

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
İKTİSAT ANA BİLİM DALI  
İKTİSAT TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KOMPLEKSİTE VE AJAN BAZLI KOMPÜTASYONEL  
İKTİSAT**

**DİLHAN DEMİR  
16710015**

**TEZ DANIŞMANI  
PROF. DR. ERCAN EREN**

**İSTANBUL  
2020**

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
İKTİSAT ANA BİLİM DALI  
İKTİSAT TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KOMPLEKSİTE VE AJAN BAZLI  
KOMPÜTASYONEL İKTİSAT**

**DİLHAN DEMİR  
16710015  
ORCID NO: 0000-0003-0911-7689**

**TEZ DANIŞMANI  
PROF. DR. ERCAN EREN**

**İSTANBUL  
2020**

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
İKTİSAT ANA BİLİM DALI  
İKTİSAT TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KOMPLEKSİTE VE AJAN BAZLI  
KOMPÜTASYONEL İKTİSAT**

**DİLHAN DEMİR  
16710015**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26.08.2020**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 17.08.2020**

**Tez Oy Birliği ile Başarılı Bulunmuştur**

**Unvan Ad Soyad**

**İmza**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ercan EREN**

**Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Yasemin Asu ÇIRPICI**

**: Doç. Dr. Kaan ÖĞÜT**

**İSTANBUL  
AĞUSTOS 2020**

## ÖZ

### KOMPLEKSİTE VE AJAN BAZLI KOMPÜTASYONEL İKTİSAT

**Dilhan Demir**

**Ağustos, 2020**

Geleneksel iktisadi modellerin temelleri “rasyonel temsilci ajan” gibi basit ve gerçekçi olmayan varsayımlara dayanır. Bu varsayımlar yoluyla analitik olarak izlenebilir modeller kurulmuş ve ekonomide büyük ilerlemeler kat edilmiştir. Fakat ekonomistler insanların birbirlerinden farklı olduğunu ve genellikle rasyonel davranmadıklarını göz ardı etmişlerdir. Ancak kompleksite iktisadı, bu indirgemecilik metoduna güvenmeyerek eski paradigmaları ortadan kaldırır. Kompleksite iktisadı; dengeden uzak kompleks dinamik yapılardan oluşan, öğrenen ve uyum sağlayan çeşitli heterojen ajanların karşılıklı bağımlılığı ve etkileşimi ile karakterize edilen patika bağımlı bir süreç olarak nitelendirilir.

Bu çalışmada, değişen ve gelişen dünyada kompleksitenin önemi ve ekonominin bir kompleks sistem olarak ele alınması gerektiği vurgulanmıştır. Bunun için kompleksite yaklaşımı tanımlanarak, geleneksel iktisadi teorilerin yetersizlikleri ve bu çerçevede kompleksite iktisadı incelenmiştir. Kompleksite iktisadında, bilginin ve/veya metodolojilerin disiplinler arasında paylaşılması, kendini sürekli yenilemesi ve evrilen bir süreci kapsadığı ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda, bilgisayar ve davranış bilimindeki gelişmelerle evrimci süreci modellemek ve ekonominin kompleks tabiatını göstermek için ajan bazlı kompütasyonel iktisattan (AKİ) yararlanılmıştır. AKİ, sınırlı rasyonel ajanlar arasındaki etkileşimi modelleyerek ekonominin alanının ötesine geçmesine ve geleneksel metotlarla çözülemeyen kompleks yapıların araştırılmasına olanak sağlamıştır. Yüksek frekanslı takas işlemleri, sosyal veya bireysel öğrenme ve davranışsal modelleme örnekleri ile AKİ desteklenmiştir. Bu çalışmayla, mantığın, duygunun ve toplum tarafından inşa edilmiş norm ve rollerin insanlar arasındaki bağdan etkilendiği ve bu etkiyle birlikte ekonomide gerçekçi olmayan hatta verimsiz kabul edilebilecek metodolojik anlayıştan çıkılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu anlayışına alternatif olarak “yeni (makro) iktisat” anlayışı oluşmaya başlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kompleks Sistemler, Kompleksite, Kompleksite İktisadı, Ajan, Ajan Bazlı Modelleme, Ajan Bazlı Kompütasyonel İktisat.

## **ABSTRACT**

### **COMPLEXITY AND AGENT BASED COMPUTATIONAL ECONOMICS**

**Dilhan Demir**

**August, 2020**

General economic theories are often based on unrealistic assumptions and fictional components such as “rational representative agents”. In spite of this shortcoming, analytically traceable models were developed and ample progress has been made in the field of economics until now. The fact that people are diverse and usually irrational was mostly overlooked throughout this advancement. Complexity economics though, disregards the logic of reductionism and challenges these out-of-date paradigms. Complexity economics is a path-dependent process, mainly associated with non-equilibrium dynamics and interrelationships of learning heterogenous agents.

The importance of complexity in an ever-changing world and the necessity of handling economics as a complex system was emphasized in this study. To attain this emphasis, the approach of complexity was provided and the deficiencies of traditional economic theories were demonstrated along with complexity economics in the same framework. The sharing environment between different disciplines, the constant adaptation of the complexity approach against novelty and the evolutionary nature of complexity economics were displayed. Agent-based computational economics (ACE) approach was picked as a medium to model the behavior of complexity and to project the progress in computational and behavioral sciences on to the evolutionary economics landscape. ACE in this context has helped economics to surpass its historic confines providing a solution to complex problems hitherto left unsolved by modelling the behavior of interacting agents with bonded rationality. High frequency trading atmospheres, social vs. individual learning are some of the few examples to supplement the ACE approach. The conclusion of this study is the eventual departure from the inefficient methodology of economics that presumes impractical conditions for economic systems where it is widely known that each logical, emotional and social construct is highly susceptible to relationships between people which lay the ground for an atmosphere that is impossible to simplify. This inefficient methodology is now gradually being replaced by “new (macro) economics”.

**Key Words:** Complex Systems, Complexity, Complexity Economics, Agent, Agent Based Modelling, Agent Based Computational Economics.

## ÖN SÖZ

Öncelikle bu çalışmanın oluşmasında tez danışmanım olmayı kabul ederek Kompleksite İktisadı ile tanışmama büyük katkı sağlayan ve bu süreçte yardımlarını esirgmeden sabırla yol gösteren Sn. Prof. Dr. Ercan Eren'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu uzun çalışma sürecinde motivasyonumu yükselten yardımları ve destekleriyle beni her zaman teşvik ederek yanımda olan sevgili arkadaşım Cenker Çakın'a emeği ve anlayışı için teşekkür ederim. Aynı zamanda tezimin yeniden düzenlenmesinde adeta bir editör edasıyla yazım konusunda destek veren arkadaşım Ömer Faruk Işıksal'a yorumları ve yönlendirmeleri için teşekkür ederim.

Eğitim öğretim hayatımın ilk adımından itibaren maddi ve manevi desteğini esirgemeyen babam Serdar Demir ve ablam Hazal Demir'e, en çok da yüksek lisansa kabul edildiğim haberini aldıktan sonra birlikte sevindiğim maalesef bitirirken birlikte olamadığım, üç sene önce kaybettiğim canım annem Özlem Sevüktekin'e bugün olduğum kişiye dönüşmemi sağladığı için sonsuz teşekkür ederim.

İstanbul; Ağustos, 2020

Dilhan DEMİR

## İÇİNDEKİLER

ÖZ.....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR .....	ix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KOMPLEKSİTE’NİN DOĞUŞU VE KOMPLEKSİTE TEORİSİ.....</b>	<b>3</b>
2.1. Kompleksite Teorisi .....	4
2.1.1. Kaos .....	6
2.1.2. Enformasyon .....	7
2.1.3. Kompütasyon .....	8
2.1.4. Fraktallar .....	10
2.2. Kompleksite Nedir? .....	11
2.3. Kompleks Sistemin Özellikleri .....	14
2.4. Kompleksite İktisadı Nasıl Ortaya Çıktı? .....	20
2.4.1. Geleneksel İktisat Teorilerin Yetersizliği .....	21
2.4.2. Neoklasik Yaklaşım ve Basite İndirgenmiş Kabulleri .....	26
2.4.3. Kompleksite İktisadı .....	29
2.5. Kompleksite İktisadı Diğer Bilimlerle İlişkisi .....	32
2.5.1. Kompleksite İktisadı ve Fizik .....	33
2.5.2. Kompleksite İktisadı ve Biyoloji .....	35
<b>3. AJAN BAZLI MODELLEME.....</b>	<b>37</b>
3.1. Ajan Kavramı .....	41
3.1.1. Ajanların Özellikleri.....	41
3.1.2. Birey Kavramının Yetersizliği .....	44
3.1.3. İnsan Psikolojisi .....	46
3.2. Ajan Bazlı Kompütasyonel İktisat .....	48
3.3. Ajan Türleri.....	51
3.4. Ajan Bazlı Modelleme Uygulamaları .....	55
<b>4. SONUÇ.....</b>	<b>60</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>62</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>66</b>

## TABLÖLAR LİSTESİ

<b>Tablo 1:</b>	Dinamik Stokastik Genel Denge Modelleri ile Ajan Temelli Modellerin Karşılaştırılması.....	23
<b>Tablo 2:</b>	Kompleksite İktisadı ile Geleneksel İktisat Arasındaki Farklar .....	25
<b>Tablo 3:</b>	Neoklasik İktisat ile Kompleksite İktisadı Arasındaki Farklar.....	27
<b>Tablo 4:</b>	Otonom Ajanlar için Zekâ Parametreleri.....	54



## ŞEKİLLER LİSTESİ

<b>Şekil 1:</b>	Algoritma Katmanları.....	9
<b>Şekil 2:</b>	Sırasıyla 1, 3, 5 ve 10 Yinelemeyle Ortaya Çıkan Basit Fraktal Ağaç ...	11
<b>Şekil 3:</b>	NK Uzayında, Durum Uzayı Ekseni .....	13
<b>Şekil 4:</b>	Bir Kanser Hücrelerine Saldıran Bağışıklık Sistemi Hücreleri .....	17
<b>Şekil 5:</b>	Lale Piyasasındaki Fiyat Dinamikleri .....	18
<b>Şekil 6:</b>	New York Borsası 1920'ler.....	32
<b>Şekil 7:</b>	a. Walrasçı Genel Denge Temsili; b. Rasgele Model; c. Birden Çok Lokal Düğümün Olduğu Denge Modeli.....	40
<b>Şekil 8:</b>	Yineleme Sayısı ile Optimal Çözüm Arasındaki İlişki .....	44
<b>Şekil 9:</b>	Yorulma Eğrisi .....	45
<b>Şekil 10:</b>	Seçim Kararlılığı, Getiri ve İmitasyon Frekansı Arasındaki İlişki.....	56
<b>Şekil 11:</b>	Dört Farklı Satış Stratejisine Dair Farklı Alıcıların Fiyat Kutu Diyagramı .....	57
<b>Şekil 12:</b>	Dört Farklı Satış Stratejisine Dair Farklı Alıcıların Açık Pozisyon Kutu Diyagramı.....	58
<b>Şekil 13:</b>	Volatilite ve Takas Hacmi .....	59

## KISALTMALAR

<b>ABM</b>	: Ajan Bazlı Modelleme
<b>AKİ</b>	: Ajan Bazlı Kompütasyonel İktisat
<b>AT</b>	: Algoritmik Takas (Algorithmic Trading)
<b>CEF</b>	: Uluslararası Ekonomi ve Finans'ta Kompütasyon Konferansı (International Conference on Computing in Economics and Finance)
<b>ÇAS</b>	: Çok Ajanlı Sistemler
<b>HFT</b>	: Yüksek Frekanslı Takas (High Frequency Trading)
<b>KAS</b>	: Kompleks Adaptif Sistemler

## 1. GİRİŞ

Ekonomideki teorik çerçeveyi oluştururken ikili formülasyonlar tek başına yeterli değildir. Çünkü iktisat, bileşenleri arasında karşılıklı etkileşimin olduğu dengeden uzak, açık ve doğrusal olmayan (nonlinear) dinamik bir yapıdır. Zaman içinde toplumsal koşullara bağlı olarak değişir ve bunların arkasındaki tarihsel süreç de göz ardı edilmemelidir. Geleneksel ekonomik teorilerden günümüz kompleksite iktisadına kadarki tüm perspektifler her zaman bir öncekinin başarılı bir çevirisidir.

Kompleksite sadece ekonomik alanda değil birçok alanda, problemlerin çözümünde optimal karar verme için yapılan bir ön çalışma olarak nitelendirilebilir. 80'li yıllarda ortaya çıkan kompleksite iktisadı kavramı, geleneksel teorilerin basit analitik çıkarımlarının önüne geçmek için “yeni” bir kapı açmıştır. İnterdisipliner bir yaklaşım benimseyen kompleksite bilimi, fizik, matematik, felsefe ve psikoloji gibi bilimlerle iç içe geçerek bunların iktisatta yansımalarını daha önce irdelenmemiş bir biçimde yorumlamıştır.

Bu çalışma, geleneksel iktisadi teorilerin, ekonomilerin günümüz kompleks yapısını açıklamadaki yetersizliğinden hareketle doğmuştur. Bu kapsamda çalışmada kompleksite biliminin nasıl ortaya çıktığı, kompleksite teorisinin kaos, enformasyon, kompütasyon ve fraktallar ile olan ilişkisi ve kompleks sistemlerin özellikleri ele alınarak iktisat incelenmiştir.

Çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde giriş yer almakta olup, ikinci bölümde kompleksite biliminin doğuşu, kompleksite teorisi, kaos, enformasyon, kompütasyon ve fraktallar hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Devamında ise şimdiye kadar üzerinde uzlaşmaya varılmış tek bir kompleksite tanımı olmadığı için çeşitli kaynaklardan kompleksite açıklanmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda kompleks sistemlerin özellikleri, kompleksite iktisadının nasıl ortaya çıktığı ve kompleksite iktisadının fizik ve biyolojiyle olan ilişkisi anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, geleneksel iktisadi teorilerin dinamik stokastik genel denge (DSGD) modellerindeki ajan yaklaşımından yola çıkarak kompleks sistemlerdeki ajan kavramı, ajanların özellikleri ve sınırlı rasyonalite sahip ajanlara karşılık, sınırlı işlemsel becerileri olan bireyin yetersizliğinden bahsedilmiştir. Devamında ise bu etkileşen özerk ajanların hesaplamalı çalışması olarak adlandırılan ajan bazlı modelleme (agent-based modeling), bunların iktisattaki uygulamaları olan ajan bazlı kompütasyonel iktisat (agent-based computational economics) ve modellerde kullanılan ajan türlerine dair bilgiler verilmiştir. ABM örnekleri sunularak bu bölüm bitirilmiştir.

Son olarak dördüncü bölümde sonuç ve çıkarımlar yapılarak çalışma sonlandırılmıştır.

## 2. KOMPLEKSİTE’NİN DOĞUŞU VE KOMPLEKSİTE TEORİSİ

İnsanoğlu, ilk bilimsel faaliyetin ne olduğu ya da bilim adı verilen olgunun ne zaman başladığı ile ilgili kesin bir fikre sahip değildir. Geçmişten günümüze bilim, bırakılan belgeler ve eserlere göre daha iyi anlaşılmış olsa da insanların tarih öncesi dönemde doğayla bağlantıları mistisizm ile ilişkilendirilmiştir (Şahin ve diğ., 2017). Bilimin tam bir tarafsızlık barındırması gerekirken insanlar daha geniş yelpazede inançlar, önyargılar, meraklar, tanıdık yapılar ve alışlageldik durumlara göre kararlarını şekillendirir. Ayrıca, kültürün insan davranışı üzerindeki güçlü etkisiyle bilim, genelde yanlış sonuçlara varabilir. D. Kahneman’a göre insanlar birçok kararı içgüdüsel ve çabuk verir. Kariyer, iş ve aile gibi uzun vadeli planlar ile ilgili kararlarını tanıdık olanı seçme güdüsüyle alırlar (Van den Berg, 2015; Kahneman, 2011). Buradan hareketle, mistisizm ve inanç unsurlarının çok yakın zamana kadar bilimin önemli bir parçası olduğu anlaşılmaktadır.

Değişen ve hızla gelişen bir dünyada insanlar, çevresinde olup biteni doğaüstü güçler yerine akıl ve bilim yoluyla açıklamaya çalışmışlardır. Aydınlanma çağı olarak adlandırabileceğimiz bu dönemde akıl ve sezgi daha ön plana çıkmış, bilimin doğayı ve toplumu anlamak için tek yol olduğu anlaşılmıştır (Şahin ve diğ., 2017).

Doğada her olay bir neden-sonuç ilişkisi ile birbirine bağlıdır ve bu ilişkiler arasındaki yasaların da iyi anlaşılması gerekmektedir (Şahin ve diğ., 2017). Çünkü, tabiat kanunları ve doğal denge yasaları ekonomi bilimine detaylı bir şekilde aktarılmıştır. Örneğin, klasik fizik paradigmasının (bir gezegenin hareketi onu oluşturan atomların dinamikleriyle açıklanması ya da bir elmanın yere düşmesi) bir sonucu olarak, mikro ve makro arasındaki fark, indirgemeci bir yaklaşımla analiz edilmektedir. Yani, bireylerin psikolojik ve nörolojik etkileri ile aldıkları karar ve seçimlerinin toplamıyla ekonomi genelinde sonuca varılır. Tıpkı kâinatın çok sayıda küçük parçaların toplamından oluşması gibi. Bunun neticesinde bireylerin piyasa sonuçları üzerindeki etkileri deterministik bir yaklaşımla elde edilmiş olur. Bu, mikro ve makro arasında bir fark olmadığı anlamına gelir: Bütünün dinamikleri,

bileşenlerinin dinamikleri toplamından başka bir şey değildir. Bu yaklaşımın yanılığı, sistemin toplam özellikleri arasında karşılıklı bağıllık olabileceğini dikkate almamaktır. Çünkü etkileşimde bulunan elemanlar, bu elemanların da reaksiyon gösterebileceği makro ölçekte bazı sonuçlar üretir. Makro iktisatçıların genelde fark edemedikleri şey, makro boyuttaki piyasa koşullarının onu oluşturan bireyler ile tekrar iletişime geçip daha kompleks ve farklı sonuçlar üretebileceğidir (Gallegati, Richiardi, 2009).

Bugünün gerçekliğinde, her şeyi kusursuzca bilmenin mümkün olmadığı açıkça görülmektedir. Bu noktada, kompleksite, aranan bazı cevaplar için artan etkileşimler ve sistem çıktısının neredeyse kaçınılmaz bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Yirminci yüzyılın ortalarına doğru, birçok farklı alanın birleşiminden oluşan kompleksite teorisi (complexity theory), henüz sınırları kesin olarak çizilemeyen yeni bir bilim dalıdır (Mitchell, 2009).

Rutledge'a (2015) göre, bilginin arttığı ve sosyal ağların hız kazandığı dünyada ekonomik değiş tokuşun da gittikçe artmasının sonucu olan kompleks yapıların ortaya çıkmasının sebepleri aşağıdaki gibidir:

- İnsanların birbirlerinin hayatlarını gerçek-zamanlı bir biçimde izleyebilmesi ile varlık ve gelir farkları arasındaki uçurumun şeffaf hale gelmesi
- Komünikasyon ve teknolojinin gelişmesi ile insanlar arasındaki bilgi ve kaynak transferinin artması
- Dünya piyasalarının daha verimli ve eş güdümlü bir biçimde hareket etmesi

Ekonomideki sistemik değişimleri ve sosyal yönelimleri, ekonominin temel analitik yöntemlerinden biri olan “marjinal değişiklik” ile analiz etmek sonucu saptırabilmektedir. Aksine, kompleksite teorisi sayesinde politika regülasyonlarından, değişen kişisel davranışlara kadar toplumu tüm kompleksliğiyle analiz etmek mümkündür (Scarborough, Burnside, 2014).

## **2.1. Kompleksite Teorisi**

Kompleksite, çeşitli disiplinlerde içsel değişim ve dönüşümü anlamak için yeni bir birleştirici teori olarak ortaya çıkmıştır (Antonelli, 2009). Aynı zamanda kompleksite teorisinin, kısmen doğrusal olmayan dinamik ve stokastik dinamik sistemler üzerine

çalışmalardan ortaya çıktığı da söylenebilir (Eser, 2016). Bu teoriye göre, bir sistemin kritik bileşenleri ile aralarındaki etkileşimleri tanımlamak ve seçilen çözüm tekniğinin ortaya çıkan analitik çerçevede işe yarar olup olmadığına karar vermek gerekmektedir (Schwardt, 2017). Kompleksite teorisi, bilgisayarların hayatımıza girmesiyle beraber insanların ulaşamayacağı hesaplama problemlerinin kolayca çözülebileceğini göstermiştir. Diğer taraftan her hesaplama problemi bilgisayarlarla çözülebile de bazı durumlarda bilinen algoritmalar tamamen kullanışlı olmayabilir (Talbot, Welsh, 2006, 10-12):

### Örnek 2.1. Gezgin Satıcı Sorunu (The Travelling-Salesman Problem)

Sorun:  $n$  şehir listesi,  $c_1, c_2, \dots, c_n$  ve mesafelerin ( $D$ ) yer aldığı  $n \times n$  simetrik matris, öyle ki

$$D_{ij} = c_i \text{ şehrinden } c_j \text{ şehrine olan mesafe,}$$

Buradaki sorun, şehirlerin her birini bir kez ziyaret eden en uygun ve en kısa turu belirlemektir.

Sırasıyla tüm turları deneyerek en kısa olanı seçmek, doğru cevabın bulunmasını sağlayacak en kolay algoritma olsa da uzun zaman alacaktır. Bunun sebebi  $n!$  kadar rotanın tek tek denenmesi gerektiğidir. Bu problem için daha verimli algoritmaların ortak özelliği, en azından  $2^n$  sayıda operasyonun yürütülmesi şeklindedir.

Tüm bilgisayarlar, zaman ve mekân kaynaklarından kolay gözlenebileni kullanır. Basit bir ifadeyle, eğer “çok büyük olmayan” bir sorun “makul” bir sürede bir bilgisayar tarafından çözülebiliyorsa, sorun izlenebilir olarak görünmektedir.

Kompleksite teorisinde hesaplama problemleri bilgisayarlar tarafından sağlanan çözümlerin içsel zorluk derecelerine göre sınıflandırılmaktadır. Burada dikkate alınması gereken iki temel soru vardır. Bunlardan ilki, bu problemin çözümünün kolay ya da zor olduğuna karar verilmesi, ikincisi ise problemin muhtemel çözümleri arasında zorluk derecelendirmesi yapılmasıdır. Bir sorunun çözümünün "kolay" olduğunu göstermek için pratik bir algoritma örneği vermek yeterlidir. Aynı zamanda, bir problemin "zor" olduğunu göstermek için ise olası pratik algoritmaların tek tek denenip böyle bir çözümün olmadığını göstermek gerekir. Bu sebeple, zor

olduğu kanıtlanmış hesaplama problemlerinin çok az örneği vardır. İkinci soru, birinci soruya oranla daha çok ilerlemenin kaydedildiği bir yoldur. Çünkü çözümünün zor olduğu kabul edilen bir problemin deneyimlenen bir problemle aynı olduğuna karar verilirse, bu durum çözüm için pratik bir algoritma geliştirmedeki yetersizlik açısından problemin zorluk derecesini açıklar.

Kompleksite teorisi, kaos teorisinin devamı niteliğinde olup birçok temel kavram, iki teoride de kullanılabildiği için birbiri içine geçmiş (girift) özelliklerini iyi anlamak gerekmektedir (Eser, 2016).

### 2.1.1. Kaos

Kaosun keşfini anlamak için dinamik sistemler<sup>1</sup> teorisine zaman içinde katkı sağlayan bilim adamlarını ve onların zamanla evrilen fizik kuramlarını anlamak gerekmektedir. Öncelikle, Aristo dünyadaki hareket yasalarını ilk inceleyen ve bunu kayıt altına alan kişi olmuş; daha sonrasında Galileo, Kepler ve Kopernik bu çalışmaları evrendeki tüm cisimlerin hareketini anlamak üzere genişletmişlerdir. Newton'un 1600-1700'li yıllarda ortaya çıkan fizik kuramları, fizik biliminin bugüne dek kullandığı yasaların (klasik mekanik) temelini oluşturmuştur. Bu yasalar aracılığıyla insanların, evrendeki tüm cisimlerin zamana bağlı hareketlerinin öngörülebileceği gerçeği doğmuştur (Mitchell, 2009). İnsan zekasının evreni açıklamadaki artan inancı determinizm fikrini ön plana çıkarmıştır. Determinizm, dünyada gerçekleşen her olayın önceden var olan bir sebeple açıklanabilir olduğunu savunur. Fakat 19. ve 20. yüzyılda determinizm fikrine getirilen eleştiriler Edward Lorenz'i kaosu keşfine itmiştir. Bu eleştirilerden ilki H. Poincaré'in "Başlangıç Durumuna Hassas Bağımlılık" yaklaşımı ve ikincisi ise W. Heisenberg'in "Belirsizlik İlkesi"dir<sup>2</sup>. E. Lorenz'in hava tahmini için geliştirdiği 12 deterministik denklem modeli ve "Lorenz Çekicisi"nden<sup>3</sup> hareketle fizikçiler başlangıç koşullarına yüksek bağımlılık gösteren durumlar için kaos terimini kullanmışlardır (Mitchell, 2009; Şahin ve diğ., 2017).

---

<sup>1</sup> Dinamik sistemler teorisi, mikro düzeyde kolektif bir şekilde etkileşerek devamlı değişim gösteren bileşenlerin oluşturduğu, makroskopik düzeyde devinim içinde olan sistemleri inceler (Mitchell, 2009).

<sup>2</sup> Heisenberg'in 'Belirsizlik İlkesi'ne göre, bir cismin konumunu ve momentumunu (kütle ve hız çarpımı) aynı anda bilmek olanaksızdır (Mitchell, 2009).

<sup>3</sup> E. Lorenz'in üç değişkenli ve üç doğrusal olmayan denklemden oluşan deterministik modelinde, sistemin davranışını gösteren üç boyutlu faz diyagram eğrilerinin belirli sınırlar içinde kendisini tekrarlamadığını düzensizlik içinde bir düzen oluşturduğunu ortaya koyan şekildir (Şahin ve diğ., 2017). Aynı zamanda fraktal boyutlara sahiptir.



Kaotik sistemler, düzensiz ve öngörülemez olsalar da belirli sınırlar içinde hareket ettikleri için istikrarlıdırlar. Bu sistemlere ilişkin modellerde parametrelerin kritik eşiği aşmasından sonra periyodunun sürekli olarak iki katına çıkmasına çatallanma denir. Kaotik sistemlerin evrensel bir özelliği olan çatallanma, bu düzensizlik içinde bir düzen olduğunu işaret eder. Bu sistemlerin bir diğer evrensel özelliği ise “Feigenbaum sabiti” dir. A. Feigenbaum, çatallanmalardan kaynaklanan parametre değerlerinin geometrik olarak birbirine sabit bir hızda (4,6692016090) yakınsadığını keşfetmiş ve bu durumu “evrensellik” olarak adlandırmıştır (Mitchell, 2009; Şahin ve diğ., 2017).

### **2.1.2. Enformasyon**

Enformasyon, bir haber ya da olgunun (fact) alıcı ve verici arasında taşınmasını ve anlaşılmasını sağlayan araçtır. Bu araç, modern dünyada kullanılan fiber-optik sinyallerde, nöronlar arasındaki küçük moleküllerde ya da en basit haliyle, internette yer alabilir (Mitchell, 2009). Enformasyonun kompleksite kavramındaki yerini anlamak ve bilginin kullanımıyla kaos içinde kurulan düzeni ilişkilendirmek için enerji, iş ve entropi (entropy) kavramlarını anlamak gerekir.

Enerji, bir sistemin iş yapabilme potansiyeli olarak tanımlanır. Fiziksel anlamda iş, bir cismi A noktasından B noktasına taşıırken kullanılan güç ile kat edilen mesafenin çarpımıdır. Ancak doğada yapılan hiçbir iş yüzde yüz verimli olmadığından kullanılan enerjinin bir kısmı boşa gider. Kullanılmayan ve işe dönüştürülemeyen bu enerjiye entropi ismi verilir. Termodinamiğin ikinci kuralına göre, evrendeki etkileşimler, işe dönüştürülen enerjiden doğduğu için, evrendeki her yeni etkileşim evrensel entropinin artmasına ve düzenin azalmasına neden olur. Entropi ile ilişkilendirilen bir başka kural da bir sistemin düzensizlikten (artan entropi) düzen (azalan entropi) durumuna geçmesi için mutlaka dışarıdan bir etken gerektiğidir (Mitchell, 2009).

Termodinamik ve enformasyon arasındaki ilişkide Maxwell’in Cini (Maxwell’s Demon) paradoksu önemli bir rol oynar. Bu paradoksa göre, aynı kabın içinde farklı hızlara sahip gaz parçacıklarının sağdan sola hareketini kontrol eden bir cin (temperature demon) vardır. Cin tarafından yapılan bu işin J. Maxwell’e göre göz ardı edilebilir olması termodinamiğin ikinci yasasını geçersiz kılar. L. Szilard’ın 1929’da Maxwell Cin’i paradoksuna getirdiği eleştirisi ise, “bilgi edinmenin” de bir

enerji gerektirdiği ve bu enerji harcama sürecinin de entropiyi attırdığı yönündedir. Bu anlamda Szilard fizik, entropi ve bilgi arasındaki ilk bağlantıyı kurmuş ve enformasyon teorisinin temellerini atmıştır (Maruyama, Nori, Vedral, 2009).

Evensel fizik kurallarına göre her sistemin düzeni zaman içinde yıkılmaya, entropisi de artış göstermeye (ısı ölüm) meyilli olsa da kompleks sistemler düzenlerini kendi içlerinde organize olarak koruyabilirler. Bu tamamen kompleks sistemlerin enformasyonu nasıl işledikleriyle ilgilidir.

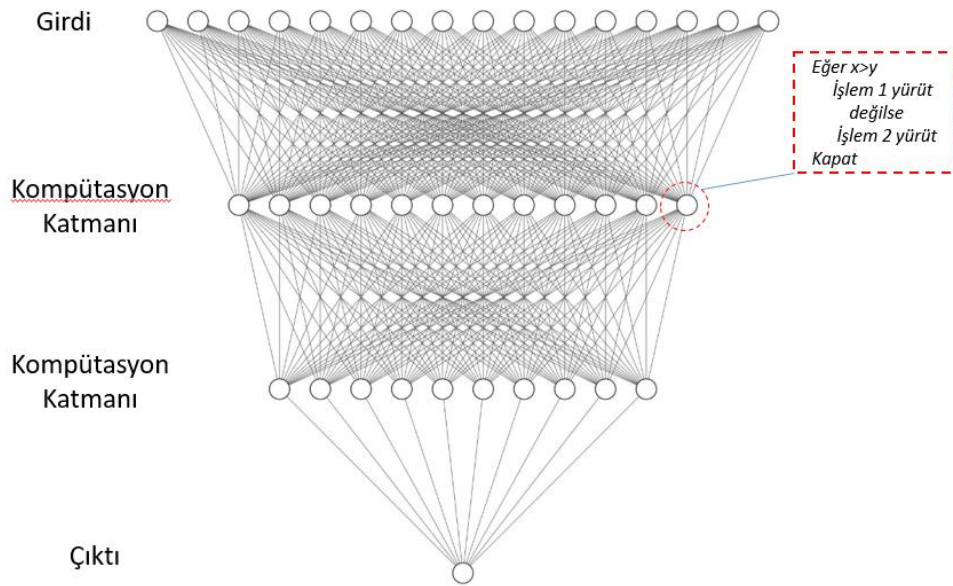
### **2.1.3. Kompütasyon**

Kelime kökeni olarak Latince “com” (birlikte, kolektif olarak) ve “putare”dan (hesap etmek) gelen kompütasyon, enformasyonun taşıdığı anlamı analiz etmek için işlenmesi olarak tanımlanır (Şahin ve diğ., 2017, Online Etymology Dictionary, [18.03.2020]). Bilişsel psikoloji ve ekonomi alanında yaptığı çalışmalarla bilinen H. Simon da karar vericilerin, enformasyonu analiz eden bir rasyonel ajan olarak ele alınması gerektiğini öne sürmüştür (Velupillai, Kao, 2013).

Kompütasyon kavramının doğuşu D. Hilbert’in 1900’lerin başındaki sorusuyla başlamıştır: Birden çok rasyonel sayısal bilinmeyen olan bir Diyofantus (Diophantine) denklemi (değişkenleri ve katsayıları tam sayılar olan) için, sınırlı sayıda operasyonla çözüme ulaşabilecek bir süreç mevcut mudur? Bu sorunun cevabı, bugünkü anlamıyla algoritmanın tanımını vermektedir. Algoritmalar, 1930’lu yıllardan itibaren matematikte resmi tanımıyla yerini almaya başlamıştır (Velupillai, Kao, 2013). 1940’lara doğru ise elle yapılan hesaplamalara verilen isim olarak ortaya çıkmıştır. Kökenine inildiğinde algoritmalar, “1”ler ve “0”lardan oluşan ikili bir sistem tarafından meydana gelir. Turing makinesi olarak adlandırılan bu sistem, Alan Turing tarafından 1935 yılında keşfedilmiş ve günümüz bilgisayarlarının temelini oluşturmuştur. Turing makineleri başlık, teyp ve kural dizgesinden oluşmaktadır ve teypteki girdilerin kurallar dahilinde çıktıya dönüştürme işlemine kompütasyon adı verilir (Mithcell, 2009). Günümüzde, bilgisayarlar tarafından ele alınan kompütasyon süreçlerinin temelini algoritmalar oluşturmaktadır.

Her ne kadar kompütasyon yeteneği sadece bilgisayarları çağırırsa da her türlü canlı ve cansız sistemlerin altyapısı algoritmalarla oluşmaktadır. Yapı olarak basit

bir “Eğer.... Öyleyse ...” döngüsünden oluşan bir denklemden, yüzlerce binlerce döngünün (katmanın) birleştiği bir yapı haline gelen algoritmalar, sistemlere karar verme yeteneği kazandırır (Şekil 1). Her yeni algoritma katmanı ya da düğümü, parçası olduğu sistemin karmaşıklığını ve karar verme kapasitesini artırır. Alan Turing, 1952'de sadece birkaç kurala uyan basit organizmaların çarpıcı derecede karmaşık bir yapı üretebileceği matematiksel bir model tanımladı ve organizmaların basit köklerden büyük kompleks yapılar oluşturabileceği durumun morfogenez (morphogenesis) olarak tanımladı (Carmichael, Hadžikadić, 2019).



**Şekil 1: Algoritma Katmanları**

Imgur. [15.03.2020]. <https://i.stack.imgur.com/f96kw.jpg>.

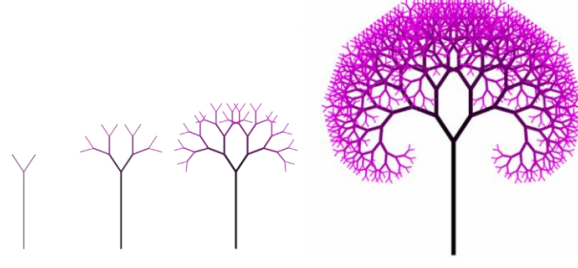
İnsanların gündelik karar verme süreçlerinde ortaya çıkan algoritmalar, bilgisayarlar tarafından merkezi bir işlem birimiyle işlenerek çıktılara dönüşmektedir. Fakat canlı ve cansız sistemlerde enformasyonun işlenmesinde önemli bir fark vardır. Canlı sistemlerde tıpkı insan beyninde olduğu gibi enformasyonun işlenmesi, merkezi değil, ademimerkeziyetçi (decentralized) bir süreçtir (Şahin ve diğ., 2017). Örneğin, sürülerin bir yerden bir yere giderken kolektif zekâları ile en kısa yolu seçmeleri ademimerkeziyetçi bir süreçtir (Carmichael, Hadžikadić, 2019). Çok sayıda basit birimin (hücrelerin) birbirleriyle etkileşime girmesiyle işlenen enformasyonu ve doğadaki bu tür ademimerkeziyetçi (merkezi kontrol yok) süreçleri modellemek için John von Neumann, hücresel otomata (cellular automata) modelini geliştirmiştir.

Turing makinasıyla yapılan bütün kompütasyonlara karşılık gelecek şekilde bir hücrel otomata kuralı mevcuttur (Mitchell, 2009).

#### 2.1.4. Fraktallar

Benoit Mandelbrot yaptığı çalışmalar neticesinde 1975 yılında “fraktal” kavramını ortaya atmıştır. Bu çalışmalar; (1) gelir dağılımının bir kuvvet yasasına (power law) uyduğunu bulması, (2) pamuk fiyatlarındaki değişimin aşırı değerlerinin normal dağılıma göre daha sık görüldüğünü gözlemlemesi (düzensiz gibi görülen verilerin bile “düzen” oluşturması), (3) bilgisayarlar arasındaki veri aktarımı sırasında parazitlerin etkisini yok etmek üzere yaptığı çalışmada parazit içeren periyotların parazit içermeyenlerin oranının aynı olduğunu tespit etmesidir. Özetle doğadaki şekillerin özbenzerlik (self-similarity) özelliği taşıdığı sonucuna varmıştır (Şahin ve diğ., 2017). Özbenzerlik, şekillerin sürekli kendini tekrar etmesi ve her ölçekte simetri olması anlamına gelir (Eser, 2016). Fraktallar buna en iyi örnektir. Fraktallar, kendini oluşturan parçaların da bütünle aynı istatistiki ya da geometrik özellikleri taşıdığı matematiksel olarak temsil edilebilen yapılardır. Örnek olarak, aşağıda verilen tek bir yapı taşıyla başlayan geometrik Şekil 2, aynı yinleme (iteration) mantığıyla tekrarlandığında çok daha farklı gözükken bir ağaç yapısına bürünebilir. Ancak derinlemesine incelendiğinde bu ağaç yapısını oluşturan yapı taşlarının da ağaç ile aynı geometrik özelliği taşıdığı ve özbenzer (kendisine benzer) oldukları görülmektedir (Érdi, 2008).

Ağaç gibi yapısında girinti-çıkıntı ve pürüzler olan şekillerin ölçeklenebilirliği “fraktal geometrisi”nin gerekliliğini doğurmuştur. Nesnelerin içerdiği düzensizliklerin dereceleri “fraktal boyut” (fractal dimension) kavramı ile ifade edilir (Şahin ve diğ., 2017; Eser, 2016). Fraktal boyut, bir nesnenin toplam boyutunun (veya alanının veya hacminin) büyütme seviyesine bağlı olarak nasıl değişeceğini belirler. Ayrıca sadece mükemmel fraktallar -büyütme seviyeleri sonsuza kadar uzananlar- kusursuz fraktal boyuta sahiptir (Koch eğrisinin uzunluğu  $4/3$  oranında artar). Fraktal boyut ile ilgili başka bir tanımda ise, bir nesnenin “pürüzlülüğünü”, “sağlamlığını” veya “karmaşıklığını” o nesnenin parçalanma derecesi ve yapısının yoğunluğunun gösterdiği ileri sürülmektedir. Özetle fraktallar tüm seviyelerde ilginç detaylara sahiptir ve fraktal boyutun “ayrıntı kademesini nicelleştirdiği” öne sürülmektedir (Mitchell, 2009).



**Şekil 2: Sırasıyla 1, 3, 5 ve 10 Yinelemeyle Ortaya Çıkan Basit Fraktal Ağaç**

Bricault, Sarah. [10.03.2020]. Recursive drawing. <http://bricault.mit.edu/recursive-drawing>.

## 2.2. Kompleksite Nedir?

Son on yılda sıkça kullanılmaya başlanan kompleksite teriminin hem beşerî hem de sosyal bilimlerde izlerine rastlanmaktadır. Bireyler karşılaştığı kompleks durumlarda istikrar sağlamak için geçmiş olaylara ve davranış kalıplarına göre hareket ederler. Fakat bu davranış biçimi değişen koşullarda etkili olmayabilir. Bu nedenle bireylerin problemlerle başa çıkma yetenekleri zaman içinde değişmektedir (Schwardt, 2017). Bu noktada kompleksite verimli bir analitik çerçeve sunar; hem patika bağımlılığının (eylemin arkasındaki tarihsel zamanın rolünü) dinamik bir bakış açısıyla açıklanmasını sağlar, hem de rutinler ve 'özgür irade' gibi birçok ikili arasındaki sürekli etkileşimin sonuçlarını değerlendirir (Antonelli, 2009). Kompleksite ile ilgili daha fazla ayrıntıya girmeden önce, “kompleks” teriminin incelenmesi doğru olur.

Kompleks (complex) ve kompleksite (complexity) kelimelerinin orijini incelendiğinde, “complex” terimi İngilizcede “parçalardan oluşan” ve “kolaylıkla anlamlandırılmayan veya analiz edilemeyen” olarak tanımlanır. Aynı zamanda çok farklı bağlamlarda sıfat olarak kullanılmaktadır; “kompleks yapılar”, “kompleks ağlar”, “kompleks süreçler”, “kompleks bilgi işleme”, “kompleks yönetim” gibi. Kompleksitenin Türkçe karşılığı olan karmaşıklık (complexity) kelimesi ise Cambridge İngilizce Sözlükte birçok parçaya sahip olmanın (içinde aynı cinsten çok öge barındıran) ve bütünün karşılıklı etkileşimi ya da bir cevap bulmanın zor olması (birbirine az çok aykırı birçok şeyden oluşma) şeklinde tanımlanmaktadır (Eser, 2016).

Kompleks kelimesi Latince; örmek ve birbirine sarılı anlamına gelen ‘plectere’ kökeninden türetilmiştir. Kompleks sistemlerde parçalar birbiri içine ayrılmaz bir

şekilde geçmiştir (Mitchell, 2009). “Kompleksite” ile “kompleks” kelimesini tanımlayan (karmaşık, bükülmüş, zor vb.) terimler eş anlamlı olsa da bilimsel anlamda daha derin bir ifadeyi barındırmaktadır. Bu nedenle P. Corning (1998), kompleksliğin ne olduğunu tanımlamaya çalışmak yerine, terimle ilişkilendirilen özellikleri tanımlamanın daha yararlı olacağını belirtmiştir: (1) kompleks bir fenomen birçok bölümden (veya ögeler, birimler veya bireylerden) oluşur; (2) parçalar arasında birçok ilişki / etkileşim vardır ve (3) parçalar kolayca tahmin edilemeyen ve çoğu zaman yeni, beklenmedik birleşik etkiler (sinerjiler) üretir. Yani kompleks, karmaşık (complicated) bir yapı olmakla birlikte, her bir parçanın sahip olduğu özelliklerden farklıdır (Dell’Anno, Friedrich, 2008).

Kompleksitenin son elli yıllık dönemdeki çeşitli tanımları, kompleks ve karmaşık problemlerin ve sistemlerin arasındaki farkın anlaşılır hale gelmesini zorlaştırmıştır (Poli, 2013). Karmaşık problemler, çözmesi zor olsa da güçlü bir algoritma ya da sistemle çözüme ulaşır (Nason, 2017). Kompleks problemler ise çözülmesi gereken bir problemi ifade etmezken yönetilmesi gereken bir duruma yol açar. Örneğin, ulaşım ya da otelcilik sektöründeki bir şirket için, Uber ya da Airbnb’nin yarattığı etkiler o şirket için yönetilmesi gereken sonuçlar doğurur. Bunun çözülebilecek bir problem olmaması, kompleksitenin üç özelliğinin iç içe geçmesinden (girift) kaynaklanır. Mitchell’a (2009) göre bu özellikler; kolektif hareket etme, ögeler arasında iletişim ve adaptasyondur. Nason’a (2017) göre kompleksiteyi başarılı bir biçimde yönetmek; a) durumu doğru tanımlamaktan (kompleks/karmaşık) b) çözmeye değil, yönetmeye çalışmaktan c) anlamak ve uyum sağlamaya çalışmaktan ve d) kompleksite anlayışını geliştirmeyi benimsemekten geçer.

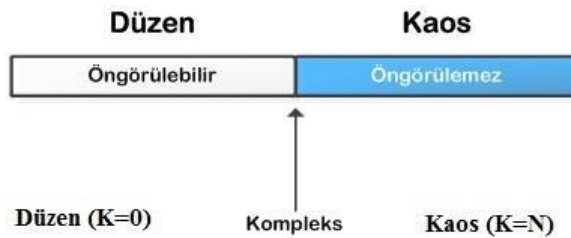
Karmaşık sistemler, yapısı itibariyle çok sayıda parçadan oluşsa da her küçük bileşenin bile sisteme etkisinin öngörülebildiği tekil olarak yönetilebilecek parçalara bölünebilirler. Böylece her bir parçanın bir diğeriyle olan sebep-sonuç ilişkisi ve bunların çözümü, karmaşık yapının bütünü için bir çözüm sağlar. Ancak kompleks sistemlerin çok parçadan oluşması ‘bütünün parçaların toplamından daha fazla şey ifade etmesi’ açısından farklılık gösterir. Ayrıca kompleks sistemlerdeki yüksek etkileşimli ağ örgüsünden kaynaklanan kaotik yapılarda bir değişkendeki farklılaşma ani ve büyük tepkilere yol açabilir. Bu yüksek derecedeki bağlantısallık, sistemin zamanla kendini yeniden yapılandırmasına olanak sağlar (Poli, 2013; Şahin ve diğ., 2017).

Karmaşık sistemlerle kompleks sistemler aynı problemin farklı seviyede zorluğundan daha çok, farklı problem tiplerini anlatır. Buna rağmen ‘gezgin satıcı örneğinde’ olduğu gibi bir problem aynı zamanda hem karmaşık hem de kompleks olabilir. Böyle durumlarda karar vericilerin yaptığı en büyük hatalardan biri, kompleks bir sistemi çözülebilecek karmaşık bir problem gibi ele almaktır. Halbuki doğru yaklaşım, kompleks yapıları fonksiyonel analiz ile yönetmek, karmaşık sistemleri de daha küçük yapı taşlarına bölerek çözmek olmalıdır (Poli, 2013).

Kompleksite, farklı disiplinler tarafından ortak bir tanım ile ifade edilememiştir. Örneğin, bilgisayar bilimlerinde kompleksite, belirli bir hesaplama için gerekli bağımsız yolların sayısını gösterirken, ekolojide türler arası yüksek bağlanabilirlik veya etkileşim gücü olarak tanımlanır. Toplumda kompleksite ise, toplumun içinde artan hiyerarşi seviyelerinde gücün ve buna bağlı olan maliyetlerin aşamalı ve dengesiz bir biçimde artmasıdır (Scarborough, Burnside, 2014).

S. Lloyd’a (2001) göre kompleksitenin 45 farklı tanımı bulunsa da; bu tanımlar iki grupta toplanmaktadır. Bunlardan ilki hesaplama (computational) odaklı yaklaşım, diğeri ise tanım (descriptive) odaklı yaklaşımdır. Hesaplamalı yaklaşım, bir sistemi analiz etmek için ne kadar bilgiye ihtiyaç duyulduğu ile ilgilenirken; tanımlamalı yaklaşım, bir sistemi tanımlamak için bilgiye ihtiyaç duyar (Gallegati, Richiardi, 2009).

J. Potts (2000) kompleksiteyi, bir sistemin fazla bağıllık (kaotik esneklik) ve düşük bağıllık (düzenli rijitlik) arasındaki dengenin sağlandığı dinamik verimlilik durumu olarak tanımlar (J. Potts 2000’den aktaran Elliott, 2004).



**Şekil 3: NK Uzayında, Durum Uzayı Eksenini**

Eser, Rüya. 2016. **Kompleksite İktisadı, Kendi Kendine Organize Olan Kritiklik ve Firma Dinamikleri**. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü: 8.

Şekil 3'e göre, düzenli sistemlerde bileşenler arasındaki ilişkiler sınırlı ve öngörülebilir olduğu için kompleksiteden söz edilmez. Diğer taraftan düzensiz

sistemlerde unsurlar öngörülemez şekilde hareket ettikleri için aralarında kesin bir ilişki yoktur. Bu da sistemlerin kompleks olmadığına işaret eder (Eser, 2016).

Kompleksite, “kaos”, “kendi kendine organize olma (self-organization)” ve “belirim (emergence)” gibi kelimeler arasındaki belirsizliği ortadan kaldırmak için kullanılan ortak bir terim görevi görmemektedir<sup>4</sup>. Aksine kompleksite, kaos sonrası bir gelişmedir ve benzerlikleri (doğrusal olmama, indirgenemezlik, evrensellik) olsa da birçok yönden farklılık gösterirler (Eren, 2013)<sup>5</sup>.

P. Matthiessen bir makalesinde kompleksitenin önemini vurgulamak için aşağıdakileri yazmıştır (Arthur, 1993):

“Refahın sırrı sadeliktir. Oysa evrimin sırrı, kompleksitenin sürekli ortaya çıkışıdır. Sadelik bir seyreklik, bir cesaret getirir. Ancak kompleksite, bizim gibi organizmaları en başta mümkün kılan şeydir. Kompleksite, kendiliğinden doğal olarak geliştiği ve güçlü bir performans sergilediği zaman gerçekten bir mucizedir.”

### 2.3. Kompleks Sistemin Özellikleri

Sistem genel tanımıyla, kendiliğinden (doğal) ya da insanlar tarafından oluşan birbirleriyle ilişkili ve birbirine bağlı parçaların uyumlu bir birleşimidir. Sistem teorisi ise bir sistemin dinamiklerini, kısıtlamalarını, koşullarını modeller ve her seviyesindeki ilkeleri açıklar. Genel sistemler teorisinin<sup>6</sup> kurucusu Ludwig von Bertalanffy (1901-1972), biyolojik ya da sosyal sistemlerin çoğunluğunu çevreyle etkileşen ve çevre tarafından şekillenen “açık” sistemler olarak tanımlamıştır.

<sup>4</sup> Kompleks sistemlerin özellikleriyle ilgili detaylar ilerleyen bölümde incelenecektir.

<sup>5</sup> Kaos ve kompleksitenin farkları:

- Kompleks sistem bir çeşit ağdır (network); birçok değişkene ihtiyaç duyar. Bir sistem hem tek hem de çok değişken ile kaotik olabilir, fakat yalnız bir değişken ile kompleks olmayabilir.
- Kompleksite rastlantısal süreçten farklıdır. Kaotik sistem rastlantısal (random) sürecinden ayrılamaz.
- Kompleksite adaptiftir. Kaotik sistem adaptif olmayabilir.
- Kompleks sistem evrensel kompütasyona uygun, kaotik sistem ise değildir.
- Kompleks sistem davranışı önceden sistematik olarak karakterize edilemeyebilir. Kaotik sistemin davranışı ise karakterize edilebilir.
- Kompleks sistem patika bağımlıdır. Başlangıç koşulları önemlidir. Başlangıç koşullarının etkisi uzun vadede devam eder. Kaotik sistem başlangıç koşullarına duyarlı olduğunda, aynı çekici (attractor) setini sürdürür.
- Kompleks sistemde bütün toplamdan büyüktür. Kaotik sistemde ise bütün toplamdan küçüktür.

<sup>6</sup> Genel sistem teorisi, bir bilgi alanına özgü kavram ve ilkelerin aksine, geniş ölçüde uygulanabilir kavram ve ilkelerin geliştirilmesi ile ilgilidir. Dinamik veya aktif sistemleri statik veya pasif sistemlerden ayırır. Aktif sistemler, davranışlar ve süreçlerle etkileşime giren yapılar veya bileşenlerdir. Pasif sistemler ise hala işlenmekte olan yapılar ve bileşenlerdir (Wikipedia, [20.03.2020]).



“Kapalı” sistemlerin ise kendi içlerindeki devinimlerle anlaşılabilirdiğini belirtmiştir (Érdi, 2008).

Kompleks sistem terimi günümüzde sıkça kullanılmasına rağmen tek bir tanımla ifade edilmez. Onun yerine sistemin birçok özelliğine atıfta bulunulabilir (Érdi, 2008). Örneğin; kompleks sistemler, makro düzeyde kolektif yeni davranışlar üretme kabiliyetine sahip birçok etkileşimli bölümden oluşan sistemlerdir. Bu tür sistem modelleri; iklim, deprem, biyolojik hücresel ağlar, borsa ve internet dinamiği, otoyol trafiği, insan beyni veya sosyal sistemlerde fikirlerin oluşumu gibi çeşitli yaşam dinamiklerine başarılı şekilde entegre edilebilir (Chen ve diğ., 2018). Aynı zamanda kompleks sistemler tek bir sebebe bağlı sonuç denklemi ile çalışmaz. Bir sonuç birden fazla sebebin birleşimi olabilir ve ortaya çıkan durum pozitif ve negatif geribildirim (feedback) mekanizmaları ile sebeplerin yapısını da değiştirebilir (Érdi, 2008). Örneğin, şehirde yeni açılan bir park alanı (çekici) pozitif geribildirim döngüleriyle temiz hava almak, yürüyüş yapmak isteyen insanları giderek artan ölçüde kendine çekmeye başlar. Fakat diğer taraftan insan sayısının giderek artmasıyla oluşacak kalabalık ve kirlilikten ötürü olumlu etkileri azaltan negatif geribildirim mekanizması devreye girer.

Kompleks sistemler, basit gibi gözükken yapıların merkezi bir üstün zekâya (bilgisayarlar) ihtiyaç duymadan nasıl kendi aralarında organize olduğu, bilgiyi harmanladığı, evrildiği ve öğrendiği ile ilgilenir. Bunlar, kompleks sistemin karşılıklı bağımlılık (interdependence), uyum sağlama (adaptability), birlikte evrim (co-evolution) ve kendi kendine organize olma gibi özellikleriyle ilgilidir. Örnek olarak; ordu karıncaları tarafından yapılan güçlü, yapısal köprüler; ateşböceklerinin senkron yanıp sönmeleri, hücrelerin meydana getirdiği organizmalar, bir ekonominin karşılıklı sürdürülebilir piyasaları verilebilir.

Her bir kompleks sistem sırasıyla kendi alt sistemlerinden meydana gelmektedir. Bu, hücrelerin meydana getirdiği organlardan oluşan insan vücudu gibi sistemlerin tamamen hiyerarşik yapılar olduğunun bir göstergesidir. Aynı zamanda hücreler arasındaki ilişki ağının iki hücre ile sınırlı kalmaması, alt sistemler arasında güçlü bir etkileşim olduğunun kanıtıdır ve ayrıştırılabilirlik (near-decomposability) olarak adlandırılmaktadır (Mitchell, 2009). “Kapanma” (closure) adı verilen bu alt sistemler, belirli sınırlarla sistemi dış çevreden ayıran bir özellik taşır. Bu durum,

kompleks adaptif sistemlerin termodinamik anlamda açık, organizasyonel açıdan kapalı olduklarını göstermektedir (Şahin ve diğ., 2017).

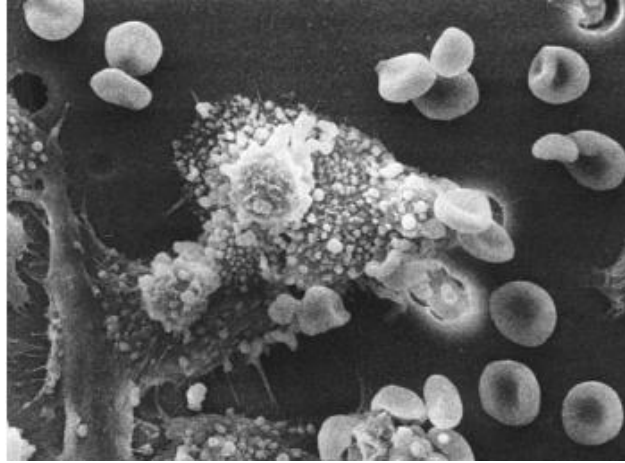
Basit sistemlerde bazı temel özellikler, tek bir sebep-sonuç ilişkisi, sebeplerdeki ufak bir değişimin sonuçlarda küçük farklılara yol açması ve öngörülebilirlik olarak sıralanabilir. Aynı özellikler kompleks sistemler için, belirim, döngüsel/dairesel nedensellik ve mantıksal paradokslar, küçük sebep değişikliklerinin büyük etkilere yol açması ve öngörülemezlik olarak verilebilir (Érdi, 2008):

- **Dairesel ve Ağsal Nedensellik (Circular and Network Causality):** Dairesel nedensellik, A'nın B'ye, B'nin C'ye sebebiyet vermesi ve sonuç olarak C'nin A'yı değiştirmesi veya ona sebebiyet vermesi olarak açıklanabilir. Biyolojik hücreler, ekolojik ağlar ve iş ilişkileri içerisinde bu tip nedensellikleri görmek mümkündür. Bu tür sistemlerde büyük değişimlerin etkisi az olur ya da hiç olmazken küçük değişimler, ani ve büyük sonuçlar doğurur.
- **Zaman-sonlu Tekillik (Finite-time Singularity):** Geri besleme mekanizmaları ölçüsüzce tek yönde ilerlediği zaman sistemin çıktıları sonlu bir zamanda sonsuz bir değere yakınsayabilir. Yani sistem bileşenlerinin davranışlarının etkileri, diğer bileşenlerin davranışını destekler (pozitif) ya da zamanla etkisini kaybetmesi (negatif) şeklinde geri döner. Örnek olarak, takas piyasalarındaki balonların patlaması verilebilir. Buradaki sistemin çıktısı olan fiyat, tek yönlü alımla özdeşleştirilen açgözlü ve sürekli alım (geri-besleme) mekanizması ile şişirilir; ancak bu dengesiz durum çok kısa sürede (zaman-sonlu) fiyat düşüşleriyle sonuçlanır (patlama).
- **Kaos ve fraktal yapısı:** Kompleks sistemlerin kaotik davranmalarının yanı sıra kaosu fraktal yapılar oluşturduğu da bilinmektedir (Érdi, 2008). Kompleks sistemlerin fraktal yapısının özelliği bir araya gelen yapıların farklı ölçeklerde incelendiğinde tekrarlayan şekillerden oluşmasıdır. Örneğin, canlıların bağışıklık sistemi ile fraktallar arasında mantıksal bir bağ kurulabilir. Bağışıklık sistemi<sup>7</sup>, hücreleri veya antikoru üzerinde, merkezi bir kontrol olmadan sistematik

---

<sup>7</sup> Bağışıklık sistemi, nispeten basit bileşenlerin toplu halde, sinyalli ve kontrollü bir şekilde çok kompleks bir davranışa yol açtığı ve adaptasyonun zaman içinde gerçekleştiği bir başka sistem örneğidir. Bağışıklık sistemi tüm vücuda dağılmış birçok farklı hücre türünden oluşmaktadır (kan, kemik iliği, lenf düğümleri ve diğer organlarda). Bu hücre koleksiyonu, herhangi bir merkezi kontrol olmadan etkili ve verimli bir şekilde birlikte çalışmaktadır. Bağışıklık sisteminin karmaşıklığını gösteren bir fotoğraf Şekil 4'te verilmiştir.

saldırıları başlatır. Bağışıklık sisteminde vücudun ana savunma mekanizması olan akyuvarlar, karşılaştıkları yabancı organizmalarla eşleştikleri oranda çoğalır ve mücadele ederler. İkinci ve izleyen nesil akyuvarlar mutasyon geçirse de ebeveynleriyle aynı davranışı sergilerler. Böylece akyuvarlar ne kadar iyi uyum sağlarsa mikro ölçekteki bir doğal seleksiyonun parçası olurlar (Mitchell, 2009). Bu doğal seleksiyon, hücrelerden organizmalara, organizmalardan canlılara, canlılardan habitatlara kadar benzer şekilde büyüyen ölçeklerde tekrarlanır.

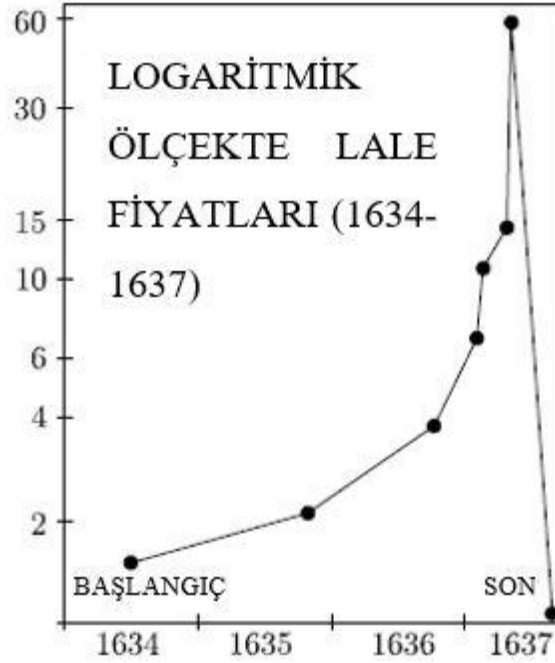


**Şekil 4: Bir Kanser Hücresine Saldıran Bağışıklık Sistemi Hücreleri**

Mitchell, Melanie. 2009. **Complexity: A Guided Tour**. New York: Oxford University Press: 8.

Kaotik olma kompleks sistemlerin önemli bir özelliğidir ve rassallıkla karıştırılmamalıdır. Rassallık periyodik olarak ortaya çıkmaz, deterministik bir ilişkiye bağlı olarak oluşur. Rassal olarak ortaya çıkan olaylar tekrar edilemez ve öngörülemez. Kaotik bir ilişkide ise çizilecek her yol başlangıç koşullarındaki şartlara yüksek bir hassasiyet ile bağlıdır (Érdi, 2008). Kaotik kompleks sistemin değişkenlerinde ortaya çıkan farklılaşmalar, öngörülemez ve büyük ölçekte değişiklikler yaratır. Bunlara özellikle ekonomi tarihinde fazla rastlanılmaktadır. Bu örneklerden biri Hollanda'da 1635 yılında lale fiyatlarında yaşanmıştır. Başlangıçta estetik değerleri için alınan laleler sonraları kâr amaçlı alınıp-satılmış ve fiyatlarda büyük dalgalanmalar yaşanmıştır. Lale fiyatları bir noktada 20 katına kadar çıkmıştır. Ancak belli bir kaotik noktaya erişen bu sistemin bir değişkenindeki farklılaşma (bir yatırımcının satışa başlamasıyla) lalenin 6 hafta içinde fiyatının %90 düşmesine sebep olmuştur (Şekil 5). Bu aynı zamanda bir

faz geçişi olarak da değerlendirilebilir. Benzer dinamiklere her borsa çöküşünde de rastlanılabılır (Érdi, 2008).



Şekil 5: Lale Piyasasındaki Fiyat Dinamikleri

Érdi, Péter. 2008. *Complexity Explained With 129 Figures*. Berlin: Springer: 333.

- **Belirim:** Kompleks yapıların heterojen bileşenleri, kendi aralarında bölgeler içinde organize olabilirler. Bu oluşumlar, tekil bileşenlerin özelliklerinin bir fonksiyonu olmak zorunda değildir (Érdi, 2008). Genellikle bileşenlerinin özelliklerinden ve davranışlarından kolayca ayırt edilemeyen karmaşık görünümlü kalıplar ve davranışlar sergilerler (Mitchell, 2009). Örnek olarak, dünyadaki hiyerarşiler, atom altı seviyeden kozmik boyuta dek farklı yapıların bir araya getirdiği unsurlar; bir ekosistemdeki enerji veya bir ekonomideki para gibi.

Bu basit yapılar yerel güdülenme ile hareket etseler de bütünlük ölçekte çok daha farklı amaçlara hizmet ettikleri görülebilir. Örneğin, insan beyni çok kompleks bazı görevler yerine getirse de beynin yapı taşı nöronların nasıl entegre olup bütünlük bir bilişsel yapıya dönüştüğü bilim adamları tarafından açıklığa kavuşturulamamıştır. Aynı şekilde böyle kompleks bir yapının nasıl tamamıyla evrimsel süreçlerin bir sonucu olarak ortaya çıktığı belirsizliğini korumaktadır (Mitchell, 2009).

- **Kendi kendine Organize Olma:** Kompleks yapılarda ortaya çıkan sonuçlar sisteme dışarıdan herhangi bir enerji beslemesi olmadan organize olurlar. Bu süreç spontane ve birbirleri arasındaki etkileşimler sonucu gerçekleşir. Böylece yeni bütünsel kompleks yapılar ortaya çıkar.

Kompleks bir sistemi karakterize eden en önemli özellik de kendiliğinden organize olan hiyerarşik sistem yapılandırmasındaki farklı katmanların spontane ortaya çıkmasıdır. Buna bir örnek ise, ekonomik sistemlerin birbiriyle eş ve izole temsili ajanların toplamı olarak ifade edilmesidir. Bu temsili ajanların seçimlerinin toplamı piyasa sonucunu verir. Yaygın olan bu yaklaşımın hatası, temsili ajan kullanımını ile heterojenliğin etkisini eleyerek asıl problemin görmezden gelmesidir. Ancak bu heterojenlik göz ardı edilemez. Tam da bu konu mikrodan makroya geçişin temel sorusudur. Eğer makro denklemler mikro birimlerin optimal seçimlerinin bir sonucu değilse makro teori nasıl türetilebilir (Gallegati, Richiardi, 2009)?

Kompleks sistemi tanımlayan önemli unsurlardan biri, ilişkilerin doğrusal olmama durumudur. Bu, dinamiklerin karşılıklı etkileşimleri ve patika bağımlılıklarıyla nitelendirilebilir. Kompleks süreçler aynı zamanda öngörülemez ve periyodik olmayan yapısal değişiklikler ile dalgalanmalar içerirler. Bunlar, kaos ya da çatallanmalar olarak adlandırılabilir. Daha önce de kaos bölümünde geçen çatallanma; bir sistemin davranış değişikliğine uğraması, sistemin mevcut durumunu koruyabilmesi için gereken bazı kritik eşik değerlerinin aşılması ve bir faz geçişinin yaşanması olarak tanımlanabilir. Kompleksitenin önemli bir özelliği olan kaosu tanımlayan ise, bu rastgele oluşan çatallanmaların deterministik sistemlerde meydana gelmesidir (Fontana, 2010). Basit deterministik sistemlerin rassal görünen hareketler sergilemeleri doğrusal olmayan yapılarından kaynaklanır. Kendiliğinden organizasyon bu süreçle başlar ve bu yapılar nedeniyle zamanla üssel olarak büyüyerek sistemin davranışını değiştirir. Ayrıca bu sistemler arasında pozitif ve negatif geri besleme döngüleri vardır. (Şahin ve diğ., 2017). Doğrusal sistemlerin deterministik modeller ile çok iyi çalıştığı söylenebilir, ancak kompleks sistemlerdeki ilişkiler doğrusal değildir. Bir sistemin doğrusal kabul edilebilmesi için, bütünüün parçaların toplamı kadar etmesi gerekmektedir, ancak doğrusal

olmayan sistemlerde ögeler arasındaki etkileşim bunu olanaksız kılar (Mitchell, 2009).

#### **2.4. Kompleksite İktisadı Nasıl Ortaya Çıktı?**

Kompleksite, ekonomik problemlerin her aşamasında yer alır. Geleneksel iktisadi modellemelerde bu gerçek her ne kadar inkâr edilse de a) ekonomi doğası gereği bireylerin etkileşimi ve b) bu bireylerin bilişsel yetenekleri doğrultusunda sisteme yönelik oluşturdukları beklentileri ile karakterize edilir. Bu durumu, Murray Gell-Mann “Eğer elektronlar düşünebilseydi fiziğin ne kadar zor olacağını hayal edin” şeklinde ifade etmiştir (Gallegati, Richiardi, 2009).

Kompleksite ekonomisi, geleneksel iktisadi düşüncelere karşı farklı yaklaşımlardan oluşur. Geçmişten günümüze uygulanan ekonomik teorilerin çeşitliliği ekonomilerin yüzyıllardır bir değişim süreci içinde olduğunun bir göstergesidir. Bu nedenle de geleneksel iktisat teorileri, ekonomileri analiz ederken yetersiz kalmıştır. Rekabet ve kapitalist işletmelerin para kazanma hırsı gibi birçok neden değişim sürecinin tetikleyicisi olabilir. Schwardt (2017), sosyal başarıdan geçen yolun finansal başarıya işaret etmesini de değişimin nedenlerine bir örnek olarak göstermiştir. Bu değişim süreci içinde hem bireylerin hem ekonomistlerin rolü çok büyüktür.

Ekonomilerin değişmesinin, bireylerin risk algısına bağlı olduğu söylenebilir. Bireylerin içinde buldukları ekonomik şartlar, çevre koşulları, risk değerlendirmeleri ve beklentileri, bireylerin yatırım kararlarına ve likidite tercihlerine yön verir. Bireylerin olumlu veya olumsuz bakış açıları ile ekonominin gelecekteki durumu arasında dairesel ve kümülatif bir ilişki vardır.

Bu süreçte ekonomistlerin rolü, sistemi tanımlamak ve iyileştirmek için olası değişiklikler önermektir. Değişen ve birbiriyle çelişen farklı bakış açılarını öne sürerken de çeşitli sorulara cevap ararlar. Ekonomik alanda neyin başarılı olup olmayacağını anlamaya çalışırlar. Buradaki esas amaç daha az maliyetli bir yol izleyerek hedefe ulaşmaktır. Bu hedeflere ulaşırken, ekonomistlerin temel analitik yapının uygulanabilirliği ile ilgili farklı görüşleri olmuştur (Schwardt 2017). Örneğin, bazıları temel modelleri seçerken, diğerleri geleneksel olmayan yaklaşımları tercih etmektedir.

Ekonomik meselelere olan bu çeşitli yaklaşımlar, zamanla şekillenen analitik bir çerçeveye ihtiyaç duyar. Bu analitik çerçeve, yukarıda da bahsedildiği gibi daha yenilikçi analizlere dayanabilir. Bu durum, ekonomik faaliyetleri açıklamak için yeterli olamayan geleneksel modellerden ya da sistemin kompleks yapısından kaynaklanır. Diğer taraftan inşa edilecek yeni modellerde, modelin çerçevesiyle ekonomistlerin kurduğu gerçekliğin özellikleri arasında bağlantı olmalıdır. Çünkü sunulmaya karar verilen analitik çerçevedeki bağlantılar anlatılan hikâyeye gömülüdür. Ekonomistlerin bu kompleks yapının yorumlanmasındaki farklı bakış açıları, kompleksite iktisadının temellerinin atılmasına olanak sağlamıştır.

#### **2.4.1. Geleneksel İktisat Teorilerin Yetersizliği**

Geleneksel iktisat teorilerinin yetersizliklerinden biri, makro ekonomistlerin genelde analizlerini yaparken, mikro temeller ile makro oluşumları açıklamaya çalışmalarıdır. Mikroyu makroya köprülemedeki mantıksal yanlışlığın kanıtı olan bir sonuç, K. Arrow'un imkânsızlık teoremidir: Ortaklaşa bir karara varmak zorunda olan bir insan topluluğu, bir bireyin sahip olduğu rasyonalitenin aynısını gösteremez (Gallegati, Richiardi, 2009). Tümdengelimci yaklaşımda; temel aksiyomlar formüle edilir ve bunların mantıksal etkileriyle analizler yapılır (Schwardt, 2017).

Geleneksel ekonomik teorilerde kullanılan yukarıdan aşağıya bakış açısına (top-down perspective) göre makroekonomik modellerin arkasında mikroekonomik kıyaslama modelleri yatmaktadır. Bu bakış açısına göre, genel olarak seçilen temel modellerde elde edilen sonuçların çoğaltılması eğilimi gösterilmektedir. Yukarıdan aşağıya bakış açısına göre her ekonomi için tek ve benzersiz bir denge vardır. Herkes kendisi için mümkün olan en iyiyi isteyerek hareket eder. Yukarıdan aşağıya bakış açılarının formülasyonu, “politik ekonomiyi” gerçek bir bilim olarak kabul etme arzusuyla gelişmiştir. Bu yaklaşım, senelerdir ekonomik meselelere olan algıları şekillendirdiği gibi belirli analizler için alternatif senaryoların değerlendirileceği bir referans noktası sunar. Bunun aksine kompleksite iktisadında kullanılan aşağıdan yukarıya perspektifte (bottom-up perspective), bir referans noktası alınmazken (kompleks analitik çerçeveler birbirinden farklı ortamlarda elde edilen benzer bakış açılarıyla ilişkilendirilmez), genellikle bütün toplamdan farklıdır (Schwardt, 2017). Bu bakış açısına göre dengeden söz edilmez. Onun yerine çoklu denge ve dengesizlik ön plandadır.

Buna paralel olarak makro ekonomistler, makro modeli tek yönlü ve doğrusal olarak incelemeyi tercih etmiş ve modelin içindeki kompleks denklem setlerini göz ardı etmişlerdir. Yani tek yönlü kurulan ilişkilerin oluşturduğu sonuçlar ve sistemlerin, tekrar bu denklemleri etkilediği yok sayılmıştır. Örneğin, alışlageldik ekonomik fenomenlerden biri olan *ceteris paribus* varsayımı, analizi kolaylaştırıcı *diğer her faktörü eşit tutma* yaklaşımıdır. Klasik ekonomi yaklaşımlarının düştüğü en büyük tuzaklardan biri de budur. Buna ek olarak, geleneksel iktisat teorilerinde standart ekonometrik araçlar bir temsili ajan varsayımına dayanmaktadır. Bu mükemmel temsili ajanlar, tam bilgiye sahip ve öğrenmeye ya da adaptasyona ihtiyaç duymazlar (Eren, 2015). Ekonomik sistemin temsili ajanlar tarafından temsil edilmesi ve makroekonominin mikro temele dayandırılması önemli sorunları doğurabilmektedir (Gallegati, Richiardi, 2009).

Geleneksel iktisadi modellerin temelinde, ekonomistler tarafından varsayılan rasyonellik, optimallik ve denge (kısa, orta, uzun dönem denge, denge fiyat, dengeye yakınsamak vb.) kavramları üzerinde durulur. Her ne kadar günümüzde denge kavramının yanında evrimden söz edilse de geçmiş iktisadi okullar için asıl olan dengedir. İktisat literatüründe ekonomik denge yaklaşımı, kısmi denge yaklaşımı ve genel denge yaklaşımı olarak ikiye ayrılır. Kısmi denge, tek bir piyasaya odaklanır ve farklı piyasalarla etkileşimin değerlendirilmediği (*ceteris paribus*) bir yaklaşımdır. Genel denge analizinde ise ekonomideki tüketici (maksimum fayda) ve üreticilerin (maksimum kar) rasyonel hareket ederek, arzın talebe eşit olduğu kaynak tahsisinin belirlenmesi amaçlanır (Mercan, 2015: 49). İlk olarak genel denge kavramı, Leon Walras tarafından 19. yüzyılın sonlarında tasarlanmış, sonrasında dinamik stokastik genel denge (DSGD) modelleri olarak değişime uğramıştır (Acet, Karaçor, Alkan, 2018).

Schwardt (2017) geleneksel iktisadi bir temel (referans) model örneğinde, ekonomik olarak en optimal tahsisatın ortaya çıkacağı bir senaryoyu açıklamaktadır. Bu optimuma ulaşmak için işlemlere yalnızca tek bir fiyat vektöründe (denge fiyat) izin verilir. Ekonomik faaliyetlerde tüm sonuçların tarafsız bir şekilde ölçülebileceği tam rekabet koşulları mevcuttur. Bu durum istenilen kaynak tahsis düzenlerini yaratır. Tüm kaynakların arz ve talebinin eşit olması gerekmekte ve tüm piyasalarda en iyi fiyat-değer bileşimine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca temel modelde piyasa



aksaklıkları (fiyat çarpıklıkları, bilgi asimetrisi vb.) ve bunların oluşturabileceği etkiler göz ardı edilmektedir. Referans perspektifinden yola çıkarak yapılan bütün analizlerde, çarpıklıklardan sonra en iyi sonuca ulaşılması beklenmez. Aksine ortaya çıkan bozulmalar nedeniyle, uygun piyasa işleyişi ve tam rekabet anlayışı için bazı müdahaleler (bireysel davranışları sınırlamak, güçlü ajanların buldukları sektörleri düzenlemek vb.) gerekmektedir (Schwardt, 2017). Buradan hareketle, genel denge yaklaşımı, iki karakteristik belirsizliğe sahiptir: ne çoklu denge problemlerini çözebilir ne de bireylerin seçim ve beklentilerini modelleyebilir (Gallegati, Richiardi, 2009). Diğer taraftan kompleks yapıdaki ajan tabanlı analizler için, denge yerine denge dışı dinamiklerden söz edilmektedir. Denge dışı yaklaşım standart ekonomik teoriye küçük bir ilave değil, ekonomiyi daha geniş açıdan değerlendirilmesini sağlayan yepyeni bir yaklaşımdır.

DSGD modelleri ile kompleks yapıdaki ajan tabanlı modelleme ile farkları aşağıdaki gibidir (Acet, Karaçor, Alkan, 2018):

**Tablo 1: Dinamik Stokastik Genel Denge Modelleri ile Ajan Temelli Modellerin Karşılaştırılması**

	<b>Dinamik Stokastik Genel Denge Modelleri</b>	<b>Ajan Temelli Modeller</b>
<b>Ajanların özellikleri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Birey ve firmalar arasında fark yoktur. Ajanlar homojendir.</li> <li>▪ Temsili ajan varsayımı geçerlidir. Ekonomideki bütün bireyler benzerdir ve bir birey ile temsil edilebilmektedir. Genellikle sonsuza dek yaşadıkları varsayılır ve faydalarını maksimize etmeye çalışırlar.</li> <li>▪ Ajanlar rasyoneldir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ajanlar heterojendir yani birbirinden farklı sayıda birden fazla ajan vardır.</li> <li>▪ Temsili olmayan ajanlar kullanılır. Ajanlar birbirlerinden farklı yapılara sahiptir. Bu nedenle ekonomideki bir birey diğer tüm bireyleri temsil etmez.</li> <li>▪ Ajanlar rasyonel değildir.</li> </ul>

<b>Piyasa özellikleri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Etkin piyasa hipotezi geçerlidir. Tüm piyasalar dengededir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Piyasalarda denge şartı yoktur.</li> </ul>
<b>Avantajları</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ DSGD modelleri ile mikro ekonomi temeller çerçevesinde büyüme, işsizlik, para ve maliye politikalarının analizinde kullanılabilir.</li> <li>▪ Para politikası tabanlı olduğu için genellikle merkez bankaları tarafından kullanılmaktadır.</li> <li>▪ DSGD modelleri dinamiktir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ajanların heterojen olması, sınırlı rasyonellik ve birbirinden etkileşim içinde olmaları gerçek sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.</li> </ul>
<b>Dezavantajları</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rasyonel beklentiler, ajanların homojen olması, fayda maksimizasyonu ve piyasaların dengede olması krizlerin öngörülememesine yol açmaktadır.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hesaplamaya dayalı bir modelleme olduğu için kodların hatasız bir biçimde entegre edilmesi gerekmektedir.</li> </ul>

Acet, Hakan, Zeynep Karaçor, Özlem Alkan. 2018. Makro Ekonomik Modeller: Dinamik Stokastik Genel Denge ve Ajan Temelli Modelleme Çerçevesinde 2008 Finansal Krizinin Değerlendirilmesi. **International Conference on Eurasian Economics**. ed. Selahattin Sarı, Alp H. Gencer, Obidjon Khamidov. Taşkent: Eurasian Economists Association and Tashkent State University of Economics: 245.

Geleneksel teoriler değişime ve içsel yeniliklere açık değildir. Çünkü yenilikler, yeni alanlarla birlikte etkin üretim süreçlerini ve her anlamda eskinin yerini yenisinin aldığı bir kapitalist sistem dinamiği doğurur. Bu sistem doğrultusunda ekonomiler ‘yaratıcı yıkımın’ etkisine hazır olmalıdır. İstikrarlı bir ortam için, sosyal yapıların kalıplaşması, büyüme hızının her bir yenilikle daha yavaşlaması gibi etkilerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Schwardt, 2017). Evrimci bir süreci destekleyen kompleksite ise konveks olmadığından yeniliğe açıktır. Yenilik (inovasyon); yeni ürünler, yeni bileşenler, bilinen bir ürün için yeni yollar ve yeni süreçler, yeni üretim düzenlemelerinin hepsini kapsamaktadır. Artan yenilikler

toplumsal koşullarda iyileştirmeler sağlar. Örneğin, denge halinde bulunan şirketlerin yeniliğe karşı gösterdiği direnç, yenilik yapmadıkça piyasa şartlarının ne kadar altında kaldığı ile doğru orantılıdır. Bu yüzden de teknolojik gelişmeler, dengesizlik ekonomisinin bir unsuru olarak değerlendirilir (Antonelli, 2009).

Geleneksel iktisadi düşünce, kendini tekrar eden kalıplaşmış yapıların dinamiklerini destekler niteliktedir. Bu yaklaşım, toplumların zamanında karşı karşıya kaldıkları gelişmeleri ele almak ve kontrolsüz işlemlerin yol açabileceği endişeleri azaltmak için uygun bir düşünceydi (Schwardt, 2017). Fakat Van den Berg (2015) 2007-2009 küresel ekonomik krizde geleneksel makroekonomi yaklaşımlarının yetersiz kalmasına rağmen, neden halen savunulduğu konusunda tartışmaya açık öneriler getirmiştir: Ekonomistlerin hala geleneksel ve doğrusal modellerle piyasaları açıklamaya çalışmalarını, bilimsel topluma “ait olma” hissiyatı ve klasik öğretilere körü körüne bağlı olmalarıyla açıklamıştır. Bu eğilim beraberinde kompleksiteyle daha yenilikçi bir analiz yapmanın önünü kesmiştir. Diğer taraftan da devam eden tartışmalar yeni bir sentezin oluşmasına olanak sağlamıştır.

**Tablo 2: Kompleksite İktisadı ile Geleneksel İktisat Arasındaki Farklar**

	<b>Kompleksite İktisadı</b>	<b>Geleneksel İktisat</b>
<b>Dinamikler</b>	Dengeden uzak, açık, dinamik, doğrusal olmayan sistemler	Dengede, kapalı, statik, doğrusal
<b>Ajanlar</b>	Ajanlar bireysel olarak modellenir	Ortaklaşa modellenirler
<b>Ağlar</b>	Bireyler arası birbirini etkileyen ağlar açık olarak modellenir.	Ajanlar piyasa mekanizmaları ile dolaylı olarak etkileşim içindedir.
<b>Belirim</b>	Mikro ve makro arasında fark yoktur.	Mikro ve makro ayrı ayrı disiplinler olarak kalır.
<b>Evrım</b>	Farklılaştırma, seçim ve gücünü artırmanın evrimci süreci ve	İçsel olarak yeniliğin yaratılması, büyüme ve kompleksite için

	yeniliğe sahip sistemi sağlar.	mekanizma yoktur.
--	--------------------------------	-------------------

Eren, Ercan. 2015. (Makro) İktisatta Gelişmeler: Yeni Bir (Makro) İktisada Doğru Mu? **Yıldız Social Sciences Review**. c. 1. s. 1: 20.

#### 2.4.2. Neoklasik Yaklaşım ve Basite İndirgenmiş Kabulleri

Ekonomide kompleksiteyi anlatırken değinilmesi gereken konulardan bir tanesi de neoklasik yaklaşımdır. Bu akımın temsilcilerinden olan Walras, neoklasik teorinin bugünkü entelektüel zeminini oluşturmuştur. Walras'ın neoklasik yaklaşımına göre ekonomi, birbiriyle mal ve hizmet alışverişi yapan devlet, üretici ve tüketicilerden oluşur. Bu ekonominin parçaları arasındaki ilişkiler doğrusal denklemler ile bir bütün olarak piyasayı temsil eder. Walras her ne kadar bu doğrusal ilişkiler ağının kompleks bir sistemi temsil ettiğini söylese de kompleksite derinlerinde iç içe geçmiş (girift) bir yapı barındırır (Van den Berg, 2015). Kompleksite iktisadında ekonomik ajanlar, birbirleriyle etkileşerek dairesel ve kümülatif bir ilişki kurarlar. Böylelikle, evrilen bir organizmaya benzetilen ekonomik ekosistemde, durağanlık ve doğrusallıktan bahsedilemez.

1990'ların başında neoklasik iktisatçıların sosyal etkileşim çalışmaları ekonomik denge üzerinde etkili olmuştur. Bu çalışmaların sonucunda, sosyal normlar ve kültürel süreçler ile bireysel tercihlerin içselleştirildiğine varılmıştır. Ayrıca temsili ajanlar aralarındaki koordinasyonu sağlamak ve belirsizliği yenmek (bilgi asimetrisi) için sosyal yaptırımlara uymayı seçmişlerdir. Bunlara ek olarak, ekonomik denge, bireylerin refahı, saygı, popülerite veya statü gibi bazı sosyal normlara dayandırılır. (Gallegati, Richiardi, 2009).

Bu süreçte birçok ekonomist, neoklasik ekonominin doğrusal yöntemlerinin açıklayamadığı ilişkileri incelemek için kompleks yaklaşımı kullanmaya başlamıştır. İlk etapta, kompleksite yaklaşımı neoklasik teoriye tam bir ikame olarak ortaya çıkmamıştır. Daha sonrasında mevcut paradigmalarda içinde kendine yavaş yavaş yer bulmuştur. Neoklasik teori ekonomik denge unsurlarını tanımlamaya çalışırken redüksiyonizmden faydalanmış, fakat kompleksite yaklaşımı redüksiyonizm yaklaşımını desteklememiştir (Fontana, 2010). Çünkü, kompleks bir sistemin bütünü anlamak için sadece bazı tekil öğelere odaklanma yaklaşımı bilimsel

redüksiyonizm olarak anılır ve Van den Berg (2015) bu yaklaşımı tünel izlemi (tunnel vision) olarak isimlendirmektedir. Kompleksite yaklaşımın ortaya koyduğu çoğulcu anlayış, henüz neye evrileceği kestirilemeyen yeni bir akımın öncüsü olarak değerlendirilmiştir (Fontana, 2010).

Anlaşıldığı üzere neoklasik teori ile kompleksite yaklaşımı ekonomiyi farklı bakış açılarıyla değerlendirir. Ama yine de Fontana (2010), bazı ekonomistlerin, kompleksitenin neoklasik yaklaşımı yadsımadığını ve kompleksite biliminin neoklasik teori için bir tamamlayıcı unsur olduğunu öne sürmüştür. Ayrıca kompleksitenin neoklasik teorinin bir alt dalı olarak değerlendirilmesi gerektiğini de belirtir. Neoklasik teorinin diğer yaklaşımları kapsadığını iddia etse de iki yaklaşımın nasıl uzlaştığı konusunda bir açıklama getirememiştir.

**Tablo 3: Neoklasik İktisat ile Kompleksite İktisadı Arasındaki Farklar**

<b>Neoklasik İktisat</b>	<b>Kompleksite İktisadı</b>
Konveks	Konveks olmak zorunda değil
Çok sınırlı	Sürekli yenilik
Yalnız azalan getiri	Azalan ve artan getiri
İlişkisiz-patika bağımsız	Bağımlı-patika bağımlı
Maksimizasyon	Yetinme

Al-Suwailem, Sami. 2011. Behavioral Complexity. **Journal of Economic Surveys**. c. 25. s. 3: 7.

Neoklasik teori ve kompleksite yaklaşımı, konveks ve konveks olmayan iki ekonomik yaklaşım olarak ele alınır. Bir objenin konveks olarak tanımlanabilmesi için bünyesinde barındırdığı birden fazla noktanın ağırlık merkezinin, yine o objenin içinde kalması gerekmektedir. Örnek olarak bir küre konveks bir yapı iken, bükülmüş bir tel konveks değildir. Bu benzetmeden yola çıkılarak neoklasik teorinin sınırları belli, katı kurallarla yönetilen deterministik bir yaklaşım sunduğu, kompleksitenin ise daha stokastik (rastlantısal) modeller içerdiği söylenebilir.

İki akımın temel farkları arasında; doğrusallık karşısında doğrusal olmama, tekil ilişki karşısında çoğulcu ilişkiler, temsili ajan (birey) yerine heterojen ajan, denge yerine dengesizlik ya da çoklu denge, rasyonel beklentiler karşısında tümevarımcı ve evrimsel bir görüş vardır (Eren, 2015). Bunlara ek olarak, Al-Suwailem (2011) neoklasik teori ile kompleksite ekonomisi arasındaki farkları birkaç ana başlık altında toplamaya çalışmıştır. Neoklasik teoride firmaların davranışlarının katı kurallara sığdırılmaya çalışılması yenilik üretebilme (1) konusundaki önemli eleştirilerden biridir. Çünkü, neoklasik teoride bir karar verici sadece mevcut koşullar altında çalışarak, en uygun sonucu verdiği sürece aynı kararı tekrarlamaya devam eder. Hiçbir zaman yeniliklerden ve onların getirdiği farklı uygulamalardan bahsedilmez. Aksine kompleksite ekonomisi çok daha ani ve farklı büyüklükte yön değişikliklerine açıktır. Günümüz modern ekonomisinde uzmanlaşmanın sağladığı artan getiriler, kompleksite ekonomisinin bir parçasıdır. Neoklasik teorinin temelinde ise azalan getiriler (2) ve yavaş yavaş dengeye ulaşan bir ekonomi mevcuttur. Bu yaklaşım da aynı zamanda ağ etkileri ile oluşan pozitif geri bildirim mekanizmasını (3) yok sayar. Bir ajanın elde ettiği sonucun, o sonuca varma sürecindeki ilk koşullara bağlı olma özelliği patika bağımlılığı (4) olarak adlandırılır. Bir başka ifadeyle patika bağımlılığı yüksek olan ekonomik teorilerde, sonucun nasıl alındığı ve ona atfedilen değer en az sonucun kendisi kadar önemlidir. Kompleksite yaklaşımında geçmiş ve geçmişin karar mekanizmalarındaki yeri büyük önem taşırken, neoklasik teori sadece sonuç ile ilgilenilir. Ekonomik karar analizlerinde öznellik ve fayda fonksiyonlarının kişiye göre değişmesi göz ardı edilmemelidir. Ayrıca, kompleks ekonomilerde her denklemin mutlak bir çözümü verilmeyebilir. Burada ajan, H. Simon'ın tanımladığı yetinmecî yaklaşım ile seçim (5) yapar (Guastello, 2016). Neoklasik teorinin öne sürdüğü her denklemin mutlak bir çözümünün olması, birçok insani özelliğin (keşif, öğrenme, mantık, yargı vb.) ekonominin bir parçası olamamasına yol açmaktadır.

Neoklasik yaklaşım (Ortodoks ekonomi), ekonominin kendi sınırları içinde incelenmesi gerektiğini savunur. Bunun aksine ekonomide, dinamik ve interdisipliner bir yaklaşım geliştirilmesi gerektiğini iddia eden Heterodoks yaklaşım Ortodoks ekonomiden ayrılır. Heterodoks yaklaşımda sosyal doku, insani bilimler, ahlaki değerler gibi kavramlar da incelenmektedir. Kompleksite ekonomisinde de fizik, kimya ve biyoloji gibi temel bilimler ele alınmaktadır (Van den Berg, 2015).

Kompleksite iktisadı tam rasyonellik ile çalışan piyasa teoremlerine alternatif bir bakış açısı sunmuştur. Yapılan ilk eleştiri, ekonominin o zamana dek hep denge ve durağanlık altında incelenmesi ile ilgili olmuş, ekonomilerin dengesizlik ve kaos ortamlarında hareket ettiği vurgulanmıştır. Aynı zamanda basite indirgemeci modellerin yerini mikro-ekolojiler ve bunların arasındaki ilişkiler almıştır (Arthur, 2014). Bunun gibi süregelen teoremleri değiştirmek 1990'ların başında çok kolay olmamış ve bunu sağlamak büyük sorunları beraberinde getirmiştir. Örneğin, 2007-2008 finansal kriziyle piyasalardaki likiditenin birden durması ve Lehman Brothers'ın batışıyla finansal piyasaların çöküşünü ekonomistlerin öngörememesi büyük bir eleştiri kaynağı olmuştur. The Economist (2009), ekonomik teorinin şimdiye dek patlayan ekonomik balonlardan en büyüğü olduğunu yazmıştır. Böylece kompleksite iktisadı literatürde kendine artan bir biçimde yer bulmaya başlamıştır.

### **2.4.3. Kompleksite İktisadı**

1987 yılında K. Arrow ve P. Anderson'un başkanlığında Santa Fe Enstitüsü tarafından organize edilen, fizikçi ve ekonomistlerin katıldığı çalıştayda neoklasik yaklaşım, genel-geçer olarak tanımlanmış ve genel denge teorisi ile karakterize edilmiştir. Daha önce de detaylarına değinilen genel denge teorisinde hanehalkları ve şirketler ana ajanlar olarak belirlenmiştir. Bu ajanlar tam rasyonellikle hareket ederler. Ajanların motivasyonları (üretim olanakları, iş gücü ve önceden belirlenmiş farklı üretim biçimleri vb.) baştan ana resmin çerçevesi çizilirken bellidir. Ekonomide denge varsayımı, ajanların içinde buldukları koşullara göre deneme-yanılma yöntemiyle karar vermesinden geçmektedir (Fontana, 2010). Aksine, ekonomik denge, sistemi oluşturan öğelerin alışverişini devam ettirmeden istikrarlı kalabildiği bir statüko olarak tanımlanırsa, bu dengenin olmadığı durumlarda sistem öğeleri arasında (etkileşimleri sonucu) bir kaynak aktarımının olması şarttır (Rutledge, 2015). Diğer taraftan neoklasik yaklaşımda kar değiş-tokuşu ile piyasada bir denge oluşacağı öngörülse de kompleksite bilimciler bu değiş-tokuşun kaotik ve hiçbir zaman dengeyi bulamayacak bir ilişki yumağına döneceğini savunur. Her mikroskobik kompleks sistem bileşeni kârını maksimize etmeye çalışsa da birinin maksimize olan kârı diğerinin azalan faydası olması sonucunu doğurur (Mitchell, 2009). Bu noktada Arrow, çalıştayı yapmadaki amacının; evrimin kaçınılmaz olduğunu öne sürerek kemikleşmiş olan bu neoklasik yaklaşımı yıkmak olmadığını

iddia etmiştir. Ona göre bu yaklaşım ajanların değişen ve çoğulcu tercihleri ile zenginleştirilebilir (Fontana, 2010).

Kompleksite iktisadı gerek genel tanımı gerekse yaklaşımı açısından tutarlı bir düşünceyi desteklememektedir. Örneğin, Mitchell (2009), ekonomileri, mal alıp satan insanların (veya şirketlerin) basit bileşenler oluşturarak piyasaların bütününde tahmin edilmesi zor olan ortaklaşa kompleks davranışlar sergiledikleri kompleks sistemler olarak tanımlamıştır. Aynı zamanda, Dell'Anno ve Friedrich (2008), ekonomik sistemler kompleks olarak nitelendirilir ise, disiplinler arası yaklaşım ile analiz edilmelerinin doğru olduğunu öne sürmüştür. Rosser'a (2010) göre ise, basit kompleksite (complicatedness), dinamik kompleksite ve hesapsal (computational) kompleksite, iktisattaki kompleksiteyi anlatmak için kullanılabilir. Bu nedenle kompleksite iktisadı birçok düşünceye ve yaklaşıma dayanan bir araştırma programı olarak düşünülmektedir.

Kompleksite ekonomisi temelinin ilk olarak Brian Arthur tarafından Santa Fe Enstitüsü'nde ortaya atıldığı ve 'kompleks adaptif sistemler' fikrine öncülük ettiği bilinmektedir. Kompleksite ekonomisi, doğrusal olmayan dinamikler, heterojen ajanlar, ağlar, belirim ve evrim fikirlerini uygulayarak 'kompleks sistemler' üzerine daha geniş düşünmeyi amaçlamıştır. Bu nedenle standart ekonomik yaklaşımdan birçok açıdan farklılık göstermektedir (Foxon ve diğ., 2013; Mitchell, 2009):

- Dinamikler: Ekonomiler açık, dengeden uzak dinamik sistemlerdir.
- Ajanlar: Mükemmel bir öngöründen yoksun, ancak zamanla öğrenip uyum sağlayabilen heterojen ajanlardan oluşmaktadır.
- Ağlar: Araçlar çeşitli ağlar üzerinden etkileşime girmektedir.
- Belirim: Makro yapılar mikro davranışlardan ve etkileşimlerden ortaya çıkmaktadır.
- Evrim: Evrimsel süreçler zaman içinde yenilikler ile artan düzen ve kompleksite yaratabilmektedir.

Yukarıdaki özelliklere ek olarak, kompleksite iktisadı, "sürekli evrilen (kendi kendine organize olan), patika bağımlı, konveks olmayan (sürekli yenilik içeren) ve bütünün bileşenlerinden bağımsız olarak değerlendirilmesi ile karakterize edilir (Foxon ve diğ., 2013; Eren, 2015). Kendi kendine organize olan ve kendisini meydana getirenlerin toplu davranışları nedeniyle belirimin yaşandığı kompleksite



iktisadına aynı zamanda Santa Fe yaklaşımı (Amerikan bakış açısı) denilmektedir (Eser, 2016). Bunun avantajları; zamanın geri dönülemezliğini (tersinemezlik), yapısal değişimi ve analitik ortamda kullanılacak temel belirsizliği içermesidir (Gallegati, Richiardi, 2009).

Genişleyen ekonomi bilimi ile ekonomik teorilerin tutarlılığı ve kullandıkları yöntemler daha fazla sorgulanmaktadır (Gallegati, Richiardi, 2009). Ekonominin analizi için kullanılan matematiksel metotlar, avantajlarına rağmen kompleksite iktisadı için yetersiz kalmıştır (Schwardt, 2017). Kompleksite iktisadının analiz edilmeye başlanması ile bilgisayar teknolojisinin gelişmesinin paralellik göstermesi sorunlara yaklaşımı nedeniyle sınırlı kaldığı büyük ölçekli benzetimlere (simulations) olanak sağlamıştır (Eren, 2015; Schwardt, 2017). Örneğin, belirsizlik gibi bazı çevresel faktörlerin matematiksel ifadesi yoktur. Matematiksel formülasyonlarda belirsizlik risk iken, iktisadi yaklaşımlarda risk 'bilinmeyen bilinememesi' durumudur. Bu durum 'bilinen bilinmeyenden' tamamen farklıdır (Schwardt, 2017). Yani, risk, bir problemin olası sonuçlarının sayısal bir olasılığa atanabilmesini gerektirir ve bu yüzden bir belirlilik içerir. Belirsizlik ise sonuçların herhangi bir sayısal temsilden yoksun olma durumudur (Rosser, 2010). Dolayısıyla kompleksite iktisadının analiz metotları daha çok belirsizliği hesaba katmaya yöneliktir. Bu belirsizliğin hesaba katılması kompleks sistem analizlerinde çok farklı sonuçlar alınmasını sağlar.

Ekonomik sistemlerin, geniş bir kompleks doğası vardır. Bu sistemlerin kompleks yapısı, diğer bütün kompleks sistemler gibi çoklu bir yapıya sahip olması ve birbiriyle etkileşime giren farklı temel unsur barındırmasından kaynaklanır. Ekonomide üretim, dolaşım ve tüketim gibi aralarında etkileşim olan ağ benzeri çoklu yapılarda, parçaların, bütünden daha etkili ve nitelikli olduğu bir yapıya ulaşmak önemlidir (Érdi, 2008).

Kompleks sistemlerde kritik bileşenler, koşullar, ilişkiler gibi yapılar, son on yılda yapılan hesaplamaların gelişmesi nedeniyle daha kolay erişilebilir ve anlaşılabilir hale geldi. Ekonomik sistemlerde matematiksel formülasyonlar yoluyla sözel bir yaklaşımın ulaşamadığı analiz düzeylerine ulaşılması da sağlandı. Bu nedenle kompleksite iktisadı, fizik, kimya ve matematiksel biyoloji gibi (matematik yoluyla daha kolay izlenebilir olan) sistemler üzerinde yoğunlaşmaktadır (Schwardt, 2017).

Aynı zamanda kompleksite iktisadının geniş doğasının içindeki gelişmelerde disiplinler arası analiz edilmesinin (matematik, fizik ve biyolojide) iktisatta ‘yeni’ yansımalar yarattığı söylenebilir (Eren, 2011).



**Şekil 6: New York Borsası 1920’ler<sup>8</sup>**

The Wall Street Journal. [1.03.2020]. Once-Popular NYSE Has No Plan to Reopen to the Public. <https://www.wsj.com/europe>.

## **2.5. Kompleksite İktisadı Diğer Bilimlerle İlişkisi**

Ekonominin çeşitli disiplinler arası çalışması, zaman içinde ekonomi biliminin farklı bilimlerle iç içe geçerek genişlediğini gösterir. Sosyal ve doğal bilimler arası analiz yapmak zor olsa da bu alandaki birçok çalışma Nobel ödülüne layık görülmüştür: Herbert Simon (sınırlı rasyonellik) ve Daniel Kahneman’ın ekonominin davranışsal, bilişsel ve psikolojik temellerine katkıları (Simon, 1997; Kahneman, 2003), Thomas Schelling’in ekonominin ajan bazlı temelleri konusundaki öncü eseri (Schelling, 1978) ve Vernon Smith’in ekonominin deneysel temelleri konusundaki eserleri (Smith, 2006) bunlara birer örnektir (Chen, Wang, 2011).

İnsanların ekonomik, endüstriyel ve çevresel faaliyetlerinin, doğal sistemler ve ekosistem üzerindeki etkisi göz ardı edilemez. Bu yalnızca, neoklasik iktisat düşüncesinin amacı olan “çevresel dışsallıkları içselleştirmeye çalışmak” olmamalıdır. Aksine bu, ekolojik ve ekonomik faktörleri bütünleştiren yaklaşımlar ve modeller geliştirmek gerektiğini gösterir (Gallegati, Richiardi, 2009). Çünkü ekonomik faaliyetlerden kaynaklanan iklim ve ekosistemler üzerindeki insan

<sup>8</sup> Bir ticaret katındaki bireysel eylemler, finansal piyasalarda tahmin edilmesi zor olan büyük ölçekli davranışlara yol açmaktadır.

etkilerinin anlaşılması, toplumsal refahın nasıl yaygınlaştırılacağı hakkında bilgi vermektedir (Schwardt, 2017).

Neoklasik teorinin, dönemin şartlarında piyasalardaki takas dengelerini başarılı bir biçimde anlattığı iddia edilebilir. Ancak ekonomi, temelde insanlar arasındaki takası tanımladığından insanların tabi olduğu tüm doğal bilimleri (fizik, biyoloji gibi) içselleştirmek zorundadır. Bu nedenle SantaFe çalıştayında, ekonomistler dahil diğer bilimlere mensup bilim insanlarının da olması doğaldır. Arrow, bu çalıştayda neoklasik/Samuelsoncu yaklaşımın odağından uzaklaşılmasını; yine de bu yeni bilimlerin farklı bakış açıları getireceğini öne sürmüştür (Fontana, 2010).

Ekonomi biliminin diğer bilimlerle etkileşimine en iyi örnek ekonomiyi izleyen dört dalın ekonomiye entegrasyonudur: davranışsal iktisat, deneysel iktisat<sup>9</sup>, nöroekonomi<sup>10</sup> ve AKİ. Bu dört dalın oluşturduğu araştırma ağının ana çalışma öğeleri olan insanlar, yazılımsal ajanlar olarak ekonomiye dâhil edilmiştir. Böylelikle psikoloji, bilişsel bilim, fizik ve sinir bilimi alanlarına da sıkça değinilmeye başlanmıştır (Chen, Wang, 2011).

Günümüzde kompleksite iktisadı ile sosyal bilimlerde, ekonofizik ve sosyal kompleksite gibi yeni kavramlar ele alınmaya başlanmıştır. Ekonofizik, ilk olarak Fizikçi H. Eugene Stanley tarafından 1995'te, fizikteki kuram ve yöntemleri kullanarak, ekonomideki problemleri çözmeye kullanılmıştır. Temel araçları arasında olasılık ve istatistiksel yöntemler olan ekonofizik, belirsizlik ve doğrusal olmayan dinamikleri içermektedir (Eren, 2011). Sosyal kompleksite ise, toplumlar geliştikçe artan enerji ve güç kullanımıyla birlikte ortaya çıkan maliyetlerin katlanarak büyümesi olarak tanımlanmaktadır (Scarborough, Burnside, 2014).

### **2.5.1. Kompleksite İktisadı ve Fizik**

Keynes, genel teorisinin son bölümünde, politikacıları iktisatçıların, onların ise 17. yy.'ın son fizikçilerinin takipçileri olduğunu belirtmektedir (Gallegati, Richiardi, 2009). İktisatla fiziğin etkileşimi 50 yıllık (1930-1980) bir aradan sonra, 20 yy.'ın

---

<sup>9</sup> Deneysel iktisatta tümevarım yöntemiyle insanların anlama, öğrenme ve bilişsel süreçleri üzerine laboratuvar ortamında kontrollü deneyler yapmak amaçlanmaktadır (Eren, 2009).

<sup>10</sup> Temel olarak verilen kararlar ile aynı anda insan bünyesinde gerçekleşen biyolojik süreçler arasında bir bağlantı kurmayı amaçlayan (nörobilim, ekonomi, psikoloji, mühendislik vb.) disiplinler arası bir alandır.

başlarındaki fizik bilimindeki gelişmelerle, ekonomistler tarafından 1980'lerin sonlarına doğru tekrar ele alınmaya başlanmıştır (Eren, 2011).

İktisatta denge unsurlarını açıklarken fiziki fenomenlerden fazlasıyla yararlanılmıştır. Neoklasik iktisatın, termodinamiğin yasalarından faydalanması buna bir örnektir. Ayrıca temel bilimlerin kompleksite iktisadına sağladığı katkıyı fiziki açıdan incelemekte olan Rutledge (2015) kompleksite yaklaşımında dengesizlik termodinamiğinin (NET: Non-equilibrium thermodynamics) geçerli olduğunu savunarak; Dünyada yaratılmış olan her "iş" in güneş enerjisinin dönüşümünden kaynaklandığını ileri sürmüştür. Termodinamiğin dört farklı yasasından iktisat için önemli olan ve kıtlık kavramı ile ilişkilendirilen birinci yasa, hiçbir enerjinin yoktan var edilemez; vardan yok edilemez olduğuyla ilgilidir. Enerjinin cins değiştirmesi, iktisat biliminde kıt kaynakların sınırsız insan ihtiyaçlarına göre nasıl dağıtılması gerektiğine bir benzetmedir (Eren, 2011). Rutledge'a (2015) göre piyasaların dengeye ulaşması için yaratılması gereken iş, bir enerji transformasyonudur. Bu enerji transformasyonu, onu yaratan sayılı faktörleri ölçen *fiyat* kavramıyla değerlendirilir. Bireyler ise, kârlı bir değiş-tokuş için doğru fiyatı ararlar. Bu takas geçişlerindeki ani ve beklenmedik değişimler, termodinamikte rastlanılan faz geçişine sebep olur. Ekonomideki faz geçişleri, farklı bir denge noktasına gelmek için ihtiyaç duyulan türbülanslara ya da krizlere işaret eder. Farklı sebeplerden kaynaklanabilen krizler, sürecin kendiliğinden oluşmasıyla da sistemin bir parçası haline gelirler (Schwardt, 2017).

Rutledge (2015) finansal krizler üzerindeki kompleksite çalışmalarını iki açıdan incelemek gerektiğini belirtmiştir:

- Ekonomi ve finansal sistemi bir kompleks oluşum olarak ele alma
- Finansal krizler veya benzeri ekstrem olayları bir faz geçişi olarak değerlendirme

Enerji Einstein'a göre ne yaratılabilir ne de yok edilebilir. Sadece şekil değiştirebilir. Ekonomik aktivite de dahil olmak üzere Dünyadaki tüm aktivite Güneş'in enerjisinin bir transformasyonudur. Termodinamiğin ikinci kanunu da ısının sadece tek yönlü hareket ettiğini ve bu hareket yönünün de sıcak kütlelerden soğuk kütlelere doğru olduğunu anlatır. Bu da ekonominin temelini oluşturan arz ve talep denge(sizliği)nin

güzel bir betimlemesidir (Rutledge, 2015). Ekonominin temelinde para ve kaynaklar bir değerine sahip olmayan ajanlar arasında aktarılır.

### **2.5.2. Kompleksite İktisadı ve Biyoloji**

Kurumsal iktisatçı olan T. Veblen fiziğe dayalı denge kavramını eleştirmiş, evrimi ve biyolojiyi odak noktası haline getirmiştir. 2008 yılına kadar biyolojik çağrışımlar Hitleri hatırladığı için evrim odaklı çalışmalar gündemden uzak kalmış, daha sonra yapılan araştırmalarda ise evrim yaklaşımının fizik temelli (kaos, kompleksite) olması dikkat çekmektedir (Eren, 2013). Öte yandan fizikten gelen biçimcilik kabul edilirken, neoklasik iktisatçıların fizikten aldıkları matematiksel formülasyonlara uyulmamıştır.

Neoklasik ekonomistlerden A. Marshall ve C. Menger, Walras-Samuelson iktisat yaklaşımına başından beri itiraz etmişlerdir (Eren, 2018). Marshall sermayenin anahtar tamamlayıcısı olan bilginin bir üretim faktörü olduğunu öne sürmüştü, Menger ise kendiliğinden organize olan evrimsel süreci savunmuştur (Eren, 2018; Antonelli, 2009). Bilgi dışsallıkları firmalar için kilit bir rol oynamaktadır. Çünkü her firma farklı bir bilgi ve yeterlilik düzeyine sahiptir. Teknolojik bilginin üretilmesi, ajanların tamamlayıcı bilgi seviyelerine katkıda buldukları endojen bir süreçtir. Bu süreçte firmaların uzmanlaşması ve teknolojik değişimler arasındaki yeni yapısal evrim, dinamik kompleks bir yapıya yol açmaktadır. Marshall'ın firma yaklaşımındaki yeni bir ürünün biyoloji ile kesiştiği nokta yaşam döngüsü metaforudur. Bu yaklaşıma göre bireyler dışında firmalar da öğrenme kabiliyetine sahiptir. Bir firmanın yeterliliklerini keşfetmesi ve yeni yetenekler öğrenip geliştirmesi, firmanın büyüme dinamiklerinde tutarlı bir yapı oluşturarak teknolojik değişime büyük katkı sağlar (Antonelli,2009). Fakat öğrenme süreçlerinin ekonomik evrim sürecinde firmalarla sınırlı kalması (sınırlı bir dışsallığa sahip olması) alternatif yeniliklerin benimsenmesini engelleyerek teknolojik değişimi yerleştirmiştir (Antonelli, 2009; Gallegati, Richiardi, 2009).

Marshall'a göre iktisadın Mekke'si biyolojidir; ekonomi sürekli değişen yaşayan bir organizma gibidir. Ayrıca Marshall, ekonomik sorunların statik denge problemleri olarak değerlendirilmesinin iyi sonuç vermeyeceğini (H. Spencer'ın evrimsel bakış

açısı), aksine toplumun bir organizma olarak daha felsefi bir şekilde ele alınması gerektiğini belirtmiştir (Antonelli, 2009):

“Organizmanın gelişmesi ister sosyal ister fiziksel olsun, bir yandan ayrı bölümleri arasında, diğer yandan birbirine daha yakın bağlantılı işlevlerin bölünmesini içerir. Her bölüm giderek daha az kendi kendine yeterli hale gelir ve bu bölümler daha iyi hale gelmek için diğer bölümlere giderek daha fazla bağımlı hale gelir. Böylece gelişmiş bir organizmanın herhangi bir bölümündeki herhangi bir bozukluk diğer bölümleri de etkiler...”

Günümüzde farklı alanlarda hem problem çözmek hem de modelleme amaçlı kullanılan yöntemlerden biri olan genetik algoritmalar, doğadaki evrim süreçlerini sanal ortamda taklit ederek çalışan bir optimizasyon yöntemidir (Akbulut, 2009). Kompleksite iktisadı ile genetik algoritmalar ekonomik alanda kullanılmaya başlanmış, biyolojik evrim süreçleri ekonomik modellemeye dahil edilmiştir (Fontana, 2010). Böylece ortaya çıkan ekonomik evrim kavramı; patika bağımlılığı, doğrusal olmama, zenginlik yaratma, çeşitlilik ve kendi kendine örgütlenmeyle açıklanabilmektedir. Ekonomik evrim, sosyoekonomik sistemlerdeki değişikliği anlamak için Genelleştirilmiş Darwinizm<sup>11</sup> ve kendi kendini örgütlenme fikirlerini birbirine bağlayan özel bir 'hesaplama' örneğidir (Gallegati, Richiardi, 2009). Buna bir örnek olarak, genetik algoritma yaklaşımıcısı J. Holland'ın, öğrenme ve adaptasyon davranışlarını biyolojik evrimle ilişkilendirdiği benzetimi gösterilebilir. Popülasyonlarla ilgili olan bu genetik algoritma çalışmasında; bireyler gözlemlenen kondisyonları ile doğru orantılı olarak çoğaltıldığında, çevreyle en iyi uyum sağlayabilenlerin çoğalma şansının daha yüksek olduğu görülmüştür (Fontana, 2010).

---

<sup>11</sup> Darwin varyasyon, seçim ve kalıtım ilkelerinin daha geniş bir uygulanabilirliğe sahip olduğunu ve biyoloji ile sınırlı olmaması gerektiğini öne sürmektedir. Bu varsayım, sosyal olguların tamamen biyolojik olarak açıklanabileceği indirgemeci yaklaşımdan çok farklıdır.

### 3. AJAN BAZLI MODELLEME

Ajanlar, bir modelin, ekonomik karar yeteneği olan, dış uyarılara tepki veren, evre ve diğer ajanlar ile etkileşen öğeleridir. Ajan bazlı modelleme (ABM) ise etkileşen özerk ajanların (davranışları üzerinde merkezi kontrol) dinamik sistemlerinin hesaplamalı bir çalışmasıdır (Gallegati, Richiardi, 2009). ABM'ler matematiksel yöntemler ile bir düzen oluşturmaya çabalamaktadır (Chen ve diğer., 2018).

Kompütasyonel modeller, geleneksel modellerden (görsel, matematiksel ve ampirik) biraz daha farklı olup 1980'lerden sonra teknolojinin de gelişmesiyle 'doğru matematiğin' (doğrusal olmayan, patika bağımlı vb.) modellere dahil edilmesini sağlamıştır (Eren, 2018). ABM'ler denklem bazlı geleneksel model problemlerinin üstesinden, farklı motivasyona sahip birçok ajanı eş zamanlı temsil ederek gelir. Bu da tüm ajanların aynı davranışa sahip olduğu varsayımına dayanan neoklasik ekonomik modellerdeki temsilci ajan yaklaşımına karşıt bir görüştür (Fontana 2010). Aynı zamanda kompütasyonel modeller aracılığıyla evrim modellenebilmeye başlamıştır. Evrimsel modelleme yöntemlerinden (evrimsel oyun teorisi ve evrimsel kompütasyon teknikleri) biri olan ABM, bu modellerin içinde ne çıkanı ve en esnek olanıdır. Çünkü konveks olmamalarının getirdiği yeniliğe açıklıkları, etkileşimlerin geri bildirimleri ve artan getirileriyle karakterize edilirler (Eren, 2018). Ayrıca, ABM kompleks sistemleri daha gerçeğe yakın bir şekilde temsil eder. Çünkü sinir ağları, genetik algoritmalar ve sınıflandırma sistemleri ile ajanlara diğerlerinden öğrenme davranışı da aşılanır. Bu ğrenme davranışı, ajanı evrime uğratmayı modellemeyi gereksiz kılar (Fontana 2010).

Esas olarak ABM'ye görünürlük kazandıran, araştırmacıların herkes için ulaşılabilir ve yaygın hale gelen yüksek işlemci kapasiteli bilgisayarlarla, bu iş için özelleşmiş benzetim platformunda ekonomik araştırmalarını yapabilmeleridir. Bu benzetim platformuna SWARM ismi verilmiştir. SWARM platformu, birbirinden bağımsız ve herkesin kullanabildiği bir protokol yaratmıştır. SWARM protokolünün bazı ilkeleri aşağdaki gibidir (Gallegati, Richiardi, 2009):

- Ajan tabanlı programlama dili kullanımı (SWARM ilk olarak C dilinde yazılmış ve daha sonra Java'ya çevrilmiştir).
- Gözleme için kullanılan ve uygulamanın yapıldığı araçların farklılaşması
- Kümeler hiyerarşisini inşa etmek için modellerin birbiri içine yerleştirilmesine izin veren bir mimariden oluşur. Böylece bir küme, programları daha yüksek seviyeli programla bütünleşmiş düşük seviyeli kümeler içerebilir.

ABM analizleri çerçevesinde, ajanların eylemleri başkalarının eylemlerinin sonuçlarına göre değişebilmekte, hatta diğer ajanların etkilendiği unsurlar da değişikliğe uğrayabilmektedir (Puu, 2010). Kompleksitenin önemli bir boyutu olan birbiriyle etkileşen ajanlar ve onların oluşturdukları yapılar, ABM aracılığıyla sayısal modellemeye dâhil edilmektedir. Burada fikir, her bir ajanı ayrı ayrı kurgulayarak kompleks sistemleri modellemektir (Gallegati, Richiardi, 2009). Modellerin kompleksliği, genelde karar vericinin hesaplamalı ve bilişsel kapasitesi ile problemin çok yönlülüğünün karşılaştırılması ile belirlenir. Bir başka deyişle ele alınan problemin karar vericilerin yetkinliklerini (tatminkârlık, sınırlı hesaplamalı kapasite, seçim yapma yetisi vb.) ne kadar aştığı da önemlidir. Kompleks sistemlerde ajanların kararları diğer ajanlardan etkilendiği ve bu etkileşimler sonucunda ilk ajanın davranışı da değiştiği için çözümü sonsuza yakınsayan problemler oluşabilir. Kompleks bir problemin çözümünün gerektirdiği kaynaklar, çözümün getireceği faydayı da aşabilir. Bu tip problemler kompleksite yaklaşımının temelini oluşturur (Fontana, 2010). Bu nedenle, ABM'ler daha geniş bir soru sormamızı sağlar: Ajanların eylemleri, stratejileri ve beklentileri, yarattıkları yapı sonucunda nasıl değişir ve bu yapı nasıl içsel bir karaktere bürünür? Bu durumda mümkün olan en doğru davranış, başkalarının eylemlerine uyum sağlayabilmektir (Schwardt, 2017). Çünkü piyasa dengesi sağlamak için bir kural yoktur. Aksine, her bir ajanın bireysel davranışına, diğer ajanların ve onların genel çevre içindeki davranışlarına yönelik kurallar mevcuttur (Gallegati, Richiardi, 2009). Bunun için ilk olarak, ajanların aldıkları kararların sonuçlara göre şekillenmesi gerekmektedir. Yani ajanların davranışlarının sonuçları hiçbir ajanın davranışını değiştirmemelidir. İkinci olarak ise çevre faktörü devreye girmektedir. Buradaki soru, çevre koşulları nedeniyle etkileşime giren ajanların, mevcut kabul görmüş olandan daha optimal bir sonuca ulaşip ulaşamayacağıdır (Schwardt, 2017). Ayrı ayrı incelendiğinde ajanlar için



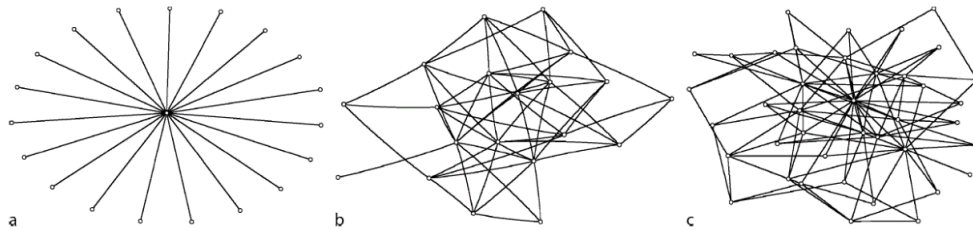
avantajlı davranışların var olduğu durumlar olabilir. Fakat bu durumlar, yeterli sayıda ajan tarafından benimsendiğinde bireysel seviyede olumsuz sonuçlar doğurabilir. Toplumsal çıkarların ve ajanların heterojenliği göz önünde bulundurulduğunda, topluma dâhil olan her ajanın ekonomik çıktıyı artırmayı hedeflemesini beklemek yanlıştır. Buna örnek olarak, Epstein ve Axtell (1996), ajanların kaynakları ve yetkinliklerindeki değişkenliklerden yola çıkarak, bankalar gibi ekonomik kurumların ortaya çıktığı benzetimler yaratmışlardır (Gallegati, Richiardi, 2009).

Ajanların ya da ajan gruplarının karşı karşıya kaldıkları rekabetçi durumlardaki tepkileri birbirinden farklı olmakla birlikte, ikilem tipi bir problem yapısına neden olur. Bu ikilem yapısında bireysel olarak en doğru kararlar, her bir ajanın olabileceğinden daha da kötüleştiği, sosyal açıdan olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu bağlamda, tek tek her bir ajanın incelenmesinin sosyal yapıyla ilgili ayırt edilebilir bilgiler vermediği söylenebilir. Kompleks sistemlerde bütün, parçaların toplamından daha da fazlasını ifade edebilmektedir. Bu yapı sistemin bileşen parçalarının etkileşiminden ortaya çıkar (Schwardt, 2017). İnsanlar sürdürülebilir kadar iyi olan yapı boyunca etkileşimlerine devam ederler. Öte yandan unutulmamalıdır ki insanlar şüphe duymaya devam ettikçe mevcut yapı değişmeye devam edecektir. Yine de çevrenin kendisi tarafından belirlenen seçenekler doğrultusunda ajanların yetkinlikleri ve sınırlı kabiliyetleri arasındaki etkileşim, faaliyetlerine devam eden ajanların yorumlanmasına ve problemlerin analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

ABM sadece insanlar arasındaki etkileşimleri modellemez. Bahsi geçen ajanlar, modellerin içinde farklı kimlikler de edinebilir. Örneğin, Georges (2018) ürün ve süreç inovasyonunun makroekonomik gelişimler üzerindeki etkisini ve R&D çalışmalarının şirket yaşam döngüleri üzerindeki etkisini ABM ile ortaya koymuştur. Bu çalışmada inovasyon, büyüme üzerindeki etkileyici faktör olarak belirlenmiştir. ABM ile simüle edilen serbest bir piyasadaki farklı R&D karakterlerine sahip şirket ajanlarının başarısı, tüketici ajanlarının benimseme davranışıyla ilişkilendirilmiş ve keşfet-faydalan (explore-exploit) seçimi şirketlerin gözünden incelenmiştir. Bu yüzden ABM'nin insanlar, şirketler, piyasalar ve devletler gibi birçok farklı karakteri aynı model içinde temsil ettiği, başarılı ve gerçek hayatı taklit eden sonuçlar ortaya çıkardığı söylenebilir.

Bütün bunlara ek olarak Gallegati ve Richiardi (2009), ABM'lerin özelliklerini sırasıyla heterojenlik, belirli alan, yerel etkileşim, sınırlı rasyonalite ve denge dışı-dinamikler olarak sıralamıştır:

- **Heterojenlik:** Analitik modellerde, ajanların farklı davranış şekillerini basite indirmek büyük bir avantaj sağlasa da bir parametrenin farklı değerleri birden fazla ajan için kullanıldığında ABM'nin hesaplama yükü değişmez.
- **Belirli Alan:** Ajanlar, içinde buldukları veya etkileşimde oldukları komşuları açısından farklılık gösterirler (Gallegati, Richiardi, 2009). Coğrafi olarak yakınlık gerektirmeyen fakat mekânsal anlamda yüksek etkileşimde olan ajanlar örgütsel bir yapı oluşturmaktadır. Bu ajanlar daha üstün bir organizasyon seviyesine işaret etmektedir. Çünkü bu tip ajanların etkileşim sonuçları, bir grup ajanın ortalamasının göstereceği sonuçlardan farklı olabilmektedir. Çok sayıda ülkeye yayılmış olan modern bir üretim ağı böyle bir durum için örnek olabilir (Schwardt, 2017).
- **Yerel Etkileşim:** Walrasçı yaklaşımda olduğu gibi analitik modeller genelde küresel etkileşimi ya da basitleştirilmiş yerel etkileşimi dikkate alırlar. Ancak ABM'nin yapı taşı stokastik ve yerel etkileşimdir.



**Şekil 7: a. Walrasçı Genel Denge Temsili; b. Rasgele Model; c. Birden Çok Lokal Düğümün Olduğu Denge Modeli**

---

Gallegati, Mauro, Matteo G. Richiardi. 2009. Agent Based Models in Economics and Complexity. **Complex Systems in Finance and Econometrics**. ed. Robert A. Meyers. New York: Springer: 38.

- **Sınırlı Rasyonalite:** Sınırlı rasyonalitenin iki bileşeni vardır; sınırlı bilgi ve sınırlı bilgi işlem gücü. Ajanlar ne küresel bilgiye ne de sınırsız hesaplama kapasitesine sahiptir. Genelde amaca yönelik davranmalarına rağmen, küresel şartları iyileştirici bir motivasyon taşımazlar. Aksine basit kurallar ile yerel bilgilere dayanarak lokal optimizasyon için uğraşırlar. Kompleksitedeki tam

rasyonalite gereklilikleri sonsuz küçüklükteki bir zamanda neredeyse sonsuz büyüklükteki bir bilginin işlenmesini gerektirdiği için sınırlı rasyonalite, ABM'nin bir karakteri olarak ortaya çıkar.

- **Denge-dışı Dinamikler:** ABM'ler, sistemin  $t+1$  zamanındaki durumunu tahmin etmek için  $t$  zamanındaki durumundan yola çıkan tekrarlanan bir yapıdan oluşurlar. Yani araştırmanın başında ve sonunda ne olduğundan ziyade sürecin hangi adımlardan nasıl geçtiğiyle ilgilendirler (Gallegati, Richiardi, 2009).

Özetle, kompleksite yaklaşımında heterojen motivasyonları olan birçok ajan mevcuttur. Bu ajanlar, bireyler veya kurumlar olabilir. Bu ajanların yarattığı etkileşimler bazı sonuçlar doğurur. Bu sonuçlar da etkileşimin bir parçası olduğunda kolay içinden çıkılmaz problemler ortaya çıkar. Bu kompleks problemlerin çözümü için de genelde ABM kullanılmaktadır. Birden çok ajanın yer aldığı bu durumlarda modelleme çalışmaları dengeyi değil, dengesizliği analiz eder. Kompleks modellerde çok fazla etkileşim olduğu ve bunlar her ajanın farklı güdeleri tarafından şekillendiği için karar alıcıların daha çok bilişsel ve psikolojik kökenleri incelenir.

### 3.1. Ajan Kavramı

Ajanlar<sup>12</sup>, hücrelerden biyolojik varlıklara, bireylerden sosyal gruplara, ailelerden firmalara kadar geniş bir yelpazede yer alabilirler. Dahası bir araya gelerek fiziksel varlıklar ve kurumlar oluşturabilirler. Buradaki gereklilik, dışarıdan bir bütün olarak algılanmaları ve özerk bir biçimde eylemde bulunmalarıdır. Merkez bankaları örnek olarak gösterilebilir.

#### 3.1.1. Ajanların Özellikleri

Ajanların yetkinlikleri, tecrübeleri ve karar verme şekilleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle diğer ajanlarla uyum sağlamaya çalışırlar. Bu uyum süreci değişkenlik gösterebilir (Fontana 2010). Çünkü ajanlar, kendi spesifik özelliklerine ve kazanımlarına göre hareket ederler. Heterojen ajanların davranışları, mikro ve makro dinamiklerin birbirleriyle etkileşimi ile anlaşılabilen ve aralarındaki mesafeden etkilenmektedir (Antonelli, 2009). Ayrıca sınırlı rasyonaliteye sahip ajanların davranışları, alışkanlık ve rutinlerine bağlı olarak evrilmektedir (Gallegati,

---

<sup>12</sup> İktisadi karar alıcı birim.

Richiardi, 2009). Buradaki esas nokta, ajanların birden çok amacı gerçekleştirme isteği ile en uygun çözüme ulaşmaya çalışmalarıdır. Bir karar verici, tüm seçeneklerden ve bunların olası sonuçlarından önceden haberdar olarak en uygun çözüme ulaşabilir (Velupillai, Kao, 2014). Her ajanın yerel bilgiye erişimi tam olup bu bilgiyle ilişki ağları kurarlar (Antonelli, 2009). Ajanlar arasındaki bu bağlantılar ve kararlarındaki uyum sağlama farkları, kompleks sistemin sağlıklı işleyişinin bir ölçütüdür (Velupillai, Kao, 2014).

Karar vericilerin karşı karşıya kaldığı kompleks durumlar için kullandıkları yetkinlikler aşağıdaki gibidir (Velupillai, Kao, 2014):

- Hırs ve başarıya olan odağın gücünü yansıtan “tatminkârlık”
- Kısıtlı hesaplama kapasitesi
- “Sezgisel” yinelenen (iterative) alternatif arayışı (ağaç yapısı)
- Aramayı durdurmaya karar vermeye yarayan “konu bilgisi”
- Olası sonuçlara göre hedef beklentinin “adaptasyonu” (artış veya azalış)
- Seçim yapma yetisi

H. Simon tarafından geliştirilen sınırlı rasyonellik nosyonu ile psikolojinin, finansal karar verme sürecindeki etkisi önem kazanmıştır (Guastello, 2016). Ekonomi ve psikolojinin bu yakınsaması için 1979 yılında D. Kahneman ve A. Tversky’nin Beklenti Teorisi<sup>13</sup> bir başlangıç niteliğinde olmuştur. Sınırlı rasyonelliğin sağladığı iki önemli düşünce vardır. Bunlardan ilki, insanların rasyonelliğinin bilgisayarlar tarafından geliştirilmesi gerektiğidir. İkincisi ise bireylere özgü olan önyargıların karar verme üzerine etkisinin akademik bir odak kazanmasıdır. Önyargılar, katı bir rasyonellikten sapmaya yol açan sistematik sapmalar olarak değerlendirilebilir (Guastello, 2016).

Sınırlı rasyonelliğe sahip ajanlar gerçeği daha doğru yansıtır (Antonelli, 2009). Sınırlı rasyonelite kavramı, prosedürel rasyonelite olarak da alınabilir. Prosedürel rasyonelite sıralı karar verme sürecine dayanır ve her durum kendi şartları içinde tatminkârlık kısıtları altında değerlendirilir (Antonelli, 2009). Örneğin, bir daire arayışında olan ya da emeklilik planı yapan bir ajan için kısıtlamalar yapması onun için mükemmel olanı kaçırdığı anlamına gelebilir (Schwardt, 2017). Bu nedenle her

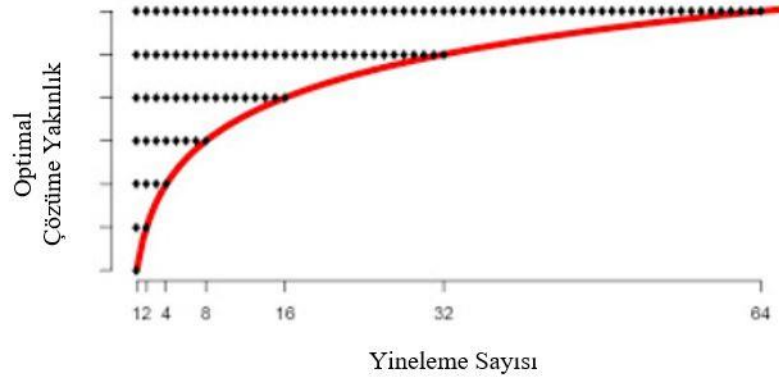
---

<sup>13</sup> Bir insanın karar verme sürecinde kayıplara kazançlardan daha fazla anlam yüklediği üzerine kurulmuştur. Beklenti Teorisi’nin üzerinde durduğu diğer bir husus ise, “beklenen risk” ten ziyade “algılanan risk” kavramının daha öne çıkmasıdır.

karar aşaması ve sunduğu olanaklar bir önceki yineleme adımından etkilenir. Diğer taraftan ajanlar, sınırlı bilgi erişimi ve kapasiteleri ile (sınırlı rasyonellik) sezgilerine dayanarak anlık kararlar alırlar. Sezgisel tarama olarak adlandırılan bu durum değişen ortamlarda geçmişten aldıkları tatmin edici sezgisel kararlarına güvenerek hareket etmelerini sağlar (Schwardt, 2017).

Ajanların asimetrik beklentileri ve zekâ seviyeleri ekonomik büyüme ve dalgalanma gibi pek çok fenomeni etkilemektedir. Asimetrik beklentilerin psikolojik temelleri ile ajanların özellikleri arasındaki ilişki yeterince açıklığa kavuşturulmadığı için ajanların etkileşimlerinin doğurduğu sonuçların anlaşılması güçleşmektedir. Beklentilerin nasıl oluştuğu, ajanların deneyimlerinden ve çevreden nasıl öğrendikleri ile yakından bağlantılıdır (Chen ve diğ., 2018). Diğer taraftan toplumdaki asimetrik zekânın, ajan yetkinliklerindeki dağılım ile doğru şekilde temsil edilmesi şarttır. Bu yüzden yazılımlardaki ajanların zekâ seviyeleri, bilim insanları tarafından olabildiğince doğru tasarlanmaya çalışılmıştır. Eğer ajan tabanlı modelleme ile temsil edilen toplum, insan zekâsındaki dağılımı doğru bir şekilde yansıtmazsa, yaratılan sosyal benzetimler kompleksiteyi tanımlamada fayda sağlamaz (Chen, Wang, 2011). Örneğin, Chen, Zeng ve Yu (2008) tarafından oluşturulan bir ajan tabanlı modelde, genetik programlama algoritmalarına zekâ boyutu da eklenerek bir benzetim yapılmıştır. Genetik programlama popülasyon odaklı olduğu için algoritmanın işlem kabiliyeti popülasyonun büyüklüğüyle doğru orantılı olarak tasarlanmıştır. Artan ve azalan popülasyon sırasıyla gelişmiş ve gelişmemiş zekâyı temsil etmektedir. Bir insanın kısa vadeli hafıza kapasitesi, aynı anda yürütebildiği bilişsel aktivitelerle ölçülmektedir. Bu benzetimde, insan zekâsının IQ boyutu ile sosyal zekânın birlikte çalışmasının önemli sonuçlar yaratacağı gösterilmiştir.

Yukarıda sayılan özelliklere ek olarak Velupillai ve Kao (2014), karar vericinin 'yetinme' kavramı üzerinde durmuşlardır. Yetinme, optimal çözümü ararken yinelemeyi kullanmayı gerektirir. Çünkü, seçilmiş bir algoritmanın optimal çözüme ulaşması ile yineleme sayısı arasında logaritmik bir ilişki vardır (Şekil 7). Yetinilebilecek bir çözüme ulaşıldığında yineleme sayısı durdurulabilir. Bir örnekte sistemin yarattığı sonuçlardan alınan geri bildirimlerle hedeflerin, uyarlanabilir ve yetinilebilecek seviyelere çekilebileceği gözlenmiştir.



**Şekil 8: Yineleme Sayısı ile Optimal Çözüm Arasındaki İlişki**

### 3.1.2. Birey Kavramının Yetersizliği

Genel denge teorisinin yapı taşlarından biri, Olimpik rasyonelliğe (olympian rationality) sahip olan homoekonomikus'tur. Homoekonomikus, herhangi bir zamanda elde edilen tüm bilgileri harmanlayarak optimal sonuca ulaşır. Bu ekonomik aktör, sürdürülebilir kesin bilgiye sahip olmanın imkânsızlığını ve insanın kısıtlı hesaplama kapasitesini görmezden gelir (Antonelli, 2009). Diğer taraftan, kompleks sistemlerdeki tüm ajanların rasyonel olduğu düşünülse bile, bu ajanların etkileşimleri sonucu ekonomik denge ulaşılabilecek bir son değildir. Çünkü ekonomi, dengesizlik durumunda varlığını sürdürür (Fontana 2010).

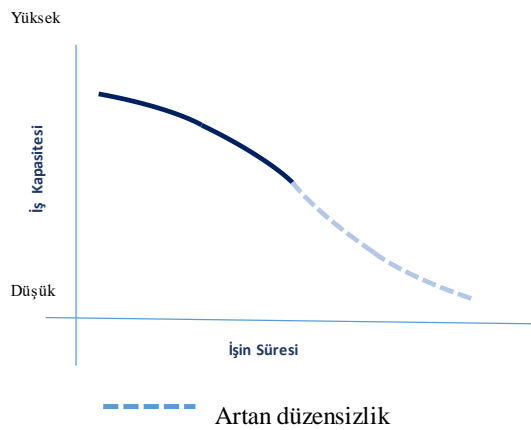
Bireylerin bilgiye erişirken karşılaştıkları sorunlar, sahip oldukları tam rasyonelliğin önüne geçmektedir. Bu sorunlardan ilki, bilginin sistemde bir yerde mevcut olmasına rağmen bu bilginin kullanılmamasıdır. İkincisi ise, bu bilginin henüz mevcut olmamasıdır. Bilinmeyen bir gelecek, bireylerin habersiz olduğu değişikliklerden kaynaklanabildiği gibi, kompleks sistemlerde gelecekteki etkileşimlerinin sonucundan da kaynaklanabilmektedir (Schwardt, 2017).

İnsanın işlemsel becerileri, ekonomik problemlerin çözümü ve bunların bileşkelerinin yarattığı kompleks sonuçlar için yeterli değildir. Bu yüzden karar vericilerin vardığı sonuçlar, sınırlı rasyonalite ile anlam kazanır. H. Simon'a göre, objektif olarak oluşturulmuş rasyonel bir davranışı formüle edebilecek insan kapasitesi, bu davranışın kompleks yapısı kadar engin değildir. Ayrıca bir insanın fizyolojik özelliklerinden arındırılmış karar verme mekanizmasını taklit edebilecek bir deneysel araştırma da mümkün değildir. H. Simon, sadece insan karar vericilere özgü olan sınırlı rasyonalite özelliğini; yetinme ve sezgisellik (heuristics) gibi

terimlerle zenginleştirmiş ve bilişsel araştırmalarını bu tabanın üzerine oturtmuştur (Velupillai, Kao, 2014).

İnsanların kompleks karar vermedeki yetersizliği, bilgisayarların insanların rasyonelliğinin geliştirilmesindeki önemini vurgulamıştır. Bunun sebebi, kısa vadedeki işlemsel bellek ile uzun vadedeki depolama belleğinin birbirinden ayrı ayrı önemli olmasıdır. Kompleks sistemleri analiz eden algoritmalar için işlemsel belleğin hızlı ve güvenilir olması gerekmektedir. Bu uygulama alanında bilgisayarların insanlardan üstün olduğu bir gerçektir. Ancak bilgisayarların algoritmik yeteneklere sahip olması da uzun vade bellekte yer alan sayısız örneğin sebep-sonuç ilişkilerinin her ayrı duruma yönelik bir filtreden geçmesi ile mümkündür. Bu da ancak algoritmaların hesaplama becerisinin, insan popülasyonunun biriktirdiği ortaklaşa hafıza ile geliştirilmesiyle olur. Böylece, insanların uzun vade kolektif belleği ile bilgisayarların kısa vade işlemsel yetkinliği, algoritmaların doğru kurulmasını sağlar (Guastello, 2016).

Guastello'nun (2016) bulgularına göre, bireylerin finansal karar vermedeki bilişsel değişkenleri (iş yapma kapasitesi), psikososyal değişkenlere göre daha baskındır. Ekonomik problemin konusu bu baskınlığın gücünü etkilese de her insanın konuya ilişkin yeteneğinin aynı olması varsayımı altında, insanların bilişsel yorulmasının sonuçlara olan etkisi (Şekil 8) psikososyal etmenlere göre daha üstün çıkmaktadır.



**Şekil 9: Yorulma Eğrisi**

Guastello, Stephen J. 2016. **Cognitive Workload and Fatigue in Financial Decision Making**, Japan: Springer: 20.

Guastelo (2016) stres unsurunun da kompleks sistemler değerlendirilirken dikkate alınması gerektiğini önermiştir. Yapılan tanım itibarıyla stres, fiziksel, sosyal, hız/yük veya düzensizlik kaynaklı olabilir. Her birine birer örnek vermek gerekirse sıcaklık değişiklikleri (fiziksel), başarı kaygısı (sosyal), kesintisiz efor ve çıktı arasındaki logaritmik ilişki (hız/yük), uyku bozukluğu (düzensizlik) insanların tabi olduğu stres faktörleri iken, bilgisayarlar bunların hiçbirinden etkilenmezler. Aynı zamanda düşünce gücü üzerindeki yüksek baskının şiddet ve konu açısından sık değişkenlik göstermesi ise insanlar için sınırlı olan kısa vade düşünce gücü üzerindeki zorlamayı arttırmaktadır. Zorlanan bilişsel kapasite ve alınmak istenen sonuçlardaki dalgalanma ise insanlara özgü olan (makinelere olmayan) stres faktörünü arttırmaktadır.

Genel ekonomik teori hiyerarşilerin ve ilişkilerin yokluğu, yetkinliklerin homojenliği, tam rasyonellik, karar vermede simetri gibi karakterlere dayandırılırken, kompleks sistemler girift hiyerarşiler ve ilişkiler ağı ile tümevarımsal ve asimetric karar vermeye dayanır (Fontana, 2010).

### **3.1.3. İnsan Psikolojisi**

Toplumlar için sürekli değişimin temel nedeni insan psikolojisidir. İnsanların toplumda önceden tanımlanmış rolleri, arzu, hırs ve kazanımları bireylerin davranışlarını etkiler. Sosyal bir varlık olan insan için, yer ve statü gibi kavramlar önemlidir. Gruplar halinde yaşayan bireyler, örgütsel yapıları ve istek seviyelerini referans alarak sezgileriyle karar verir ve eylemlerini şekillendirir. Bireyler, her ne kadar etkileşim ortamları içinde denge kurmaya çalışsalar da içinde buldukları sosyal yapılar nedeniyle kendilerini risklere karşı korumaları zorlaşmaktadır. Esas sorun bireysel faaliyetleri dışında gelişen etkilerle nasıl başa çıkacaklarıdır. Bunun için kurallar ve normlar mevcuttur. Kurallara bağlı olarak davranış modelleri istikrar sağlayabildiği gibi bu modellerin uygulanabilirliği, daha kompleks durumlarda farklılık gösterebilmektedir (Schwardt, 2017).

İnsanların kompleks bir durumu kavramak için yaptığı basite indirgeme işlemi, nedensel redüksiyonizm (causal reductionism) olarak isimlendirilir ve insan psikolojisinin bilimsel olarak tanımlanan yanılgılarından biridir (Érdi, 2008). İnsanın indirgemeci tavrı, şartlanma ve öğrenme süreçlerinin, sosyoekonomik koşulların,



rahatsızlıkların ve kompleks yapıların ürünüdür. Oysa insanı kapalı bir hücre olarak ele alan bu tür yaklaşımlar, insanın dünyaya açık oluşunu görmezden gelmektedir. İndirgemeci anlayışın bir başka versiyonu; teorileri, gözlemlene verilerine bağlamak, kavramları nesnelere indirgemek ve nedensel/determinist olaylarla açıklamaya dayanmaktadır (Keskin, 2019). Bu yanlıgılardan ötürü insanların davranışlarının sosyal ve psikolojik yönlerinin daha iyi anlaşılması güçleşmektedir (Foxon ve diğ., 2013).

Bireyler seçimlerini hem istekleri doğrultusunda hem de birbirlerinin etkileri altında kalarak yaparlar. İnsan psikolojisi, kendi için en faydalı olanı tercih etmek yönündedir. İnsanların karşılaştıkları sorun yapıları, zamanla stratejik davranışlarını değiştirmelerini gerektirir. Örneğin, modern ekonomiler için 'buluşun zorunluluktan doğduğu' gerçeği, yeni ürünlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Aynı zamanda rekabet sonucunda tüketim bir amaç olmaktan çıkmış araç olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bireylerin değişen tüketim arzuları, ekonomik faaliyetlere yön verir (Schwardt, 2017).

Farklı ilgi alanlarına sahip olan bireylerin karşılaşabileceği sorunlarda sonuca ulaşabilmeleri için birbiriyle etkileşime girmeleri gerekir. Örnek olarak, sermaye ve emek tipik olarak somutlaştırılmış birer düşmandır. Sermaye ve emek hakkında üretimde yaratılan değerin dağıtımıyla ilgili bir anlaşmaya varılması gerektiğinde karşılıklı bağımlılık anlayışı gelişirse, gruplar ihtiyaçların anlaşılmasında uzlaşmaya varabilirler.

İnsanlar seçimleri doğrultusunda mevcut koşulları şekillendirse de gelecekte oluşabilecek yeni koşulları bilemez. Çünkü gelecekteki koşullar zamanla atılan tüm adımların kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Örneğin, insanların mevcut koşullarda istikrarı sağlamak amacıyla öngörülemeyen etkilerden korunmaya çalışmaları, yakın çevrelerine karşı olan kontrollerini arttırdıklarını ya da birbirleriyle olan bağlarını kopardıklarını göstermiştir (Schwardt, 2017). Aralarındaki ilişkilerin yönündeki bu ani değişimler türbülans yarattığı gibi, ticaretin hız kazanması ve sermaye akışlarının ani yön değiştirmesi istihdam ve gelir üzerinde beklenmedik etkiler yaratabilir. Bu süreç yeni endüstrilerin oluşması veya yok olmasına ön ayak olabilir. Yarışın gerisinde kalanlar ise kurtuluş için devletlere başvurabilirler. Bu da kompleks sistemler perspektifinden incelendiğinde şirketler ve bireylerin yanına

devletlerin eklenmesine örnek gösterilebilir. Böylece sistemin içindeki ajanların (ör: yıkıcı politikalar izleyen şirketlerin) yol açtığı sonuçlar, diğer ajanların ortaya çıkmasına sebep olur (Rutledge, 2015).

Kompleksite, metodolojik bireycilik ve bütüncülük (holizm) olarak iki karşıt felsefi bakış açısını uzlaştırmanın bir yolu olarak da görülebilir. Analiz birimi olarak ajanları kullanan ABM, toplum genelindeki gelişmeleri, bireylerin kararlarının bütünü olarak açıklamaya ve anlamaya yönelik felsefi bir yöntem olan metodolojik bireyciliğe derinlemesine dayanmaktadır. Metodolojik bireyciliğin, en ileri (ve en hatalı) versiyonunda, bir sistemin bileşenlerinin ayrı ayrı analiz ederek anlaşılabilirliğini, indirgemeci yaklaşımın bütünü, parçalarının toplamından başka bir şey olmadığını ileri sürmektedir. Bununla birlikte, her şeyi basit nesnelere ve yasalara indirgeme yeteneği, bu nesne ve yasalardan evreni yeniden oluşturma gücü sağlamaz. Başka bir deyişle, indirgemecilik (redüksiyonizm), oluşturmacılık (konstrüksiyonizm) anlamına gelmez (Gallegati, Richiardi, 2009). Asıl olarak Aristoteles'e atfedilen "bütün onu oluşturan parçaların fazlasıdır" söylemi günümüz bilimindeki bütüncülüğün sanatsal bir anlatımıdır. Bazı durumlarda oluşan bu bütün, kendi içinde bir mantık izleyebilir. Bu, bütünü oluşturan parçaların ayrılamaz bir tam olduğunu da ifade eder. Metodolojik redüksiyonizm ise bütünü davranışını oluşturan parçaların özellikleri ile anlatılabileceğini söyler (Sturmborg, 2016). Bir şirketler kartelinin ortak bir ürünün fiyatını etkilemek için bir araya gelmesi buna örnek olarak verilebilir. Bu örnekte birbirinden farklı ajanlar birleşerek yeni ve özerk bir ajan oluşturmuşlardır (Schwardt, 2017).

### **3.2. Ajan Bazlı Kompütasyonel İktisat**

Ekonomi bilimi hem etkileşimi gerektiren hem de etkileşime zorlayan kıt kaynaklarla karakterize edilen bir ortamda bireysel eylemlerin amaçlanan ya da istenmeyen sonuçlarını inceler (Gallegati, Richiardi, 2009). Dünya ekonomileri beş temel özellik sergiler; (1) heterojen etkileşimli katılımcılardan oluşmaları, (2) katılımcılarının etkileşimleri tarafından yönlendirilen değişken sistemler oluşları, (3) insan katılımcılara sahip olmaları ve katılımcıların karar süreçlerinin diğer katılımcıların geçmiş ve gelecek kararları tarafından etkilenmesi, (4) tüm katılımcıların yerel kararlar alması (yerel durumları dikkate alarak hareket etmekle sınırlılar), (5) katılımcılar tarafından herhangi bir zamanda yapılan eylemlerin gelecekteki

durumları etkilemesi ve dolayısıyla sistemde tepki yaratacak sonuçlar doğurmasıdır (Tsfatsion, 2020). Kompleksiteyle dikkat çekmeye başlayan ajan bazlı kompütasyonel iktisat (AKİ), ekonomik süreçlerin bir parçası olan ajanların etkileşimlerinin, denge-dışı dinamik sistemler ile hesaplamalı modellenmesidir (Roberto, Schneider, 2008; Tsfatsion, 2020; Gallegati, Richiardi, 2009). Denge-dışı dinamikler, AKİ'yi tüm diğer genel ekonomik modelleme yaklaşımlarından ayıran temel özelliğidir.

Kompleks adaptif sistemlerin iktisatta bir uygulaması olan AKİ, bilgisayar bilimi öne çıkarken kompleks sistemler için bilgisayar benzetimleri yoluyla hesaplanabilir bir modelleme sağlamıştır (Gallegati, Richiardi, 2009). Bunun için, F. Hayek'in kendiliğinden düzen fikri bir başlangıç noktası olmuştur. Bilgisayar bilimine dikkat çeken O. Lange ile Hayek'in ortaya koyduğu düzen fikri, AKİ ve Avusturya Okulunun bir kombinasyon gibi düşünülmektedir (Eren, 2015).

Avusturya Okulu, ajanların rasyonel olmadığını, tercihlerin sürekli değiştiğini ve esas olanın insanın faaliyetleri olduğunu öne sürmüştür. Rasyonellik yerine akla uygunluk, beklentiler ve heterojen gibi kavramlar kullanılmıştır. Bu nedenle günümüzdeki davranışsal iktisata oldukça yakındır. Aynı zamanda AKİ modellerinin piyasanın evrimci ve kompleks tabiatını ortaya koyduğunu düşünürsek, Avusturya Okulunun AKİ modelleriyle paralel olduğunu söylenebilir. Çünkü Hayek'in düzen fikrinin arkasında da evrim ve kompleksite yatmaktadır (Eren, 2015). Ekonomi öğrenen ajanlarla ilgilendiği için, evrim ve değişim ekonomik dünyanın vazgeçilmezleridir (Gallegati, Richiardi, 2009).

Bir bütün olarak ele alınan modelleme ilkeleri (İlke 1-7), AKİ'yi kullanan modelleyicilerin başlangıç koşullarını belirlemesine ve sisteme müdahale etmeden sonuçların nasıl somutlaştığını incelemesine olanak verir (Tsfatsion, 2020):

- Ajan Tanımı: Bir ajan, kendi verileriyle, öznitelikleri ve yöntemleri temelinde hareket edebilen, hesaplamalı olarak oluşturulmuş bir dünyada bulunan bir yazılım varlığıdır.
- Ajan Kapsamı: Ajanlar bireyleri, sosyal grupları, kurumları, biyolojik varlıkları veya fiziksel varlıkları temsil edebilir.

- Ajanın Yerel Odağı: Ajanın herhangi bir zamandaki aktiviteleri, içinde bulunduğu koşulun bir fonksiyonudur.
- Temsilci Otonomisi: Temsilci etkileşimlerinin koordinasyonu, ajanların dünyası dışında yer alan kısıtlamalardan etkilenmez.
- Sistemin İnşası: Modellenen sistemin herhangi bir zamandaki durumu, o sırada ajan durumlarının kolektif yönelimiyle belirlenir.
- Sistem Tarihe Bağlılığı: Modellenen sistemde gerçekleşen tüm olaylar sadece diğer ajanların zaman çizgisi üzerindeki etkileşimleri ile belirlenir.
- Modelleyicinin Etki Alanı: Modelleyici sadece, zamanın başlangıcındaki durumu belirler ve daha sonra işleyişe karışmadan sonucu raporlar.

AKİ'nin ortak özellikleri; aşağıdan yukarıya perspektif, heterojenlik, evrilen kompleks sistem (ECS), doğrusal olmama, doğrudan (içsel) etkileşimler, sınırlı rasyonellik, öğrenme, "gerçek" dinamiklik, içsel ve kalıcı yenilik ("novelty", değişme), seçimlerin piyasa temelli ve kompleks oluşudur (Eren, 2013).

Model-birey yaklaşımında yapılan analizler iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan ilki yukarıdan aşağıya bakış açısı olarak adlandırılan, analizlerin yapılabileceği ekonomik sistemde dengeyi varsayanlardır. İkincisi ise aşağıdan yukarı analiz şekli olan, kendi yaşadıkları çevrenin merkezinde bireysel etkileşimlerle devam eden bir süreç olduğunu varsayanlardır. Yukarıdan aşağıya bakış açısıyla temsili ajanlar sistemin ve işleyişinin bir parçası olan düzen tarafından sınırlandırılarak, rasyonellikle mümkün olan en iyi ekonomik sonucu elde etmeye çalışırlar. Diğer taraftan, aşağıdan yukarıya bakış açısında mikro temellerden çıkarım yapılarak makro sonuçlara varılmaktadır. Bu perspektife göre ajanların hareketleri, çevrelerini şekillendirdiği için ekonomik çevreyi oluşturan ajanların eylemleridir (Schwardt, 2017). Yani bu yaklaşımla ajanların etkileşimlerine dayanarak geliştirilen modeller ajanları ve kurumları açık şekilde sunmaktadır.

Şu anda ön planda olan AKİ araştırmaları amaçları bakımından dörde ayrılmaktadır. Bu amaçlardan ilki, dünyada sosyal normlar, piyasa koşulları, ekonomik döngüler, gelir eşitsizliği gibi konuları inceleyip bunların ardındaki sebepleri deneysel bir yaklaşımla anlamaktır. İkincisi, AKİ'nin sosyal yapıların, kuralların ve kurumların oluşma aşamasında bir test aracı olarak kullanılmasıdır. Burada araştırmacı, kurulmak istenen modelin belirlenen koşulların içinde çalışıp çalışmadığını

gözlemlemek için sistemi "serbest bırakır". Bu yaklaşım bir kovaya su doldurup sızdırıp sızdırmayacağını görmeye benzer. AKİ ile bu tip tasarım aşamasında olan kurumların ya da kuralların istenen şekilde çalışıp çalışmayacağı simüle edilebilir. Üçüncü olarak, AKİ teori oluşturma aşamasında kullanılabilir. Bir sistemin içindeki ajanların tüm olası başlangıç koşulları bir algoritmaya yüklenerek bu başlangıç koşullarından hangilerinin gerçekleşebilir sonuçlar vereceği test edilir. Ayrıca güvenilirliği yüksek teorileri için koşullar ve potansiyel yöntemler de keşfedilebilir. Dördüncü ve son olarak ise AKİ, araştırmacıların mevcut yöntemlerine bir güncelleme ve yükseltme seçeneği sunar (Tsfatsion, 2020).

Kesin cevaplara ulaşmak için henüz çok erken olsa da AKİ ve kompleksite yaklaşımı önerdiği ampirik sonuçları açısından gelecek vaat eden bir ekonomi dalıdır. Ancak ajan bazlı bir ekonomiyi modellemenin kendi içinde çok kompleks bir macera olduğu kaçınılmaz bir gerçektir (Gallegati, Richiardi, 2009).

### **3.3. Ajan Türleri**

AKİ'nin ilk uygulamalarındaki ajanlar, görece olarak daha basit ve homojen nitelikteydi (Chen, Wang, 2011). Bu modellerin (basit ajanlı) kısıtlı kullanım alanları göz önünde bulundurulduğunda, en öne çıkanı ajan bazlı finansal piyasa uygulamalarıdır. Basit davranış kurallarının kompleks modeller oluşturabildiği bir ortamda, tüm finansal piyasa kompleksliğinin de çok basit ve neredeyse homojen finansal araçlar tarafından ortaya çıkabileceği tahmin edilebilir (Chen, Wang, 2011). Bu araçlar, yatırımcılar, bankalar, yatırım şirketleri ve düzenleyiciler olabileceği gibi risklere karşı toleransları ve genel yatırım stratejileri de dahil olmak üzere birçok açıdan farklılık gösterirler (Acet, Karaçor, Alkan, 2018). Bu tip kompleks piyasa modellerinin dezavantajı, ajanların kısıtlı sayıdaki davranış biçimleri (iki veya üç tip) ve sistemlerden ajanlara geri bildirim olmamasıdır. Bu ajanların öğrenmeye ilişkin ya da adaptif olarak tanımlanabilecek tek davranışları çoklu olasılıklar arasından seçim yapmaktır. Bu yüzden basit ajanlar pasif olarak nitelendirilir (Chen, Wang, 2011). Bu yetersizliğe çözüm olarak Mitchell (2009), kompleks sistemleri adaptif ve adaptif olmayan olarak ikiye ayırmıştır. *Adaptif olmayan* kompleks sistemlerin aksine, kompleks *adaptif* sistemlerde (KAS) ajanlar arası öğrenme ve uyum sağlama ön plana çıkmaktadır.

Fontana (2010) ve Sturmberg (2016) göre KAS'ın ana karakterleri aşağıdaki gibidir:

- Kompleks adaptif sistemler yapısal açıdan birçok farklı parçadan oluşur. Bu parçalar hiyerarşiler ve global kural belirleyicilerden bağımsız hareket eder, devamlı evrilir ve dengesizlik ekonomisinin bir parçasıdır. İç içe olan kompleks adaptif sistemlerin bir ögesi ortadan kaldırılırsa da sistem, farklı koşullar altında yeni bir dengeye ulaşabilir.
- Her bileşenin ilgi ve etki alanları farklı olduğu için parçaların toplamı bütün olmak zorunda değildir. Bölgesel gerçekler ve etkileşimler daha baskındır.
- Ajanlar, denge durumu dışında hareket ederler.
- Ajanlar değişikliğe ayak uyduran bir karaktere sahiptir ve adaptasyonun sağladığı inovasyonlar diğer ajanların adaptasyonlarını da tetikler.
- Geri döndürülemez özelliklere sahiptirler. Doğadaki genetik kod ve çevresel koşulların bir sonucu olan organizmalar gibi evrimleri hep geleceğe doğru çalışır.
- Sistemin uyarıcılara verdiği tepkiler doğrusal değildir. Sistem her zaman ani ve büyük tepkiler vermeye eğilimlidir.
- Sistem devamlı çevresiyle madde, enerji, insan, sermaye ve bilgi alışverişi içindedir.
- Sistemin kendiliğinden organize olması çoklu etkileşimlere, güçlü bir geribildirim mekanizmasına ve devamlı olan keşfet-faydalanan dengesine bağlıdır.

Kompleks adaptif sistemler sadece ekonomik senaryolarda değil, bir arada hareket eden ve bir yönelimi olan organizmalarda da görülebilir. Örneğin, Sturmberg (2016) insan vücudunu (moleküller, hücreler, organlar, insanın fiziksel bütünlüğü ve çevresi) kompleks adaptif sistem olarak ele almıştır. İnsanın sağlıklı olması, bu 5 seviyedeki sağlık ajanlarının yatay olarak kendi aralarında etkileşimiyle veya seviyelerin birbirinden etkilenmesi ile açıklanmıştır. Yani, sağlıklı organların sağlıklı insana sebep olduğu bir durumda, aynı sağlıklı insanın biyolojik dengeye daha kolay ulaşan hücrelere sahip olduğu anlatılmıştır. Böylece bütün bir sistem ile onu oluşturan ajanların arasındaki geri-besleme mekanizması da örneklendirilmiştir.

KAS'ın öne çıkan bileşenlerinden biri otonom ajandır. Otonom ajanların, daha önceden tanımlanmış kurallarla düşünebildiği, uyum sağlayabildiği ve stratejik

planlar yapabildiği kabul edilmektedir. Bu ajanları oluşturmak için genetik algoritmalar ve genetik programlama öne çıkan metotlardır (Chen, Wang, 2011). Genetik algoritmalar, kromozomlar ile özdeşleştirilen aday çözümler sunmaktadır ve amaç bu aday çözümlerin en iyisini bulmaktır. Aynı zamanda çözümün kalitesini tanımlayan bir sağlık fonksiyonu da bulunur (bir kromozom en iyi çözüme ne kadar yaklaşırsa o kadar sağlıklı sayılır). İlk adım, rassal bir seçimle aday kromozomların çözüm bulmasını sağlamaktır. Bu çözüm aşaması tanımlandıktan sonra aday çözümler mutasyon ya da çaprazlama ile çoğaltılır ve tekrar çözüm aranır. Her çoğalma ya da mutasyon aşamasında aday çözüm nüfusu sabit tutulur ve sağlık fonksiyonları en yüksek olan adaylar hayatta kalır. Böylece biyolojideki doğal seleksiyon adımları tekrarlanarak en optimal çözüme ulaşılmaya çalışılır (Érdi, 2008). Bu metotlar, otonom ajanların kendi kendilerine keşif yapma imkânı sunarak onlara belirli düzeye kadar otonomi sağlar. Otonom ajan örneklerinden biri dinozor hipotezidir<sup>14</sup>. “Dinozor” metaforunun kullanılması, ne kadar güçlü ya da popüler olursa olsun her kuralın, nihayetinde piyasa tarafından dışlanacağı anlamına gelir. Bu tür kompleksite problemleri, basit ajanlı sistemler tarafından açıklanamaz (Chen, Wang, 2011).

Diğer taraftan, KAS ve ÇAS (Çok ajanlı sistemler) ajanları arasında ayırım yapılmaktadır. KAS ajanları daha basit kurallara ve niteliklere sahiptir; yalnızca yerel bilgi ile büyük ölçüde özerktir ve sistemin ortaya çıkan özelliklerini bozmadan benzer ajanlarla kolayca ikame edilebilirler (Carmichael, Hadžikadić, 2019). Bu ikame edilebilirlik sayesinde de sistem dış etkilerden korunmuş olur (Şahin ve diğ., 2017). KAS ajanları, özbenzerlik özelliği taşır ve birçok çalışmada heterojen sayılsalar da homojendirler<sup>15</sup>. Buna karşılık, ÇAS ajanları daha özerk ve akıllı, daha kompleks ve sayıca daha az olma eğilimindedir. Aynı zamanda ajanlar, spesifik, çeşitli ve katı bir hiyerarşiye sahiptir. Örnek olarak, bir arabanın tüm parçaları ve bir arı kovanı karşılaştırıldığında, her arı kolayca bir diğeriyle değiştirilirken, bir arabanın her parçasının işlevi ayrıdır (Carmichael, Hadžikadić, 2019).

---

<sup>14</sup> Dinozor hipotezi piyasadaki koşulların değişkenliğinin hiçbir zaman durağan olmadığını ve verilen bir  $t$  anında piyasa koşullarını doğru tahmin eden bir ajanın aynı tahmin performansını başka bir zaman diliminde gösteremeyeceğini ifade eder. Evrilemeyen bir ajanın piyasanın dışına itileceğini gösterir.

<sup>15</sup> Örneğin Epstein, ajanların spesifikasyonlarının (attribute-values) değişkenlik gösterdiğini ve heterojen olduklarını ileri sürmüştür. Ama aslında hepsi birer ajandır.

Bu iki ajan bazlı model sınıfı ekonomistler tarafından aynı anda kullanılmakta ve avantajları ve dezavantajları da literatürde yoğun bir şekilde tartışılmaktadır. Otonom ajanları basit ajanlardan ayıran temel özelliklerden biri öğrenme ve düşünce yeteneği geliştirmeleridir. Her ne kadar yetkinlikler insanlara özgü olsa da bilgisayarların ve algoritmaların ekonomiyi deneysel bir tabana oturtmak için, bu karakterleri yazılımın anlayacağı bir dile çevirmeleri gerekmektedir. İnsan zekâsı ve insanın seçim yeteneği birer parametre olarak tanımlandığında üç farklı bilişsel yetkinlik öne çıkmaktadır:

**Tablo 4: Otonom Ajanlar için Zekâ Parametreleri**

Mantıklandırma Derinliği (Repth of Reasoning)	Yargıya Varma (Judgements)	İş Birliği (Cooperation)
<p>- Birden çok seçeneğin olduğu durumlarda, kazanan seçimin ortaya çıkması için uygulanan yineleme yaklaşımıdır.</p> <p>- İnanç-bazlı öğrenme, beklenti bazlı öğrenme, evrimsel öğrenme ve ağ yapısında öğrenme insana özgü öğrenme AKİ modelleri tarafından kullanılan benzetimlerdir.</p> <p>- Keynes'in güzellik yarışması oyununda<sup>16</sup> muhakeme derinliği ve zekâ ölçütü arasında</p>	<p>- Tüm karar verme mekanizmaları yinelenen yapıda olmadığından iyi bir yargı yeteneğinin, ajanların bilişsel kapasiteleriyle ilgili olup olmayacağı üzerinde durulur.</p> <p>- Kagel ve Levin'in bir araştırmasında (1986) ajanların zekâ düzeylerinin SAT (Scholastic Aptitude Test) skorlarıyla ölçüldüğü bir modelde yüksek skora sahip katılımcıların kazananın laneti tuzağına</p>	<p>- Ajanlar arasındaki etkileşim, asimetric bilgi tuzağının üstesinden gelmede önem kazanır. Kolektif zekanın bireysel yeteneklerin önüne geçtiği durumlarda, bilgi paylaşımındaki iş birliği fark yaratan faktörler arasındadır.</p> <p>- İkiz deneklerin kullanıldığı bir deneyde yüksek IQ'nun iş birliğini arttırdığı ve daha başarılı sonuçlara olanak verdiği kanıtlanmıştır. Aynı zamanda zeki insanların</p>

<sup>16</sup> Bu oyunda seçici için iki olasılık vardır: Birincisi "en güzel" bulduğu adaya oy vererek ve kendi ödül kazanma ihtimalini şansa bırakmak; ikincisi ise daha akılcı davranarak diğer seçicilerin tercihlerini tahmin ederek buna yönelik bir tercih yapmak (toplumun genel güzellik algısını dikkate almak) ve kendi ödül kazanma şansını maksimize etmek. İkinci yolu seçen seçici, tüm seçicilerin ikinci yolu seçmiş olabilecekleri tahminiyle hareket edebilir. Yani 3. aşamada seçici, ortalama güzellik görüşünün ne olduğu üzerine değil; ortalamanın, ortalama güzellik görüşü beklentisi üzerine seçim yapar.



pozitif bir ilişki tanımlanmıştır.	daha az düştüğü gösterilmiştir.	daha sabırlı ve anlayışlı olduğu gösterilmiştir.
------------------------------------	---------------------------------	--

Chen, Shu-Heng, Shu. G. Wang. 2011. Emergent Complexity in Agent-based Computational Economics. *Journal of Economic Surveys*. c. 25. s. 3.

AKİ modelleri de basit karar mekanizmalarından, kompleks öğrenme algoritmalarına kadar insana özgü mantıklandırma adımını taklit edebilmektedir. Birçok AKİ deneyinde ajanlara diğer ajanların görünür olmayan davranışları rassallaştırılarak, modellerin beklenmeyen etkilere nasıl tepki verdiği simüle edilebilmektedir.

### 3.4. Ajan Bazlı Modelleme Uygulamaları

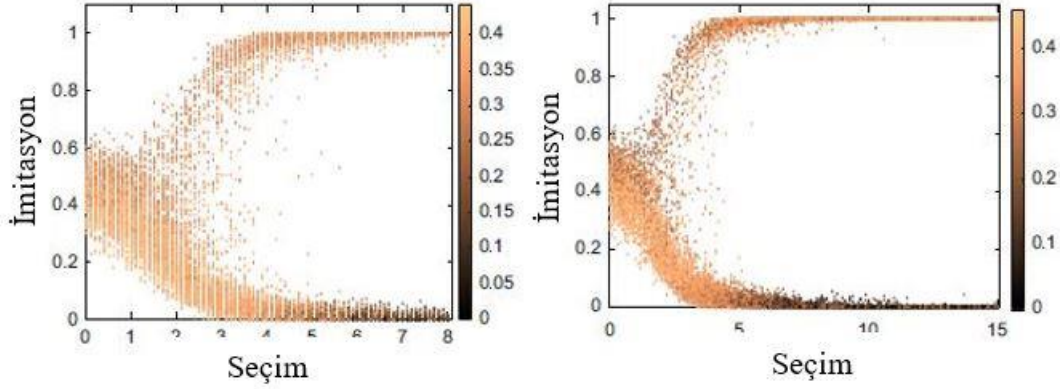
AKİ'nin kullanım alanları son yıllarda finansal yatırımlar, piyasa süreçleri ve makroekonomiye kaymıştır. Özellikle yatırım firmalarının da algoritma bazlı, öğrenen sistemleri tercih ettiği ortamlarda AKİ, kolektif öğrenme ve sosyal ağların önemi üzerinde durmaktadır (Chen ve diğ., 2018).

Chen ve diğ., (2018) Ekonomi ve Finans'ta Karmaşık Sistem Modelleme ve Simülasyonu adlı çalışmalarında Uluslararası Ekonomi ve Finans'ta Kompütasyon konferansından (CEF) birçok AKİ örneği paylaşmış ve ABM'nin takas piyasalarındaki bulgularından bahsetmişlerdir. Bunlardan bazıları ise aşağıdaki gibidir:

#### 1. Uygulama Örneği: Sosyal veya Bireysel Öğrenme

Tüketici tercihlerinin sonucu nasıl etkilediğinin araştırıldığı bir çalışmada, keşfet-faydalanan davranış şekillerinin maksimum faydaya etkileri öngörülme çalışılmıştır. ABM'ye dayanan bu çalışmada, ajanların kendi arasında değişiklik yapabileceği farklı öğrenme şekilleri sunulmuştur. Sosyal bir varlık olan insanın toplum içinde diğer ajanlardan öğrenme şekli, imitasyon ya da sosyal öğrenme olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, daha çok bireysel tecrübeler dayalı bir öğrenme biçimi edinen bireyler de kendini sosyal etkileşimden soyutladıkları için inovasyoncular olarak tanımlanmışlardır. Aşağıdaki Şekilde (10) imitasyon frekansının artması, açık renk ile sembolize edilen getirilerin de artmasının, aksine imitasyon frekansının azalması getirilerin de azaldığının (koyu renk) bir göstergesidir. Yani sosyal öğrenen ajanların (imitasyon) bireysel öğrenen ajanlardan (inovasyon) daha fazla marjinal

fayda sağladığı gösterilmiştir. Bir diğer çıkarım ise, belirli bir seçim kararlılığı seviyesinden sonra (4 seviyesi) ajanların öğrenme metotlarına bağlı kaldığı görülmektedir.



**Şekil 10: Seçim Kararlılığı, Getiri ve İmitasyon Frekansı Arasındaki İlişki**

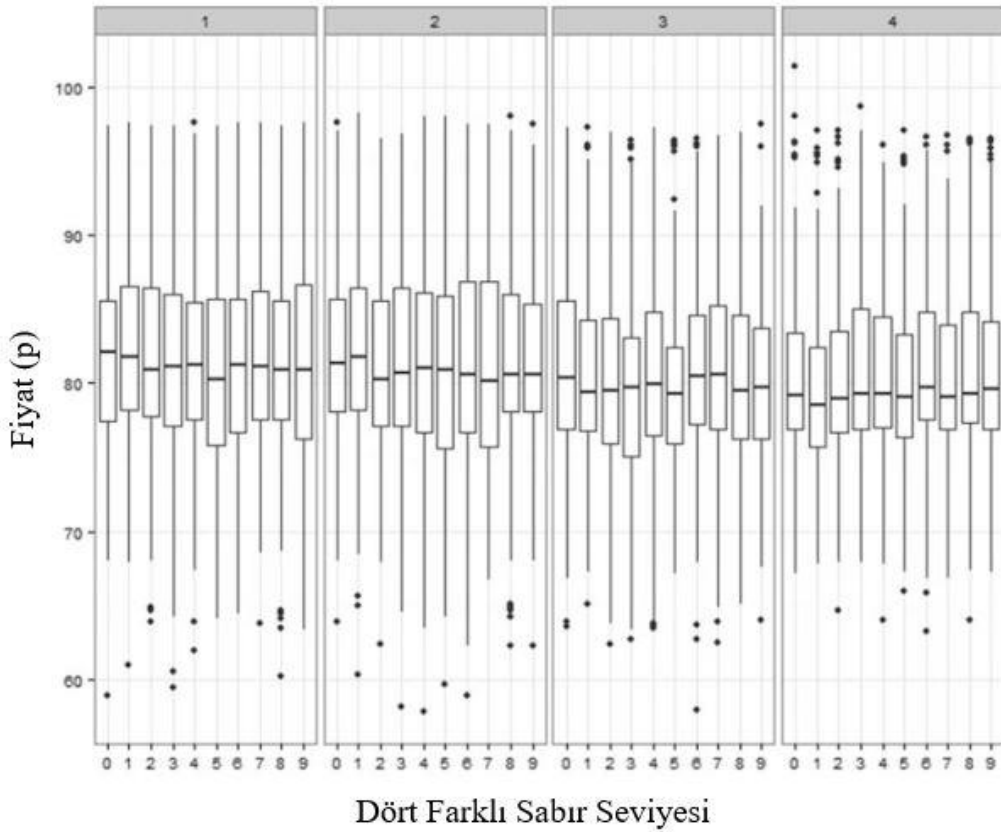
Chen, Shu-Heng, Bin-Tzong Chie, Ying-Fang Kao, Wolfgang Magerl, Ragupathy Venkatachalam. 2018. Heterogeneity, Price Discovery and Inequality in an Agent-Based Scarf Economy. **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 134.

Farklı özellikteki bireylerin gerçekleştirdiği takas aktivitelerindeki başarı faktörü, piyasadaki denge fiyata ulaşma hızı ile karakterize edilir. Bu başarı faktöründe sosyal öğrenmeyi kullanan (imitasyon) ajanlar, istatistiki olarak pozitif yönde ayrılmaktadır. Ancak kitleler büyüdükçe üstel olarak artan öğrenme etkilerinin sürü psikolojisine evrilmesi ile piyasadaki volatilitenin arttığı da ortaya konmuştur (Zhang, Li, 2018). Ekonomik başarıya ulaşmak isteyen ajanların öğrenme metodunu değiştirme eğilimi olduğu gözlenmiştir. Öğrenme metodunu değiştirme isteği ile ekonomik başarı pozitif korelasyon göstermektedir. Bir başka deyişle, bireysel öğrenme ya da sosyal öğrenme arasında kesin bir tercih belirlemeyen ajanlar, ekonomik takaslarında stratejilerini, duruma göre değiştirdiğinde daha da fazla başarı elde etmişlerdir. Psikolojik tabanlı olan bu tercihler ile çevreyle etkileşimi sayısalılaştırabilen bu örnekler ABM'nin kompleks ekonomik sorunlara cevap bulabildiğinin başarılı bir kanıtıdır.

## 2. Uygulama Örneği: Davranışsal Modelleme

Rege ve diğ., (2018) tarafından ele alınan çalışmada Lüksemburg tarım ürünleri piyasasında alıcı ve satıcıların davranışsal farklılıklarına göre fiyat ve miktar belirleme mekanizmalarının nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu çalışma AKİ'leri

davranışsal boyutuyla ele almasıyla ve nisbi derinliği az olan piyasaları incelemesiyle öne çıkmıştır. Piyasa yapıcılarının olmadığı birden çok alıcı ve satıcı olan bir piyasa örneğinde Rege ve diğ., (2018), takas devrelerinde (rounds) verdiği tekliflerle talepleri karşılanmayan (istenilen fiyat veya miktar) alıcı ve satıcıların davranışlarını AKİ ile simüle etmişlerdir.

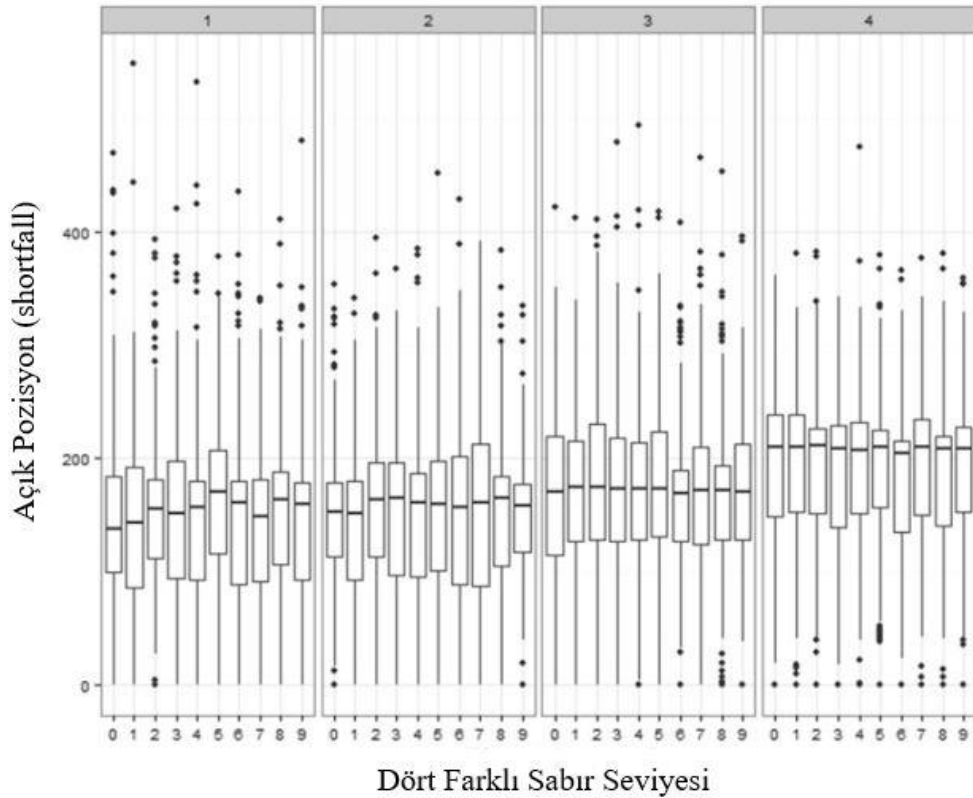


**Şekil 11: Dört Farklı Satış Stratejisine Dair Farklı Alıcıların Fiyat Kutu Diyagramı**

Rege, Sameer, Tomás Navarrete Gutiérrez, Antonino Marvuglia, Enrico Benetto, Didier. 2018. Modelling Price Discovery in an Agent Based Model for Agriculture in Luxembourg. **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 106.

Şekil 11, 10 tane alıcı ve 4 sabır seviyesindeki her senaryo için alıcı ile satıcının her takas devresinde uzlaştığı fiyatları gösteren kutu diyagramıdır. Her senaryo için;  $\mu_p = [81.61, 81.46, 80.30, 80.38]$ , standart sapması ise  $\sigma_p = [6.85, 6.84, 6.50, 6.18]$ . 1. grup fiyat açısından sabırsız, 2. grup adet açısından sabırsız, 3. grup adet açısından orta sabırlı, 4. grup ise fiyat açısından sabırlı olanlardır. Yapılan çalışmada, teklif verdiği fiyata alıcı veya satıcı bulamayan ajanlar fiyatı güçlü ölçüde değiştirdiklerinde “sabırsız” kategorisinde değerlendirilmiş; bu duruma verdiği fiyat

değiştirme tepkisini daha yumuşatılmış bir trende yayan ajanlar ise “sabırlı” olarak etiketlenmiştir. Çalışmanın bir sonucu, daha sabırlı ajanların rol aldığı takas piyasasının belirlediği fiyat dağılımının daha az volatilité ( $\sigma_p = 6.18$ ) gösterdiğidir. Şekil 12’de ise 10 tane alıcı ve 4 sabır seviyesindeki her senaryo için alıcı ile satıcının her takas devresinde kalan adet açığını (shortfall) gösteren kutu diyagramıdır. Buradaki her senaryo için;  $\mu_s = [153.66, 152.90, 169.88, 189.45]$ , standart sapması  $\sigma_s = [77.62, 71.61, 77.33, 73.79]$ . Çalışmanın bir diğér sonucu ise daha sabırlı olan ajanların takas sonucunda açık pozisyonlarının daha fazla ( $\mu_s = 189.45$ ) olduğudur.



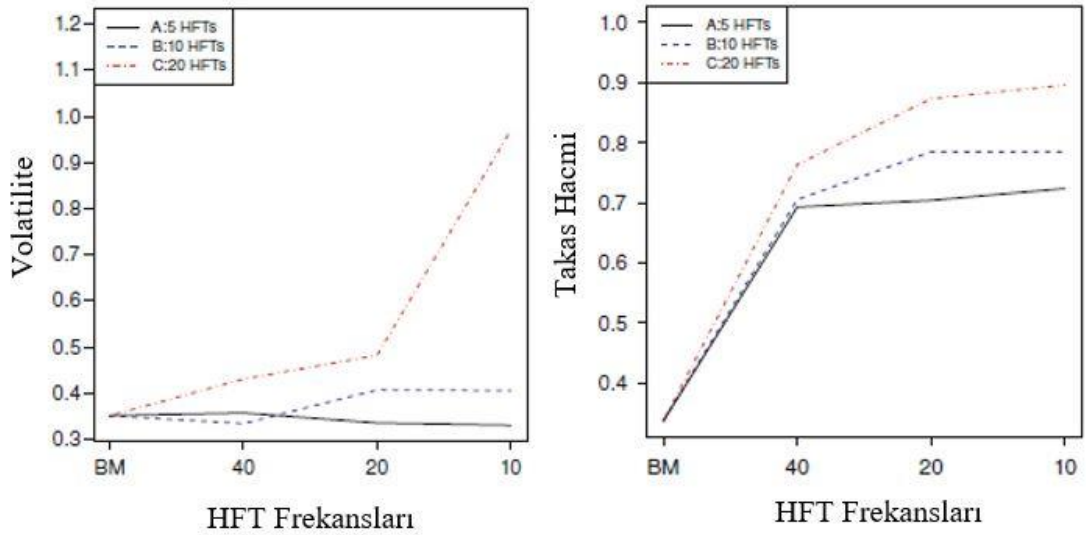
**Şekil 12: Dört Farklı Satış Stratejisine Dair Farklı Alıcıların Açık Pozisyon Kutu Diyagramı**

Rege, Sameer, Tomás Navarrete Gutiérrez, Antonino Marvuglia, Enrico Benetto, Didier. 2018. Modelling Price Discovery in an Agent Based Model for Agriculture in Luxembourg. **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 107.

### 3. Uygulama Örneği: Yüksek Frekanslı Takas İşlemleri (HFT)

Günümüzde yüksek frekanslı takas işlemleri (HFT) gitgide makineler tarafından algoritmik takas (AT) temeline dayandırılarak yapılmaktadır. The Economist’te

(2019) yer alan bir makaleye göre ABD’de yer alan yatırım fonlarının takas aktivitelerinin 60%’i makineler tarafından yürütülmektedir. Aynı zamanda bu makinelerin yürüttüğü takas işlemleri 2019’da ilk kez insan yatırımcıların yürüttüğü büyüklüğün önüne geçmiştir. Finansal takas piyasaları, barındırdığı yüksek çeşitlilik ve sebep-sonuç ilişkileri açısından ABM için yüksek nitelikli bir inceleme kaynağı barındırmaktadır. Bu incelemelerden biri de 2018 yılında Yang ve Yeh (2018) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada tipik bir HFT aktivitesi yürüten AT tabanlı bir takas bilgisayarı ile düşük frekanslı takas gerçekleştiren insanlar tarafından karakterize edilen yatırımcı profilinin piyasa parametrelerine yansımaları ölçülmüştür. Şekil 13’te, HFT’lerin işlem süreleri sıklaştıkça (belli bir seviyeyi aştıklarında) piyasada volatilitenin arttığı ve takas hacminin genişlediği gösterilmektedir. Ayrıca sayısı artan HFT’ler (C) volatilitiyi daha çok beslemekte ve likiditeyi (trading volume) de arttırmaktadır. Yani kritik sonuçlar içeren bu çalışmada HFT’lerin piyasadaki fiyat keşfi sürecini hızlandırdıkları, volatilitiyi arttırdıkları; ama aynı zamanda piyasadaki likiditeye de büyük oranda pozitif etkilerinin olduğu tespit edilmiştir. Bu araştırmanın diğer önemli ve ilginç bir boyutu ise, HFT ve algoritma kullanımının makine-makine veya insan-insan arasında gittikçe yoğunlaşan ve farklı takas kriterleri benimseyen ajanları birbirinden uzaklaştıran bir yapıyı hızlandırdıklarıdır (Yang, Yeh, 2018).



**Şekil 13: Volatilite ve Takas Hacmi**

Yeh, Chia-Hsuan, Chun-Yi Yang. 2018. Does High Frequency Trading Matter? **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 86-86.

#### 4. SONUÇ

Zaman içinde ekonomide farklı yaklaşımların ortaya çıktığı ama bu yaklaşımların popülerliğini hızla yitirdikleri gözlenmektedir. Bu açıdan kompleksite yaklaşımı, ilk olarak 1980’lerde akademik makalelerde yer almaya başlamış ve 2000’lerde yaygın olarak kabul görmüştür. Ortaya çıkan bu yeni bilim “kompleksite bilimi” anlayışıyla, ekonomide kompleks bir dönemin başladığı söylenebilir.

Evrimsel süreç içinde, süre gelen klasik fizik ve biyoloji yaklaşımlarından uzaklaşmış, modern fizik ve evrimsel biyoloji ve bilgisayar bilimindeki gelişmelerle kompleksite bilimi, iktisatta yeni bir akım doğurmuştur. Bu süreçte kaos ve ekonofizik de yeni iktisadın yaygınlaşmasında etkili olmuştur.

Bilgisayar bilimindeki gelişmeler, yeni fizik anlayışının oluşmasına büyük katkı sağlasa da yapay zekânın limitlerinin olduğu unutulmamalıdır. Yapay zekâ ile otomasyon iş yükünün büyük bir kısmı insanlar yerine taşınabilmektedir. Fakat bilgisayarların karar verme yetenekleri, kullandıkları veri tabanındaki örneklerin eksikliğiyle ortaya çıkan her yeni sonucu yorumlamak için yetersiz kalabilir. Bu durumda insanların yine müdahale etmesi gerekecektir. Aksi takdirde algoritmaların aldığı sonuçlar gerçeklikten gitgide uzaklaşır. Ayrıca dikkat edilmesi gereken bir unsur da otomasyona olan bağımlılığın insanları karar vermede tembelliğe itmesidir. Tesfatsion’a (2020) göre başka bir eleştiri de AKİ’lerde ajanların insanlar kadar rasyonel davranamayacağı ve modellerin stokastik etkilerin tamamen dışarıda tuttuğu yönündedir.

Ekonomi doğası gereği sürekli değişmek ve durmaksızın gelişmek zorundadır. Eski iktisat zamanla yerini “yeni (makro) iktisada” bırakmaya başlamıştır:

- Azalan getiriler yerine azalan ve artan getiriler birlikte kullanılmaktadır.
- İnsana ait karakteristik özellikleri yeni iktisat yaklaşımıyla modellemek mümkündür.

- Tam rasyonel temsili ajanlar yerine sınırlı rasyonel heterojen ajanlar modellerde kullanılır.
- Ajanlar ilişkisiz değil, aksine birbirine bağımlıdır. Ajanlar arası karşılıklı doğrusal olmayan etkileşimler, KAS yoluyla modellenilebilir.
- Değişen çevreyle ajanlar öğrenir ve tutumları değişebilir.
- İktisadi değişkenleri ele alırken mikrodan yola çıkarak makroya ulaşmak yerine bütünün toplamdan farklı olduğu bir yapı düşünülmelidir.
- İstikrar ve denge kavramlarından uzaklaşmış, piyasa istikrarsızlığı ve denge dışı dinamikler odak haline gelmiştir.
- Toplumlar yerine orta düzey (meso) değişkenler, özellikle kurumlar öne çıkmaktadır.
- Maksimizasyon prensibi yerine yetinmecî gibi farklı prensipler temel alınır.
- Deterministik ve durağanlık yerine stokastik ve kendiliğinden organizasyon esastır.
- Deneysel iktisat, ekolojik ekonomi, ekonofizik, davranışsal iktisat, bilgisayar benzetimleri gibi yeni alanlar ortaya çıkmıştır.
- Tümdengelimci yaklaşım yerine tümevarım yöntemi kullanılmaktadır.
- Modellerde kullanılan aşağıdan yukarıya perspektif her şeyin ana prensiplere bağlı kalınmadan da türetilbildiğini gösterir.
- Belirsizliğe daha çok önem verilir.
- Kaos kavramından hareketle yeni iktisat öngörülemeyen ve düzensiz davranışlar sergiler.
- İnsanların yaşam döngüsü ve bireysel yaşam üzerine odaklanılmıştır.
- İndirgemecilik yaklaşımından uzaklaşmış, insan davranışlarının sosyal ve psikolojik yönleri daha iyi anlaşılmıştır.
- Tersinemezlik ve başlangıç koşullarına bağlılık yani patika bağımlılığı söz konusudur.
- Evrimci süreç yeniliğe açıklık gerektirir bu yüzden konveks değildir.

Tüm bu gelişmelerin sonucu olarak kompleksite iktisadi bir moda akımından ziyade, ekonomi paradigmasında önemli bir değişimi ifade etmektedir. Bir sonraki ana iktisat akımının ne olacağı değişimin boyutlarına bağlı olsa da kompleksitenin artık ekonomi biliminin değişmez bir parçası olduğu yadsınamaz bir gerçektir.

## KAYNAKÇA

- Acet, Hakan, Zeynep Karaçor, Özlem Alkan. 2018. Makro Ekonomik Modeller: Dinamik Stokastik Genel Denge ve Ajan Temelli Modelleme Çerçevesinde 2008 Finansal Krizinin Değerlendirilmesi. **International Conference on Eurasian Economics**. ed. Selahattin Sarı, Alp H. Gencer, Obidjon Khamidov. Taşkent: Eurasian Economists Association and Tashkent State University of Economics: 242-248.
- Akbulut, Dilek. 2008. Evrimsel Tasarım Yöntemi ve Yaratıcılığın Süreç İçerisindeki Yeri. **Sanat ve Tasarım Dergisi**. c. 1. s. 2: 21-33.
- Al-Suwailem, Sami. 2011. Behavioral Complexity. **Journal of Economic Surveys**. c. 25. s. 3: 481-506.
- Antonelli, Cristiano. 2009. The Economics of Innovation: From The Classical Legacies to The Economics of Complexity. **Economics of Innovation and New Technology**. c. 18. s. 7: 611-646.
- Arthur, W. Brian. [03.02.2020]. Science in a Complex World: A Small Group of Santa Fe Researchers Changed Economic Thinking. [https://www.santafenewmexican.com/news/local\\_news/science-in-a-complex-world-a-small-group-of-santa-fe-researchers-changed-economic-thinking/article\\_cc459747-b2fa-5ba9-83aa-8dbf497abd89.html](https://www.santafenewmexican.com/news/local_news/science-in-a-complex-world-a-small-group-of-santa-fe-researchers-changed-economic-thinking/article_cc459747-b2fa-5ba9-83aa-8dbf497abd89.html).
- Arthur, W. Brian. 1993. Why Do Things Become More Complex? **Scientific American**. c. 268. s. 5.
- Carmichael, Ted, Mirsad Hadžikadić. 2019. The Fundamentals of Complex Adaptive Systems. **Complex Adaptive Systems: Views from the Physical, Natural, and Social Sciences**. ed. Ted Carmichael, Andrew J. Collins, Mirsad Hadžikadić. Switzerland: Springer: 1-16.
- Chen, Shu-Heng, Shu. G. Wang. 2011. Emergent Complexity in Agent-based Computational Economics. **Journal of Economic Surveys**. c. 25. s. 3: 527-546.
- Chen, Shu-Heng, Bin-Tzong Chie, Ying-Fang Kao, Wolfgang Magerl, Ragupathy Venkatachalam. 2018. Heterogeneity, Price Discovery and Inequality in an Agent-Based Scarf Economy. **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 113-140.
- Chen, Shu-Heng, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du, Tina Yu. 2018. On Complex Economic Dynamics: Agent-Based Computational Modeling and Beyond. **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 1-14.



- Corning, Peter A. 1998. Complexity Is Just a Word!. **Technological Forecasting and Social Change**. c. 59: 197-200 (Aktaran: Dell'Anno, Roberto, Friedrich Schneider. 2008. A Complex Approach to Estimate Shadow Economy: The Structural Equation Modelling).
- Dell'Anno, Roberto, Friedrich Schneider. 2008. A Complex Approach to Estimate Shadow Economy: The Structural Equation Modelling. **Coping with the Complexity of Economics**. ed. Faggini, Marisa, Thomas Lux. Milano: Springer: 110-114.
- Epstein, Joshua M., Robert L. Axtell. 1996. **Growing artificial societies: Social science from the bottom up**. Washington D.C.: The Brookings Institution Press (Aktaran: Gallegati, Mauro, Matteo G. Richiardi. 2009. Agent Based Models in Economics and Complexity. **Complex Systems in Finance and Econometrics**. ed. Robert A. Meyers. New York: Springer).
- Érdi, Péter. 2008. **Complexity Explained With 129 Figures**. Berlin: Springer: 1-20.
- Eren, Ercan. 2011. Yeni İktisatta Ortak Noktalar. **İktisatta Yeni Yaklaşımlar**. ed. Ercan Eren, Metin Sarfati. İstanbul: İletişim Yayınları.
- \_\_\_\_\_. 2013. Kompleksite İktisadı ve Ajan Temelli Modelleme; Metodolojik Bir Yaklaşım. **Türkiye Ekonomi Kurulu: Tartışma Metni**. s. 3.
- \_\_\_\_\_. 2015. (Makro) İktisatta Gelişmeler: Yeni Bir (Makro) İktisada Doğru Mu? **Yıldız Social Sciences Review**. c. 1. s. 1: 1-35.
- \_\_\_\_\_. 2018. İktisadi Modellemede Gelişmeler: Evrim Modellenebilir mi? **Efil Journal**. c.1. s.1: 58-87.
- Eser, Rüya. 2016. **Kompleksite İktisadı, Kendi Kendine Organize Olan Kritiklik ve Firma Dinamikleri**. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Fontana, Magda. 2010. Can Neoclassical Economics Handle Complexity. **Journal of Economic Behavior and Organization**. c. 76. s. 3: 584–596.
- Foxon, Timothy J., Jonathan Köhler, Jonathan Michie, Christine Oughton. 2013. Towards a new complexity economics for sustainability. **Cambridge Journal of Economics**. c. 37. s. 1: 187-208.
- Gallegati, Mauro, Matteo G. Richiardi. 2009. Agent Based Models in Economics and Complexity. **Complex Systems in Finance and Econometrics**. ed. Robert A. Meyers. New York: Springer: 30-54.
- Georges, Christopher. 2018. Product Innovation and Macroeconomic Dynamics. **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 205-220.
- Guastello, Stephen J. 2016. **Cognitive Workload and Fatigue in Financial Decision Making**, Japan: Springer: 1-36.
- Imgur. [15.03.2020]. <https://i.stack.imgur.com/f96kw.jpg>.
- Kahneman, Daniel. 2003. Maps of bounded rationality: psychology for behavioral economics. **American Economic Review**. c. 93. s.5 (Aktaran: Chen, Shu-Heng, Shu. G. Wang. 2011. Emergent Complexity in Agent-based Computational Economics. *Journal of Economic Surveys*).

- Kahneman, Daniel. 2011. **Thinking, Fast and Slow**. New York: Farrar, Straus and Giroux.
- Keskin, Uğur. 2019. Bilimsel Çalışma Süreçlerine İlişkin Metaforlar Üzerine Bir İnceleme. **Anadolu Akademi Sosyal Bilimler Dergisi**. c. 1. s.2: 91-112.
- Lloyd, Seth. 2001. Measures of Complexity: A Nonexhaustive List. **IEEE Control Systems Magazine**. c. 21. s. 4: 7-8 (Aktaran: Gallegati, Mauro, Matteo G. Richiardi. 2009. Agent Based Models in Economics and Complexity).
- Maruyama, Koji, Franco Nori, Vlatko Vedral. 2009. The physics of Maxwell's demon and information. **Reviews of Modern Physics**. c. 81. s.1: 1-23.
- Mercan, Mehmet. 2015. Türkiye'de Enerji Yoğun Sektörler Üzerine Uygulanan Karbon Vergilerinin Refah Üzerindeki Etkileri: Genel Denge Analizi. **Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi**. c. 1. s. 1: 49-60.
- Mitchell, Melanie. 2009. **Complexity: A Guided Tour**. New York: Oxford University Press: 3-70.
- Nason, Rick. 2017. **It's Not Complicated: The Art and Science of Complexity in Business**. Toronto: University of Toronto Press: 90-117.
- Online Etymology Dictionary. [18.03.2020]. Compute. <https://www.etymonline.com/word/compute>.
- Poli, Roberto. 2013. A Note on the Difference Between Complicated and Complex Social Systems. *Cadmus Journal*. c. 2. s.1: 142-147.
- Potts, Jason. 2000. **The New Evolutionary Microeconomics: Complexity, Competence, and Adaptive Behavior**. Edward Elgar Publishing (Aktaran, Elliott, Catherine S. 2004. *The Journal of Socio-Economics*. Book reviews. c. 33. s. 2).
- Puu, Tõnu. 2010. On The Economics of Increasing Complexity With Some Special Focus on Culture. **Journal of Economic Behavior and Organization**. c. 75. s. 1: 59-68.
- Rege, Sameer, Tomás Navarrete Gutiérrez, Antonino Marvuglia, Enrico Benetto, Didier. 2018. Modelling Price Discovery in an Agent Based Model for Agriculture in Luxembourg. **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 91-112.
- Rise of the Financial Machines**. 2019. *The Economist*.
- Rosser J. Barkley. 2010. Constructivist Logic And Emergent Evolution In Economic Complexity. **Computable, Constructive & Behavioural Economic Dynamics: Essays in Honour of Kumaraswamy (Vela) Velupillia**. ed. Stefano Zambelli. New York: Routledge: 184-197.
- Rutledge, John. 2015. Economics as energy framework: Complexity, turbulence, financial crises, and protectionism. **Review of Financial Economics**. c. 25.
- Bricault, Sarah. [10.03.2020]. Recursive drawing. <http://bricault.mit.edu/recursive-drawing>.
- Scarborough, Vernon L., William R. Burnside. 2014. Complexity and Sustainability:

- Perspectives from The Ancient Maya and The Modern Balinese. *Society for American Archaeology, American Antiquity*. c. 75. s. 2: 327-363.
- Schelling, Thomas C. 1978. **Micromotives and Macrobehavior**. New York: W.W. Norton and Company (Aktaran: Chen, Shu-Heng, Shu. G. Wang. 2011. Emergent Complexity in Agent-based Computational Economics. *Journal of Economic Surveys*).
- Schwardt, Henning. 2017. **The Path to a Modern Economics: Dealing with the Complexity of Economic Systems**. Switzerland: Springer.
- Simon, Herbert A. 1997. **Models of Bounded Rationality, Volume 3: Empirically Grounded Economic Reason**. Cambridge: MIT Press (Aktaran: Aktaran: Chen, Shu-Heng, Shu. G. Wang. 2011. Emergent Complexity in Agent-based Computational Economics. *Journal of Economic Surveys*).
- Smith, Vernon. 2006. **Papers in Experimental Economics**. Cambridge: Cambridge University Press. (Aktaran: Chen, Shu-Heng, Shu. G. Wang. 2011. Emergent Complexity in Agent-based Computational Economics. *Journal of Economic Surveys*).
- Sturmberg, Joachim P. 2016. "Returning to Holism": An Imperative for the Twenty-First Century. **The Value of Systems and Complexity Sciences for Healthcare**. ed. Joachim P. Sturmberg. Switzerland: Springer: 3-19.
- Şahin Serçin, Seçkin Sunal, Kaan Öğüt, Yasemin Asu Çırpıcı, Hale Kırer, Rüya Eser. 2017. **Kompleksite ve İktisat**. ed. Eren Ercan, Serçin Şahin. İstanbul: Elif Yaymevi: 1-43.
- Talbot, John, Dominic Welsh. 2006. **Complexity and Cryptography: An Introduction**. New York: Cambridge University Press: 10-15.
- Tesfatsion, Leigh. 2020. Agent-based Computational Economics (ACE): Growing Economies from the Bottom Up. <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm>.
- The Wall Street Journal. [1.03.2020]. Once-Popular NYSE Has No Plan to Reopen to the Public. <https://www.wsj.com/europe>.
- Van den Berg, Hendrik. 2015. Mainstream Economics' Flight from Complexity. **Forum for Social Economics**. c. 47. s. 1: 1-24.
- Velupillai, K. Vela, Ying-Fang Kao. 2014. Computable and Computational Complexity Theoretic Bases for Herbert Simon's Cognitive Behavioral Economics. **Cognitive Systems Research**. c. 29–30: 40–52.
- What went wrong with economics and how the discipline should change to avoid the mistakes of the past**. 2009. *The Economist*.
- Wikipedia. [20.03.2020]. Systemtheory. <https://en.wikipedia.org/wiki/Systemtheory>.
- Yeh, Chia-Hsuan, Chun-Yi Yang. 2018. Does High Frequency Trading Matter? **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 71-90.
- Zhang, Yangrui, Honggang Li. 2018. Price Volatility on Investor. **Complex Systems Modeling and Simulation in Economics and Finance**. ed. Shu-Heng Chen, Ying-Fang Kao, Ragupathy Venkatachalam, Ye-Rong Du. Switzerland: Springer: 181-192.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel Bilgiler:**

Ad Soyad: Dilhan Demir

Doğum Yeri/Tarihi: İstanbul/18.08.1993

E-posta: dilhandemir@gmail.com

Diller: Türkçe, İngilizce

### **Eğitim:**

**Yıldız Teknik Üniversitesi İktisat** (09.2016-06.2020) (GPA: 3,00)

Bilimsel Hazırlık (09.2016 – 06.2017)

*Tez Çalışması: Kompleksite İktisadi*

**İstanbul Ticaret Üniversitesi Bankacılık ve Finans %100 Burslu** (09.2011-06.2016)  
(GPA: 3,57)

İngilizce Hazırlık (09.2011-06.2012)

**İstanbul Kadıköy Lisesi Türkçe/Matematik** (09.2007-06.2011) (GPA: 77,90/100)

### **İş Deneyimi:**

**Century 21** Gayrimenkul Danışmanlığı (01.2020- )

**Trio Grup, Bu Ajans, Sofra Grup** Etkinlik Hosting (03.2013-02.2015)

**Turyap** Gayrimenkul Danışman Asistanlığı (01.2014-07.2014)

**Unitas Grup** Telemarketing (06.2012-08.2012)

### **Akademik Başarılar ve Sertifikalar:**

**İTİCÜ** Bankacılık ve Finans, 2016 Dönem, Bölüm Üçüncülüğü

**İstanbul Kadıköy Lisesi**, 2011 Dönem, Okul Dördüncülüğü

**Fenerbahçe** Yıldız Basketbol Takımı Lisanslı Oyuncu

**ATA Yatırım**, Yatırım Araçları ve Forex Sertifikası

**TEB**, Finansal Okuryazarlık Eğitimi

**İTİCÜ** Bankacılık ve Finans Kulüp Üyeliği