar beklerseniz, karışım son olarak tamamen kendiliğinden durulacaktır. Şimdi bir miktar daha tepkiyen eklediğinizdeyse bahsetmiş olduğumuz salınımlı davranış başlar. Böylelikle sistem bir periyotlu halden iki periyotlu hale geçmiş ve bir çatallanma meydana gelmiştir. Sonrasında bizi ne beklediğini tahmin edebilirsiniz. Yeni bileşenlerin sisteme akış hızını ve "artık ürünler"in uzaklaştırılma hızını giderek artırırsanız, kritik bir eşikte sistemin dört periyotlu hale çatallanmasıyla birlikte, salınımlı örüntü çift ritim sergileyerek daha karışık bir hale gelir. Tepkiyenlerin akışı hızını artırmaya devam ettiğinizdeyse, su damlatan musluktan ve öncesinde bahsettiğimiz diğer örneklerden aşina olduğumuz periyot katlamanın peşi sıra basamakları tüm görkemiyle belirir, periyodik örüntünün belirginliği azalır ve sistem eşiğin öbür tarafına atlayarak kaosa geçer. (Bu durumda, sözü edilen süreç daha hızlı işler; çünkü periyot dörtten sonra her şey adeta bir telaş içerisinde gerçekleşir.) Kendini-düzenleme ve eş dağılımlı sistemlerden kendiliğinden örüntüler doğması başta olmak üzere, açıkladığımız tüm ilginç şeyler kaosun eşiğinde gerçekleşir. Tüm bunlar, tıpkı daha önce ele almış olduğumuz örneklerde olduğu gibi faz uzayı, limit çevrimleri ve çekiciler dilinde de açıklanabilir. Bir BZ tepkimesinin gelişimini açıklayan, faz uzayında güzergâhlarla ilişkili tuhaf çekiciler bulunduğuna dair delil bile vardır.[15] Tüm bunların, hikâyemizin buraya kadarki bölümüyle ilişkilendirilişini görmek güzel olsa da Turing'in (embriyolojinin, büyüyen embriyodaki örüntü ve şekil gelişimini ele alan bir yanı olan) morfogenez sürecine kavrayış sağlama ümidinden epey uzaklaşmış gibi duruyoruz. Bu bakımdan, bulunmamız gereken yere dönelim ve Turing'in fikirlerinin, bir embriyonun kapsamlı gelişimine yönelik asli bir katkı olduğu henüz ispatlanmamış olmasına karşın (yine de bu konuya yönelik çalışmalar sürmektedir), çarpıcı ve açıkça görülür biçimde başarılı olduğu belirli bir alan olduğunu belirtelim.

Turing mekanizmasının bu zaferi, memelilerin deri ve postlarında gelişen çizgi ve noktalar gibi izlerin yanı sıra daha genel anlamda diğer hayvanların yüzeylerindeki örüntülerin nasıl biçimlendiğiyle de ilgilidir. İlk olarak Oxford Üniversitesinde, ardından Seattle'daki Washington Üniversitesinde çalışan James Murray bu araştırmaya büyük ölçüde katkıda bulundu. Murray, 1988'de *Scientific American*'da yayımlanan "How the Leopard Gets Its Spots"[16] başlıklı, okunabilirliği yüksek bir makalede keşiflerinin çoğunu bir araya topladı. (Bu çalışmanın tamamı, kitabı *Mathematical Biology'de* nispeten daha teknik, ama daha az okunabilir haliyle görülebilir.) Murray, yalnızca leoparın noktalarının değil, bir zebranın çizgilerinin, bir zürafanın üzerindeki iri lekelerin ve hatta bir fare veya filin postunda örüntüleniş olmamasının, kritik bir evredeki, gelişmekte olan embriyonun yüzeyindeki çalıştırıcı ve inhibitör kimyasalların difüzyonunu içeren aynı basit süreç vasıtasıyla açıklanabileceğini buldu. Örüntüleniş sürecinin kesin olarak bu şekilde işlediği henüz kimse tarafından kanıtlanmış değil; ancak bu tür bir örüntüleniş sürecinin iş başında olduğu varsayıldığında, oluşacak örüntü çeşitlerinin bunlar olacağı kesinlikle doğrudur. Bu fikrin, özellikle basitliğinden kaynaklanan muazzam bir cazibesi vardır. Bir düzeyde,

---

15 Bu buluş, Austin'deki Texas Üniversitesi bünyesindeki bir ekip tarafından 1983 yılında gerçekleştirildi. İleride, "Turing Noktası" örüntüsünü oluşturan ilk bilim insanlarından biri olacak Harry Swinney de bu ekibin bir üyesiydi.

16 "Leoparın noktaları nasıl oluşur?" Cilt 258, sayı 3, s. 80.

DNA kodunun tek bir bireyin bedeninin inşasını tanımlaması bağlamında, fiilen "gelişimin şu aşamasında şu iki kimyasalı sal" komutunu veren bilginin saklanması, erişkin bedendeki her nokta ve çizginin kesin konumunu eksiksiz olarak tanımlayan gerçek anlamdaki bir taslaktan çok daha az yer (bilgisayar benzetmesi kullanıldığında daha az hafıza) kaplar. Diğer bir düzeydeyse, farklı hayvanların bedenlerinde farklı türde örüntülerin neden ve nasıl ortaya çıktığını ve bazı hayvanların neden hiç örüntüye sahip olmadığını açıklayan tek bir basit mekanizmanızın olmasını, her farklı hayvan türündeki her farklı örüntü türünü tanımlayan farklı birer taslağa sahip olmaya tercih edersiniz. İleride de göreceğimiz gibi, orijinali Turing tarafından ileri sürülen ve Murray ile çağdaşları tarafından masaya yatırılan basit mekanizma çeşidi, evrimin mekanizmalarına yönelik önemli kavrayışlar sağlar. Bilimde bir problemin en basit çözümünün, onun kesin doğru çözümü olduğu *her zaman* için doğru değildir. Yine de, Ockham'ın Usturası[17] olarak bilinen bu yaklaşım, çoğu koşul için son derece güvenilir bir pratik yöntem teşkil etmiştir ve ortada aksini gerektirecek baskın bir neden bulunmadığında en basit çözümü seçmek kesinlikle her zaman için akla yatkındır. Bu durumda da, yap-boza yönelik en basit çözüm Turing sürecidir.

Memelilerin bedenlerinin yüzeylerinde gördüğümüz örüntüler ya deri renkleri ya da postlarındaki tüylerin derinin belirli bir bölgesinden uzadıkça edindiği renklerdir. Her iki koşulda da renk, derideki bir şeyin varlığı ile belirlenir. Bir tekir kedisindeki izlerde, şaşırtıcı biçimde bu renklerin pek azı –siyah, beyaz, kahverengi renkleri ve turuncu-sarıdan oluşan bir renk yelpazesi– yer alır ve bu yelpazenin hemen hemen tamamı izlerde mevcuttur. Renkler derideki hücreler tarafından üretilen iki pigmentin mevcut veya eksik olmasına, renklerin yoğunluğu ise her pigmentten ne kadar bulunduğuna bağlıdır. Bu pigmentlerden eumelanin siyah veya kahverengini verirken, feomelanin sarı veya turuncu rengi verir. Hiçbir melanin

---

17 Yaklaşıma, "olgular gerekmediği takdirde çoğaltılmamalıdır." diyen İngiliz mantıkçı ve felsefeci Ockham'lı William'ın (yaklaşık 1285–1349) adı verilmiştir.

bulunmaması durumundaysa tüy veya deri beyaz kalır. Peki belirli hücrelerin "çalışır halde" olup melaninlerin hangi çeşidinden ne miktarda üreteceğine karar veren nedir? Murray'in başarısı, tam olarak hangi kimyasalların yer aldığını henüz bilmememize karşın gerçek, canlı hayvanlarda gördüğümüz örüntülerin tam olarak (ve yalnızca) Turing tepkimeleri vasıtasıyla üretilecek olan örüntüler olduğunu ortaya koydu. Hatırlayacağınız gibi, Turing tepkimelerinde, embriyonun gelişiminin ilk evresi olan ana rahmine düşüşle başlayan birkaç haftalık süreç içerisinde gerçekleşen, büyümekte olan embriyonun yüzeyi üzerindeki bir çalıştırıcı ve bir inhibitörün difüzyonu yer alıyordu. (Örneğin toplam 360 gün gebelik dönemi yaşayan zebrada, derideki örüntülerin tohumunun, ana rahmine düşüşten yaklaşık 21-35 gün sonra atıldığına dair delil mevcuttur.) Bu kimyasallardan birinin mevcut oluşunun, aynı zamanda, daha sonra bir hücrenin melanin üretebilme becerisini çalışır duruma getirmesi halinde ortaya çıkacak sonuç, BZ tepkimesinin sığ-kap versiyonlarındakine denk bir örüntünün, o hücrelere görünmez biçimde damgalanması olacaktı. Ne var ki bu örüntüler yalnızca, başka herhangi bir kimyasal tetikleme (veya tüyün uzaması) melanin üretilmesini söyleyen bir mesaj yolladığı zaman yaşamda kendini gösterecekti. Bu mesajsa derideki tüm hücreler tarafından alınacak, ancak yalnızca Turing tepkimeleri esnasında belirlenmiş hücreler tarafından eyleme geçirilecekti.

İşin özeti olarak, sözü geçen biyokimyasal süreçler hakkında fazla kafa yormadan, Murray'in yapması gereken "tek" şeyin, farklı gelişim evrelerindeki memeli embriyolarınınkine benzeyen yüzeylerde Turing tepkimesi sonucunda oluşan örüntülerin hangi yollarla şekillendiğini tahmin etmekte kullanılabilecek matematiksel bir model geliştirmek olduğunu söyleyelim. Sürecin yüzeyler üzerinde (veya içerisinde) hareket eden dalgalar içermesi sebebiyle, yüzeyin hem büyüklüğü hem de şekli, tepkime tarafından üretilen örüntüyü etkiler. Murray'in dikkat çektiği gibi durum, bir davulun gergin zarından çıkarılan seslerin davul zarının büyüklüğüne ve şekline bağlı olmasına görünüşte bir hayli benzer; çünkü farklı büyüklükteki ses dalgaları (başka bir deyişle, farklı müzik notaları anlamına gelen farklı dalga boylarındaki ses dalgaları) belirli bir düzen çerçevesinde farklı büyüklükteki zarlara sığar. (İki sistem arasında gerçekten oldukça yakın bir matematiksel benzetme bulunsa da yer alan fiziksel süreçler çok farklıdır.) Murray, Turing tepkimesinin tetiklendiği anda yüzeyin çok küçük olması halinde hiçbir örüntünün oluşamayacağı sonucuna vardı. Bu şu manaya gelir: Mekanizmanın işleyişe geçebilmesi için yeterli yer yoktur veya diğer bağlamda düşünmek isterseniz, tepkimeyle ilişkili "dalga boyu" zarın boyutundan büyüktür ve dolayısıyla örüntü görülemez. (Duvarda kullanılmak üzere tasarlanmış bir boya rulosu kullanarak küçük bir tuval üzerine narin hatlar çizmeye çalışmak buna benzetilebilir.) Diğer uç nokta olan, görece büyük yüzeylerin işe dahil olduğu yerde etkileşimler, kapsamlı herhangi bir örüntünün oluşmasına izin vermeyecek denli karışık duruma gelir. Bu, sanki aynı anda farklı birçok konuşma yapılan bir odada ortaya çıkan eş dağılımlı bir curcunaya benzer. Aslında, büyük yüzeylerde çok hassas ölçekli bir "örüntüleniş" bulunması mümkündür. Örneğin yeterince yakından baktığınızda bir filin yüzeyindeki bütün tüylerin tamı tamına aynı renk olmadığını görürsünüz; ancak uzaktan bakıldığında fil eş dağılımlı bir renktedir. Bu, tıpkı puantilist[18] bir resmin içerisindeki, biraz uzaktan bakıldığında eş dağılımlı bir rengin içine karışan çok hassas yapıdaki renk noktalarına ya da tıpkı çene çalan insanlarla dolu bir odada tüm gürültüye rağmen komşunun ne dediğini çıkarabilmemize benzer. Dolayısıyla modele göre, hem çok küçük hem de çok büyük memeliler doğada tam olarak karşılaştığımız gibi örüntüsüz yüzeylere sahip olmalıdır. Peki ya bu uç noktaların arasında neler meydana gelmektedir?

Boyut bakımından küçükten başlayıp büyüğe doğru ilerlersek, oluşabilecek ilk örüntü çeşidi oldukça geniş şeritlerden

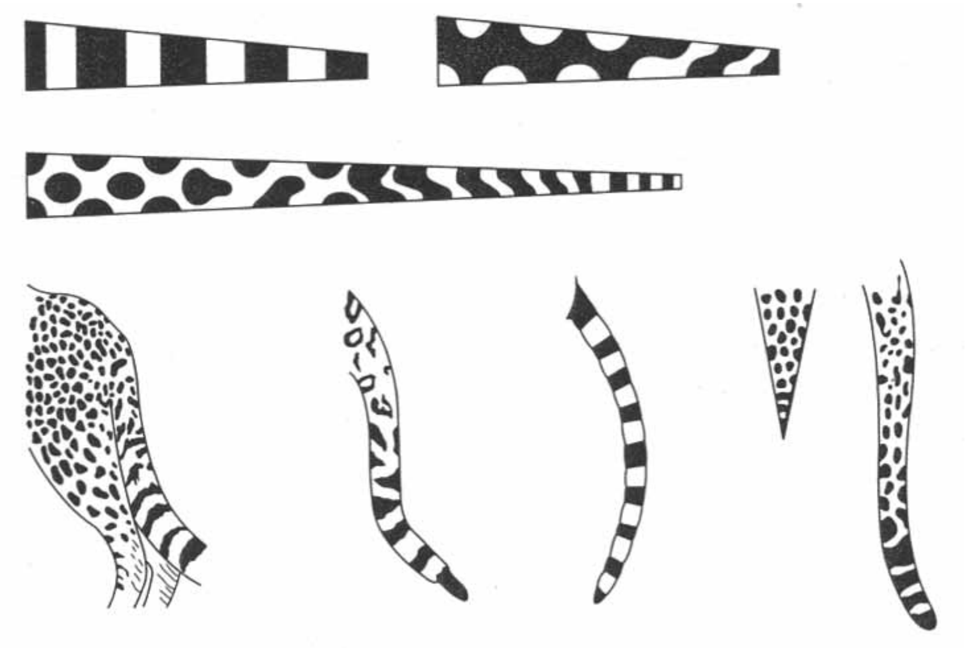
---

[18] Puantilizm [noktacılık] tekniğiyle yapılan resimlerde, çok sayıda ufak temel renk noktasının birbiriyle karıştırılmadan bir araya getirilmesiyle izleyicinin gözünde çeşitli ara renklerin yanılsaması oluşturulur –çn.

meydana gelir, sonrasında sırasıyla çizgiler, noktalar ve sınırları aralarındaki dar çubuklarla bölünmüş iri lekeler görülürken daha büyük yüzeylerde lekeler yine eş dağılımlı bir renk içerisine karışıp kaybolur. Oluşturulan bu örüntülerin tümü, doğada görülen örüntüler yelpazesini bir hayli andırır. (Yine küçükten büyüğe doğru gidildiğinde leoparın noktaları, bir zebra veya bir kaplanın çizgileri ve bir zürafanın lekeleri gibi.) Murray konuyu kitabında şöyle özetler:

> Modelin oluşturduğu örüntüler ile hayvanların geniş çeşitliliğinde bulunan örüntüler arasında hayrete düşüren bir benzerlik olduğunu görüyoruz. Simülasyonlarımızdaki parametrelere getirdiğimiz sınırlamalara rağmen, muhtemel örüntülerin zenginliği dikkate değerdir. Örüntüler tepkime bölgesinin geometri ve ölçeğine fazlasıyla bağlı olsa da, daha sonra büyüme halinde başlangıçtaki örüntüde çarpıklık meydana gelebilir... Tek bir mekanizmanın, memelilerin postlarındaki gözlemlenmiş tüm örüntüleri oluşturabileceği fikri oldukça cazip bir fikirdir.

Gelgelelim elbette ki bir hayvanda, örüntü oluşumunu mümkün kılan biyokimyasal bir mekanizma bulunsa dahi, bir örüntü yer almak *zorunda değildir*. Mekanizmanın çalışır durumda olmama ihtimali her zaman mevcuttur. Bununla birlikte, örneğin bir kutup ayısının neden eş dağılımlı beyaz renge sahip olması gerektiğine dair bariz evrimsel gerekçeler vardır. Diğer yandan, örüntülerin gelişmiş olduğu yerlerde, örüntü çeşidi ile müsait yüzeyin boyutu arasındaki bağıntıya dair çok düzgün bir örneğe kedi ailesinin çoğu üyesinin kuyruğunda rastlanabilir. Aşağı yukarı silindirik vaziyetteki kuyruklarda bulunan örüntüler, noktalar veya kuyruğu çevreleyen dairesel şeritler ya da çizgiler şeklinde olabilir. Jaguarınki gibi uca doğru sivrilen kuyruklar içinse, alt kısım noktalarla kaplı olsa bile uç kısım çizgili şeritlerle bezelidir. Bu örnek, modelin; daha küçük alanlarda şeritlerin, daha büyük alanlarda ise noktaların oluşacağı tahminiyle aynı doğrultudadır.



Şekil 4.2 *Bir hayvanın bedeninde bulunan, bir embriyonun gelişimi esnasında meydana gelen kendi kendini düzenlemiş kimyasal süreçler tarafından üretilmiş örüntüler (aşağıda) o hayvanın boyutuyla ilişkilidir. Kimyasal difüzyon süreçleri daha küçük alanlarda çizgiler üretirken, daha büyük alanlarda noktalar üretir.*

Modelin önemli özelliklerinden bir diğeri, bir hayvanın yüzeyinde oluşan örüntü çeşidinin, erişkinin boyut ve şekline değil, Turing sürecinin iş başında olduğu esnada embriyonun boyut ve şekline bağlı olduğudur. Erişkinin boyutuyla da bir miktar bağıntı olduğu açıktır; çünkü ana rahmine düşüşten kısa bir süre sonrasından itibaren fil embriyoları, fare embriyolarının aynı gelişim evresinde olduklarından daha büyük olma eğilimindedir. Gelgelelim iki farklı zebra türü olan *Equus burchelli* ve *Equus grevyi*'deki çizgilerin arasındaki farklılıklar embriyo boyutunun öneminin altını güzel bir biçimde çizer. İlk türün, diğerine oranla daha seyrek ve daha geniş çizgileri vardır. Bu yüzden, bu iki farklı zebra türünü yan yana getirdiğinizde, erişkin boyutları aşağı yukarı aynı olsa bile belirgin bir şekilde birbirinden farklı durur. J. B. L. Bard, her iki zebra için, çizgi sayılarını sayarak ve hayvanın büyümesinin örüntülerde yol açtığı çarpıklıkların nasıl meydana gelmiş olduğunu hesaba katarak, *burchelli*'nin üzerinde görülen örüntülerin tohumunun embriyo yirmi bir günlükken, *grevyi*'nin üzerinde görülen örüntülerin tohumunun ise embriyo 5 haftalıkken atılmış olması gerektiğine işaret etti. Murray, Turing etkisinin matematiksel modelini ileri sürmeden önce de bu biliniyor olmasına rağmen, –çalıştırıcı ve inhibitörün embriyo yüzeyi üzerindeki difüzyonunun daha erken gerçekleşmesinin, daha geniş çizgilere karşılık geliyor oluşundan dolayı– farklılıklar, modelin tahminleriyle tamı tamına uyuşuyordu. Genetik ve çevrenin ("doğa" ve "yetişme"nin) bu şekilde birleştirilmesinin çarpıcılığına 2002 yılı başında, klonlanan ilk kedinin dünyaya geldiği haberinin yayınlanmasıyla dikkat çekildi. Çok-renkli hayvanlardaki renk örüntülerinin, onların genetik mirasları ile (gelişmekte olan embriyonun aldığı besin miktarı gibi) rahimde meydana gelen olayların birleşiminin bir sonucu olması nedeniyle, yavru kedinin kürkündeki örüntü izleri, özdeş DNA'lara sahip olmalarına rağmen annesindekilerin tamı tamına aynısı değildi.

Bu değindiklerimiz, aynı zamanda tüm bunların evrim anlayışımız için ne kadar önemli olduğunu bize hatırlatır. İki zebra türündeki örüntülerin arasındaki gözle görülür farklılıklar sadece, embriyoda Turing etkisinin iş başında olduğu zamanın değiştirilmesiyle meydana getirilir. Bu belirli durumda, iki örüntü de bildiğimiz kadarıyla evrimsel bir üstünlüğe sahip değildir. (Anatominin her özelliği uyumsal olmak zorunda değildir.) Yine de biz daha ince (veya daha kalın) çizgilere sahip olmanın –belki de daha iyi kamuflaj sağlama açısından– bir üstünlük sağladığını varsayalım. Bu varsayım çerçevesinde, –hayal edilebilecek en küçük "mutasyon"lardan biri sayılabilecek– embriyonun gelişim esnasındaki belirli bir olayın *zamanlamasının* değiştirilmesi dışında başka hiçbir değişiklik yapılmadan, bireyler arasındaki doğal çeşitliliklerin, seçilim baskısına cevap verecek hammaddeyi nasıl sağlayabileceğini ve bir zebra türünün tüm popülasyonunu o doğrultuda nasıl değiştirebileceğini kavramak kolay olurdu. Kitabımızın kalan kısmında evrim hakkında söyleyeceğimiz daha birçok şey olacak; ama gerekli zemini hazırlamak adına, dış görünüşün basit kimyasal süreçlerin kontrolü altındaymış gibi gözükmesi hakkındaki birkaç örneğin daha altını çizmekte yarar var. Murray'in, memelilerin izlerini nasıl aldıkları modelinin, bu model türünün ilklerinden olması ve Turing mekanizması ile BZ tepkimesi tartışmamıza doğal bir ilerleme sağlaması sebebiyle bir nebze ayrıntısına girdik. Gelgelelim çalışma prensipleri birbirine çok benzediğinden, bu diğer modellerin ayrıntısına inmemize hiç gerek yok.

Daha ileride yer vermemiz gereken evrim tartışmamıza geçmeden, öncelikle Darwinci doğal seçilim sürecinin kısa bir özetini yapmak muhtemelen faydalı olacaktır; çünkü evrim ve doğal seçilim arasındaki ilişki oldukça kafa karıştırıcıdır. Evrim, hem canlı organizmalarda hem de fosil kayıtlarında iş başında olduğu görülen bir süreç, bir gerçekliktir.[19] Aynı şekilde, elmanın ağaçlardan düşüşü ve ayın dünyanın çevresindeki yörüngesini takip edişi de birer gerçekliktir. Elmanın ve ayın (ve diğer şeylerin) hareketi kütleçekim teorisiyle açıklanır. Newton'un teorisi çoğu insan ihtiyacı için yeterliyken, çökmüş yıldızlar gibi uç olgularla uğraşıyorsanız Einstein'ın teorisi uygundur. Evrim Darwin'in doğal seçilim teorisiyle açıklanır. Bu teori bugün dünyadaki çoğu amaç için uygundur; ancak tıpkı Newton'un teorisi gibi, zamanında fikir babası için bilinmez olan şeyleri hesaba katmak amacıyla bu teori üzerinde de değişiklikler yapılmıştır. Newton'un teorisi kütleçekim için ne ifade ediyorsa, Darwin'in teorisi de evrim için aynı şeyi ifade eder; ancak Einstein'ın kütleçekimin bir evrimsel karşılığı, diğer bir deyişle Darwin'in teorisinin ötesine taşarak bugün bilinen tüm gerçeklikleri bünyesinde barındıran eksiksiz bir evrim teorisi –Darwin'in teorisinde nasıl değişikliklerin yapılması gerektiği hakkında çeşitli öneriler ileri sürülmüş olsa da– henüz elimizde yoktur. Darwin'in teorisinin esası, evrimsel teori anlayışımızın nüvesinde yer alır ve yavrunun ebeveynlerine olan benzerliğinin kusursuz olmadığını, dolayısıyla hem nesilden nesle hem de her nesildeki bireyler arasında çeşitlilikler bulunduğunu söyler. (Bir parçanın, ait olduğu yap-boza uyması gibi.) Çevrelerine en iyi uyan bireyler besin

[19] Günümüzde evrimin iş başında görüldüğü örnekler içerisinde en sevdiklerim "süper-mikrop"ların antibiyotiklere, bitki zararlılarınınsa böcek ilaçlarına karşı nasıl direnç geliştirmiş olduklarıdır.

bulma, çiftleşme ve –hayati önem taşıyan– üreme açısından en başarılı olanlardır. Bu bireyler böylelikle yeni nesle daha çok yavru aktarır. Bu yavrular da ebeveynlerini andırdıklarından, ebeveynlerini başarılı kılan belirli özellikleri kalıtım yoluyla edinir; ama bu edinim muhtemelen ufak farklılıklarla gerçekleşir. Sonraki nesiller için de bu böyle devam eder.

Bu, her nesildeki en uyumlu olanın seçildiği bir doğal seçilim sürecidir. Klâsik örneğe göre ağaçların tepelerindeki sulu meyvelere erişebiliyor olmak bir avantajsa, uzun boyunlu otçullar hayatta kalma mücadelesinde daha başarılı olup daha fazla yavrulayacakken, daha kısa boyunlu otçullar daha az besine erişerek yavrulamakta daha fazla zorluk çekeceklerdir. Uzun veya kısa boyunluluk eğiliminin kalıtım yoluyla edinildiği, ancak bireyler arasında hâlâ çeşitlilikler bulunduğu (ortalama ne olursa olsun, bazı boyunlar ortalamadan daha uzun veya kısadır) takdirde, uzun boyunluların lehine olan seçilim baskısı, nesiller geçtikçe zürafa gibi bir canlı varlığın evrilmesine yol açar. Çeşitlilik yaşamın yalnızca baharatı olmakla kalmaz, aynı zamanda yaşamın işleyişinin tam kalbinde yatar. Darwinci teori, canlı türlerinin ekolojik nişlerine –bir anahtarın kilidine uyduğu gibi– fevkalade uygun olması gerektiğini çok güzel açıklar. Diğer yandan teorinin, seçilim bağlamında evrimsel açıdan nötr olan ve ait olduğu bireye ne avantaj ne de dezavantaj bahşeden özelliklerin var olmasına alan sağladığını kavramak da önemlidir. Bunlara örnek olarak, bazı alelade salyangozların kabuklarındaki çizgili örüntülerde görülen çeşitlilikleri verebiliriz. Bu salyangozlar aynı türden olmalarına rağmen birbirlerinden çok farklı gözükebilir. Hatta bu farklılık, aynı türden olmayan bir *burchelli* zebra bireyiyle bir *grevyi* zebra bireyi arasında gözüken farklılığın çok daha ötesinde bile olabilir. Artık, yeteri kadar üzerinde durduğumuz evrimin temellerini bir kenara bırakıp hikâyemizde ilerleyebiliriz.

Murray'in, Turing mekanizması tarafından oluşturulan çizgiler ve noktalar üzerindeki çalışmasından bu yana, doğaya ait örüntülerin daha birçoğu Murray ve diğerleri tarafından aynı usulle araştırılmaya devam etti. Bu araştırmaların, üzerinde durduğumuz hikâyeyi en yakından ilgilendirenlerinden birini, Tübingen'deki Max Planck, Gelişim Biyolojisi Enstitüsünde çalışan Hans Meinhardt ve meslektaşı André Koch yürüttü. Murray'inkine benzer ancak Turing tepkimesi yerine BZ tepkimesi mekanizmasını temel alan bir yaklaşım kullanan bu ikili, embriyonun gelişimi dahilindeki uygun bir zamanda, embriyo zarı üzerinde rastgele yerlerde bir çalıştırıcının tetiklenmesiyle, (bir leoparın üzerindeki noktalara karşılık gelenler de dahil) canlılardakilere bir hayli benzer örüntülerin matematiksel modellerinde üretilebileceğini keşfetti. Bu belirli model, temelinde yatan kimya çok basit olmasına rağmen daha karışık örüntüler üretebildiğinden avantajlıdır. Deniz canlılarının kabuklarındaki örüntüler de çalıştırıcı ve inhibitör bileşenleri içeren bazı kimyasal süreçlerden üretmelerini bekleyeceğimiz örüntülerle eşleşir ve çoğu biyolog bu sürecin iş başında olduğu bir canlı türü bulmuş olabileceğine inanmaktadır. *Pomacanthus imperator,* diğer adıyla keler balığının erişkininde, balığın kafasından kuyruğuna dek boylu boyunca uzanan paralel çizgiler bulunur ve balık büyüdükçe bu çizgilerin yenileri oluşur. Büyüme esnasında çizgilerin her birinin büyüklüğü aynı kalırken çizgileri birbirinden ayıran boşluklar da sabit kalır. Yeni çizgiler, tıpkı bir noktalar kümesinde çatallanan tek bir tren rayının dallanıp birbirine paralel iki yol oluşturması gibi, önceki çizgilerin bazılarında bulunan çatallardan gelişir. 1990'larda Kyoto Üniversitesinde çalışmakta olan Shigeru Kondo ve Rihito Asahi tam olarak bu davranış örüntüsünü Turing mekanizmasını kullanarak yeniden üreten bir matematiksel model geliştirdi. Bu, Turing sürecinin ta kendisinin, embriyonik gelişme esnasında tek seferde gerçekleşmiş bir olay olmaktan ziyade, bu erişkin balıklarda hâlâ gerçekleşiyor olduğunu öne sürer ve söz konusu süreçte yer alan mevcut kimyasalların yakında teşhis edilebileceğine yönelik ümidi artırır.

Benzer modeller kelebeklerin kanatlarında oluşan örüntüleri taklit etme amacıyla da kullanılmıştır. Birazdan değineceğimiz konuyla ilişkili olması sebebiyle, böyle daha birçok uygulama arasından bu örneği seçmek yerinde olacaktır. Murray, yüzeysel olarak gözleri andıran iri noktaların oluşumu da dahil olmak üzere, bu kanat örüntülerinin çoğu özelliğini üreten mekanizmalar üzerinde çalıştı. (Bu noktaların evrim vasıtasıyla seçildiği düşünülür; çünkü bir avcı, kelebeğe kısa bir bakış attığında, leziz bir yemektense daha büyük bir yaratığa ait bir çift gözün kendisine baktığını sanabilir.) Bu çalışmanın bir yönü, bu gibi örüntülerin, kelebeğin genetiğinde saklanan karışık bir taslağa gerek kalmadan, temel kimyayla kolaylıkla üretilebileceğini ve böylelikle bu tür bir özelliğin evrim vasıtasıyla seçilmesinin gerçekten ne kadar olası olduğunu gösteriyordu. Öte yandan model, mahsus bu durum için, ilgili kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği şartların aşama aşama değişmesi halinde, göz noktası örüntüsünün asli bir özelliği olan yarıçapının da aşama aşama değiştiğini söylüyordu. Örneğin bir sıcaklıkta gelişen kelebekler belirli boyutta göz noktalarına sahip olurken, farklı bir sıcaklıkta gelişen kelebekler farklı boyutta göz noktalarına sahip oluyordu ve noktalarla sıcaklık arasında devamlı ve düzgün bir bağıntı ortaya çıkıyordu. Buna sadece yorum getirmekle yetinelim; çünkü sözünü etmekte olduğumuz temelde yatan kimya çeşidinin doğurabileceği tek davranış örüntüsü bu değildir. Bazı süreçlerde, tepkimelerin gerçekleştiği ortamda meydana gelen küçük değişiklikler kritik bir noktaya erişilene kadar büyük bir etkiye neden olmaz. Süreç, bu kritik nokta aşıldığında aniden yeni bir işleyiş fazına geçer. Murray'in atıfta bulunduğu, bu şekilde hassas bir süreci ele alan bir örnek, omurgalı uzuv üzerinedir. Parmakların büyümekte olduğu gelişim evresinde yer alan biyokimyasal süreçler ufak çapta sekteye uğratıldığında ortaya çıkan sonuç, biraz büyük veya küçük bir el değil altı parmaklı bir eldir. Bu, gelişim sürecinde küçük bir değişime yol açan bir mutasyon (bir genin DNA kodunun maruz kaldığı, bir kopyalama hatasından kaynaklanabilecek küçük bir değişiklik) vasıtasıyla doğal yollarla meydana gelebilir. Değişikliğe uğrayan DNA, sonrasında, mutasyon zararlı değilse alt nesillere aktarılacaktır. Aileler içerisinde bu tip özelliklerin devamlılığını sürdürmeye meyilli olması bundan kaynaklanır. 8. Henry'nin eşlerinden biri olan ve bir elinde altı parmakla dünyaya gelen ancak bunlardan biri çabucak kesilen Anne Boleyn'in ailesi için bunu söyleyebiliriz. Gelişim biyologları arasında ünlü olan, konuya ilişkin başka bir örnekteyse bir çeşit çift eli olan Boston'lu bir adam rol alır. Adamın elinde başparmak yoktur ve başparmağın bulunması gereken yerin iki yanında, birinde üç, diğerinde dört parmak bulunan iki küme halinde dizilmiş yedi parmak vardır. Bir uzuv tomurcuğundan diğerine hücre nakledilmesiyle de benzer yapılar meydana getirilebilir.[20] Ayrıca bu yapılar uygun modeller (Turing mekanizması gibi kaosun eşiğindeki kayıp sistemlerde meydana gelen süreçleri açıklayan modeller) aracılığıyla matematiksel olarak açıklanabilir. Burada üzerinde durmamız gereken nokta şudur: Çevredeki küçük değişiklikler ya da küçük mutasyonlar, gelişmekte olan vücut üzerinde bazen büyük etkilere yol açabilir. Bu, Darwin'e yaşadığı dönemde bilinmez olan görece yeni şeylerden biri olmakla birlikte evrimin işleyişinin içyüzünü daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Gelgelelim diğer koşullar altında aşama aşama değişimin söz konusu olduğunu hatırlamamız gerekir. Murray'e göre:

> Odaklandığımız belirli örüntüleme özelliği ve mekanizmaya bağlı olarak, şekilde adım adım veya kesikli değişim meydana gelir ... evrimin nasıl gerçekleştiğini anlamanın yolunun, ilgili morfogenetik süreçlerin anlaşılmasından geçtiği apaçıktır.

Aslına bakarsanız morfogenez konusunu daha fazla didiklememizin lüzumu yok. Bu tartışmayı geride bırakırken beraberimizde götürmemiz gereken, morfogenez ve evrimsel biyolojide küçük etkilerin bazen küçük, bazen de büyük değişikliklere yol açabileceği –ve bunun, çok basit bir kimyayı kapsayan örüntü-oluşturma modelleri bağlamında, prensipte anlaşılabileceği– bilgisidir. Küçük ve rastlantısal değişikliklerin aynı zamanda dünyanın tümünde de, özellikle kaosun eşiğindeki kayıp sistemler konu olduğunda büyük veya küçük etkilere yol açabileceği –ve bunun neden ve nasıl gerçekleştiğini anlamakla, hem yaşamın ta kendisinin hem de zekânın ortaya çıkışına yönelik daha iyi bir anlayış sağlanacağı– da ortaya çıkar.

---

20 Lewis Wolpert ve meslektaşları Londra'da civcivleri kullanarak bu gibi önemli deneyleri yürüttü.

5

Depremler, Yok Oluşlar ve Ortaya Çıkış

Bilim insanlarının “karmaşık sistemler”den bahsettiğini duyan diğer birçok insan afallar; çünkü “karmaşık” ve “karışık” sözcüklerinin aynı anlama geldiği ve bir sistem karışıksa anlaşılmasının zor olacağı varsayılır. Her iki varsayım da doğru olmak zorunda değildir. Karmaşık bir sistem gerçekten de, sadece birbirleriyle etkileşim halindeki birçok daha basit bileşenden oluşur. Daha önce de gördüğümüz gibi, Galileo ve Newton'dan beri bilimsel zaferlerin çoğu, karmaşık sistemlerin basit bileşenlerine ayrılması ve bu basit bileşenlerin davranış biçimlerinin incelenmesiyle kazanılmıştır. (Hatta gerekirse, ilk kestirim olarak, bileşenlerin gerçekte olduklarından da basit olduğu varsayılır.) Dünyayı anlamamız konusunda bu yaklaşımın nasıl bir başarı sağladığına yönelik klâsik bir örnek verebiliriz. Kimya biliminin büyük bir kısmı büyük ölçüde, basit bileşenlerin atomlar olarak kabul edildiği ve bu nedenle de bu atomların çekirdeklerinin nelerden oluştuğunun çoğu zaman önem teşkil etmediği bir model bağlamında anlaşılabilir. Bir adım daha öteye gidersek, bir kutu içinde hapsedilmiş karbondioksit gazının davranışını tanımlayan yasaları da kabaca, küresel moleküllerin birbirlerine ve içlerinde bulundukları kabın duvarına çarparak sekmeleri bağlamında anlayabi-