KİLİKYA FELSEFE DERGİSİ Sayı: 1, Nisan 2021, 33-51
KİLİKYA JOURNAL OF PHILOSOPHY Issue: 1, April 2021, 33-51

Makale Geliş Tarihi | Received: 25.11.2020 E-ISSN: 2148-9327
Makale Kabul Tarihi | Accepted: 06.04.2021 http://dergipark.org.tr/kilikya
Araştırma Makalesi | Research Article

SCHRÖDİNGER'İN *YAŞAM NEDİR?* KİTABI, GEN-MERKEZCİLİK VE BİYOLOJİK ORGANİZASYON

Çağlar KARACA*

Öz: Bu makalede, Erwin Schrödinger'in kuramsal biyolojiye önemli bir katkıda bulunan *Yaşam Nedir?* adlı kitabındaki fikirlerini ve bu kitabın da etkisiyle gelişen gen-merkezci yaklaşımı eleştirel olarak değerlendirmeyi amaçlıyorum. Schrödinger'in canlılık konusundaki entelektüel mirasının tartışmaya açılması moleküler biyolojinin yaşam bilimlerinde hakim hale gelişinin ve yaşamın organizasyona dayalı temelinin anlaşılması açısından özel bir önem taşıyor. Yayınlandığından beri biyoloji felsefesinde önemli tartışmaları beraberinde getiren *Yaşam Nedir?* kitabı, yaşamı termodinamiğin yasaları doğrultusunda ele alması açısından biyolojide organizasyonu vurgular. Bununla birlikte Schrödinger'in canlılığın kodu olarak tasavvur ettiği aperiyodik kristal kavramı gen-merkezciliği destekleyen öncül fikirleri barındırmaktadır. Schrödinger, canlı varlıkların doğadaki entropi artışı eğilimiyle baş etmesi gereken nitelikte olması gerektiğini savundu ve bu görüş, canlılığa dair temel bir ilke olarak yaygın kabul gördü. Schrödinger'in yaşamın düzenliliğini mikro düzeyde aperiyodik kristal hipotezi ile açıklama girişimi ise nispeten daha tartışmalıdır. Makalede, bu tartışmalı konuları aydınlatmak amacıyla Schrödinger ve ardından gelişen gen-merkezci yaklaşımlara yönelik eleştirileri ele alıyorum. Ardından, gen-merkezciliğin sınırlılıklarına karşı yaşamın organizasyonunun organizma seviyesinde ele alınması değerlendiriyorum. Bu görüş, Kant'ın self-organizasyon kavramıyla tanımladığı, parça-bütün ilişkilerindeki karşılıklılığı temel alır. Son olarak, yaşamın organizasyonuna dair felsefî yaklaşımları ve entropinin buradaki rolünü tartışıyorum. Organizma düzeyinde ve organizma-çevre ilişkisindeki çoklu etmenlerin geri-besleme ilişkilerine dayanan ağ yapısı, gen-merkezciliğin indirgemeci yaklaşımına karşı kapsayıcı bir alternatif sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: gen-merkezcilik, Schrödinger, Kant, self-organizasyon, indirgemecilik

* Öğr. Gör. Dr.| Lecturer
Kastamonu Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Bilim Tarihi Bölümü, Türkiye | Kastamonu University, Faculty of Science and Letters, Department of History of Science, Turkey
ckaraca@kastamonu.edu.tr
Orcid Id: 0000-0002-4059-6916

Karaca, Ç. (2021). Schrödinger'in *Yaşam Nedir?* Kitabı, Gen-Merkezcilik ve Biyolojik Organizasyon. *Kilikya Felsefe Dergisi*, (1), 33-51.

SCHRÖDINGER'S *WHAT IS LIFE?*, GENE-CENTRISM, AND BIOLOGICAL ORGANIZATION

Abstract: In this paper, I address Erwin Schrödinger's contribution to theoretical biology in *What is Life?* and the gene-centric approach, which was influenced by Schrödinger's book, from a critical point of view. Discussing Schrödinger's intellectual heritage in this area is essential for understanding how molecular biology has become dominant in life sciences and why life is based on organization. Since it was published, Schrödinger's book led to significant discussions in philosophy of biology due to considering life in relation with the laws of thermodynamics. On the other hand, Schrödinger's notion of the aperiodic crystal was preliminary to the idea that genes are the code of life. Schrödinger held the view that living things have to cope with the increase of entropy, and this view has been widely adopted as a basic principle of life. Yet, Schrödinger's attempt at explaining life's order based on the hypothesis of the aperiodic crystal is rather controversial. In this context, I discuss Schrödinger's ideas and gene-centrism, as well as the alternative view for gene-centrism based on life's organization at the organism level. The latter is in line with the Kantian understanding of life that considers reciprocity of the part-whole relations within an organism. Finally, I discuss philosophical approaches towards life's organization and the role of entropy. The networks of multiple factors at the level of organism and across the relations between the organism and its environment, which involve feedback relations, provide a viable and comprehensive alternative against gene-centrism.

Keywords: gene-centrism, Schrödinger, Kant, self-organization, reductionism

1. Giriş

20. yüzyılda gelişen moleküler biyoloji ve genetik canlılığın bilimsel kavranışında yeni bir kapı araladı. Moleküler biyoloji, biyoloji, biyokimya ve fiziğin kesişim alanında doğmuş ve sonrasında da bu disiplinlerin ortak yürüteceği çalışmalar hız kazanmıştı. Özellikle biyokimya alanında RNA'nın işlevlerinin ayrıntılı olarak ortaya konması moleküler biyoloji açısından dönüm noktası oldu. (Judson, 1996) Genetikteki çığır açıcı çalışmaların getirdiği aşırı iyimserlik ise, biyolojinin bütüncül ve çok sesli yapısının geri plana itilerek moleküler düzeye ve spesifik olarak da genlere indirgenebileceği yanılgısına yol açtı. Örneğin İnsan Genomu Projesi'ne büyük kaynaklar yatırılıyordu ve insanın gen haritasının çıkarılmasının tüm hastalıklara çare olabilecek, insanın türsel varoluşunun şifresini çözebilecek bir yol açacağı beklentisi yaratılıyordu. Oysa, yaşam bilimlerinde son dönemlerde yapılan çalışmalar yaşamın organizasyonunun çok boyutlu bir niteliğe sahip olduğunu, dolayısıyla bu tür indirgemeci yaklaşımların sınırlı bir kavrayış sunabileceğini göstermektedir. İlginç bir şekilde, Schrödinger'in yaşamla ilgili bilimsel görüşleri, hem yaşamı termodinamiğin yasaları doğrultusunda ele alması açısından biyolojik organizasyonun bütüncül yönünü, hem de aperiyodik kristal kavramının moleküler düzeydeki kodlama düşüncesine kaynaklık etmesi nedeniyle gen-merkezci yaklaşımı destekleyen nüveler barındırıyordu. Bu nedenle, Schrödinger'in canlılık konusundaki entelektüel mirasının tartışmaya açılması gerek yaşamın organizasyona dayalı temelinin gerekse de gen-merkezciliğin anlaşılması açısından özel bir önem taşıyor.

Schrödinger, *Yaşam Nedir?* adlı kitabında canlı varlıkların doğadaki entropi artışı eğilimiyle baş etmesi gereken nitelikte olması gerektiğini savundu ve bu görüş, sonrasında canlılığa dair temel bir ilke olarak kabul gördü. Schrödinger'in yaşamın düzenliliğini mikro düzeyde aperiyodik kristal hipotezi ile açıklama girişimi ise, nispeten daha tartışmalı ve eleştiriye açıktır. Bu makalede, her iki fikre yönelik eleştirileri ele alıyor ve Schrödinger'in yaşamla ilgili yaklaşımının bugün ne anlama geldiği sorusunu yanıtlamaya çalışıyorum. Schrödinger ve ardından gelişen gen-merkezci yaklaşımlara yönelik eleştirilere yönelik yürüteceğim tartışmanın ardından, gen-merkezciliğin sınırlılıklarına bir alternatif olarak yaşamın organizasyonunun organizmanın parça-bütün ilişkilerindeki karşılıklılık temelinde çözümlenmesi yaklaşımını ele alıyorum. Bu alternatif perspektif Kant'ın self-organizasyon görüşüne değin geri götürülebilir. Bu temelde, modern biyolojide yaşamı organizasyona dayalı olarak açıklayan felsefî yaklaşımları ve entropinin buradaki rolünü tartışıyorum.

2. Schrödinger'in Yaşam Bilimlerindeki Etkisi

Schrödinger'in biyoloji ve fizik dünyasında hayli yankı uyandıran kitabı *Yaşam Nedir?* yazıldığı dönemden beri dünya genelinde bilim insanları ve felsefeciler tarafından tartışılıyor. Buna rağmen, ilgili kitap ülkemizde Schrödinger'in temel keşfini içeren dalga mekaniği alanındaki çalışmalarına kıyasla yeterince bilinmiyor. Avusturya doğumlu olan Erwin Schrödinger (1887-1961), bu ülkedeki çalışmalarının ardından öncelikle Zürih Üniversitesi'nde görev aldı. 1921'de Berlin'e geçerek Friedrich Wilhelm Üniversitesi'nde daha önce Max Planck'ın üstlendiği bir pozisyona getirildi. 1933 yılında Nazilerin iktidara gelmesine tepki olarak Almanya'dan ayrıldı ve Oxford Üniversitesi'nde çalışmaya başladı. 1940 yılında İrlanda'ya geçerek Dublin'deki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nün kuruluşunda görev aldı ve emekliliğine kadar burada kaldı. *Yaşam Nedir?* kitabını da bu dönemde kaleme aldı. Schrödinger'in bilim tarihinde hatırı sayılır bir bilim insanı olarak anılmasının temel nedeni, 1926 yılında *Annalen der Physik'te* dört makale halinde yayınladığı dalga mekaniği üzerine olan çalışmalarıdır. Bu çalışmasında bir sistemin dalga fonksiyonunu hesaplayan ve sonradan kendi adıyla anılan bir denklem geliştirmiş ve bu sayede 1933 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmıştır. Bunun yanında, Schrödinger'in Einstein'la mektuplaşmalarında ortaya attığı, Schrödinger'in kedisi olarak da bilinen düşünce deneyi özellikle popüler bilim literatüründe sıkça konu edilmiş, hatta bu isimden yola çıkan kitaplar kaleme alınmıştır.[1]

Schrödinger bir fizikçi olarak felsefeyle de yakından ilgileniyordu. Genç yaşlarından itibaren okuduğu Schopenhauer'ın eserlerinden derinden etkilenmiş, not defterlerinden

[1] Bu düşünce deneyini Schrödinger aslında kuantum fiziğinin Kopenhag yorumundan doğan paradoksal bir durumu göstermek için tasarlamıştı. Kopenhag yorumuna göre bir kuantum sistemi, dışarıdan gözlemlenene dek süperpozisyon ilkesince aynı anda birden fazla kuantum durumunu barındırabilir. Schrödinger ise bir kedinin yaşamının atomik düzeyde radyoaktif bozunmaya bağlı olduğu bir sistem varsayarak, radyoaktif bozunma gözlem öncesince hem gerçekleşmiş hem de gerçekleşmemişse, makro düzeyde kedinin hem ölü hem diri olması gibi çelişkili bir sonuca yol açacağını göstermek istemişti. Fakat popüler bilim literatürünün etkisiyle kimi zaman kedinin gözlemlenene dek hem ölü hem diri olacağının varsayıldığı şeklinde yorumlanmıştır. Schrödinger'in kedisinden yola çıkılarak yazılan bir kitap olarak bkz. Gribbin (2005).

anlaşıldığı kadarıyla Spinoza ve Mach gibi filozofları da okumuştu. (Yoxen, 1979) Sokrates öncesi doğa filozofları üzerine *Doğa ve Yunanlılar* adlı bir kitap yazmış, ayrıca sonradan *Yaşam Nedir?* kitabıyla birleştirilerek yayınlanan *Zihin ve Madde* adlı kısa eserinde doğu felsefesi temelinde benlik, zihin ve varlık arasındaki ilişkiye dair düşünceler öne sürmüştür. Schrödinger biyoloji alanında formel eğitim almamış olmakla birlikte genç yaşlarından itibaren –babasının botanik alanındaki çalışmalarının da etkisiyle— bu alanla yakından ilgileniyordu. Örneğin, Darwin'in *Türlerin Kökeni* onun hayatı boyunca en sevdiği kitap olmuştu. (Dronamraju, 1999) 1920'li yıllarda renkli görmenin fizyolojisi ve biyofiziği üzerine çalışmalar ortaya koymuştu ve bu alanda önemli bir otorite olarak kabul ediliyordu. (Moore, 2015) Yaşamın ne olduğu sorusuna bilimsel bir cevap verme arayışı ise Schrödinger'in bir fizikçi olarak biyoloji ve felsefeye duyduğu ilginin ortak ürünü olarak yorumlanabilir.

XIX. yüzyılda yaşamın ne olduğu sorusu organik varlıkların genel fiziksel ilkelerle açıklanmasını savunan - uç bir yorumda ise organizmalardaki parça - bütün ilişkisini makinelerden farksız gören - mekanistler ve yaşamın indirgenemez bir karakteri olduğunu - ve hatta cansız varlıklarda bulunmayan bir özü içerdiğini - savunan vitalistler arasındaki tartışmada şekilleniyordu. XX. yüzyılın başlarından itibaren ise mekanizm-vitalizm tartışması yerini yaşamın biyokimyasal faktörler açısından tanımlanması girişimine bıraktı. Bu dönemde Hopkins (1913), Haldane (1949), Bernal (1951) ve Needham (1930) gibi önde gelen bilim insanları ilgili bağlamda eserler verdi ve tartışmalar yaşamın başlangıcındaki kimyasal koşullar, düzen ve kaos, evrilebilirlik gibi konulara odaklandı. Schrödinger de yaşamın vitalizmde olduğu gibi entelekya gibi mistik bir kavramla açıklanmasına kesin bir şekilde karşı çıkıyor ve biyolojinin temelinde yatan moleküler dizilimlerin fiziksel olarak anlaşılması çabasını öne çıkarıyordu. (Yoxen, 1979)

Schrödinger'in biyolojiyle ilgili kaleme aldığı tek kitap olan *Yaşam Nedir?* onun 1943 yılında Dublin İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde verdiği derslerin sonucunda ortaya çıkmıştı. Pek hacimli bir eser olmamasına rağmen, bu kitap yaşam bilimleri üzerinde derin bir etki bıraktı. İlk kez 1944 yılında yayınlanan kitap, fizikle biyolojinin kesişim alanında yer alıyordu ve yaşamın ne olduğu sorusunu kuantum mekaniğinin sonuçları çerçevesinde ele alıyordu. Schrödinger'in fikirleri fizikçilerin moleküler biyolojiye yönelmesinde ilham kaynağı oldu; örneğin James Watson ve Francis Crick, 1953 yılında DNA'nın ikili sarmal yapısı üzerine gerçekleştirdikleri büyük keşiflerinde Schrödinger'in düşüncelerinden yola çıktıklarını belirtmişlerdir. (Murphy & O'Neill, 1997; Watson, 2001) Bu alandaki çalışmaların gelişimi açısından, Schrödinger biyologlardan çok II. Dünya Savaşı sonrası dönemde yeni bir konu arayışı içerisinde olan fizikçileri etkilemiştir. (Dronamraju, 1999) Watson ve Crick ile Nobel ödülünü paylaşan diğer isim olan Maurice Wilkins de Schrödinger'in kitabının o dönem fiziğin biyolojiye önemli katkılar yapabileceği yönündeki iyimserliğe katkıda bulunduğunu belirtmiştir. (1963)

Yaşam Nedir? yayınlandığı ilk yıllardan itibaren birçok dile çevrilmiş ve dünya genelinde yaşamın kaynağı, genetik ve kuantum fiziğiyle ilgilenen bilim insanlarını etkilemiştir.

Öte yandan, bu küçük hacimli kitabın geniş çevrelerin ilgisini uyandırması kısmen Schrödinger'in fizikçi olarak dünya çapındaki ününe bağlanmıştır. (Yoxen, 1979, s. 22) Aslında Schrödinger söz konusu eserini yazarken biyoloji literatürüne sınırlı ölçekte başvurmuştu ve moleküler biyolojide veri olarak aldığı belirli görüşler zaman içerisinde yanlışlanmıştı. Örneğin genlerin Schrödinger'in kabul ettiği düşüncenin aksine proteinlerden değil büyük oranda DNA'dan oluştuğu Schrödinger'in kitabının yayınlanmasından kısa zaman sonra anlaşılmıştı. Buna rağmen, *Yaşam Nedir?*'in önemi meseleye yaklaşım tarzından ve Schrödinger'in sorduğu soruların özgünlüğünden kaynaklanıyordu. Bu nedenle, içerisinde yer alan birçok görüşün güncelliğini yitirmesine rağmen kitap 1950'lerden itibaren klasikleşti ve sonraki dönemde ise moleküler biyoloji tartışmalarının odak noktalarından biri olarak tarihsel bir metin haline dönüştü. (Yoxen, 1979, s. 44)

Schrödinger yaşamı, termodinamik üzerine çalışmalarıyla bilinen Boltzmann ve Gibbs çizgisinde bir fizikçi olarak anlamaya çalıştığını vurguluyordu. Termodinamiğin ikinci yasası kapalı sistemlerde entropinin sabit kalacağını veya artacağını öngörür. Rudolf Clausius, entropi kavramını bir sistemdeki iş için kullanılamayan enerji miktarını ölçmek üzere ortaya attı. Ludwig Boltzmann ise, bu tanımla paralel olarak bir sistemin basınç, hacim ve enerji gibi ölçülebilen makro özellikleri ile bu özelliklere karşılık gelen mikro konfigürasyonların oranının entropi seviyesini belirlediğini ortaya attı ve bu temelde bir formül geliştirdi. Entropinin artmasının anlamı, sistemin makro özelliklerinin daha fazla moleküler konfigürasyona karşılık gelen makro değerlere yaklaşarak termodinamik dengeye ulaşmasıdır. Buradaki öngörü, moleküller arasındaki çarpışmalar sonucunda istatiksel olarak moleküllerin bireysel hızları gibi ölçütlerde ortalamaya daha yakın değerlerin yaygınlık kazanmasıdır. Makro ölçekte ise sistem daha homojen bir nitelik kazanır. Örneğin, sıcak ve soğuk bir kütle temas ettiğinde bu iki kütlenin sıcaklıkları spontane olarak eşitlenme eğilimindedir. Sistem makro ölçekte tekdüze bir hale gelirken, mikro ölçekte ise düzensizleşir; örneğin kabın tek bir tarafına yığılmış olan moleküllerin dağılmasıyla rastgele çarpışmaların çeşitliliği artar. Termodinamik dengeye yaklaşılmasıyla birlikte sistemin kullanılabilir enerjisi de azalır. Gerek canlılık gerekse de makineler –örneğin bir buhar motorunun işleyişi- açısından termodinamiğin ikinci yasası, enerji çevriminde sistemdeki kullanılabilir enerjinin bir kısmının zamanla yitirilmesinin kaçınılmaz olduğunu ifade eder. Biyolojik süreçlerde serbest enerjinin salınımı kontrollü olarak gerçekleşir; belirli bir kimyasal reaksiyonda ortaya çıkan enerji organik düzenin sürdürülmesi için diğer süreçlere aktarılır. Fakat bu aktarım sırasında enerjinin bir kısmı ısı aracılığıyla yitirilir ve bu durum da doğadaki genel entropi artışına katkıda bulunur. Dolayısıyla organizmalar da diğer tüm fiziksel sistemler gibi termodinamik yasalarına tabidir. Öte yandan, canlılar moleküler düzeydeki stokastik etmenlerin, bir başka deyişle rastgele değişimler sonucunda oluşan düzensizliğin etkisini azaltabilirler. Canlı varlıklar, sürekli metabolik faaliyet içerisinde olmaları, çevreleriyle sürekli madde ve enerji alışverişi yapmaları sayesinde lokal olarak düşük entropi alanları oluştururlar. Schrödinger canlılığa özgü olan bu durumu negatif entropi olarak tanımlamıştır. (1944/2012) Olby ise, Schrödinger'in canlıların serbest enerji kullanmasını daha yalın bir şekilde ifade etmesi yerine negatif enerji kavramını ortaya atmasına eleştirel yaklaşmaktadır. (1971) Schrödinger bu kavramla biyoloji ile

fizik arasındaki zıtlığa vurgu yapmak istiyordu. Ancak entropi mutlak sıcaklık olan 0 Kelvin'de sıfırlanır ve bunun altına inmek imkansız gözükmektedir. Elbette Schrödinger böyle bir durumu kastetmemiş olsa da onun ortaya attığı kavramdan türetilen negentropi bu açıdan problem taşımaktadır.

Schrödinger canlıları termodinamik açıdan 'düzenli' yapan şeyi sorguluyordu ve cevabın moleküler düzeyde verilebileceğini düşünüyordu. (1944/2012) Bu temelde, *Yaşam Nedir?* kitabındaki bir diğer önemli fikir olarak genlerin aperiyodik kristal yapıda olması gerektiğini öne sürdü. Schrödinger, doğa yasalarının makro düzeyde istatistiksel temelde işlediğini vurgular. Örneğin, içi gaz dolu bir kabın sıcaklığı veya yüzeye uygulanan basınç ve gazın yoğunluğu gibi makro düzey özelliklerin ölçülmesindeki hata payı, gazın kütlesiyle ters orantılıdır; yani ne derecede büyük ölçüde işlemler söz konusuysa hata payı da o denli az olacaktır. Atom-altı düzeyde ise bir parçacığın enerji seviyelerindeki geçişler stokastiktir. Örneğin, sisteme ısı verildiğinde parçacığın daha yüksek bir enerji seviyesine sıçraması olasılığı da daha yüksek olacaktır, fakat enerji durumunun değişimini belirleyen determinist bir limit yoktur. Bu olasılıksal temel nedeniyle, mikro düzeydeki etkileşimlere dair kesin öngörülerde bulunamayız ve tekil parçacıklar söz konusu olduğundan makro düzeyde olduğu gibi bir istatiksel yakınsama da mümkün değildir.

Schrödinger'in eserini yazdığı dönemde genlerin yapısı ve genlerdeki değişimleri sağlayan mutasyonların[2] nedeni henüz tam olarak anlaşılmamıştı, fakat gelişmekte olan X-ışını teknikleri sayesinde kalıtımın moleküler düzeyde bir tür düzenliliğe dayalı olduğu biliniyordu. (Muller, 1927) Moleküler düzeyde makro düzeydeki gibi istatiksel temelde bir düzenlilik ise söz konusu olamayacağından, Schrödinger canlılardaki düzenliliği sağlayan etmenlerin anlaşılabilmesi için, mikro yapıdaki düzenin ardında yatan unsurlara odaklanılması gerektiğine inanıyordu. Örneğin, Habsburg hanedanının üyelerinde görülmesi nedeniyle Habsburg dudağı olarak da bilinen, alt çenenin çıkık olması sonucu beliren dudak şekli yüzyıllar boyunca kuşaktan kuşağa geçebilmiştir.[3] Schrödinger, ısının bozucu etkisinin genlerin aktarımı sırasında moleküllerin yapısını sürdürebilmesinin önünde engel olduğunu, canlıların moleküler yapısında ise bu bozunum etkisini tersine çeviren bir yapısal özellik bulunuyor olması gerektiğini düşünüyordu. Bu doğrultuda, moleküler düzeydeki aperiyodik kristal yapıların canlıların düzenliliğini belirlediğini öne sürdü. Bilindiği gibi, kristaller moleküler olarak son derece düzenli yapılardır. Schrödinger'e göre canlılıkta da benzeri bir düzen geçerli olmalıydı, dolayısıyla biyolojik düzenliliğin kaynağı moleküler düzeydeki birimlerde yatıyordu. Öte yandan bu moleküler birimler yaşamın daha üst düzey bileşenlerini

[2] Schrödinger mutasyonların ısıl dalgalanmalar veya ışıyan enerjinin emilimi sonucunda kuantum geçişleri nedeniyle gerçekleştiğini öngören Delbrück'ün çalışmalarını dayanak edinmiş, fakat kitabını yazdığı dönemde tespit edilmiş olan, doğal radyasyonun mutasyonlar üzerindeki etkisini dikkate almamıştı. (Dronamraju, 1999) Dolayısıyla Schrödinger'in mutasyonlarla ilgili açıklamasının kendi dönemi için dahi eksik olduğu vurgulanmıştır.

[3] Alt çenenin aşırı çıkık olması nedeniyle işlevsel bozukluklara yol açabilen Habsburg dudağındaki gibi patolojik boyutları olmamakla birlikte, buna benzer şekilde kalıtımsal özelliklerin başka bir tarihsel örneği de bilindiği gibi Osmanlı padişahlarının soyunda görülen çengel burun yapısıdır.

kodlayacak karmaşıklığı mümkün kılabilecek büyüklüğe sahip heterojen yapılar olmalıydı. Bu nedenle de kaynaklık eden "kodun" aperiyodik yapıda olması gerektiği varsayılmıştır.

Elbette, aperiyodik kristal genleri açıklayan bir çeşit metafor olarak ortaya atılmıştı. Olby, Schrödinger'in kitabını tartıştığı makalesinde negatif entropi kavramının yanı sıra bu kavramdaki birçok probleme de dikkat çekmiştir. (1971) Öncelikle, kristal oluşumu kendini kopyalayan örüntüler içermesi nedeniyle yaşamın moleküler düzeydeki yinelenim süreçlerine benzerlik gösterse de, katı ve sağlam olan kristal yapılar yaşamın dinamik ve akışkan moleküler niteliğiyle karşıtlık içindedir. Olby'nin dikkat çektiği bu karşıtlık önemli, zira Schrödinger'in ısının bozucu termodinamik etkisine karşılık olarak yaşamın yapıtaşlarını statik ve bozunmaz yapılar olarak tahayyül ettiğini gösteriyor. Oysa, DNA'nın ikili sarmal yapısında bu tarz bir bozunmazlık bir ölçüde bulunsa da, DNA yapısı dahi stokastik etmenler sonucu gerçekleşen bozunmaları sürekli olarak tamir eden enzimler ve RNA, ribozom ve diğer proteinler arasındaki sürekli etkileşim ve yeniden-üretim sayesinde korunabilmektedir. Bu dinamik tamir mekanizmaları ise serbest enerjinin aşamalı olarak kullanıldığı moleküler süreçler sayesinde mümkün olmaktadır, yani entropi artışı dinamik moleküler süreçler sayesinde kontrol edilmektedir. Olby'nin eleştirdiği bir başka husus, Schrödinger'in *Yaşam Nedir?*'i yazdığı sırada zaten kısmen aydınlatılmış olan atomlar arası kovalent bağların rolünü ihmal etmesidir. (1971) Bir başka deyişle, Schrödinger mevcut kimyasal etmenleri göz ardı ederek yeni bir fiziksel yaklaşımı kovalamıştır. Schrödinger, yaşamın temel moleküllerinin nasıl olup da yeterince büyük (o dönemde 1000 atom boyutunda olarak hesaplanan) bir yapıyı muhafaza edebileceği üzerine varsayımlarda bulunuyordu. Oysa, kovalent bağlar, hidrojen bağı ve elektrostatik etmenler gibi nedenlere bağlı olarak gerçekleşen polimer zinciri oluşumu zaten makromoleküllerin nasıl dağılmadan kalabildiğini açıklıyordu. Olby'nin dikkat çektiği gibi, 1930'lu yıllardan itibaren bu alanda önemli keşifler yapılmıştı. Üstelik, polimer zincirler kristallerin aksine içerisindeki moleküler unsurların bireysel özelliklerini yansıtmasına izin veriyordu ve yaşamın organizasyon dinamikleriyle uyumlu bir görüş sunuyordu.

Negatif entropi ve aperiyodik kristal düşüncesinin yanı sıra Schrödinger'in kitabında ele alınan üçüncü önemli problem mevcut doğa yasalarının biyoloji karşısında yetersizliğidir. Schrödinger, yukarıda açıkladığım istatiksel karakter nedeniyle mevcut fizik yasalarının biyolojiyi açıklayamayacağına, biyolojik sistemleri anlamak için yeni fizik yasalarının keşfedilmesi gerektiğine inanıyordu. Hatta Yoxen Schrödinger'in asıl olarak biyolojide yasalılıkla ilgilenmesine rağmen, genetik açısından öncü olarak kabul edilmesi durumunun onun temel aldığı bu problemi gölgelediğini belirtmiştir. (1979) Biyolojinin fizikle bağlantılı olarak sağlayabileceği yeni atılımların fizikteki çözümsüzlüklere yanıt olabileceği ve fizik yasaları konusunda ufkumuzu genişletebileceği varsayımı Schrödinger'in ilham aldığı Max Delbrück'ün ve onun da etkilendiği Niehls Bohr'un bilimsel yaklaşımlarına kadar dayandırılabilir. (Domondon, 2006)

3. Gen-merkezciliğin Eleştirisi ve Self-organizasyon

Schrödinger, yaşama dair bu hipotezini bilgi teknolojilerinin temeli olan kodlama ve enformasyon aktarımı ile ilgili matematiksel düşüncelerin atılımına sahne olan 1940'lı yıllarda ortaya koydu. Kodlama ile ilgili teorik ve pratik çalışmalar bu dönemden itibaren aslında biyolojide değil, iletişim teknolojisinde gelişiyordu, fakat Schrödinger'in yanı sıra Norbert Wiener ve George Gamow gibi fizikçilerin etkisiyle diğer alanlara da uygulanan sibernetik eksenli görüşler biyolojiye de aktarılmaya çalışıldı. Schrödinger'den hayli etkilenmiş olan Watson ve Crick'in dört farklı amino asitten oluşan genetik dizilimlerin fiziksel yapısını ortaya koyması, sonrasında amino asit dizilimlerin proteinlerin yapısını ne şekilde belirlediğinin anlaşılmasıyla yaşamın "kodunun" kaynağının genler olduğu düşünüldü ve genetik kod kavramı literatüre yerleşti. Oysa DNA ve RNA gibi yaşamın moleküler yapıtaşlarının keşfinde enformasyon kuramının hemen hiç etkisi olmamıştı ve bu kuram geriye dönük bir okumayla sonradan moleküler biyolojiye uygulanmıştı. (Judson, 1996, s. 249)

Genlerin yaşamın kodunu içerdiği düşüncesi, sözü edilen enformasyonel çerçevenin de öncesine, August Weismann'ın (1834-1914) XIX. yüzyılda ortaya attığı germ ve soma ayrımına dayanır. Bu ayrıma göre, germ hücreleri somatik hücrelerin yapısını belirler ve kalıtım yoluyla bir sonraki kuşağa aktarılır, fakat bu hücreler somatik hücrelerdeki değişimden etkilenmez, çünkü sonradan kazanılan özellikler kalıtımla aktarılamaz. Biyolojide merkezî dogma olarak bilinen olgu da germ ve soma ayrımındaki Weismanncı düşünceyi desteklemiştir. Merkezî dogmaya göre, nükleik asitlerden proteinlere bilgi aktarımı gerçekleşir, fakat tersi yönde bir bilgi aktarımı söz konusu değildir. Bilgi aktarımı, amino asit dizilimlerinin biyokimyasal etmenlere bağlı olarak proteinlerin üç boyutlu yapısını belirlemesiyle gerçekleşir. Bilindiği gibi, bu dizilimlerdeki mutasyonlar ise fenotipteki değişime ve çeşitliliğe giden yolda ilk adımdır. Ne var ki, söz konusu genotip-fenotip ilişkisinin bilgi aktarımını ve varyasyonu belirleyen yegane etmen olduğu inancı aslında son dönemde ortaya konan çalışmalarla sorgulanır hale gelmiştir. Kodlayıcı olmayan DNA ve RNA'nın bilgi aktarımında önemli roller üstlendiğinin keşfedilmesi söz konusu modele en büyük eleştiriyi getirdi. Ayrıca, prionlar üzerine çalışmalar proteinlerin kendi arasında da bilgi aktarımı olabileceğini ortaya koydu. Prionlar, kendi katlanma şekillerini diğer proteinlere empoze ederek yapılarını kopyalayabilen bir protein türüdür; dolayısıyla prionlarda proteinler arası bir belirlenim ilişkisi söz konusudur.[4] Prionların normal-dışı katlanmaya neden olduğu ve bu nedenle fonksiyonel anlamda olumlu bir etkilerinin olmadığı düşünülüyordu. Fakat maya hücrelerinde, prionların yeni oluşan proteinlerin yapısını değiştirerek genetik varyasyona etkide bulunabildiği, böylece de yararlı fenotipik özelliklerin ortaya çıkmasına neden olabildiği gösterilmiştir. (True & Lindquist, 2000) Prion çalışmaları

[4] Örneğin, Papua Yeni Gine yerlilerinin yamyamlık merasimlerinde ölen aile üyelerinin beyinlerini yemesiyle bulaşan ve nörolojik sorunlara yol açan ölümcül kuru hastalığının sorumlusu prionlardır. Bu örnekte, normal dışı bir şekilde katlanan prionlar bulaşıcı patojenik unsurlardır, zira bulaştığı kişide var olan protein yapısını bozarlar.

böylece protein yapısı ve işlevlerinin birebir amino asit dizilimleri tarafından belirlenmediğini, başka unsurların devreye girebileceğini kanıtlamıştır. (Bussard, 2005)

Öte yandan, Weismanncı yaklaşımın yansımalarını da içeren genetik kod düşüncesi merkezi dogmanın çok daha ötesindedir. Bu görüşe göre genler salt enformasyonel yapılardır: Genlerin taşıdığı bilgi, tıpkı bir bilgisayar yazılımı gibi embriyonik gelişimi belirler ve fenotipik özellikleri kodlar. Schrödinger'in kısmen sorumlu tutulabileceği gen-merkezci yaklaşım, *Yaşam Nedir?* kitabında alıntılanan bir başka fizikçi olan Max Delbrück tarafından daha da ileri götürülmüştür. Delbrück, Nobel ödülünü biyofizik temelinde virüslerin genetik yapısı üzerine olan çalışmalarıyla almıştı. Delbrück genleri salt bilgi aktarımı sağlayan moleküler yapılar olarak değerlendiren yeni-Weismanncı yaklaşımı temsil ediyor, genlerin organizma üzerindeki rolünü Aristoteles'in formel nedenine benzetiyordu. Delbrück Aristoteles'in babanın kalıtımdaki rolünü aktif biçimlendirici ilke ile bağdaştırmasına atıfta bulunarak, bu anlayışın, modern biyolojide embriyonun gelişimini yönlendirdiği öne sürülen "genetik program" kavramının öncülü olduğunu savunur. (1971) Benzer şekilde, Richard Dawkins gen-merkezcilik yaklaşımını "bencil gen" kavramı üzerinden formüle etmiş ve bu görüşün yaygınlaşmasına önemli bir katkıda bulunmuştur. (1989) Dawkins'e göre, tüm canlılar gibi bizler de genlerin kontrolündeki makineleriz. Biyolojik özelliklerimiz ve kendi irademizle yaptığımızı düşündüğümüz edimler, aslında doğal seçilim karşısında belirli genlerin kendini sürdürebilmesi doğrultusunda şekillenirler. Bu nedenle, Dawkins'in yaklaşımında organizmaların varlığı genlerin taşıyıcısı olmaya ve hayatta kalmaya indirgenmiştir.

Schrödinger aperiyodik kristalin birebir fenotipi belirleyebileceğine dair yeterli biyofiziksel kanıtın ortaya konmamış olduğunun farkındaydı, fakat gelecekte bu tür kanıtların bulunabileceğine dair umut taşıyordu. Her bir enzimi kodlayan belirli bir gen olduğu düşüncesi, genlerin yaşamın moleküler kodları olduğu inancını beslemiştir. Söz konusu düşünce Beadle ve Tatum (1941) tarafından "bir gen – bir enzim" hipotezi olarak ortaya atılmıştır. Bu düşüncenin ileri sürülmesi Schrödinger'in "Yaşam Nedir?" konferanslarını verdiği döneme denk geliyordu; bu nedenle Schrödinger bu görüşten habersizdi. (Moore, 2015) Fakat ilgili düşünce zaten genlerin işlevi ile ilgili bir gerçekten çok bir inancı ve bu doğrultuda geliştirilen bir araştırma programını içeriyordu. (Bussard, 2005) Bir gen – bir enzim hipotezi, ortaya atıldıktan sonra kısa sürede yanlışlanmış, genetik değişimlerin proteinin genel yapısında büyük değişikliklere yol açmadığı, ancak belirli bir polipeptit zincirinde fark yaratabildiği ortaya konmuştur. (Davis, 2007)

Genetik kod düşüncesinin ardında yatan gen-merkezci yaklaşım günümüz biyoloji felsefesinde birçok açıdan eleştiriye tabi tutulmaktadır. Bu eleştiriler dayanaklarını yaşam bilimlerindeki epigenetik, evrimsel-gelişimsel biyoloji, sistemler biyolojisi gibi alanlardaki son dönem keşiflerden alır. Bu alanlardaki eleştirel yaklaşımların her biri ayrıntılı analizleri gerektirdiğinden bu makalede bunları tek tek ele almayacağım. Bununla birlikte, Schrödinger'in gen-merkezci paradigmaya katkılarını ayrıntılı olarak ele alan Lenny Moss'un eleştirilerine yer vermekte fayda görüyorum. Moss

Schrödinger'in genlerin yaşamın kodu olduğu düşüncesini doğrudan savunmadığını, fakat onun aperiyodik kristal öngörüsünün kendisinden sonraki bilim insanlarına ilham verdiğini vurgulamıştır. (2003) Buna karşılık, mikro seviye düzen ile makro özellikler arasında genler üzerinden kurulan bu tür bir ilişkinin, hücrelerin kendi organizasyonel dinamiklerini yok sayarak onları kendi başına düzensiz birer yığınmış gibi görme yanlışını doğuracağına dikkat çekmiştir. Oysa organizmanın genler dışındaki hücresel unsurları da düzenin sağlanmasında etkilidir. Örneğin çok-hücreli bir organizmada hücreler, aralarındaki etkileşimleri belirleyen zarla çevrelenmiştir ve bunun getirdiği bölümlenme organizmanın termodinamik anlamda dengeden-uzak yapıda kalmasını sağlar. Hücre zarı yarı geçirgen bir yapıdadır ve zar üzerindeki gözeneklerin açılıp kapanır olma özelliği, kimyasal reaksiyonların gerçekleştirdiği koşulların düzenlenmesini ve organelleri oluşturan parçaların kanalize edilmesini sağlar. Biyomoleküllerin etiketlendiği ve difüzyon gibi fiziksel etmenler ve moleküler sinyaller yardımıyla işlevsel açıdan gerekli yerlere gönderildiği kompleks bir sistemin varlığı, organizmalardaki düzenin genlerin kodlayıcı rolünün çok daha ötesinde dinamikleri olduğunu gösterir. Organizma düzeyindeki heterojen yapı geri-besleme ilişkilerine dayanan karmaşık düzenleyici ağların varlığına bağlıdır ve genler bu sistemdeki unsurlardan yalnızca biridir. Genler organizmanın formunu doğrudan belirlemek yerine, formun stabilize edilmesini sağlarlar. (Newman & Linde-Medina, 2013) Genlerin proteinleri ve diğer organik bileşenleri kodlaması ise, çoğu durumda birebir bir ilişkiyi yansıtmaz. Bir başka deyişle, tek bir gen genellikle tek bir fonksiyonla sınırlanmış olmadığı gibi, belirli bir fonksiyon da birçok gen tarafından üstlenilebilir. Spesifik bir gen, farklı organizasyon bağlamlarında farklı roller üstlenebilir. Keza, aynı işlevi gören glikoproteinler veya hücre zarı parçaları da farklı genler tarafından kodlanabilirler. Dolayısıyla genler ve daha üst-düzey organik bileşenler arasında çoklu bir ilişki söz konusudur. (Moss, 2003)

Moss'un (2003) da vurguladığı gibi, sözü edilen dinamikler Schrödinger'in yaşamla ilgili görüşünü geliştirdiği dönemde tam olarak bilinmiyordu. Bu anlamda genlerin yaşamın kodu olarak sunulması, aslında onun görüşlerinin uç bir yorumudur ve Schrödinger'in bu konuda kısmen sorumluluğu vardır. Schrödinger'in kitabının, konunun bu tartışmalı yanına rağmen çığır açıcı niteliği ise, canlılığın süreçsel temelini termodinamik açıdan denge-dışı durumla bağdaştırması olmuştur. Buradaki süreçsellik, canlı varlıkların durağan fiziksel cisimlerden farklı olarak ancak dinamik bir biçimde bütünlüğünü koruyabilmesini niteler; bu dinamizm bir sürekliliği ve düzenliliği beraberinde getirdiğinden, canlılığın bir organizasyon sorunu olarak ele alınması söz konusudur. Canlı varlıkların organizasyon temeliyle ilgili düşünceler, antik çağa kadar dayanmakla birlikte, modern bilimsel düşünce açısından XVII. yüzyıldan itibaren geliştirilmekteydi. John Locke, bir organizmanın dinamik kimliğinin, onu oluşturan parçacıkların maddi varlıklarının toplamından oluşan bir kimliğin ötesinde bir niteliği olduğunu tespit etmişti. (McLaughlin, 2001) Cansız bir varlığın parçacıkları değiştiğinde veya ayrıştığında, bütünün kimliğinin de ortadan kalktığını görürüz. Canlı bir varlıkta ise bütünün bireyselliği mutlak olarak bütünün parçalarının andaki maddi varlığıyla özdeşleşmemiştir. Öyle ki, belirli bir anda organizmayı oluşturan maddi bileşenler zaman içerisinde bozunurlar, organizma dışına atılırlar ve yerlerini aynı formdaki başka

parçacıklara bırakırlar. Günümüz terminolojisiyle söyleyecek olursak, hücre yenilenmesi ve metabolik döngüler organizmayı oluşturan bileşenlerin sürekli değişime uğradığını, buna rağmen organizmanın bütünlüğünü koruduğunu gösterir. Örneğin, insan bedeninde alyuvar hücreleri her dört ayda bir, karaciğer hücreleri altı ila on iki ayda bir, yağ depo hücreleri ise on yılda bir yenilenirler; merkezî sinir sistemi hücreleri gibi çok az sayıda hücre ömür boyunca sabit kalır. (Milo & Phillips, 2015)

Hücresel yenilenmenin ayrıntıları sonradan keşfedilmiş olmakla birlikte, rejenerasyon olgusu ve buna bağlı olarak organizmanın bireyselliğinin sürekli maddî değişime rağmen korunması XVIII. yüzyılda yaygın olarak kabul edilmiş ve araştırmalarla kanıtlanmıştı. Bu dönemde Kant, canlılık üzerine Johann F. Blumenbach (1752-1840) gibi dönemin önde gelen doğa bilimcilerini etkileyen felsefî görüşler ortaya attı. Kant'ın ortaya attığı self-organizasyon kavramı bu bağlamda özellikle önemlidir. Kant, organizmanın amaç ve araçları bünyesinde bütünleştirdiğini, bu nedenle self-organize bir varlık olduğunu belirtmiştir. (1790/2007) Organizmada, her bir parçanın varlığı diğer parçaların ve genel olarak bütünün varlığına, aynı şekilde bütünün varlığı da her bir parçanın varlığına bağlıdır, çünkü herhangi bir parça organizmanın geri kalan unsurları olmaksızın üretilemez. Parçaların işlevsel karşılıklılığı organizmaların ve insan yapımı varlıkların ortak bir özelliğidir. Örneğin bir saatin işleyişi de parçaların uyum içerisinde çalışmasına bağlıdır. Buna rağmen Kant ancak organizmada bu tür bir karşılıklı ilişkinin kendi kendini üretmenin ön koşulu olduğunu, dolayısıyla da organizmanın süreçsel varoluşunun temeli olduğunu vurgular. Organizmanın self-organizasyonu, parçaların karşılıklı yeniden üretiminin yanı sıra, organizmanın bireysel ve türsel olarak kendini üretmesi durumlarını ifade eder. Organizasyonun sürekliliğinin organizmanın varoluş koşulu olması açısından, Kant'tan Schrödinger'e bir düşünsel devamlılık söz konusudur. Fakat biyolojik organizasyonda parça-bütün ilişkisi açısından bakıldığında, Schrödinger'in temsil ettiği moleküler düzeydeki belirlenim önkabulünün Kant'ın self-organizasyon kavramındaki düşüncelerden uzaklaşmayı beraberinde getirdiği görülür. Kant'ın tanımladığı şekliyle self-organizasyonda, organizmanın parçaları ve parça ile bütün arasında karşılıklılık esas kabul edilir. Schrödinger'in yaklaşımına göre ise bütündeki düzenliliğin kaynağı parçada aranıyordu; dolayısıyla parçadaki düzenliliğin bütünü belirlemesi söz konusuydu.

Biyolojik varlıkların devamlılığının altında yatan kimyasal süreçlerin keşfedilmesiyle birlikte, bu dinamik sürekliliği tanımlamak ve biyolojik stabiliteyi kimyasal dengeden ayırt etmek üzere homeostaz kavramı ortaya atılmıştır (Keller, 2009). Homeostaz, organizmanın stabil kalabilmesinin koşulu olan aktif metabolik regülasyon durumunu tanımlar. Schrödinger'in yaşamı termodinamik ekseninde açıklaması ve sonrasında yürütülen çalışmalarla birlikte, biyolojik stabilitenin kimyasal dinamizm ve termodinamik denge durumundan uzaklaşmaya bağlı olduğu anlaşılmıştır. Kimyasal

denge organizmanın ölümü anlamına gelir. Bu nedenle organizmanın sürekli metabolik faaliyet ve enerji akışıyla birlikte denge-dışı bir konumda kalması gerekir.[5]

Fiziksel sistemlerin denge durumuna ulaşması serbest enerjinin sistemden çevreye aktarılması anlamına gelir. Organizmanın termodinamik açıdan dengeden-uzak konumda kalmasının gerekliliğinden, dolayısıyla bir anlamda termodinamik dengenin yaşamla karşıtlık içinde bulunduğundan söz edilmişti. Öte yandan, bu, termodinamik faktörün, yani spontane olarak düşük enerji seviyesine geçilmesiyle gerçekleşen dönüşümlerin biyolojide rolü olmadığı anlamına gelmez. Örneğin, hücre zarını oluşturan fosfolipit çift tabaka yapısı, bu şekilde kendiliğinden oluşur. Sulu ortamda, fosfat ve yağ asidi gibi bileşenlerden oluşan organik moleküller hidrofobik (suyu iten) ve hidrofilik (suyu çeken) kısımlarının çift tabaka oluşturacak şekilde dizilmesiyle söz konusu yapıyı oluştururlar. Dolayısıyla, organizma seviyesinde entropi artışı canlı varlıkların baş etmesi gereken bir faktör olmasına rağmen, moleküler düzeyde termodinamik faktörün işlevsel rolü olabilir. Bu temele dayanarak, fosfolipit çift tabaka ve benzer şekilde spontane şekilde oluşan yapıların -örneğin küresel biçimli fosfolipit oluşum olan misel bu şekilde kendiliğinden oluşabilir- yaşamın başlangıcında rol oynadığı öne sürülmüştür. (Luisi, 2006) Fosfolipit yapıların spontane olarak şekillenmesi, içerisinde kimyasal reaksiyonların gerçekleşebileceği kapalı geometrik şekiller oluşturmaya müsait olması ve günümüz organizmalarında hücre zarını oluşturması nedeniyle yaşamın başlangıcında etkili olduğu düşünülmektedir. Öyle ki, fosfolipit tabaka yaşam için elzem olan bölümlenmede (yani organizmanın içsel koşulunu dış çevreden ayırmada) temel rolü üstlenmektedir. Hücre zarının enerji ve bilginin iletimi ve metabolik dönüşümlerdeki rolü, Schrödinger ve sonrasında geliştirilen genetik replikasyon temelli yaklaşımın tek yönlülüğüne karşı önemli bir etmen olarak vurgulanmıştır. (Moss, 2003; Weber, 2010) Öte yandan, termodinamik ve spontane oluşumlar konusunda, ilk canlıların nasıl evrimleştiği ve metabolik aktivitelerinin ne şekilde gerçekleştiği hâlâ spekülasyonlara açık, tam olarak aydınlatılamamış konulardır. Organizmalar açısından çoğu durumda, enzimler gibi kinetik faktörlerin varlığı, kendiliğinden oluşması mümkün fakat termodinamik açıdan olası olmayan kimyasal koşulların yaratılması için zorunludur ve yukarıda belirtilen fosfolipit yapı oluşumu gibi spontane etmenler dışarıdan enerji girdisine muhtaç olan organizmaların varlığını tek başına açıklayamaz.

İlk organizmaların ortaya çıkışını ve organizmanın varoluşunun asgari koşulunu termodinamik faktörleri göz önünde bulundurarak açıklamaya çalışan Stuart Kauffman'ın çalışmaları, gerek Schrödinger'in gerekse de Kant'ın canlılık için

[5] Dengeden-uzak (İng. *far-from-equilibrium*) sistemlerin biyolojik süreçleri kapsayan ve bu süreçlerin ötesine geçen niteliğinin anlaşılması, 1970'li yıllardan itibaren İlya Prigogine'in öncülük ettiği çalışmalar sayesinde gerçekleşti. (Prigogine & Stengers, 2017) Bu çalışmalarla birlikte self-organizasyon kapasitesinin organizmalar dışında da ortaya çıkabileceği, örneğin sıvı dolu bir kabın ısıtılmasıyla beliren altıgen şekilli Bénard hücrelerinin bu tür dengeden-uzak yapılar olduğu gösterildi. Self-organizasyonun tipik örneği olan bu yapılar moleküllerin bireysel düzeydeki rastgele hareketlerinin kap içindeki ısı farkının yol açtığı yukarı yönlü itki nedeniyle eşgüdüm kazanması sonucu ortaya çıkar. Bu ve benzeri self-organize sistemlerdeki temel örüntü kaotik koşullar içerisinde gerçekleşen çeker (İng. *attractor*) oluşumudur.

öngördüğü ilkeleri birlikte ele alan bir karaktere sahiptir. Kauffman biyolojide self-organizasyonu kapsamlı bir şekilde incelemiştir (ör. Kauffman, 1993). Kauffman'a göre biyolojik otonomiye sahip en küçük birim biri spontane gerçekleşen ve diğeri spontane olmayan iki reaksiyonun eşlendiği bir döngü olmalıdır. (2000) Metabolizma faaliyetlerinde, egzergonik reaksiyonlar spontane gerçekleşir; yani bu reaksiyonlarda serbest enerji açığa çıkar. Endergonik reaksiyonlar ise spontane değildir; yani bu reaksiyonlarda belli bir enerji girdisi gerekir ve bu enerji kimyasal bağlarda saklanır. Bu iki tür reaksiyonun eşlenmesiyle birlikte egzergonik reaksiyondan açığa çıkan enerji endergonik reaksiyonu beslemek için kullanılabilir ve böylece kendi kendini sürdüren bir kimyasal döngü sağlanmış olur. Kauffman'ın bu hipotezi deneysel olarak kanıtlanamamıştır. Buradaki en ciddi eksikliklerden biri, böylesi bir eşlenmenin devamlılığının ekolojik arkaplanının açıklanmamış olmasıdır. Tüm canlı sistemler dışarıdan enerji akışına ihtiyaç duyar, bu da enerji kaynağı olabilecek elementlerin (örneğin günümüz canlı sistemlerinde karbon ve oksijenin) doğadaki çevrimini gerektirir. Kauffman, bu eksikliğin giderilmesi adına, sonraki çalışmalarında birbirlerini katalize eden moleküllerin bir ağ içerisinde yer alacağını, buna eşlik eden bir besin kaynağının ise kendini katalize edebilen bu ağı destekleyeceğini öngörmüştür. (Hordijk, Steel, & Kauffman, 2012)

Kauffman (2020) Schrödinger'in öne sürdüğü düşünceleri güncel bulgular ışığında ele alarak aperiyodik kristal öngörüsünün isabetli olduğunu ileri sürmüştür. Kauffman'a göre DNA'nın kod işlevi görebilmesi organizmanın diğer fiziksel sistemlerden farklı olarak kendi sınır koşullarını belirlemesiyle mümkündür. Sınır koşulları, gerçekleşen fiziksel olayın belirlendiği ortam koşulları anlamına gelir. Örneğin, sıvı dolu bir kabın ısıtılmasıyla birlikte, self-organizasyon dinamikleri Bénard hücrelerinin oluşumuna yol açar (bkz. Dipnot 6). Bu tür bir süreçte sınır koşullarını kabın şekli belirler. Canlılarda ise, DNA, RNA ve proteinler, hatta hücre zarı ve diğer organeller sınır koşullarını oluştururlar. Organizmanın moleküler unsurları aktivasyon sınırını düşürerek reaksiyonları katalize edici bir işlev üstlenir, dolayısıyla canlılarda sınır koşulları dinamik olarak belirlenmiştir ve serbest enerji akışını kısıtlayarak biyolojik açıdan işe (kimyasal reaksiyonlara) aktarılmasını sağlar. Organizmanın sınır koşulları yine organizma içerisinde belirlenmiştir, dolayısıyla kendi sınırlarını belirleyen bir organizasyon söz konusudur.

Kauffman, kodlayıcı gen düşüncesinin yanı sıra organizasyonun bütüncül yanına vurgu yaparak Schrödinger'in yeniden ele alınmasında bir açıdan Moss'un yukarıda açıkladığım perspektifine yaklaşmaktadır. Bununla birlikte, Moss'un (2003) kodlayıcı gen düşüncesine getirdiği temel eleştiri göz önünde bulundurulduğunda, Kauffman'ın aperiyodik kristal varsayımı ile bütüncül organizasyon arasındaki çelişkileri göz ardı ettiği görülebilir. Kauffman, Schrödinger'in yaşamın düzenliliğini aperiyodik kristalle açıklamasının organizmaların dengeden-uzak konumda bulunmasına (Schrödinger'in perspektifinden, negatif entropi koşuluna) bir açıklama getirdiğini öne sürer. Burada, Kauffman moleküler düzenlilik (DNA, RNA ve proteinler) ile kimyasal reaktivite, dengeden-uzak sistemlerin kısıt (İng. *constraint*) koşulları ile organizmadaki içsel

süreçlerin birbirini karşılıklı olarak kısıtlaması[6] arasında paralellik kurmaktadır. Dengeden-uzak dinamiklerle içsel süreçlerin birbirini kısıtlaması arasındaki bağlantı aslında yukarıda sözünü ettiğim, organizmanın alt unsurları arasındaki karşılıklılık ve self-organizasyon düşüncesini destekliyor. Karşılıklı kısıtlayıcılık koşulu ise Kantçı temeldeki organizasyon düşüncesinin termodinamik açıdan yorumlanması olarak değerlendirilebilir. Kant organizmayı oluşturan parçaların karşılıklılığını ve bütünün bireysel ve türsel yeniden üretimini self-organizasyonun dayanağı olarak ele alıyordu. Karşılıklı kısıtlar, organizmadaki belirli parçaların değil fakat farklı tempodaki biyolojik süreçlerin birbiriyle ilişkisini temel alır. Söz konusu dinamik yaklaşım, örneğin bir enzimle o enzimin katalize ettiği reaksiyon arasındaki değişim hızı farkı gibi durumları temel alır. Enzim, görev aldığı kimyasal reaksiyonlardan neredeyse değişime uğramadan çıkar. Bir enzimin nispeten değişmez kaldığı bir kimyasal reaksiyonun geçirdiği süreç ile o reaksiyonda görev alan enzimin kendisinin sentezlenmesi ve ömrünü tamamlaması döngüsü arasındaki tempo farkı ise bu örnekte süreçsel kapanımın temel niteliğine işaret eder. (Moreno & Mossio, 2015) Bu temelde, farklı tempodaki biyolojik süreçlerin karşılıklı ilişkileri dinamik bir kapanım koşulu oluşturur ve organizmanın entropi artışı karşısında süreçsel bir şekilde varlığını sürdürmesini sağlar.

Yakın dönemde öne sürülen biyolojik organizasyon görüşü ile Kant'ın self-organizasyon kavramı arasında paralellik bulunmaktadır. Öte yandan, Kauffman'ın iddia ettiğinin aksine, aynı şeyi Schrödinger'in biyolojik yaklaşımı için söylemek mümkün değildir. Kauffman'ın vurguladığı gibi, organizmadaki ekzotermik reaksiyonlarda ortaya çıkan serbest enerjinin kademeli olarak salınımı ve endotermik reaksiyonların kimyasal bağlarda enerji birikimini sağlaması gerçekten de moleküler düzenliliğin sağlanmasında temel bir role sahiptir, fakat bu etmen kodlayıcı gen (veya aperiyodik kristal) nosyonuyla bağdaştırılabilir mi? DNA ve RNA tek başlarına inaktif moleküllerdir ve organizmanın tamamlayıcı çevre koşulları olmadan kendilerini kopyalayamazlar. Bu nedenle, Schrödinger'in aperiyodik kristal varsayımının organizmaların dengeden-uzak olma koşulunun temeli olarak ele alınabileceği düşüncesi kuşkuludur. Genetik materyalin tek başına kendini kopyalayabilen özelliğinin olmayışı, aynı zamanda Kauffman'ın uygun *in vitro* ortamda RNA benzeri moleküllerin kendi başlarına sentezlenebileceği öngörüsünün deneysel olarak doğrulanmayışının (ve belki de doğrulanamaz olmasının) da temel sebebi olarak görülebilir.

4. Sonuç

Schrödinger'in yaşamla ilgili kuramsal yaklaşımının güncel kalan ufuk açıcı yanlarının yanı sıra sınırlı yanlarının da bulunduğunu söyleyebiliriz. Negatif entropi; organizma, popülasyon ve makro-evrim düzeyindeki biyolojik süreçlerin enerji dönüşümleriyle

[6] Kauffman'ın burada vurguladığı düşüncenin ayrıntılı bir açıklaması Montévil ve Mossio'nun (2015) ilgili makalesinde bulunabilir. Yine aynı doğrultuda, biyolojik organizasyonun farklı tempodaki süreçlerin kapanımı sonucunda gerçekleştiği öne sürülmüştür. (Moreno & Mossio, 2015)

bağlantılı olarak anlaşılmasına dair önemli bir kavram haline geldi.[7] Öte yandan, Schrödinger'in katkı sunduğu gen-merkezci yaklaşımın temel düzeyde sorunları bulunmaktadır: Belirli gen dizilimlerinin fenotipik özellikler üzerindeki belirleyiciliği, makro organizasyondaki düzenin kaynağının genler olduğu anlamına gelmez. DNA'daki stabilitenin diğer seviyelerdeki düzenliliği sağladığı görüşünü desteklemek üzere geçmişte birçok araştırma finanse edilmesine rağmen, bu düşüncenin bir mit olduğu ve hücre, doku ve organizma düzeyindeki stabilitenin genlerin rolünü tamamlayan dinamikleri olduğu bugün ortaya çıkmıştır. (Longo, 2009) Dolayısıyla, canlı varlıkların organizasyon hiyerarşisi, moleküler düzeye indirgenmek yerine farklı katmanlardaki dinamikleriyle birlikte bütüncül bir şekilde ele alındığında anlaşılabilir.[8]

Biyolojideki felsefî problemler açısından bakacak olursak, Schrödinger'in kitabının etkileri çerçevesinde tartıştığımız sorun gen-merkezci düşünce ve bu düşünceye paralel olarak biyolojik sistemlerin farklı düzeylerdeki niteliklerinin moleküler biyolojiye indirgenmesinde düğümleniyor. Schrödinger'in organizmaları denge-dışı sistemler olarak değerlendirmesi, düzenliliğin fizikî dinamikleri ile canlılık arasında önemli bir bağlantıya dikkat çekmektedir. Buna rağmen, Schrödinger'in yaşamın düzenini genlere indirgemesi, organizasyonun diğer etmenlerinin yok sayıldığı bir kuramsal çerçeveye katkı sunmuştur.[9] Canlılığın formunu moleküler biyolojiye indirgeyen gen-merkezci yaklaşımın eleştirisi de zaten genlerin belirleyicilik rolünün kapsamını ve niteliğini tartışmaya açmaktadır. Yukarıda değinildiği gibi, genlerin organizma üzerindeki belirleyiciliği organizasyondaki kontekste bağlıdır. Çünkü diğer genlerin ve genler dışındaki moleküler unsurların bağlamı belirli bir genin ne şekilde ifade edileceğini belirler ve çoğu durumda belirli bir gen belirli bir düzenlilik örüntüsüyle özdeş değildir. Üstelik, genlerin ifade edilmesi, genler ile diğer üst düzey unsurlar (örneğin transkripsiyon faktörleri gibi proteinler ve düzenleyici ağlar) arasında ve yine genlerle çevresel etmenler arasında (epigenetik açıdan incelenen) yoğun geri-besleme ilişkilerinin bulunduğunu gösterir. Bu durum ise organizma ve organizma ötesindeki

[7] Schrödinger'in negatif entropi temelindeki yaklaşımını bakteri yaşamı bağlamında uygulayan bir çalışma için bkz. Von Stockar ve Liu, (1999). Popülasyon düzeyinde evrimsel belirim ve hiyerarşi düşüncesini Schrödinger'den ilham alarak araştıran bir çalışma olarak bkz. Crutchfield & Görnerup (2006). Brooks ve Wiley (1988) ise, makro evrim dinamiklerini entropi ekseninde ele almıştır.

[8] Bu noktada, belirim (İng. *emergence*) kavramı temelinde problemler ortaya çıkıyor–ki bu problemlere dair biyoloji ve fizik temelinde birçok felsefi argüman üretilmiştir. Örneğin, makro yapıların nihayetinde mikro düzeyde en ayrıntılı şekilde incelenebilen parçacıklar olduğu ve bu nedenle makro özelliklere dair tüm bilimsel kuramların nihayetinde kısmi ve yüzeysel olduğu, ölçek hiyerarşisi temelinde belirim düşüncesine karşı güçlü bir eleştiridir. Bu tartışma başlı başına bir öneme sahip olduğundan, bu makalede ayrıntısına girmiyorum.

[9] Elbette gen-merkezciliğin eleştirmenleri de dahil olmak üzere hiçbir araştırmacı genlerin fenotipik özellikler üzerinde en azından kısmî oranda belirleyici rolü olduğunu reddetmiyor. Bu tür bir belirlenimin en açık örneği, tek bir gendeki değişimin tüm hücreleri etkilediği monojen (tek-genli) hastalıklardır. Örneğin, hem anne hem de babadan kusurlu genin geçmesiyle açığa çıkan orak hücre anemisi bu tür bir hastalıktır. Bu hastalıkta, tek bir gendeki değişim kandaki alyuvar hücrelerinin şeklinin yuvarlak değil orak biçiminde olmasına neden olur. Orak biçimli hücreler ise yuvarlak yapıdaki hücrelerin aksine birbirlerine geçerek kan damarlarında tıkanıklığa, buna bağlı olarak da (alyuvar hücreleri oksijen taşıdığından) oksijen taşınmasında aksaklığa yol açar. Bununla birlikte, buradaki örnekteki gibi tek bir gene indirgenebilen özelliklerin sayısı oldukça sınırlıdır.

sistem dinamiklerinin genler üzerinde belirleyiciliği olabileceğini, dolayısıyla genlerin düzenin yegâne kaynağı olamayacağını gösterir. (Oyama, Griffiths, & Gray, 2001)

Canlı sistemlerde bütünün organizasyon dinamikleri karşılıklı bağımlılık ve geri-besleme ilkeleri temelinde belirlenir. Metabolizmanın süreçsel olarak organizmanın maddesini yeniden üretmesi bizi Kant'ın ortaya attığı self-organizasyon kavramını yeniden ele almaya götürüyor. Yukarıda açıkladığım üzere, Kant organizmada amaç ve aracın bütünleştiğini ifade ediyor ve bunun temeli olarak da parçaların arasındaki karşılıklılık ilkesini gösteriyordu. Kant'ın burada sözünü ettiği, döngüsel türde bir nedensellik ilişkisidir. Organizma kendini sürekli olarak yeniden üretir; embriyonik gelişim, metabolizma ve hareket (hayvansal hareket, bitkilerdeki ışığa yönelim vs.) gibi süreçler organizmada bütünleşmiştir ve herhangi bir dinamik etmenin veya parçanın başlatıcı olmasından söz edemeyiz. Öyle ki, türsel ve bireysel düzeydeki döngüsel süreçler–elbette evrimsel dönüşüm potansiyeliyle birlikte—biyolojik varoluşun temelidir. Organizma yapısal olarak "vardır" ve "eyler" demek yerine, organizma kendini "eylemiyle var eder" diyebiliriz ancak.[10] Bütüncül açıklama organizmacı bir çözüm önerisini, bütünü bütün yapan organizasyon dinamiklerini temel almakla birlikte parçadaki kendine özgü evrimsel ve morfogenetik arkaplanı da reddetmez. Gen-merkezcilik karşısında böylesi organizmacı bir yaklaşım hiç kuşkusuz nihai bir çözümden çok, çözüme giden yolda problemin daha sağlam bir temele oturtulmasını öngörmektedir.

Schrödinger, *Yaşam Nedir?*'in son kısmında, yaşamın çözüm bekleyen problemlerini kendi felsefî inançları uyarınca tartışır—ki bu inançlar Hinduist Vedanta sisteminin mistisizminden yoğun olarak etkilenmiştir. Bu doğrultuda Schrödinger, yaşamın sırlarının bilincin anlaşılmasıyla çözülebileceği, insandaki (canlılıktaki) bilincin ise, doğu mistisizmini yansıtan bir şekilde, evrensel bir algı, evrenin kendisini algılaması olduğu düşüncelerini ifade eder. Schrödinger'e göre Vedanta felsefesi bu anlamda madde-zihin ikiliği ve özgür irade-zorunluluk problemlerini çözmemize yardımcı olabilir. Schrödinger'in yeni doğa yasalarıyla birlikte bilinç-madde ve irade anlayışımızı felsefî olarak kökten değiştirecek entelektüel değişimlerin yaşanabileceği umudunu taşıdığı bu son kısımda seziliyor. Onun bu tür mistik görüşlere yer vermesi, kitabı okuyan birçok bilim insanı tarafından şaşkınlıkla, yer yer de tepkiyle karşılanmıştır (ör. Muller, 1946). Bu bölümde, bir anlamda bir tür "mistisizme sığınma" söz konusudur. Öyle ki Schrödinger, ele aldığı bilimsel sorunlar karşısında biyoloji ve kimyanın sunabileceği olası çözümleri göz ardı ediyor ve keşfedilebilecek yeni doğa yasalarını işaret ediyordu. Schrödinger'in yöneldiği mistisizm XX. yüzyıl fizikçileri açısından yeni bir durum değil: J. Robert Oppenheimer, David Bohm ve daha birçok fizikçi de kuantum mekaniği ile doğu felsefesi arasında paralellikler görmüş ve bu felsefeye ilgi

[10] Bu düşünce, özyaratım (otopoyez) kavramını ortaya atan Maturana ve Varela (1980) tarafından da vurgulanmıştır. Diğer yandan, bilinçli eylemi önceleyen biyolojik devinim problemi, örneğin biyolojik ritim ve embriyonik gelişim gibi etmenler de ortada duruyor. Bu nedenle "organik süreçsellik organizmanın varoluş koşuludur" demek daha doğru ve kapsayıcı olacaktır. Buna rağmen "eylem"in varoluş koşulu olmasını vurgulamamın sebebi ise özyaratım gibi bilincin başlangıcını yaşamın kökenine dayandıran yaklaşımlar çerçevesinde, böylesi bir tanımlamanın da savunulabilir olmasıdır.

duymuşlardır. Batı felsefesinde bilinci (dolayısıyla gözlemciyi) maddeden soyutlayan Kartezyen görüşün ve nesne ontolojisinin egemen olması ve ilgili fizikçilerin bu felsefî görüşlerin modern fizikteki gelişmelere denk düşmediğini sezmesi, batıdaki bu görüşlere alternatif teşkil eden doğu felsefesine böylesi bir yönelimi açıklayabilir.

Yaşam Nedir? kitabının güncelliğini yitirmemesi ve belki uzun süre daha yitirmeyecek olması, Schrödinger'in sorduğu soruların felsefî açıdan kışkırtıcı olması, fizik ve biyolojiyi bir araya getirmesi ve fiziğin mevcut bilimsel temellerini canlılık bağlamında sorgulamasında yatıyor. Bu konuda Schrödinger'in en iddialı varsayımlarından biri, canlılığı düzenli ve stabil yapan unsurların yeni fizik yasalarının keşfiyle anlaşılabileceğidir. Yaşamın moleküler temellerinin anlaşılmasında bir hayli yol alındığını söyleyebiliriz. Kuantum fiziğinin sonuçlarının biyolojiye uygulanması ise oldukça yeni bir süreç ve bu alan belki de fiziği değiştirebilecek yeni keşiflere dahi gebe olabilir. Kuşkusuz, bu konuda—kendi savları çokça eleştirilmiş olsa da—Schrödinger'in kitabı temel bir ilham kaynağı olarak çoktan tarihte yerini almıştır. Biyolojiyle fiziği ortak olarak ele alan bir bilimsel yaklaşımın yeni doğa yasalarına kapı aralayabileceği düşüncesine katılıyorum. Kant, Newton'un fizikteki başarısından öylesine etkilenmişti ki insan aklının sınırları ve bilim-felsefe ilişkisine dair görüşlerini bu doğrultuda geliştirdi. Fakat, kendisi bir yandan da biyolojinin Newton'u olamayacağını, çünkü fizikteki mekanik, yasalı açıklamalara nazaran biyolojideki teleolojinin açıklanamaz olduğunu savunuyordu. Schrödinger'in düşüncesine paralel olarak diyebiliriz (ve umut edebiliriz) ki, belki de Kant'ın dikkat çektiği bu uçurum kapanabilir ve doğadaki yasalılık düşüncesi dahi biyoloji ve fiziği birlikte ele alan teorik yaklaşımlarla birlikte yeni bir tarzda ele alınabilir (ör. Smolin, 1999).

KAYNAKÇA

Beadle, G. W., & Tatum, E. L. (1941). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 27,* 499-506.

Bernal, J. D. (1951). *The Physical Basis of Life.* Abingdon: Routledge and Paul.

Brooks, D. R., & Wiley, E. O. (1988). Evolution as Entropy: Towards a Unified Theory of Biology. D. L. Hull (Ed.), *Science and Its Conceptual Foundations* içerisinde. Chicago: The University of Chicago Press.

Bussard, A. E. (2005). A Scientific Revolution? *EMBO Reports 6* (8), 691-694.

Crutchfield, J. P., & Görnerup, O. (2006). Objects that Make Objects: the Population Dynamics of Structural Complexity. *Journal of The Royal Society Interface*, *3* (7), 345-349.

Davis, R. H. (2007). Beadle's Progeny: Innocence Rewarded, Innocence Lost. *Journal of Biosciences*, *32* (2), 197-205.

Dawkins, R. (1989). *The Selfish Gene*. Oxford: Oxford University Press.

Delbrück, M. (1971). Aristotle-totle-totle. J. Monod & E. Borek (Ed.) içerisinde, *Of Microbes and Life* (ss. 50-5). New York: Columbia University Press.

Domondon, A. T. (2006). Bringing Physics to Bear on the Phenomenon of Life: the Divergent Positions of Bohr, Delbrück, and Schrödinger. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, *37* (3), 433-458.

Dronamraju, K. R. (1999). Erwin Schrödinger and the Origins of Molecular Biology. *Genetics*, *153* (3), 1071-1076.

Gribbin, J. (2005). *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde* (N. Çatlı, çev.). İstanbul: Metis Yayınları.

Haldane, J. B. S. (1949). *What Is Life?* Londra: Alguin Press.

Hopkins, F. G. (1913). The Dynamic Side of Biochemistry. *Nature*, *9 2* (2294), 213-223.

Hordijk, W., Steel, M., & Kauffman, S. A. (2012). The Structure of Autocatalytic Sets: Evolvability, Enablement, and Emergence. *Acta Biotheoretica*, *60* (4), 379-392.

Judson, H. F. (1996) *The Eighth Day of Creation: Makers of the Revolution in Biology*. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press.

Kant, I. (2007). *Critique of Judgement* (J. C. Meredith, çev.). Oxford: Oxford University Press.

Kauffman, S. A. (1993). *The Origins of Order*. Oxford: Oxford University Press.

Kauffman, S. A. (2000). *Investigations*. Oxford: Oxford University Press.

Kauffman, S. A. (2020). Answering Schrödinger's "What Is Life?" *Entropy*, *22* (8), 815.

Keller, E. F. (2009). Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-organization, Part Two. Complexity, Emergence, and Stable Attractors. *Historical Studies in the Natural Sciences*, *39* (1), 1-31.

Longo, G. (2009). From exact sciences to life phenomena: Following Schrödinger and Turing on programs, life and causality. *Information and Computation*, *207* (5), 545-558.

Luisi, P. L. (2006). *The Emergence of Life: From Chemical Origins to Synthetic Biology*. Cambridge: Cambridge University Press.

Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1980). Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living. R. S. Cohen & M. W. Wartofsky (ed.) içerisinde, *Boston Studies in the Philosophy of Science*. Boston & London: D. Reidel Publishing Company.

McLaughlin, P. (2001). *What Functions Explain: Functional Explanation and Self-Reproducing Systems*. Cambridge: Cambridge University Press.

Milo, R. & Phillips, R. (2015). *Cell Biology by the Numbers.* New York: Garland Science.

Montévil, M., & Mossio, M. (2015). Biological Organisation as Closure of Constraints. *Journal of Theoretical Biology*, *372*, 179–191.

Moore, W. (2015). *Schrödinger: Life and Thought*. Cambridge: Cambridge University Press.

Moreno, A., & Mossio, M. (2015). Biological Autonomy: A Philosophical and Theoretical Enquiry. C. T. Wolfe, P. Huneman, & T. A. C. Reydon (Ed.) içerisinde, *History, Philosophy and Theory of Life Sciences*.

Moss, L. (2003). *What Genes Can't Do*. Cambridge: M.I.T. Press.

Muller, H. J. (1927). Artificial Transmutation of the Gene. *Science*, *66* (1699), 84-87.

Muller, H. J. (1946). A Physicist Stands Amazed at Genetics. *Journal of Heredity*, *37*, 90-92.

Murphy, M. P., & O'Neill, L. A. J. (1997). *What is Life? The Next Fifty Years: Speculations on the Future of Biology*. Cambridge: Cambridge University Press

Needham, J. (1930). *Order and Life*. Cambridge: M.I.T. Press.

Newman, S. A., and Linde-Medina, M. (2013). Physical Determinants in the Emergence and Inheritance of Multicellular Form. *Biological Theory*, *8* (3), 274-285.

Prigogine, I., & Stengers, I. (2017). *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. Londra: Verso.

Schrödinger, E. (2012). *What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge: Cambridge University Press. (İlk kez 1944'te basıldı.)

Smolin, L. (1999). *Life of Cosmos.* Oxford: Oxford University Press.

Von Stockar, U., & Liu, J. S. (1999). Does Microbial Life Always Feed on Negative Entropy? Thermodynamic Analysis of Microbial Growth. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, *1412* (3), 191-211.

Watson, J. D. (2001). *The Double Helix: A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA*. New York: Touchstone.

Weber, B. H. (2010). What is Life? Defining Life in the Context of Emergent Complexity. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, *40* (2), 221-229.

Wilkins, M. H. F. (1963). Molecular Configuration of Nucleic Acids. *Science*, *140* (3570), 941-950.

Yoxen, E. J. (1979). Where does Schroedinger's "What is Life?" Belong in the History of Molecular Biology? *History of Science*, *17*(1), 17–52.