

KOMPLEKSİTE İKTİSADI VE AJAN BAZLI KOMPÜTASYONEL İKTİSAT*

Complexity Economics And Agent- Based Computational Economics**

Emre ÖRÜN¹

ÖZET

İktisadi ajanlar arasındaki etkileşimde ajanların heterojenliğini ve sınırlı rasyonaliteye sahip olmasını göz ardı eden ve katı değişmez varsayımlar ile iktisatta teorik modeller geliştiren geleneksel iktisadın geçerliliği 2008 küresel finansal kriz ile sorgulanmıştır. Kompleksite iktisadı ile birlikte artık iktisatta sınırlı rasyonalite, ajanların birbirleri ile etkileşimi ve heterojenliği, dengesizlik veya birden çok denge durumu iktisadi modellemeye dâhil olmuştur. Bu tür esnek varsayımlarla beraber kompütasyon bilimindeki gelişmeler iktisadi ajan bazlı kompütasyonel iktisat ile daha ileriye taşınmıştır. Özellikle endüstriyel organizasyon, makro iktisat, politik iktisat ve bilhassa emek piyasası, çevre politikaları ve iktisadi ağ oluşumunda ajan bazlı kompütasyonel iktisat kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, geleneksel iktisat ve kompleksite iktisadının temel özelliklerine ve kompleksite iktisadının geleneksel iktisattan farklı yönlerine ve ajan bazlı kompütasyonel iktisada değinilmiştir. Çalışmanın temel amacı, kompleksite iktisadının ve ajan bazlı kompütasyonel iktisadın geleneksel iktisada göre avantajlarının ve dezavantajlarının neler olduğuna değinmektir. Çalışmada kompleksite iktisadı ile birlikte ajan bazlı kompütasyonel iktisat, iktisatçılara ve araştırmacılara teori geliştirmede varsayım açısından gerekli esnekliği sağladığı ve geleneksel iktisada göre üstün olduğu çıkarımı yapılabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Geleneksel İktisat, Kompleksite İktisadı, Ajan Bazlı Kompütasyonel İktisat, Denge, Sınırlı Rasyonalite

ABSTRACT

The validity of traditional economics that ignores the heterogeneity and limited rationality of agents in the interaction between economic agents and the theoretical models in economics by rigid unchanging assumptions has been questioned by the 2008 global financial crisis. With the complexity economics, limited rationality in economics, interactions and heterogeneity of agents with each other, imbalance or multiple equilibrium state have been included in economic modeling. With such flexible assumptions, developments in computational science have taken forward to economics by the agent-based computational economics. Agent-based computational economics has been used in industrial organization, macroeconomics, political economy and especially in labor market, environmental policies and economic network formation. In this study, it was mentioned to the basic features of traditional economics and complexity economics and different aspects of complexity economics from traditional economics and agent-based computational economics. The main purpose of this study is to discuss the advantages and disadvantages of complexity economics and agent-based computational economics compared to traditional economics. In this study, it can be concluded that complexity economics and agent-based computational economics provide the necessary flexibility in terms of assumptions in developing to theory and are superior to traditional economics.

Keywords: Traditional Economics, Complexity Economics, Agent-Based Computational Economics, Equilibrium, Bounded Rationality

1. ORCID: 0000-0002-2739-1959

1. Araştırma Görevlisi, T.C. Yozgat Bozok Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü.

* Bu çalışma yeğenim Zeynep CANİBEK'in aziz hatırasına ithaf edilmiştir.

** ÖRÜN, Emre (2020). "Kompleksite İktisadı ve Ajan Bazlı Kompütasyonel İktisat". Akademi Sosyal Bilimler Dergisi, C. 7, S. 19, s. 48-62.

Makale Geliş Tarihi: 28 Haziran 2019 Kabul Tarihi: 14 Aralık 2019

GİRİŞ

20. yüzyılın ortalarından itibaren birçok disiplinde (psikoloji, hayvan psikolojisi, yapay zekâ, antropoloji, felsefe) olduğu gibi iktisatta da önemli değişiklikler olmuştur. 1950’li yıllardan sonra bilhassa ana akım iktisadında değişmeler yaşanmaya başlanmış ve iktisat giderek daha çok disiplinler arası bir bilim olma sürecine girmeye başlamıştır. Özellikle iktisattaki değişim rasyonalite kavramında oluşmuş ve sınırlı rasyonalite kavramı literatüre girmiştir (Bögenhold, 2014; Sunal ve Ögüt, 2017:53). Bu bağlamda Sunal ve Ögüt’e göre (2017);

“(…) yerleşik iktisadın tüketici probleminde yaklaşımı fayda maksimizasyonuna dayalı olarak kurgulanmışken, maksimizasyon yerine tatmine (satisficing) dayalı modeller kullanılmaya başlamıştır. Böylelikle ekonominin aktörlerinin; sürekli optimizasyon problemleri çözen birer makine değil, bazen sadece beklentilerini karşılamakla yetinen (satisficing agent) bazen de istese bile optimal sonuca ulaşamayan, dolayısıyla tam anlamıyla rasyonel davranamayan varlıklar olduğu kabulü iktisatta kendisine yer bulmuştur.”

Mamafih, yaşanan iktisadi krizlerle birlikte özellikle 2008 krizi ile birlikte iktisatta metodoloji tartışmaları daha çok yer almaya başlamış ve küresel kriz iktisat teorileri için bir “doğal deney” ve aynı zamanda kriz olmuştur. Ana akım DSGE modellerinin rasyonel beklentiler, temsili ajan ve tam rekabet gibi varsayımları krizi öngörmeye engel olmuş ve makroekonomik dinamiklerin doğasının tam olarak anlaşılmasına olanak vermemiştir (Fagiolo ve Roventini, 2017). Bu bağlamda, mevcut iktisat teorilerinin krizlere açıklık getirmeyişi ve geliştirilen teorileri temel alan iktisat politikalarının başarısızlığı “yeni arayışlara” sebebiyet vermiştir. Yeni arayışlar ile birlikte iktisatçıların ekonomiyi sistem yapısında sürekli değişime sebebiyet veren heterojen ajanların olduğu bir ekoloji olarak görmesi gerektiği kanısı ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda iktisatta artık tek bir neden ve sonucun olmadığını ayrıca gelişen teknoloji ile ekonomilerin de daha kompleks bir yapıya büründüğü söylenebilmektedir. Bu ise iktisatta artık yeni eğilimlerin ortaya çıkmasına, disiplinler arası etkileşimin önemine vurgu yapmaktadır.

Çalışmada ilk olarak geleneksel iktisadın temel özellikleri ve eksik yönlerine değinilecektir. Geleneksel iktisadın temel varsayımlarına değindikten sonra ikinci bölümde kompleksite iktisadının temel özellikleri ve geleneksel iktisat ile farklı olan yönlerine değinilecektir. Üçüncü bölümde ise ajan-bazlı kompütasyonel iktisat incelenecektir ve son olarak ise sonuç bölümü ile genel bir değerlendirme yapılacaktır.

1. Geleneksel Teori

İktisattaki önemli farklılıklardan birisi denge kavramıdır. Geleneksel yaklaşım ile kompleksite yaklaşımı arasındaki temel farklılık denge kavramına bakış açılarıdır. Geleneksel yaklaşım bireylerin rasyonel olduğunu belirtmekte ve bu bağlamda bireyler ekonomideki bütün malların fiyatlarını bildiği ve gelecekteki ve cari gelirlerinin bilindiği varsayılmıştır. Bireyler bu durumda gelirlerinden daha fazla harcama yapmayacak, firmalar ise ürünlerin fiyatını ve ücretlerin seviyesini bilerek ne kadar üretim yapacaklarına karar vermektedir. Firmalar tarafından üretilen ürünlerin yani derneşik arz ile tüketiciler tarafından talep edilen ürünlerin yani derneşik talebin birbirine eşit olduğu durumda ekonomi dengededir. Bu bağlamda, tam rekabette dengede olan bir ekonominin etkin (efficient) olduğu söylenmektedir. Bu durum ise ekonomide birinin refahının artması için diğer kişinin refahının azalmasını ifade etmektedir. Bu tür bir denge ise görünmez el aracılığıyla olmaktadır. Ayrıca, ekonomide ilk olarak Leon Walras tarafından geliştirilen ve hayır sever tellal olarak bilinen düzenleme mekanizması da bulunmaktadır. Bu mekanizma ekonomiyi dengeye getirmektedir. Ancak Rolf R. Mantel (1974), Gerard Debreu (1974) ve Hugo Sonnenschein (1972) tarafından, oldukça tahrip edici bir şekilde “tatonnement” sürecinin illa ekonomiyi dengeye

getirmeyeceği gösterilmiştir.

Geleneksel teoride iktisat piyasası içindeki dengenin karakteristik özelliklerine odaklanmaktadır (Kirman, 2018, s. 94). Ekonominin, dış şoklara tepki olarak bir dengeden diğerine sıçradığı/gittiği belirtilmektedir. Geleneksel teori, tüketiciler için bütçe kısıtı, firmalar için ise teknoloji kısıtı olan mikro temeller (sound microfoundations) üzerine kurulmuştur. Mikro temellerin üzerine kurulmasındaki temel amaç ise optimizasyonun sağlanmasıdır yani olası en iyi alternatife erişmektir. Geleneksel teoride rasyonalite kavramı ön planda tutulmuş ve bireylerin kararlarının rasyonel olarak nitelendirilmesi için katı (stringent) koşullar/şartlar (conditions) bulunmaktadır. Bir tüketici A malını B malına tercih ettiğinde B malını A malına tercih etmesi söz konusu değildir. Bu varsayım ilk bakışta mantıklı gelse de oldukça iddialı bir varsayım niteliği taşımaktadır. Gerçek hayatta bireyler tercihlerini değiştirebilmekte ve tercihlerini değiştirebilmek için ise herhangi bir sebep olmasına gerek yoktur. Ayrıca, bireylerin rasyonelliğine dair yapılan varsayım onların gerçekten gözlemlenen davranışları üzerine değil içgüdü (introspection) üzerine temellenmiştir. Gelecekle ilgili karar verme durumunda ise bireylerin sadece benzer beklentilere sahip olduğu değil ayrıca ekonominin evrildiği yöne doğru beklentilerin tutarlı olduğu belirtilmektedir. Ancak geleneksel yaklaşımda beklentilerin nasıl oluşturulduğu ise hâlâ cevabı aranan soru niteliğindedir (Kirman, 2018).

Geleneksel yaklaşımda mikro temeller oluşturulurken ve bireylerin beklentileri oluşturulurken ajanlar arası etkileşim, sosyal bağlar göz ardı edilmektedir. Ayrıca, geleneksel yaklaşımda modelleme aşağıdan yukarıya olmakla birlikte, modelde karar vericiler ilk olarak modellenir ve daha sonra ise test edilmektedir (Eren ve Kırer, 2017: 112; Kirman, 2018). Geleneksel yaklaşımda azalan marjinal getiri ve azalan marjinal faydanın kombinasyonu piyasanın doğal bir denge (balance) mekanizmasının olduğunu ve bu mekanizmanın ise fiyat olduğu belirtilmiştir. Fiyat üretici ve tüketici için temel bilgi niteliğindedir ancak fiyat düzeyinin ne olabileceği, nasıl hesaplanacağı ve tahmin edilip edilemeyeceği klasik dönemde cevapsız kalmıştır (Beinhocker, 2006: 29).

Geleneksel yaklaşımda, iktisadi yapıların oluşumunun uygulanmaması ve bu tür iktisadi yapıların basit bir şekilde parçaların incelenmesi ile açıklanamayacağı belirtilmektedir (Eren ve Kırer, 2012: 112; Foster ve Metcalfe, 2012).

2. Kompleksite İktisadı

Giderek “kompleks” bir yapıya bürünen ülke ekonomileri ve bununla beraber hem sosyal bir bilim olan iktisadın diğer bilimlerle etkileşim içine girmeye başlaması ile iktisatta yeni alanlar ortaya çıkmaktadır. Bu alanlardan birisi ise kompleksite iktisadıdır.

İlk olarak kompleksite iktisadının dengeye bakış açısı incelendiğinde geleneksel görüşün karşısında olarak nitelendirilebilecek kompleksite iktisadı ekonominin kendini sürekli organize ettiği fikrine karşı çıkmaktadır ve ekonominin asla dengeye gelmeyeceğini ifade etmektedir. Özellikle yaşanan son küresel krizden sonra geleneksel teorisinin krizi atlatmak için sunacağı reçetenin çok yararlı olmadığı ve söyleyeceği çok az şeyi olduğu ortaya çıkmıştır. Bu tür söylemler sadece iktisatçılardan gelmemekle kalmamıştır. Merkez bankası yöneticileri, Dünya Bankası Baş Ekonomisti ve diğer birçok önemli kurum da geleneksel teorisinin son krizde yardım edemediğini belirtmiştir.

Sosyal bir bilim olarak iktisat, bireylerin kişisel özelliklerini, toplumun yapısını, tarihini, kurumlarını ve bunların birbiri ile olan etkileşimini göz önünde bulundurması gerekmektedir. Bu bağlamda kompleksite iktisadı bireyler ve toplumlar arasındaki heterojenlik ve etkileşimi, toplumların tarihini ve kurumlarını iktisadi karar alma sürecinde dikkate almaktadır.

Kompleks kavramının ne anlam ifade ettiği irdelendiğinde ilk olarak komplike ile kompleks

kavramları arasındaki ayrımın yapılması gerekmektedir. Komplike sistem parçalara ayrılarak anlaşılabilirken kompleks sistem parçaların bütünlüğünü ifade etmektedir. İktisat politikası uygulamalarında ekonominin komplike bir sistem değil kompleks bir sistem olduğunun farkına varılması gerekmektedir (Eren, 2019: 54; Kapoor, 2016: 13) Ayrıca, Kapoor'a göre ekonominin komplike olduğu yaklaşımı artık eskimiş ve giderek kompleks bir yapıya bürünen ekonomiyi anlamada başarısız olduğu ortaya çıkmıştır (2016: 14).

Kompleks olgulardan söz edildiğinde sayıca daha fazla olmak sistemi daha fazla kompleks yapmamaktadır. Az sayıda parçalarla da daha kompleks sistem ortaya çıkabilmektedir. Kompleks olmak parçalar arasındaki ilişkiden ortaya çıkmaktadır. Kompleks bir sistemin birbiri ile etkileşim içinde olduğu özellikler aşağıda belirtilmiştir (Eren ve Kırer, 2017: 109; Martin ve Sunley, 2007: 577; Şahin vd., 2017: 33-35):

- **Kendiliğinden organizasyon ve belirim:** Sistemin parçaları arasındaki etkileşimin doğası ve biçimi zaman içinde kendi kendine tekrardan yapılır. Bu ise kompleks sistemlerin birincil ayırt edici özelliğidir.
- **Adaptasyon:** Kompleks sistemler dışsal çevredeki değişikliklere tepki olarak veya içsel olarak yani kendi kendine organize yoluyla da kendi yapılarını değiştirebilirler. Bu durumda ise sistem önemli bir aşamaya evrimde ve sistemin yapısında veya dinamiklerinde önemli değişiklikler yapmak için parçalar (components) arasında zincir reaksiyon/tepkimeler oluşturmaktadır.
- **Doğrusal olmama:** Kompleks sistemin parçaları arasındaki geri beslemeden ortaya çıkmaktadır. Bu ise değişimin ve sistemdeki patika bağımlılığının geri döndürülemezliği ile sonuçlanmaktadır.
- **Sınırlı fonksiyonel bozulabilme:** Yüksek derecede iletkenlik/bağlanabilirlikten, açıklık ve sistemin dinamik yapısından dolayı sistemdeki parçaları durağan olarak ayırtırmak/analiz etmek sınırlıdır.
- **Açıklık:** Kompleks bir sistemin sınırlarının belirlenmesi zordur. Kompleks sistem ve çevre arasındaki sınır analizin amacına bağlıdır. Dışsal şoka karşı sistemin kırılabilirliğini (susceptibility) da ifade etmektedir. Bu ise yeni bir rejime geçişe sebebiyet verebilmektedir.
- **Dağıtılmış bir doğa ve gösteriminin olması:** Kompleks sistemler karakteristik olarak multi-scaler'dır.
- **Belirli ve çözülebilir olmama:** Kompleks sistemler deterministik değildir. Bu ise parçaların/bileşenlerin (components) fonksiyonu hakkında tam bir bilgiye sahip olunması durumunda bile davranışlarında kesinlik beklenmesi imkânsızdır.

Nihayetinde, kompleks sistemler yukarıda belirtilen önemli birkaç özelliğinden dolayı temel olarak deterministik değildir. Parçalar arasındaki ilişki ve fonksiyonları hakkında tam bir bilgiye sahip olursa bile davranışları hakkında kesin bir kanıya varılamamaktadır. Ancak bu tür bir yargı parçaların davranışlarının rastgele olduğu anlamına gelmemektedir. Parçalar kompleks, dağıtılmış geri bildirim (distributed feedback) ve kendi kendini güçlendiren mekanizmalar aracılığı ile çalıştığı için standart ölçüm araçları ile tahmin edilememektedir (McGlade ve Garnsey, 2006).

Bu bağlamda bir değerlendirme yapıldığında oluşum, kendi kendine organizasyon, düzen, türbülans, evrim, tümevarım, kritiklik, adaptasyon, ağlar, lineer olmama, tersine döndürülemezlik (irreversible) ve dengede olmama kavramları kompleksite bilimini çeşitli kombinasyon ve permütasyonda karakterize eden kavramlardır (Velupillai, 2011: 562).

Kompleksite iktisadi evrimci iktisattan farklı olsa da evrimden de yararlanmaktadır. Adaptasyon

özelliği evrim ile olan bağlantısını göstermektedir. Bilgisayar ya da kompütasyondaki gelişmeler kompleksite iktisadını etkilemektedir. Bilgisayar biliminin gelişmesi ile daha önce yapılamayan kaotik durumların modellenip çözümlenebilmesine, simüle edilebilmesine olanak sağlanmıştır (Keen, 2002: 184).

Kompleksitenin iktisada etki etmesi son dönemlerde ortaya çıkmamıştır. Eren'e göre (2011) ilk iktisatçılardan günümüze kadar iktisatçılar kompleksite kavramının farkına varmış ve bu bağlamda düşünüldüğünde kompleksite iktisadı Adam Smith'e kadar gitmektedir. Smith'te ki "Görünmez El" kavramı "denge" kavramından ziyade "kendiliğinden düzeni" çağrıştırmaktadır. Bu ise ayrıca evrimci düşüncenin de iktisada olan etkisini göstermektedir.

Tablo 1. Kompleksite İktisadı ve Geleneksel İktisat Arasındaki Fark

	Kompleksite İktisadı	Geleneksel İktisat
Dinamik	<ul style="list-style-type: none"> Dengeden uzak açık, lineer olmayan, dinamik sistem 	<ul style="list-style-type: none"> Dengede, kapalı, statik ve lineer sistem
Ajanlar	<ul style="list-style-type: none"> <i>Bireysel olarak modellenir:</i> Karar vermek için tümevarımcı kurallar kullanır Eksik bilgiye sahiptirler Hata ve ön yargıya maruz kalırlar Zaman içinde öğrenir ve adapte olurlar 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Kolektif olarak modellenir:</i> Karar vermek için tümdengelimci hesaplamalar yapar Tam bilgiye sahiptirler Hata yapmaz ve ön yargı yoktur Zaman içinde öğrenme ya da adapte olmaya gerek duymazlar (kusursuzdurlar)
Ağlar	<ul style="list-style-type: none"> Bireysel ajanlar arasındaki etkileşim açık bir şekilde modellenir Zaman içinde ilişki ağı değişir 	<ul style="list-style-type: none"> Ajanların piyasa mekanizması aracılığıyla dolaylı olarak etkileşime geçtiği varsayılır
Oluşum	<ul style="list-style-type: none"> Makro ve mikro iktisat arasında ayrım yapılmamaktadır Makro oluşumlar mikro düzeydeki davranış ve etkileşimlerden ortaya çıkmaktadır 	<ul style="list-style-type: none"> Mikro ve makro iktisat farklı disiplinlerdir
Evrim	<ul style="list-style-type: none"> Farklılaşmanın, seleksiyonun ve zenginleşme/çeşitlenmenin evrimci süreci sisteme özgünlük sağlar 	<ul style="list-style-type: none"> Özgünlüğü endojen olarak yaratan ve kompleksite ve düzen içerisinde büyümeyi sağlayan mekanizma yoktur

Kaynak: (Beinhocker, 2006: 97)

Tablo 2. Ekonomik Teori ve Modellemede Çatışan Teoriler

	Geleneksel Sunum	Kompleks
Ajanların sayısı	Temsili (bir, az)	Çok (mümkün-tam ölçek)
Ajanların çeşitliliği	Homojen veya az tip	Heterojen, mümkün olduğu kadar özgünlük
Ajanların amaçları ve hedefleri	Sayısal (scalar) – değerli fayda, sabit	Diğer – ilgili (regarding), evrilen
Ajan davranışı	Rasyonel, maksimize eden, kırılgan	Amaçlı, adaptif, davranışsal
Öğrenme	Bireysel, sosyal	Ampirik temelli, grup
Enformasyon	Merkezileşmiş, bedava, belirsiz	Dağıtılmış, maliyetli, zımni (tacit)
İnançlar	Ücretsiz, koordine olan	Koordine olmayan, koordine olmak maliyetli
Etkileşim topolojisi	Eşit olasılık, iyi karıştırılmış	Sosyal ağlar
Piyasalar	Walrasçı, tek fiyat faktörü	Ademi merkezietçi, lokal fiyatlar
Firmalar ve kurumlar	Yok veya birimsel aktörler	Çoklu-ajan grupları
Seçim operatörleri	Tek düzey	Çoklu düzey
Yönetişim	Ortanca seçmen	Öz yönetim, kural evrimi
Dönemsel yapı	Statik veya denge dinamiği	Dengesizlik dinamiği
Dinamizmin kaynağı	Dışsal, ekonomi dışında	Ekonominin içinde
Dinamik özellikleri	Düz, farklılaşabilir	Düzenli değil, oynak
Dinamiklik karakteri	Markovcu, politika yok	Patika bağımlı, tarih (geçmiş) önemlidir
Çözüm kavramları	Ajan düzeyinde denge	Makro durağan durumlar (durağanlık)
Çok düzey karakteri	Sınırlı, bölünüm hatası	Gerçek (aslında olan), makro düzeyde oluşum
Metodoloji	Tümdengelimci, matematiksel	Abdüktif (abductive), kompüsyonel
Ontoloji	Temsili ajan	Birbirini etkileyen ajanların ekolojisi
Data	Örnekler, deneşik	Mikro data, büyük data
Politika duruşu	Yukarıdan aşağıya tasarlanan	Aşağıdan yukarıya evrilen

Kaynak: (Axtell vd., 2016)

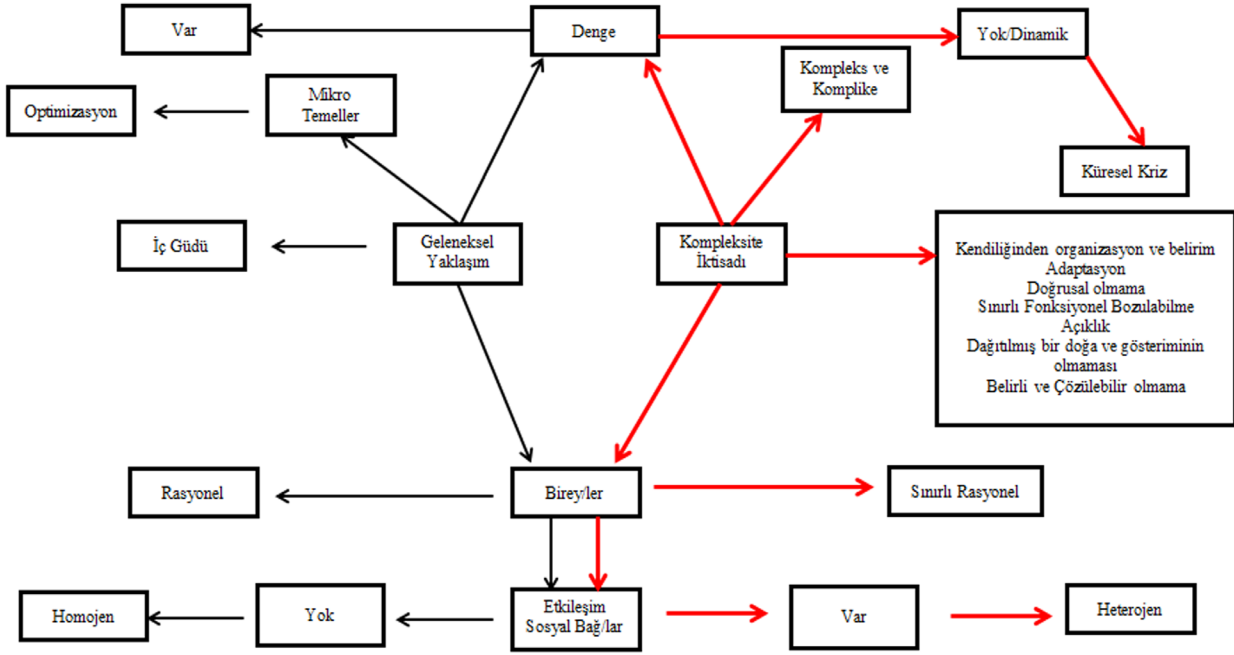
Kompleksite iktisadının iktisada katkıları açısından güçlü yönleri olmakla birlikte ayrıca zayıf yönleri de olmaktadır. Keen (2002) bu açıdan kompleksite iktisadının güçlü ve zayıf yönlerini ele almaktadır:

Güçlü taraflar: Kompleksite iktisadı bir iktisat okulu olarak ortaya çıkmamıştır. Ancak kompleksite iktisadını çalışmak güç ve anlaması zor bir alandır. Matematiksel anlamda meydan okuyucu bir tarafı olan kompleksite iktisadı ile ilgilenenler sadece alternatif iktisatla ilgilenenler değil ayrıca neoklasik iktisat ile ilgilenen iktisatçılardan da iyi bir matematik bilgisi bulunmaktadır. Kompleksite iktisadı ile ilgilenenler doktora eğitimine fizik, biyoloji ya da matematikte başlamış ve iktisada sonradan yönelmiştir. Bu ise kompleksite iktisadı teorisyenlerinin alana oldukça etkili olduğu anlamına gelmektedir. Kompleksite iktisadının elindeki bu üstünlük neoklasiklerin ellerinden matematiğin alınmasına neden olmuştur.

Zayıf taraflar: Birçok kompleksite iktisatçısı post-keynesyen iktisada meyilli olsa da iktisadi düşünce tarihi açısından eksiklikleri bulunmaktadır. Örneğin IS-LM, rasyonel beklentiler gibi kavramlar ekonomideki kompleksite modellerinde aniden belirmiş ve teorisyenler bu araçların (tools) kökenlerinin neredeyse hiç farkında değildir.

Geleneksel iktisat ve kompleksite iktisadının kavramsal düzlemde karşılaştırması özet olarak şekil 1’de verilmiştir.

Şekil 1. Kompleksite İktisadı ve Geleneksel İktisadın Kavramsal Bağlamda Karşılaştırılması



Not: Siyah oklar geleneksel yaklaşımı, kırmızı oklar ise kompleksite iktisadını belirtmektedir.

3. Ajan-Bazlı Kompütasyonel İktisat

Kompleks sistemler, giderek kompleks bir yapıya bürünen ekonomilerin analizi için farklı araçlar ve metodolojinin uygulanmasını gerektirmektedir. Bilgisayarların gelişimi ile iktisatta ve diğer sosyal bilimlerde de kompleks sistemlerin gerçeklere daha uygun bir şekilde modellenebilmesine olanak sağlamıştır. Sistemlerin birbiri ile etkileşim içinde olan birimlerden meydana gelmesinden dolayı kompleks sistemleri analiz etmek için ajan-bazlı kompütasyonel iktisat (AKİ) geliştirilmiştir. AKİ'nin gelişimi ile birlikte merkezi olmayan (decentralized) piyasa ekonomileri ile induktif (inductive) öğrenme, eksik rekabet, ticaret-ağ formasyonu, bireysel davranışların açık-kapalı eş evrimi (coevolution) ve iktisadi kurumlar gibi çeşitli iktisadi olgular/fenomenler çalışılmaktadır. Bu bağlamda AKİ, piyasa ekonomisinin kompleks yapısını analiz için kullanılan bir yaklaşım olarak tanımlanabilmektedir (Çilingiroğlu, 2017: 187; Tesfatsion, 2002a: 7191; Tesfatsion, 2006: 7-8).

AKİ, ekonomik sorunların çalışılmasında bilgisayar yoğun araç ve teknikler kullanılmaktadır. Ayrıca, kompütasyonel iktisattaki diğer araştırma alanlarında son yirmi yılda hesaplama kapasitesinde ciddi bir gelişmeden faydalanmıştır. Ancak yeni optimizasyon tekniklerinin keşfinde ve denklem temelli modellerin numerik çözümüne odaklanan geleneksel kompütasyonel iktisattan farklıdır. AKİ ajanların ve ajanlar arasındaki etkileşim dinamiklerine odaklanmaktadır ve iktisadi sürecin kompütasyonel çalışması etkileşen ajanların dinamik bir sistemi olarak modellenebilmektedir (Tsfatsion, 2002b; Tesfatsion, 2006; Tubaro, 2009).

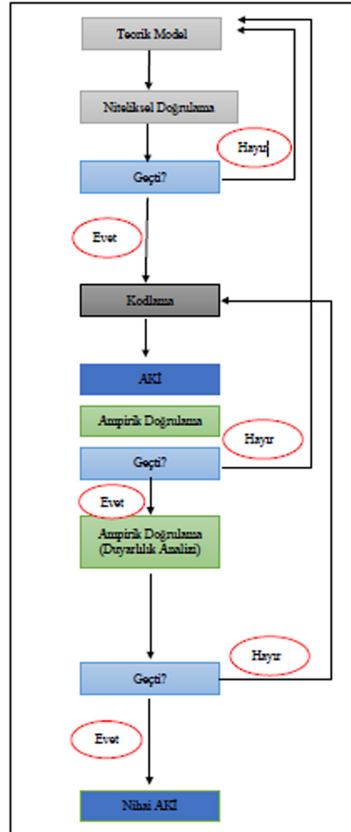
AKİ denildiğinde iktisatçılar geri beslemenin niceliksel modellemesini yapmak için gerekli araçlardan yoksundur. Geleneksel iktisat modelleri yukarıdan aşağı yapıya sahiptir (Tsfatsion, 2002a: 7191). Ayrıca Richiardi, Leombruni, Saam ve Sonnessa'ye (2006) göre ajan bazlı modellerin sağlam bir metodolojik temeli ve araştırmacılara özgürlük sağlamakla birlikte farklı yöntemlerin açık bir sınıflandırması yoktur ve her bir modelin kendine has etkileşim yapısı bulunmaktadır. Bununla birlikte sistem dinamiklerinin tanımlanmasını sağlamak için simülasyonlardan elde edilen yapay verinin (data) işlenmesinde standart bir yöntem bulunmamaktadır. Bu bağlamda ise ajan bazlı modellemenin uygulanma sürecindeki detayların tam olarak anlaşılmasının güç olduğu

belirtilmektedir.

AKİ modelleyicileri ilk olarak belirli sayıda ajanın olduğu ekonomi inşa ederek modellemeye başlamaktadır. Bu ajanlar hem iktisadi ajan oldukları gibi aynı zamanda çeşitli sosyal ve çevresel olgu/fenomenleri de temsil eden ajanlardır. AKİ’de ilk olarak ajanların özellikleri belirlenerek ekonominin başlangıçtaki durumu belirlenir. Ajanlar, içselleştirilmiş davranış normları, iletişim ve öğrenme şekillerinin de dahil olduğu davranış şekli (mode), ajanın kendisi ve diğerleri hakkında bilgi depolanması özelliklerini barındırmaktadır. Ayrıca tüm olaylar sırasıyla tarihsel akış bağlamında ajan-ajan etkileşimlerinden ortaya çıkmak zorundadır (Tsfatsion, 2002a: 7191).

Farklı ajan davranışlarının bir araya getirilip makro düzeyde bir çıktı alma sürecini de ifade eden ajan bazlı simülasyon araştırmacılara herhangi bir denge gereksinimi olmaksızın ya da matematikle ilgili kısıtlama ve herhangi bir dışsal şok varsayımında bulunmadan mikro ve makro düzey arasındaki bağlantının testini yapabilme ve hipotezini test edebilme olanağı sağlamaktadır (D’Orazio, 2017: 421). Ajan bazlı kompütasyonel iktisatta teorik model inşa edildiğinde kompütasyonel modelin geçerliliği tanımlayıcı çıktı doğrulama (validation), dolaylı kalibrasyon, girdi doğrulama, ampirik kalibrasyon, tarihselci yaklaşım (historical-friendly approach), C-VAR (eşbütünleşme-vektör otoregresif), S-VAR (yapısal-otoregresif) gibi alternatif metotlar ile test edilebilmektedir. Doğrulama adımı olarak da tanımlanabilecek bu adımda da teorik modelin geçerliliği doğrulanırsa ikinci adıma geçilmektedir. Aksi olması durumunda ise teorik model formülasyonuna tekrar geri dönmektedir. İkinci aşama kompütasyonel modelin uyarlaması/uygulaması ve geliştirilmesi söz konusudur. Bu bağlamda seçilen teorik model tercih edilen programlama koduna (diline) çevrilerek simüle edilmektedir. Bu testten sonra ise modelde nicelik doğrulama adımı olarak belirtilen stres testi ve ANTs (Aktif Lineer Olmayan Testler) uygulanmaktadır. Modelin bu testi de geçmesi durumunda üçüncü aşamaya geçilmesi söz konusudur. Bu aşamada ise parametreler üzerinde duyarlılık analizi yapılmaktadır. Yukarıda belirtilen ajan bazlı modellemenin inşa metodolojisi şekil 2’de belirtilmiştir.

Şekil 2. Ajan Bazlı Modelin İnşa Metodolojisi



Kaynak: (D’Orazio, 2017)

Tablo 3. Ajan Bazlı Kompütasyonel İktisadın Araştırma Alanları

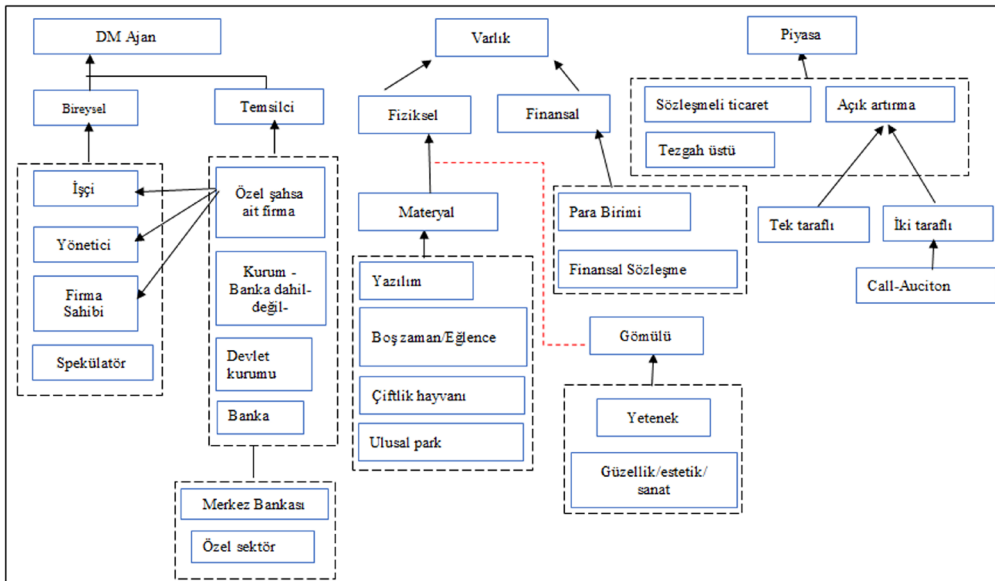
Öğrenme ve biçimlendirilmiş akıl
Davranışsal normların evrimi
Piyasa sürecinin aşağıdan yukarı modellenmesi
İktisadi ağ oluşumu
Firma içi (intra-firm) organizasyon
Piyasa iletişim kurallarının (protocol) tasarımını test etmek için AKİ laboratuvarlarının kullanımı
Kompütasyonel ajanların tasarımını test etmek için AKİ laboratuvarlarının kullanımı
Gerçek ve kompütasyonel ajanlarla eşanlı deneyler

Kaynak: (Tsfatsion, 2002a: 7191; Tsfatsion, 2003: 265)

Şekil 3’te de belirtildiği üzere ajan bazlı modellerde ajanlar, nispeten basit dinamiksel metotlar tarafından yönetilen pasif fiziksel materyallerden sosyal yeteneklere sahip birey ya da grubu temsil eden karar verici ajanlara (decision-making agents –DMAgents) kadar geniş bir perspektifi temsil edebilmektedir. Bu bağlamda, ajanların temsili ve kompleksitenin belirlenmesi söz konusu olduğunda AKİ, teorisyenlere geniş bir özgürlük sağlamaktadır ve bireysel AKİ ajanları, gerçek yaşamdaki duruma koşullu adaptif tepki (eğer bu olursa ne yapmalıyım), ileriye yönelik öğrenme (eğer bunu yaparsam ne olacak?), zamanlar arası planlama, sosyal iletişim, duruma koşullu tepkide değişime sebebiyet veren amaç hedefli öğrenme, ajan popülasyonunun kompozisyonunda değişime sebebiyet veren çoğalma (reproduction) gibi daha kompleks davranışların modellemeye dahil edilmesine olanak sağlayabilmektedir. AKİ’deki ajanlar sınırlı rasyonellik bağlamında diğer ajanlar hakkında tam bilgiye sahip değildirler ve bir ajan diğer ajanın nasıl davranacağını tam olarak bilememektedir (Borrill ve Tsfatsion, 2011).

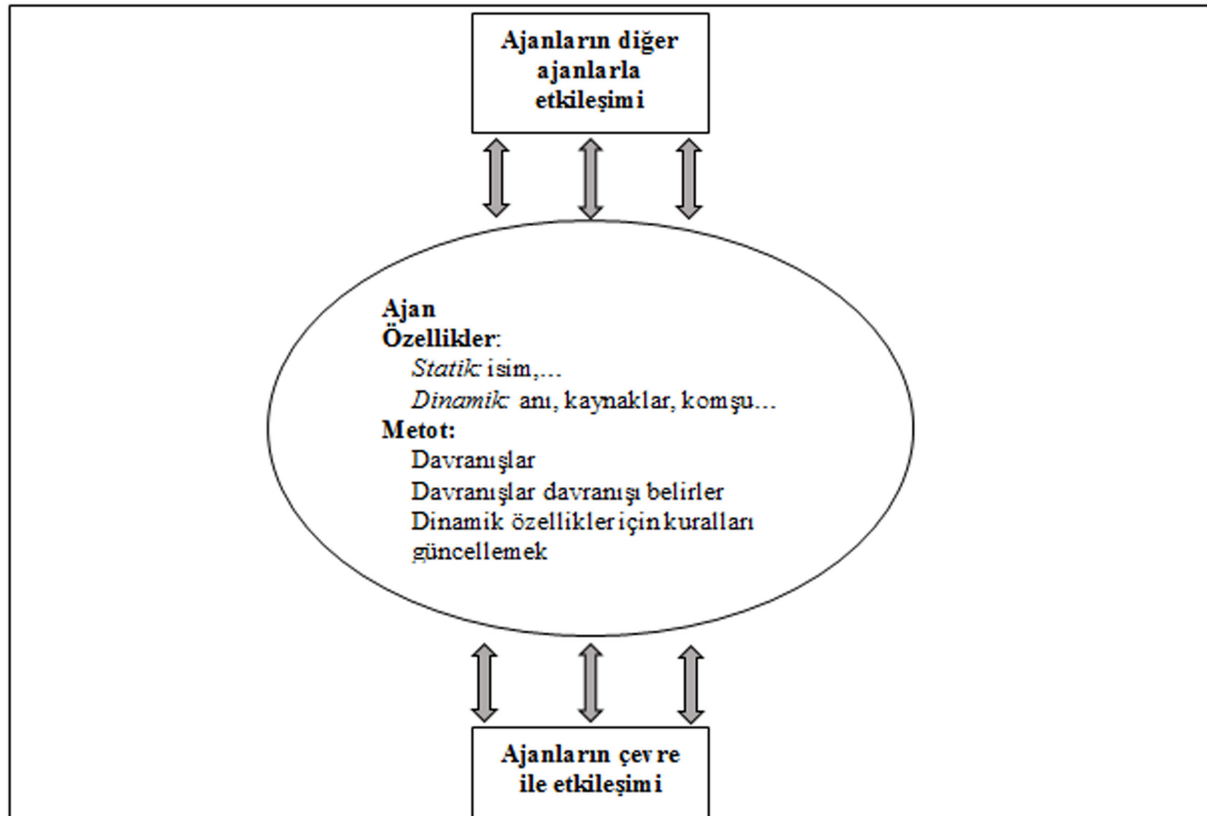
Bu bağlamda şekil 3 kapsamında bir değerlendirme yapıldığında ajanlar bireyler (üreticiler ve tüketiciler), sosyal gruplar (aileler, topluluklar, firmalar ve devlet kurumları), kuruluşlar (piyasalar ve düzenleyici sistemler), biyolojik varlıklar (canlı hayvanlar, mahsuller ve ormanlar) ve fiziksel varlıklar (hava, coğrafi bölgeler ve altyapı) olarak ifade edilebilir (Keleş ve Eren, 2014: 208). Tipik bir ajanın temel yapısının gösterildiği şekil 4’te ajan ile ilişkili olan her şey ya o ajanın özelliğidir ya da ajan üzerinde uyguladığı metottur. Ajan özelliği statik, simülasyon sürecinde değiştirilemez, olabileceği gibi dinamik yani simülasyon sürecinde değiştirilebilir olabilmektedir. Statik bir ajan özelliği ajanın ismi iken dinamik ajan özelliği ise ajanın geçmiş etkileşimlerinden kalan anısıdır (Macal ve North, 2010).

Şekil 3. Ajan Bazlı Kompütasyonel İktisatta Ajanlar



Kaynak: (Borrill ve Tsfatsion, 2011)

Şekil 4. Temsili Ajan



Kaynak: (Macal ve North, 2010: 154)

Sosyal bilimlerde AKİ'nin temellerinin nerelere kadar gittiğinin araştırması yapıldığında birkaç kökeni bulunmaktadır. İktisatçılar için en önemli olan ise reel bir piyasa anlayışının inşası olmuş ve bu süreç Walras'a kadar uzanmıştır. İktisadi düşünce tarihi analizinde bu anlayış iktisatçılar tarafından farklı şekillerde araştırılmış ve takibi yapılmıştır. Bu bağlamda geleneksel iktisatta olduğu gibi AKİ'de de çözüm aranan sorunlar ve konular ortaya çıkmıştır. Bu konulardan başlıcaları ajanların heterojenliği, derneşiklik problemi ve doğru matematik (Velupillai, 2010; Borrill ve Tesfatsion, 2011) olarak belirtilebilir (Chen, 2012: 1-2):

• Derneşiklik problemi

Derneşiklik problemi ekonomide GSYH, fiyat endeksi gibi kavramların hesaplanılmasının ne kadar doğru olduğu ve bu bağlamda bu tür kavramlara Avusturya iktisadi bağlamında şüphe ile bakılması gerektiği belirtilmektedir. Belirtilen niceliksel değişmelerin yanında ayrıca niteliksel değişmelerin de hesaplanılmasında güçlükler yaşanmaktadır (Chen, 2012).

• Ajanların heterojenliği

Daha önce de bahsedildiği üzere neoklasik iktisatta ajanlar homojen iken AKİ'de heterojendir. Ajanların heterojen olması aynı zamanda modellemede de probleme sebebiyet vermektedir. Bu bağlamda ajanların heterojenliğini baz alan uygun bir matematik kullanılmalıdır (Borrill ve Tesfatsion, 2011).

• Doğru matematik

AKİ yorumuna dayanan (constructive) ve klasik modelleme yaklaşımlarını birleştirmektedir. Ajanlar etkileşim aracılığı ile yeni bilgi edindikleri gibi ayrıca, etkileşimleri de etkileyen hesaplanamayan inançları da bulunmaktadır. Matematiksel yaklaşımın birleştirilmesi ilk olarak amaçla da bağlı olabilmektedir. Bu ise basit algoritmik modellerden daha çok insan davranışlarını anlayabilme

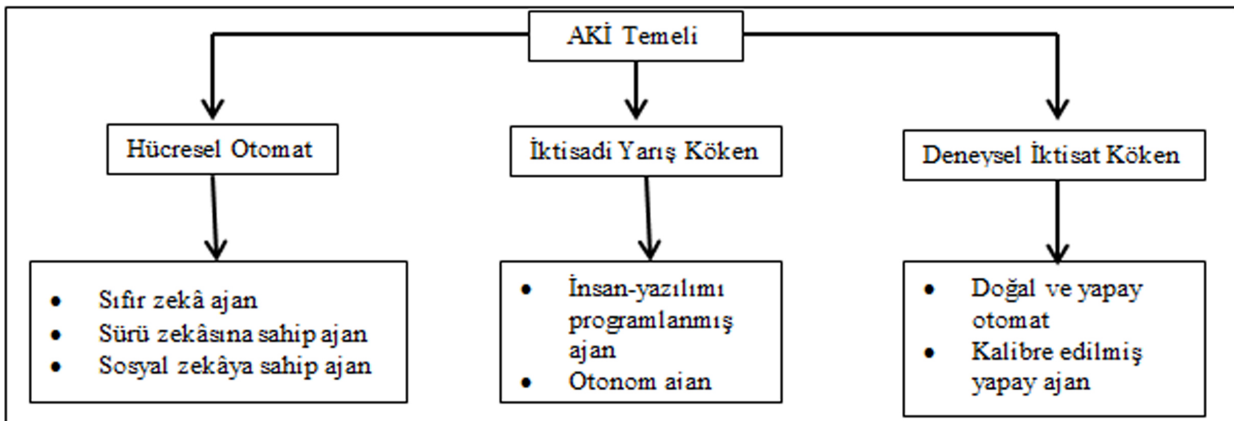
olanağı sağlamaktadır (Borrill ve Tesfatsion, 2011: 4).

Sosyal bilimlerde AKİ temellerinin nerelere kadar gittiğine dair araştırma yapıldığında birkaç kökeni bulunmaktadır. İktisatçılar için en önemli olan ise reel bir piyasa anlayışının inşası olmuş ve bu süreç Walras'a kadar uzanabilmektedir. Sosyal bilimlerde öncü ajan bazlı modellemelerden birisi şehir dinamikleri ile başlamıştır. Thomas Schelling'in (1969, 1971) mekânsal yakınsama modeli ilk ajan bazlı kompüsyonel iktisat modeli olarak görülmektedir. Ajan bazlı modellemede öncü olarak kabul edilebilecek diğer bir çalışma ise James Sakoda'nın çalışmasıdır. Schelling ve Sakoda hücreli otomata atıfta bulunmuşlardır ve çalışmaları "dama tahtası" model (checkerboard model) olarak bilinmektedir. Entelektüel araştırma açısından hücreli otomatın arkasında biyoloji bulunmaktadır. Bu ise iktisadın fizikten daha çok biyoloji ile bağlantılı olmasını ifade edebilmektedir. Hücreli otomattaki ajanlar ağ-temelli karar kuralları tarafından karakterize edilmektedir. Ağ global ve yerel olabilmektedir ancak ajanların davranışı genel olarak yerel ağ tarafından etkilenmektedir (Chen, 2012). Ayrıca, hücreli otomattaki ajanlar basit programlanmış ajanlardır (simple programmed agents) ve bu ajanlardan en çok bilineni ise sıfır zekâ ajandır (zero-intelligence agent) ve rastgele davranan bir ajan tarafından karakterize edilmektedir. Bununla birlikte ajanlar sıfır zekâli ajanlar olabilecekleri gibi sürü zekâli (swarm intelligence), sosyal zekâli (social intelligence) ya da insan özelliklerini taklit eden ajanlar olarak modellenebilmektedir (Chen, 2012; Çilingiroğlu, 2017). Basit programlı bu ajanlarda kompleks dinamiklerin ortaya çıkışı temel olarak statik olarak davranan ajanlardan olmakta ve bu ajanların öğrenme, adaptasyon, keşfetme ve çevreyi keşfetmek için çok sınırlı yetenekleri bulunmaktadır.

AKİ'nin bir diğer temeli ise oyun teorisi kökenli olarak da bilinen iktisadi yarışma kökenli olmasıdır (economic tournament origin). İktisadi yarışma kökenli AKİ, oyuna insan-yazılımı programlanmış ajan olarak bilinen (human-written programmed agents) bir diğer ajanın da girmesi ile başlamış ve daha sonra ise otonom ajanlara doğru geliştirilmiştir. İnsan-yazılımı programlanmış ajanlar ise tekrarlanan mahkûmlar çıkmazı yarışı ve ikili ihale (double auction) yarışı tarafından tanımlanabilmekte ve her iki yarışın da temel amacı etkili stratejileri oluşturabilmektir. Bu tür ajan bazlı yarışlardaki tek kısıt ise yeni giriş ve tekrardan girişlere kapalı olmasıdır. İnsan-yazılımı programlanmış ajanlardan ayrılan otonom ajanlarda ise davranışsal kurallar otomatik olarak bilgisayarlardan üretilirken, insan-yazılımı programlanmış ajanlar ise insanlar tarafından yazılan algoritma ya da davranış kurallarına sahip olan yapay ajanlardır (Chen, 2012).

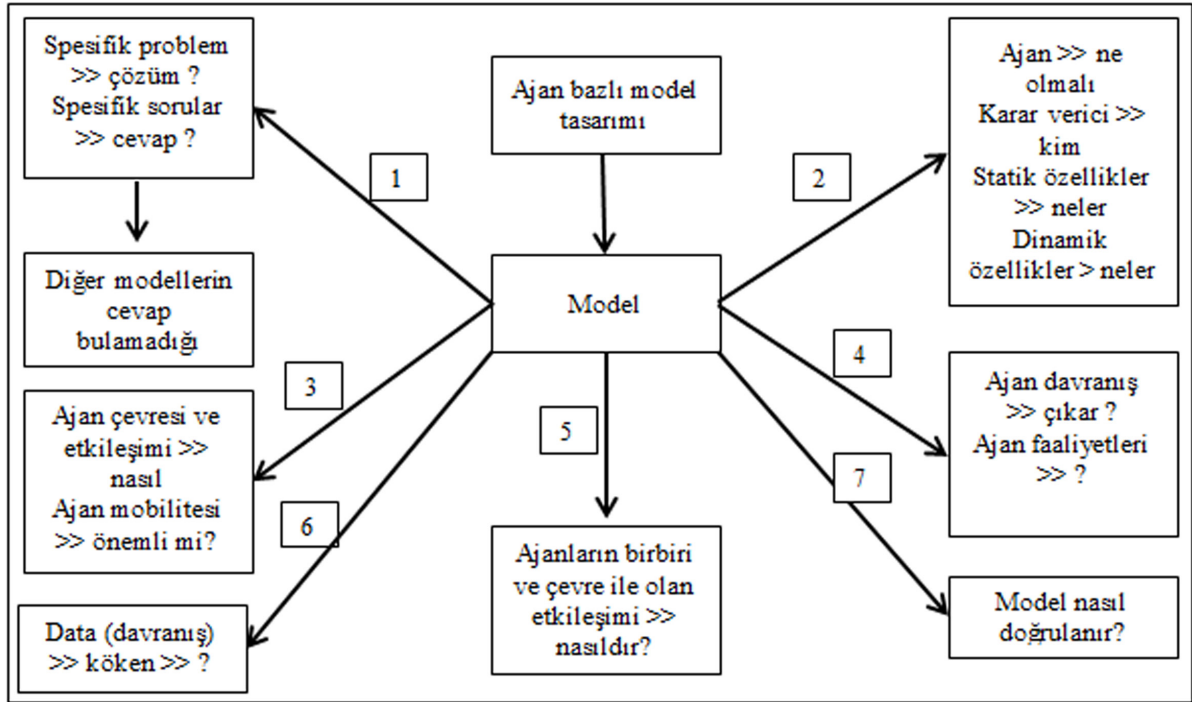
AKİ'nin bir diğer temeli ise deneysel iktisat kökenli olmasıdır (experimental economics origin). Daha önce de tartışıldığı üzere otonom ajan fikri insan davranışının gözlemlenmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu fikir ise karşılaştırmalı yapay ve doğal otomat çalışmalarının bir parçası olabilmektedir. AKİ'nin deneysel iktisat kökeninde bir modelleyici, doğal otomat olarak insan deneğini ve yapay otomata karşılık olarak ise otonom ajan ya da yazılım ajanını kabul ettiğinde bu iki ajan arasındaki tek yönlü çalışma (bi-directional) AKİ'nin deneysel iktisat kökenlisi olarak tanımlanmaktadır ve kalibre edilmiş yapay ajanlar bulunmaktadır (Chen, 2012).

Şekil 5. Ajan Bazlı Kompüsyonel İktisat Temelleri



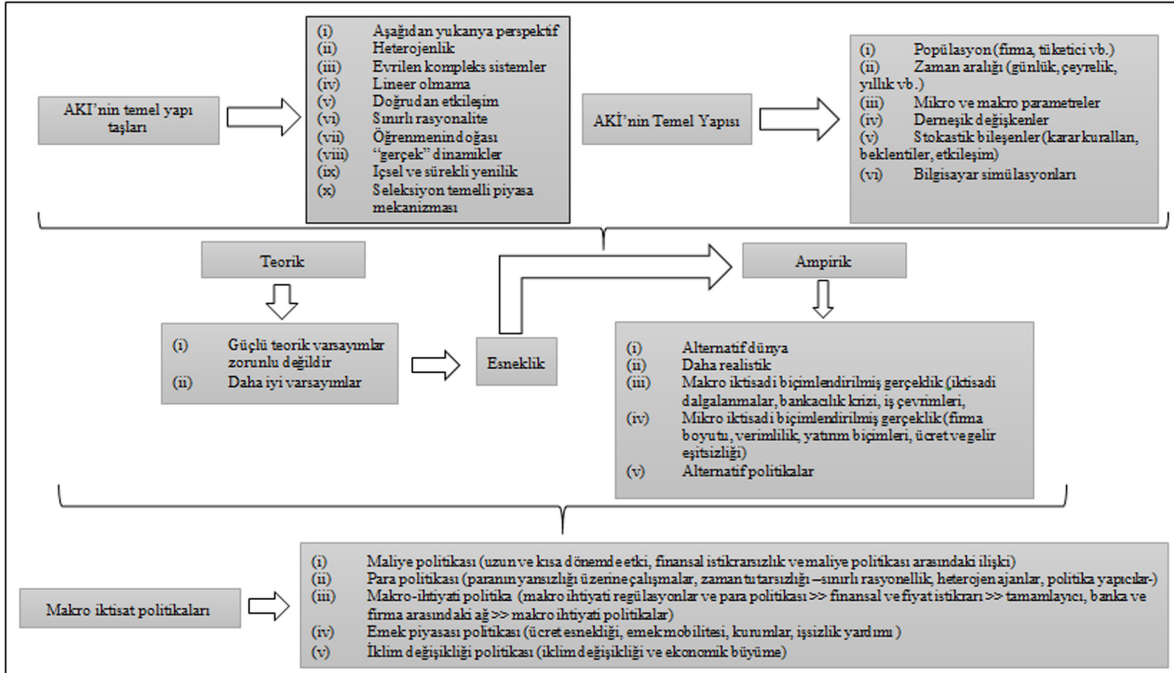
Şekil 6’da da görüleceği üzere ajan bazlı model geliştirilirken bir takım soruların cevaplanması modelleme açısından faydalı olacaktır. Modelin, (i) diğer modelin cevap bulamadığı spesifik problemlere cevap verip vermediği, (ii) ajanın ne olması gerektiği, sistemdeki karar vericinin kim olacağı, ajanın statik ve dinamik özelliklerinin neler olması gerektiği, (iii) ajanın çevresi ile etkileşiminin nasıl olduğu ve ajanın mobilitesinin önemli olup olmadığı, (iv) ajan davranışlarındaki çıkarların ne ve ajan faaliyetlerinin neler olduğu, (v) ajanların birbirleri ile olan ve çevreleri ile olan etkileşimlerinin nasıl olduğu, (vi) özellikle ajan davranışları hakkında verinin (data) nerden geldiği ve son olarak (vii) ajan davranışlarının nasıl doğrulanacağı sorularının cevaplanması gerekmektedir (Macal ve North, 2010).

Şekil 6. Ajan Bazlı Model Tasarımı



Bu bağlamda AKİ'nin temelleri, politika alanları ve ajanların genel özellikleri şekil 7’de özetlenmiştir.

Şekil 7. Ajan Bazlı Kompütasyonel İktisadın Temel Yapısı



SONUÇ

Küresel krizden sonra açık ve net bir şekilde geçerliliği sorgulanan denge, ajanların rasyonel olması, homojenlik kavramları yerine tek bir dengeden ziyade dengesizlik veya birden fazla denge, homojenlik yerine heterojenlik, ajanların sınırlı rasyoneliteye sahip olması, geleneksel iktisatta var olan katı varsayımların yerini daha esnek ve geliştirilebilir varsayımların alması iktisatta önemli gelişmelere sebebiyet vermesine olanak sağlamıştır.

Kompleksite iktisadı ile birlikte artık iktisada belirsizlik, değişme, adaptasyon, geri etkileşim, birbirini etkileme, süreksizlik, kendiliğinden organizasyon, evrim ve patika bağımlılığı girmiştir. İktisat modellemelerinde bu kavramların girmesi ile birlikte iktisat sadece disiplinler arası alanını genişletmekle kalmamış ayrıca doktorası biyoloji, matematik ve fizik olan araştırmacılar da kompleksite iktisadı üzerine araştırma yapmaya başlamıştır. Bu ise kompleksite iktisadını neoklasik iktisada karşı matematiksel modelleme açısından daha üstün olmasını sağlamıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte ülke ekonomilerinin yapısı da kompleks bir yapı haline gelmiş ve bu doğrultuda belirsizlik de artmaya başlamıştır. Belirsizliğin artışı ile birlikte artık iktisadın daha çok biyoloji temelli olduğu bir nevi doğa nasıl belirsizlik ve etkileşim içinde ise iktisadın da artık felsefi yani düşünsel boyut açısından biyoloji temelli olduğu kanısı yaygın bir görüş haline almaya başlamıştır.

Kompleksite iktisadının nasıl test edilebileceği söz konusu olduğunda ise ajan bazlı kompütasyonel iktisat (AKİ) gelmektedir. İktisatta temel problemlerden birisi olan derneşiklik problemi ile GSYH, TÜFE gibi derneşik kavramların tam olarak doğru hesaplanabilmesi AKİ tarafından sorgulanmış ve doğru matematik kullanımının önemine vurgu yapmıştır. Bu bağlamda AKİ araştırmacılara daha esnek varsayımların kullanılabilmesini sağlamaktadır, AKİ'de kullanılan metodolojik yöntemin temel esasları olsa da izlenecek süreç araştırmacıya da bırakılmıştır. AKİ ile birlikte iktisadi ajanlar sadece üretici ve tüketiciler olmakla kalmamış ayrıca sosyal gruplar, kuruluşlar, biyolojik varlıklar ve fiziksel varlıklar da ajan olarak kabul edilmiştir. Bu bağlamda bir değerlendirme yapıldığında kompleksite iktisadı ve AKİ'nin geleneksel iktisadın cevap veremediği soru ve sorunlara cevap verme açısından ve iktisatta var olan boşlukları doldurma açısından başarılı olduğunu söylemek mümkündür.

KAYNAKÇA

- Axtell, R., Kirman, A., Couzin, I. D., Fricke, D., Hens, T., Hochberg, M. E., . . . Sethi, R. (2016). *Challenges of Integrating Complexity and Evolution into Economics*. D. S. Wilson, & A. Kirman (Ed.). Complexity and Evolution: Toward a New Synthesis for Economics (s. 65-81). MIT Press.
- Beinhocker, E. D. (2006). *The Origin of Wealth*. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press.
- Borrill, P. L., & Tesfatsion, L. (2011). *Agent-Based Modeling: The Right Mathematics for the Social Sciences?* (91). Economics Working Papers (2002-2016).
- Bögenhold, D. (2014). *Schumpeter's Idea of a Universal Social Science*. *International Atlantic Economic Society*, 42(2), 205-215.
- Chen, S.-H. (2012). *Varieties of Agents in Agent-Based Computational Economics: A Historical and a Interdisciplinary Perspective*. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 36, 1-25.
- Çilingiroğlu, H. K. (2017). *Ajan-Bazlı Kompütasyonel İktisat*. E. Eren, & S. Şahin (Ed.). *Kompleksite ve İktisat* (s. 184-204). Ankara: Efil Yayınevi.
- Debreu, G. (1974). *Excess Demand Functions*. *Journal of Mathematical Economics*, 1(1), 15-21.
- D'Orazio, P. (2017). *Big Data and Complexity: Is Macroeconomics Heading toward a New Paradigm?* *Journal of Economic Methodology*, 24(4), 410-429.
- Eren, E. (2011). "Yeni" İktisatta Ortak Noktalar. E. Eren, & M. Sarfati (Ed.). *İktisatta Yeni Yaklaşımlar*. İstanbul: İletişim Yayınları.
- Eren, E. (2019). "Gerçekçi Bilim" ve İktisat. *İktisat ve Toplum*, 9(100), 49-61.
- Eren, E., & Kırer, H. (2017). *Eski Fizik - Eski İktisat ve Yeni Fizik - Yeni İktisat*. Ç. Boz, K. Öğüt, & A. D. Bozkurt (Ed.). *İktisat ve Diğer Bilimler* (s. 95-129). İstanbul: İletişim Yayınları.
- Fagiolo, G., & Roventini, A. (2017). *Macroeconomic Policy in DSGE and Agent-Based Model Redux: New Developments and Challenges Ahead*. *Journal of Artificial Societies and Simulation*, 20(1).
- Foster, J., & Metcalfe, J. S. (2012). *Economic Emergence: An Evolutionary Economic Perspective*. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 82(2-3), 430-432.
- Kapoor, S. (2016). *The Rising Complexity of the Global Economy. New Approaches to Economic Challenges: Insights into Complexity and Policy* (s. 13-14). Paris: OECD.
- Keen, S. (2002). *Debunking Economics*. London: Zed Books.
- Keleş, E., & Eren, E. (2014). *Ajan Tabanlı Modelleme ve Hesaplamalı İktisat*. *Marmara Üniversitesi Öneri Dergisi*, 11(42), 197-219.
- Kirman, A. (2018). *Complexity Economics*. L. Fischer, J. Hasell, J. C. Proctor, D. Uwakwe, Z. Ward-Perkins, & C. Watson (Ed.). *Rethinking Economics An Introduction to Pluralist Economics* (s. 91-106). Paris: Routledge.
- Macal, C., & North, M. (2010). *Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation*. *Journal of Simulation*, 4, 151-162.
- Mantel, R. R. (1974). *On the Characterization of Aggregate Excess Demand*. *Journal of Economic Theory*, 7, 348-353.
- Martin, R., & Sunley, P. (2007). *Complexity Thinking and Evolutionary Economic Geography*. *Journal of Economic Geography*, 7, 573-601.
- Richiardi, M., Leombruni, R., Saam, N., & Sonnessa, M. (2006). *A Common Protocol for Agent-Based Social Simulation*. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1), 1-22.
- Schelling, T. C. (1969). *Models of Segregation*. *The American Economic Review*, 59(2), 488-493.
- Schelling, T. C. (1971). *Dynamic Models of Segregation*. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, 143-186.
- Sonnenschein, H. (1972). *Market Excess Demand Functions*. *Econometrica*, 40(3), 549-563.
- Sunal, S., & Öğüt, K. (2017). *Kompleks Adaptif Bir Sistem Olarak Ekonomi ve İktisat*. E. Eren, & S. Şahin (Ed.). *Kompleksite ve*

İktisat (s. 44-57). Ankara: Efil Yayınevi.

Şahin, S., Sunal, S., Öğüt, K., Çırpıcı, Y. A., Kırer, H., & Eser, R. (2017). *Kompleksite Olgusu ve Kompleksite Teorisi'nin Gelişimi*. E. Eren, & S. Şahin (Ed.). *Kompleksite ve İktisat* (s. 1-43). Ankara: Efil Yayınevi.

Tesfatsion, L. (2002a). *Economic Agents and Markets as Emergent Phenomena*. PNAS, 99(3), 7191-7192.

Tesfatsion, L. (2002b). *Agent-Based Computational Economics: Growing Economies from the Bottom Up*. *Artificial Life*, 8, 55-82.

Tesfatsion, L. (2003). *Agent-Based Computational Economics: Modelling Economies as Complex Adaptive Systems*. *Information Science*, 149(4), 263-269.

Tesfatsion, L. (2006). *Agent-Based Computational Economics: A Constructive Approach to Economic Theory*. *Computing in Economics and Finance Working Paper No 527*.

Tubaro, P. (2009). *Agent-based Computational Economics: a Methodological Appraisal*. *EconomiX Working Paper*.

Velupillai, K. V. (2011). *Non-Linear Dynamics, Complexity and Randomness: Algorithmic Foundations*. *Journal of Economic Surveys*, 25(3), 547-568.