



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü
İktisat Anabilim Dalı

BİR UYARLAMALI KARMAŞIK SİSTEM OLARAK EKONOMİ

Baki ÜNAL

Yüksek Lisans Tezi

Ankara 2010

BİR UYARLAMALI KARMAŞIK SİSTEM OLARAK EKONOMİ

Baki ÜNAL

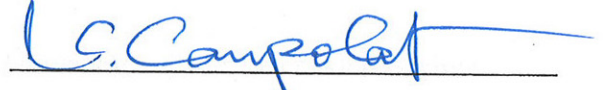
Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü
İktisat Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

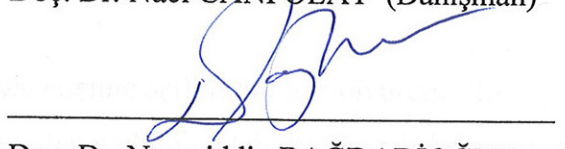
Ankara 2010

KABUL VE ONAY

Baki Ünal tarafından hazırlanan “Bir Uyarlamalı Karmaşık Sistem Olarak Ekonomi” başlıklı bu çalışma 25.01.2010 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



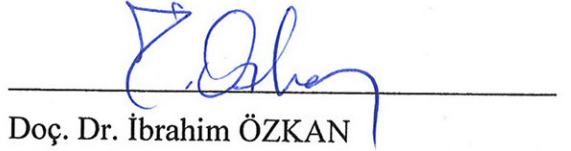
Doç. Dr. Naci CANPOLAT (Danışman)



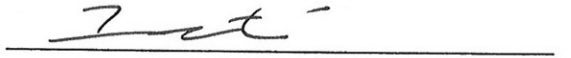
Doç. Dr. Necmiddin BAĞDADIOĞLU



Doç. Dr. Hüseyin ÖZEL



Doç. Dr. İbrahim ÖZKAN



Doç. Dr. Hatice Çakmak Karaçay

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İrfan ÇAKIN

Enstitü Müdürü

BİLDİRİM

Hazırladığım tezin/raporun tamamen kendi çalışmam olduğunu ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi taahhüt eder, tezimin/raporumun kağıt ve elektronik kopyalarının Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü arşivlerinde aşağıda belirttiğim koşullarda saklanmasına izin verdiğimi onaylarım:

☒ Tezimin/Raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir.

☐ Tezim/Raporum sadece Hacettepe Üniversitesi yerleşkelerinden erişime açılabilir.

☐ Tezimin/Raporumun yıl süreyle erişime açılmasını istemiyorum. Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir.

25.01.2010

Baki Ünal



TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasındaki yardımlarından ve desteklerinden ötürü Sayın Naci Canpolat’a ve abim Daim Ünal’a teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

ÜNAL, Baki. “*Bir Uyarlamalı Karmaşık Sistem Olarak Ekonomi*” Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2010

Bu yazı karmaşıklık yaklaşımının ekonomiye olan etkisini değerlendirmektedir. Karmaşıklık yaklaşımı her alanda olduğu gibi ekonomide de yeni anlayışlara yol açmıştır. Karmaşıklık yaklaşımı genel olarak klasik analitik çözümlemeye yanıt vermeyen sistem problemlerine başarıyla uygulanabilmektedir. Karmaşıklığın oldukça eskiye dayanan kökenleri vardır ama karmaşık sistemlerin bilimsel olarak çalışılması yenidir. Karmaşıklık teorisinden önce bu alanlar doğaüstü veya metafiziksel olarak görülmüştür. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler karmaşıklık çalışmalarını mümkün kılmıştır. Karmaşıklık teorisi Kuhn’un bilimsel devrimler için ortaya koyduğu kriterlere uyarak bilimsel bir devrimi meydana getirmektedir. Ekonomik bakış açısından da karmaşıklık neoklasik ana akımla rekabet eden yeni bir paradigmadır.

Anahtar Sözcükler: Ekonomik Karmaşıklık, Karmaşıklık Teorisi, Santa Fe Yaklaşımı.

ABSTRACT

ÜNAL, Baki. *“Economy as a Complex Adaptive System”* Master’s Thesis, Ankara, 2010

This paper evaluates the impact of the complexity approach on economics. Complexity theory evokes new understandings in economics. Complexity theory can be successfully applied to the problems of the systems which doesn’t response classical analytical methods. Complexity has old roots but scientific studies of complex systems are novel. Before complexity theory these areas are seen as supernatural and metaphysical. The developments in computer technology facilitate complexity studies possible. Complexity theory is a scientific revolution that obeys the Kuhn’s criteria. From economical view point complexity is a new paradigm that competes with neoclassical main stream.

Key Words: Economic Complexity, Complexity Theory, Santa Fe Approach

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	i
BİLDİRİM.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLO DİZİNİ.....	ix
ŞEKİL DİZİNİ.....	x

BÖLÜM 1

GİRİŞ.....	1
------------	---

BÖLÜM 2

ÇEŞİTLİ BAĞLAMLARDA KARMAŞIKLIK.....	3
2.1 KOLMOGOROV KARMAŞIKLIĞI.....	3
2.2 HESAPSAL KARMAŞIKLIK.....	4
2.3 DİLİN KARMAŞIKLIĞI.....	5
2.4 HESAPLAMA MAKİNELERİNİN KARMAŞIKLIĞI.....	8
2.4.1 Sonlu Otomat.....	8
2.4.2 Deterministik Olmayan Aşağı-itmeli Otomat.....	9
2.4.3 Doğrusal Olarak Sınırlanmış Otomat.....	10
2.4.4 Turing Makinesi.....	11
2.5 SİSTEM DİNAMİKLERİNİN KARMAŞIKLIĞI.....	12
2.6 HÜCRESEL OTOMATLARDA KARMAŞIKLIK.....	18
2.7 KARMAŞIK SİSTEMLER.....	21

2.7.1 Sutherland’da Sistem Karmaşıklığı.....	23
2.7.2 Foster’ın Karmaşık Sistemler Sınıflandırması.....	25
2.7.3 Kendi Kendine Organizasyon.....	27
2.8 SONUÇ.....	35

BÖLÜM 3

EKONOMİ VE KARMAŞIKLIK.....	37
3.1 EKONOMİDE KARMAŞIKLIK.....	38
3.1.1 Pozitif Geribildirimler ve Artan Getiriler.....	43
3.1.2 Patika Bağımlılığı.....	44
3.2 BAŞLICA EKONOMİSTLERDE KARMAŞIKLIK.....	45
3.2.1 Adam Smith.....	45
3.2.2 Thomas Malthus.....	45
3.2.3 David Ricardo.....	46
3.2.4 John Stuart Mill.....	46
3.2.5 Karl Marx.....	47
3.2.6 Leon Walras.....	47
3.2.7 Marshall.....	47
3.2.8 Keynes.....	50
3.2.9 Hayek.....	51
3.2.10 Başlıca Ekonomistlerin Karmaşıklık Görüşüne Olan Eğilimlerinin Değerlendirilmesi.....	53
3.3 SANTA FE ENSTİTÜSÜ.....	54
3.4 METODOLOJİ VE MODELLEME.....	57
3.5 SONUÇ.....	57

BÖLÜM 4

MODEL VE SİMÜLASYON	59
4.1 MODEL.....	59
4.2 ALGORİTMA.....	64
4.3 JAVA KAYNAK KODU.....	65
4.4 SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	76

BÖLÜM 5

SONUÇ	90
KAYNAKÇA	91

TABLO DİZİNİ

Tablo-1: Çeşitli bağlamlardaki karmaşıklıklar arasındaki ilişkiler.....	21
Tablo-2: Basit ve Karmaşık Sistemler Arasındaki Farklar.....	24
Tablo-3: Ekonomistlerin Karmaşıklık Vizyonuna Eğilimleri.....	54

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 4.4.1 Simülasyon Zaman Serisi Çıktısı.....	76
Şekil 4.4.2 Simülasyon Zaman Serisi Çıktısı.....	77
Şekil 4.4.3 Simülasyon Zaman Serisi Çıktısı.....	78
Şekil 4.4.4.a. Farklı α_N değerleri için sonuçlar.....	79
Şekil 4.4.4.b. Farklı α_N değerleri için sonuçlar.....	80
Şekil 4.4.4.c. Farklı α_N değerleri için sonuçlar.....	80
Şekil 4.4.4.d. Farklı α_N değerleri için sonuçlar.....	81
Şekil 4.4.4.e. Farklı α_N değerleri için sonuçlar.....	81
Şekil 4.4.4.f. Farklı α_N değerleri için sonuçlar.....	82
Şekil 4.4.5.a. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar.....	83
Şekil 4.4.5.b. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar.....	83
Şekil 4.4.5.c. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar.....	84
Şekil 4.4.5.d. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar.....	84
Şekil 4.4.5.e. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar.....	85
Şekil 4.4.5.f. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar.....	85
Şekil 4.4.6.a. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar.....	86
Şekil 4.4.6.b. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar.....	87
Şekil 4.4.6.c. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar.....	87
Şekil 4.4.6.d. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar.....	88
Şekil 4.4.6.e. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar.....	88
Şekil 4.4.6.f. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar.....	89

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Karmaşıklık teorisi ekonomide yeni bir bakış açısı olarak görünmektedir. Karmaşıklık teorisinin kökenleri sibernetiğe, kaos teorisine ve sistem teorisine dayanmaktadır. Lakin sistemlerin karmaşıklığı antik çağlardan itibaren bilinen bir olgudur. İnsanlar tarih boyunca ele aldıkları sistemlerdeki karmaşıklıkla baş etmek için çeşitli yollar geliştirmişlerdir. Bu yollar metafizik ve doğaüstü yaklaşımları da içermektedir. Örneğin ilkel insanlar doğada karşılaştıkları karmaşıklığı gönlü alınabilen ruhlarla veya tanrılara atfederek karmaşıklıkla baş etmeye çalışmaktadırlar. Lakin sistemlerin karmaşıklığının bilimsel olarak çalışılması oldukça yenidir. Bunun başlıca iki sebebi vardır. Bunlar temel bilimsel yöntem olarak görülen analitik yöntemin karmaşık sistemlerin analiz edilip anlaşılmasındaki başarısızlığı ve bilgisayar teknolojisinin günümüzde ulaştığı seviyenin araştırmacılara sunduğu yeni olanaklardır. Analitik yöntemin sistemleri anlamadaki eksik ve yetersiz yönlerinin keşfedilmesi karmaşıklık teorisine bir kapı açmıştır.

Tezin ikinci bölümünde karmaşıklık kavramını çeşitli bağlamlardan örneklerle açıklanacaktır. Bir dizideki karmaşıklığa, bir hesaplamanın karmaşıklığına, dildeki karmaşıklığa, hesaplama makinelerinin (otomatların) karmaşıklığına, sistem dinamiklerinin karmaşıklığına ve hücrel otomatlardaki karmaşıklığa değinilecek ve bu farklı bağlamların karmaşıklıkları arasındaki ilişkiler ortaya konacaktır. Basit ve karmaşık sistemler arasındaki ayrımı daha belirginleştirmek için Sutherland'ın "Sistem Karmaşıklığı İkonografı ve Cilliers'in (1998) karmaşık sistemler için belirttiği karakteristikler sunulacaktır. Karmaşık sistemlerin önemli bir özelliği olan kendi kendine organize olmaya değinilecektir.

Tezin üçüncü bölümünde ekonomideki karmaşıklık ele alınacaktır. Öncelikle ekonominin neden bir karmaşık sistem olduğunu açıklanacak daha sonra neoklasik ana akım ekonomi anlayışıyla karmaşık sistemlerin ekonomi perspektifi arasındaki farklılıkları sıralanacak ve bunlar karşılaştırılacaktır. Klasik ekonomi anlayışının pek üstünde durmadığı ama karmaşıklık perspektifi açısından oldukça önemli olan

ekonomideki pozitif geri bildirimler ve patika bağıllığı konularını ele alınacaktır. Bu bölümde başlıca ekonomistlerin karmaşıklık yaklaşımına olan eğilimleri de değerlendirilecektir.

Bu bölümde karmaşıklık teorisini çalışan dünyadaki en önemli enstitü olan Santa Fe enstitüsü ve çalışmaları hakkında bilgi verilecektir. Günümüzdeki karmaşık sistem anlayışının büyük oranda bu enstitü tarafından belirlendiği ifade edilecektir. Ardından karmaşıklık yaklaşımının hangi metodolojik yönlerden standart yaklaşımdan ayrıldığını sunulacak ve bu bağlamda Epstein'ın (1999) üretken bilimine referansta bulunulacaktır.

Tezin dördüncü bölümünde karmaşıklığın nasıl çalışılabileceğini örneklendirmek için ajan temelli bir simülasyon uygulaması gerçekleştirilecektir. Bu simülasyon çalışmasında ajanların sahip olduğu davranış türlerinin popülasyonu ele alınacak ve bu davranış türlerinin popülasyon içindeki evrimi modellenecektir. Bu simülasyon çalışmasında ajanların yerel etkileşim parametrelerine göre davranış türleri popülasyonunun global olarak nasıl evrim geçirdiğini ele alınacaktır. Farklı yerel etkileşim parametrelerinin sonucu olarak popülasyonda farklı türlerin nasıl baskın hale geldiğini gösterilecektir. Simülasyonda türlerin evrimini modellemek için replikatör denklemi kullanılacaktır.

İkinci diziye bakıldığında belirgin bir örüntü göze çarpmamaktadır. Bu diziye yazmak için kullanılabilecek en kısa program, dizinin uzunluğu kadar olacaktır.

Görülebileneceği gibi bir dizinin Kolmogorov karmaşıklığı o dizinin kendisinden uzun olamaz. Yine görülebileceği gibi bir dizinin rastgeleliği (yani o diziye ifade etmek için gereken programın uzunluğunun dizinin uzunluğuna eşit olduğu durum) o dizinin Kolmogorov karmaşıklığının üst sınırını oluşturmaktadır. Bir dizinin Kolmogorov karmaşıklığı, aynı zamanda o dizinin sıkıştırılabilirlik miktarı olarak algılanabilir. Küçük bir bilgisayar programına sıkıştırılabilir bir dizinin Kolmogorov karmaşıklığı düşük, bir algoritma ile pek sıkıştırılmayan dizilerin Kolmogorov karmaşıklığı yüksektir.

2.2 HESAPSAL KARMAŞIKLIK (*Computational Complexity*)

Hesapsal karmaşıklık, bir problemin çözülebilmesi ya da hesaplanabilmesi için gerekli bilgisayar kaynaklarının miktarının bir ölçütüdür. Bir problemin hesaplanmasında iki tür hesaplama karmaşıklığıyla karşılaşılabilir.

Birinci tür hesapsal karmaşıklık, karar verilemez (*undecidable*) problemlerle ortaya çıkar. Karar verilemez problemleri sonlu zamanda çözebilmek için hiçbir akıl ya da bilgisayar bir algoritma ortaya koyamaz. Hilbert'in 10. problemi ve durma problemi (bir Turing makinesine bir algoritma ve ilk parametreler verildiğinde o Turing makinesinin durup durmayacağı problemi) bu tür problemlere örnek olarak verilebilir. Karar verilemez problemlerin varlığının keşfedilmesi, bilim tarihinde önemli bir yer tutar. Fontana (2008), ekonomideki karar verilemez problemler için şunları ifade etmektedir:

“Bu tür bir problemin tipik bir örneği kendi kendini referans (*self-reference*) vermedir: bir ajanın diğer ajanların varsayımları hakkında varsayımlar biçimlendirmesi gerekmektedir. Bu herhangi bir çözüme ulaşmayan bir prosedürdür. Karar verilemezlik sonsuz geri gitmeye (*regress*) yol açtığı için tam rasyonellikle ya da öngörü ile aşılamaz. Bir çözüme ulaşmak için ajanın diğer bazı yardımlara ihtiyacı vardır. Bunlar prosedürel rasyonellik (*procedural rationality*)

(Simon 1969), hayvani içgüdü (*animal spirits*) (Keynes 1973, ch. XII), ya da odak noktaları (*focal points*-Schelling 1960, p. 57) olabilir. Ekonomik literatürde kendi kendini referans vermenin birçok örneği vardır” (Fontana 2008).

İkinci tür hesapsal karmaşıklık teoride karar verilebilir ama talep ettiği çok yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle pratikte hesaplanması imkansız problemlerle karşılaşıldığında ortaya çıkmaktadır. Bu tür problemlerle karşılaşıldığında gerekli hesaplama adımı evrendeki atom sayısından daha çok olabilir. Bu yüzden bu tür problemlerle karşılaşıldığında istenen değerleri hesaplamak (örneğin optimum nokta) kullanıcı için bir avantaj olmaktan çıkmaktadır. Fontana’nın da ifade ettiği gibi:

“Gösterileceği gibi hesaplama karmaşıklığı, matematiksel maksimizasyon tekniklerinin ekonomik karar vermenin modellenmesine uygulanamayacağını ifade eder. Buna ilaveten rasyonellik üzerine çalışmalar insanın hesapsal yeteneklerinin ağır hesapları kaldıramayacağını göstermiştir. Bu nedenle optimal çözüme genellikle ulaşamaz. Hesaplama karmaşıklığı bizi karar verme için yeni modeller ve metaforlar araştırmak zorunda bırakmaktadır” (Fontana 2008).

Yukarıda da belirtildiği gibi hesaplama karmaşıklığı iki şekilde ortaya çıkmaktadır. Eğer hesaplama karmaşıklığı ele alınan problemde kaynaklanıyorsa (örneğin problem karar verilemez ise) bu durumda karmaşıklık ontolojiktir. Eğer hesaplama karmaşıklığı bizim hesaplama kısıtlarımızdan kaynaklanıyorsa (örneğin hesaplama maliyetleri muazzam derecede yüksek ise) bu durumda karmaşıklık epistemolojiktir.

2.3 DİLİN KARMAŞIKLIĞI

Noam Chomsky bir biçimsel dili (*formal language*), içinde tanımlandığı dilin alfabesinden sözcükler üretmeye yarayan kurallar kümesi olarak tanımlamaktadır. Bu kurallar sayesinde üretilen belirli diziler dildeki sözcükleri meydana getirir. Ayrıca geçerli kurallar aracılığıyla eski sözcüklerin yerine yenilerini koyarak yeni sözcükler oluşturulabilir. Chomsky’nin hiyerarşisinde bir dilin karmaşıklığı (yerine koyma aracılığıyla) yeni sözcüklerin üretilmesinde karşılaşılan kısıtlara karşılık gelir.

Bir biçimsel dil aşağıdaki bileşenlerden oluşan bir gramerle tanımlanmaktadır:

1. Nihai (*terminal*) Semboller: Nihai semboller bir dildeki daha (anlamını koruyarak) alt parçalara bölünemeyen kelimeler ve semboller toplamıdır. Örneğin: kuş ,araba, kedi, uçak...vb. Bu semboller genellikle küçük harflerle ifade edilirler: a,b,c.. vb.
2. Ara semboller (*nonterminal symbols*): Ara semboller dildeki yapıların toplamını ifade eder. Örneğin: cümle, fiil, isim, sıfat...vb. Bu semboller genellikle büyük harflerle gösterilirler: A, B, C...vb.
3. Üretim kuralları (*production rules*): Eski dizilerden nasıl yeni diziler oluşturulabileceğini gösteren kurallardır. Ara değişkenlerin yerine hangi nihai sembollerin ya da yeni ara sembollerin konulabileceğini gösteren kurallardır.
4. Başlangıç ara sembolü: Dilin üretiminin başlangıcını temsil eden bir ara semboldür. Genelde “S” ile gösterilir.

Biçimsel bir dilde yeni sözcüklerin üretimi “ $P \rightarrow Q$ ” şeklinde ifade edilir. Burada “P” bir ya da daha fazla ara değişken ve sıfır ya da daha fazla nihai sembolü içeren bir dizidir. Q ise nihai sembollerinin ve ara sembollerin herhangi bir bileşimini içeren bir dizidir. Türkçe gibi doğal bir dilin üretimi şu şekilde olabilir:

$$\begin{aligned}
 S &\rightarrow \langle \text{cümle} \rangle \\
 \langle \text{cümle} \rangle &\rightarrow \langle \text{özne} \rangle \langle \text{tümleç} \rangle \langle \text{yüklem} \rangle \\
 \langle \text{özne} \rangle &\rightarrow \text{“Ali”}
 \end{aligned}$$

Chomsky yukarıdaki gibi tanımlanan biçimsel dillerin gramerleri için hiyerarşik bir sınıflandırmada bulunmuş ve 4 hiyerarşik düzey ortaya koymuştur:

0. Tip: Kısıtlanmamış gramerler (*unrestricted grammars*): Bütün biçimsel gramerleri içerir. Bu gramerin üretiminde sağ ve sol taraf için herhangi bir kısıt yoktur. Kısıtlanmamış gramerler en karmaşık biçimsel dilleri içerir. Bu gramere sahip diller kısıtlanmamış diller olarak adlandırılmaktadır. Bu diller aynı zamanda yinelemeli olarak sayılabilir diller (*recursively enumerable languages*) olarak bilinmektedir.

1. Tip: Bağlama duyarlı gramerler (*context sensitive grammars*): Üretimi “ $aBc \rightarrow abc$ ” şeklinde olan gramerlerdir. Burada “B” ara değişkendir. a, b, c, nihai sembollerden (ya/ya da ara sembollerden) oluşan dizilerdir. Bu gramerler bağlama duyarlı olarak adlandırılır çünkü ancak belirli bir bağlamda (a_c bağlamı) “B” yerine “b” yazılabilir. Bu gramere sahip diller bağlama duyarlı diller olarak adlandırılmaktadır.
2. Tip: Bağlamdan bağımsız gramerler (*context free grammars*): Üretimi “ $B \rightarrow b$ ” şeklinde olan gramerlerdir. Burada B ara sembol. “b” ise nihai ve ara sembollerden meydana gelebilmektedir. Bu gramere sahip diller bağlamsal bir kısıt içermediği için bağlamdan bağımsız diller olarak adlandırılmaktadır.
3. Tip: Düzenli gramerler (*regular grammars*): Üretimi $A \rightarrow aB$ ya da $A \rightarrow a$ şeklinde olan gramerlerdir. Bu gramerde sol tarafta tek bir ara sembol bulunur. Sağ tarafta ise ya tek bir nihai sembol ya da ek olarak nihai sembolü takip eden tek bir ara sembol bulunmaktadır. Bu gramere sahip olan diller düzenli diller olarak adlandırılmaktadır.

Yukarıdaki hiyerarşide belirli bir numaraya sahip olan gramer numarası daha yüksek olan gramerleri kapsamaktadır yani her gramer, numarası kendinden küçük olan gramerlerin bir alt kümesidir. Tip numaraları arttıkça karşılık gelen karmaşıklık azalmaktadır ve diller daha kesin tanımlanabilir hale gelmektedir. Böylece bu gramerler hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Albin, Chomsky hiyerarşisinin ekonomik analizdeki önemine dair şunları ifade etmektedir:

“Chomsky’nin formel diller hiyerarşisi, sosyal ve ekonomik sistemlerin karmaşıklığının analizi ve nitelenmesinde, bir taraftan hesaplama araçlarının karmaşıklığı ile ilişkisi diğer taraftan doğrusal olmayan dinamik sistemlerle olan ilişkisi nedeniyle anahtar bir öneme sahiptir” (Albin, 1998).

2.4 HESAPLAMA MAKİNELERİNİN (OTOMATLARIN) KARMAŞIKLIĞI

Bu bölümde soyut hesaplama makinelerinin türleri ve her türe karşılık gelen karmaşıklıklar ele alınacaktır. Soyut hesaplama makinelerinin her türüne bir biçimsel dil türü karşılık gelmektedir. Her makine kendine karşılık gelen dil türünü kabul etmekte ve her dil türü için o dil türünü tanıyacak bir otomat (soyut hesaplama makinesi) yapılandırılabilir.

2.4.1 Sonlu Otomat (*Finite Automaton*)

Bu soyut hesaplama makinelerinin (otomatların) en basiti sonlu otomattır (*finite automaton*). Bir sonlu otomat sonlu sayıda içsel duruma sahiptir ve üzerine veri sembolleri yazılı bir banttı (tape, şerit) veri sembollerini okuyabilmektedir. Sonlu otomat bant üzerindeki sembolleri okuyarak hareket etmektedir. Sonlu otomat banttı okuduğu sembole mevcut içsel durumuna göre yeni bir içsel duruma girmektedir.

Sonlu otomat şu beşli ile tanımlanmaktadır:

$$M = (Q, \Sigma, T, q_0, F)$$

Q : Sonlu içsel durum kümesi.

Σ : Sonlu girdi sembolleri kümesi (alfabe).

$T: Q \times (\Sigma \cup \{\epsilon\}) \rightarrow P(Q)$ Dönüşüm fonksiyonu ($P()$ kuvvet kümesi, ϵ boş kümedir.)

$q_0 \in Q$: Başlangıç durumu

$F \subseteq Q$: Son (ya da kabul edilen) durumlar kümesi

Hesap makinesi sonlu bir otomata en basit örnek olarak verilebilir. Hesap makinesi, tuşlarında mevcut olan sembolleri okumakta ve işlemektedir. Hesap makinesi eğer yorumlayamadığı sembollerle karşılaşırsa hata uyarısı verecektir.

Ekonomik bakış açısından ekonomik bir karar vericinin sahip olabileceği en düşük maliyetli ve kapasiteli hesaplama aracı sonlu otomattır.

Sonlu otomatlar tarafından kabul edilen diller Chomsky hiyerarşisinde düzenli gramere sahip olan düzenli dillerdir. Diğer taraftan bir sonlu otomat herhangi bir düzenli dili kabul edecek şekilde yapılandırılabilir. Yine Chomsky hiyerarşisinde düzenli dillerin üstünde kalan dilleri (örneğin bağlamdan bağımsız bir dili) tanıyacak bir sonlu otomat yapılandırmak mümkün değildir.

2.4.2 Deterministik Olmayan Aşağı-itmeli Otomat (*Nondeterministic Pushdown Automata*)

Eğer yukarıdaki sonlu otomata bellek olarak kullanabileceği (ilk giren son çıkar mantığıyla çalışan) sınırsız bir bellek yığını eklersek “deterministik olmayan aşağı itmeli otomatı” elde ederiz.

Deterministik olmayan aşağı itmeli otomat şu yedili tanımlanmaktadır:

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, T, q_0, Z, F)$$

Q : Sonlu içsel durum kümesi.

Σ : Sonlu girdi sembolleri kümesi (girdi alfabesi).

Γ : Sonlu bellek yığını sembolleri kümesi. (bellek yığını alfabesi)

$T: Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow P(Q \times \Gamma^*)$ Dönüşüm fonksiyonu

$q_0 \in Q$: Başlangıç durumu

Z : Bellek yığını başlangıç sembolü.

$F \subseteq Q$: Son (ya da kabul edilen) durumlar kümesi

Deterministik olmayan aşağı itmeli otomatın kullanabileceği bir belleği olduğu için sonlu otomattan daha üst karmaşıklık düzeyini temsil etmektedir.

Deterministik olmayan aşağı itmeli otomat, Chomsky hiyerarşisinde düzenli dillerin bir üstünde yer alan bütün bağlamdan bağımsız dilleri ve düzenli dilleri tanıyıp kabul edebilir. Yine herhangi bir bağlamdan bağımsız dili kabul edebilecek bir deterministik olmayan aşağı itmeli bir otomat yapılandırılabilir. Aşağı itmeli otomata sahip bir ekonomik karar verici, sonlu otomata sahip bir karar vericiye göre daha karmaşık bilgileri işleyebilir.

2.4.3 Doğrusal Olarak Sınırlanmış Otomat (*Linear Bounded Automata*)

Doğrusal olarak sınırlanmış otomat bandı sınırlı bir Turing makinesine eşdeğerdir. Bandın bu sınır değerleri sağda \$ ve solda ¢ olarak belirtilmiştir. Doğrusal olarak sınırlanmış otomat yalnızca bu değerler arasında hareket edebilir.

Doğrusal olarak sınırlanmış otomat şu sekizli ile tanımlanmaktadır:

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, T, q_0, \epsilon, \$, F)$$

Q : Sonlu içsel durum kümesi.

Γ : Sonlu izin verilebilir bant sembolleri kümesi

Σ : Boşluk sembolünü içermeyen, Γ 'nin bir alt kümesi. Girdi sembolleri kümesi (girdi alfabesi).

$T: Q \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R\}$: Bir sonraki adım fonksiyonu

$q_0 \in Q$: Başlangıç durumu

ϵ : Bandın sol taraftaki bitimini gösteren Σ 'nun bir elemanı.

$\$$: Bandın sağ taraftaki bitişini gösteren Σ 'nun bir elemanı.

$F \subseteq Q$: Son (ya da kabul edilen) durumlar kümesi

Doğrusal olarak sınırlanmış otomat Chomsky hiyerarşisinde bağlama duyarlı dillere karşılık gelmektedir. Herhangi bir bağlama duyarlı dil için o dili kabul edecek bir

doğrusal olarak sınırlanmış otomat yapılandırılabilir. Ayrıca doğrusal olarak sınırlanmış otomat bütün bağlama duyarlı dilleri kabul edebilir.

2.4.4 Turing Makinesi

Turing makinesi iki bellek yığınınına sahip aşağı itmeli otomatla eşdeğerdir. Bir bellek yığınınından diğerine veriler aktarılabilirdi için hiçbir veri kaybolmadan bütün veriler işlenebilir. Turing makinesi Alan Turing tarafından ortaya konmuştur. Turing makinesi sonsuz belleğe yani banda sahiptir. Bütün algoritmik hesap prosedürleri bir Turing makinesinde uygulanabilir. Hiçbir hesaplama aracının kapasitesi-gücü bir Turing makinesinden yüksek olamaz.

Bir Turing makinesi biçimsel olarak şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, T, q_0, B, F)$$

Q : Sonlu içsel durum kümesi.

Γ : Sonlu izin verilebilir bant sembolleri kümesi

Σ : Boşluk sembolünü içermeyen, Γ 'nin bir alt kümesi. Girdi sembolleri kümesi (girdi alfabesi).

$T: Q \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R\}$: Bir sonraki adım fonksiyonu

$q_0 \in Q$: Başlangıç durumu

$B \in \Gamma$: Boşluk sembolü

Turing makineleri Chomsky hiyerarşisinde kısıtlanmamış dillere karşılık gelmektedir. Herhangi bir kısıtlanmamış dili kabul edebilecek bir Turing makinesi yapılandırılabilir. Yine Turing makinesi bütün kısıtlanmamış (yinelemeli olarak sayılabilir) dilleri kabul edebilir. Yine hiyerarşi gereği Turing makinesi Chomsky hiyerarşisindeki en güçlü hesaplama makinesidir ve daha alt düzeyde bulunan yani geri kalan bütün biçimsel dilleri kabul edip işleyebilir.

“Ekonomik bir bakış açısından doğrusal olarak sınırlanmış otomatın sınırlı depolama kapasitesi bir Turing makinesinden niteliksel olarak farklı hesaplama maliyetini temsil eder. Bir problemi analiz ederken doğrusal olarak sınırlanmış bir otomat kullanan bir karar verici gerekli hesaplama kaynaklarının maliyetini kendinden emin bir şekilde ayarlayabilir. Lakin Turing makinesini kullanan bir karar verici hesaplama maliyetinin ne kadar artacağından asla emin olamaz” (Albin, 1998, s.46).

2.5 SİSTEM DİNAMİKLERİNİN KARMAŞIKLIĞI

Dinamik sistemler ve ya sistem dinamikleri kavramları ile durumu zaman içinde değişim gösteren sistemleri ve bunların özelliklerini kastetmekteyiz. Bertuglia ve Vaio (2005, s.10), dinamik sistemlere sallanan bir sarkacı, radyoaktif bir maddenin bozunmasını, güneş sistemindeki gezegenlerin hareketlerini, bir bitkinin büyümesini, belirli bir popülasyondaki eğilimleri, caddelerdeki trafik akışını, borsa endeksindeki hareketleri örnek olarak vermiştir. Yukarıdaki gibi dinamik sistemlerde sistemin belirli bir andaki durumu belirlenebilir ve bu durumun zaman içindeki değişimi gözlenebilir. Eğer bu değişimler matematiksel olarak bir düzene yol açıyorsa bu durumda dinamik sistemin matematiksel bir modelini elde etmiş ve sistemin çalışma mekanizmasını ortaya çıkarmış oluruz. İncelediğimiz sistem daha karmaşık hale geldikçe o sistemi biçimsel olarak tarif etmek de, sistemin çalışma mekanizmasını ortaya çıkarmak da daha zor hale gelmektedir.

Dinamik bir sistem modellenirken önce zaman içinde değişen durum değişkenleri tanımlanır ardından bu değişkenlerin zaman içindeki değişimi diferansiyel denklemlerle veya fark denklemleriyle tarif edilir. Dinamik sistemlerin modellenmesinde iki tür matematiksel denklem biçimi kullanılabilir. Bunlar doğrusal ve doğrusal olmayan matematiksel denklem biçimleridir. Bu bağlamda doğrusal matematiksel denklemlerle modellenebilen sistemler doğrusal sistemler olarak, doğrusal olmayan matematiksel denklemlerle modellenebilen sistemler doğrusal olmayan sistemler olarak adlandırılabilir.

Çeşitli bilimsel alanlar içindeki birçok çeşitli sistemlerin dinamikleri denge eğilimi göstermektedir. Bu tür sistemler doğrusal diferansiyel denklemlerle

modellenebilmektedirler. Bir doğrusal diferansiyel denklemin genel biçimi şu şekildedir:

$$x^{(n)} + a_{n-1}(t)x^{(n-1)} + a_{n-2}(t)x^{(n-2)} + \dots + a_1(t)x' + a_0(t)x = b(t)$$

Yukarıda $a_i(t)$ ve $b(t)$, t değişkeninin sürekli fonksiyonlarıdır ve $x^{(i)}$ bilinmeyen $x(t)$ fonksiyonunun i 'inci türevidir. $b(t) = 0$ olduğunda diferansiyel denklem homojen olarak adlandırılmaktadır. Eğer homojen doğrusal bir diferansiyel denklemin $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ gibi iki çözümü elde edilebilirse bu çözümlerin doğrusal birleşimleri yani $c_1x_1(t) + c_2x_2(t)$ de bir çözümdür (burada c_1 ve c_2 bir reel sayıdır). Bu, doğrusal diferansiyel denklemlerin üstdüşüm (*superposition*) özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu özellik indirgemeciliğin, olguyu alt parçalara ayırma, bu alt parçalar için çözüm bulma ve bu çözümleri birleştirerek genel çözümü bulma yöntemini ifade etmektedir. Ele almak istediğimiz sistem doğrusal olduğunda bu sistemi indirgemeci bir yöntemle incelemek mümkün görünmektedir.

Bertuglia ve Vaio (2005, s.30) gerçek bir sistemin doğrusal olarak modellenebilmesinin uygun olabilmesi için sistemde söz konusu olan durum değişkenlerinin büyüklüklerinin küçük değişimlere maruz olmaları gerektiğini ifade etmektedir. Eğer dinamik bir sistemde ortaya çıkan güçler sistemi tekrar dengeye ulaştırıyorsa bu tür sistemler doğrusal olarak ele alınabilirler. Bu tür sistemlerde ortaya çıkan dengeleyici gücün büyüklüğünün dengeden olan uzaklıkla orantılı olması gerekir. Eğer sistem dengeden çok küçük bir uzaklıkta ise bu durumda sistem karşı koyucu güçleri üretebilir. Lakin eğer dengeden çok fazla uzaklaşırsa sistem dengeleyici güçleri üretemeyebilir.

Ancak girdi ve çıktının veya sebep ve sonucun birbirleri ile doğru orantılı olduğu sistemler doğrusal olarak modellenebilmektedir. Lakin doğada girdi ve çıktının veya sebep ve sonucun birbirleri ile orantılı olmadığı birçok sistem bulabiliriz. Bu tür sistemlerde küçük bir etki büyük sonuçlara yol açabildiği gibi büyük bir etki de küçük sonuçlara yol açabilmektedir. Sistemleri doğrusal olarak modelleme gerçek hayatta

karşılaşılan olguların birçoğunu ihmal etmesine rağmen sistemleri modellemede ilk ve en basit yaklaşımı ifade etmektedir:

“Gerçekte, doğrusallaştırma adı verilen bu metot, doğal olgulardaki birçok değişmez ögenin ve düzenliliklerin varlığını fark etmemizi sağlamıştır. En önemlisi klasik fizikte, doğrusallaştırma, diğer temel ve çeşitli problemler çözülme bile, yüksek derecede bir hassaslıkla çeşitli olguları ele almamızı mümkün kılmıştır. Buradaki düşünce oldukça basittir. Denklemleri doğrusal hale getirirken ihmal ettiğimiz terimlerin etkisi küçüktür. Doğrusal hale getirilmiş denklemlerin çözümü ile doğrusal olmayan denklemlerin çözümü arasındaki bir farkın olduğu doğru kabul edilmiş ama bu farkın bilinmediği ve küçük olduğu varsayılmıştır; lakin bu her zaman geçerli değildir” (Bertuglia ve Vaio, 2005, s.40).

Bertuglia ve Vaio (2005, s.44) doğrusal dinamik modellerin kararlı çözümler bulmada ve kararsızlık durumlarının tahmin edilmesinde kullanılabildiğini ama bu tür modellerin çözümlerinin dört genel türe indirgenebileceğini belirtmektedir:

1. Kararlı Salınımlar.
2. Üstel olarak büyüyen (patlayıcı) salınımlar.
3. Asimptotik kararlılık
4. Sınırsız (patlayıcı) büyüme

Doğrusal modeller gelecek hakkında kesin tahminlerde bulunmamızı sağlarken doğrusal olmayan modeller ancak olay gerçekleştikten sonra tahminlerde bulunmamızı sağlamaktadır. Doğrusal olmayan modellerin öngörülerini tahmin edilecek zaman aralığı arttıkça daha güvenilmez hale gelmektedir. 1960’ların sonlarından itibaren geliştirilen dinamik sistemler teorisi ile doğrusal olmayan sistemlerin uzun vadeli davranışları üzerine çalışmalar başlamış ve doğrusal olmayan sistem modelleri ortaya konmuştur. Bu modeller genellikle bilgisayarda çözülmektedir. “Doğrusal modellere karşıt olarak bu dinamik modeller, doğrusal modellerin tipik dört şemasından farklı evrimsel şemalar üretebilmektedir ve belirli parametre değerleri için, olası yapısal değişimleri tahmin edebilmektedir” (Bertuglia ve Vaio, 2005, s.45).

Bertuglia ve Vaio (2005, s.40) genel bir bağlamda doğrusal olmama problemini ele almak için bilimin klasik çağı boyunca ve günümüzde de analitik tekniklerin var olmadığını ifade etmektedir.

Doğrusal olmayan sistemlerde çıktı girdi ile orantılı olmak zorunda değildir. Bu sistemlerde üstdüşüm (*superposition*) ilkesi geçerli değildir. O yüzden indirgemeci yöntemin olguyu alt parçalarına ayırıştırma bu alt parçaları ayrı ayrı inceleme daha sonra incelenen alt parçaları birleştirerek olguyu açıklama yöntemi bu tür doğrusal olmayan sistemlerde kullanılamaz.

Doğrusal olmayan sistemlerin genel bir çözümü birkaç istisna dışında mevcut değildir. Doğrusal olmayan denklemlerin çözümleri nümerik yöntemlerle yaklaşık olarak bulunur. Belirli parametre değerleri için doğrusal olmayan bir denklem sisteminin çözümleri herhangi bir belirsizlik olmadan gerçekleştirilebilir. Lakin diğer parametre değerlerinde doğrusal olmayan denklem sisteminin evrimi tahmin edilemez bir hale gelebilir. Bu durum determinist kaos olarak adlandırılmaktadır. Bu durum kaos olarak adlandırılmaktadır çünkü sistemin evriminin tahmin edilmesi mümkün değildir ve başlangıç koşullarındaki küçük bir değişim büyük bir değişime neden olabilmektedir. Doğrusal olmayan sistemlerde başlangıç koşullarındaki küçük bir değişim orantısız bir biçimde büyük sonuçlara yol açabilmektedir. Bu olgu kelebek etkisi olarak adlandırılmaktadır. Bu tür sistemler kaotik veya tuhaf çekiciler içerebilir.

Doğrusal olmayan sistemlerin matematiksel olarak işlenmesi doğrusal olanlara göre daha zordur. Doğrusal olan sistemlerin aksine doğrusal olmayan sistemler bize gelecek için kesin tahminler verememektedir. Doğrusal olmayan sistemlerin indirgemeci bir yaklaşımla ele alınması mümkün değildir.

Sosyal sistemler genellikle yüksek derecede doğrusal olmayan sistemlerdir. Bu sistemlerde düzenliliklerin tanımlanması zordur. Bu tür sistemlerin doğrusal matematikle etkin olarak ele alınması pek mümkün değildir.

Doğrusal olmayan sistemler kaotik dinamiklere yol açabildiği gibi karmaşık dinamiklere de yol açabilmektedir. Karmaşık dinamikler gösteren sistemler genel bir bağlamda matematiksel bir biçimde nitelendirilememektedir. Bu tür karmaşık dinamikler gösteren sistemler uyarlamalı karmaşık sistemler olarak adlandırılmaktadır. Bu tür sistemlerin doğrusal olmayan dinamikleri kendi kendini organize eden ve kendi kendini üreten yapılara yol açmaktadır. Canlı varlıklar bu tür karmaşık dinamikler içeren sistemlerin başlıca örneklerindendir. Karmaşık sistemler önsel olarak tahmin edilmesi mümkün olmayan yeni davranışlar ve yapısal değişimler üretebilmektedir.

Bir dinamik sistemle karşı karşıya kalan bir rasyonel karar verici, davranışlarının sonuçlarını değerlendirmek için bir hesaplama makinesine ihtiyaç duyar. Böyle bir hesaplamada kullanılan hesaplama makinesinin hesaplama gücü bir karar vericinin hesaplama maliyetleri ile ilişkilidir. Albin (1998, s.47), ekonomik hesaplama maliyetlerini hesaplama makinelerinin karmaşıklıklarının hiyerarşisi ile ilişkilendirmektedir. Buna göre tek bir evrensel çekicili denge durumu içeren bir dinamik sistem sonlu otomata ve düzenli dillere karşılık gelmektedir. Bir sonlu otomatın belleği yoktur o yüzden hesapsal maliyetler açısından oldukça ucuzdur. Tek noktalı bir çekiciye sahip olan bir dinamik sistemle karşı karşıya kalan bir rasyonel birey çok az hesaplama kaynağına gereksinim duyacaktır.

Periyodik çekicili dinamik sistemler deterministik olmayan aşağı itmeli otomata ve bağlamdan bağımsız dillere karşılık gelmektedir. Bu tür dinamiklerle karşı karşıya gelen bir karar vericinin belleğe ihtiyacı olacaktır. “Burada hesaplama makinesinin maliyeti dinamik sistemin ürettiği tekrarlayan örüntüsün boyutu ile orantılı olacaktır” (Albin, 1998, s.47).

Kaotik çekicili dinamik sistemler doğrusal olarak sınırlanmış otomatlara ve bağlama duyarlı dillere karşılık gelmektedir. “Bir yörüngede hafif bir sapma gerçekleştiğinde bu sapma zaman ve mekan boyunca sonsuz bir biçimde çatlara ayrılacaktır. Kaotik yörüngelerin bu yayılımı bağlama duyarlı dillerin üretim kurallarının monotonik özelliğine karşılık gelmektedir. Bu karmaşıklık sınıfındaki problemler tipik olarak prensipte karar verilebilir (*decidable*) olmasına rağmen, hesaplama maliyetlerinin hızlı

artışı nedeniyle bu problemlerin hesapsal olarak izini sürmek genellikle zordur” (Albin, 1998, s.48).

Albin (1998) herhangi bir ekonomik sistemdeki karar vericilerin Turing makinesine eşdeğer bir karmaşıklığa sahip olduğu varsayıldığında, bu karar vericilerden oluşan ekonominin bağlama duyarlı dillerden ve doğrusal olarak sınırlanmış otomattan daha üst bir karmaşıklık düzeyine yani kısıtlanmamış dillere karşılık geleceğini ifade etmektedir.

“Bu sistemlerin ayırt edici özelliği durumlarının çıkarımlarının monoton olmayışdır. Sistemin durumunu karakterize etmek için eğer bir karmaşıklık ölçütü seçersek (örneğin üretilen sözcüğün boyutu ya da bir ekonomik piyasada gözlemlediğimiz alışverişlerin sayısı), bu durumun daha karmaşık bir durumdan evirildiği olasılığını göz ardı edemeyiz. Örneğin insanlar oldukça karmaşık ve karışık çıkarımlar temelinde oldukça basit davranış biçimleri benimseyebilmektedirler” (Albin, 1998 s.46).

Sistem dinamiklerinin çalışılması Newton’cu klasik mekaniğe dayanmaktadır. Newton doğal süreçler için kesin bir biçimde determinist bir çerçeve ortaya koymuştur. Bu çerçeveye göre bir sistemin mevcut durumundan sistemin gelecekteki ve geçmişteki durumu kesin bir biçimde çıkartılabilir. Newton’cu klasik mekanik uzun süre doğal süreçleri tarif etmede doğruluğu tartışılmaz bir yol olarak görülmüştür. Newton’cu mekaniğin bu başarısı bu teorinin temel öğelerinin farklı bilimsel alanlara transfer edilmesi girişimlerini doğurmuştur. Yıllar geçtikçe bu girişimlerin başarısızlıkları ortaya çıkmıştır. Newton’cu mekaniğin determinizmi zaman içinde şu şekilde çözülmüştür (Bertuglia ve Vaio, 2005, s.21):

1. *Determinizm*. Katı bir bağlamda ve klasik mekaniğin ifade ettiği bir şekilde. (Newton, Leibniz, Lagrange, Euler, Laplace: Newton’un “Prensipler” kitabının basıldığı 1687’den 19.yüzyılın ilk birkaç on yılına kadarki süre)
2. *İstatistiksel Belirlenimsizlik*. (Clausius, Lord Kelvin ve Boltzmann: 19.yüzyılın ikinci yarısında)
3. *Kuantum Belirlenimsizliği*. (Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Dirac ve diğerleri: 20.yüzyılın ilk birkaç on yılından itibaren başlayarak.)

4. *Determinist Kaos*. (İlk defa 19.yüzyılın sonunda Poincaré tarafından ortaya kondu daha sonra terk edildi. Ondan sonra Lorenz, Smale, Yorke, Prigogine ve diğerleri tarafından 20. yüzyılın son birkaç on yılında devam ettirildi.)

Bertuglia ve Vaio (2005, s.21), yukarıdaki ilk üç maddenin bilimsel düşüncenin tarihsel aşamaları olarak birbirini takip ettiğini ifade etmektedir. Bertuglia ve Vaio (2005, s.21), üçüncü maddenin günümüzde de bilimsel araştırmanın konusu olduğunu ve gelişiminin dördüncü maddenin yani determinist kaosun ortaya çıkmasına paralel olarak devam ettiğini belirtmektedir.

2.6 HÜCRESEL OTOMATLARDA KARMAŞIKLIK

Bir hücresel otomat (*cellular automata*), düzenli bir hücreler ızgarasından ve bu ızgaraların sonlu sayıdaki durumlarından oluşan doğrusal olmayan kesikli bir modeldir. Izgaradaki hücreler birbirlerinin komşulukları ile yerel olarak etkileşmektedir ve komşularının durumuna göre hücreler yeni değerler almaktadır.

Wolfram hücresel otomatları var oldukları örgünün (*lattice*) boyutları, her bir adımda her bir konumun işgal ettiği durum sayısı (k), konumların tek adımlı etkilerini tanımlayan limitin yarıçapı (r), ve otomatın evrimini yöneten kurallar bakımından sınıflandırmıştır (Wolfram, 2002).

Hücresel otomattaki kurallar bir hücrenin durumunun komşu hücrelerin durumuna göre değişmesine izin verir. En basit otomat tek boyutlu otomattır. Tek boyutlu otomatın simülasyonu durumların yatay ve zamanın dikey olarak gösterildiği iki boyutlu bir grafikte görselleştirilebilir. Tek boyutlu hücresel otomat simülasyon maliyeti en düşük otomattır. Örneğin tek boyutlu bir otomatta durum sayısının 2 ve komşu hücrelerin birbirlerini etkileme menzilinin 1 olduğu varsayalım. Bu durumda bir konumun bir sonraki durumu kendi durumu ve sağ ve sol komşularının durumları tarafından belirlenir. Böyle bir tek boyutlu hücresel otomatta toplam 256 olası hücresel otomat kuralı var olacaktır. Wolfram, bu 256 kural içinde, gerçek dünyadaki olası davranışları yansıtabilmesi muhtemel bir alt

kümeye odaklanmıştır. Örneğin sağ ve sol etkiler gerçek dünyada genelde farklı olmadığı için bu 256 kural içinden simetrik kurallara odaklanmıştır.

Her ne kadar hücresel otomatların evrimini belirleyen kurallar basit olsa da hücresel otomatların başlangıç koşullarından itibaren nasıl evrileceğini ifade eden genel bir algoritma yazmak pek mümkün değildir. Wolfram, birçok tek boyutlu hücresel otomatın evrimi sonucunda ortaya çıkan örüntüleri incelemiş ve çarpıcı sonuçlar bulmuştur.

Wolfram çok sayıdaki hücresel otomatlarda yaptığı gözlemler sonucu tek boyutlu hücresel otomatların dört karmaşıklık düzeyinde sınıflandırılabileceğini bulmuştur. Wolfram her ne kadar tek boyutlu hücresel otomatlarda bu dört sınıfın ayırımına varsa da daha çok boyutlu hücresel otomatlarda da benzer bir sınıflandırmanın geçerli olduğuna inanmaktadır.

1. tip otomatlar herhangi bir başlangıç durumundan homojen yani tekbiçimli bir duruma evirilmektedir. Bu otomatlarda başlangıç durumundaki bir sapma zaman içinde tükenmekte ve kaybolmaktadır. Bu otomatlar tek bir kararlı dengeye sahip dinamik sistemlerle benzerlik göstermektedir.

2. tip otomatlar herhangi bir başlangıç durumundan periyodik örüntülere evirilmektedir. Başlangıç durumundaki bir sapma periyodun büyüklüğünü değiştirebilir ama yine de örüntü periyodiktir. Bu tür otomatlar periyodik çekicili dinamik sistemlere karşılık gelmektedir.

1. ve 2. tip otomatların zaman içindeki evrimini kestirmek kolaydır. Bu tür otomatlarda başlangıç durumunda gerçekleşen küçük bir sapma zaman içinde azalmaktadır.

3. tip hücresel otomatlar tekrarlanmayan (periyodik olmayan) karışık örüntülere evirilmektedir. Bu otomatlarda başlangıç durumundaki küçük bir sapma zaman içinde büyüyen bir örüntüye yol açmaktadır. Bu tür otomatlar, kaotik davranış ve

kaotik çekiciler içeren dinamik sistemlere ve bağlama duyarlı dillere karşılık gelmektedir. Bu tür otomatların evrimini tahmin etmek zordur.

4. tip hücresel otomat çoğalan ve yayılan düzensiz yapılar üretmektedir. Başlangıç koşullarındaki bir değişim yayılan ve çoğalan değişimlere yol açar. Başlangıç koşullarındaki bir değişimin devamlı yayıldığı 3. tip hücresel otomatların aksine 4. tip otomatlarda başlangıç koşullarındaki bir değişimin sonuçları önce yayılıp genişleyebilir ama daha sonra tekrar daralabilir. 3. tip otomatlara benzer olarak 4. tip otomatların da evrimini kestirmek zordur. 4. tip otomatlar kısıtlanmamış gramerlerden üretilen biçimsel dillere benzerdir.

“Dinamik sistemler bakış açısından 4. tip hücresel otomat 2. ve 3. tipteki otomatlar arasındaki sınırdaki yer alır. Bir 2. tip hücresel otomatın başlangıç koşullarındaki bir değişim periyodik çekicinin içine doğru monotonik olarak yatıştır. 3. tip sistemdeki başlangıç koşullarındaki bir değişiklik bütün uzay boyunca monotonik olarak patlar. 4. tip sistemin başlangıç koşullarındaki bir değişim ne içeriye çöker ne de patlar ama sistem boyunca düzensiz bir biçimde yayılır. Bu yüzden 4. tip hücresel otomatlar “kaosun eşiğindeki karmaşıklık” (*complexity on the edge of chaos*) modelleridir. Bu sistemler, alt-kritik kararlılık ile üst-kritik kararsızlık arasındaki sınırdaki yer alır” (Albin, 1998, s.51).

3. tür bir çevrede rasyonel davranışta bulunmak isteyen bir karar verici istenen tahminin hassaslığına ve tahmin edilmek istenen zamansal uzaklığa göre artan bir hesaplama maliyeti ile karşı karşıya gelir. Böyle bir durumda karar vericinin rasyonelliğinin bir sınırı ortaya çıkmaktadır.

4. tip otomatlarda da rasyonel davranış için çeşitli kısıtlar sergilemektedir. Bu tür sistemler karar vericiler için yine zorluklar ortaya koymaktadır:

Başlangıç koşullarında verili ufak bir değişim bir dizi çatallaşan sonuçlara yol açabilir. Bu sonuç zaman içinde belirli bir yeni durumun ortaya çıkması ile basitleşebilir. Ama bireyin bunun doğru olup olmadığını bulması için bütün karmaşıklığıyla sistemi simule etmekten başka bir çaresi yoktur (Albin, 1998 s.52).

Böyle bir simülasyon gerçekleştiren ajan için bu simülasyonun sonlu bir zamanda sonuca ulaşp ulaşmayacağını bilmenin bir yolu yoktur. Karar verici simülasyonu

bilgisayar üzerinde ne kadar uzun süre çalıştırsa da sonuca ulaşmanın birkaç adım ötede mi olduğunu ya da programın sonsuz bir döngüye mi girdiğini bilemez.

Tablo-1 Çeşitli bağlamlardaki karmaşıklıklar arasındaki ilişkiler

Chomsky Hiyerarşisi	Diller	Minimal Otomat	Dinamik Sistem	Hücresel Otomat Sınıfı
Tip.0	Kısıtlanmamış	Turing Makinesi		4.Tip
Tip.1	Bağlama duyarlı	Doğrusal olarak sınırlanmış otomat	Kaotik çekicili dinamik sistemler	3.Tip
Tip.2	Bağlamdan bağımsız	Deterministik Olmayan Aşağı-itmeli Otomat	Periyodik çekicili dinamik sistemler	2.Tip
Tip.3	Düzenli	Sonlu otomat	Tek evrensel çekicili, denge durumu içeren sistemler	1.Tip

2.7 KARMAŞIK SİSTEMLER

Yukarıda farklı bağlamlarda karmaşıklık tanımları verilmiştir. Bir sistemin karmaşık olarak nitelendirilmesinde dikkatli olunmalıdır. Çünkü basitlik ve karmaşıklık birbirlerini maskeleyebilmektedirler. Birçok sistem basit olarak görünebilir ama yakından bakıldığında belirgin bir biçimde karmaşıklık ortaya çıkabilir (örneğin

yaprak). Bazı sistemler çok karmaşık olarak görülebilir ama basitçe modellenebilmektedirler (örneğin içten yanmalı motor). Karmaşıklık sistemin bileşenleri arasındaki ilişkilerden doğduğu için ancak sistem düzeyinde görülebilir bir olgudur. Sisteme çok yakından ya da çok uzaktan bakılması karmaşıklığa odaklanmayı önleyebilir. Karmaşıklık ile basitlik arasındaki ayrım genellikle sisteme olan uzaklığımıza göre değişir. Ancak bu, karmaşıklığın dilsel bir olgu ya da sisteme uzaklığımızın bir fonksiyonu olduğu anlamına gelmemektedir. Karmaşık sistemlerin farklı bakış açılarına göre değişmeyen özellikleri vardır.

Dikkat edilmesi gereken ikinci önemli ayrım, karışık ve karmaşık kavramları arasındadır. Bazı sistemler çok büyük sayıda bileşen içerebilir ve çok değişik görevleri yerine getirebilir ama analitik bir yolla analiz edilebilirler. Bu tür sistemler karışıktır. Diğer bazı sistemler ise doğrusal olmayan ilişki kümelerinden ve geribildirim döngülerinden oluşarak ancak zaman boyutu ile analiz edilebilirler. Bu sistemleri analiz girişimleri analiz edilen sistemlerde düzensizliklere neden olabilir. Bu tür sistemler karmaşıktır. Karmaşık sistemler genellikle canlı şeylerle ilişkilidir. Cilliers (1998), Karmaşık sistemlerin aşağıda sıralanan özellikleri taşıdığını öne sürmektedir:

Karmaşık bir sistem çok sayıdaki bireyden oluşur. Bu çok sayıdaki birey dinamik olarak birbirleri ile etkileşim halindedir. Bu etkileşimler fiziksel olabileceği gibi bilginin transferi şeklinde de gerçekleşebilir. Bu etkileşim esnasında her birey birçok bireyi etkiler ve onlardan etkilenir. Bu etkileşimler doğrusal değildir. Doğrusal olmama sebep ve sonuç arasında orantısızlığa yol açar. Etkileşimler genellikle kısa menzillidir. Yani bireyler öncelikle komşularıyla madde, enerji ve bilgi alışverişinde bulunmaktadırlar. Etkileşimler döngüler (*loops*) içerir. Bir aktivitenin etkisi dolyı veya doğrudan yine ona geri bildirilir (*feedback*). Bu geri bildirim pozitif veya negatif olabilir. Karmaşık sistemler genellikle çevreleriyle etkileşim halinde olan açık sistemlerdir. Bu yüzden bu tür sistemlerin sınırlarını tanımlamak zordur. Karmaşık sistemler dengeden uzak bir durumda çalışır. Sistemin hayatta kalabilmesi için sürekli bir enerji akışı gereklidir. Denge bu sistemler için ölümlü ifade eder. Karmaşık sistemlerin bir tarihi vardır. Karmaşık sistemler zaman boyunca evrim geçirirler. Sistemin tarihi sistemin sonraki zamandaki hallerini de belirler. Karmaşık sistemlerde her birey bütünün davranışı konusunda bilgisizdir. Karmaşıklık yerel olarak mevcut olan bilgiye ve madde alışverişine tepki veren bireylerin zengin etkileşimlerinin bir sonucudur.

2.7.1 Sutherland'da Sistem Karmaşıklığı

Sutherland (1975) sistemlerin analitik olarak işlenebilir olup olmadığını 3 alt boyutta incelemiştir. Sistemin bu üç alt boyutu şunları içermektedir: sistemin sahası (*domain*) (yapısal), sistemin dinamikleri (davranışsal) ve sistemin çevresi (ekolojik). Genel sistem, xyz uzayındaki pozitif alanı gösteren 3 boyut; sistemin yapısal, dinamik ve ekolojik boyutlarının işlenebilirliğinin artıp azalışını göstermektedir. Buna göre orijinden uzaklaştıkça her bir boyutun işlenebilirliği azalmakta orijine yaklaştıkça her bir boyutun işlenebilirliği kolaylaşmaktadır. İşlenebilirliğin az ya da çok olmasına göre her bir boyutta biri orijine yakın (daha işlenebilir) diğeri orijine uzak (daha az işlenebilir) iki nokta seçilmiştir. Bu noktalar her bir boyutta DO₁, DO₂; DY₁, DY₂; E₁, E₂ adlandırılmış ve aynı numaraya karşılık gelen iki düzlemden orijine yakın olanı mekanizm düzlemi, uzak olanı gestalt düzlemi olarak adlandırılmıştır. Bu iki düzlem arasında kalan noktalar çeşitli düzeylerdeki işlenebilirliklere karşılık gelmektedir:

SAHA (DOMAIN)

DO₁: Sistemin sahası yüksek derecede kısıtlıdır, homojendir ya da kesin eşleştirmelere (*mapping*) uygundur (örneğin: bölümlenmiş bir sistem)

DO₂: Saha ampirik olarak erişilemez, heterojen ya da kötü bir şekilde yapılandırılmıştır. (Örneğin farklılaşmış bir sistem)

DİNAMİK

DY₁: Sistemin oluşumsal özellikleri yüksek derecede durağanlık eğilimindedir ya da zaman içinde tutarlıdır. (Örneğin: durağan durum sistemi)

DY₂: Sistemin dinamikleri özünde karmaşıktır ve zaman boyunca belirgin varyasyonlar içerir. (Örneğin: Stokastik durumlu bir sistem)

EKOLOJİK

E₁: Sistemin çevresiyle olan karşılıklı ilişkileri yüksek derecede programatiktir ve kısıtlıdır. Çevrenin kendisi oldukça basittir. (Örneğin: Kapalı bir sistem)

E₂: Sistem değişken ve karmaşık bir çevreye duyarlı bir haldedir. Potansiyel olarak karmaşık bir doğaya sahip bu dışsal faktörler sistem üzerinde etkin şekilde belirleyicidir. (Örneğin: Açık bir sistem)

Bu altı noktanın üçer üçer birleştirilmesi ile her biri farklı işlenebilirliklere (*tractability*) sahip 2³ yani gestalt ve mekanizm düzlemleri de dahil 8 düzlem elde edilir.

Bir sistem analistinin elindeki sistemin kesin olarak hangi analitik kategori altına düştüğünü bulma problemiyle yüzyüze gelmekteyiz. Bunun sistemin çeşitli boyutları (yapısal, davranışsal ve ekolojik) ile sergilediğı özelliklerin bir fonksiyonu olduğunu bilmekteyiz.

Tablo-2: Basit ve Karmaşık Sistemler Arasındaki Farklar

BOYUTSAL DEĞİŞKENLER	VERİLEN DEĞER	
	İzlenebilir	İzlenemez
EKOLOJİK		
a. Sistemin ekolojik özelliklerinin belirlenme şekli	İçsel	Dışsal
b. Sistemin ekolojik arayüzlerinin doğası	Seçici	Evrensel
c. Sistemin bulunduğu çevrenin görece karmaşıklığı	İyi huylu ya da Dingin	Çalkantılı ya da Değişken
YAPISAL		
a. Ampirik olarak erişilebilen sahanın oranı	Yüksek	Düşük
b. Yapısal özellikler arasındaki homojenlik derecesi	Yüksek	Düşük
c. Bunların dağılımındaki	Yüksek	Düşük

simetri derecesi		
d. Sahanın kesin büyüklüğü	Küçük	Büyük
e. Özellik dağılımlarının yoğunluğu	Düşük	Yüksek
DİNAMİK		
a. Herbir sistem bileşeni için mevcut olan davranışsal alternatifler (roller)	Az	Çok
b. Her bir parçanın meşgul olabileceği farklı arayüz çeşitleri	Az	Çok
c. Parçalarla bütün arasındaki ilişkilerin doğası	Bağımlı	Yarı özerk
d. Herhangi verili bir girdi ya da herhangi verili bir çıktı karşısında bileşenin kullanabileceği farklı oluşumsal durum çeşitliliği	Bir	Birkaç ya da Çok

2.7.2 Foster'ın Karmaşık Sistemler Sınıflandırması

Foster (2005) karmaşık sistemleri şu şekilde sınıflandırmıştır:

1. Birinci sınıf karmaşık sistemler (enerjinin empoze edildiği durum):

Bu tür sistem enerjinin kimyasal öğelere empoze edildiği fizyo kimyasal çerçevede varlık gösterir. Bu sistemler enerjiyi hareket, ısı ve ışık olarak dağıttığı için fraktallar, türbülans, ve Bernard hücreleri gibi uyarlamalı olmayan yapılar ve örüntüler meydana gelir. Bu tür karmaşıklığın varlığında ortaya çıkan dinamikler hem konvansiyonel dinamiksel matematikle hem de doğrusal olmaya dinamiksel tekniklerle modellenebilir.

2. İkinci sınıf karmaşık sistemler (bilginin empoze edildiği enerjinin kazanıldığı durum):

Bu sistem dışarıdan bilgiyi alarak enerji kazanımı üzerinde bir derece kontrol sağlamasına izin verecek bilgi yapılarına dönüştürür. Burada bilgi dış dünyadaki öğelerle bağlantı kurabilme kapasitesinden başka bir şey değildir. Enerji kazanımı

elbette fiziksel yapıların oluşmasını (formasyonunu) gerektirir. Bu düzeydeki karmaşıklık bilginin genetik olarak kodlandığı ve doğal seçilime maruz kaldığı biyoloji alanında işlemektedir. Başka bir deyişle bilgi deneyim tarafından empoze edilir. Memeliler gibi beyne sahip daha gelişkin türler örneğinde olduğu gibi bilgi avlanma gibi deneyimlerden elde edilip genetik olmayan şekilde aktarılabilir. Bu durumda beyin gelişmişliği doğal seçim için önemli olmaktadır. Açık olarak bu sistemler karmaşık ve uyarlamalıdır.

3. Üçüncü sınıf karmaşık sistemler (Bilginin kazanıldığı durum):

Bu karmaşıklık türü biyolojik sistem çevresiyle yalnızca bir veri alanı olarak etkileştiğinde değil ayrıca mümkün dünyaların imajları doğrultusuyla etkileştiği, yani öğeler arasında gerçek gözlenmiş dünyada var olmak zorunda olmayan bağlantıları içeren bilgi yapılarıyla etkileştiği durumda var olur. Burada artık bilgi yalnızca deneyimlerin birikimi değil ayrıca algılanan gerçekliğin görünüşünü belirleyen “zihinsel (*mental*) modellerin” de kaynağıdır. Bu gerçekleştiğinde elbette bazı zihinsel modeller de bilgi kümesinin bir parçası olacaktır. İnsan varlığında bazı bilgiler empoze edilirken bazı bilgiler de kazanılır. Gerçeklikten gelen bir geri bildirim ve gerçekliğe giden bir ileri bildirim vardır. Bu tür karmaşık sistemleri çevrenin tekrar düzenlenip sömürüldüğü ekonomik gelişimin erken aşamalarında buluruz. Bu tür sistemler karmaşık ve uyarlamalıdır ama buradaki adaptasyon doğal seçimden daha fazlasıdır ve yaratıcılık içerir.

4. Dördüncü düzen (sınıf) karmaşık sistemler (etkileşimli (interaktif) bilgi durumu):

Bu sistemler zihinsel (*mental*) modellerin etkileşimlerinde ortaya çıkar. Benim imgelemim (hayal gücüm) hala gerçekliği bir kalıba sokabilir lakin bunun böyle olduğunun bilgisi başkalarını benim ne hayal ettiğimi hayal etmeye yönlendirir. Örneğin Maynard Keynes algılayarak gözlemlendiğinde, finansal piyasaların katılımcıları fiyatların temelleriyle değil ortalama değerlerle daha fazla ilgilenme eğilimi göstermektedirler. Bu tür karmaşık sistemler insanların gelecek için istekler ve taahhütler oluşturup gelecek içinde son tarihi olan kontratlar ve düzenlemelerin içine girdiklerinde ortaya çıkmaktadır. Bu tür karmaşıklık çok sofistike ekonomik sistemlerin meydana gelmesinin arkasındaki büyük güçtür. Bu bireylerin isteklerini “anlayışlarda” birleştirerek aksi takdirde ulaşılamaz organize karmaşıklığı yaratır. Bu ekonomide yeni bir düşünce değildir. Adam Smith kapitalizmin gücünün birbirine yeterli derecede güvenen ve anlaşılan bencil aktörlerin gelecek için mal ve hizmetlerin üretimi ve dağıtımı için işbirliği yapmasını mümkün kılacak duygu ve düşüncelerde yattığını kabul etmiştir. Bu tür sistemler birbirine bağlı mental modelleri yani birbirine bağlı bilgi kümelerini içerir. Lakin bu tür sistemler fırsatlar doğurduğu gibi tehditler de içermektedir. Eğer kolektif imgelemler pozitif geri bildirim var olduğunda gerçekçi bir olasılıkla bir ilişkinin taşınmasını keserse çok şiddetli yapısal kopukluklar sonuç olarak ortaya çıkabilir.

Foster (2005), bu karmaşıklık sınıflarında aşağıya doğru gittiğimizde bağlantıların ve bilgilerin rolünün daha önemli ve daha açık hale geldiğini ifade etmektedir. Maddelerde ilerledikçe bilgi çok daha önemli bir hale gelmekte, bilgi çevreyi şekillendirirken

çevrenin bir parçası haline gelmektedir. Foster (2005)'a göre sıkça atıfta bulunulan “bilgi” ekonomisi ya da yeni ekonomi kavramlarının 4.sınıf karmaşıklığın gelişmemiş ekonomik sistemlerde baskın olan 3.sınıf karmaşıklığından daha önemli olduğunun bir bakıma onaylanmasıdır.

2.7.3 Kendi kendine Organizasyon (*Self-Organization*)

Yaşayan bir organizma ya da büyüyen bir ekonomi gibi bir karmaşık sistem, yapısını geliştirmeli ve çevredeki değişimlerle göre içyapısını uyarlayabilmelidir. Dışsal bir tasarımcıyı iddia etmek karmaşıklığın kökeni problemine pek yanıt vermez. Sistemin çevresine hangi mekanizmalarla karşılık verdiğini bulmamız gerekir.

Burada anahtar anlayış kendi kendine organizasyon kavramıdır. Bu karmaşık bir sistemin davranışını kontrol eden merkezi bir denetleyicinin ya da dışsal bir yaratıcının olmaması anlamına gelmektedir. Kendi kendine organizasyonla başlangıçta görece basit yapı bir sistem karmaşık bir organizasyona evrilebilir. Bu süreç hem çevrenin hem de sistemin belleğinin etkisiyle sistemin dağıtık öğeleri arasındaki ilişkilerin değişimi sürecidir. Bu ancak sistemin bir dereceye kadar esnek olması ile sağlanabilir.

Cilliers (1998, s.90) kendi kendini organizasyonun tanımını şu şekilde vermektedir:

“Kendi kendine organizasyon kapasitesi, karmaşık sistemlerin, çevreleriyle baş etmek için ya da çevrelerini manipüle etmek için uyarlamalı ve kendiliğinden içsel yapılarını değiştirmelerini ve geliştirmelerini mümkün kılan bir özelliğidir.”

Kendi kendini organize eden sistemlere örnek olarak beyin ve doğal dil verilebilir.

Kendi kendine organize olan sistemlerin içyapısı bir dış tasarımcının müdahalesi veya merkezi bir içsel merkezi bir kontrol mekanizması olmadan evrim geçirmektedir. Kendi kendine organize olan sistemlerdeki bu evrim ne tamamen içsel ne de tamamen dışsal olarak belirlenmemekte ama içsel ve dışsal etkilerin karşılıklı karmaşık etkileşimleri sonucunda gerçekleşmektedir. Cilliers (1998, s.89) kendi kendine organize olan

sistemlere bir baraj gölündeki balık sürüsünü örnek vermektedir. Bu göldeki balıkların durumu, besinlerin mevcudiyeti, suyun sıcaklığı, mevcut oksijen miktarı, yılın hangi döneminde olduğuna gibi birçok değişkene bağlıdır. Bu koşullar değiştikçe balık sürüsü yeni koşullara kendini uyarlayacaktır. Lakin bu uyarlama esnasında her bir balık çıkarları doğrultusunda yalnızca kendi durumunu uyarlamakta ama bunun sonucu olarak tüm balık sürüsünün durumu çevreye göre uyarlanmaktadır. Bu uyarlama esnasında balıkların bireysel olarak durumu değişirken sonuç olarak çıktı sürü ölçeğindedir.

Kendi kendini organize eden sistemlerin belirli özellikleri vardır. Cilliers (1998, s.91) kendi kendine organize olan sistemlere dair şu özellikleri bildirmiştir: Kendi kendine organize olan sistemlerin yapısı bir tasarımın veya tamamen çevresel etkilerin sonucu değil ama sistemle çevre arasındaki etkileşimin bir sonucudur. Sistemin yapısı çevresel değişimlere karşı dinamik olarak uyarlanmaktadır. Kendi kendine organize olma doğrusal olmayan süreçleri içerir. Organize olma bir sistemin bütünsel bir özelliğidir. Burada bütünsel davranış yerel etkileşimlerden ortaya çıkmaktadır. Basit yerel etkileşimler çok karmaşık bütünsel davranışlara yol açabilir. Kendi kendine organize olan sistemleri indirgemeci bir biçimde tarif etmek pek mümkün değildir çünkü yerel birimler bütünsel etkiler hakkında bir şey bilmemektedirler ve bütünsel etkilerde bulunamamaktadırlar. Kendi kendine organize olan sistemlerin genellikle bir hafızaları vardır. Bu sistemler hafızalarında biriken deneyimlerini öğrenmede kullanırlar. Bu hafızanın büyüklüğüne göre sistem daha karmaşık hale gelebilir ve daha karmaşık durumlarla baş edebilir. Kendi kendine organize olan süreçler belirli amaçlara yönelmediği ve bu amaçlar tarafından belirlenmediği için bu süreçleri içeren sistemlerin fonksiyonunu ifade etmek zordur. Bir sistemin fonksiyonu genellikle o sistemi içeren daha büyük bir sistem bağlamında ifade edilir. Cilliers (1998, s.92) bir aslandaki endokrin sisteminin fonksiyonu hakkında konuşabilmemize rağmen aynı anda bir aslanın kendisinin fonksiyonu hakkında konuşabilmenin zor olduğunu örnek vermiştir. Yine buna benzer bir şekilde bir ekosistemdeki yırtıcı hayvanların fonksiyonuna dair konuşabilmemize rağmen bir ekosistemin fonksiyonu hakkında konuşmak pek mümkün değildir.

“Özellikle yıkımsal sonuçlara yol açan beklenmedik olaylarla karşılaştığımızda bu olayların sebebini olasılığı zayıf durumların nadir bir birleşimine atfetme eğilimi

gösteririz. Borsanın çöküşünün, bir depremin, ani ve beklenmedik bir politik şiddetin ortaya çıkmasını açıklamamız gerektiğinde bunları oluşturan faktörler birleşimini bulmaya çalışırız ve genellikle aynı faktörlerin bileşiminin tekrar oluşma olasılığının zayıf olduğunu göstermeyi umarız. Lakin bu tür bir analiz büyük karmaşık sistemlerin davranışlarının, küçük basit sistemlerin davranışlarından çıkartılarak açıklanmaya çalışılmasının bir sonucudur. Ne yazık ki bu tür bir çıkartım başarısızlıkla sonuçlanmaktadır. İçinde birçok faktörün eş zamanlı olmayan bir şekilde etkileştiği karmaşık sistemler beklenmedik ve genellikle tahmin edilemeyen davranışlar sergilemektedir. Bir karmaşık sistem aracılığıyla kendi kendini organize eden davranış olasılığını ihmal eden herhangi bir analizin açıklama gücü eksik kalacaktır” (Cilliers 1998, s. 96).

Cilliers (1998, s.94) bir sistemin kendi kendine organize olan bir sistem olabilmesi şu önkoşulların sağlanması gerektiğini belirtmiştir:

1. Çok sayıda bileşen mikroskobik birimin var olması.
2. Değişimin yerel etkileşimlerin sonucu olarak ortaya çıkması
3. Birimler arasında rekabetin var olması
4. Belli birimler arasında işbirliğinin var olması
5. Etkileşimlerin doğrusal olmaması
6. Simetri kırılmalarının gerçekleşmesi
7. Sistemin dağınık bir yapıda bulunması

Karmaşık sistemlerin analizinde kullanılabilecek yararlı bir kavram Per Bak ve Kan Chen tarafından ortaya konan kendi kendine organize olan kritiklik kavramıdır. Bu kavram çok sayıda ve birbirleri ile etkileşim halinde bulunan sistemlerin davranışlarını açıklamakta kullanılmaktadır.

Bak (1996) doğada gözlenen birçok karmaşık davranışın, çok sayıda bileşen içeren sistemlerin “kritik” bir duruma evrilme eğiliminden kaynaklandığını savunmaktadır. Bu kritik durumda küçük bir olay zincirleme bir reaksiyon başlatarak sistem çapında büyük sonuçlara yol açabilir. Bak (1996), doğadaki değişimlerin çoğunun düzgün bir eğri boyunca değil ama kırılmalar içeren yıkımlı olaylarla gerçekleştiğini belirtmektedir. Bu kritik duruma evrim herhangi bir dış müdahale olmadan gerçekleşmektedir. Bu

durum, yalnızca sistemin bireysel elementleri arasındaki dinamik etkileşimlerden meydana gelmektedir. Bak, kritik durumun kendi kendine organize olmuş olduğunu ifade etmekte ve kendi kendine organize olmuş kritikliğin karmaşıklığı üreten bilinen tek genel mekanizma olduğunu bildirmektedir.

Kendi kendine organize olan kritiklik kavramına kum yığını metaforu örneği verilmektedir. Buna göre zemin üzerine kum sabit bir hızda dökülmektedir. Bu dökülme esnasında başlangıçta kum yığınının oluşmuş bir piramit meydana gelmektedir. Lakin bu dökülme esnasında belli bir kritik andan sonra dökülen kumlar piramidin yüzeylerinden aşağıya doğru kaymaya başlar ve küçük heyelanlar oluşur. Bu heyelanlar kum döküldükçe çeşitli büyüklüklerde domino etkisi sonucu oluşabilmektedir. Kum yığını sıçramalı ve kesintili bir denge davranışı sergilemektedir. Burada sistem kendisini belirli tekil yerel bir olayın sistem çapında en geniş etkide bulunabileceği kritik bir duruma doğru organize etmektedir. Heyelanların başlamasından itibaren sistemin davranışı artık kumların bireysel davranışlarından çıkartılamamaktadır. Heyelanların dinamikleri kumların bireysel davranışlarından çıkartılamamakta ama ancak kum yığınının bütünsel davranışlarından çıkartılabilinmektedir. Böylece kendi kendine organize olan kritikliğin anlaşılmasında bütünsel bir yaklaşım gerekli hale gelmektedir.

Kendi kendine organize olan kritiklik teorisi bize kendi kendini organize eden bir sistemin kendisini katı düzenlilik ve kaos arasındaki kritik bir noktada dengelemeye çalışacağını söylemektedir.

Kendi kendine organize olan sistemlerde belleğin önemli bir rolü vardır. İster biyolojik ister sosyolojik olsun hiçbir karmaşık sistem tarihi ele alınmadan anlaşılamaz. Sistemin tarihi yalnızca sistemin anlaşılmasında rol oynamamakta aynı zamanda sistemin yapısını belirlemektedir. Kendi kendine organize olan karmaşık sistemlerde bellek dağıtık bir biçimde depolanmaktadır.

Kendi kendine organize olan kritiklik kavramı basit desenleri takip eden yıkımları (*catastrophes*), $1/f$ gürültüsünü, fraktalları (*fractals*), güç yasasını (*power law*), ve Zipf kanununu açıklamakta kullanılmaktadır.

Heylighen (2002), bilimin ve özellikle fiziğin Newton’cu mekanik paradigmadan geliştiğini ifade etmektedir. Bu paradigmaya göre gözlemlenen bütün olgular, hareketleri doğanın determinist kanunları tarafından belirlenmiş atomlara ve ya parçacıklara indirgenmektedir. Bu bakış açısına göre mevcut olan her şey geçmişte de farklı bir şekilde mevcuttur ve gelecekte de mevcut olacaktır. Bu paradigmada yaratıcılığın veya yeniliklerin yeri yoktur.

Heylighen (2002), yirminci yüzyıl biliminin, bu tür bir felsefe ile karmaşık olguların açıklanamayacağı ve modellenemeyeceği sonucuna ulaştığını iddia etmektedir. Yirminci yüzyılın ortalarından itibaren bilim adamları yeni yapıların ve yaratıcılığın ortaya çıktığı olguları çalışmaya başlamışlardır. Bilim adamlarının gerçekleştirdiği bu çalışmalar kendi kendine organizasyon ve uyarılma kavramları ekseninde bütünleşmeye başlamıştır.

Kendiliğinden yeni yapıların ortaya çıkmasının birçok örneği vardır. Bu yeni yapılar hem laboratuarda hem de günlük hayatta gözlenebilmektedir. Heylighen (2002), bunlara örnek olarak kristalleşmeyi, Benard olgusunu, mıknatıslanmayı ve Belousof-Zhabotinsky reaksiyonunu vermektedir. Bütün bu örneklerde yeni yapılar herhangi bir dışsal etki olmadan ortaya çıkmaktadır. Bu tür olayları mekanistik bir dünya anlayışı ile açıklamak mümkün değildir. Mekanik dünya anlayışı organizasyon gösteren durumlarla karşılaştığında bunları dışsal bir organize ediciye atfetme eğilimi göstermektedir. (Örneğin saat ve saatçi metaforu) Örneğin termodinamiğin ikinci kanununa göre eğer bir sistem kendi haline bırakılırsa entropi yani düzensizlik yalnızca artabilir ama azalamaz. Bu yüzden kendi kendine organize olma olgusunu açıklamak için bu tür bir paradigmadan vazgeçmemiz gerekir.

Belçikalı bir termodinamikçi olan Ilya Prigogine, kendi kendine organize olan ve dengeye ulaşmayan sistemler üzerinde 1950’lerden itibaren yaptığı çalışmalarla Nobel ödülü kazanmıştır. Prigogine çalışma arkadaşları ile birlikte “yayılgan yapılar” (*dissipative structures*) üzerine çalışmıştır. Bu tür yayılgan sistemler açık sistemlerdir yani sistemle çevresi arasında sürekli bir madde veya bilgi alışverişi mevcuttur. Bu

sistemler sürekli entropi üretmekte ama bu entropi sistemin dışına atılmaktadır. Bu tür sistemlerin en belirgin örnekleri canlı organizmalardır. Bitkiler ve hayvanlar besin veya ışık biçiminde düşük entropili enerji ve maddeyi özümsemekte daha sonra bunları yüksek entropili atık ürünler biçiminde dışarı atmaktadır. Bu durum bu sistemlerin içsel entropilerini düşürmelerini ve termodinamiğin ikinci kanunu ile baş etmelerini sağlamaktadır.

Nicolis ve Prigogine (1977) kendi kendine organizasyonun, genellikle termodinamik denge dışı bir durumdaki doğrusal olmayan sistemlerde meydana geldiğini ifade etmektedir. Heylighen (2002), termodinamikçilerin fiziksel sistemlere dair somut gözlemlerinin, sibernetikteki karmaşık ve otonom sistemlerin daha soyut ve yüksek seviyedeki analizleriyle tamamlandığını ifade etmektedir.

Kendi kendine organize olan sistemler üzerine ilk konferans 1959 yılında Chicago’da düzenlenmiştir. Düzenleyiciler arasında sibernetik disiplininin kurucuları yer almaktadır. İngiliz sibernetikçi W. Ross Ashby “kendi kendine organizasyon prensibini” önermiştir. Buna göre bileşiminden veya türünden bağımsız olarak bir dinamik sistem her zaman denge durumuna eğilim göstermektedir. Bu denge durumu çekici (*attractor*) olarak adlandırılabilir. Bu durum sistemin durumu ile ilgili belirsizlikleri azaltır ve kendi kendini organizasyona karşılık gelmektedir. Bu denge durumu sistemin farklı parçalarının karşılıklı uyarlandığı bir durum olarak yorumlanabilir.

Bir diğer sibernetikçi Heinz von Foerster “gürültüden kaynaklanan düzen” prensibini formüle etmiştir. Buna göre bir sistemi etkileyen sarsıntılar (gürültüler, *noise*) ne kadar fazla ise sistem kendini o kadar daha hızlı organize edecektir. Başka bir deyişle sistemin durumu uzayda ne kadar hareket ederse bir çekiciye ulaşması o kadar yüksek bir olasılık olacaktır. Eğer sistem hareket etmeden tek bir yerde durursa herhangi bir çekiciye ulaşamayacak böylece kendi kendine organizasyon gerçekleşmeyecektir. Prigogine benzer bir biçimde “dalgalanmalar aracılığıyla düzen” prensibini formüle etmiştir. Doğrusal olmayan sistemlerde genellikle birçok çekici bulunur. Eğer sistem çekiciler arasında bir yerde bulunuyorsa olası dalgalanmalar sistemi bir ya da diğer çekiciye doğru itecektir.

Heylighen (2002), 1950'lerden ve 1960'lardan yani kendi kendine organize olan sistemlerin termodinamikte ve sibernetikte ilk çalışılmaya başlanmasından itibaren bu sistemlere birçok örnek ve uygulama keşfedildiğini belirtmektedir. Heylighen (2002), Prigogine'nin gözlemlerinden yola çıkarak yeni bir bilimsel dünya anlayışını öne sürdüğünü ifade etmektedir. Bu yeni dünya görüşü karmaşık sistemlerin yeni bir kuramının oluşturulmasına yönelmektedir.

Bu çalışmalardan ortaya çıkan uygulamalardan biri sinirsel ağlardır. Sinirsel ağlarda bütün nöronlar birbirileri ile doğrudan veya dolaylı olarak bağlıdır ama herhangi bir merkezi veya yönetici bir nöron ya da nöron grubu yoktur. Sinirsel ağlarda hesaplama dağıtık bir biçimde gerçekleşmektedir. Sinirsel ağlardan oluşan beyin herhangi bir dış yönerge olmadan kendi kendine bilişsel yapılar oluşturabilmektedir.

Benzer bir olguya lazer ışığının üretilmesinde rastlanmaktadır. Buna göre eğer atomlar bir enerji girdisi ile uyarılırlarsa normal ışık oluşmaktadır. Ama eğer atomların ışık yayması eşzamanlı hale getirilirse sonuç olarak lazer ışını ortaya çıkmaktadır. Bu, başlangıçta bağımsız bileşenlerin daha sonra bir arada tutarlı bir biçimde çalışır hale gelmesinin bir örneğidir.

Anlık ortaya çıkan kolektif davranışın bir diğer örneğine canlı sürülerinde rastlanmaktadır. Bu davranışa kuş sürüleri, balık sürüleri, arı kovanları, koyun sürüleri örnek olarak verilebilir. Bu tür hayvan sürüleri sanki bütün bir hayvanmış gibi davranmaktadır. Bu sürülerde diğer sürü bireylerinin davranışını kontrol eden ve yönlendiren lider birey bulunmamaktadır. Sürünün davranışı kolektif olarak ortaya çıkmaktadır.

Kendi kendine organize olan sistemlere bir örnek ekosistemdir. Ekosistemde birçok farklı tür birbirleri ile etkileşirken rekabet ve işbirliği içinde bulunmaktadır. Benzer bir biçimde piyasa da kendi kendine organize olan sistemlere örnek olarak verilebilir. Ekonomik bir piyasada farklı üreticiler birbirleriyle etkileşim içinde rekabet etmekte ve tüketicilerle mal ve para alışverişi içinde bulunmaktadır. Piyasada malların doğru

miktarlarda üretilmesini ve doğru yerlere dağıtılmasını sağlayan sanki gizemli bir güç varmış gibidir. Heylighen (2002), Adam Smith'in zamanında "görünmez el" dediğine günümüzde "kendi kendine organizasyon" diyebileceğimizi ifade etmektedir.

Yukarıdaki örneklerde olduğu gibi kendi kendine organize olan bir sistemin bütünsel düzeni bireylerin yerel etkileşimlerinin bir sonucudur. Bu sistemlerde bireyler yalnızca yerel olarak etkileşimde bulunmakta ama üretilen düzen bütünsel olmaktadır.

Kendi kendine organize olan sistemlerin bir özelliği de sistemde merkezi bir kontrol ve yönetim mekanizmasının bulunmamasıdır. Kendi kendine organize olan bir sistemin çıktısı üzerinde bütün parçaların bir etkisi vardır. Merkezi bir kontrol ve yönetim mekanizmasının bulunduğu sistemlere göre kontrol mekanizması dağıtık olan sistemler zararlı ve olumsuz etkilere daha fazla tolerans ve esneklik gösterebilir. Merkezi yönetimli sistemlerde eğer merkezi yönetim zarar görürse tüm sistem zarar görür. Ama dağıtık bir sistem zarar gördüğünde sistemin diğer bileşenleri zarar gören parçanın görevlerini üstlenerek sistemin düzgün bir şekilde çalışmaya devam etmesini sağlar. Bu duruma en iyi örnek olarak beyin verilebilir. Beyinde merkezi yönetici bir nöron veya nöron grubu yoktur. Beyinin belli bölgeleri belli görevleri yerine getirmek için uzmanlaşmış olabilir. Eğer beyinin küçük bir kısmı zarar görürse bu beyinin bütünsel fonksiyonuna zarar vermez çünkü zarar gören bölümün görevleri diğer bölümler tarafından üstlenilir.

Fizikte kullanılan matematiksel yapılar genellikle doğrusaldır. Yani sonuçlar sebeplerle orantılıdır. Lakin kendi kendine organize olan sistemler genellikle doğrusal olmayan davranışlar sergilemektedirler. Bu tür sistemlerde küçük bir etki büyük bir sonuca veya büyük bir etki küçük bir sonuca neden olabilir. Bu doğrusal olmayan davranışlar bileşenler arasındaki geribildirimlerden kaynaklanmaktadır. Bu tür sistemlerde bir bileşenin diğer bir bileşen üzerindeki etkisi bir geribildirim aracılığıyla ilk bileşene geri yansıtılır. Burada sebep sonuç arasındaki ilişki döngüseldir. Geribildirim pozitif veya negatif olabilir.

Kendi kendine organize olan bir sistemin çevresine uyum sağlaması gerekmektedir. Bu yüzden kendi kendine organize olan sistemler içinde bulundukları çevreye sürekli uyulanmaktadır.

Sibernetikçilere göre uyarlama düzenleme ve kontrol problemi olarak modellenilebilir. Bu amaçtan sapmaların küçültülmesi ile gerçekleştirilebilir. Bu sistemin, sapmalara karşı koyabilmek için yeterli çeşitlilikteki davranışları veya türleri üretebilmesi ve verili sapmaya karşı koyabilmek için en uygun davranışı veya türü seçebilmesi anlamına gelmektedir. Burada çeşitlilik ve seçim anahtar öneme sahiptir. Ekolojik ve ekonomik sistemlerdeki uyarlama mekanizmalarındaki çeşitlilik ve seçim buna örnek olarak verilebilir.

Karmaşık uyarlamalı sistemler kaosu eşikinde bulunma eğilimi göstermektedirler. Bu sistemler donuk bir denge ile çalkantılı kaotik bir davranışın arasındaki dar bir alanda varlık gösterir. Karmaşık sistemlerin bu eşikte bulunma eğilimine Per Bak tarafından kendi kendine organize olan kritiklik (*self-organized criticality*) adı verilmiştir.

Heylighen (2002), kendi kendine organize olmanın altında yatan temel mekanizmanın dinamik sistemi yöneten determinist veya stokastik çeşitlilikler ile bir çekiciye ulaşana kadar durum uzayının keşfedilmesi olduğunu belirtmektedir. Bu süreç çeşitliliğin artırılması ile (örneğin sisteme gürültü eklenmesi ile) hızlandırılabilir. Herhangi bir çekiciye ulaşılmasıyla sistemin bileşenlerinin davranışları kısıtlanmakta ve kendi kendine organizasyon gerçekleşmektedir.

2.8 SONUÇ

Bu bölümde “karmaşıklık” kavramının farklı alanlarda neyi ifade ettiği üzerinde durulmuştur. Karmaşıklık, Kolmogorov karmaşıklığı olarak bir söz dizisini ifade eden en kısa programın uzunluğunu, hesapsal karmaşıklık olarak bir problemin çözümünün gerektirdiği bilgisayar kaynaklarının miktarını, dilin karmaşıklığı olarak bir alfabeden sözcüklerin üretilmesinde karşılaşılan kısıtları, bir sistemde gözlenen dinamiklerin karmaşıklığı olarak doğrusal olmayan dinamikleri, bir hücreli otomatın karmaşıklığı

olarak hücrel otomatlarda gözlenen karmaşık desenleri ifade etmektedir. Karmaşıklık kavramına yukarıdaki gibi birçok farklı alanda rastlanabilmesine rağmen bu alanlardaki karmaşıklık sınıfları arasında örtüşmeler ve eşleşmeler mevcuttur. Bir bağlamdan diğer bağlama karmaşıklık sınıflarının birbirleri ile nasıl örtüştüğü yukarıda ortaya konmuş ve bu bir tablo ile ifade edilmiştir.

Daha sonra sistemlere yönelinmiş ve karmaşık sistemler ele alınmıştır. Bir sistemin basit mi yoksa karmaşık mı olarak adlandırılmasında uyulması gereken kriterler ortaya konmaya çalışılmıştır. Bir sistemin basit ya da karmaşık olarak adlandırılmasında gözlemcinin rolü vurgulanmıştır. Bir sistemin basit mi yoksa karmaşık mı olduğunu ayırd edebilmekte kullanılabilecek, Sutherland'ın (1975) ortaya koyduğu ölçütler sunulmuştur. Sutherland'ın (1975) ortaya koyduğu bu ölçütlerin üç boyutunun var olduğu ve bunların sistemin sahasını, dinamiklerini ve ekolojisini kapsadığı gösterilmiştir. Daha sonra Foster'ın (2005) karmaşık sistemleri nasıl sınıflandırdığı incelenmiş ve karmaşık sistemlerin dört alt sınıfa ayrılabilceği gösterilmiştir. Bu karmaşıklık sınıflarında aşağı doğru inildiğinde bilginin rolünün arttığı teşhis edilmiştir. Ardından karmaşık sistemlerin önemli bir özelliği olan kendi kendine organizasyon olgusuna değinilmiştir. Karmaşık bir sistemin anlaşılmasında dışsal bir tasarımcının var sayılmasının yetersiz kaldığı ve karmaşık sistemlerin dışsal bir tasarımcı veya içsel merkezi bir kontrol mekanizması olmadan evrim geçirdiği gözlenmiştir. Karmaşık sistemlerde görülen bu kendi kendini organizasyon olgusunun incelenmesi ve açıklanabilmesi için yeni bir bilimsel paradigmanın gerekliliği görülmüştür. Kendi kendine organizasyonun açıklanmasında termodinamiğin kanunlarının yetersiz olduğunu teşhis edilmiştir. Karmaşık sistemlerin katı bir düzen ile düzensizliği ifade eden kaos arasında bir durumda var olma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu eğilimin Per Bak tarafından kendi kendine organize olan kritiklik olarak adlandırıldığı belirtilmiştir.

BÖLÜM 3

EKONOMİ VE KARMAŞIKLIK

Karmaşıklıkla karşı karşıya kalınan başlıca alanlardan biri de ekonomidir. Ekonomik sistem birçok bireyi ve bunlar arasındaki etkileşimleri içeren oldukça karmaşık bir yapıdır. Ekonominin bu karmaşıklığına rağmen şimdiye kadar ekonomi bilimi aynı fizikteki gibi ekonomide basit kanunlar bulmaya ve bu kanunları dengeye odaklanan yapısal denklemlere indirgemeye çalışmıştır. Lakin karmaşıklık teorisindeki gelişmeler ekonominin anlaşılmasında da yeni olanaklar sunmaktadır. Karmaşıklık teorisinin paradigması ekonomideki neoklasik anaakımın paradigmasından farklılık göstermektedir. Bu farklılık hem ontolojik, hem epistemolojik hem de metodolojik sonuçlara yol açmaktadır. Karmaşıklık bakış açısına göre “teorem-ispat” şeklindeki tümdengelimsel ve indirgemeci bir bilimsel yapı karmaşık sistemlerin ele alınmasında uygun değildir. Bu bölümde karmaşıklık yaklaşımının hangi bakımlardan neoklasik anaakımdan ayrıldığına değinilecektir. Bu bağlamda neoklasik anaakımın pek değinmediği ama karmaşıklık vizyonuna göre önemli olan artan getirilerden ve patika bağımlılığı olgularından bahsedilecektir. Daha sonra başlıca ekonomistlerin karmaşıklık vizyonuna olan eğilimleri değerlendirilecek ve bu bağlamda bu ekonomistler sınıflandırılacaktır.

Daha sonra karmaşıklık teorisi konusunda dünyada başta gelen en önemli bilimsel kurum olan Santa Fe enstitüsüne değinilecektir ve bu enstitünün karmaşıklığa olan yaklaşımı hakkında bilgi verilecektir. Santa Fe enstitüsünde bir araya gelen çeşitli disiplinlerden bilim adamlarının “karmaşık adaptif sistemler” kavramı ekseninde ortaklaştığı ifade edilecektir.

En son olarak da karmaşıklık araştırmalarında nasıl bir modelleme yönteminin ve metodolojinin benimsendiği ifade edilecek ve bu metodolojinin klasik bilimsel metodolojiden nasıl ayrıldığı belirtilecektir.

3.1 EKONOMİDE KARMAŞIKLIK

Ekonomi, karmaşıklık teorisinin başlıca uygulanma alanlarından birisidir. Ekonomi, Cilliers (1998) tarafından ortaya konulan aşağıdaki özellikleri sağlayarak karmaşık uyarlamalı bir sistemi meydana getirmektedir. Chilliers (1998, s.6) ekonominin karmaşık uyarlamalı bir sistem olduğuna dair şu karakteristikleri ortaya koymuştur:

Bir ülkedeki ekonomik olarak davranan bireylerin sayısı fazladır. (Genellikle birkaç milyon). Bireyler borç vererek, borç alarak, yatırım yaparak ve mallar için parayı değişerek birbirleriyle etkileşim halindedir. Bu ilişkiler sürekli olarak değişmektedir. Bir ekonomik ajan büyük sayıdaki diğer elementlerle etkileşmektedir. Etkileşim doğrusal değildir: Para bileşik faiz getirebilir; küçük bir yatırım büyük getiriler üretebilir. Ekonomik ajanlar öncelikle kendi dolaylarındaki (uzamsal anlamda olmak zorunda değil) ajanlarla etkileşirler. Bir ajanın aktivitesi tekrar ona yansiyabilir. İyi bir yatırım iyi bir getiri getirir (*positive feedback*), fazla harcamalar para arzında eksikliklere yol açabilir (*negative feedback*). Aktiviteler büyük sayıdaki ara adımlardan sonra tekrar kendine yansiyabilir. Ekonomik sistem kesin olarak açık bir sistemdir. Sanal olarak sınırlarını çizmek mümkün değildir. Devamlı olarak politik sistemden, tarımdan (iklim koşullarından), bilimden, teknolojiden, uluslararası ilişkilerden, toplumun istikrarından ve bunun gibi birçok şeyden etkilenmektedir. Malların, ürünlerin, paranın ve bilginin sistemin içine sürekli bir akışı vardır. Ekonomik sistem arz ve talep dinamikleri tarafından sürdürüldüğü için hiçbir zaman denge durumunda olamaz. Ekonomi büyüyor ya da daralıyor olabilir, hızlanıyor ya da yavaşlıyor olabilir, ama durgunluk zamanlarında bile durgun bir halde değildir. Ekonomik sistemler tarihleri tarafından büyük ölçüde etkilenirler. Bugünün fiyatları büyük ölçüde dünün fiyatlarına bağlıdır. Birçok önemli ekonomik eğilim büyük zaman dönemlerinde oldukça yavaş değişir. Bir ekonomik ajan yalnızca kendine hali hazırdaki bilgi ile davranır. Bütün diğer ajanların neler yaptığını bilmez. Örneğin bir ajan bir mal satın almak istediğinde kararını yerel faktörlere göre biçimlendirir.

Foster (2005), ekonominin aşağıda sıralanan gerekçeler nedeniyle karmaşık bir sistem olduğunu söylemektedir:

1. Sistem, organize olmuş karmaşıklığını yaratmak, sürdürmek ve genişletmek amacıyla dışarıdan aldığı enerjiyi işe, veriyi bilgiye dönüştüren dağıtık yapılardır.

2. Bu sistem başka sistemlerin parçası ya da karşıtı olabilir ama kendi içinde yine de bir bütündür. Sistemler arasındaki bağlantılar çok daha yüksek düzeyde karmaşıklığın ortaya çıkmasına izin verir.
3. Yapısal gelişmeler olarak ortaya çıkan bileşenler arasındaki bağlantıların hiyerarşik ve doğal özellikleri nedeniyle sistem, belli bir derecede yapısal tersinmezlik göstermek zorundadır. Bu durum esnek olmama ve bozuk uyarılma gibi yapısal süreksizliklere (*discontinuity*) sebep olabilir.
4. Sistemin maruz kaldığı evrimsel süreç ancak zaman boyutu da açıkça göz önünde bulundurularak anlaşılabilir. Ortaya çıkma, büyüme, durağanlık, yapısal dönüşüm aşamaları ancak zaman boyutuyla tanımlanabilir. Bu durum, çeşitliliğin üretilmesi, yenilikçilik, difüzyon, seçim, sistemin sürdürülmesi ve bakımına hangi faktörlerin yol açtığına dair teorik soruların ortaya çıkmasına neden olur.

Colander (2000a) ekonomide, basitlik ve karmaşıklık olarak adlandırdığı iki temel görüşün olduğunu ve günümüzde ekonomi bilimine basitlik görüşünün egemen olduğunu belirtmektedir. Colander’a göre

“Bu doğaldır çünkü günümüze değin basitlik görüşü bilimdeki tek araç olmuştur. Eğer bir sistem gerçekten karmaşık ise –basit yapısal denklemlere indirgenemiyorsa– bilimin de dışında idi. Bu durum, karmaşıklık biliminin gelişmesiyle değişmiştir” (Colander, 2000a, s. 2).

Colander’a göre sorun ekonominin karmaşık olup olmaması değildir. Çünkü “ekonominin karmaşık olduğu konusunda herhangi bir tereddüt ya da anlaşmazlık yoktur”. Sorun, ekonomik olguların basit yapısal denklemlere indirgenerek mi, yoksa ekonominin karmaşıklığı göz ardı edilmeyecek bir biçimde mi analiz edildiğindedir. Colander’a (2000a) göre hem basitlik görüşü hem de karmaşıklık görüşü olgulardaki basitliklerin araştırılmasıdır. Bilim bir bakıma basitliklerin ve genelliklerin araştırılması ve bunların matematiksel ifadeler şeklinde depolanmasıdır. Lakin bu çalışmada basitlik görüşü tercih edildiğinde bu bir takım dezavantajlar doğurmaktadır. Çünkü basitlik görüşü ile sistem düzeyinde görülen karmaşıklığın ele alınması mümkün değildir. Basitlik görüşünün indirgemeci yaklaşımı sistem içindeki hayati, dinamik ve etkileşimli ilişkileri yitirmekte ya da göz ardı etmektedir.

“Bilim, ister karmaşıklık bilimi ister standart bilim olsun basitlik arayışıdır – doğal süreçlerle ilgili bilgileri verimli bir şekilde depolama metodları arayışıdır. Bilim, dünyanın karmaşıklığını alıp veri sıkıştırma (*data compression*) süreci ile onu

basitleştirmektedir. Bu veri sıkıştırma birçok biçim alabilir: Başlangıçta enformel bilgi (*informal knowledge*) biçimini alır; bilim ileriye gittikçe ve derinleştikçe formel bilgi daha kusursuz hale gelir” (Colander, 2000a, s. 2).

Bu süreç ekonomi biliminin gelişiminde de gözlenebilir. Colander (2000a) ekonomiden şu örneği vermiştir: “Adam Smith örneğin rekabetin insanların genel refahına hizmet edeceği bilgisini ortaya koymuş ama bunu biçimsel bir hale getirmemiştir.” Adam Smith’in görüşleri, ekonomi biliminin gelişiminin ileri aşamalarında biçimsel hale getirilmiştir. Standart bilim şimdiye kadar olguları biçimsel hale getirmekle ilgilenmiş, gözlenen olguları matematiksel denklemlerle ifade etmek standart bilimin başlıca amaçlarından birini oluşturmuştur. Ancak, karmaşık sistemlerin özellikleri basit yapısal denklemlere indirgenememektedir. Karmaşık sistemler için heterojenlik, seçim, tarih, patika bağımlılığı ve ortaya çıkma (*emergence*) önemli alt başlıklardır. Colander, standart bilimle ilgili olarak şu tespitlerde bulunmaktadır:

“Standart bilim, veri sıkıştırmada yapısal basitleştirici metodu (*structural simplicity method*) takip eder. Basit ilişkileri araştırır, veriyi analitik olarak çözülebilir modele indirgemeye çalışır ve modelin indirgenmiş halini bulur. Newton’un ve Einstein’ın ünlü denklemleri bunun örnekleridir. Standart bilim birçok alanda çok büyük derecede başarılı olmuştur. Örneğin enerji ile kütle arasındaki ilişkinin $E = mc^2$ ‘ye indirgenmesi büyük bir başarıdır” (Colander, 2000a, s. 2).

Ekonomi de dahil olmak üzere karmaşık uyarlamalı (*adaptive*) sistemler çoğunlukla basit yapısal denklemlere indirgenememektedir. Colander (2000a) bilimin bu şekilde basit denklemlere indirgenemeyen alanlarının genel olarak bilimin dışında bırakıldığını, dışarıda bırakılmadığı durumlarda da bu alanlarda çok fazla anlaşmazlık çıktığını ifade etmektedir.

Eğer çalıştığı alanda basit yapısal denklemler bulamıyorsa bu durumda bir bilim adamının Colander’a (2000a) göre üç seçeneği vardır: “Alanı bilimin dışında ilan edebilir, yapısal bir basitlik aramaya devam edebilir, ya da basitliği başka bir alanda aramaya başlayabilir.” Karmaşıklık paradigması ile çalışan bir bilim adamı bu üç seçenekten üçüncüsü tercih edecektir:

Karmaşıklık bilimi, basit yapısal yasalara tabi olmayan bununla beraber yinelemeli (*iterative*) bir süreç olarak ele alındığında basitleştirilebilecek bir olgu sınıfının var

olduğunu kabul eder. Yinelemeli süreçlerin, tahmin edilebilir ve anlaşılabilir belli sonuçlara yol açan karakteristiklerinin olduğunu öne sürer. Bu görüşle uyumlu olarak karmaşıklık basitliği yapıda değil yinelemeli süreçte arar (Colander, 2000a, s. 3).

Karmaşık uyarlamalı sistemlerin varlığı tarih boyunca bilinirken neden şimdi karmaşıklık teorisi isminde yeni bir yaklaşım ortaya çıktığı sorulabilir ve böyle bir yaklaşımın çok önceden ortaya çıkmış olması gerekliliği savunulabilir. Bunun yanıtı bilgisayar teknolojisinin günümüzdeki ulaştığı düzey ve araştırmacılara sunduğu olanaklardır. Karmaşık uyarlamalı sistemlerin varlığının bilinmesine rağmen bu sistemlerle baş edebilmek için gerekli araçlar ancak bilgisayar teknolojisindeki (hem yazılımsal hem de donanımsal) gelişmeler sayesinde mevcut hale gelmiştir.

Karmaşık sistem teorisi, neoklasik teori aksine yalnızca öğelerle değil öğeler arasındaki ilişkilerle de ilgilenir. Neoklasik teori denge varsayımına dayanmaktadır ve buna göre ekonomik sistem denge durumundadır ya da denge durumuna ulaşmayı amaçlamaktadır. Böyle bir denge durumu ancak öğelerin saat düzeneği biçiminde çalıştığı bir durumda mümkündür. Bu denge kavramı mekanikten alınmış statik bir denge tanımıdır. Oysaki ekonomik sistemlerde bize dinamik bir denge tanımı gerekmektedir. (Örneğin Termodinamiğin denge tanımına benzer bir tanım) Neoklasik teorinin temel aldığı paradigma ayrıca evrime izin vermemektedir. Foster (2005) bu konuda şunları ifade etmektedir:

“Ele alınan sistemin organize karmaşıklığının, mekanizması denge çözümünün çıkarılabileceği belirli bir matematiksel fonksiyon kümesiyle temsil edilebilecek derecede iyi tanımlanmış olduğu varsayılmaktadır. (Geleneksel ekonomik teoride sistemin organizasyonu oldukça iyi tanımlanmış varsayılır, sistem içi mekanizmalar matematiksel fonksiyonlar kümesi olarak ifade edilir ve bu fonksiyonlardan da denge çözümü matematiksel olarak çıkartılır.) Sorun, bu tür özellikleri olan sistemlerin evrim geçirememesidir. Evrim ancak sistemin hem iç düzeninin hem de dış çevre ile olan ilişkilerinin yapısal olarak değişmesiyle gerçekleşebilir” (Foster, 2005).

Foster (2005), karmaşık sistemler yaklaşımının ekonomiye uygulanmasının, Herbert Simon, Friedrich von Hayek, Gunnar Myrdal ve Nicholas Georgescu-Roegen gibi birçok ekonomistin bu tür düşünceleri sunmasına rağmen sınırlı kaldığını ifade etmektedir. Foster (2005), Kenneth Arrow ve Brian Arthur’un 1980’lerin sonunda

karmaşıklık bilimi araştırmaları için Santa Fe Enstitüsünün kuruluşunda etkin bir rol oynamalarına rağmen ekonomistlerin bu bilim adamlarının katkılarının ilginin artan getiriler üzerine yoğunlaştığını belirtmektedir. Ayrıca Foster (2005), karmaşık uyarlamalı sistemler yaklaşımının işletme yönetimi alanında 1990’lardan itibaren uygulanmaya başlanmasına rağmen evrimci ekonomistlerin ekonomik sistemleri kendi kendini organize eden dağıtık yapılar olarak düşünen daha sınırlı bir bakış açısına sahip olduklarını ifade etmektedir. Foster (2005) Post Keynesyenlerin karmaşık sistem perspektifinin aydınlatıcı rolüne ilgisiz kaldıklarını ve bu ekonomistlerin ilgisinin yalnızca “karmaşık dinamiklerin” yararlılığı üzerine olduğunu belirtmektedir. Foster (2005) neo-Austrian ekonomistlerin karmaşık sistem yaklaşımına en açık heterodox gurubu oluşturduğunu ama bu ekonomistlerin neoklasik teori üzerinde etkili olmadığını ifade etmektedir.

Montgomery (2000) karmaşıklık teorisi ile genel denge temelli neoklasik teori arasındaki farklılıkları şu şekilde özetlemektedir:

1. “Neoklasik teori doğrusallaştırma (*linearization*) üzerine (geldiği 19.yy fiziği gibi) temellenmişken, karmaşıklık teorisi ekonomik olgunun doğrusal olmayan özelliğini vurgular (Brock 1997, s.387 ; Arthur 1990, s. 99 ; Arthur *et al.* 1997a, s. 2-5).
2. Neoklasik teori, kitlesel (toplam , *aggregate*) davranışın izole olarak ele alınmış temsili ajanın davranışının incelenerek tamamen anlaşılabilceği düşüncesini sürdürürken, karmaşıklık teorisyenleri kitlesel davranışın kitlenin içindeki aktörler arasındaki derin etkileşimlerin farkına varmadan anlaşılamayacağını öne sürerler (Brock 1988, s. 82; Arthur *et al.* 1997a, s. 3-9; Katz ve Shapiro 1986; North 1997, s. 227 ; Krugman 1997, s. 241-242).
3. Neoklasik teori, ekonomi biliminin temel kavramı olarak “denge”yi vurgularken, karmaşıklık teorisyenleri temelde dengesizlik (*disequilibrium*) süreçleri üzerinde durmaktadırlar (Arthur 1988:9-13 , 1990 , 1996 ; Arthur *et al.* 1997a: 4-6).
4. Neoklasik teori “rasyonel” beklentileri benimserken, karmaşıklık teorisi beklenti oluşturma (*expectations-formation*) teorilerinin üzerinde durarak gerçek ekonomideki ajanların sayesinde aslında öğrendikleri uyarlamalı, evrimsel, tümevarımsal ve “el yordamı ile yürüten” süreçleri vurgularlar (Arthur *et al.* 1987, 1997a:7-11; Lane 1997 ; Tesfatsion 1997).
5. Neoklasik teori, üretim süreçlerinde azalan getiriler (ya da negatif geribildirim) varsayımı üzerine temellenmişken karmaşıklık teorisi artan getirilerin ya da (pozitif geribildirim) birçok süreçte genel ve ekonomik olarak önemli

olduğunun üzerinde dururlar (Kaldor 1970; David 1985; Arthur et al. 1987, Arthur 1988, 1999, 1996).

6. Neoklasik teori, daha önceki kararların şimdiki kararları kısıtlamadığı ve kurumların akışkan olduğu gelip-geçici bir dünyada işler görünürken, karmaşıklık teorisi patika bağımlılığının, uyarlamalı evrimin (*adaptive evolution*), ve kurumsal yapının hayati öneminin üzerinde durur.
7. Neoklasik teori, basit politika reçetelerine ulaşırlarken, karmaşıklık teorisinin önerdiği politikaların içerikleri daha karmaşıktır” (Montgomery, 2000).

Ekonomiye neoklasik yaklaşım ile karmaşıklık yaklaşımı arasında derin farklar vardır. Farklı yaklaşımı benimseyen ekonomistler farklı soruları sormakta ve farklı yöntemleri kullanmaktadırlar. Neoklasik teori, teoremleri tümdengelsel bir yöntemle ispatlayarak gelişim kaydederken karmaşıklık yaklaşımı bilgisayar simülasyonları ile konusunu aydınlatmaya çalışmaktadır. Neoklasik teori denge kavramına dayanırken, karmaşıklık yaklaşımı heterojenliği, tarihi, öğrenmeyi, yerel etkileşimleri ve denge dışı dinamikleri de ele almaktadır. Neoklasik teori ekonomiyi “teori-ispat” yöntemi ile anlamaya çalışırken, karmaşıklık yaklaşımı makro düzeni oluşturan mikro kuralları bulmaya çalışarak ekonominin işleyişini anlamaya çalışmaktadır. Arthur’un ifadesiyle

“ “Santa-Fe yaklaşımı” ya da karmaşıklık yaklaşımı standart teoriye bir ek değil denge dışı (*out-of-equilibrium*) düzeyde daha genel bir teoridir” (Arthur, 2000, s. 20).

3.1.1 Pozitif Geribildirimler ve Artan Getiriler

Ekonomide artan getirilerin sonucu olarak pozitif geri bildirimler gözlenebilmektedir. Ancak, neoklasik teori denge üzerine şartlandığı için dengenin sağlanması için negatif geribildirimler yani azalan getiriler varsayma eğilimindedir. Arthur (2000), pozitif geri bildirimlerin varlığının karmaşık olguların ortaya çıkmasında rol oynadığını ifade ederek iki alandan örnek vermiştir. Bunlardan birinci örnek nükleer reaktörlerle ilgilidir. Buna ABD’de göre başlangıçta üç tane nükleer santral teknolojisi vardır (hafif su, ağır su ve gaz soğutmalı) . Her teknoloji daha çok benimsendikçe daha fazla gelişmektedir yani pozitif geribildirim mevcuttur. Başlangıçta her teknoloji eşit şansa ve eşit pazar payına sahiptir. Ancak, bu teknolojilerden biri başlangıçta küçük de olsa bir üstünlük

elde ederse baskın hale gelecektir, ki öyle de olmuştur. ABD de hafif su reaktörleri neredeyse tamamen baskın duruma gelmiştir. Arthur (2000)'in ikinci örneği internet alanındandır. İnternet alanında başlangıçta yine eşit şansa sahip üç online servis şirketi vardır: Prodigy, CompuServe ve American Online. Her şirket daha fazla üye kazandığında daha geniş servis seçeneklerini müşterilerine sunmaktadır yani pozitif bir geribildirim mevcuttur. Yine bu örnekte de American online erken rekabet döneminde üstünlük elde ederek baskın hale gelmiştir.

Arthur (2000), Marshall'ın da çok uzun bir zaman önce yukarıdaki bu olgulara benzer olguları teşhis ettiğini bildirmektedir. Marshall'a göre eğer bir şirket pazar payı büyürken iyi bir başlangıç yaparsa şirket tekel haline gelecektir.

3.1.2 Patika bağımlılığı (*Path Dependence*)

Patika bağımlılığı şimdiki kararların geçmişteki kararlara bağlı olduğunu ifade etmektedir. Patika bağımlılığı karmaşık sistemlerin önemli bir özelliğidir. Karmaşık sistemlerin bir tarihi vardır ve karmaşık sistemler bu tarihe göre şekillenirler.

Patika bağımlılığı aşağıdaki kupa (Polya) süreci ile betimlenebilir. Bu sürece bir kırmızı bir de beyaz top içeren bir kupa ile başlanmaktadır. Daha sonra kupadan rastgele çekilişler yapılmaktadır. Eğer çekilen top kırmızı ise top kupaya geri atılmakta ve kupaya bir diğer kırmızı top daha eklenmektedir. Eğer çekilen top beyaz ise yine çekilen top kupaya geri konmakta ve kupaya bir beyaz top daha eklenmektedir. Eğer bunu birçok defa tekrar edersek başlangıçtaki çekilişlere bağlı olarak beyaz ya da kırmızı toplardan biri baskın hale gelecektir. Bu süreç patika bağımlılığının bir örneğidir. Buna göre sistemin sonraki aşamalarındaki hali başlangıçtaki seçimlere bağlıdır.

Patika bağımlılığının önemli örnekleri teknolojinin gelişiminde gözlenebilir. Teknolojideki bu patika bağımlılığının başlıca örneği literatürde QWERTY hikâyesi olarak bilinmektedir. QWERTY hikayesi daktilonun evrimini ele almaktadır. Daktilonun icadındaki tuşların “QWERTY” olarak adlandırılan yerleşimi daha sonra sabit hale gelmiştir oysaki bu yerleşim verimli bir yerleşim değildir. Ama daktilonun

tuşlarının yerleşimindeki erken aşamalardaki bir tercih sonraki aşamalardaki tercihleri de etkilemiş ve bu tuş kalıbı standart hale gelmiştir.

3.2 BAŞLICA EKONOMİSTLERDE KARMAŞIKLIK

Fontana (2008), ekonominin karmaşıklığına dair ifadelerin çeşitli ekonomistler tarafından ortaya konduğunu ifade etmektedir. Başlıca ekonomistlerin karmaşıklık vizyonu açısından değerlendirilmesi şu şekildedir:

3.2.1 Adam Smith

Colander'in (2000b), Adam Smith'i karmaşıklığın problemlerini fark ettiği için ve artan getirilere yaptığı vurgu sebebiyle karmaşıklık görüşüne eğilimini yüksek olarak değerlendirmiştir. Colander'in (2000b) ayrıca Adam Smith'in piyasa olanağı argümanını (*vent for surplus*) karmaşıklık perspektifiyle uyumlu görmektedir. Adam Smith ekonomik düşünceyi ilk sistemleştiren kişidir ve bu yüzden de ekonominin babası olarak görülür. Colander'in (2000b), Adam Smith'i karmaşıklık perspektifinden tutarsız olarak görmektedir ama bu tutarsızlık için iyi bir sebep olduğunu belirtmektedir. Ayrıca Colander (2000b), Adam Smith'in açık olmayan politika reçetelerini, kesin politika reçetelerine yol açmayan karmaşıklık perspektifiyle uyumlu olarak görmektedir. Sonuç olarak Colander (2000b) Adam Smith'in karmaşıklık perspektifine olan eğilimini yüksek olarak görmektedir.

3.2.2 Thomas Malthus

Colander (2000b), Malthus'u karmaşıklık görüşü bağlamında tarafsız olarak değerlendirmiştir çünkü Colander'a (2000b)'a göre Malthus'un tarafsızlığı bir boyutuyla yüksek ve düşük eğilimlerinin birbirini dengelemesinin bir sonucudur. Colander (2000b), Malthus'un popülasyon üzerine çalışmaları sebebiyle karmaşıklık görüşüne eğiliminin yükseldiğini ama diğer taraftan azalan getirilere odaklanması sebebiyle karmaşıklık görüşüne eğiliminin düştüğünü ifade etmektedir. Ayrıca

Colander'a (2000) göre Malthus'un, endojen büyüme süreçlerine izin vermemesi ile de karmaşıklık görüşüne eğilimi düşmektedir.

3.2.3 David Ricardo

Colander (2000b)'a göre Ricardo ekonomideki basitlik görüşünün başlıca temsilcilerinden biridir. Ricardo Smith'in düşüncelerini ekonomik kanunlar olarak biçimlendirmiştir. Colander (2000b), Ricardo'nun ortaya koyduğu karşılaştırmalı üstünlükler teorisinin ekonomi tarihinin en önemli gelişmelerinden birini oluşturduğunu ifade etmektedir. Ayrıca Ricardo emek-değer teorisini geliştirmiş ve ticaret'in neden geliştiği argümanını ortaya koymuştur. Colander'a (2000b) göre ayrıca Ricardo neoklasik marjinal üretkenlik teorisinin de öncüsüdür. Colander'a (2000b) göre Ricardo'nun karmaşıklık görüşüne eğilimi düşüktür çünkü biçimlemeleri (formalizasyonları) ekonomistlerin yapısal basitlik görüşüne odaklanmalarını sağlamış ve Adam Smith'in artan getiriler üzerine vurgusunun görmezlikten gelinmesini sağlamıştır.

3.2.4 John Stuart Mill

Colander'a (2000b) göre Mill, biçimsel klasik düşünceye çok az katkı yapmış olgun bir klasik ekonomist olarak sunulmaktadır. Colander'a (2000b) göre Mill, ekonomiyi hümanist bir duruma çekmiş, klasik ekonomiyi ücretler fonu teorisinden (*wage fund theory*) uzaklaştırmış ve dağıtımın sosyal kanunlarıyla (*social laws of distribution*) üretimin teknik kanunları (*technical laws of production*) arasındaki ayrımı tasvir etmiştir. Colander'a (2000b) göre Mill'in karmaşıklık görüşüne eğilimi yüksektir. Colander'a (2000b) göre Mill'in dağıtımın sosyal kanunları üzerine odaklanması ekonominin karmaşıklığının fark edilmesinde önemli bir gelişmedir. Colander (2000b) ayrıca Mill'in sosyal ve ekonomik olgunun bölünemeyeceğini fark ettiğini de bildirmektedir. Bu da yine olguları alt parçalarına bölerek analiz eden basitlik görüşüne karşı karmaşıklık görüşüne Mill'in eğilimini göstermektedir.

3.2.5 Karl Marx

Colander'a (2000b) göre Marx, ana akımın ideolojik görüşlerini paylaşmayan bir klasik ekonomist olarak genellikle sunulur. Colander (2000b) Marx'ın emek değer teorisini sömürü teorisine dönüştürdüğünü ve onunla ilgili derin problemleri gösterdiğini ifade etmektedir. Ayrıca Colander (2000b) Marx'ın artan getiriler, ekonomilerin büyüme eğilimi ve bu büyüme sürecinde dağıtımın nasıl sağlandığı üzerine odaklandığını belirtmektedir.

Colander'a (2000b) göre Marx'ın karmaşıklık görüşüne eğilimi yüksektir. Bu yalnızca Marx'ın indirgemeci olmayan açık fikirli analizlerinden kaynaklanmamakta ayrıca sınıflar üzerine biçimsel analizinden ve bireylerin rasyonelliklerinin etraflarındaki sosyal durumdan kaynaklandığı vurgusundan kaynaklanmaktadır. Marx'ın yine devrim teorisi ekonomik sistemin karmaşık gelişimini aydınlatmaktadır.

3.2.6 Leon Walras

Colander'a (2000b) göre Walras ekonomiyi genel denge teorisine oturtan ve marjinalizmi (*marginalism*) geliştiren ekonomist olarak görülmektedir. Walras ekonomiyi basit matematiksel bir yapı haline getirmiştir ve indirgemeci biçimlemeleri vardır bu yüzden Colander (2000b), Walras'ın karmaşıklık görüşüne eğilimini düşük olarak değerlendirmiştir.

3.2.7 Marshall

Fontana (2008), Marshall'ın ekonominin ruhuna en yakın bilimin matematiksel fizik değil biyoloji olduğunu ve fizikte olduğu gibi ekonomide kesin ekonomik kanunlar diye bir şeyin olmadığını düşündüğünü bildirmiştir (Marshall, 1961, s. 14). Fontana (2008), Marshall'ın, insan davranışının kesinsizliği ve çeşitliliği sebebiyle kesinliğe ulaşamayacağını ve sonuç olarak tümünden gelimsel bir biçimde matematiğin ekonomide geniş bir şekilde kullanılmasını uygun bulmadığını belirtmiştir (Marshall 1961, s. 14).

Colander (2000b), Marshall'ın arz ve talep kavramlarının tanıtılmasında anahtar bir rol oynadığını ama teoriyi biçimlendirme de başarısız olduğunu vurgulamaktadır. Marshall ekonomiyi hem verimli bir bilimsel alan hem de insanlığın gelişmesinde rol oynayacak bir araç olarak görmektedir. Marshall biyolojik analogilerin ekonomiye saat düzeneği analogisinden daha uygun olduğunu belirtmiştir. Marshall ekonomideki bir çok alanda karmaşıklığı teşhis etmiştir. Marshall ekonomideki karmaşıklıkla baş etmek için “eğitilmiş sağduyu” kavramına çokça referans vermiştir. Ayrıca Colander (2000b) Marshall'ın genel dengenin herhangi bir basit belirtimini (*specification*) reddettiğini ve Prensipler kitabının 21. notunda kitlesel (*aggregate*) ekonominin gerçek temellerinin termodinamikte bulunabileceğini savunduğunu bildirmektedir. Bu düşünceleriyle Marshall'ın karmaşıklık görüşüne eğilimli olduğunu söyleyebiliriz.

Comim (2000), Marshall'a göre ekonomik düşünmenin fiziksel statiklere (*statics*) benzer metotlarla başlaması ve dereceli olarak daha biyolojik bir tona evrilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Marshall sağduyu (*common sense*) kavramına özel bir önem atfetmiş ve bunu karmaşıklıkla baş etmek için bir araç olarak görmüştür.

Comim (2000), insan davranışlarının dünyası bir bütün olarak çok geniş ve karmaşık olduğu için Marshall'a göre onun önsel ve birleşik bir entelektüel çaba ile analiz edilemeyeceğine inandığını belirtmektedir. Comim (2000), Marshall'ın yazdıklarında karmaşıklık konusundan çokça bahsedildiğini ifade etmektedir. Comim (2000) örneğin Marshall'ın “prensipler” (*Principles*) ve “Endüstri ve Ticaret” (*Industry and Trade*) gibi ana kitaplarında, “ekonominin şimdiki durumu” (1885) (*The present position of econpmics*) ve “eski ve yeni ekonomistler kuşağı” (*The old Generation of Economics and the New*) (1897) gibi makalelerinde ve, Edgeworth (bak Pigou 1925) gibi diğer ekonomistlerle yazışmalarında karmaşıklık konusu yer aldığını bildirmektedir. Comim (2000), Marshall'ın ekonomistlerin çalışma amacının karmaşık sebeplerin birbiri ile dokunmuş etkilerini çözülmesi olduğunu ifade ettiğini belirtmiştir.

Comim (2000) Marshall için karmaşıklığın önemli bir kavram olduğunu belirtmiş ve karmaşıklığın Marshall'da üç alt başlıkta bulunabileceğini ifade etmiştir:

1. Marshall'ın ekonomik olguların karmaşık doğasına yaptığı referanslarda,
2. Ekonomik sistemin karmaşıklığı ile ilgili doğrudan söylediği ifadelerde,
3. Halen karmaşık sistemler çalışmaları tarafından çalışılan kategorilere yaptığı vurgularda.

Marshall ekonomik sistemleri ele alırken karmaşıklığa çokça referansta bulunmuştur (Comim, 2000):

“Marshall’a göre: arz ve talep arasındaki karşılıklı etkileşim karmaşıktır ([1920] 1961: xv); “endüstriyel organizma” karmaşıktır ([1920] 1961: 47,248); modern para piyasası formları karmaşıktır ([1920] 1961: 72); imalatın ölçekleri (scale of manufactures) karmaşıktır ([1920] 1961: 256); spekülâtörlerin davranışlarının iyi ve kötü etkileri karmaşıktır ([1920] 1961: 293); büyük anonim şirket yönetiminin ve yönetsel işletmenin problemleri karmaşıktır ([1920] 1961: 306-308); “değer” problemi (value problem) karmaşıktır ([1920] 1961: 366); toprağın mülkiyet hakkı hadisesi karmaşıktır ([1920] 1961: 413); uzun dönemlerle ilişkili sorular karmaşıktır ([1920] 1961: 456); kümülatif etkiler karmaşıktır ([1920] 1961: 559); “organik bütünlük” düşüncesi karmaşıktır ([1920] 1961: 582); borçlu ve alacaklı arasındaki ilişkiler karmaşıktır ([1920] 1961: 650); endüstriyel verimlilikle çalışma saati arasındaki ilişki karmaşıktır ([1920] 1961: 693); üretimin sınırlarını kontrol eden sebepler karmaşıktır ([1920] 1961: 849) ve heterojen arz güçleri (the heterogeneous forces of supply) karmaşıktır ([1920] 1961: 852)” (Comim, 2000).

Comim’e (2000) göre Marshall’ın ekonomik sistemlerin karmaşık olduğuna dair kabulü Marshall’ın şu ifadelerinden de çıkartılabilinmektedir: “Doğanın davranışı karmaşıktır uzun vadede onun basit olduğu varsaymak ve onu temel önermeler serisi ile ifade etmeye çalışmak pek bir şey kazandırmaz” ([1920] 1961: x). “İnsan bilimi karmaşıktır ve onun kanunları kesin değildir” ([1920] 1961: 32). ekonomik problemimiz “tek bir bakış açısıyla odaklanmak için çok karmaşıktır” ([1920] 1961: 545). “Sosyo-ekonomik organizma ilk bakışta görüldüğünden daha hassas (*delicate*) ve karmaşıktır” ([1920] 1961: 712). Comim (2000) ayrıca Marshall’ın günümüzde karmaşıklık teorisi içinde çalışılan konulara referans verdiğini belirtmekte ve Marshall’ın “ekonominin, devamlı değişen ve hemen göze çarpmayan insan doğasının güçleri ile ilgilendiği için kesin fiziksel bilimlerle karşılaştırılamayacağını” ([1920] 1961: 14) öne sürdüğünü ifade etmektedir.

Marshall ekonomideki karmaşıklıkla baş etmek için eğitilmiş sağduyu kavramına başvurmuş ve bunu her problemdeki nihai belirleyici öge olarak düşünmüştür. Marshall sağduyuyu pratik karmaşık problemlerin üzerine gitmek için bir araç olarak tasvir etmiştir.

Comim'e (2000) göre Marshall'ın karmaşıklık üzerine ifadeleri beş alt başlıkta özetlenebilir:

1. Karmaşıklık ekonomik sistemlerin önemli bir özelliğidir. Ekonomik güçler evrim geçirmekte, birikerek çoğalan (*cumulative*) bir şekilde bulunmakta, doğrusalsızlıklar sergilemekte ve zamansal geri dönüşsüzlükler ortaya koymaktadır.
2. Karmaşıklık, ekonomik akıl yürütmenin pratik yararlılığı ile yakından ilişkili bir problemdir; gerçek ekonomi (*economics proper*) alanına aittir.
3. Karmaşıklık eğitilmiş sağduyu (*trained common sense*) ile ele alınabilir.
4. Karmaşıklık ve sağduyu örneğin şunlar aracılığıyla somut olarak ilişkilidir:
 - a. ekonomik problemlerin günlük hayatın daha geniş bir çerçevesi içinde bağlama yerleştirilmesi
 - b. ekonominin kullanımında tarihi ve coğrafi farklılıkların tanınması
 - c. teorilerin test edilmesinde ampirik kanıtların rolünün dikkatli olarak tetkik edilmesi

3.2.8 Keynes

Fontana (2008), Keynes'in ekonomik materyalin "birçok bakımdan zaman içinde homojen olmayan" doğası ile ilgilendiğini belirtmiştir (Keynes 1973, s.297). Keynes'e göre ekonomi, zaman içinde değişen ve analizi daha az hassas hale getiren "motivasyonlarla, beklentilerle, psikolojik belirsizliklerle" baş etmek zorunda olduğundan genelleştirmeler her zaman mümkün olmamaktadır (Fontana, 2008).

Colander'a (2000b), Keynes'in karmaşıklığa olan eğilimini tarafsız (Nötr) olarak değerlendirmektedir. Colander'a (2000b) göre Keynes, ekonometriyi sorgulamasıyla, ekonominin ergodik olmadığına olan vurgusu ve olasılık üzerine çalışmalarıyla karmaşıklık perspektifine eğilim göstermektedir. Ama politikada görüşlerini basit statik

modellerle ifade ederek basitlik görüşüne eğilim göstermektedir. Sonuç olarak Colander (2000b), Keynes'in eğilimini tarafsız olarak değerlendirmektedir.

3.2.9 Hayek

Fontana (2008), Hayek'in algısal ve kendiliğinden düzenler (*sensory and spontaneous orders*) üzerine yazarken, kendi kendini koordinasyon ve kendi kendini kontrol ile karakterize olan kendi kendine organize olan yapıların doğasını tarif ettiğini ifade etmiştir. Fontana (2008), Hayek'e göre düzenin bağlantılar arasında olduğunu ve düzenin “davranışlarının, meydana geldiği diğer elementlerin ilişkileri ve karşılıklı ayarlamaları tarafından belirlenmekte” olduğunu ve bağlantıların birbirlerini karşılıklı olarak etkileyebileceklerini belirtmiştir (Hayek 1967, s. 73). Fontana (2008), Hayek'e göre kendiliğinden düzenlerin bireylerin kendi seçtikleri hedeflere ulaşma girişimlerinin bir sonucu olduğunu ifade etmiştir. Fontana (2008)'ya göre heterojenliği belirsizliği ve bağlantıları kapsayacak metotların yokluğunda bu bilginlerin ekonominin karmaşık doğasına dair spekülasyonları soyut ele alımlar olarak yorumlanmıştır: Marshall'ın ormandaki ağaçlar evrimsel metaforu, Keynes'in hayvan ruhları (*animal spirits*) ve Hayek'in kendiliğinden düzeni genellikle formalizasyona (biçimlenmeye) elverişsiz olarak görünmektedir. Ekonominin aksiyomatik ve matematiksel hale getirilmesinin ekonomi biliminin temel amacı haline gelmesiyle bu kavramların göz ardı edilmesi sonucu doğmuştur. Lakin son zamanlarda matematikteki ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler daha önce metafiziksel ve biçimselleştirmeye uygun görülmeyen bu olguları bilimsel bir platforma taşımıştır.

Colander (2000b), Hayek'e standart düşünce tarihinde kısaca yer verildiğini, bunun sebebinin de hem 1980'e kadar yaşaması hem de sürekli evrimleşen çalışmalarının standart kalıba uymamasından kaynaklandığını ifade etmektedir. Colander (2000b), Hayek'in vizyonu modern karmaşıklık tanımına çok yaklaştığını ama karmaşıklık alanında herhangi bir ampirik ve analitik çalışmayı yürütmediğini ifade etmektedir.

Colander'a (2000b), göre Hayek karmaşık olgunun doğasını anlamakta ve onu ekonomiyle doğru bir şekilde ilişkilendirmektedir. Hayek'in kendiliğinden

organizasyon vurgusu karmaşıklık yaklaşımıyla örtüşmektedir. Yine Colander’a (2000b), göre Hayek’in fiyatların, herhangi bir bireyin hesaplamadığı ve hesaplayamayacağı sistemsel bilgi içerdiği düşüncesine odaklanması karmaşıklık yaklaşımıyla örtüşmektedir. Colander (2000b), ayrıca Hayek’in fiziki taklit eden indirgemeci yaklaşımın ekonomiye uygun olmadığını düşündüğünü ifade etmektedir. Ayrıca Colander (2000b), Hayek’in organize olmuş karmaşıklığın bireysel elementlerin birbiriyle olan bağlarına bağımlı olduğunu fark ettiğini bildirmektedir. Yukarıdaki özelliklerle Colander (2000b), Hayek’in karmaşıklık görüşüne olan eğiliminin yüksek olduğu değerlendirmesinde bulunmaktadır.

Avusturya ekonomi okulu karmaşıklık görüşüne en benzer vizyona sahip ekonomi okuludur. Avusturya Okulu karmaşıklık görüşü ile uyumlu bir şekilde neoklasik teorisinin çeşitli yönlerini eleştirmektedir. Örneğin Avusturya Okulu, neoklasik okulun iddia ettiği gibi bir bireyin davranışının kolektif davranış için vekil olarak ele alınabileceği fikrini eleştirerek neoklasik okulun “temsili birey” kavramına itiraz etmektedirler. Yine örneğin Avusturya Okulu, neoklasik okulu dengeyi temel alması sebebiyle eleştirmektedir ve ekonomik aktivitenin denge dışı bir süreç olduğunu ifade etmektedirler. Montgomery (2000), ayrıca Avusturya okulunun, neoklasik okulun rasyonel beklentiler varsayımı üzerine inşa ettiği modellerin gerçekçiliğini eleştirdiğini (bunları ütöpik bulduğunu) ve Avusturya okulunun neoklasik argümanları fazla basitleştirdiği bulduğunu ifade etmektedir. Bu itirazlarıyla Avusturya okulunun düşünceleri ile karmaşıklık görüşünün örtüştüğü görülmektedir.

Avusturya ekonomi okulu ile karmaşıklık görüşünün örtüştüğü en önemli kavramlardan biri ekonomik sistemin insan tasarımı değil insan eyleminin bir sonucu olduğunu söyleyen Hayek’in kendiliğinden düzen (*spontaneous order*) kavramıdır.

Montgomery’a (2000) göre Hayek toplumu ve onun kurumlarını, milyonlarca bireyin kararlarının birleşik bir ürünü olarak, hem mekanda hem de zamanda dağıtık, her bir bireyin kendi problemlerinin çözümünü aradığı ama bu süreçle aynı zamanda toplumun yapısının yaratılmasına katkıda bulunduğu bir ağ olarak görmektedir. Hayek’in ekonomiye dair bu anlayışı karmaşıklık yaklaşımıyla örtüşmektedir.

Montgomery (2000), Hayek'in karmaşıklık üzerine makalelerinde ekonomik sistemi birçok ögeden ve süreçten oluşan ve hiyerarşik olarak karmaşıklık arz eden bir biçimde betimlediğini belirtmiştir. Montgomery (2000) Hayek'in karmaşık bir çerçevede dar bir bağlamda olayların tahmininin çok zor olduğunu bunun yerine karmaşık bir sistemde örüntülerin tahmininin daha kolay olduğunu ifade ettiğini bildirmektedir.

Montgomery (2000) ayrıca Hayek'in istatistiğin kullanımı konusunda eleştirel olduğunu belirtmektedir: Hayek, neoklasik kullanımda istatistiğin örüntülerin ortaya çıktığı düzeyden çok daha alt düzeylere odaklandığını böylece karmaşık örüntülerin yitirildiğini ifade etmektedir.

Montgomery (2000), Hayek'in piyasa sistemini evrimsel, kendi kendini organize eden korunumsuz düzen şeklinde kavramsallaştırarak gören son yüzyıldaki başlıca ekonomist olduğunu ifade etmektedir.

3.2.10 Başlıca Ekonomistlerin Karmaşıklık Görüşüne Olan Eğilimlerinin Değerlendirilmesi

Colander'in (2000b) ekonomi eğitiminde altta yatan iki görüşün olduğunu teşhis ettiğini ve bu vizyonları basitlik ve karmaşıklık vizyonları olarak adlandırdığını yukarıda ifade etmiştik. Colander'in (2000b) ekonomi tarihindeki başlıca ekonomistleri hangi vizyona (karmaşıklık ya da basitlik) eğilimli olduklarını değerlendirmekte ve şu tablo'yu ifade etmektedir:

Tablo-3: Ekonomistlerin Karmaşıklık Vizyonuna Eğilimleri

Başlıca Ekonomistler	Karmaşıklık Görüşüne Eğilimleri
Smith	Yüksek
Maltus	Yansız
Ricardo	Düşük
Mill	Yüksek
Marx	Yüksek
Walras	Düşük
Marshall	Yüksek
Hayek	Yüksek
Keynes	Yansız

3.3 SANTA FE ENSTİTÜSÜ

Karmaşık uyarlamalı sistemler teorisinin gelişimindeki en önemli dönüm noktalarından biri 1984 yılında Santa Fe Enstitüsü'nün kuruluşudur. Enstitü, ekonomik teorinin başlıca isimlerinden Kenneth J. Arrow da dahil olmak üzere fizik, biyoloji, sosyoloji, ekonomi, ve bilgisayar bilimleri alanlarından bir çok seçkin bilim adamını bir araya getirmiştir. Santa Fe Enstitüsü karmaşıklık üzerine çalışan dünyadaki en önemli araştırma merkezidir. Santa Fe Enstitüsü kendini şu şekilde tanıtmaktadır:

“Santa Fe Enstitüsü bilimsel anlayışın sınırlarını genişleten disiplinler arası bir araştırma topluluğudur. Amacı günümüzde karşılaşılan birçok problemin altında yatan, karmaşık fiziksel, hesapsal, biyolojik ve sosyal sistemlerdeki genel temel prensiplerin keşfedilmesi, anlaşılması ve bildirilmesidir” (Santa Fe enstitüsü web sitesi).

Ekonomik sistemlerdeki karmaşıklık ve uyarlamalı davranış Santa Fe Enstitüsünde yapılan çalışmalarla anlam kazanmıştır. Arthur ve diğ. (1997, s. 2) de ifade ettiği gibi ekonomide karmaşıklığın anlamını ve önemini ifade edebilecek tek bir görüş yoktur. Bunun yerine birbiri ile ilişkili konular arasında bir benzerlik kümesi tanımlanmaktadır. Farklı bilimsel alanlardaki benzerlikler karmaşık uyarlamalı sistemler ya da uyarlamalı doğrusal olmayan ağlar konusunda çakışmaktadır. “Bu sistemler ya da ağlar ister proteinleri, ister karıncaları, ister ekonomik ajanları temsil etsin yüksek derecede birbirine bağımlı ve etkileşimli bireylerin oluşturduğu bilimsel bir alanı temsil etmektedir” (Comim, 2000).

Arthur ve diğerleri (1997, s. 3) uyarlamalı doğrusal olmayan ağları şu şekilde karakterize etmektedir (Comim, 2000):

1. **Dağınık etkileşimler** (*Dispersed interaction*): Global sonuçlar birçok farklı ve dağınık ajanların birbirlerinin davranışlarına göre etkileşimde bulunduğu süreçlerle üretilir. Burada ajanların yalnızca çok olmaları değil aynı zamanda farklı olmaları da gereklidir çünkü bu özellik toplam davranışta “sürekli yeniliklerin” (*perpetual novelty*) üretilmesine yardımcı olur.
2. **Evrensel bir kontrolörün var olmaması** (*No global controller*): Ajanlar arasındaki etkileşimler yasal kurumlar gibi rekabet ve koordinasyon mekanizmalarıyla üretilir
3. **Enine kesen hiyerarşik organizasyon** (*Cross-cutting hierarchical organization*): Evrensel organizasyon birçok farklı düzeyde var olmaktadır. Herhangi bir düzeydeki birimler daha üst düzeydeki birimler için yapı taşı görevi görmektedir.
4. **Sürekli uyarlama** (*Continual adaptation*): Çevredeki değişimlere yanıt olarak ajanların içsel durumları değişmektedir. Bireyler biriken deneyimlerine göre sürekli adapte olmaktadır.
5. **Aralıksız yenilikler** (*Perpetual novelty*): Yeni davranışlar ve yeni yapılar, yeni davranışların ve yeni yapıların yaratılmasını harekete geçirmektedir. Böylece sistem sürekli yeniliklerin üretilmesi durumundadır.
6. **Denge-dışı dinamikler** (*Out-of-equilibrium dynamics*): Sürekli yenilikler durumu verili iken ekonomi herhangi bir optimum denge yakınında çalışmamaktadır.

Santa Fe yaklaşımı yukarıda özellikleri belirtilmiş karmaşık uyarlamalı sistemlerin ya da uyarlamalı doğrusalsız ağların disiplinler arası çalışılmasını içerir. Bu sistemler, içinde bulundukları çevrenin dinamik durumunu içselleştirmekte ve yansıtmaktadır.

“Santa-Fe anlayışı karmaşıklığın düzeyler ve hiyerarşiler halinde olduğunu, kendi kendini organize ettiğini, korunumlu ve korunumsuz dinamik sistemleri, denge harici düzen nosyonlarını, kaotik fenomenleri, fiziksel sistemlerin çoğulculuğunu ve kozmik bir denge-dışı fenomen olan big-bang’i (büyük patlamayı) kapsar. Santa-fe’nin karmaşıklık anlayışı ayrıca Hayek’in karmaşık fenomen teorisiyle de çarpıcı benzerlikler gösterir. Hayek gibi, Brian Arthur’un etkisi altında ekonomi ansızın ortaya çıkan (*emergent*), kendi kendini organize eden evrimsel bir süreç olarak görülür. Ajanlar bilgiyi sınıflandırır ve hiyerarşik olarak düzenlerler, hiyerarşik olarak ne bildikleri ve kendi yerel dünyalarındaki beklentilerine göre bilişsel biçimde karar verirler. Ekonominin sürekli bir denge dışılık halinde bulunması daha muhtemeldir” (Wible, 2000, s. 23).

Santa Fe yaklaşımı karmaşık sistemlerin anlaşılması için “teorem-ispat” şeklindeki bir teorik yapının uygun olmadığını ifade etmektedir. Santa Fe yaklaşımına göre böyle bir yapı karmaşık sistemlerde mevcut olmayan dengeye, doğrusallığa, sabit noktaların ve çekicilerin bulunmasına dayanmaktadır (Comim, 2000). Santa Fe yaklaşımına göre ekonomi izole bir disiplin olarak görülmemekte daha geniş bir kültürel sistem içine gömülü daha bütünleşik bir disiplin olarak görülmektedir (Comim, 2000). Uyarlamalı doğrusal olmayan ağlar üzerine çalışmalar akademik ilgiyi denge noktalarının bulunmasından daima değişen yörüngelerin bulunmasına çevirmiştir (Comim, 2000).

Santa Fe enstitüsünün ortaya koyduğu yeniliklerden biri de bilgisayar simülasyonlarına verilen önemdir. Santa-fe yaklaşımındaki birleştirici bir diğer öge de karmaşık sistemlerin ortak dinamik özelliklerin öğrenilmesi için mümkün olduğunca çok karmaşık uyarlamalı sistemin bilgisayarla modellenmeye çalışılmasıdır. Fiziksel, kimyasal, biyolojik, ekonomik sistemler çağın son bilgisayar teknikleriyle modellenmektedirler. Santa Fe grubu bu simülasyonları yeni bir çeşit deneysel yöntem olarak görmekte ve “bilgisayar deneyleri” olarak adlandırmaktadırlar (Wible, 2000, s. 24).

Santa Fe yaklaşımı Hayek’in desen tahmini (*pattern prediction*) vurgusuyla tutarlı görünmektedir. Hayek’e göre gelecekte yaşanacak olayların detaylı bir şekilde tahmin edilmesi ekonomik fenomenin karmaşıklığı nedeniyle mümkün değildir. Ekonomi gibi sosyal bilimlerin amacı izole ve belli bir zamana ait olayların değil desenlerin tahmini olmalıdır. Hayek’e göre tahmin yanlış bir düzeyde yapılmaya çalışılmaktadır. Santa Fe’nin karmaşıklık görüşüne göre de toplam ekonomik olayların simülasyonu belli bir

birey için dar bir tahmin vermek zorunda değildir. Santa-fe yaklaşımı neoklasik ekonominin, ekonomik olguyu optimize edici birey düzeyine indirgeyen güçlü indirgemeciliğinden sakınmaktadır (Wible 2000, s. 24).

3.4 METODOLOJİ VE MODELLEME

Fontana'ya (2008) göre, ekonominin karmaşıklığıyla ilişkili açıklama, çözüm, tahmin kavramları Joshua Epstein'in (1999) üretken bilim (*generative science*) kavramından çıkartılmaktadır. Üretken bilime göre bir olgunun açıklanması o makro olguyu meydana getiren mikro kuralların bulunmasına bağlıdır. Fontana (2008), üretken bilimin bu özelliği ile matematiksel çıkarım yöntemleri ile çalışan neoklasik teoriden ayrıldığını ifade etmektedir. Neoklasik ekonomik teori, sistemin dinamiklerini ifade eden matematiksel ifadeler bulduğunda o olguyu açıklanmış kabul etmektedir. Bu durum makro düzenin altındaki mikro kuralların örtüsünü kaldırmaya çalışan üretken bilimden farklılık göstermektedir.

Fontana (2008), neoklasik teorisinin başvurduğu denklem temelli modellerin uyarlamalı süreçleri ve sistemde ortaya çıkan yenilikleri açıklayamadığını belirtmekte ve karmaşık sistemlerin modellenmesi için ajan temelli modellerin gerektiğini ifade etmektedir. Öğrenen algoritmaların (genetik algoritmalar, sinirsel ağlar) kullanılmasıyla uyarlama, seçim ve öğrenme olgularının modellenmesinin mümkün hale gelmiştir ve bu araçlar ekonomistleri kısıtlı optimizasyona başvurmaktan kurtarmıştır.

3.5 SONUÇ

Sonuç olarak ekonominin karmaşık bir sistem olduğu ve ekonomiye karmaşıklık yaklaşımının hem ontolojik, hem epistemolojik hem de metodolojik olarak neoklasik anaakımdan farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Lakin ekonomik sistem karmaşık olmasına rağmen şimdiye kadar ekonomi bilimi basitleştirici, indirgemeci ve tümdengelimsel bir yaklaşımı temel olarak benimsemiştir. Ama yeni teorik ve teknolojik araçların ortaya çıkmasıyla ivme kazanan karmaşıklık teorisi ekonomide de önemli olanaklar vaat etmektedir. Artan getiriler ve patika

bağımlılığı neoklasik ekonominin pek değinmediği ama karmaşık olguların ortaya çıkmasına neden olan iki önemli olgudur. Ekonomistler ekonomideki karmaşıklıkla baş etmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Ekonomistlerin karmaşıklık vizyonuna olan eğilimleri yukarıda değerlendirilmiştir.

Santa Fe enstitüsü karmaşıklık teorisinin geliştirildiği dünya üzerindeki en önemli enstitüdür. Karmaşıklık teorisi, bu enstitünün bilim adamlarınca gerçekleştirilen çalışmalarla tanımlanmaktadır.

Karmaşıklık yaklaşımı, klasik bilim ve neoklasik ana akımla karşılaştırıldığında farklı bir bilimsel yöntem benimsemiştir. Bu yöntem Epstein (1999) tarafından üretken bilim olarak adlandırılmıştır. Klasik bilim ve neoklasik ana akım “teorem-ispat” şeklinde bir bilimsel yöntem izlerken karmaşıklık teorisi simülasyonlardan ve öğrenen programlardan (genetik algoritmalar ve sinirsel ağlar) yararlanmaktadır.

BÖLÜM 4

MODEL VE SİMÜLASYON

Bu bölümde yinelemeli (*iterated*) bir asimetrik evrimsel oyun simülasyonu sunulacaktır. Ele aldığımız sistem aşağıdaki özellikleri taşımaktadır:

1. Sistem çok sayıda elementten oluşur ve bu elementler heterojendir.
2. Bu çok sayıdaki element birbirleri ile dinamik olarak etkileşim içindedir.
3. Elementler birbirleri ile yerel olarak etkileşmektedir ve global bir denetleyici yoktur.
4. Sistemin global davranışı yerel bileşenlerin etkileşimi sonucu ortaya çıkmaktadır.
5. Elementler zaman boyunca karşılıklı evrim geçirmektedir.
6. Uygun olan türlerin seçildiği ve üretildiği bir öğrenme ve adaptasyon süreci vardır.

Yaptığımız simülasyonda hangi mikro etkileşim parametrelerinin hangi makro çıktılarına yol açtığını göstereceğiz.

4.1 MODEL

Sunacağımız model Canpolat ve Özel'in (2008) çalışmasından alınmıştır. Bizim sunacağımız model Canpolat ve Özel'in (2008) sunduğu modelin yinelemeli (*itareted*) bir versiyonudur.

Simülasyon n tane bireyden oluşan bir popülasyonu ele almaktadır. Bu bireyler aynı tercihlere ama farklı bilişsel ve fiziksel yeteneklere sahiptir. Bu yetenekleri başlangıç zenginliği olarak adlandırmaktayız ve Z_i ile göstermekteyiz. Bu yetenekler bireyler popülasyonunda başlangıçta rastgele dağılmıştır. Başlangıç zenginliğindeki farklılıklar

doğadaki eşitsizlikleri temsil etmektedir. Bu eşitsizlikler popülasyon bireyleri arasındaki hiyerarşik ilişkilerin ve farklı pazarlık güçlerinin kaynağıdır. Aynı zamanda bu eşitsizlikler sosyal etkileşimlerde bireylerin oynadığı rolleri belirlemekte ve davranış seçimlerini ve etkileşimin çıktılarını etkilemektedir.

Her dönemin başında bireyler rastgele eşleşmektedirler. Bu bireylerden başlangıç donanımı yüksek olanı Z_H , başlangıç donanımı düşük olanı Z_L ile gösterilsin. Daha sonra bu bireyler ortak çalışmanın koşullarını müzakere etmektedirler. Eğer anlaşılırsa birlikte çalışmaktadırlar. (Bu simülasyonda biz ortak çalışmaktan elde edilen gelirin, bireyler tarafından çalışmaya ayrılan toplam zenginliğin iki katı olduğunu varsaymaktayız.) Bireyler arasındaki anlaşma iki koşula bağlıdır: Çalışma sonrası elde edilecek zenginliğin bireyler arasında nasıl paylaşılacağı (paylaşım kuralı) ve bireylerin birlikte çalışmaya donanımlarının ne kadarını ayıracakları (katkı oranı).

Birey “i” tarafından çalışma için ayrılan donanım oranı ε_i olsun ($0 \leq \varepsilon_i \leq 1$). Bu durumda birey “i” tarafından çalışmaya ayrılan donanım $\varepsilon_i Z_i$ şeklinde ifade edilebilir. Başlangıç donanımları mükemmel olarak gözlenilemediği için gerçek katkı oranının müzakere koşullarındakinden daha az olabileceğini varsaymak mantıklıdır.

Çalışma sonrasında elde edilen çıktının çalışmaya ayrılan donanımın bir fonksiyonu olduğunu varsayalım. Bu durumda eğer “i” bireyi tek başına çalışırsa çalışmadan aşağıdaki fonksiyona göre çıktı elde edecektir.

$$Q_i = Q(\varepsilon_i Z_i)$$

Bu durumda tek başına çalışan bir bireyin çalışma sonrası donanımı şu şekilde olacaktır:

$$w_i = (1 - \varepsilon_i)Z_i + Q_i$$

Eğer bireyler birlikte çalışmaya karar verirlerse “j” bireyi ile çalışan “i” bireyinin çalışma sonrası donanımı şu şekilde yazılabilir:

$$E[w_i] = (1 - \varepsilon_i)Z_i + \alpha_i Q_{ij}$$

Burada $E[.]$ beklenti işlemcisi ve $Q_{ij} = Q(\varepsilon_i Z_i, \varepsilon_j Z_j)$ dir. Müzakerenin çıktısı bir rastgele değişkendir çünkü donanımlar mükemmel olarak gözlenememektedir ve katkı oranlarına da kesin olarak uyulması zorlanamamaktadır. Bundan sonraki gösterimlerde beklenti işlemcisini yazmayacağız.

Donanımlar rastgele dağıtıldığı için her eşleşmede her birey kendisini iki ayrı durumdan birinde bulabilir: Yüksek donanım durumu (Rol I) veya düşük donanım durumu (Rol II). Donanımların düşük veya yüksek olma durumu eşleşen bireylerin göreceli zenginliklerine göre belirlenir. Donanım seviyelerinin mükemmel olarak gözlenilemediğini varsaymamıza rağmen bireylerin donanımları arasındaki farkları algılayabildiklerini varsaymaktayız. Bu algılanan asimetri bireylerin seçim stratejilerini ve kazançlarını etkilemektedir.

Simülasyonda bütün oyuncuların iki stratejiye sahip olduğunu varsayıyoruz: Oyuncular paylaşım kuralını veya katkı oranını seçebilmektedirler. Biz simülasyonda iki paylaşım kuralının var olduğunu kabul etmekteyiz: Piyasa kuralı ve eşitlikçi kural. Piyasa kuralına göre oyuncular çıktıya yaptıkları katkı oranına göre çıktıdan pay almaktadırlar. Eşitlikçi kurala göre ise oyuncular çıktıdan eşit pay almaktadırlar. Eşitlikçi dağıtım kuralına göre her bir oyuncunun çıktıdan aldığı payı α_w ($\alpha_w=0,5$) olarak, ve piyasa kuralına göre yüksek donanımlı oyuncunun çıktı payını α_M olarak göstermekteyiz.

Yüksek donanımlı oyuncunun katkı oranını ε_H ve düşük donanımlı oyuncunun katkı oranını ε_L ile gösterilsin. Bir oyuncunun tercih ettiği dağıtım kuralı oynandığında o oyuncunun bütün donanımını çalışmaya ayıracağı varsayılmaktadır. Bu durumda örneğin α_M oynandığında $\varepsilon_H=1$ olacaktır. Dikkat edilirse piyasa kuralı yüksek donanımlı oyuncu tarafından tercih edilmektedir çünkü $\alpha_M > \alpha_w$. $(1 - \alpha_M) < \alpha_w$ olacağı için düşük donanımlı oyuncu eşitlikçi kuralı tercih edecektir.

Her eşleşmede her birey için dört farklı olası durum söz konusudur:

1. Eğer her iki oyuncu da paylaşım kuralı oynarsa (örneğin yüksek donanımlı oyuncu α_M ve düşük donanımlı oyuncu α_W oynarsa) herhangi bir anlaşma yapılmaz ve her iki oyuncu da yalnız başına çalışır. Bu durumda rol I ve rol II' deki oyuncuların yeni zenginlikleri şu şekilde olmaktadır:

$$w_{11}^I = (1 - \varepsilon_H)Z_H + Q(\varepsilon_H Z_H)$$

$$w_{11}^{II} = (1 - \varepsilon_L)Z_L + Q(\varepsilon_L Z_L)$$

2. Eğer rol I' deki oyuncu α_M , ve rol II' deki oyuncu ε_L oynarsa rol I' deki ve rol II' deki oyuncuların zenginlikleri şu şekilde olmaktadır:

$$w_{12}^I = \alpha_M Q(Z_H, \varepsilon_L Z_L)$$

$$w_{12}^{II} = \alpha_W Q(\varepsilon_H Z_H, Z_L)$$

$$\alpha_M = (Z_H) / (Z_H + \varepsilon_L Z_L)$$

3. Eğer rol I' deki oyuncu ε_H , ve rol II' deki oyuncu α_W oynarsa rol I' deki ve rol II' deki oyuncuların zenginlikleri şu şekilde olmaktadır:

$$w_{21}^I = (1 - \varepsilon_H)Z_H + \alpha_W Q(\varepsilon_H Z_H, Z_L)$$

$$w_{21}^{II} = (1 - \varepsilon_L)Z_L + (1 - \alpha_M)Q(Z_H, \varepsilon_L Z_L)$$

4. Eğer her iki oyuncu da katkı oranı oynarsa bu durumda çıktının çalışmadan sonra yapılacak müzakerelerle paylaşılacağını varsayıyoruz. Bu durumda oyuncuların zenginlikleri şu şekilde olmaktadır.

$$w_{22}^I = (1 - \varepsilon_H)Z_H + \alpha_N Q(\varepsilon_H Z_H, \varepsilon_L Z_L)$$

$$w_{22}^{II} = (1 - \varepsilon_H)Z_H + (1 - \alpha_N)Q(\varepsilon_H Z_H, \varepsilon_L Z_L)$$

Yukarıda α_N yüksek donanımlı oyuncunun müzakereler sonunda elde ettiği çıktı payıdır.

Rol I ve rol II' deki oyuncuların çıktı matrisi şu şekildedir:

$$W^I = \begin{bmatrix} w_{11}^I & w_{12}^I \\ w_{21}^I & w_{22}^I \end{bmatrix}$$

$$W^{II} = \begin{bmatrix} w_{11}^{II} & w_{12}^{II} \\ w_{21}^{II} & w_{22}^{II} \end{bmatrix}$$

Her birey her eşleşmede kendini farklı bir pozisyonda bulduğu için popülasyon dört davranışsal stratejiden meydana gelmektedir:

1. $T_1 = (\alpha_M, \alpha_W)$: Rol I' de piyasa kuralını oyna, Rol II' de eşit paylaşım kuralını oyna
2. $T_2 = (\varepsilon_H, \alpha_W)$: Rol I' de yüksek katkı seviyesini oyna, Rol II' de eşitlikçi paylaşım kuralını oyna
3. $T_3 = (\alpha_M, \varepsilon_L)$: Rol I' de piyasa paylaşım kuralını oyna, Rol II' de düşük katkı seviyesini oyna
4. $T_4 = (\varepsilon_H, \varepsilon_L)$: Rol I' de yüksek katkı seviyesini oyna, Rol II' de düşük katkı seviyesini oyna.

Oyunun refah matrisi şu şekilde olmaktadır:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11}^I + w_{11}^{II} & w_{11}^I + w_{21}^{II} & w_{12}^I + w_{11}^{II} & w_{12}^I + w_{21}^{II} \\ w_{21}^I + w_{11}^{II} & w_{21}^I + w_{21}^{II} & w_{22}^I + w_{11}^{II} & w_{22}^I + w_{21}^{II} \\ w_{11}^I + w_{12}^{II} & w_{11}^I + w_{22}^{II} & w_{12}^I + w_{12}^{II} & w_{12}^I + w_{22}^{II} \\ w_{21}^I + w_{12}^{II} & w_{21}^I + w_{22}^{II} & w_{22}^I + w_{12}^{II} & w_{22}^I + w_{22}^{II} \end{bmatrix}$$

Popülasyonun t anındaki durumunu $\mathbf{f}(t)$ ile gösterelim bu durumda strateji türlerin frekansları yani f_i 'ler aşağıdaki simplekse ait olacaktır:

$$S_4 = \{f(t) = (f_1(t), \dots, f_4(t)) \in R^4 : \sum f_i = 1, f_i \geq 0, i = 1, \dots, 4\}$$

Bir davranışsal stratejinin başarısı diyelim ki T_i türünün uygunluğu ile popülasyonun ortalama uygunluğu arasındaki farkın bir fonksiyonu olsun. Frekans olarak T_i türünün

uygunluğunun $(Wf)_i = \sum_j w_{ij} f_j$ ve ortalama popülasyon uygunluğunun (fWf) olmaktadır.

Bu durumda davranışsal stratejilerin evrimi bir fark denklemi olarak aşağıdaki replikatör denklemi ile modellenenir.

$$f_i(t+1) = f_i(t) + f_i(t) \left[\frac{(Wf)_i - fWf}{fWf} \right]$$

4.2 ALGORİTMA

Simülasyon şu algoritma ile gerçekleşmektedir:

1. İlk önce belli sayıda bir popülasyon oluşturun ve zenginlikleri bu popülasyonun bireylerine rastgele dağıtın.
2. Daha sonra bu popülasyondan rastgele iki birey seçin. Seçilen bireylerden yüksek donanımlı olanı Z_H , düşük donanımlı olanı Z_L olarak adlandırın.
3. Stratejilerin başlangıç frekanslarını $\mathbf{f} = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4] = [0.25, 0.25, 0.25, 0.25]$ olarak belirleyin.
4. ε_H , ε_L , $Q(A) = A$, $Q(A, B) = 2(A + B)$, $\alpha_W = 0.5$, α_N , $\alpha_M = (Z_H / (Z_H + \varepsilon_L Z_L))$ değerlerini yerine koyarak w_{ij}^k değerlerini hesaplayın.
5. Hesaplanan w_{ij}^k değerlerini kullanarak

$$W = \begin{bmatrix} w_{11}^I + w_{11}^{II} & w_{11}^I + w_{21}^{II} & w_{12}^I + w_{11}^{II} & w_{12}^I + w_{21}^{II} \\ w_{21}^I + w_{11}^{II} & w_{21}^I + w_{21}^{II} & w_{22}^I + w_{11}^{II} & w_{22}^I + w_{21}^{II} \\ w_{11}^I + w_{12}^{II} & w_{11}^I + w_{22}^{II} & w_{12}^I + w_{12}^{II} & w_{12}^I + w_{22}^{II} \\ w_{21}^I + w_{12}^{II} & w_{21}^I + w_{22}^{II} & w_{22}^I + w_{12}^{II} & w_{22}^I + w_{22}^{II} \end{bmatrix}$$

matrisini hesaplayın.

6. Aşağıdaki şekilde ortalama uygunluk değerini yani fWf değerini hesaplayın:

$$fWf = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{11}^I + w_{11}^{II} & w_{11}^I + w_{21}^{II} & w_{12}^I + w_{11}^{II} & w_{12}^I + w_{21}^{II} \\ w_{21}^I + w_{11}^{II} & w_{21}^I + w_{21}^{II} & w_{22}^I + w_{11}^{II} & w_{22}^I + w_{21}^{II} \\ w_{11}^I + w_{12}^{II} & w_{11}^I + w_{22}^{II} & w_{12}^I + w_{12}^{II} & w_{12}^I + w_{22}^{II} \\ w_{21}^I + w_{12}^{II} & w_{21}^I + w_{22}^{II} & w_{22}^I + w_{12}^{II} & w_{22}^I + w_{22}^{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

7. T_i türlerinin uygunluklarını, yani $(Wf)_i = \sum_j w_{ij} f_j$ değerlerini aşağıdaki şekilde

hesapla:

$$(Wf)_1 = (w_{11}^I + w_{11}^{II}) * f_1 + (w_{11}^I + w_{21}^{II}) * f_2 + (w_{12}^I + w_{11}^{II}) * f_3 + (w_{12}^I + w_{21}^{II}) * f_4$$

$$(Wf)_2 = (w_{21}^I + w_{11}^{II}) * f_1 + (w_{21}^I + w_{21}^{II}) * f_2 + (w_{22}^I + w_{11}^{II}) * f_3 + (w_{22}^I + w_{21}^{II}) * f_4$$

$$(Wf)_3 = (w_{11}^I + w_{12}^{II}) * f_1 + (w_{11}^I + w_{22}^{II}) * f_2 + (w_{12}^I + w_{12}^{II}) * f_3 + (w_{12}^I + w_{22}^{II}) * f_4$$

$$(Wf)_4 = (w_{21}^I + w_{12}^{II}) * f_1 + (w_{21}^I + w_{22}^{II}) * f_2 + (w_{22}^I + w_{12}^{II}) * f_3 + (w_{22}^I + w_{22}^{II}) * f_4$$

8. $(Wf)_i$ ve fWf değerlerini replikatör denkleminde yerine koyarak bir sonraki frekans dağılımlarının değerlerini bul.

$$f_i(t+1) = f_i(t) + f_i(t) \left[\frac{(Wf)_i - fWf}{fWf} \right]$$

9. Yeni bulunan frekans değerlerini yani $[f_1(t+1) \ f_2(t+1) \ f_3(t+1) \ f_4(t+1)]$ değerlerini 3. adımdaki $\mathbf{f} = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]$ yerine koyarak yukarıdaki işlemleri sonuçta herhangi bir strateji türü 0'a yaklaşıncaya kadar (örneğin herhangi bir T_i 'nin frekansı 0.001'in altına düşünceye kadar) tekrarla.

4.3 JAVA KAYNAK KODU

Gerçekleştirdiğimiz simülasyon üç ayrı java dosyasını içermektedir. Bunlar *MainSimulation.java* , *Simulation.java*, ve *Agent.java* dosyalarıdır. Çalıştırılan dosya yani “public static void main(String[] args)” ifadesini içeren dosya *MainSimulation.java* dosyasıdır.

MainSimulation.java dosyasındaki **MODE** değişkeni yinelemenin (*iteration*) hangi değişken üzerinden yapılacağını seçmeye yaramaktadır. Buna göre:

MODE = 0 → Herhangi bir yineleme yapma

MODE = 1 → α_N değerleri üzerinden yineleme yap

MODE = 2 → ε_H değerleri üzerinden yineleme yap

MODE = 3 → ε_L değerleri üzerinden yineleme yap.

MainSimulation.java dosyasındaki **COUNT** değişkeni yineleme sayısını belirtmektedir.

Simulation.java dosyasındaki başlangıç değişkenlerinin anlamları şunlardır:

MAX_NUM_OF_ITERATIONS: Maksimum yineleme sayısı.

NUMBER_OF_AGENTS: Üretilen ajan sayısı.

MAX_ENDOWMENT: Maksimum başlangıç zenginlik seviyesi miktarı

MIN_RATIO: Yineleme sırasında herhangi bir türün popülasyondaki frekansı bu değerin altına düştüğünde yineleme durmaktadır.

f1_ratio, f2_ratio, f3_ratio, f4_ratio: Değerleri türlerin popülasyondaki başlangıç yüzdelerini (frekanslarını) belirtmektedir.

Programın çalışmak için “javastatsoft_beta1.2.jar” paketine ihtiyacı vardır.

Programın kaynak kodu şu şekildedir:

MainSimulation.java:

```
import java.util.ArrayList;

import statgraphics.eda.ScatterPlot;
import statgraphics.util.PlotFrame;
import statsoft.util.PlotFrameFactory;

public class MainSimulation {

    static double MODE = 1;

    static double AN = 0.6;
```

```

static double EH = 0.7;
static double EL = 0.7;

static int COUNT = 100;

static String modeX = "AN";

////////////////////////////////////

static ArrayList<double[]>TYPE_RATIOS_FOR_EACH_ITERATION = new
ArrayList<double[]>();

public static void main(String[] args) {

    if(MODE==0){
        // run just once.
        Simulation s = new Simulation();
        System.out.println(AN);
        s.run(AN, EH, EL);
    } else {
        if(MODE==2){
            modeX="EH";
        } else if(MODE==3){
            modeX="EL";
        }
        run100Times();
    }
}

public static void run100Times() {

    double[][] ydata1 = new double[1][COUNT];
    double[][] ydata2 = new double[1][COUNT];
    double[][] ydata3 = new double[1][COUNT];
    double[][] ydata4 = new double[1][COUNT];

    for(int i=0; i<COUNT; i++){
        double x = (double)i/COUNT;

        Simulation s = new Simulation();

        if(MODE==1){
            s.run(x, EH, EL);
        } else if(MODE==2){
            s.run(AN, x, EL);
        } else if(MODE==3){
            s.run(AN, EH, x);
        }

        System.out.println((double)i/COUNT);
        Simulation.printArr(s.TYPE_RATIOS);
        ydata1[0][i] = s.TYPE_RATIOS[0];
        ydata2[0][i] = s.TYPE_RATIOS[1];
        ydata3[0][i] = s.TYPE_RATIOS[2];
        ydata4[0][i] = s.TYPE_RATIOS[3];
    }

    drawChart("f1", ydata1);
}

```

```

        drawChart("f2", ydata2);
        drawChart("f3", ydata3);
        drawChart("f4", ydata4);
        drawChart2("f2 and f3", ydata2, ydata3);
        drawChart4("All 4", ydata1, ydata2, ydata3, ydata4);
    }

    public static void drawChart(String dataname, double[][] ydata){
        double[][] xdata = new double[1][COUNT];;
        for(int i=0; i<COUNT; i++){
            xdata[0][i] = (double)i/COUNT;
        }

        String [] dataNames={dataname};
        PlotFrame[] pf=new PlotFrame[1];

        ScatterPlot scatterPlot = new
        ScatterPlot(xdata,ydata,dataNames,dataname,modeX,"Ratios");
        pf[0]=new PlotFrame("Scatter
        Plot",scatterPlot.getPlot(),1000,270);

        new PlotFrameFactory().putPlotFrame(pf);
    }

    public static void drawChart4(String dataname, double[][]
    ydata1, double[][] ydata2, double[][] ydata3, double[][] ydata4){
        double[][] xdata = new double[4][COUNT];;
        for(int i=0; i<COUNT; i++){
            xdata[0][i] = (double)i/COUNT;
            xdata[1][i] = (double)i/COUNT;
            xdata[2][i] = (double)i/COUNT;
            xdata[3][i] = (double)i/COUNT;
        }
        double[][] ydata = new double[4][COUNT];
        ydata[0] = ydata1[0];
        ydata[1] = ydata2[0];
        ydata[2] = ydata3[0];
        ydata[3] = ydata4[0];

        String [] dataNames={"f1","f2","f3","f4"};
        PlotFrame[] pf=new PlotFrame[1];

        ScatterPlot scatterPlot = new
        ScatterPlot(xdata,ydata,dataNames,"All four types",modeX,"Ratios");
        pf[0]=new PlotFrame("Scatter
        Plot",scatterPlot.getPlot(),1000,270);

        new PlotFrameFactory().putPlotFrame(pf);
    }

    public static void drawChart2(String dataname, double[][]
    ydata2, double[][] ydata3){
        double[][] xdata = new double[2][COUNT];;
        for(int i=0; i<COUNT; i++){
            xdata[0][i] = (double)i/COUNT;

```

```

        xdata[1][i] = (double)i/COUNT;
    }
    double[][] ydata = new double[2][COUNT];
    ydata[0] = ydata2[0];
    ydata[1] = ydata3[0];

    String [] dataNames={"f2","f3"};
    PlotFrame[] pf=new PlotFrame[1];

    ScatterPlot scatterPlot = new
    ScatterPlot(xdata,ydata,dataNames,"f2 and f3",modeX,"Ratios");
    pf[0]=new PlotFrame("Scatter
    Plot",scatterPlot.getPlot(),1000,270);

    new PlotFrameFactory().putPlotFrame(pf);
}
}

```

Simulation.java:

```

import java.awt.Graphics2D;
import java.awt.geom.Rectangle2D;
import java.awt.image.BufferedImage;
import java.io.BufferedWriter;
import java.io.File;
import java.io.FileWriter;
import java.util.ArrayList;
import java.util.Random;

import org.jfree.chart.ChartFactory;
import org.jfree.chart.ChartPanel;
import org.jfree.chart.ChartUtilities;
import org.jfree.chart.JFreeChart;
import org.jfree.chart.plot.PlotOrientation;
import org.jfree.data.xy.XYSeries;
import org.jfree.data.xy.XYSeriesCollection;

public class Simulation {

    static double MAX_NUM_OF_ITERATIONS = 200;
    static double NUMBER_OF_AGENTS = 100.0;
    static double MAX_ENDOWMENT = 100.0;
    static double MIN_RATIO = 0.001;

    static double f1_ratio = 0.25;
    static double f2_ratio = 0.25;
    static double f3_ratio = 0.25;
    static double f4_ratio = 0.25;
}

```

```

static double EH;
static double EL;
static double AW = 0.5;
static double AN;

static ArrayList f1 = new ArrayList();
static ArrayList f2 = new ArrayList();
static ArrayList f3 = new ArrayList();
static ArrayList f4 = new ArrayList();

/*////////////////////////////////////*/
static ArrayList<Agent> agents = new ArrayList<Agent>();
static Random rand = new Random();
static boolean isDone=false;
static double[] TYPE_RATIOS = new double[4];

public Simulation(){

    TYPE_RATIOS[0] = f1_ratio;
    TYPE_RATIOS[1] = f2_ratio;
    TYPE_RATIOS[2] = f3_ratio;
    TYPE_RATIOS[3] = f4_ratio;
    isDone = false;
    agents = new ArrayList<Agent>();

}

public void run(double AN, double EH, double EL) {

    this.AN=AN;
    this.EH=EH;
    this.EL=EL;

    System.out.println("Simulation Started with " +AN);
    create_agents();

    for(int i=0; i<MAX_NUM_OF_ITERATIONS; i++){
        step();
        if(isDone)
            break;
    }

}

public static void step(){
    checkRatios();
    Agent[] arr = chooseTwoAgents();
    Agent a = arr[0];
    Agent b = arr[1];

    f1.add(TYPE_RATIOS[0]);
    f2.add(TYPE_RATIOS[1]);
    f3.add(TYPE_RATIOS[2]);
    f4.add(TYPE_RATIOS[3]);

    //printArr(TYPE_RATIOS);

    double[][] mat = createMatrix(a,b);

```

```

//printMatrix(mat);

double[][] m1 = {TYPE_RATIOS};
double[][] m3 =
{{TYPE_RATIOS[0]}, {TYPE_RATIOS[1]}, {TYPE_RATIOS[2]}, {TYPE_RATIOS[3]}};

double[][] fwf = multMatrices(m1, multMatrices(mat, m3));
double[][] wf = multMatrices(mat, m3);

for(int i=0; i<4; i++){
    TYPE_RATIOS[i] = TYPE_RATIOS[i] +
(TYPE_RATIOS[i]*((wf[i][0])-(fwf[0][0]))/(fwf[0][0]));
}

}

private static double[][] createMatrix(Agent a1, Agent a2) {
    double w11=0.0; double w12=0.0; double w13=0.0; double w14=0.0;
    double w21=0.0; double w22=0.0; double w23=0.0; double w24=0.0;
    double w31=0.0; double w32=0.0; double w33=0.0; double w34=0.0;
    double w41=0.0; double w42=0.0; double w43=0.0; double w44=0.0;

    Agent a=a1;
    Agent b=a2;
    if(a1.endowment<a2.endowment){
        a=a2;
        b=a1;
    }

    w11 = w111(a,b)+w112(a,b);
    w12 = w111(a,b)+w212(a,b);
    w13 = w121(a,b)+w112(a,b);
    w14 = w121(a,b)+w212(a,b);
    w21 = w211(a,b)+w112(a,b);
    w22 = w211(a,b)+w212(a,b);
    w23 = w221(a,b)+w112(a,b);
    w24 = w221(a,b)+w212(a,b);
    w31 = w111(a,b)+w122(a,b);
    w32 = w111(a,b)+w222(a,b);
    w33 = w121(a,b)+w122(a,b);
    w34 = w121(a,b)+w222(a,b);
    w41 = w211(a,b)+w122(a,b);
    w42 = w211(a,b)+w222(a,b);
    w43 = w221(a,b)+w122(a,b);
    w44 = w221(a,b)+w222(a,b);

    double[][] w =
{{w11, w12, w13, w14}, {w21, w22, w23, w24}, {w31, w32, w33, w34}, {w41, w42, w43, w44}};
    return w;
}

private static void printMatrix(double[][] mat) {
    // TODO Auto-generated method stub
    for(int i=0; i<mat.length; i++){
        printArr(mat[i]);
    }
}
}

```

```

private static double[][] multMatrices(double[][] a, double[][] b){
    int m = a.length;
    int p = b[0].length;
    int n = a[0].length;

    double[][] res = new double[m][p];
    for(int i=0; i<m; i++){
        for(int j=0; j<p; j++){
            for(int k=0; k<n; k++){
                res[i][j]=res[i][j]+(a[i][k]*b[k][j]);
            }
        }
    }
    return res;
}

private static Agent[] chooseTwoAgents() {
    int index1 = rand.nextInt(agents.size());
    Agent ai = agents.get(index1);

    int index2 = rand.nextInt(agents.size());
    Agent aj = agents.get(index2);

    Agent[] res = {ai, aj};
    return res;
}

public static double AM(Agent a, Agent b){
    return a.endowment/(a.endowment+(EL*b.endowment));
}

public static double Q(double A){
    return A;
}

public static double Q(double A, double B){
    return 2*(A+B);
}

public static void create_agents(){
    for(int i=1; i<NUMBER_OF_AGENTS+1; i++){
        Agent a = new Agent(i,
1+(int)(Math.random()*(MAX_ENDOWMENT-1)));
        agents.add(a);
    }
}

// a high, b low
public static double w111(Agent a, Agent b){
    return ((1- EH)*a.endowment) + Q(EH*a.endowment);
}
public static double w112(Agent a, Agent b){
    return ((1- EL)*b.endowment) + Q(EL*b.endowment);
}

public static double w121(Agent a, Agent b){

```

```

        return AM(a,b)*Q(a.endowment, (EL*b.endowment));
    }

    public static double w122(Agent a, Agent b){
        return AW*Q((EH*a.endowment),b.endowment);
    }

    public static double w211(Agent a, Agent b){
        return ((1-
EH)*a.endowment)+(AW*Q((EH*a.endowment),b.endowment));
    }

    public static double w212(Agent a, Agent b){
        return ((1-EL)*b.endowment)+(1-
AM(a,b))*Q(a.endowment,(EL*b.endowment));
    }

    public static double w221(Agent a, Agent b){
        return ((1-EH)*a.endowment)+(AN*Q((EH*a.endowment),
(EL*b.endowment)));
    }

    public static double w222(Agent a, Agent b){
        return ((1-EL)*b.endowment)+(1-
AN)*Q((EH*a.endowment),(EL*b.endowment));
    }

    public static void checkRatios(){
        if(TYPE_RATIOS[0]<MIN_RATIO){
            System.out.println("T1 cok azaldi");
            exit();
        } else if(TYPE_RATIOS[1]<MIN_RATIO){
            System.out.println("T2 cok azaldi");
            exit();
        } else if(TYPE_RATIOS[2]<MIN_RATIO){
            System.out.println("T3 cok azaldi");
            exit();
        } else if(TYPE_RATIOS[3]<MIN_RATIO){
            System.out.println("T4 cok azaldi");
            exit();
        }
    }

}

public static void exit(){
    String s = AN +"";
    writeToFile();
    drawChartFrom4("fi Chart", f1,f2,f3,f4,"fi.png");
    //System.exit(1);
    isDone = true;
}

public static void printArr(double[] type_ratios2){
    for(int i=0; i<type_ratios2.length;i++){
        System.out.print(type_ratios2[i]+" ");
    }
    System.out.println();
}

public static void writeToFile(){
    try{
        // Create file
        FileWriter fstream = new FileWriter("out.csv");
        BufferedWriter out = new BufferedWriter(fstream);
        out.write("f1,f2,f3,f4");
    }
}

```

```

        out.write("\n");

        for(int i=0; i<f1.size(); i++){
            out.write(f1.get(i)+","+f2.get(i)+","+f3.get(i)+","+f4.get(i)+",");
            out.write("\n");
        }
        out.write("\n");

        //Close the output stream
        out.close();
    }catch (Exception e){//Catch exception if any
        System.err.println("Error: " + e.getMessage());
    }
}

public static void drawChartFrom4(String title, ArrayList list1,
    ArrayList list2, ArrayList list3, ArrayList list4, String filename){

    // create a dataset...

    XYSeries series1 = new XYSeries("f1");
    for(int i=0; i<list1.size(); i++){
        series1.add((new Double(i)).doubleValue(), (new
Double(list1.get(i).toString()).doubleValue()));
    }

    XYSeries series2 = new XYSeries("f2");
    for(int i=0; i<list2.size(); i++){
        series2.add((new Double(i)).doubleValue(), (new
Double(list2.get(i).toString()).doubleValue()));
    }

    XYSeries series3 = new XYSeries("f3");
    for(int i=0; i<list3.size(); i++){
        series3.add((new Double(i)).doubleValue(), (new
Double(list3.get(i).toString()).doubleValue()));
    }

    XYSeries series4 = new XYSeries("f4");
    for(int i=0; i<list4.size(); i++){
        series4.add((new Double(i)).doubleValue(), (new
Double(list4.get(i).toString()).doubleValue()));
    }

    XYSeriesCollection dataset = new XYSeriesCollection();
    dataset.addSeries(series1);
    dataset.addSeries(series2);
    dataset.addSeries(series3);
    dataset.addSeries(series4);

    JFreeChart chart = ChartFactory.createXYLineChart(
        title, // chart title
        "time", // x axis label
        "rate", // y axis label
        dataset, // data
        PlotOrientation.VERTICAL,
        true, // include legend
        true, // tooltips

```

```

        );

        ChartPanel chartPanel = new ChartPanel(chart);
        chartPanel.setPreferredSize(new java.awt.Dimension(500, 270));
        chartPanel.setMouseZoomable(true, false);

        BufferedImage image = new
BufferedImage(500,270,BufferedImage.TYPE_4BYTE_ABGR);
        Graphics2D g2 = image.createGraphics();
        Rectangle2D rect = new Rectangle2D.Double(0,0,500,270.0);
        Rectangle2D drawer = new
Rectangle2D.Double(0,0,rect.getWidth()-rect.getX(),rect.getHeight()-
rect.getY());
        System.out.println(rect.toString());
        try{
            ChartUtilities.saveChartAsPNG(new
File(filename),chart,(int)rect.getWidth(),(int)rect.getHeight());
        }
        catch(Exception e){
            e.printStackTrace();
        }
    }
}

```

Agent.java:

```

public class Agent {

    int id;
    double endowment;

    public Agent(int id, double endowment){
        this.id = id;
        this.endowment = endowment;
    }

    public String toString(){
        return "Agent " +id + " endowment "+endowment;
    }

}

```

4.4 SİMÜLASYON SONUÇLARI

Belirtilen simülasyon parametreleri için simülasyon çıktılarını aşağıda göstermekteyiz:

MODE=0,

$\alpha_N = 0.6$

$\varepsilon_H = 0.7$

$\varepsilon_L = 0.7$

$Q(A) = A$

$Q(A, B) = 2(A + B)$

COUNT = 100

MIN_RATIO= 0.001

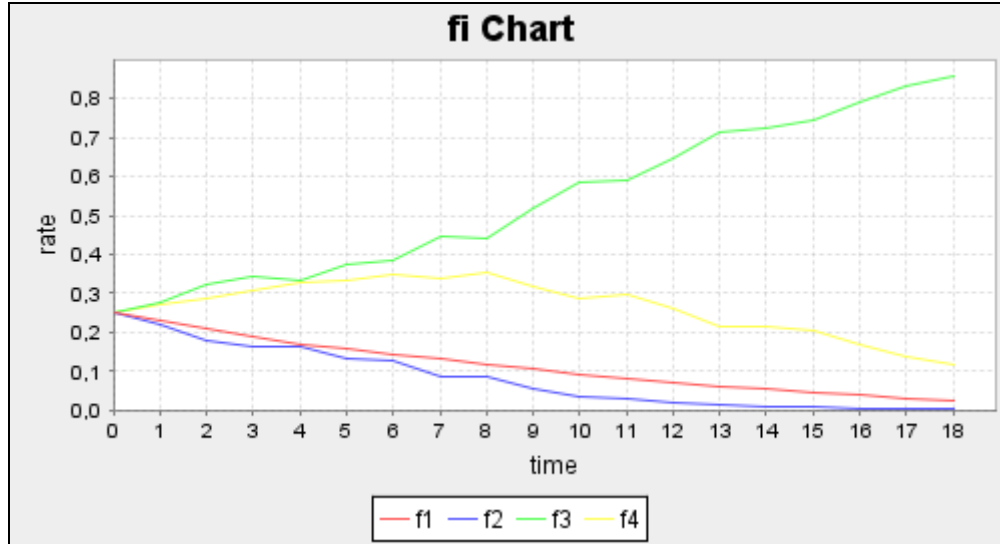
MAX_NUM_OF_ITERATIONS = 200

NUMBER_OF_AGENTS = 100

MAX_ENDOWMENT = 100

f1_ratio = f2_ratio = f3_ratio = f4_ratio = 0.25

değerleri için Simülasyon çıktısı aşağıdaki gibidir:



Şekil 4.4.1 Simülasyon Zaman Serisi Çıktısı

Yukarıdaki grafikte x eksenı zamanı, y eksenı türlerin frekanslarını (popülasyonda bulunma yüzdelerini) göstermektedir. Yukarıda görüldüğü türler eşit popülasyon yüzdeleri ile başlamakta (0.25) ama zamanla f3 (T3) popülasyonda baskın hale gelmektedir.

MODE=0,

$\alpha_N = 0.6$

$\varepsilon_H = 0.5$

$\varepsilon_L = 0.5$

$Q(A) = A$,

$Q(A, B) = 2(A + B)$

COUNT = 100

MIN_RATIO= 0.001

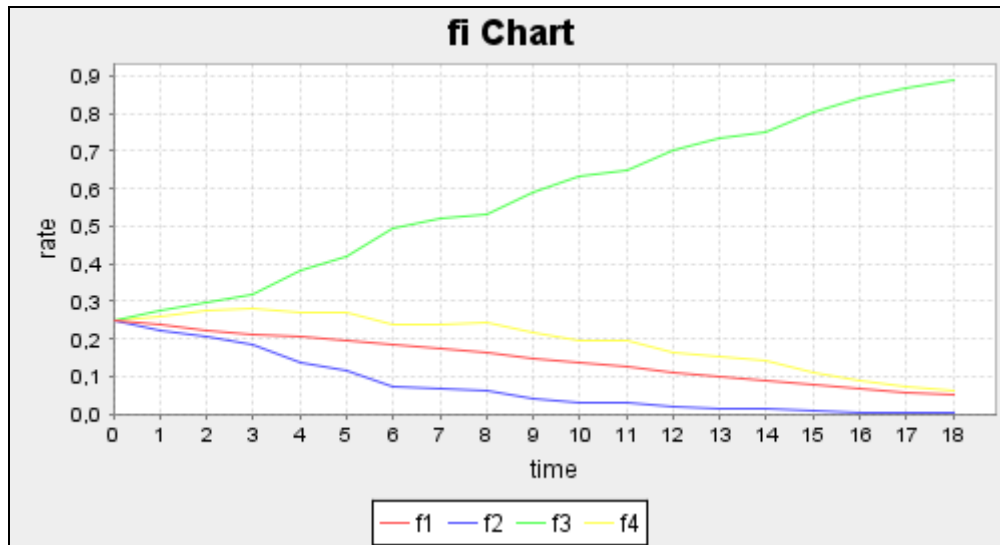
MAX_NUM_OF_ITERATIONS = 200

NUMBER_OF_AGENTS = 100

MAX_ENDOWMENT = 100

f1_ratio = f2_ratio = f3_ratio = f4_ratio = 0.25

değerleri için Simülasyon çıktısı aşağıdaki gibidir:



Şekil 4.4.2 Simülasyon Zaman Serisi Çıktısı

Yukarıdaki grafikte de x eksenı zamanı, y eksenı türlerin frekanslarını (popülasyonda bulunma yüzdelerini) göstermektedir. Yukarıda görüldüğü türler eşit popülasyon yüzdeleri ile başlamakta (0.25) ama zamanla f3 (T3) yine popülasyonda baskın hale gelmektedir.

MODE=0,

$\alpha_N = 0.8$

$\varepsilon_H = 0.5$

$\varepsilon_L = 0.5$

$Q(A) = A$,

$Q(A, B) = 2(A + B)$

COUNT = 100

MIN_RATIO= 0.001

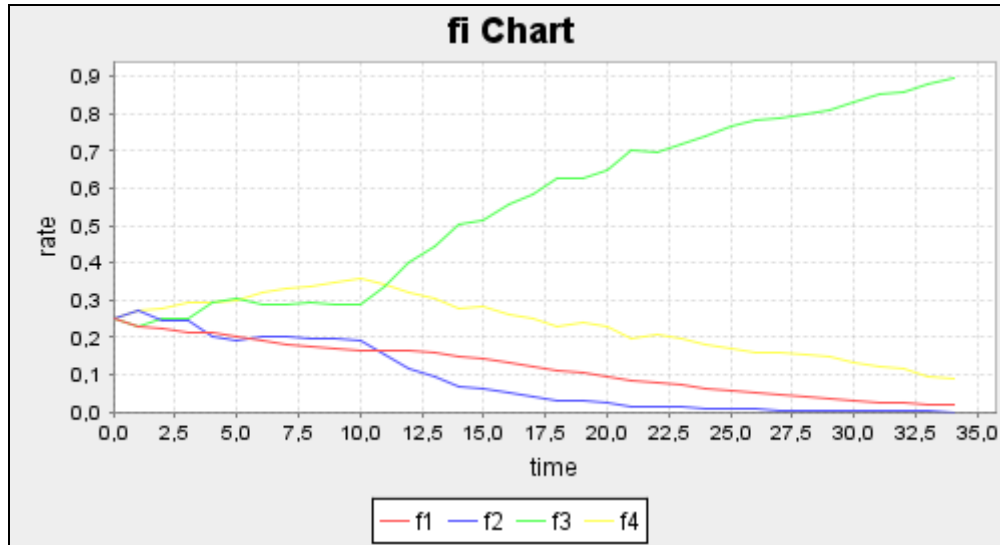
MAX_NUM_OF_ITERATIONS = 200

NUMBER_OF_AGENTS = 100

MAX_ENDOWMENT = 100

f1_ratio = f2_ratio = f3_ratio = f4_ratio = 0.25

değerleri için Simülasyon çıktısı aşağıdaki gibidir:



Şekil 4.4.3 Simülasyon Zaman Serisi Çıktısı

Yukarıdaki grafikte de x eksenı zamanı, y eksenı türlerin frekanslarını (popülasyonda bulunma yüzdelerini) göstermektedir. Yukarıda görüldüğü türler eşit popülasyon yüzdeleri ile başlamakta (0.25) ama zamanla f3 (T3) yine popülasyonda baskın hale gelmektedir.

MODE=1,

$$0 < \alpha_N < 1$$

$$\varepsilon_H = 0.7$$

$$\varepsilon_L = 0.7$$

$$Q(A) = A$$

$$Q(A, B) = 2(A + B)$$

COUNT = 100

MIN_RATIO= 0.001

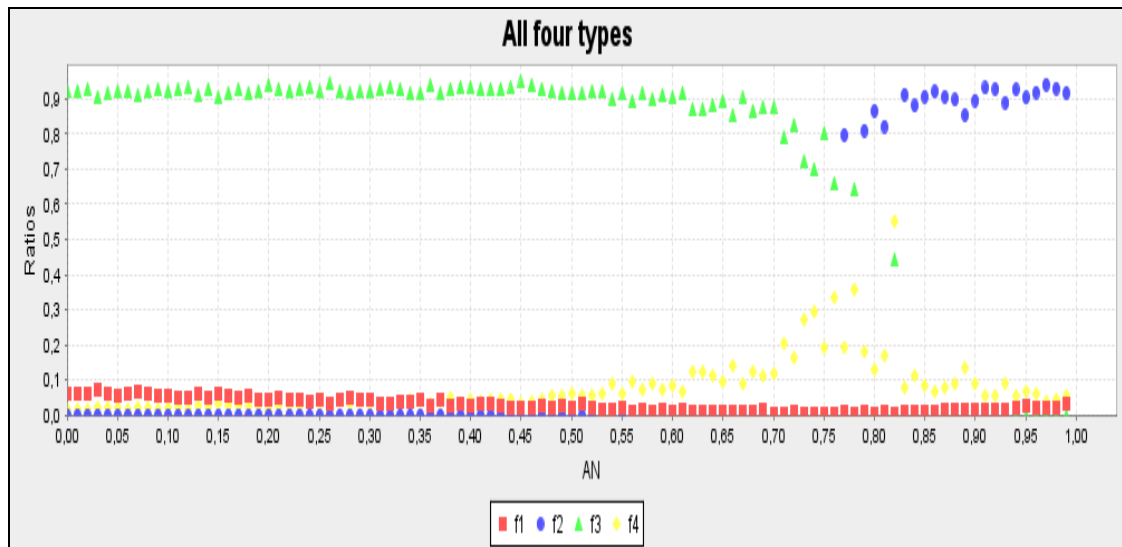
MAX_NUM_OF_ITERATIONS = 200

NUMBER_OF_AGENTS = 100

MAX_ENDOWMENT = 100

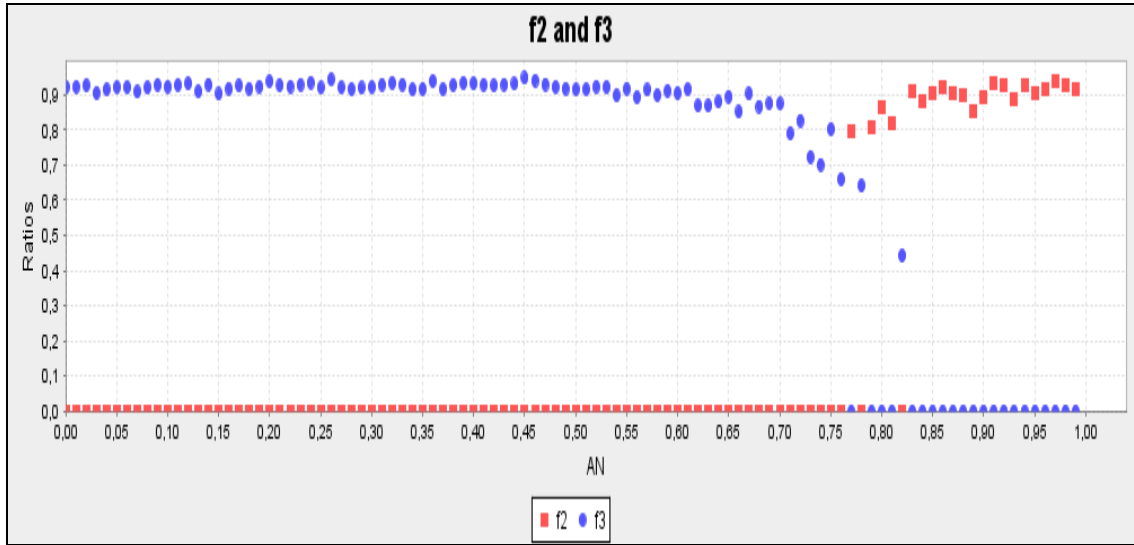
f1_ratio = f2_ratio = f3_ratio = f4_ratio = 0.25

değerleri için Simülasyon çıktısı aşağıdaki gibidir:

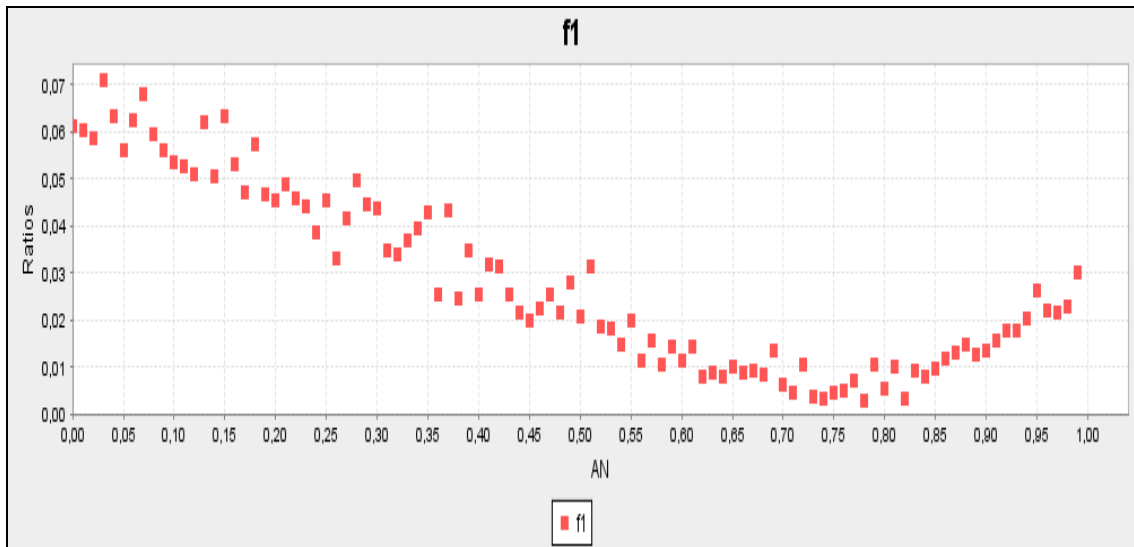


Şekil 4.4.4.a. Farklı α_N değerleri için sonuçlar

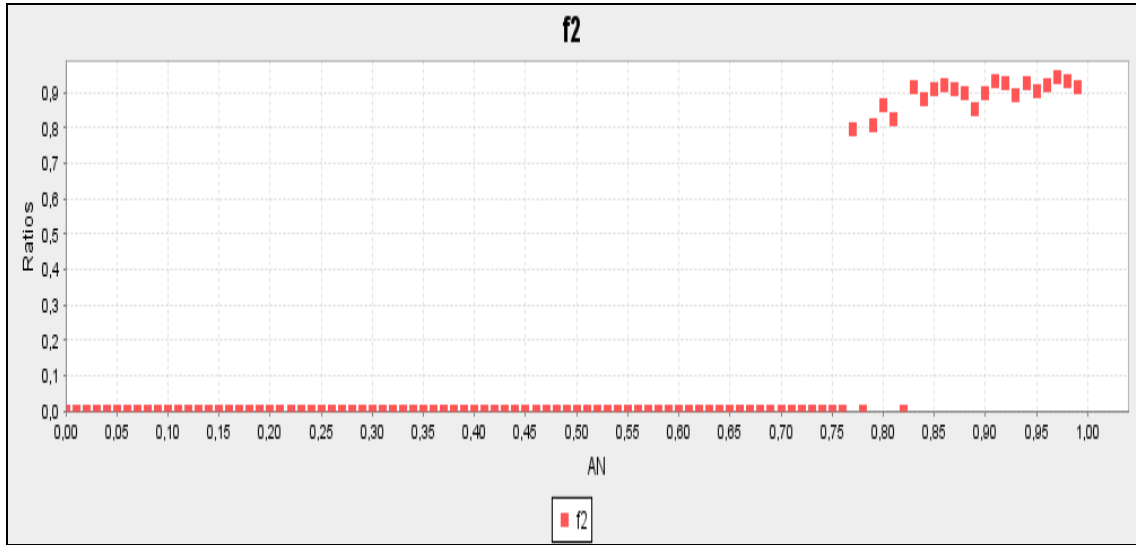
Yukarıdaki grafikte x eksenini α_N ($0 < \alpha_N < 1$) değerini, y eksenini ise türlerin frekanslarını göstermektedir. Yukarıda görüldüğü gibi α_N değeri 0.7'den küçük iken popülasyonda f3 (T3) baskın iken, α_N değeri 0.8'den büyük iken popülasyonda f2 (T2) daha baskın bir hale gelmektedir. Aşağıdaki grafikler de yukarıdaki grafiğin başka şekilde bir gösterimidir:



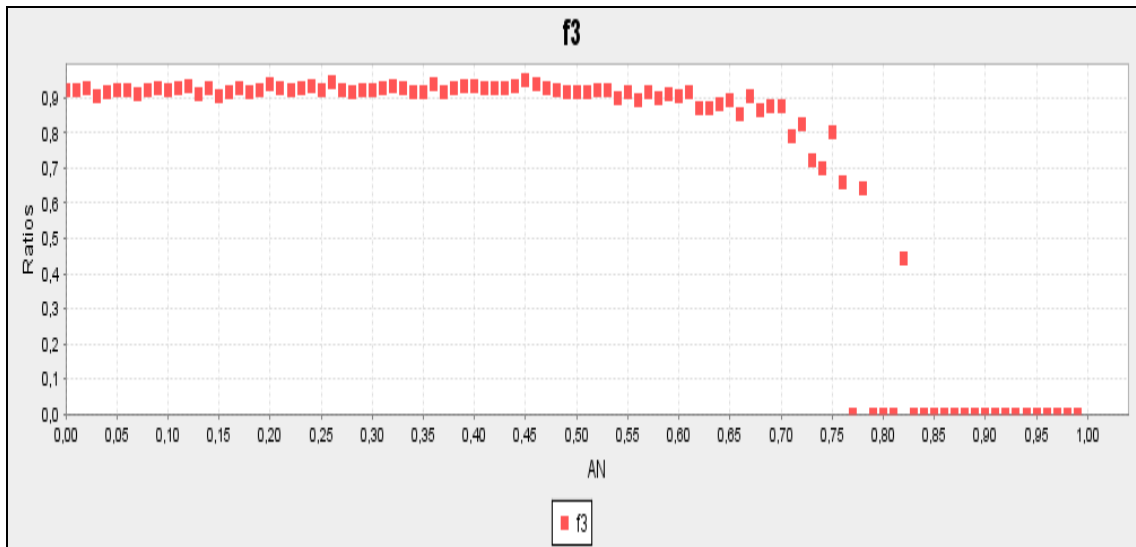
Şekil 4.4.4.b. Farklı α_N değerleri için sonuçlar



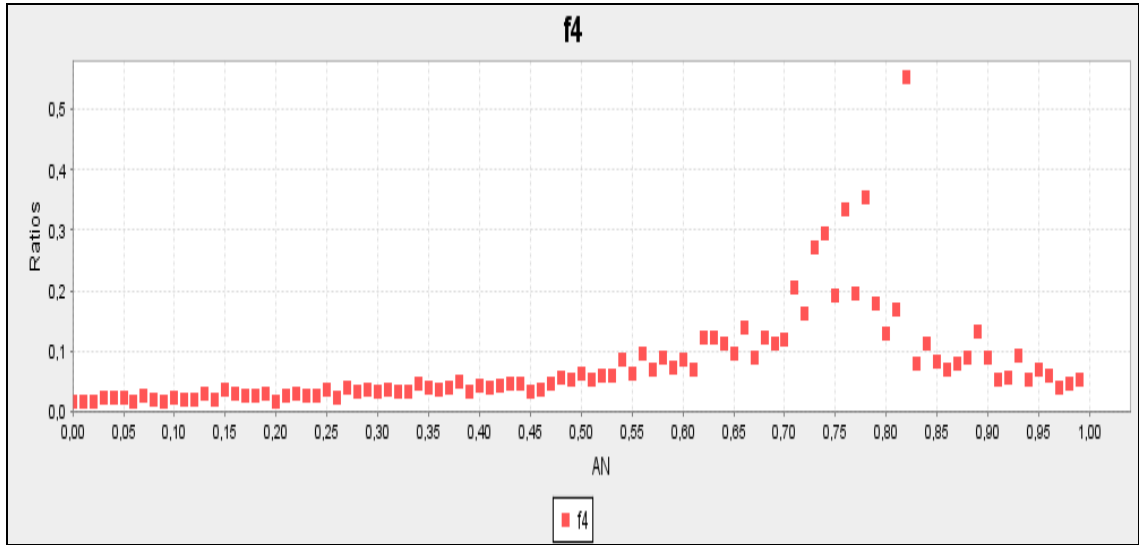
Şekil 4.4.4.c. Farklı α_N değerleri için sonuçlar



Şekil 4.4.4.d. Farklı α_N değerleri için sonuçlar



Şekil 4.4.4.e. Farklı α_N değerleri için sonuçlar



Şekil 4.4.4.f. Farklı α_N değerleri için sonuçlar

MODE=2,

$\alpha_N = 0.6$

$0 < \varepsilon_H < 1$

$\varepsilon_L = 0.7$

$Q(A) = A$

$Q(A, B) = 2(A + B)$

COUNT = 100

MIN_RATIO= 0.001

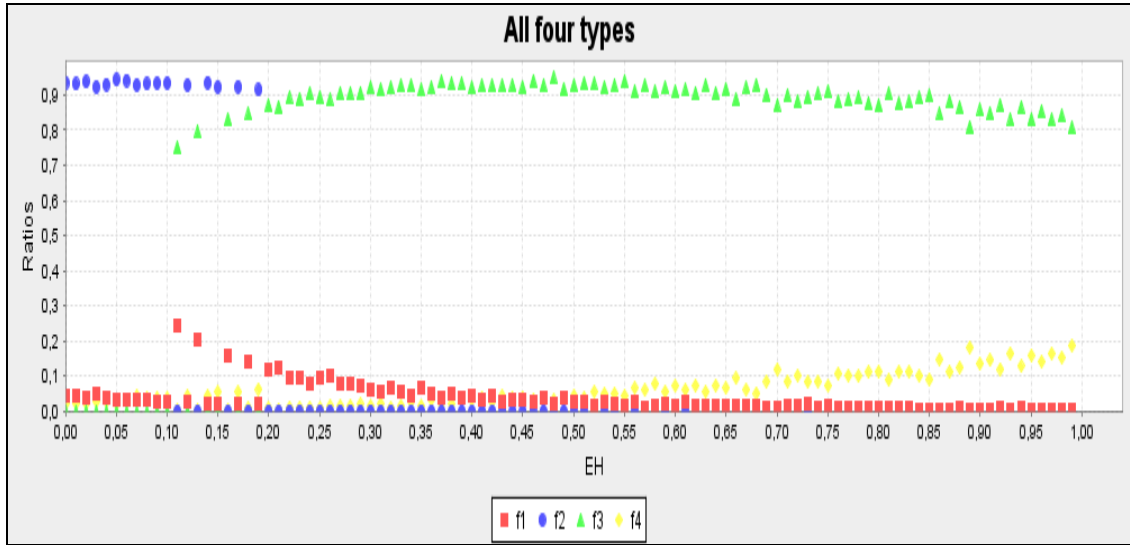
MAX_NUM_OF_ITERATIONS = 200

NUMBER_OF_AGENTS = 100

MAX_ENDOWMENT = 100

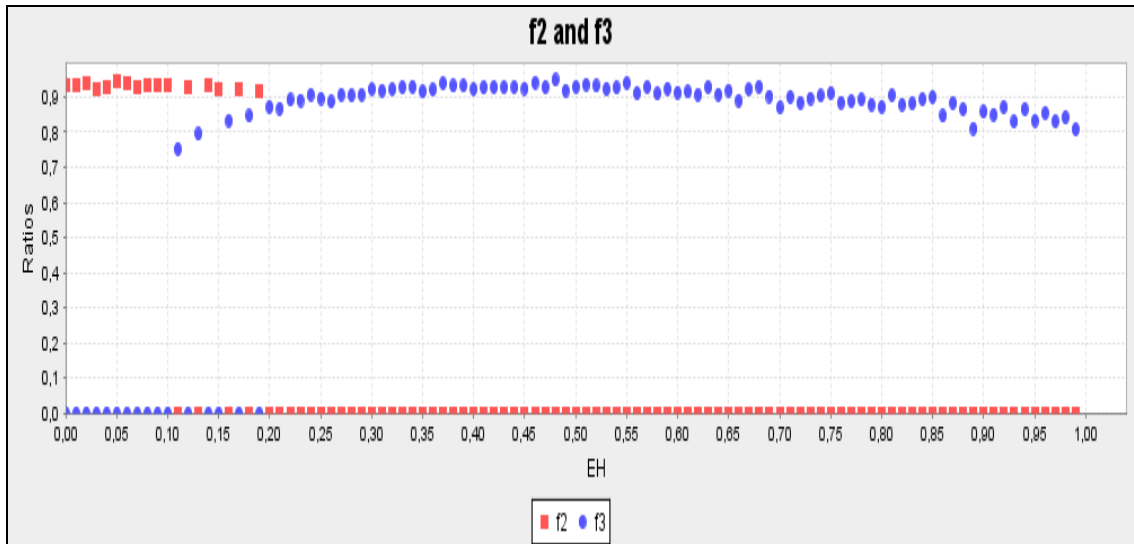
f1_ratio = f2_ratio = f3_ratio = f4_ratio = 0.25

değerleri için Simülasyon çıktısı aşağıdaki gibidir:

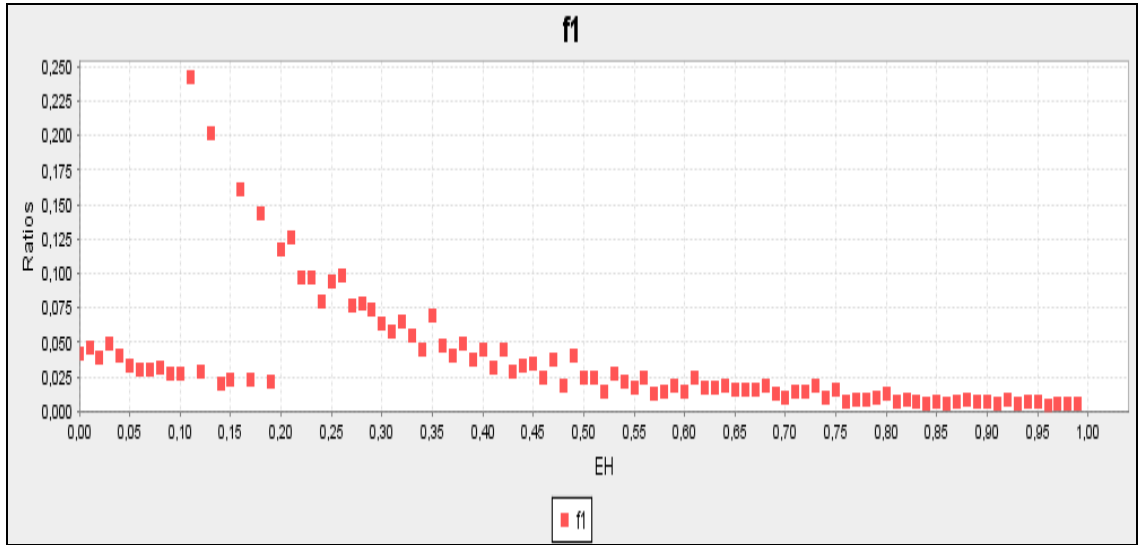


Şekil 4.4.5.a. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar

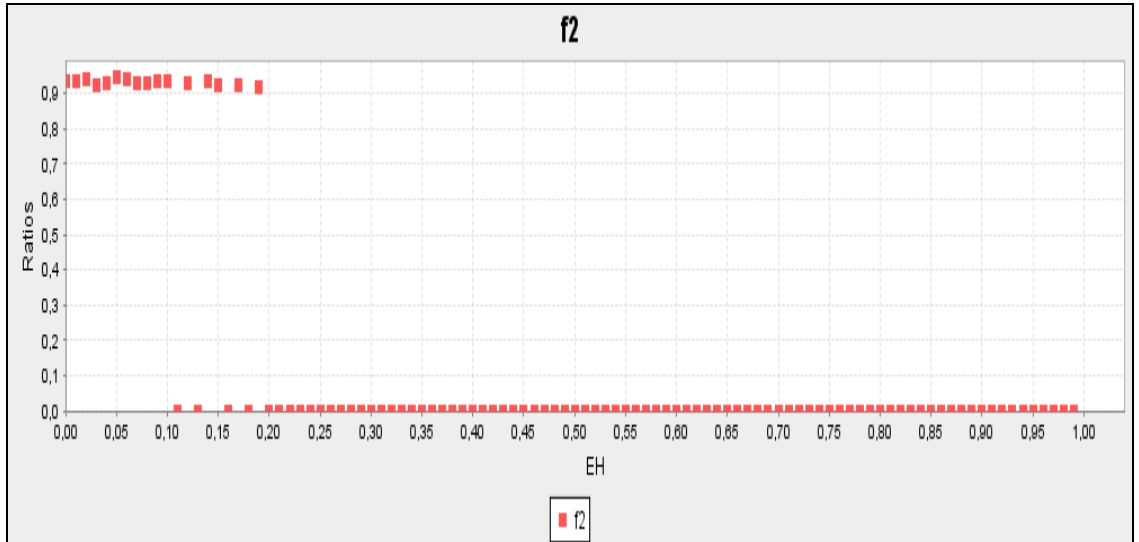
Yukarıdaki grafikte x eksenini ε_H ($0 < \varepsilon_H < 1$) değerini, y eksenini ise türlerin frekanslarını göstermektedir. Yukarıda görüldüğü gibi ε_H değeri 0.1'den küçük iken popülasyonda f2 (T2) baskın iken, ε_H değeri 0.2'den büyük iken popülasyonda f3 (T3) daha baskın bir hale gelmektedir. Aşağıdaki grafikler de yukarıdaki grafiğin başka şekillerdeki gösterimleridir:



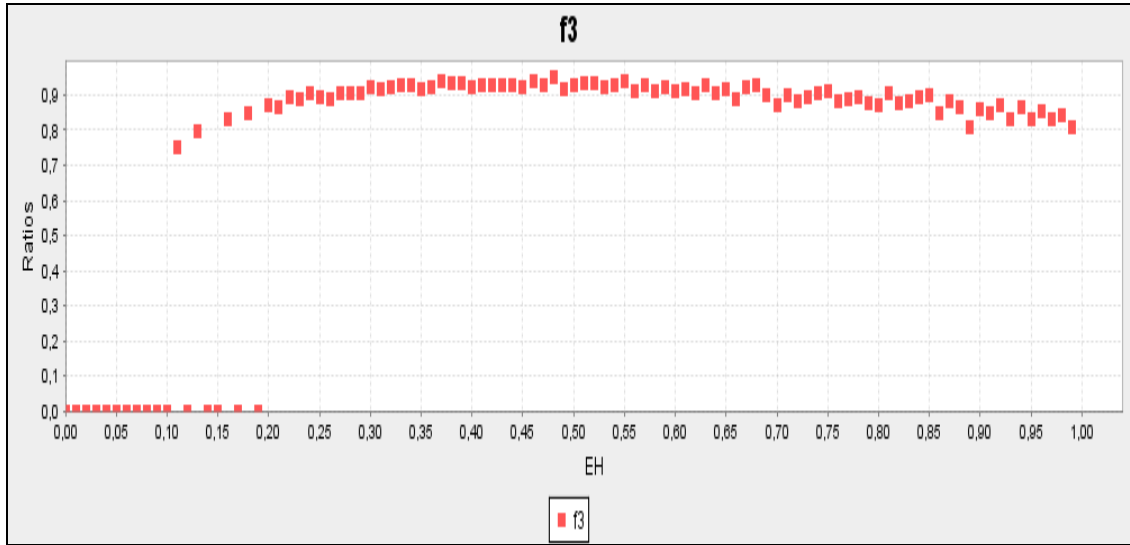
Şekil 4.4.5.b. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar



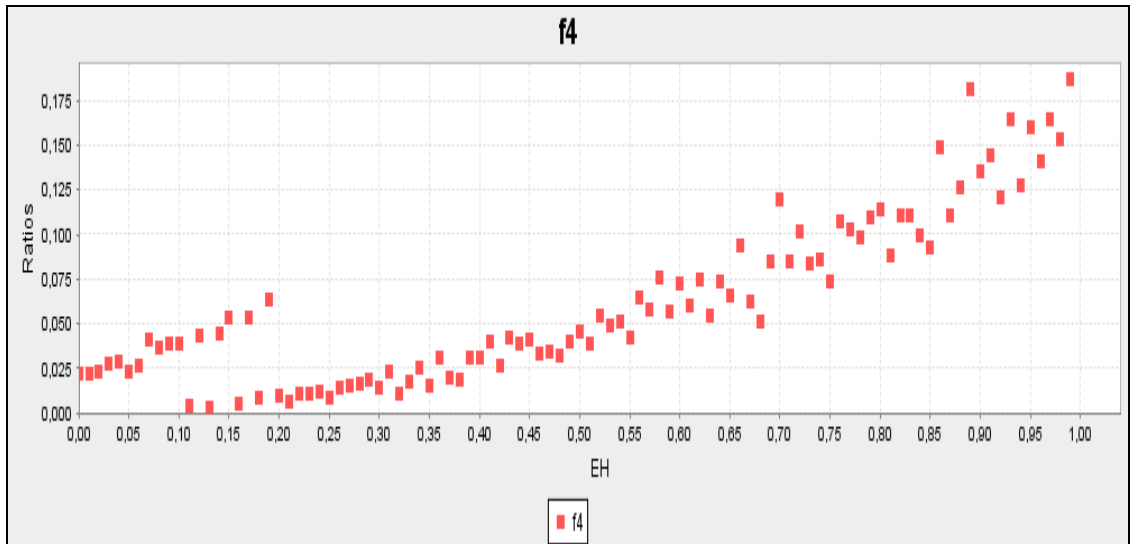
Şekil 4.4.5.c. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar



Şekil 4.4.5.d. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar



Şekil 4.4.5.e. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar



Şekil 4.4.5.f. Farklı ε_H değerleri için sonuçlar

MODE = 3,

$\alpha_N = 0.6$

$\varepsilon_H = 0.7$

$0 < \varepsilon_L < 1$

$Q(A) = A$

$Q(A, B) = 2(A + B)$

COUNT = 100

MIN_RATIO= 0.001

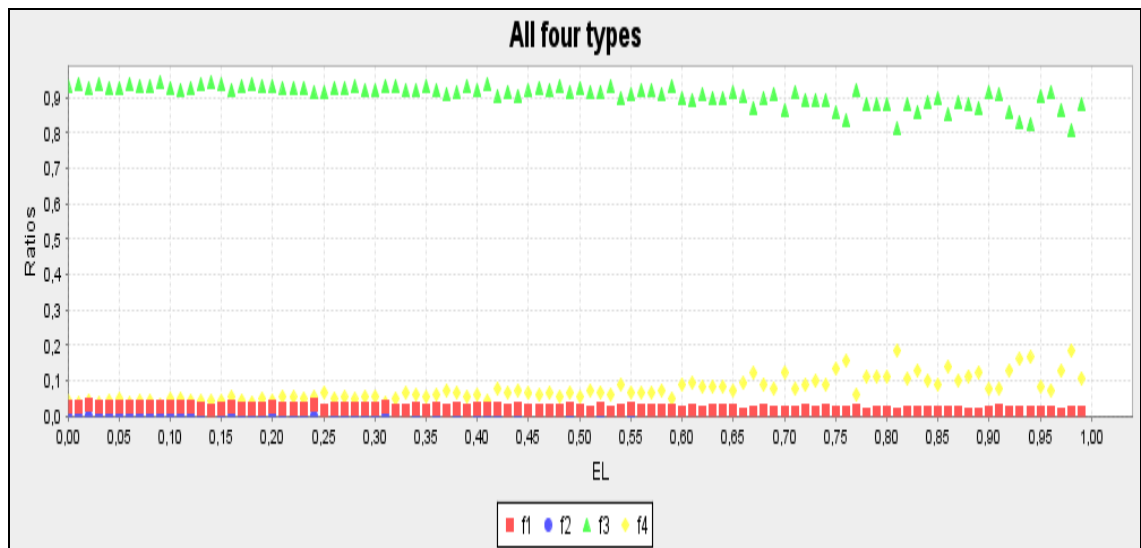
MAX_NUM_OF_ITERATIONS = 200

NUMBER_OF_AGENTS = 100

MAX_ENDOWMENT = 100

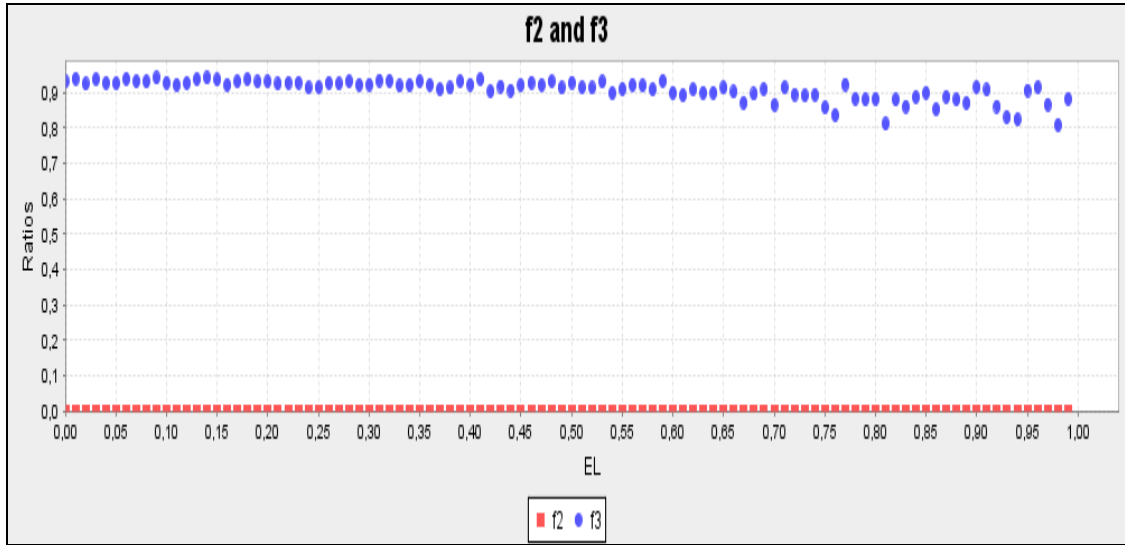
f1_ratio = f2_ratio = f3_ratio = f4_ratio = 0.25

değerleri için Simülasyon çıktısı aşağıdaki gibidir:

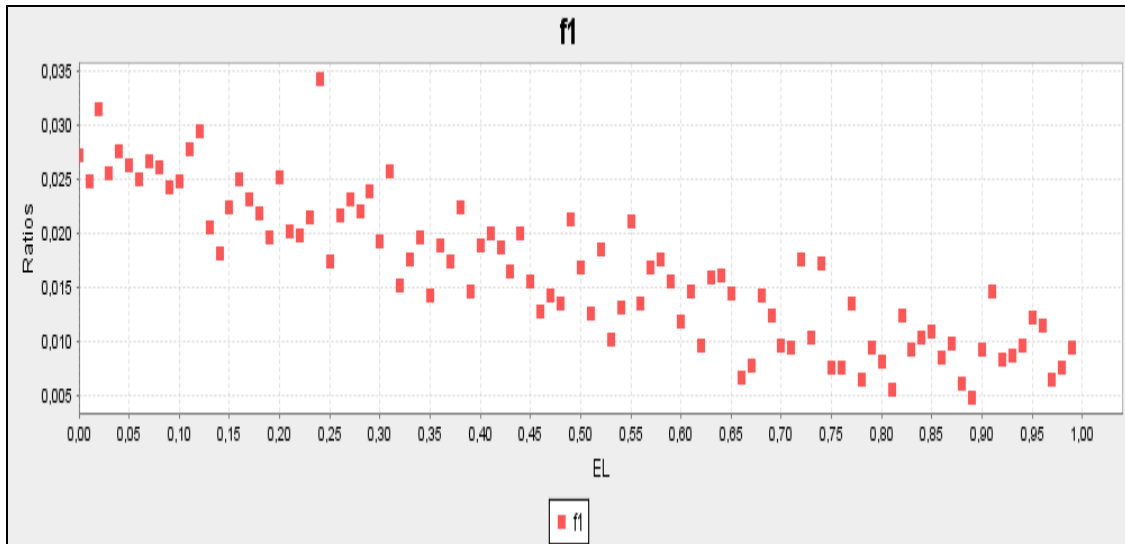


Şekil 4.4.6.a. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar

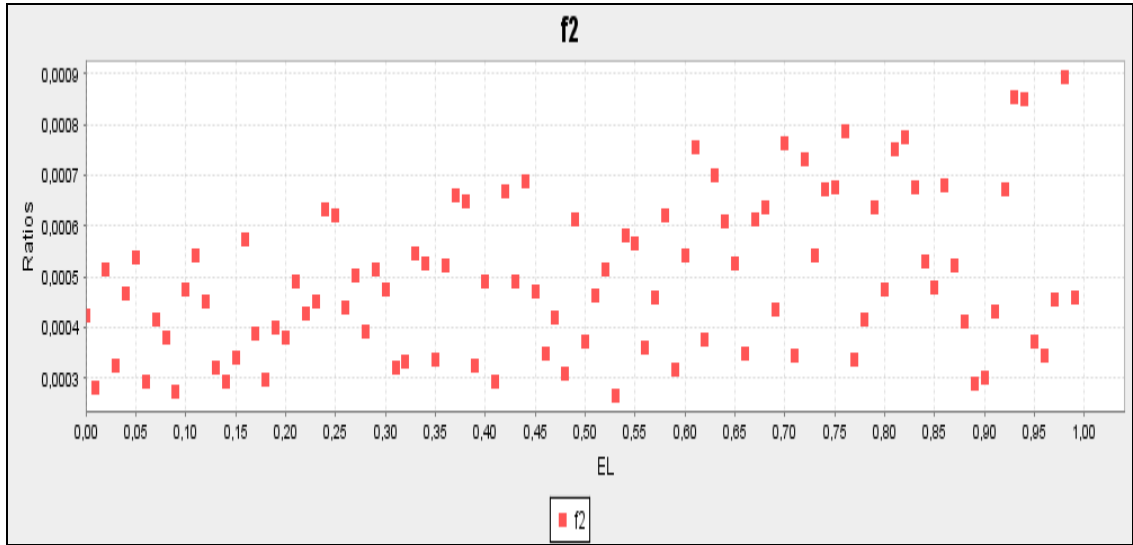
Yukarıdaki grafikte x eksenini ε_L ($0 < \varepsilon_L < 1$) değerini, y eksenini ise türlerin frekanslarını göstermektedir. Yukarıda görüldüğü gibi bütün ε_L değeri için popülasyonda f3 (T3) baskın haldedir. Aşağıdaki grafikler de yukarıdaki grafiğin başka şekillerdeki gösterimleridir:



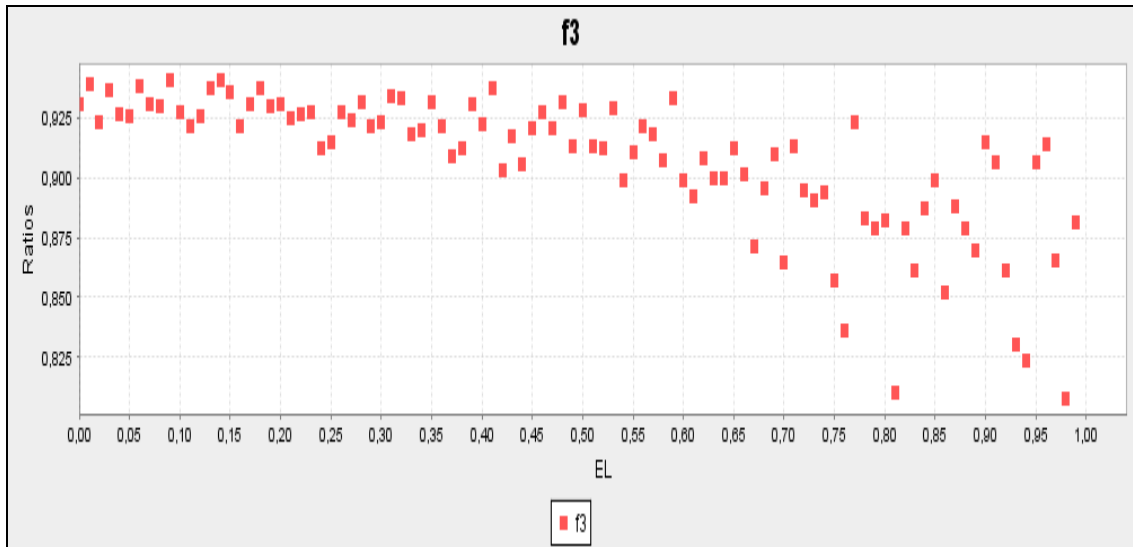
Şekil 4.4.6.b. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar



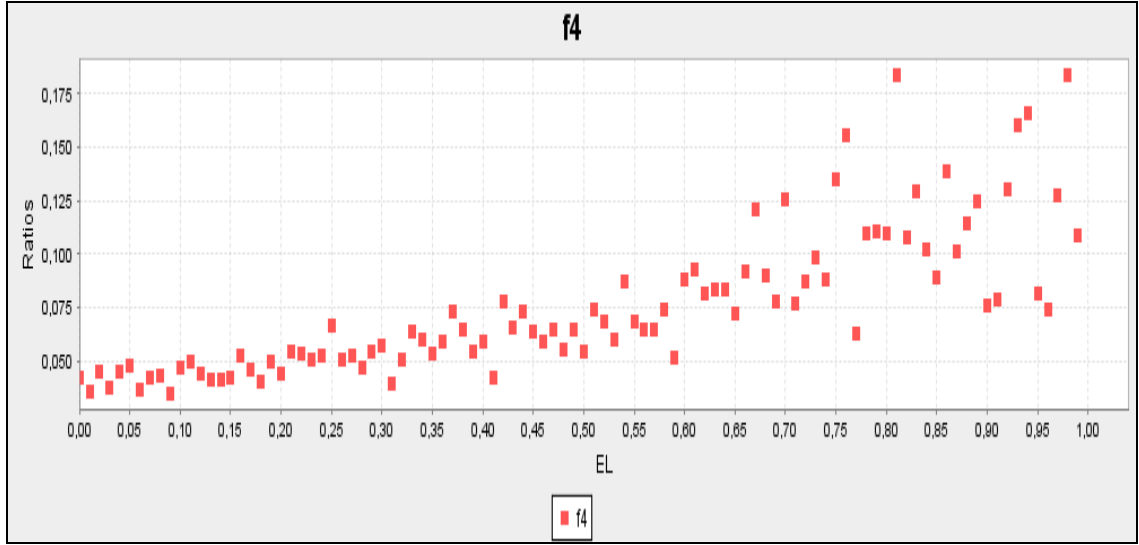
Şekil 4.4.6.c. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar



Şekil 4.4.6.d. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar



Şekil 4.4.6.e. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar



Şekil 4.4.6.f. Farklı ε_L değerleri için sonuçlar

BÖLÜM 5

SONUÇ

Karmaşıklık teorisi görece yeni bir yaklaşım olmasına rağmen oldukça ilerleme kaydetmiştir. Karmaşıklık teorisi geleneksel analitik bilimin baş edemediği problemlerle baş etme kapasitesine sahiptir ve bu bağlamda yeni bir bilimsel akımdır. Karmaşıklık teorisi Kuhn'un (1970) bilimsel devrimler üzerine ortaya koyduğu şartları sağlayarak bilimsel bir devrimi meydana getirmektedir. Bu akım altında yapılan bilimsel çalışmalar bu akımın yalnızca bilimsel bir moda olmadığını göstermektedir. Karmaşıklık teorisi her alanda standart analitik bilimle rekabet eden yeni bir bilimdir. Ekonomide de durum böyledir. Karmaşık sistem teorisinin en verimli olabilecek alanlarından önemli bir tanesi ekonomidir. Karmaşıklık teorisi hem metodolojik hem de ontolojik olarak neoklasik ana akım ekonomiye karşıt bir yaklaşımdır.

Bu tezde karmaşıklık yaklaşımı altında yapılabilecek çalışmalara örnek olarak bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Yaptığımız simülasyonda ajan temeli bir sosyal etkileşim modeli kullanılmıştır. Ajanların ortak veya yalnız başına çeşitli katkı seviyelerinde çalışarak üretimde bulunduğunu, ve ortak çalıştıklarında ürettikleri zenginliği nasıl paylaşacaklarını modelledik. Popülasyonun bu bağlamda farklı paylaşım ve katkı stratejileri güden dört farklı türden oluştuğunu ifade ettik ve bu türleri değişime tabi kıldık. Modelde ajanlar yerel olarak etkileşmekte ve bir global denetleyici bulunmamaktadır. Yapılan simülasyonda ajanlar arasındaki yerel etkileşim parametrelerinin doğurduğu global sonuçlar ve popülasyondaki davranışsal stratejilerin evrimi üzerindeki etklileri ortaya konmuştur. Bu bağlamda çeşitli yerel parametre değerleri için global sonuçlar elde edilmiştir. Tür popülasyonlarının frekanslarının değişimi ve türlerin baskın hale gelmesi grafiklerle gösterilmiş yaklaşık eşik değerler bulunmuştur.

KAYNAKÇA

- Albin, P.S. (1998). *Barriers and Bounds to Rationality: Essays on Economic Complexity and Dynamics in Interactive Systems*. Princeton: Princeton University Press,
- Axtell, Robert and Joshua M. Epstein (1999). Coordination in Transient Social Networks: An Agent-Based Model of the Timing of Retirement. In Henry Aaron (Ed.). *Behavioral Dimension of Retirement Economics*. New York: Russel Sage.
- Arthur, W. Brian, Ermoliev, Yuri M. and Kaniovski, Yuri M. (1987). Path-Dependent Processes and the Emergence of Macro-Structure. *European Journal of Operational Research*, vol. 30, pp. 294-303.
- Arthur, W. Brian, (1988). Self-Reinforcing Mechanisms in Economics. Pages 9-31 in P. W. Anderson, K. J. Arrow, and D. Pines, eds. *The Economy as an Evolving Complex System*. Addison-Wesley, Redwood City, CA.
- Arthur, W. B., (1996). Increasing Returns and the New World of Business. *Harvard Business Review*, July-August, 100 - 109.
- Arthur, W.B., Durlauf, S. ve Lane, D. A. (1997). The Economy as an Evolving Complex System II. MA: Addison-Wesley.
- Arthur, W. B. (2000). Complexity and the Economy. In: Colander, D.A. (Ed.)(2000a), *The Complexity Vision and the Teaching of Economics*, Edward Elgar, 19-28.
- Bak P. (1996). *How nature works*. NY: Springer-Verlag.
- Bertuglia, C. and Vaio, V. (2005). *Nonlinearity, chaos, & complexity*. Oxford, UK: Oxford University Press.

- Brock, William A. (1997). Asset Price Behavior in Complex Environments. In: Arthur, W.B., Durlauf, S.N., Lane, D.A. (Eds.), *The Economy As an Evolving Complex System II*, Addison-Wesley, 385-423.
- Brock, W.A. (1988). Nonlinearity and complex dynamics in economics and Finance. In: Anderson, P.W., Arrow, K.J., Pines, D. (Eds.), *The Economy as an Evolving Complex System*, vol. V. Addison-Wesley, Redwood City, CA, 77-97.
- Canpolat, N., Özel, H. (2008). Evolutionary Dynamics of Globalization. *Turkish Economic Association*, Discussion Paper, 2008/16.
- Cilliers, P. (1998). *Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems*. London: Routledge.
- Colander, D. (ed.) (2000a). *The Complexity Vision and the Teaching of Economics*. Edward Elgar, 1-16.
- Colander, D. (2000b). A thumbnail sketch of the history of thought from a complexity perspective. In: D. Colander (Ed.), *Complexity and the History of Economic Thought*, London, UK: Routledge, 31-43.
- Comim, Flavio (2000). Marshall and the Role of Common Sense in Complex Systems. In: D. Colander (Ed.), *Complexity and the History of Economic Thought*, London, UK: Routledge, 155-192.
- David, Paul A. (1985). Clio and the Economics of QWERTY. *American Economic Review*, 75, 332-337.
- Epstein, Joshua M. and Axtell, Robert (1996). *Growing Artificial Societies - Social Science from the Bottom Up*, Cambridge MA: MIT Press.

- Fontana, M. (2008). The Complexity Approach to Economics: A Paradigm Shift. *CESMEP*, WP
- Foster, J. (2005). From simplistic to complex systems in economics. *Cambridge Journal of Economics*, 29, no. 6, 873-892.
- Hayek F. A. (1967). The Results of Human Action but not of Human Design. *Studies in Philosophy, Politics and Economic*, London: Routledge & Kegan Paul: 189-204
- Heylighen, F. (2002). The Science of Self-organization and Adaptivity. In: *The Encyclopedia of Life Support Systems*, EOLSS Publishers Co. Ltd.
- Kaldor, N. (1970). The Case for Regional Policies. *Scottish Journal of Political Economy*, November, 337-348.
- Katz, Michael L. and Carl S. (1986). Technology Adoption in the Presence of Network Externalities. *Journal of Political Economy*, 94, 822-841.
- Keynes, John M. (1973 [1937]). The General Theory of Employment, Money and Interest, in The Collected Writings of John Maynard Keynes, vol. VII. (D. Moggridge ed.). London: Macmillan for the Royal Economic Society.
- Krugman, P. (1997). How the Economy Organizes Itself in Space: A survey of the New Economic Geography. In: Arthur, W.B., Durlauf, S.N., Lane, D.A. (Eds.), *The Economy As an Evolving Complex System II*, Addison-Wesley, 239-262.
- Kuhn, T. (1970). The structure of scientific revolutions (2nd ed.). Chicago: University of Chicago Press.

- Lane, David (1997). Is What Is Good For Each Best For All? Learning from Others in the Information Contagion Model. In: Arthur, W.B., Durlauf, S.N., Lane, D.A. (Eds.), *The Economy As an Evolving Complex System II*, Addison-Wesley, 105-127.
- Marshall, Alfred (1961). [first edition 1890, eight edition 1920], *Principles of Economics*, 2 vols. (vol. I Text, vol. II Notes). edited by C. W. Guillebaud, London: Macmillan.
- Montgomery, Michael R. (2000). Complexity Theory An Austrian Perspective. In: D. Colander (Ed.), *Complexity and the History of Economic Thought*, London, UK: Routledge, 227-240.
- Nicolis, G. and Prigogine, I. (1977). *Self-Organization in Non-equilibrium Systems*. New York: Wiley.
- North, D. C. (1997). Some Fundamental Puzzles in Economic History/Development. In: Arthur, W.B., Durlauf, S.N., Lane, D.A. (Eds.), *The Economy As an Evolving Complex System II*, Addison-Wesley, 223-237.
- Sutherland, J. W. (1975). *Systems: Analysis, Administration, and Architecture*. New York: Van Nostrand.
- Tesfatsion, Leigh, (1997). How Economists Can Get ALife. In: Arthur, W.B., Durlauf, S.N., Lane, D.A. (Eds.), *The Economy As an Evolving Complex System II*, Addison-Wesley, 533-564.
- Wible, James (2000). What is Complexity. In: D. Colander (Ed.), *Complexity and the History of Economic Thought*, London, UK: Routledge, 15-30.
- Wolfram, Stephen (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media, Inc.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Baki ÜNAL

Doğum Yeri ve Tarihi : Uşak 1981

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Çankaya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği

Yüksek Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce, Rusça, Almanca

Bilimsel Faaliyetleri :

İş Deneyimi

Stajlar : MAN A.Ş., Söke UN

Projeler :

Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi : bakiunal@yahoo.com

Tarih : 25.01.2010