

**YILDIZ SOCIAL
SCIENCE REVIEW
(YSSR)**

VOLUME: 6 YEAR: May 2020 NUMBER: 2

Available Online: <http://dergipark.org.tr/tr/pub/yssr>

ISSN : 2149-4363
ISSN (Online) : 2687-6256

Publisher:

On Behalf of Yıldız Technical University Faculty of Economics and Administrative Sciences
Dean Prof. Kenan AYDIN

Communication:

Phone: +90 212 383 6712

Website: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yssr>

E-mail: donduran@yildiz.edu.tr

Address: Yıldız Teknik Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi 34210
Esenler/İstanbul/Turkey

Printing Date: December 31, 2020

Printed by: Yıldız Publishing Center Davutpaşa/İstanbul

Front Page Designed by: Mehtap Kul

Cover Designed by: Gündüz Altay Köklü

Logo Designed by: Hasan Öğretmen

Typesetting by: Murat Donduran

Yıldız Social Science Review is a refereed and international journal and published in May and November.

Editorial Board

Honorary Editor

Prof. Erdener KAYNAK (Pennsylvania State University, Harrisburg)

Editor in Chief

Prof. Murat DONDURAN (Yıldız Technical University, Turkey)

Associate Editors

Prof. Meral UZUNÖZ (Yıldız Technical University, Turkey)

Prof. Jürgen KAHLER (University Erlangen-Nuremberg, Germany)

Prof. Evren BALTA (Özyeğin University, Turkey)

Prof. Murat YILDIZOĞLU (Bordeaux University, France)

Prof. Halil Emre AKBAŞ (Yıldız Technical University, Turkey)

Assoc. Prof. Tolga AKSOY (Yıldız Technical University, Turkey)

Assoc. Prof. Burak ÜNVEREN (Yıldız Technical University, Turkey)

Asst. Prof. Christoph WEBER (ESSCA School of Management, France)

Asst. Prof. Tuğçe OZANSOY ÇADIRCI (Yıldız Technical University, Turkey)

Asst. Prof. Antonio MASALA (IMT Lucca, Italy)

Yiğit AYDOĞAN, PhD (Kırklareli University, Turkey)

Field Editors

Business Administration and Management

Prof. Halil Emre AKBAŞ (Yıldız Technical University, Turkey)

Asst. Prof. Tuğçe OZANSOY ÇADIRCI (Yıldız Technical University, Turkey)

Economics

Prof. Meral UZUNÖZ (Yıldız Technical University, Turkey)

Assoc. Prof. Tolga AKSOY (Yıldız Technical University, Turkey)

Political Science and International Relations

Prof. Evren BALTA (Özyeğin University, Turkey)

Asst. Prof. Antonio MASALA (IMT Lucca, Italy)

English Language Editor

RA. Alaaddin TOK, PhD (Yıldız Technical University, Turkey)

Turkish Language Editor

RA. Sırrı Emrah ÜÇER, PhD (Yıldız Technical University, Turkey)

Managing Editors

RA. Halil ŞİMDİ, PhD (Sakarya University, Turkey)

RA. Alaaddin TOK, PhD (Yıldız Technical University, Turkey)

RA. Sırrı Emrah ÜÇER, PhD (Yıldız Technical University, Turkey)

RA. Ecem DOYGUN (Yıldız Technical University, Turkey)

RA. Selin ERDOĞAN (Yıldız Technical University, Turkey)

RA. Volkan GÜNGÖR (Yıldız Technical University, Turkey)

RA. Hikmet KAYA (Yıldız Technical University, Turkey)

RA. İbrahim Engin KILIÇ (Yıldız Technical University, Turkey)

RA. Özdemir TEKE (Yıldız Technical University, Turkey)

RA. Alican YILDIRIM (Yıldız Technical University, Turkey)

Advisory Editorial Board

Prof. Remzi ALTUNIŞIK (Sakarya University)
Prof. Coşkun BAYRAK (University of Arkansas at Little Rock-UALR, USA)
Prof. Esin CAN (Yıldız Technical University, Turkey)
Prof. Wendy CARLIN (University College London, UK)
Prof. Nevin COŞAR (Yıldız Technical University, Turkey)
Prof. Ayşe Betül ÇELİK (Sabancı University, Turkey)
Prof. Ahmet DEMİREL (Marmara University, Turkey)
Prof. A. Suut DOĞRUEL (Emeritus, Turkey)
Prof. Fatma DOĞRUEL (Marmara University, Turkey)
Prof. Salih DURER (Yıldız Technical University, Turkey)
Prof. Cumhuri ERDEM (Abant İzzet Baysal University, Turkey)
Prof. Ercan EREN (Yıldız Technical University, Turkey)
Prof. Ercan GEGEZ (Marmara University, Turkey)
Prof. Cemal İBİŞ (Işık University, Turkey)
Prof. İbrahim KIRCOVA (Yıldız Technical University, Turkey)
Prof. Erdoğan KOÇ (Balıkesir University, Turkey)
Prof. Mehmet Akif OKUR (Yıldız Technical University, Turkey)
Prof. Gökhan ÖZER (Gebze Technical University)
Prof. John ROEMER (Yale University, USA)
Prof. Ayşegül SEVER (Marmara University, Turkey)
Prof. Faruk SÖNMEZOĞLU (İstanbul University, Turkey)
Prof. Yasir SULEIMAN (University of Cambridge, United Kingdom)
Prof. Hüseyin TAŞTAN (Yıldız Technical University, Turkey)
Prof. Gülsün YAY (Yıldız Technical University, Turkey)
Prof. Cengiz YILMAZ (Middle East Technical University, Turkey)
Prof. Tefik YOLDEMİR (Marmara University, Turkey)
Prof. Ming-Miin YU (National Taiwan Ocean University, Taiwan)
Asst. Prof. Güneş GÖKMEN (New School of Economics, Russia)
Asst. Prof. Selim GÜLEŞÇİ (Bocconi University, Italy)
Giuseppe ATTANASI, PhD (University of Strasbourg, France)
Massimo BAGARANI, PhD (University Guglielmo Marconi)
Thomas R. MATTAIR, PhD (Middle East Policy Council, USA)
Draniele SIENA, PhD (Banque de France, France)

ARTICLES

Research Articles / Araştırma Makaleleri

Doğrusal Olmayan Dinamik Sistemlerin İncelenmesi ve Kompleksite Bilimi

Examination of Nonlinear Dynamic Systems and Complexity Science

Hasan Tatlıpınar 81

Covid-19 and Digitalization: Network Analysis on Industrial Robots Trade Among the BRI Countries

Covid-19 ve Dijitalleşme: KYG Ülkeleri Arasındaki Endüstriyel Robot Ticareti Üzerine Ağ Analizi

Semanur Soyyiğit and Ercan Eren 99

Kompleks Sistemler ve Veri Bilimi

Complex Systems and Data Science

Uzay Çetin 119



Doğrusal Olmayan Dinamik Sistemlerin İncelenmesi ve Kompleksite Bilimi

Examination of Nonlinear Dynamic Systems and Complexity Science

Hasan TATLIPINAR ^a

Araştırma Makalesi/Research Article

Başvuru/Received: 02.11.2020; Kabul/Accepted: 29.12.2020

ÖZ

Doğrusal olmayan dinamik sistemler ile ilgili çalışmalar günümüzde bilimsel çalışmaların merkezinde yer almaktadır. Fizik bilimi, biyo-sistemler, yeni teknolojiler ve iktisat gibi birçok bilim disiplini doğrusal olmayan dinamik sistemlerin davranışlarına göre modeller oluşturmakta ve bu konularda çalışmalar yapmaktadırlar. Bu nedenle bu yazıda iyi bilinen birkaç doğrusal olmayan dinamik sistem örnek verilerek bu sistemlerin nasıl incelendiği üzerinde durulacaktır. Bunun yanında fiziksel sistemlerin davranışı veya bilgi teorisinde önemli bir yere sahip olan çeşitli entropi tanımları tartışılacaktır. Ayrıca doğrusal olmayan sistemlerle doğrudan ilgili olan kompleksite biliminin genel kavramları üzerinde de kısaca durulacaktır.

Anahtar kelimeler: doğrusal olmayan bilim, kaos, entropi, kompleksite bilimi

ABSTRACT

Studies on the nonlinear dynamic systems are at the center of scientific studies today. Many scientific disciplines such as physics, bio-systems, new technologies and economics create models according to the behavior of nonlinear dynamical systems and work on these subjects. Therefore, this article will focus on how these systems are studied by giving well-known a few examples of nonlinear dynamical systems. Also, the various definitions of entropy, which has an important place in the behavior of physical systems or information theory, will be discussed. In addition, general concepts of the complexity science that are directly related to nonlinear systems will be briefly emphasized.

Keywords: nonlinear science, chaos, entropy, complexity science

^a Yıldız Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, htatli@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9728-8519

1. Giriş

Fizik bilimi geniş anlamı ile evreni her yönü ile inceleyen en eski bilimdir. Kompleksite ise yine yaşadığımız evrendeki oluşumların, değişimlerin, olguların yanı sıra bugün biyolojiden ekonomiye kadar birçok bilimdeki oluşum ve davranışların anlaşılması için oluşmuş yeni bir bilimdir. Bu incelemede fizik bilimi ile kompleksite bilimi arasındaki ilişki üzerine durulacaktır. Fizik biliminin oluşumu neredeyse insanlık tarihi kadar eskidir bu nedenle günümüze kadar fizik biliminin gelişiminin oldukça geniş ve iyi bilinen bir tarihi vardır. Kompleksite biliminin ise ancak birkaç on yıllık bir tarihi vardır. Kompleksite sözcük anlamı ile anlaşılması zor, çözümlenmesi kolay olmayan olay ve olguları açıklamak için kullanılan karmaşık sözcüğü gibi anlaşılabilir, fakat kompleksite bilimi derken daha ileride açıklanacağı gibi belli bir hiyerarşik yapıya (sistem yapısına) ve ölçekleme gibi birtakım matematiksel kurallara sahip bir bilim disiplini anlaşılmalıdır (Badii & Politi, 1997; Eren & Şahin, 2017). Daha genel olarak kompleksite bilimi kompleks davranış gösteren sistemleri inceleyen bilimdir. Burada sistem çok geniş anlamı ile anlaşılmalıdır. Sistem nesnelerin, biyo-yapıların, canlıların veya sosyal toplulukların oluşturduğu sistem olarak düşünülmelidir. Bu anlamda sistem etrafımızda gözlemlediğimiz her şey olarak düşünülebilir. Bir sistemin davranışı, basit veya karmaşık olabilir. Eğer göz önüne aldığımız sistemin davranışı karmaşık ise bu sistemi analiz etmek için kullandığımız kavramlar bütünlüğü Kompleksite bilimini oluşturur. Kompleksite bilimi matematik, fizik, kimya, biyoloji gibi temel bilim alanları yanı sıra günümüzde sosyoloji ve ekonomi gibi bilimleri de kapsamaktadır. Fizik biliminde doğrusal olmayan dinamik sistemlerin davranışını anlamak için kullanılan yöntemler kompleksite biliminin de anlaşılmasında kolaylık sağlayacaktır. Bu nedenle fizik biliminin gelişimi ve yapısını anlatan kısa bir çerçeve çizmek gerekir.

Çevremizde gördüğümüz her şey bir değişim içindedir bu anlamda her şeyin bir dinamiği vardır. Bu değişimin nedenlerini, nasıl olacağını araştırmak ve yanıtlar vermek fizik biliminin ana konularından biridir. Fizik bilimi insanlık tarihi boyunca çok basit bir şekliyle Antik Dönem, Klasik Dönem (Orta Çağ ve Aydınlanma Dönemi), Modern Dönem ve Günümüz gibi sınıflandırılabilir. Bu her dönem için keskin tarihsel sınırlar olmamasına rağmen bütün Dünyaya yayılmış ve genel kabul gören bir takım bilim anlayışları bakımından birbirlerinden ayrılırlar. Antik dönemde doğa olayları veya birtakım sistemlerin davranışı kabaca dört element teorisi ile açıklanıyordu ve bu görüş uzun bir süre bilimsel bir çerçeve olarak görev yaptı. Antik dönemden sonraki Orta Çağ döneminde Dünya'nın birçok bölgesinde Antik döneme ait bilim çerçevesi sorgulandı deneylerle test edildi ve bu çerçevenin yeterli olmadığı ortaya kondu, ardından gelen Klasik dönemde ise günümüzde yaygın olarak egemen olan bilim çerçevesinin kavramları oluştu. Çoğunlukla Aydınlanma dönemi olarak da adlandırılan bu dönem Matematik ve Fizikte yeni kavramlar çerçevesinin oluştuğu bir dönemdir. Bu dönemin başlangıcındaki bazı bilim adamları Galileo, Newton, Descartes, Pascal, Euler, Lagrange olarak sayılabilir. Bu dönemde çevremizde doğa olayları ve birçok sistemin davranışı Klasik Mekanik olarak adlandırılan bir bilim çerçevesi ile açıklandı. Klasik mekanik yasaları basitçe eylemsizlik ilkesi, dinamiğin temel yasası ve etki tepki yasası olarak özetlenebilir. Buna göre evrendeki nesnelere klasik mekanik yasalarına göre hareket ederler ve bu yasalar genellikle doğrusal (lineer) denklemlerle ifade edilirler. Bu lineer denklemler belli başlangıç koşullarına göre çözüldüğünde sistemin herhangi bir andaki davranışını verirler. Bu anlamda bu denklemler bir başlangıç ve son öngören, belirlenebilirlerdir (deterministiklerdir). Klasik mekanik yasalarının oluşturduğu çerçeve günümüzde uygulamada olan birçok mühendisliğin alt yapısını oluşturur. Kabaca 1700-1900 döneminde etkin olan bu bilim çerçevesi bugün mekanik dünya görüşü dediğimiz mühendislikten sosyolojiye birçok bilim alanını etkilemiştir. İri ölçekli nesnelere düşük hızlardaki davranışını iyi belirleyen bu mekanik birbirine göre ivmeli hareket eden sistemlerde iyi sonuç vermiyordu bu problem Albert Einstein tarafından özel ve genel görelilik teorisi ile düzeltilti ve klasik mekanik çerçevesi tamamlandı. 1900 yıllarının başında atomik ölçekte yapılan bazı deney sonuçları ile Klasik mekanik yasalarının uyuşmadığı görüldü

dönemin Planck, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Born, Einstein ve Pauli gibi bilim adamları atomik ölçekteki fizik olaylarını açıklayan Kuantum mekaniğini oluşturdu. Kuantum mekaniği yasaları birçok açıdan klasik mekanik yasalarından farklıdır, bunların başında bir parçacığın nasıl tanımlanacağı gelir. Klasik fizik yasalarına göre bir parçacık belli bir kütleye, konuma sahiptir. Bu durum gözlemden bağımsızdır. Kim nasıl bir yöntemle ölçerse ölçsün aynı kütle konum, momentum gibi fiziksel büyüklükleri elde eder. Parçacığın üzerine etki eden kuvvetler ve başlangıç koşulları biliniyorsa parçacığın zaman içindeki davranışı tamamen bilinir. Bu durum kuantum mekaniğinde biraz farklıdır parçacık ölçüm sistemine dolayısı ile ölçene göre bazen parçacık bazen de dalga gibi davranır. Parçacığı belirleyen fiziksel büyüklük parçacığa ait Schrödinger dalga denkleminin çözümü olan bir dalga fonksiyonudur bu fonksiyon kompleks (sanal, reel olmayan) bir fonksiyon olduğu için doğrudan kendisinin değil, karesinin parçacıkla ilgisi vardır ve parçacığın bir bölgede bulunma olasılık yoğunluğunu verir. Bu nedenle klasik mekanikte parçacığın konumu, momentumu gibi fiziksel büyüklükleri kesin olarak ölçülebilir iken kuantum mekaniğine göre bu büyüklükler belli bir olasılığa göre ölçülebilirler. Klasik mekaniğe göre bir parçacığın konumu ve momentumu aynı anda kesin olarak ölçülebildiği halde kuantum mekaniğinde bu mümkün değildir, bu büyüklükler aynı anda ancak belli bir belirsizlik hassasiyeti ile ölçülebilirler. Kuantum mekaniğindeki bu olasılıklı yapı daha önce klasik mekanik yasalarına göre tanımlanmış birçok bilimsel kavramın yeniden sorgulanmasına ve tartışılmasına neden olmuştur (Faye, 2019). Günümüzde de doğa yasalarının deterministik ya da olasılıkçı yapıda olup olmadığı konusunda tartışmalar sürmektedir. Sonuç olarak günümüzde makro ölçekte klasik fizik yasaları atomik ölçekte ise kuantum fiziği yasalarının geçerli olduğu konusunda bir görüş hakimdir. Bu iki mekanik arasında nasıl geçiş olacağı uygunluk ilkesi veya karşılığı bulunma ilkesi ile açıklanmıştır. Bir sistemi incelerken ölçek olarak makroskobik (iri ölçek) ve mikroskobik (atomik) ölçek gibi bir ayırım yapılacağı gibi, sistem çok parçacıklı bir yapıya sahip ise bu durumda da sistemi oluşturan parçacıkların rastgele veya eş uyumlu hareketine göre de bir sınıflandırma yapılabilir. Eğer sistem rastgele dağılımlı bir dinamiğe sahip ise olasılık teorisi yasalarına dayanan istatistik mekanik kullanılabilir, eğer sistemi oluşturan parçacıklar eş evreli(coherent) bir dinamiğe sahip iseler bu durumda istatistik yapmak uygun değildir ve alan teorisi gibi ortak davranış teorileri kullanılmalıdır. Bu durum aşağıdaki Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Fiziksel Sistemlerin Ölçek ve Davranışlarına Göre Sınıflandırılması.

	Makro ölçek: Klasik Mekanik + Görelilik Teorisi. (Makro moleküllerden galaksilere kadar geniş bir aralık.)	
Ortak davranan, eş evreli (coherent) sistemler. (Dalgalar, lazer, hologramlar, solitonlar...) Makro+ Mikro Ölçek	Kompleks sistem, tablodaki tüm durumları kısmen içeren sistemler.	Rasgele davranan, eş evreli olmayan sistemler, İstatistik Mekanik (olasılık yasaları) Makro+Mikro ölçek
	Mikro (atomik) ölçek: Kuantum mekaniği. (Atom ve Molekül sistemleri, atom altı parçacıklar).	

Tablo 1’de kompleksite ölçek ve davranış sınıflandırmasının ortasına yerleştirildi çünkü kompleks sistemler bu durumların hepsini kısmen de olsa içerir. Tabloda kompleksite dışında tanımlanan kalan sistemleri inceleyen teorilerin oluşturduğu matematik denklemleri klasik dönemde ve günümüzde çoğunlukla lineer denklemlerdir. Bunun birkaç nedeni vardır. Evrenimizin yapısını ve davranışını temsil eden bu denklemler yüksek simetrik, sade ve matematiksel çözümleri kesin olarak yapılabilir olmalıydı çünkü bu dönem düşünürleri için yüksek simetrisinin aynı zamanda evreninin estetiğinin kaynağı olduğu görüşü hakimdir. Lineer

denklemler çözümleri başlangıç koşullarına göre belli davranışı olan ve başlangıç koşullarındaki küçük değişimlerin genel davranışta küçük değişimlere neden olduğu denklemlerdir. Aynı zamanda bu lineer denklemler, sistemi oluşturan parçaların bireysel davranışlarının toplamı ile sistemin toplam davranışının aynı olduğu, sistemin çoğunlukla parçalara ayrışabildiği durumları ifade eden, sisteme yapılan etki ile sistemin yanıtının doğrusal olduğu durumların oluşturduğu denklemlerdir. Bu yaklaşım özellikle birkaç parçacıktan oluşmuş sistemler, düzenli (periyodik) yapıya sahip fizik, kimya ve mühendislik sistemleri için oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Lineer teorilerde simetrisi bozuk olan veya lineer olmayan durumlar ise bu lineer durumlara küçük değişimler eklenerek yaklaşık yöntemlerle incelenir. Bu duruma örnek olarak Güneş sistemimiz verilebilir. Güneş sistemi belli bir periyodik yapıya sahiptir ve bu periyodik davranış Klasik fizik sistemi olarak Kepler yasaları ile ifade edilir. Bu teoride Güneş sistemindeki birtakım simetri bozuklukları ihmal edilir, bu ihmal belli zaman süreleri için (evrenin yaşına göre görece kısa) sistemin davranışının periyodik olduğunu belirtir. Fakat uzun zaman sürelerinde ihmal edilen büyüklüklerin etkisi ile güneş sisteminin kaotik bir dinamiğe sahip olacağı ve dağılacağı bilinen bir gerçektir (Peterson, 1993). Benzer şekilde elektromanyetik dalgalar, basit atomların yapısı lineer kuantum mekaniği kullanılarak açıklanabilir. Doğada gerek makro gerekse atomik ölçekte bu lineer denklemlerle açıklanamayan birçok durum da söz konusudur. Örneğin atmosfer olayları, depremler, girdap olayları, maddenin faz geçişi durumları gibi daha pek çok fiziksel olay lineer denklemlerle açıklanamayan olaylardır. Bu nedenle bu sistemler doğrusal olmayan bilim yardımı ile incelenmektedir. Fizik sistemlerine benzer şekilde Sosyal sistemlerin sınıflandırılması da şöyle yapılabilir.

Tablo 2. Sosyal Toplulukların Ölçek ve Davranış Şekline Göre Sınıflandırılması

	Makro topluluklar, büyük insan toplulukları, kıtalar, ülkeler, BM, vb.	
Ortak bir amaca (hedefe) sahip bireylerin oluşturduğu topluluklar. Makro + Mikro Ölçek.	Kompleks topluluk, bu dört durumun hepsini kısmen içeren sistemler.	Rastgele bir araya gelmiş bireylerden oluşan topluluklar. Makro + Mikro Ölçek.
	Mikro topluluklar, aile fertleri, şubeler, amatör gruplar...	

Fiziksel büyüklükler için Tablo 1’de verilen yaklaşım biyoloji, sosyoloji, ekonomi gibi birçok sisteme de genişletilebilir. Bu durumda biyoloji ve sonrası sistemlerin davranışının çok küçük bir kısmı lineer teorilerle açıklanabilir, bu sistemler genel olarak lineer olmayan davranış gösterirler. Bilgisayarların yaygın olmadığı dönemlerde fiziksel sistemlerin davranışı için lineer denklem ve denklem sistemleri kullanılmaktaydı, bu nedenle türbülans olayı, atmosfer olayları, faz geçişleri gibi karmaşık ve analizi zor problemlerin incelenmesi için yaklaşık yöntemler ve sayısal yöntemlere ihtiyaç vardı. Yarım asır önce yaygın olmayan bu yöntemler bilgisayar teknolojisinin ve sayısal analiz yöntemlerinin gelişmesi ile bilimsel hesaplamaların merkezine yerleşti.

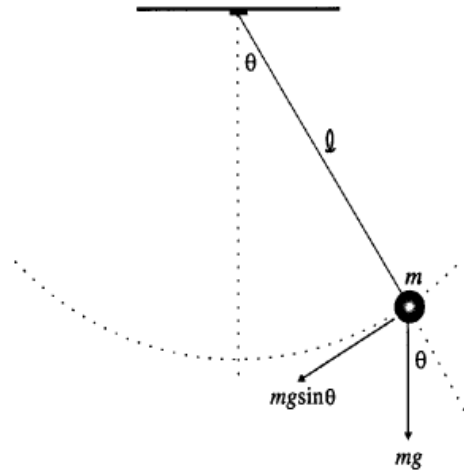
2. Doğrusal Olmayan Dinamik Sistemlere Bazı Örnekler

2.1. Basit Sarkaç

Şekil 1’de verilen basit harmonik salıncıyı ele alalım, l uzunluklu bir ipin ucunda m kütleli bir cisim şekilde verilen salınım hareketini yapsın. Bu sistem doğrusal olmayan dinamik bir

sistemdir, bazı varsayımlar altında basit harmonik hareket yapar, fakat genel davranışı daha karmaşıktır.

Şekil 1. Basit Sarkaç



$\vec{F} = m\vec{a}$ Dinamiğin temel yasası denklemi kullanıldığında ($x = l\theta$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$) olmak üzere sarkacın hareket denklemi; $\ddot{\theta} + \omega_0^2 \sin \theta = 0$ şeklinde bulunur. $\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} \dots$ şeklinde θ 'nin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Burada θ küçük ise $\sin \theta \approx \theta$ alınıp $\ddot{\theta} + \omega_0^2 \theta = 0$ doğrusal denklemi elde edilir ve denklemin çözümleri $\ddot{\theta}(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ şeklinde periyodik bir fonksiyondur. Fakat θ büyük ise $\sin \theta \approx \theta$ yaklaşımı çalışmaz, bu nedenle doğrusal olmayan denklemi çözmemiz gereklidir.

Doğrusal olmayan sönüm: Viskoz bir akışkan içinde hareket eden cisim problemi fizikteki önemli bir problemdir. Bu problemde sürtünme kuvvetlerinin önemli etkileri vardır. Örneğin, havada hareket eden bir (roketin, uçağın, uydunun, vb.) cisim üzerine etkiyen sürtünme kuvveti yüksek hızlarda oldukça önemlidir. Cisim hızı \vec{v} , cisme etkiyen kuvvet $F(\vec{v})$ ise bu kuvvetin analitik olarak belirlenmesi mümkün değildir. Fakat basitçe $F \sim |\vec{v}|^{n-1} \vec{v}$ gibi düşünülebilir. Buna göre yer yüzeyine yakın bir yerde cismin hareket denklemi $m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} - mk|\vec{v}|^{n-1} \vec{v}$ şeklindedir. ($k > 0$ sabiti viskozite ve geometriye bağlı). Deneysel verilere göre $v_1 \leq 24 \text{ m/s}$ için $n = 1$ Stokes yasası geçerlidir, $v_1 < v < v_s$ (v_s : ses hızı $\approx 330 \text{ m/s}$) ise $n = 2$ alınabilir. Bu ise Newton Direnç Yasası olarak bilinir. $n = 1$, ve $n = 2$ için denklem analitik olarak çözülebilir. $v_s < v \leq 600 \text{ m/s}$ aralığında havada hareket eden bir cisme karşı havanın gösterdiği direnç oldukça artar¹ (patlama yapar) ve 600 m/s ' den sonra tekrar doğrusal olarak davranır. Bu konu otomobil ve uçak sektöründe oldukça önemlidir (Marion & Thornton, 1995).

2.2. Kulak Zarının Titreşimi

Newton'un 2.yasası biyolojik sistemlerin hareketini anlamada da kullanılabilir. Orta kulakta bulunan kulak zarının titreşimi (denge noktası etrafında) bir boyutlu sistem gibi düşünülebilir. $x(t)$ kulak zarının denge konumundan ayrılma mesafesi olsun, $F(x)$, zar $x(t)$ kadar yer değiştirdiğinde geri getirici kuvvet olmak üzere küçük x yer değiştirmeleri için $F(x)$ Taylor serisine açılabilir.

$$F(x) = F_0 + \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_{x=0} x + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}\right)_{x=0} x^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{\partial^3 F}{\partial x^3}\right)_{x=0} x^3 + \dots$$

¹ Bu olay son yıllarda ses duvarını aşan uçaklar için alışık olduğumuz bir durumdur.

$x = 0$ için $F_0 = 0$ (denge noktası), kuvvetin geri getirici olması için $\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_{x=0} < 0$ olmalı. Bu terim $-k$ alınırsa küçük yer değiştirmeye karşılık gelen x 'li terimin en küçük üslü olanı etkin olduğu düşünülüp serideki diğer terimler ihmal edildiğinde $F(x) = -kx$ şeklinde Hooke Yasası elde edilir. m kulak zarının kütlesi olmak üzere $F(t)$ kulak zarına gelen ses basıncının oluşturduğu periyodik kuvvet ise Newton'un 2. denklemine göre kulak zarının hareketinin denklemi $m\ddot{x} = -kx + f(t)$ veya $\tilde{\omega}_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $F(t) = \frac{f(t)}{m}$ olmak üzere $\ddot{x} + \tilde{\omega}_0^2 x = F(t)$ şeklinde zorlamalı basit harmonik salınıcı denklemi elde edilir. Kulak zarına etki eden $F(t) = A\cos(\omega t)$ şeklinde ise, kulak zarı başlangıç periyodundan sonra yalnızca ω frekansına yanıt verir. Bu ω dışındaki seslerin (harmoniklerin) kulak zarı tarafından algılanması için, $F(x)$ bağıntısındaki doğrusal olmayan terimlerle de bağlantı kurulmalıdır. Kulak zarı üzerine yapılan deneylerde, ses basınç kuvvetinin kulak zarını asimetrik olarak etkilediği görülmüştür. Taylor açılımındaki 2. terimi göz önüne alacak olursak ve $\frac{1}{2!}\left(\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}\right)_{x=0} = -\beta m$ diyebiliriz, kulak zarının titreşimini veren denklem $\ddot{x} + \tilde{\omega}_0^2 x + \beta x^2 = F(t)$ şeklinde yazılabilir. Bu zorlamalı doğrusal olmayan salınıcı denklemdir. Denklemdaki lineer olmayan x^2 'li terim asimetriyi temsil etmektedir.

2.3. Rekabet Olayı ve Volterra-Lotka (V-L) Yarış Denklemleri

Doğada birçok sistem birbiri ile rekabet halindedir, bu sistemler biyolojik, fiziksel veya sosyal sistemler olabilir, bu sistemleri temsil eden denklemler doğrusal olmayan denklemlerdir. (V-L) Biyolojik canlılar arasındaki etkileşmeyi veren denklemdir. 1905-1923 yılları arasında Adriyatik'te yakalanan balık miktarı analizine dayanmaktadır. Bu süre içinde büyük balık ve küçük balık popülasyonundaki değişime bakılmıştır. N_B = büyük balık sayısı N_L = küçük balık sayısı olmak üzere balık popülasyonunun değişimini veren gözlemsel veya "phenomenological" bir çift denklem şu şekildedir.

$$\dot{N}_B = (-\alpha_B + g_B N_L)N_B, \quad \dot{N}_L = (+\alpha_L - g_L N_B)N_L \quad (\dot{N}_i = \frac{dN_i}{dt}, \alpha_i, g_i > 0)$$

Balıklar arasında etkileşme yok ise $g_B = g_L = 0$ olacaktır bu durumda balık popülasyonu veren birbirinden bağımsız iki lineer denklemin çözümleri $N_B \propto e^{-\alpha_B t}$, $N_L \propto e^{+\alpha_L t}$ şeklindedir. Eğer bir etkileşme var ise büyüme katsayısı $+g_B N$ ve azalma katsayısı $-g_L N$ devreye girecek ve diferansiyel denklemin yapısı değişerek dögüsel bir yapıya sahip olacaktır. Denklemlerin doğru ve çabuk çözümleri popülasyondaki başlangıç koşullarının kesinliğine ve etkileşme şekillerinin sadeliğine bağlıdır (Neff & Tillman, 1975).

Elektronik salınıcı (Van der Pol denklemi) doğrusal olmayan sistemler teorisinin gelişiminde önemli bir rol oynamıştır, çünkü bu denklem, doğrusal problemlerde karşılaşılmayan sonlu çevrim (*limit cycle*) özelliği gösterir. Sonlu çevrimli durumda, sistemin başlangıç koşulları ne olursa olsun, sistem bir periyoda yakınsar ve periyodik davranış özelliği gösterir. Bütün elektronik salınıcılar, birçok akustik veya mekanik sistem, kalp atışı gibi sistemler sonlu çevrim özelliği gösterirler. Bu sistemlerin dinamiğini veren denklem $\dot{X} - \epsilon(1 - X^2)\dot{X} + X = 0$ şeklinde doğrusal olmayan bir denklemdir. Burada $\epsilon > 0$ olan ve devre elemanları ile ilgili bir parametredir, X ise elektronik salınıcı için yer değiştirme büyüklüğüdür. $X > 1$ için lineer olmayan sönüm terimi salınıcının büyüklüğünü azaltacak şekilde, $X < 1$ için ise negatif sönüm söz konusu, yani salınının büyüklüğü artacak yödedir (Van der Poll, 1926).

2.4. Doğrusal Dalga Denklemi ve Solitonlar

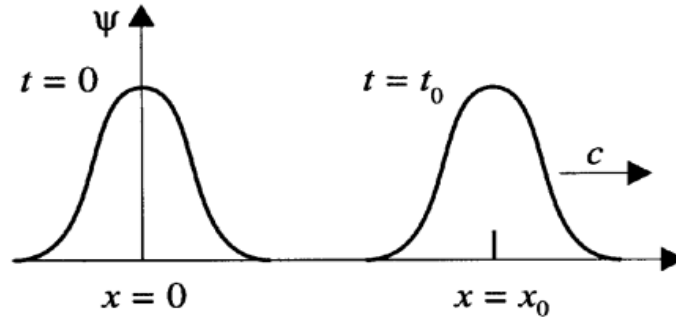
Sürekli bir ortamda bir dış etken tarafından oluşturulmuş doğrusal dalga denklemi $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$ şeklindedir. Şekil 2'de gösterilen ve belli bir ortamda c hızı ile ilerleyen atma şeklindeki bir dalga ortamı oluşturan bileşenler arası etkileşmelere (veya sürtünmelere) göre bir

süre sonra sönüme uğrar, bu ise dış etkinin oluşturduğu değişimin yok olması demektir. Bu sönümün olmaması için sistemde iç sürtünmeleri dengeleyecek bir geri besleme etkisi olmalıdır. Bir dalganın sönüme uğramadan yapısını korumasına soliton denir. Bu kararlı yapılar doğrusal dalga denklemleri ile elde edilemezler, bu nedenle denklemlerde doğrusal olmayan terimler olmalıdır ve bu doğrusal olmayan terimler denklemin temsil ettiği sistem için geri besleme etkisi oluştururlar. Bu tür denklemlere örnek olarak sığ sularda oluşan dalga denklemleri (bir boyutlu Boussinesq denklemleri) verilebilir:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + 6 \frac{\partial^2 (\psi^2)}{\partial x^2} + \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} = 0$$

Dikdörtgen bir kanalda düzgün akan bir suda ani bir değişim sonucu oluşan dalgalar $\frac{\partial \psi}{\partial t} + \alpha \psi \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} = 0$ (Korteweg-de Vries (KdV) denklemleri) ve Manyetik bir ortamda sipin dalgalanmalarını veren $\psi_{xx} - \psi_{tt} = \sin \psi$ (Sine Gordon denklemleri) denklemleri verilebilir. Bu denklemler belli koşullar altında soliton çözümleri verirler.

Şekil 2. Bir Ortamda c Hızı ile İlerleyen Atma (Puls) Şeklindeki bir Dalganın Grafik Gösterimi



Soliton yaklaşımı günümüzde doğrusal olmayan bilimin önemli bir çalışma alanıdır (Scott vd., 1973).

2.5. Rayleigh-Benard Konveksiyonu ve Lorenz Denklemleri

Bir kaptaki veya bölgede bulunan bir akışkanı göz önüne alalım. Akışkan alt kısımdan ısıtıldığında ısının düşey doğrultuda yukarı bölgelere nasıl ulaşacağı akışkanlar mekaniği için önemli bir problemdir. Akışkan üst üste sonsuz tane ince tabakadan oluşmuş varsayılabilir. Tabakalar arasındaki ΔT sıcaklık farkı küçük ise akışkan dengededir ve ısı iletim yolu ile üst tabakalara iletilir. Fakat ΔT sıcaklık farkı belli bir kritik değer üzerine çıkarılır ise konveksiyon olayı oluşur. Lord Rayleigh akışkanda sıcak kısımlarda akışkanın yukarı hareketi ve soğuk kısımlarda aşağı doğru hareketi sonucu birbirine komşu yuvarlanan silindirik şeklinde bir yapı oluştuğunu gözlemiştir. Sıcaklık farkı daha da artırılır ise daha karmaşık (kaotik) yapılar oluşur (Koschmieder, 1974). Sıcaklık ve akışkan yoğunluğunun değişimine göre silindirik yapıların altıgen yapılara dönüştüğü de gözlenmiştir, bu ise simetri kırılmasının güzel bir örneğidir. Edvard Lorenz benzer yaklaşımla atmosferde ısı iletimini modellemeye çalıştı bunun sonucu başlangıç koşullarına göre kaotik davranış gösteren aşağıdaki Lorenz denklemlerini elde etti (Lorenz, 1963).

$$\dot{x} = \sigma(y - z)$$

$$\dot{y} = rx - y - xz$$

$$\dot{z} = xy - bz$$

Bu denklemlerde x, y, z reel değişkenler, σ, r, b ise başlangıç koşullarını sağlayan reel sabitlerdir. Lineer olmayan Lorenz denklemleri kaotik davranış gösteren sistemlerin ilk örneklerinden birisidir.

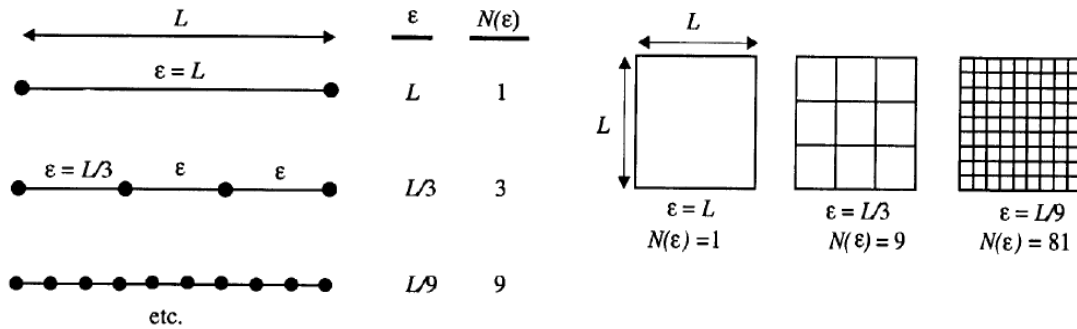
Bu birkaç örneği verilen lineer olmayan sistemlerin davranışlarının incelenmesi için genel olarak topolojik, analitik ve nümerik yöntemler kullanılır.

Topolojik yöntemde sistemi oluşturan değişkenlerin sistemin başlangıç koşulu parametrelerine göre oluşturduğu faz uzayında nasıl davranacağı incelenir. Bu yöntem sistemin faz uzayındaki akış karakteri, sistemdeki tekilliklerin yapısı gibi sisteme ait niteliksel özellikleri belirler. Analitik yöntemde ise sistemi tanımlayan adi veya kısmi diferansiyel denklemler veya denklem sistemleri analitik olarak çözülür. Fakat daha önce de belirtildiği gibi lineer olmayan sistemlere ait denklemlerin analitik çözümleri kolay değildir çünkü bu durumda sistemin simetri gibi özelliklerinden faydalanılarak denklem çözümleri elde edilir fakat sistemdeki simetrinin tanımlanması her zaman kolay değildir. Nümerik yaklaşımda ise sisteme ait denklemler veya denklem sistemleri günümüzde oldukça gelişmiş olan neredeyse her sisteme özgü tanımlanabilen yöntemlerle incelenir. Topolojik yöntemde faz uzayı analizi kısaca şöyle özetlenebilir. $\frac{dx}{dt} = P(x, y)$, $\frac{dy}{dt} = Q(x, y)$ gibi diferansiyel denklemleri göz önüne alalım. P ve Q , x ve y ye lineer bağlı olmayan fonksiyonlar, t ise bağımsız değişken olsun. Matematikçiler P ve Q nun t ye açıkça bağlı olmadığı bu denklemleri otonom denklemler olarak adlandırır. Bütün mekanik problemleri Newton' un 2. Yasasına göre $\vec{F} = m\vec{a}$, $\vec{F} = m \frac{d^2x}{dt^2} = m\ddot{x}$ şeklinde yazabilir. Sisteme etkiyen kuvvet (mekanik kuvvet) konumun veya hızın fonksiyonu olabilir. Buna göre $F = F(x, \dot{x})$ ya da $\ddot{x} = F(x, \dot{x})$ yazabilir, $\dot{x} = \frac{dx}{dt} = y \Rightarrow \ddot{x} = \dot{y} = F(x, y)$ buna göre $P(x, y) = \frac{dx}{dt} = y$ $Q(x, y) = \frac{dy}{dt} = F(x, y)$ yazılabilir. Bu durumda t zaman parametresi elimine edilirse, $\frac{dy}{dx} = \frac{Q(x, y)}{P(x, y)}$ şeklinde zamandan bağımsız bir denklem elde edilir. Bu denklemin çözümleri, zaman ilerledikçe, faz düzleminde sistemin davranışını faz yörüngeleri olarak adlandıracağımız çözümlerini verir. Newton denklemlerinin çözümlerinde faz düzlemi x ve \dot{x} ile belirlenir, halbuki yarış denklemlerinde faz düzlemi popülasyonu oluşturan ikililer oluşturur (tavşan, tilki sayıları vb.). Genel olarak $y(x)$ fonksiyonunun elde edilmesi zor olabilir. Bu durumda topolojik yaklaşım bize bu tür denklemlerde, faz düzleminde (x_0, y_0) gibi belirli özel noktaların (kararlı veya tekil noktalar) olduğunu ve çözümlerin genel yapısının bu noktalar yardımı ile yapılabileceğini söyler. Verilen bir otonom sistemde $P(x_0, y_0) = 0$ ve $Q(x_0, y_0) = 0$ olduğu bir nokta kritik nokta olarak adlandırılır. Faz düzleminde lineer davranış ait yörünge çizgileri ve basit tekil nokta tipleri aşağıda tablo halinde verilmiştir. Korunumlu sistemlerde sistemin hareketi sistemin toplam mekanik enerjisinin belirlediği bu faz eğrilerinin biri üzerinde hareket eder. Sistem korunumlu değilse sistemin mekanik enerjisi sürtünme kuvvetleri etkisi ile azalacak ve sistem merkezde bulunan tekil noktalara doğru hareket edecektir. Bu tekil noktalar basit çekici olarak da adlandırılır. Doğrusal davranış için faz uzayının bu basit yorumu kaotik davranış için farklılık gösterir, kaotik sistemlerde çekicilerin faz uzayındaki davranışı Lorenz Kelebeğinde olduğu gibi acayip çekici olarak adlandırılır. Çekicileri sınıflandırmak için Poincaré kesiti yöntemi kullanılabilir. Poincaré kesiti şöyle elde edilir, sistemin faz uzayında faz yörüngelerine dik bir düzlem yerleştirilir, faz eğrilerinin bu düzlemi kestiği noktalar Poincaré kesitini oluşturur. Basit çekiciler için bu kesitler düzenli bir yapıya sahip noktalar veya doğrular gibi tam boyutlu basit geometriye sahiptirler. Tuhaf çekiciler için ise Poincaré kesiti basit geometrik şekiller yerine fraktal yapıya sahip şekillerdir. Basit tekil noktalar ve Poincaré kesiti Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 5'te ise acayip çekici olarak Lorenz ve Rösler çekicileri verilmiştir.

2.6. Lineer Olmayan Geometri ve Fraktal Boyut

Lineer olmayan sistemler geometrik olarak da doğrusal sistemlerden farklılık gösterirler. Buna bir örnek olarak fraktal boyut gösterilebilir. Lineer sistemlerde bir boyutlu yapılar bir doğru ile temsil edilir, benzer şekilde iki boyutlu yapılar bir yüzey ile ve üç boyutlu yapılar çeşitli üç boyutlu yapılarla temsil edilirler. Bir boyutlu lineer durumda başlangıç ve son bellidir. İki doğrunun kesişimi bir nokta şeklindedir. İki boyutlu durumda yüzeyin ön arka veya alt üst tarafları bellidir, iki yüzeyin kesişimi bir eğridir. Alt yüzden üst yüze sürekli olarak geçiş yapılamaz, geçiş esnasında eğrisel bir süreksizlik vardır. Üç boyutlu geometrik yapılarda iç kısım dış kısım gibi ayrımlar açıktır ve tanımlarında herhangi bir anlaşılabilirlik yoktur. İç yüzden dış yüze geçiş sürekli değildir yüzeysel bir süreksizlik vardır. Uzay ve zaman bileşenleri göz önüne alındığında 1, 2, 3 veya 1 + 1, 1 + 2, 1 + 3 ya da N tamsayı olmak üzere $N + 1$ tam sayı boyut geçerlidir. Bunun yanında lineer olmayan geometriler için lineer geometri için bahsedilen büyüklükler biraz farklılık gösterir. Buna göre başlangıç ve son Kantor tozunda olduğu gibi tanımlı değildir. Yine Möbius şeridi için alt yüz üst yüz ayrımı yapılamaz, benzer şekilde Klein şişesi için iç kısım dış kısım ayrımı yapılamaz. Bunun yanında anakaraların sahil kıyılarının uzunluğu, sünger yapıların doluluk miktarları, gökyüzündeki bulutlar gibi fiziksel nesnelere boyutu (kapasite boyutu) tam sayı olmayan, kesirli sayılarla ifade edilirler. Bu tür kesirli boyuta sahip sistemler fraktal yapılar olarak tanımlanır.

Fraktal yapıların kapasite boyutu şöyle hesaplanır. Göz önüne aldığımız bir ve iki boyut için ε ve $N(\varepsilon)$ aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekilde belirtildiği gibi 1D doğru için $N(\varepsilon) = \frac{L}{\varepsilon}$, 2D düzlem için $N(\varepsilon) = \frac{L^2}{\varepsilon^2}$, 3D için $N(\varepsilon) = \frac{L^3}{\varepsilon^3}$... D boyuta genellediğimizde $N(\varepsilon) = \frac{L^D}{\varepsilon^D}$ yazılabilir. Bu bağıntıdan kapasite boyutu D

çözülebilir. $N(\varepsilon) = \left(\frac{L}{\varepsilon}\right)^D = (L \cdot \frac{1}{\varepsilon})^D = \ln N(\varepsilon) = D(\ln L + \ln \frac{1}{\varepsilon})$, $D = \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln L + \ln(\frac{1}{\varepsilon})}$, $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \gg$

$\ln L$ olduğu için $D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \frac{1}{\varepsilon}}$ bulunur. Bu ise kesirli bir değere sahiptir. Bu kesirli değeri

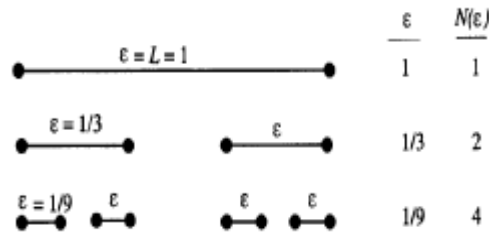
görmek için Cantor seti olarak adlandırılan aşağıdaki örnek verilebilir. Bir boyutlu L uzunluklu bir doğruyu göz önüne alalım, doğruyu üçe bölüp ortadaki parçayı dışarda bırakalım, geri kalan parçalar için bu işlemi devam ettirelim. Bu durumda elde edilecek noktalar kümesi Cantor tozu olarak adlandırılır. Bu bir boyut içine gömülmüş sistemin kapasite boyutu şöyle hesaplanır.

$\varepsilon = \left(\frac{1}{3}\right)^k$ olmak üzere $N(\varepsilon) = 2^k$ olacaktır. Cantor tozu veya Cantor kümesinin kapasite boyutu $D_C = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \frac{1}{\varepsilon}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\ln 2^k}{\ln 3^k} = \frac{\ln 2}{\ln 3} = 0,6309 \dots$ olacaktır.

Cantor tozu fraktal boyuta sahiptir. Bu boyut sıfır değil, fakat 1 de değildir. Yani nokta veya doğru da değildir. Bu şekilde hesaplanmış fraktal boyutlar Koch kar yağışı parçası için $D = 1,26186$, Sierpinsky üçgeni için $D = 1,58496$, Lorenz çekicileri için $D = 2,06$, Lojistik

Harita için $D = 0,538$, Türbülans sistemi için $D = 2,1 - 4,1$, Bulutlar için $D = 2,35$ şeklindedir.

Cantor kümesinin şematik gösterimi



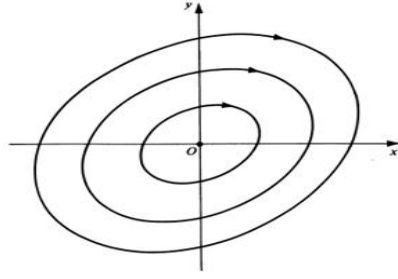
2.7. Lojistik Denklem ve Lyapunov Üsteli

$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n)$ Şeklinde doğrusal olmayan bir denklemi göz önüne alalım. Denklemdeki a parametresi $0 \leq a \leq 4$ aralığında, başlangıç değer x_0 (0,1) aralığında seçildiğinde denklemin x çözümleri (0,1) aralığında kalacaktır. Denklemdeki n biyolojik sistemler göz önüne alındığında zaman adımı olarak da ele alınabilir. Bu durumda x_0 belli bir andaki popülasyonu belirtiyor ise x_n belli zaman sonundaki popülasyonu belirleyecek şekilde ayarlanabilir. Aşağıda Şekil 6'da lojistik denklemin üç farklı çözümü verilmektedir. Denklem $X_0 = 0.2$ başlangıç değeri ve n adım sayısı 60 alınarak a parametresini çeşitli değerleri için çözümler verilmiştir. $a = 2.8$ için sistem 1 periyoda sahip ve $x = 0.6428$ değerine yakınsamaktadır. $a = 3.3$ için sistem 2 periyoda sahip ve x değeri $x = 0,8236$ ile $x = 0,4794$ aralığında değişmektedir. $a = 3.8$ değeri için ise sistemin hangi periyoda sahip olduğu ve hangi x değerleri aralığında değiştiği belli değildir. Bu durum kaotik durum olarak tanımlanır. Bu bilgilere göre lojistik denklemin sistemdeki parametre ve başlangıç koşullarına göre periyodik ve kaotik davranış gösteren çözümleri vardır. Bu durum ayrıca faz yörüngelerinin davranışına göre $\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \ln \left| \frac{df(X_k)}{dX_k} \right|$ şeklinde tanımlanan Lyapunov üsteli ile de belirlenebilir (Wolf vd., 1985). Şekil 7'de Lojistik denklem için hesaplanmış Lyapunov üstelleri gösterilmiştir. Buna göre periyodik bölgede Lyapunov üsteli negatif değerler, kaotik olduğu bölgelerde ise pozitif değerler alır.

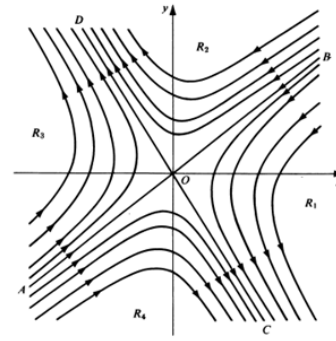
Şekil 6'da yukarıdan aşağı doğru, 1 periyotlu durum, 2 periyotlu durum ve kaotik durum, en alt şekilde ise x in a parametresine göre değişimi verilmiştir. Periyot katlanması $a \sim 3.6$ değerine kadar ayırt edilebilir durumdadır, bu değerden sonra denklemin çözümleri kaotik değerler alır, periyot katlanmaları artık ayırt edilemeyecek durumdadır. Buna uygun olarak Şekil 7'de Lyapunov üstelleri periyodik bölge için negatif değerler, kaotik bölgeler için ise pozitif değerler almaktadır.

Bu örneklerden sonra doğrusal olmayan sistemlerin davranışı için kısaca şunları söyleyebiliriz. Sistemin başlangıç koşulları ve sistemdeki parametrelere göre davranışı doğrusal (periyodik), kaotik ve rasgele olarak sınıflandırılabilir. Doğrusal çözümler tek periyotlu (veya değerli) veya çok periyotlu olabilir. Bu bölgede sistemde tekillikler olabilir ve bu tekillikler Şekil 4'te özetlendiği gibi basit tekil noktalar. Buna göre bu bölge için çözümler analitik olarak elde edilebilir, sistemin davranışı tamamen belirlenebilir olduğu için sistemin deterministik olarak adlandırılır. Bu durum Şekil 6'da tablodaki son satırda lojistik denklemde x in a parametresine göre değişimini veren $a \approx 3.6$ değerinden önceki duruma karşılık gelir. Benzer durumda Şekil 7'de bu periyodik bölge Lyapunov üsteli λ nın negatif değerler aldığı durumlara karşılık gelir. Bu lineer bölge için hesaplanan Poincare kesitleri basit geometrik şekillere sahiptirler. Bu lineer davranışın dışında sistem kaotik veya rasgele bir dinamiğe sahiptir. Kaotik bölgede sistemin durumu artık doğrusal değildir, sistemin durumu başlangıç değerlerindeki küçük değişimlere oldukça hassas bağlıdır.

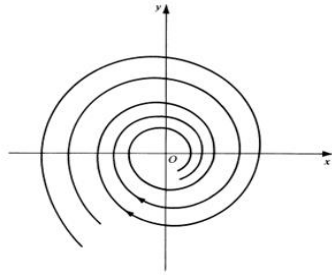
Şekil 4. Basit Tekil Noktalar ve Poincaré Kesiti



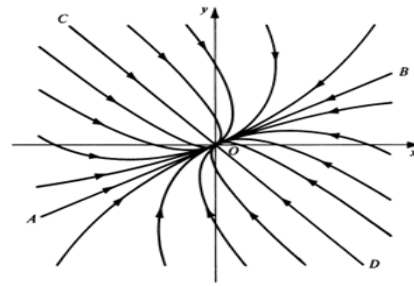
Merkez noktası



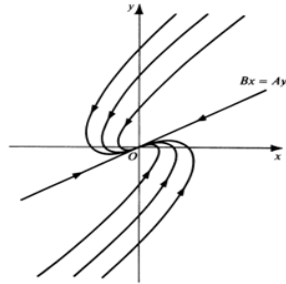
Eyer noktası



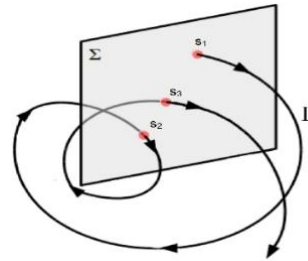
Spiral nokta



Düğüm noktası

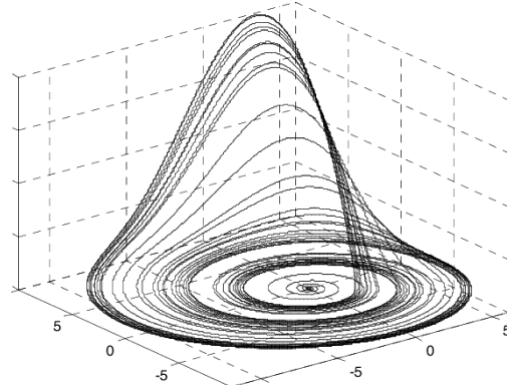
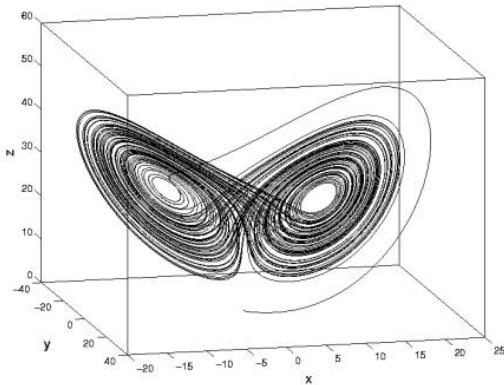


Sarmal Nokta

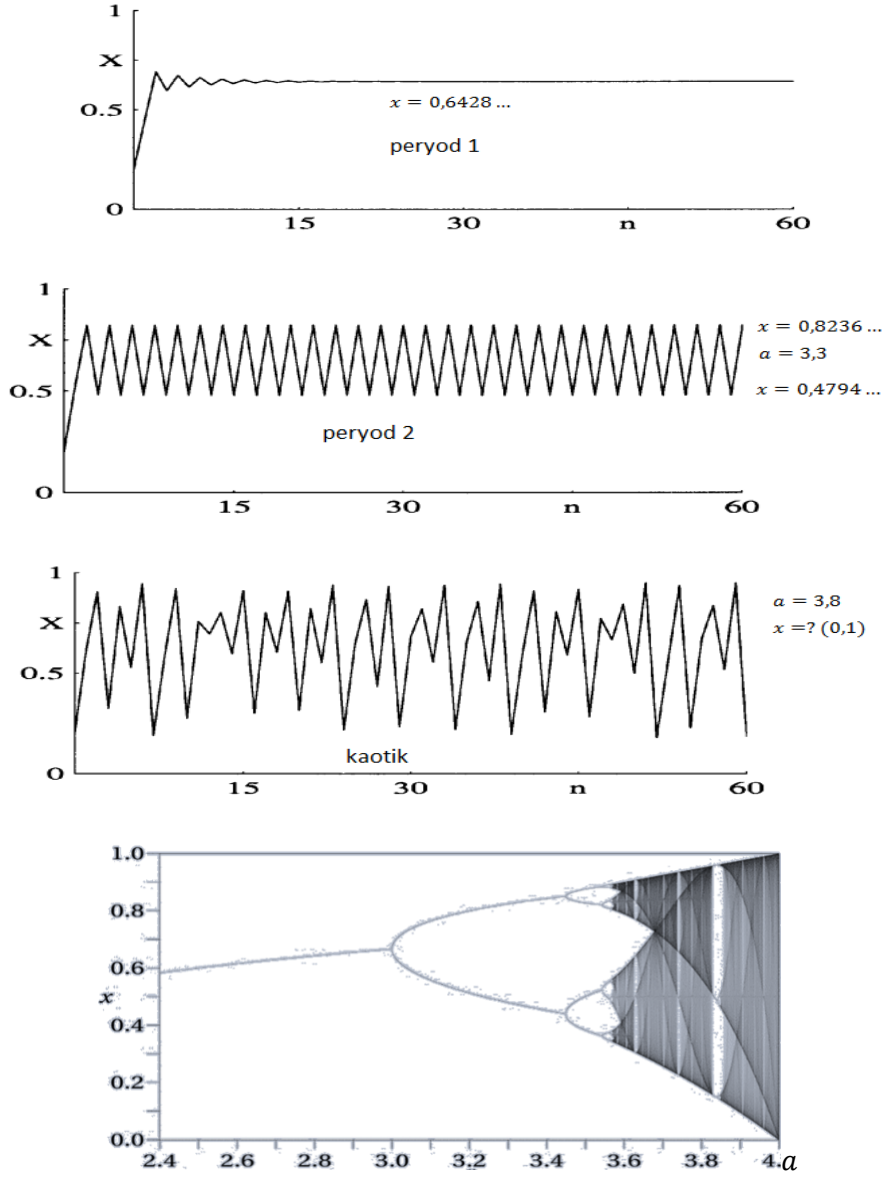


Poincaré kesiti

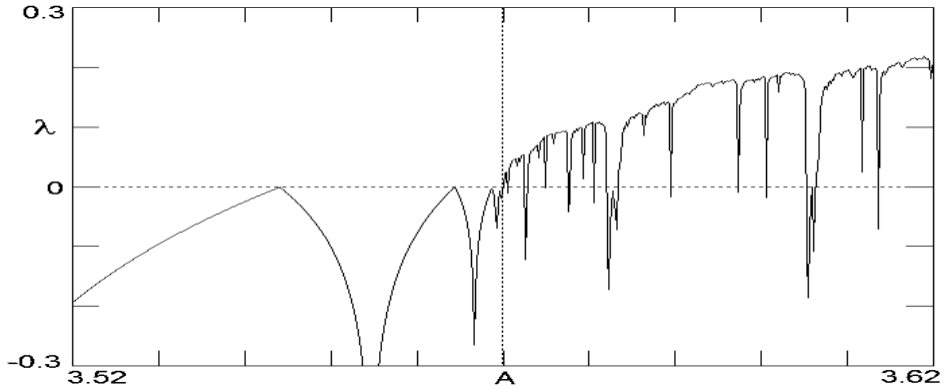
Şekil 5. Lorenz ve Rösleer Çekicileri



Şekil 6. Lojistik Denklem Analizi



Şekil 7. Lojistik Denklem Zaman Serisi için Lyapunov Üstelleri (Enns & McGuire, 1997).



Başlangıç değerleri veya sistemdeki parametrelerdeki küçük bir değişim bir süre sonra çok büyük değişimlere neden olur. Sistemin gelecekteki davranışı kesin olarak öngörülemez. Sistemin nasıl davranacağını ölçen testlerden birisi de Lyapunov üstelidir. Bu üstel bir başlangıç değerinde aralarında belli bir mesafe bulunan faz yörüngelerinin sistemin evrimi sırasında birbirinden ne kadar uzaklaşacağını ölçülmesine dayanan eksponansiyel bir üsteldir. Buna göre bir durum için sistemin Lyapunov üstelleri negatif ise sistem periyodik davranışa sahip olacaktır. Bu üstel pozitif değerler aldığı anda ise sistem kaotik davranacaktır. Şekil 7’de Lyapunov üstelleri lojistik denklem için gösterilmiştir. Periyodik bölgeden kaotik bölgeye sistem periyot katlanması veya çatallanma (bifurkasyon) yaparak geçiş yapar. Bu çatallanma sistemin kararsız olması veya kararlı yapının yok olması sonucu oluşur. Doğada birçok sistem bifurkasyon özelliği gösterir. Matematikçi Rene Thom özellikle biyolojik sistemlerdeki bifurkasyonlar yoluyla toplulukların niteliksel davranışlarındaki değişimleri açıklayan bir felaket (*catastrophe*) kuramını ortaya attı. Bu kurama göre sistemdeki parametrelerin oluşturduğu uzayda oluşacak bifurkasyon türlerini sınıflandırdı (Thom, 1989). Rasgele davranış bölgesinde sistem ile ilgili bir bilgi elde etmek mümkün değildir. Bu bölge kimi zaman beyaz gürültü olarak da adlandırılır.

Doğrusal olmayan sistemler termodinamik ya da istatistiksel olarak da sınıflandırılır. Buna göre Prigogine gibi bazı bilim adamları termodinamiği üç gruba ayırır. 1- Denge durumu termodinamiği (Termostatik) (Clausius vd.), 2- Lineer termodinamik (akı ve elektriksel iletkenlik gibi lineer denklemlerle ifade edilen transport olayları) (Lars Onsager vd.), 3- Lineer olmayan termodinamik. Self organize sistemler, şok dalgaları gibi kompleks sistemlerde akı denklemleri lineer değil. (Prigogine vd.)

3. Entropi

3.1. Entropi Tanımı ve Bilgi Entropisi

Entropi tanımı ilk kez fizikte termodinamiğin ikinci yasası olarak ortaya çıkmıştır. Bilindiği gibi termodinamiğin birinci yasası bir sistemde iç sistemin iç enerjisinin de hesaba katılarak enerjinin korunumu yasasının ifade edilmesidir. İkinci yasa ise bir sistem ile çevresi göz önüne alındığında korunumlu olan toplam enerjinin sistem ve çevresi arasında nasıl paylaşılacağı ile ilgilidir. Clausius tarafında tanımlanan termodinamik entropi sistemin bir durum fonksiyonudur. Buna göre izole bir sistemde termodinamik bir süreçte $\Delta S \geq 0$ yasası geçerlidir. Burada entropideki değişimin sıfıra eşit olması tersinir süreçleri, sıfırdan büyük olması tersinir olmayan süreçleri ifade eder. İzole edilmiş kapalı bir sistemin entropisi, tersinmez süreçler için daima artar. Entropi maksimum olduğunda sistem dengededir ve Enerjisi minimumdur. Bu durum Maksimum entropi ilkesi olarak adlandırılır. Termodinamik Entropi aynı zamanda iş yapamayacak enerjinin, boşa harcanan enerjinin bir ölçüsü olarak da tanımlanabilir. Buna göre bir sistemin entropisi ne kadar düşük ise o kadar fazla iş yapabilir, tersine entropi maksimum olduğunda sistem hiç iş yapamaz. Entropinin artışı, enerjinin bir bölgede, daha yoğun durumdan, daha yaygın duruma kendiliğinden geçme ölçüsü olarak da adlandırılır. Entropinin artış yönü zamanın artış yönü olarak alınır, zaman oku tanımlanabilir. 2. yasayı düzensizliğin ölçüsü olarak da tanımlamak mümkündür, burada düzen göz önüne alınan sistemin iş yapabilme yeteneğine sahip olması, düzensizlik ise iş yapamama özelliğine sahip olması anlamında kullanılmalıdır. Termodinamik maddenin iri ölçekli görüngü bilimsel (fenomonolojik) bilimdir. Boltzmann ve Gibbs (BG) mikroskobik ölçekte parçacıklar arası etkileşimleri hesaba katarak maddenin makroskobik davranışını veren entropiyi $S_{BG} = -k \sum p_i \log(p_i)$ şeklinde tanımladılar. Boltzmann-Gibbs istatistik entropisi de sistemi temsil eden bir durum fonksiyonudur. Buna göre N tane parçacıktan oluşmuş bir sistemi temsil eden bu durum fonksiyonu bilinir ise sistemin bütün termodinamik büyüklükleri elde edilebilir. Bu şekilde tanımlanan entropi sistemin oluşturduğu faz uzayının ağırlıklı hacmi ile ilgilidir. Bu nedenle entropinin artışı sistemin faz uzayının büyümesi ile ilgilidir. Bu tanıma göre bir sistemde entropi artışı sistemin düzensizliğinin artışına karşılık gelir.

Fiziksel sistemlerin davranışı için tanımlanan bu entropi tanımı Şanon tarafında bilgi teorisine de genişletilmiştir. Buna göre bir olayda mümkün durumların sayısı N_s olsun, bu durumda bilgi $I \propto N_s$ veya c bir sabit olmak üzere $I = cN_s$ yazılabilir. Birden fazla sistem söz konusu ise $N_s = c(\text{taban})^I$ veya $I = c \log N_s$ yazılabilir. Bir sistemle ilgili süreçte N_s toplam olay sayısı olmak üzere bir olayın olma olasılığı $P = \frac{1}{N_s}$ ise $I = c \log(\frac{1}{N_s})$ veya $I = -c \log(P)$ yazılabilir.

Bilgi teorisinde I ya kod uzunluğu $1/P$ ye sürpriz denir. Şanon, Bell laboratuvarlarında sinyal iletiminde maksimum bilgi nasıl iletilir problemi ile uğraştı. Şanon'a göre mümkün olan bir olaylar kümesi alalım, bu olayların olma olasılığı p_1, p_2, \dots, p_N olsun, bu olası durumlardan hangisinin olacağını bilinmiyor, bu nedenle herhangi bir olayın ölçülmesinde (belirlenmesinde) bir belirsizlik veya bir tercih var. Şanon yaptığı çalışma ile bu belirsizliğin $H_S = -K \sum_{i=1}^N p_i \log(p_i)$ şeklinde tanımlanacağını gördü ve bu ifadeye Bilgi entropisi ismi verildi. Boltzmann entropisi fiziksel sistemleri ilgilendir, Şanon entropisi ise olasılıkları ilgilendiren çok daha geniş bir alana uygulanabilir. Günümüzde bilim adamları BG entropisini (veya Şanon bilgi entropisini) farklı birkaç yoldan non-extensive (yaygın olmayan) sistemlere genelleştirme ile ilgili çalışmalar yapmaktadırlar. Bu tür entropiler genelleştirilmiş entropi olarak adlandırılırlar (Masi, 2005).

3.2. Kolmogorov-Sinai Entropisi (KS)

Şanon entropisini kaos teorisi ile ilgilendirmek kolay değil, her zaman pozitif ve geniş bir değişim aralığına sahip. Bu nedenle Kolmogorov, metrik-entropi (teorik-ölçüm entropisi) tanımladı, buna göre sıralı olasılıkları kullanan, bir oran şeklinde olan, limit durumlara göre belirlenen KS entropisi

$$H_{KS} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{t \rightarrow \infty} \left[\sum_{i=1}^{N_r} p_r \log \left(\frac{1}{p_r} \right) \right] / \text{zaman} \quad \text{veya} \quad H_{KS} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{t \rightarrow \infty} [H_t - H_{t-1}]$$

şeklinde yazılır. Burada ε olayın ölçüldüğü kutunun büyüklüğüdür. Limitler ε sabit ise zaman sonsuza ve verilen bir zaman için ε sifıra gidecek şekildedir. H_t herhangi bir t anındaki entropidir. Buna göre deterministik sistemlerde $H_{KS} = 0$, kaotik sistemlerde $H_{KS} > 0$, rasgele sistemlerde $H_{KS} = \infty$ değerlerini almaktadır.

Ilya Prigogine, Clausius entropisini açık sistemlere genişletmiştir. Clausius izole edilmiş bir sistemde entropinin artacağını belirtmişti. Pirogogine ise aynı zamanda sistem ile çevresi arasında bir entropi alışverişi olduğunu belirtmiştir. Buna göre toplam entropi değişimini $dS_T = dS_I + dS_E$ olarak ifade etmiştir. (Burada T indisi entropideki toplam değişimi, I indisi sistemin iç entropi değişimini, E ise sistem ile çevresi arasında değiş-tokuş yapılan entropiyi belirtmektedir). $dS_T > 0$ ise sistem düzenden kaosa geçer $dS_T < 0$ ise sistem kaostan düzene geçiş gösterir. $dS_I > 0$ olduğunda $dS_E > 0$ olduğu durumlarda sisteme entropi girer, o $dS_E < 0$ olduğu durumlarda sistemden entropi çıkar, $dS_E = 0$ olduğu durumlarda ise sistemin izole olduğu durumlara karşılık gelir. Sistemin toplam entropisi $dS_T > 0$ ve $dS_I = 0$, $dS_E < 0$ olduğu durumlar sistemin self organize olduğu durumlara karşılık gelir.

Lineer olmayan denklemlerin, bazı durumlar için kaotik çözümler verdiğini bilinmektedir. Buna göre kaotik davranan sistemler için de entropiye benzer bir büyüklüğün tanımlanması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Böylece bu sistemlerde zaman oku benzeri bir tanım yapılabilir. Bu çalışmalar J. Von Neuman, G. Birkhoff, E. Hopf, A. Kolmogorov, D. Anosov, V. Arnold, Y. Sinai gibi bilim insanları tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmalara göre dinamik sistemlerin davranışı, sistemin faz uzayındaki davranışına göre, Basit (periyodik), “*ergodic*”, “*mixed ergodic*” (kaotik) olarak adlandırılabilir. Bu davranışlar içinden kaotik olanı başlangıç koşullarına çok duyarlı ve faz uzayındaki her yörünge birbirinden üstel olarak uzaklaştığı için, zaman geçtikçe bütün faz uzayını kaplar (Termodinamik denge). Bu durum “*mixed ergodic flow*” olarak adlandırılır ve kaotik dinamik sistemin davranışını belirler. Bundan daha rasgele davranış Kolmogorov’un anısına “*K-flows*” olarak adlandırılır. Bu durumda sistemin davranışı en üst belirlenemez durumdadır. Yani sonsuz tane ölçüm bile, bir sonraki durumun ne olacağını

kestiremez. Bazı çalışmalar K-flow un entropiye benzer özellik gösterdiğini belirtmektedir. Buna göre bir “*internal time*” (iç zaman) tanımı yapılmakta ve bu dinamik sistemin yaşını belirtmektedir. Kaotik dinamik sistemler için aynı zamanda kuantum mekaniğine benzer bir belirsizlik ilkesi tanımı yapılmaktadır. Buna göre sistemin termodinamik olarak tamamen belirlenmesi, sistemin dinamik tanımını anlamsız yapar, tersi sistemin dinamik olarak tamamen belirlenmesi, termodinamik bakışı anlamsız yapar (Dorfman, 1999).

4. Kompleksite

Günümüzde kompleksite olayının kesin ve üzerinde tam olarak uzlaşmış matematiksel bir tanımı henüz yoktur. Fakat birçok farklı sistemin yapısal ve dinamik olarak kompleks davranış gösterdiği ve bu davranışın evrensel olduğu görülmüştür. Makro veya mikro kalabalık (geniş) bileşenlerden oluşmuş bir yapı (topluluk) varlığını korumak için zamanla gittikçe daha kompleks hale gelir. Bu kompleksliği üretmediği anda da yok olur. Bu durum her sistem için geçerli olmasına rağmen nasıl oluştuğu her sistem için farklı bir mekanizmaya sahiptir. Doğrusal olmayan dinamiğe sahip sistemlerin genel davranışları basit ve kaotik olabilir. Kompleks davranış bu iki davranışın aynı anda olduğu durum gibi düşünülebilir. Kompleksite bilimi disiplinler arası bir bilimdir bu nedenle yalnızca fizik yasalarından yola çıkarak tanımlanması eksik olur. Kompleks sistemlerin yapıları ve davranışları için aşağıdaki genel tanımlar yapılabilir.

- Kompleks sistemler birçok bileşene sahiptirler, bu bileşenler çeşitli alt bileşenlere sahip olabilirler, bu alt bileşenler de daha küçük bileşenlere ayrıştığında basit temel bileşenler elde edilir. Bu temel bileşenlerin farklı bireysel davranışları vardır. Sistem bileşenlerine ayrıştıkça kompleksite azalır veya yok olur, sistemin bileşenleri artıkça kompleksite artar.
- Kompleks sistemde bileşenler arasında çok sayıda ilişki vardır bu ilişkiler birbirine kuple olmuş dinamik denklemler şeklinde ifade edilirler ve sistemin evrimi bu denklemler ile ifade edilir.
- Bileşenler arasındaki ilişkiler genel olarak bir doyumluk (satürasyon) ve eşik değere sahip lineer olmayan karakterdedirler, sistemin öz evrimi bu lineer olmayan davranıştan kaynaklanır.
- Bileşenler arasındaki ilişki çevre tarafından sağlanır. Çevrenin etkisi zamanla bağlantılı dış destek şeklindedir. Sistem zamana bağlı bu dış etkiyi algılar ve kendisini bu etki altında maksimum yaşayacak şekilde adapte eder.
- Kompleks sistem tipik olarak uzun süre evrimini hatırlar ve bunun sonucu çevre ve başlangıç koşullarına göre kendisi davranışını uyarlar.
- Kompleks sistem düzenli ve rastgele bileşenlerden oluşur fakat bunlardan herhangi biri baskın değildir.
- Kompleks sistemler hiyerarşik yapıya, öz organizasyona ve ortaya çıkış (emergence) özelliklerine sahiptirler.
- Kompleks sistem geniş bir zaman ve uzunluk ölçeğinde ölçek davranışı gösterirler, bu nedenle hiç kimse veya birkaç ölçek davranışı sistemin evrimini belirleyemez (Allegrini vd., 2004).

Kompleks sistemde en alt yapısal bileşenden başlanarak sistemin bütünü kapsayacak şekilde aşağıdan yukarı doğru gidildikçe öz organizasyon, hiyerarşi ve ortaya çıkış (*emergence*) davranışları oluşur. Ters yönde gidildiğinde bu davranışlar yok olur ve en alt bileşenler basit sistemler olarak ele alınabilir. Sistemin zaman içindeki evrimi süresince alt bileşenlerin davranışı rastgelelik içerir. Bu rastgelelik belli bir değere ulaştıktan sonra yok olur ve sistemin davranışı bir sadelik (*simplicity*) gösterir. Dinamik olan bu özellik ölçeğe bağlı olarak yapısal durum içinde geçerlidir.

5. Sonuç

Tarihsel gelişime uygun olarak toplumların bilim yapma biçimi aynı zamanda teknoloji, eğitim, sağlık ekonomi, politika gibi yapıların oluşturulmasında etkili olmuştur. Günümüzde kullanımda olan teknoloji ve diğer yapılar çoğunlukla daha önce bahsedilen klasik ve modern dönem lineer düşünce sistemi üzerine tasarlanmıştır. Bu basit, öngörülebilir, indirgemeci, küçük değişimlerin önemsiz olduğu lineer yaklaşım birçok konuda başarılı olmuştur. Fakat bu yaklaşımla oluşturulmuş sistemler zaman içinde belli tıkanıklıklara, açmazlara, çözümsüzlüklere de sahip olmuşlardır. Günümüzde teknoloji, biyoloji, çevre, sosyoloji ve ekonomi gibi konularda birçok problemle karşı karşıyayız. Bu problemler çoğunlukla bu sistemlerin kompleks yapıya ve ilişkilere sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu problemlerin çözümü yukarıda genel özellikleri özetlenen Kompleksite bilimine ihtiyaç olduğu açıktır. Kompleksite bilimi tanımı şimdilik iddialı bir tanımdır. Fakat sistem teorisi, *graph* (çizge) teorisi, yapay sinir ağları teorisi, ajan tabanlı modelleme gibi bilimsel yöntemler kompleksite bilimi çerçevesinde değerlendirilebilir. Kompleksite bilimi ile ilgili paradoks sayılacak bazı tartışmalardan da bahsedilebilir. Bunlardan biri algoritmik kompleksitedir. Kompleks bir problemi çözmek için yazılan bir algoritma problemin kendisinden daha kompleks olabileceğidir. Bir diğeri ise bilimsel teoriyi insanlar yapar, kompleksite bilimi ise insanında öznesi olduğu bir durumdur. Bu nedenle insanın kendisinin de bir parçası olduğu bir çerçeveyi tam olarak tanımlayıp tanımlayamayacağı sorgulanabilir. İçinde bulunduğumuz evren bir bütünsellik içindedir insan zekasının bu bütünselliği kavrama, tanımlama düzeyinde bir üst sınır olup olmadığı da kompleksite bilimi çerçevesinde tartışılan bir sorudur.

Kaynakça

- Allegrini, P., Giuntoli, M., Grigolini, P., & West, B. J. (2004). From knowledge, knowability and the search for objective randomness to a new vision of complexity. *Chaos, Solitons & Fractals*, 20(1), 11-32. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(03\)00424-7](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00424-7)
- Badii, R., & Politi, A. (1997). *Complexity*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524691>
- Dorfman, J. R. (1999). *An introduction to chaos in nonequilibrium statistical mechanics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511628870>
- Enns, R. H., & McGuire, G. C. (1997). *Nonlinear physics with Maple for scientists and engineers*. Birkhauser.
- Eren, E., & Şahin, S. (Ed.). (2017). *Kompleksite ve İktisat*. Efil Yayınevi.
- Faye, J. (2019). Copenhagen interpretation of quantum mechanics. E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopaedia of Philosophy* içinde (Winter 2019 ed.). <https://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen>
- Koschmieder, E. L. (1974). *Advances in Chemical Physics*. Wiley. <https://doi.org/dqtt5k>
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2), 130-141. <https://doi.org/fwwt5q>
- Marion, J. B., & Thornton, S. T. (1995). *Classical Dynamics of Particles and Systems*. Saunders College Publishing.
- Masi, M. (2005). A step beyond Tsallis and Rényi entropies. *Physics Letters A*, 338(3-5), 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2005.01.094>
- Neff, R. B. & Tillman, L. (1975). Three new pocket calculators: Less costly, more powerful. *Hewlett-Packard Journal*, 27(3), 2-7. <https://www.hpl.hp.com/hpjournal/pdfs/IssuePDFs/1975-11.pdf>
- Peterson, I. (1993). *Newton's clock: Chaos in the solar system*. Freeman.
- Scott, A. C., Chu, F. Y. F., & McLaughlin, D. W. (1973). The soliton: A new concept in applied science. *Proceedings of the IEEE*, 61(10), 1443-1483. <https://doi.org/fcvksh>
- Thom, R. (1989). *Structural stability and morphogenesis*. Westview Press. <https://doi.org/fsk2>
- Van der Pol, B. (1926). LXXXVIII. On “relaxation-oscillations”. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 978-992. <https://doi.org/10.1080/14786442608564127>
- Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., & Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 16(3), 285-317. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(85\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0167-2789(85)90011-9)



Covid-19 and Digitalization: Network Analysis on Industrial Robots Trade Among the BRI Countries

Covid-19 ve Dijitalleşme: KYG Ülkeleri Arasındaki Endüstriyel Robot Ticareti Üzerine Ağ Analizi

Semanur SOYYIĞIT^a

Ercan EREN^b

Research Article/Araştırma Makalesi

Received/Başvuru: 09.11.2020; Accepted/Kabul: 29.12.2020

ABSTRACT

The pandemic indicates that the use of digital technologies is going to become more important hereafter. In such a world where countries need to take action to shape their future in accordance with this ‘new normal’, the policies followed by countries in high technological sectors will be determinative on their positions within global value chains in the future. Based on this, international trade of industrial robots among the Belt and Road Initiative members is analyzed via complex network tools in the present study. The empirical results indicated that the international trade network of industrial robots has complex system properties such as power-law distribution, disassortativity, core-periphery structure etc. The results also revealed that developing members of the Initiative may exploit export hubs of the network, namely South Korea, Singapore, Austria and Italy in order to digitalize their economies in the short-term.

Keywords: complex network analysis, Covid-19, international trade, industrial robots, digitalization

ÖZ

Pandemi, yaşamımızın bundan sonraki kısmında dijital teknolojilerin kullanımının daha önemli hale geleceğini göstermektedir. Ülkelerin bu ‘yeni normal’e uygun olarak geleceklerini şekillendirmede eyleme geçmeleri gereken böyle bir dünyada, yüksek teknoloji sektörlerinde izlenecek politikalar, ülkelerin gelecekte küresel değer zincirindeki pozisyonları üzerinde belirleyici olacaktır. Buna dayanarak bu çalışmada, Kuşak ve Yol Girişimindeki üye ülkeler arasındaki uluslararası endüstriyel robot ticareti kompleks ağ araçları ile incelenmektedir. Ampirik sonuçlar uluslararası endüstriyel robot ticaret ağının güç yasa dağılımı, farklılık eğilimlilik, merkez-çevre yapısı gibi birtakım kompleks ağ özellikleri taşıdığını ortaya koymuştur. Sonuçlar ayrıca, girişimin gelişen ülkelerinin kısa dönemde ekonomilerinin dijital dönüşümünü sağlamada, ağda yer alan Güney Kore, Singapur, Avusturya ve İtalya gibi ihracat merkezlerinden yararlanabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: kompleks ağ analizi, Covid-19, uluslararası ticaret, endüstriyel robotlar, dijitalizasyon

^a Kırklareli University, Department of Public Finance, semanurs83@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5679-6875

^b Yıldız Technical University, Department of Economics, ercaeren@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4513-278X

1. Introduction

It is stated that China's Belt and Road Initiative (BRI), which was announced in 2013 and has started to be implemented in a serious way with significant infrastructure investments reaching a wide geographical coverage every passing day, is a project put forward to strengthen China's economic situation. Because it is believed that demand shrinking in the US, the EU countries and Japan, which are the most important trade partners of China, had effect on the slowing growth rate of China (Bocutoğlu, 2017, p. 267; Karagöl, 2017, p. 3). China also evaluated Transatlantic Trade and Investment Partnership (TTIP), which was signed by the US and the EU, as a reason of decrease in its export (Karagöl, 2017, p. 3). Thus, the initiative, put forward by China, is thought to be a project in order to retain the capital accumulation and to increase the demand for the goods manufactured in the country (Balcı, 2018, p. 2; Bocutoğlu, 2017, p. 267). On the other hand, there is a significant amount of infrastructure investments within the scope of the Initiative. It is a probable outcome of these investments that trade among the BRI countries will be affected positively. So, within the scope of the initiative that involves such big investments and constitutes a new global value chain, what is the case in terms of international trade in the sectors that are vital for digitalization? This question has especially become necessary to answer after the Covid-19 pandemic.

As it is known, the world has encountered the Covid-19 pandemic, originated from China, since the end of 2019. One of the features of the pandemic is that it is contagious not only in terms of health, but also in terms of economy. The reason is the increased inter-connectedness of global economy through global value chains (GVCs) and international movements of capital, people, goods and services (Strange, 2020, p. 2). That's why the case of re-nationalisation of GVCs is mentioned as insulation of countries from the economic consequences of the pandemic (OECD, 2020, p. 3). However, this idea increases, let alone decreases, the importance of robots which are important components of GVCs. Because it is said that the automation and the use of robots is an urgency against the destructive impact of the pandemic on supply chains through the restrictions of the movement of people. That's why digitalization of supply chain is accepted as a new strategy (Baker & McKenzie, 2020, p. 16).

Therefore, it is important to examine the initiative, which covers many developing countries from Asia to Africa, Europe and Latin America, for the robot industry that has the potential to shape future of these countries in terms of both short-term and long-term. Short-term impact is related to recovery of the immediate effects of the pandemic and highly important. Long-term impact is crucial in terms of the propitiousness to the 'new normal' and its sustainability. In this study, in line with this importance, the international trade among the BRI countries in industrial robots sectors is analyzed for the year 2018 with complex network analysis.

The main objectives to use complex network approach in this study are:

- (i) to determine the complex structure properties of the network statistically,
- (ii) to calculate complex system measures as high-degree indicators (such as assortativity/disassortativity, core-periphery structure, density, hub and authority centralities, power-law degree distribution etc.),
- (iii) to compare and evaluate these high-degree measures with first degree ones within the scope of the dynamics of the network structure,
- (iv) to make more realistic evaluations, inferences and policy recommendations related to the pandemic for the countries with reference to the differences between high and first degree results.

With reference to these objectives, the flow of the study is planned as follows: First, the relationship between the pandemic and industrial robots sectors is discussed in the Section 2.

Literature search and methodological information is given in the Section 3 and Section 4 respectively. Empirical results are presented in Section 5 and discussed in the Section 6.

2. The Pandemic and the Use of Industrial Robots

Strange (2020, p. 2) mentions about three features of the pandemic that differentiate it from the previous crises. First one is that it is a global phenomenon that has health effects that are not limited and localized same as virus outbreaks before. Secondly, the pandemic has multidimensional effects: public health and economic activity. Policy responses to recover one dimension have adverse impact on the other. This feature differentiates the pandemic from financial crises experienced so far. Third, the pandemic is contagious in economic sense as much as in health sense due to GVCs. Because global economy is highly inter-connected due to international movements of people, capital, goods and services.

OECD (2020, pp. 2-3) draws attention to the development of GVCs. Accordingly, the expansion of GVCs has stopped since 2011 and, trade tensions and rising protectionism has decreased global import content of production. However, the pandemic has revealed a different debate that GVCs create additional economic vulnerabilities since international trade is disrupted. There are different suggestions by scholars and policy-makers about the future of GVCs. Some suggestions say that there is no need to rethink GVCs while some reveals that contraction of GDP would have been worse with re-nationalized GVCs (OECD, 2020, pp. 2-3). However, digitalization, in any case, either in value chains or in national economy, seems to be inevitable. Del Rio-Chanona et al. (2020) developed an index, called Remote Labour Index (RLI) for each occupation. Index value equals to 1 indicates that the activities associated with an occupation can be overcome at home, while index value equals to 0 indicates that none of the activities related to the occupation can be performed at home. Accordingly, when the occupation list is examined, it is observed that occupations related to service sector have values close to 1, while occupations related to manufacturing have values close to 0. Thus, we can deduce that digitalization is required for manufacturing activities during the pandemic since production activities within this sector are not appropriate for social distancing measures.

Replacement of manpower with machines is not something new. This can be observed in each stage of industrial revolution. Steam engines, that were the symbol of Industry 1.0, replaced labor force and became driving force of industrialization. Electrification was accepted as the beginning of the second industrial revolution. Within this stage of the industrial revolution, the assembly line was first used in the automotive industry. The result was acceleration of the production process and serial production. The third industrial revolution, which began in the 1970s, had some characteristics such as IT and further automation through electronics. This stage of the industrial revolution is characterized by the replacement of labor force by machines in serial production. Finally, Industry 4.0 refers to the technical integration of cyber physical systems into production and logistics, and also the use of the IoT and services in industrial processes. What distinguishes the fourth industrial revolution from the third is the introduction of Artificial Intelligence (AI) in the service sector (Wisskirchen et al., 2017, pp. 11-12).

Not all economies are at the same level of industrialization. Manchanda et al. (2020, pp. 3-4) classified countries in three development stages which are low-income economies, emerging markets and more advanced markets. Low-income economies are defined as the countries that are narrowly engaged with GVCs in agriculture, textiles, ready-made garments, light engineering, footwear, electronics assembly and leather goods. Thus, these countries are less advanced technologically in manufacturing industry and dependent on labor force. This country classification includes mostly Sub-Saharan countries. Countries involving emerging markets have an evolving industrial structure. Industrial sector is more diversified and competitive within these economies. Technology skills of the labor force within these countries are also improving. Turkey, Brazil, India, Thailand etc. are the countries within this classification. The more advanced economies have sophisticated industrial structure. These countries are

characterized by their competitiveness in GVCs and their high levels of technological sophistication. Germany, Japan, the US and China are the countries within this classification. Taking these differences into consideration, we can say that use of industrial robots in production differ from one classification to the other. However, it is a fact that integration and use of industrial robots in the production facilities, especially during the pandemic which will last for unforeseen period, is vital for each economy, but mostly for the countries of which production processes depends on labor force predominantly.

3. Literature Review

The literature on the BRI flourishes every passing day since it is a popular and novel issue. We can separate the studies on the BRI as pre-pandemic and post-pandemic. Pre-pandemic studies analyze some properties of the trade among the BRI countries. However, post-pandemic studies, very few in numbers, make reassessment of the Initiative and reveal possible outcomes of the pandemic on the Initiative. In this part of the study, we will first mention about the pre-pandemic studies, and then post-pandemic studies.

There are two major methods used in the empirical studies on the trade relations among the BRI members: gravity models and network analysis. It is stated that network analysis is more preferable since it has some advantages compared to gravity models which are based on standard econometric method. This means that gravity models fail to notice some features which network analysis can explain. One of the disadvantages of gravity models is to not to capture skewed distribution of trade relations in the network, meaning that these models do not take one of the most prominent properties of the international trade, namely ‘preferential attachment’, into consideration. Another disadvantage of gravity models is to not to represent the effect of the third party in international trade. This causes to fail to evaluate the holistic structure of the trade network (Smith & Gorgoni, 2018, pp. 27-28). That’s why, in this section, studies that analyzed the trade relations among the BRI via network analysis are summarized. Fu et al. (2018) enhanced standard gravity model by using some additional indicators to reflect geographical, cultural, institutional and factor-endowment properties. They also constituted a trade network covering the BRI countries and applied network analysis. They found that China was at the core and the countries at the first-tier were Russia, Kazakhstan, Indonesia, India, Poland and Turkey. The importance of these countries stems from their being important channels to spread to Mongolia-Russia, Central Asia, Southeast Asia, South Asia, Central and Eastern Europe and West Asia. The findings of the Boffa's (2018) study, which analyzed the BRI via network analysis by using input-output tables, revealed that there were two production networks around China and Russia which is related reciprocally. The key sector of the network was ‘Computer, Electronic and Optical Products’. This sector comprised the 15% of the export from the BRI countries. It was also revealed that the only 15% of the added value of this sector was constituted by the BRI countries while 30% of the added value was constituted by advanced countries. This result was interpreted as the potential to use more input from the BRI countries in the future. The study also revealed that not only trade but also vertical specialization would increase as a result of the decrease of trade costs. Boffa finally stated that the BRI was an initiative that was based on ‘win-win’ principle and let the countries specialize in line with the comparative advantages. Song et al. (2018) analyzed both the trade network that consists of the BRI countries and the trade network that covers countries around the world. The main research question of the study was not topological properties of the BRI trade network, but position of the BRI trade network in global trade network and its interaction with the globe. The authors, firstly, detected trade groups clustered around a hub for both the BRI trade network and global trade network with community detection method. Afterwards, they investigated reciprocal trade relations among these groups and made some suggestions for these countries on how to manage these trade relations in order to increase their powers in global trade. In another study, Liu et al. (2018) analyzed trade network for the BRI countries from 2000 to 2016 via network analysis. They built undirected and weighted adjacency matrices and made used of community detection

method. The findings revealed that not all trade relations have importance equally and that centralities of trade groups and countries change over time.

Li et al. (2019), which not directly focused on the BRI countries but gave inspiration for our study, analyzed international trade network for industrial robots, which are an important element of AI to shape the future of the countries, via complex network analysis. Although the authors do not focus on the BRI directly, their findings are important. The results revealed that catch-up countries (such as China within this case) would promote industrial robot trade within the scope of such regional collaborations (Li et al., 2019, p. 12).

When it comes to the literature on the post-pandemic research of the BRI (analyzing the impacts of the Covid-19 pandemic on the BRI) is also so emergent and open to improvement. There are a few studies evaluating this impact. However, these studies do not involve an empirical analysis. In one of these studies, Buckley (2020) evaluated immediate, medium-term and long-term impacts of the pandemic on the BRI and concluded that the BRI, like many pre-pandemic institutions, will require radical reassessment in the post-pandemic world. Buckley reveals that China's health diplomacy in supplying medical equipment may strengthen the tie between the countries and China. On the other side, unemployment in China will be a really big problem and the effects of the dislocation caused by the lockdown may be semi-permanent. Increasing social unrest led by increasing unemployment will lead to rethink of the BRI. The countries have started functioning with decreased physical connectivity since the pandemic. Buckley states that, physical globalization recede while digital globalization will continue to grow. In this case, politically motivated and huge trans-continental links may be re-evaluated as 'wasteful'. However, connectivity between resources and transport hubs may remain their value as trade recovers. Thus, there is a trade-off for China between to increase income, employment and wealth at home and to sustain the initiative. Bugaenko (2020) makes an evaluation of the future of the BRI and its impact in Central Asia. Accordingly, Bugaenko claims that the BRI will undergo two stages. In the first stage, the project will be suspended. The reasons are the quarantine-imposed interruptions in transportation and the diversion of China's resources to remediate its own economy. In the second stage, China will pursuit its BRI policies actively. In this stage, there might be a little change in the strategy. Within this stage, inward-oriented economy will activate the interest in resource and geopolitical reasons will impel cooperation with border countries. Bugaenko says that if Central Asian countries create necessary conditions, local production by Chinese firms will develop. As a result of increased cooperation with China, export of Central Asian countries will become China-oriented, both in energy and mining sectors.

The literature search indicates that there is not any study that directly analyzes trade relations among the BRI countries in terms of the industrial robots sectors that have become crucial especially for the post-pandemic era. Therefore, in this study, we focused on these sectors by being inspired by Li et al. (2019).

4. A Brief Explanation of Network Theory

As stated by Reichardt (2009, p. 2), the first step to understand a complex system is the decomposition of the system into its parts. Economics is approached as a complex system by complexity science, contrary to standard approaches. This resulted to use complex system methods in the field of economics. Network analysis is one of them as a method that is proper to decompose the economic system into its parts. Recently, many economic phenomenon has started being analyzed within the scope of network structure.

It is observed that international trade among countries, financial relations among economic agents and global production relations are the main subfields of economics in which network tools are used widely. Network representation of these economic relations enables us to see the

parts of the system and the relations among them. That's why the network analysis has drawn attention of policy makers, recently (OECD, 2009, p. 9).

Network theory, that is called graph theory in mathematics, was enhanced via the solution method of Königsberg puzzle which was put forward in 18th century. Euler, who is the famous mathematician and physicist of that era, revealed the most important two elements of a network, by defining each land as a node and each bridge as a link (Toroczkai, 2005, p. 96). Based on this, network is basically defined as a set consists of the nodes and the links among these nodes. Mathematical notation of a network is as follows (Estrada, 2015, pp. 95-96):

$$G = (V, E, f)$$

where V is the set of finite nodes, E is the set of links among these nodes and f is the mapping that connects the elements of E and V . Networks are classified as binary or weighted and directed or undirected, depending on the properties of their links (Chow, 2013, p. 3). A weighted network corresponds to a network in which each link has a different weight. Mathematical notation of a weighted network changes as follows:

$$G = (V, W, f)$$

where $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ indicates the set of weights. Degree and strength are important concepts in binary and weighted networks, respectively. Degree of a node is the number of links that node has. Strength of a node refers to total weight of that node (Chow, 2013, pp. 5-8). Mathematical tool that makes it possible to analyze a network is matrix. This matrix, which is called adjacency matrix, is built for a binary network as follows (Estrada, 2015, pp. 95-96):

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i, j \in E \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

The factor that has to be taken into consideration to build the adjacency matrix is the direction of the relation for directed networks and the weight of the relation for weighted networks.

Network analysis has two related but distinct methods (Bougheas & Kirman, 2014, p. 9). One of them is the examination of the statistics related to topological properties of the network and the other is the simulations based on these statistical properties.

There are some major properties examined within the scope of topological properties. One of them is connectedness which can be analyzed both in node-level and in network-level. In a directed network, which does not involve self-loops and multilink, connectedness is measured in network-level by a coefficient which is called 'density coefficient'. It is formulized as follows (Newman, 2010, p. 134):

$$\rho = \frac{m}{n(n-1)}$$

where m corresponds to count of links and n corresponds to count of nodes. This coefficient indicates the ratio of count of actual links in the network to the count of maximum possible links. Density coefficient lies between 0 and 1. In other words, this coefficient gives an idea about the realization ratio of the links in the network. The higher the coefficient is, the higher the connectedness.

Another important property of a network is reciprocity that can be related with a lot of important phenomena. Reciprocity indicates the tendency of node pairs to be connected by mutual links pointing in opposite directions (Ruzzenenti, 2010, p. 1716). It is the proportion of mutual connections in a directed graph (Csardi & Nepusz, 2006, p. 331).

Another important topological property is the degree distribution of a network. A great number of studies based on real-world networks have indicated that there are a lot of nodes with weak links and there are a few nodes with strong links. The shape of this distribution in logarithmic scale is a straight line. It means that the distribution follows power-law. Power-law distribution

is indicated as $P(k) \propto k^{-\alpha}$ mathematically and means that formation of links in the network is not random. That's an important point, since it implies that network system is managed by some hubs with high degree/strength. These hubs are major determinants on the system behavior even if their number is not much (Newman, 2008, p. 34). In network theory, a network that follows power-law distribution is called scale-free network since the same functional form exists when the variable is rescaled (Boccaletti et al., 2006, p. 188). α has a special importance in network analysis since it means that a higher α leads to a lower probability of nodes with many links. In other words, the higher the α is, the less the super-nodes are (Hein et al., 2006, p. 270).

Power-law distribution has higher peak and heavy-tail. One method to determine whether a distribution has heavy-tail or not is examination of kurtosis and skewness values. If kurtosis value is positive, then the distribution has heavy-tail (Decarlo, 1997, p. 292). Skewness is a measure to determine on which side of the distribution heavy-tail exists. If skewness is positive, then heavy-tail is on the right side, meaning that the distribution is right-skewed. If skewness is negative, then the distribution is left-skewed (Hippel, 2011). However, it is also required to analyze the fitness of a distribution to power-law distribution statistically. One of the tests used on this purpose is Kolmogorov-Smirnov test. If the p-value is lower than 0.05, then the null hypothesis that represents fitness to power-law distribution is rejected (Csardi & Nepusz, 2006, p. 160). Clauset (2011) states that fitness to power-law distribution is an indication of complexity in generating process of structure examined.

Another property of a network is assortativity/disassortativity. Assortativity implies that nodes with high degree/strength have tendency to have links with the nodes with high degree/strength. Oppositely, disassortativity means that nodes with high degree/strength have tendency to have links with the nodes with low degree/strength (Reichardt, 2009, pp. 6-7). A correlation coefficient is used to determine whether assortative or disassortative structure exists in the network (Newman, 2003). This coefficient lies in the range of $-1 < r < 1$. If it is positive, then there exists assortativity in the network. However, if it is negative, then there exists disassortativity. $r = -1$ corresponds to perfect disassortativity, while $r = 1$ corresponds to perfect assortativity. Detection of assortative/disassortative structure is an important part of network analysis since disassortativity indicates existence of core-periphery structure in a network (Fuge et al., 2014; Csermely et al., 2013, p. 99). In a core-periphery structure, nodes in the core are related to each other and also to nodes in the periphery. However, nodes in the periphery are not related to each other (Borgatti & Everett, 1999, pp. 377-378). Borgatti and Everett developed a correlation coefficient that measure fit of a real data network to a network that has ideally core-periphery structure. This correlation coefficient lies between 0 and 1. The closer to 1 the coefficient is, the closer to perfect core-periphery structure the real-data network is (Borgatti & Everett, 1999, p. 393). Existence of core-periphery structure in a network requires the determination of core and periphery nodes of the network. Thus, centrality measure becomes an important tool on this purpose.

There is a great number of centrality measures to determine the importance of nodes in network such as degree centrality, betweenness centrality, closeness centrality, eigenvector centrality, hub and authority centrality etc. In this study, hub and authority centralities developed by Kleinberg (1999) are computed. In a directed network, a hub is a node with high out-going degree/strength and an authority is a node with high in-coming degree/strength. However, Kleinberg stated that it is not sufficient for a node to have high out-going degree/strength to be a 'good' hub; it is also required for this node to be related with 'good' authorities that have high in-coming degree/strength. Similarly, a 'good' authority is a node with in-coming degree/strength from 'good' hubs. Kleinberg stated that, thus, there is a 'mutually reinforcing relationship' between hubs and authorities (Kleinberg, 1999, pp. 7-8). Kleinberg indicated this relationship as follows:

$$x^{<p>} \leftarrow \sum_{q:(q,p) \in E} y^{<q>}$$

$$y^{<p>} \leftarrow \sum_{q:(p,q) \in E} x^{<q>}$$

where $x^{<p>}$ and $y^{<p>}$ are authority weight and hub weight of node p , respectively. Kleinberg developed an algorithm that works with an iterative process in order to compute hub and authority centralities of the nodes in network. Each node in the network is assigned with a hub and an authority centrality value at the end of this iterative process.

Kleinberg, with reference to $G = (V, E)$ in which $V = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ is node vector, firstly defined y vector which consists of $y^{<p>}$ values and x vector which consists of $x^{<p>}$ values. Then, Kleinberg proved that these vectors converge to y^* and x^* at the end of the iterative process. y^* vector is hub centrality vector and x^* vector is authority centrality vector. With reference to A matrix that is the adjacency matrix of graph G , x^* and y^* vectors are eigenvectors of $A^T A$ and AA^T matrices, respectively (Kleinberg, 1999: pp.9-11). Thus, $M_{auth} = A^T A$ and $M_{hub} = AA^T$ are authority and hub matrices, respectively (Kolaczyk, 2009, pp. 92-93).

In the present study, it is aimed to examine the international trade of the sectors that have importance in today's world of AI with reference to network properties explained above within the scope of the BRI which is a new global value chain formation. The main motivation to select these sub-sectors is their potential to shape the future of the economies. Taking into consideration that the most of the BRI countries are developing countries, it becomes necessary to analyze the trade network in terms of these sectors. The Harmonized System (HS) codes that represent the industrial robots sectors, explanation of these commodity codes and the source of the data are given in Table 1 in detail.

Table 1. Definition and the Source of the Data

HS Codes	Explanation of the Data	Source of the Data
HS Code 842489	Mechanical appliances; for projecting, dispersing or spraying liquids or powders.	United Nations Comtrade
HS Code 842890	Lifting, handling, loading or unloading machinery	United Nations Comtrade
HS Code 847950	Machinery and mechanical appliances; industrial robots.	United Nations Comtrade
HS Code 848640	Machines and apparatus of a kind used solely or principally for the manufacture or the repair	United Nations Comtrade
HS Code 851521, HS Code 851531, HS Code 851580	Welding machines and apparatus	United Nations Comtrade

Directed and weighted adjacency matrices, which are built by using export values for each sector exists in Table 1 for the year 2018, are used in the analysis. We choose the year 2018, because it is the latest year to reach the data for all BRI countries. All data have been obtained from the United Nations Comtrade. We followed Li et al. (2019) within the process of the selection of the sectors. In their study examining global industrial robot trade, Li et al. (2019) defined these sectors mentioned as important sectors in today's AI era. The present study consists of 143 countries which are currently attended the BRI. The list of the countries can be found in Appendix A.

5. Empirical Results

First of all, some descriptive statistics for each sub-sector is given in Table 2. Accordingly, *industrial robots* and *machines and apparatus* sub-sectors have the weakest trade connections among the BRI countries while *mechanical appliances* sub-sector is the sector with the highest count of links. Assortativity correlation coefficient is observed to be negative for each sub-sector, meaning that countries with high trade volumes tend to have relations with the countries with low trade volumes. Depending on the values of assortativity correlation coefficient which is closer to 0 rather than -1, it can be said that disassortativity is weak.

Table 2. Descriptive Network Statistics

Sectors	Nodes	Edges	Assortativity	Transitivity	Reciprocity	Density
Industrial robots	143	512	-0.16	0.31	0.24	0.03
Lifting machinery	143	1286	-0.1	0.34	0.23	0.06
Machines and apparatus	143	231	-0.11	0.17	0.14	0.01
Mechanical appliances	143	1406	-0.07	0.34	0.19	0.07
Welding machines	143	1297	-0.12	0.3	0.21	0.06

Source: Authors' calculation.

Reciprocity values indicate the share of mutual links in the network. *Machines and apparatus* sector has the lowest while *industrial robots* sector has the highest reciprocity value. Ruzzenenti et al. (2010) stated that this measure refers to economic interdependence of countries in the international trade network (Ruzzenenti et al., 2010, p. 1716). It can be observed that *industrial robots* sector has the highest interdependence while *machines and apparatus* sector has the lowest. When it comes to density coefficient, *mechanical appliances* sector has the highest value. *Lifting machines* and *welding machines* follow *mechanical appliances* sector. *Industrial robots* and *machines and apparatus* sectors have the lowest density.

Taken all these results together, it can be stated that there exists a few core countries and periphery countries as a result of disassortative structure. Polarization is more apparent in the *industrial robots* and *machines and apparatus* sectors of which density coefficients are the lowest. In Table 3, 'core-periphery fit' measure, that was developed by Borgatti and Everett (1999) to investigate core-periphery structure, is given.

Table 3. Core-Periphery Fit Correlation

Sectors	Cores	Periphery	Core/Periphery Fit
Industrial robots	CHN, KOR	Other countries	0.68
Lifting machinery	CHN, KOR	Other countries	0.7
Machines and apparatus	CHN, SGP	Other countries	0.81
Mechanical appliances	CHN, ITA, KOR	Other countries	0.68
Welding machines	CHN, KOR	Other countries	0.72

Source: Authors' calculation.

This measure, lies between 0 and 1, indicates to what extent the real-data network fits the network that has ideal core-periphery structure. The closer to 1 the coefficient is, the closer to ideal core-periphery structure the network structure is. Depending on Table 3, it can be said that the networks for each sub-sector fit to core-periphery structure significantly. According to the computations; core countries are China and South Korea in *industrial robots*, *lifting machines* and *welding machines* sub-sectors. The cores are China and Singapore in *machines and apparatus* sub-sector, while the cores are China, Italy and South Korea in *mechanical appliances* sub-sector.

Centrality measure enables us to analyze how central the countries are in the network. However, degree/strength distribution is another major property to investigate.

Table 4. Fitness to Power-Law Distribution

Sectors	Skewness	Kurtosis	α	p-value	KS statistics
Industrial robots	5.41	32	1.34	0.21	0.18
Lifting machinery	6.74	51.14	1.74	0.84	0.14
Machines and apparatus	8.3	71.9	1.35	0.66	0.3
Mechanical appliances	8.26	76.38	1.82	0.97	0.11
Welding machines	6.53	47.19	1.69	0.99	0.11

Source: Authors' calculation.

Positive skewness and kurtosis values for each sub-sector imply respectively that the distribution is right-skewed and that the distribution has heavy-tail. There exist also Kolmogorov-Smirnov test results in Table 4. The null hypothesis, implies the fitness to power-law distribution, cannot be rejected since the p-values are higher than 0.05, meaning that degree distribution for each sub-sector fits power-law. This result is also a proof of that the connectedness in the networks is heterogeneous. In another word, there is a few important hub countries and there are a lot of countries with low trade values in the networks. α can give some information about this heterogeneity. Depending on the explanation in methodology section, it can be said that *industrial robots sector* has the highest probability of having super-nodes while *mechanical apparatus sector* has the lowest probability. After detecting heterogeneity of connectedness, it is important to determine these hub countries. Table 5 represents the country rankings in terms of hub and authority centralities.

In Table 5, hub and authority centralities correspond to export and import centrality, respectively. Thus, hub centrality of a country refers to export impact of this country on the network. Similarly, authority centrality of a country refers to import impact of this country on the network. Country rankings are also given in table in terms of export and import to compare centrality measures. This comparison is important to reveal how differ centralities (as high degree indicators) from import/export shares (first degree indicators). The reason why centrality measures are stated as high degree indicators is that these measures take into consideration both the strength of a node and the strength of the nodes to which that investigated node has link. This is the mutually reinforcing relationship between countries, stated by Kleinberg (1999).

Firstly, it is observed that South Korea ranks first in terms of hub centrality although Italy ranks first in terms of export share in *industrial robots* network. South Korea is more important country in *industrial robot* network as a supplier than Italy although its export share is lower than Italy. The reason is that South Korea has connection with more important importers than Italy has. China, which ranks second in terms of export share, ranks fourth in terms of hub centrality. South Korea, which ranks third in terms of export share, ranks first in terms of hub centrality. Visualization of industrial robots network based on hub centralities is presented in Figure B.1 in Appendix B. When it comes to import, China ranks first in terms of both authority centrality and import share, meaning that China is the most important importer of the network since it has relations also with important exporters (hubs). Poland ranks second in pursuit of China in terms of authority centrality although it ranks fourth in terms of import share. This means that Poland has trade connections with more important exporter countries than Thailand and Vietnam have, although it has lower import share than Thailand and Vietnam have.

When it comes to *lifting machines* sub-sector; China ranks first with 26.7% export share and South Korea ranks second with 22.4% export share. However, South Korea ranks first in terms of hub centrality which is a high degree indicator. In other words, South Korea is more important supplier than China in *lifting machines* network, although China has the highest share in the export among the BRI countries. Besides, Singapore, which cannot take place among first-five countries in terms of export share, ranks third in pursuit of South Korea and China in terms of hub centrality. Visualization of lifting machines network based on hub centralities is presented in Figure B.2 in Appendix B. In terms of import, China ranks first for both indicators,

namely authority centrality and import share. Russia, which ranks second with 9% import share in pursuit of China, does not take place among the first-five countries in terms of authority centrality. Czechia, which does not take place among first-five countries in terms of import share, ranks third in terms of authority centrality, meaning that Czechia has trade connection with important exporters in *lifting machines* sub-sector.

Table 5. Hub and Authority Centralities

Industrial robots							
Rank	Hub centrality	Rank	Export share (%)	Rank	Authority centrality	Rank	Import share (%)
S. Korea	0.82	Italy	22.55	China	0.95	China	21.38
Italy	0.49	China	21.14	Poland	0.18	Thailand	12.07
Austria	0.26	S. Korea	15.49	Vietnam	0.11	Vietnam	6.54
China	0.11	Austria	13.9	Czechia	0.11	Poland	6.43
Singapore	0.08	Singapore	12.55	Thailand	0.1	S. Korea	6.34
Lifting Machinery							
Rank	Hub centrality	Rank	Export share (%)	Rank	Authority centrality	Rank	Import share (%)
S. Korea	0.98	China	26.73	China	0.94	China	15.43
China	0.12	S. Korea	22.36	Vietnam	0.24	Russia	8.99
Singapore	0.1	Italy	11.81	Czechia	0.11	Vietnam	7.25
Italy	0.07	Luxembourg	4.89	Hungary	0.1	Italy	5.38
Austria	0.07	Austria	4.49	Thailand	0.08	Thailand	4.89
Machines and apparatus							
Rank	Hub centrality	Rank	Export share (%)	Rank	Authority centrality	Rank	Import share (%)
S. Korea	0.74	Singapore	50.15	China	0.95	China	59.61
Singapore	0.67	S. Korea	38.33	S. Korea	0.3	S. Korea	20.23
Malaysia	0.04	China	6.2	Malaysia	0.06	Singapore	5.83
Thailand	0.01	Malaysia	4.24	Vietnam	0.04	Malaysia	4.34
China	0.01	Thailand	0.5	Phillipines	0.02	Vietnam	2.98
Mechanical appliances							
Rank	Hub centrality	Rank	Export share (%)	Rank	Authority centrality	Rank	Import share (%)
China	0.81	China	38.34	Russia	0.47	Russia	10.1
Italy	0.5	Italy	21.32	Vietnam	0.41	China	7.41
S. Korea	0.24	S. Korea	10.55	Poland	0.32	Vietnam	6.78
Poland	0.11	Czechia	3.86	Austria	0.27	Poland	6.28
Czechia	0.08	Austria	3.41	Italy	0.24	Austria	4.82
Welding machines							
Rank	Hub centrality	Rank	Export share (%)	Rank	Authority centrality	Rank	Import share (%)
S. Korea	0.97	China	27.44	China	0.74	China	14.47
China	0.18	S. Korea	24.97	Hungary	0.55	Hungary	9.01
Italy	0.14	Italy	13.4	Vietnam	0.33	Vietnam	8.45
Austria	0.11	Austria	10.8	Russia	0.1	Russia	7.96
Poland	0.02	Poland	3.4	Indonesia	0.06	Poland	5.84

Source: Authors' calculation.

In terms of export share of *machines and apparatus* sub-sector, Singapore ranks first with 50.2% and South Korea ranks second with 38.3%. However, South Korea has more impact than Singapore has in terms of hub centrality. This result indicates that South Korea is more important exporter than Singapore is due to its trade connections with important importer countries of the network. Visualization of machines and apparatus network based on hub centralities can be seen in Figure B.3 in Appendix B.

When *mechanical appliances* sub-sector is evaluated in terms of export, it is observed that there is not a significant distinction between first and high degree indicators. China, Italy and South Korea ranks first-three countries respectively for both of the indicators namely hub centrality and export share. Czechia, which ranks fourth with 3.9% export share, is replaced by Poland in terms of hub centrality and thus Czechia ranks fifth. Network visualization of mechanical appliances network based on hub centralities can be seen in Figure B.4 in Appendix B. In terms of import, Russia ranks first according to both high degree and first degree indicators. However, China which ranks second with 7.41% import share does not take place among first-five country ranking. In other words, Vietnam, Poland, Austria and Italy have trade connections with more important exporters in comparison with China in *mechanical appliances* trade network.

A similar evaluation also exists in *welding machines* network. China ranks second in pursuit of South Korea in terms of hub centrality, although it is the biggest exporter in terms of export share. This result also indicates that South Korea has more impact on the *welding machines* trade network as an exporter country than China has. Network visualization of welding machines network based on hub centralities is presented in Figure B.5 in Appendix B.

6. Conclusion

In the present study, we analyzed international trade of robot industries which has importance in today's AI era. This subject has recently become more crucial to examine especially in terms of post-pandemic world. Because, the world is believed to be a different place from the pre-pandemic term. Physical globalization is said to be replaced by digital globalization. Digitalization in national economies has become primary goal of the countries to recover the immediate impacts of the pandemic stem from lockdowns, quarantines and social distancing measures. All routines from consumption to production has started changing. Thus, use of industrial robots has gained importance for all economies.

When empirical results are evaluated generally, it can be concluded that there is heterogeneous connectedness and disassortative structure for each sub-sector. In other words, there is a few countries with high export volumes while there is a great number of countries with low export volumes. Besides, the countries with high export volumes tend to have trade connections with the countries with low export volumes, meaning that core-periphery structure exists. When the centralities are evaluated, it is observed that China, as the country that suggested the BRI, is an important importer rather than being an exporter in terms of the sectors in question. Because China ranks first in industrial robots, lifting machines, machines and apparatus and welding machines sectors in terms of authority centrality which is a high-degree indicator. In other words, China is the biggest importer of the network in mentioned sectors. When the results are evaluated in terms of export, hub centrality of South Korea is remarkable. South Korea ranks first in industrial robots, lifting machines, machines and apparatus and welding machines sub-sectors overwhelmingly. Singapore is another important exporter in pursuit of South Korea. Additionally, Italy and Austria are important exporters in industrial robots, lifting machines and welding machines sectors. Depending on these, it can be concluded that South Korea is the leader country as a supplier of high-tech robots to the BRI trade network. The mentioned European countries are also important actors that supplies high-tech robots to the BRI countries. Briefly, South Korea and Singapore are the hubs in Asia while Italy and Austria are the hubs in Europe. Thus, physical transportation connections within the BRI may help the BRI members to obtain industrial robots from these hubs and transform their production facilities. However,

this will bring some other obligations for these countries. Digitalization of economies is crucial for the post-pandemic era and it seems it is going to be crucial for a long time. BRI may ease the digitalization for the developing members of the BRI. However, these member countries should also transform their labor market properly. Labor force that is replaced by machines should be trained to comply with this new formation. In addition, education and training of labor force should also be planned hereafter in the long-run.

Finally, we presented two graphs in Appendix C for the countries mentioned above in order to indicate the importance of R&D. Share of R&D expenditure in GDP and R&D researcher per million are presented in Figure 6 and Figure 7, respectively. When remembering that China, which is called as the factory of the world, does not have power within these industrial robots sectors as an exporter, it becomes more meaningful that China also has a weak performance in both of the indicators in Appendix C. South Korea has the best performance in both indicators in Appendix C. Similarly, Austria and Singapore have also good performances. We can relate this performance of the countries with their hub centralities. That is to say, the countries, which invest in R&D, also have good performance in the export of industrial robots.

Thus, it can be concluded that the BRI countries, which are mostly developing countries and also enthusiastic to take place in such a new global value chain formation, should follow some policies. In the short-term, they need to transform their economies as proper to the ‘new normal’ to recover the immediate impacts of the pandemic, meaning that digitalization, accompanied with right labor market policies, should be applied. In the long-term, these countries should give more importance to research and development. Research and development will be the most crucial factor for the sustainability of the new normal.

References

- Baker & McKenzie International. (2020). *Beyond Covid-19: Supply chain resilience holds key to recover*.
<https://www.bakermckenzie.com/-/media/files/insight/publications/2020/04/covid19-global-economy.pdf>
- Balcı, Z. (2018, January). *Çin'in yeni 'İpek Yolu' projesi* [China's new 'Silk Road' project] (Research No. 52). İHH İnsani ve Sosyal Araştırmalar Merkezi.
<https://insamer.com/rsm/files/CININİPEKYOLUPROJESI.pdf>
- Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., & Hwang, D. U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4-5), 175-308. <https://doi.org/cjpbxz>
- Bocutoğlu, E. (2017). *Çin'in "Bir Kuşak-Bir Yol" projesinin ekonomik ve jeopolitik sonuçları üzerine düşünceler* [Considerations on the Economic and Geopolitical Consequences of China's "One Belt-One Road" Project]. In S. Sarı, J. Primbaev, A. H. Gencer, A. Turdalieva, & B. Tufaner (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Eurasian Economies* (pp. 265-270). <http://avekon.org/papers/1995.pdf>
- Boffa, M. (2018). *Trade linkages between the belt and road economies* (Working Paper No. 8423). World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/29768>
- Borgatti, S. P., & Everett, M. G. (1999). Models of core/periphery structures. *Social Networks*, 21(4), 375-395. [https://doi.org/10.1016/S0378-8733\(99\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0378-8733(99)00019-2)
- Bougheas, S., & Kirman, A. (2014). *Complex financial networks and systemic risk: A review* (Working Paper No. 14/04). Center for Finance, Credit and Macroeconomics. <https://www.nottingham.ac.uk/cfc/documents/papers/cfc-2014-04.pdf>
- Buckley, P. J. (2020). China's belt and road Initiative and the COVID-19 crisis. *Journal of International Business Policy*, 3(3), 311-314. <https://doi.org/gg7vc7>
- Bugaenko, A. (2020, May 13). Impact of the COVID-19 pandemic on the belt and road initiative in Central Asia. Central Asian Bureau for Analytical Reporting.
<https://cabar.asia/en/impact-of-the-covid-19-pandemic-on-the-belt-and-road-initiative-in-central-asia/>
- Chow, W. (2013, July 5). *An anatomy of the world trade network*. Hong Kong Economy. [https://www.hkeconomy.gov.hk/en/pdf/An%20Anatomy%20of%20the%20World%20Trade%20Network%20\(July%202013\).pdf](https://www.hkeconomy.gov.hk/en/pdf/An%20Anatomy%20of%20the%20World%20Trade%20Network%20(July%202013).pdf)
- Clauset A. (2011, September 1). *Lecture 3: Inference, models and simulation for complex systems* [Lecture Notes]. Santa Fe Institute.
http://tuvalu.santafe.edu/~aaronc/courses/7000/csci7000-001_2011_L3.pdf
- Csardi, G., & Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems*, 1695.
<https://cran.r-project.org/web/packages/igraph/index.html>
- Csermely, P., London A., Wu, L.Y., & Uzzi, B. (2013). Structure and dynamics of core/periphery networks. *Journal of Complex Networks*, 1(2), 93-123.
<https://doi.org/10.1093/comnet/cnt016>
- Decarlo, L.T. (1997). On the meaning and the use of kurtosis. *Psychological Methods*, 2(3), 292-307.
- Del Rio-Chanona, R.M., Mealy, P., Pichler, A., Lafond, F., & Farmer, J.D. (2020, April 17). Supply and demand shocks in the COVID-19 pandemic: An industry and occupation perspective. *Covid Economics*, 6, 65-103.

- Estrada, E. (2015). Introduction to complex networks: Structure and dynamics. In J. Banasiak & M. Mokhtar-Kharroubi (Eds.), *Evolutionary equations with applications in natural sciences* (pp. 93-131). Springer International Publishing.
- Fu, X. M., Chen, H.X., & Xue, Z.K. (2018). Construction of the belt and road trade cooperation network from the multi-distances perspective. *Sustainability*, 10(5), 1439. <https://doi.org/10.3390/su10051439>
- Fuge, M., Tee, K., Agogino, A., & Maton, N. (2014). Analysis of collaborative design networks: A case study of openideo. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 14(2), p. 021009. <https://doi.org/10.1115/1.4026510>
- Hein, O., Schwind, M., & König, W. (2006). Scale-free networks – the impact of fat tailed degree distribution on diffusion and communication processes. *Wirtschaftsinformatik*, 48(4), 267-275. <https://doi.org/10.1007/s11576-006-0058-2>
- Hippel, P. (2011). Skewness. In M. Lovric (Ed.), *International Encyclopedia of Statistical Science*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_525
- Karagöl, E. T. (2017, May). *Modern İpek Yolu projesi* [Modern Silk Road project] (Rapor No. 174). Siyaset, Ekonomi ve Toplum Araştırmaları Vakfı Perspektif. http://www.setav.org/assets/uploads/2017/05/174_Perspektif.pdf
- Kleinberg, J. M. (1999). Authoritative sources in a hyperlinked environment. *Journal of the ACM (JACM)*, 46(5), 604-632. <https://doi.org/10.1145/324133.324140>
- Kolaczyk, E. D. (2009). *Statistical analysis of network data: Methods and models*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-88146-1>
- Li, Y., Peng, Y., Luo, J., Cheng, Y., & Veglianti, E. (2019). Spatial-temporal variation characteristics and evolution of the global industrial robot trade: A complex network analysis. *PLoS ONE*, 14(9), Article e0222785. <https://doi.org/ghr3b6>
- Liu, Z., Tao, W., Sonn, Jung W., & Chen, W. (2018). The structure and evolution of trade relations between countries along the belt and road. *Journal of Geographical Sciences*, 28(9), 1233-1248. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1522-9>
- Machanda, S., Kaleem, H., & Schlorke, S. (2020). *AI investments allow emerging markets to develop and expand sophisticated manufacturing capabilities* (Issue Brief No. 87). International Finance Corporation. <http://hdl.handle.net/10986/34851>
- Newman, M. E. J. (2003). Mixing patterns in networks. *Physical Review E*, 67(2), Article 026126. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.026126>
- Newman, M. E. J. (2008). The physics of networks. *Physics Today*, 61(11), 33-38. <https://doi.org/10.1063/1.3027989>
- Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An introduction*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199206650.001.0001>
- OECD. (2009). *Applications of complexity science for public policy- new tools for finding unanticipated consequences and unrealized opportunities*. <http://www.oecd.org/science/inno/43891980.pdf>
- OECD. (2020, June 3). *COVID-19 and global value chains: Policy options to build more resilient production networks* [Policy Response]. <http://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/covid-19-and-global-value-chains-policy-options-to-build-more-resilient-production-networks-04934ef4/>
- Reichardt, J. (2009). *Introduction to complex networks*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-87833-9>

- Ruzzenenti, F., Garlaschelli, D., & Basosi, R. (2010). Complex networks and symmetry II: Reciprocity and evolution of world trade. *Symmetry*, 2(3), 1710-1744. <https://doi.org/10.3390/sym2031710>
- Smith, M., & Gorgoni, S. (2018). Network analysis and the study of international trade and investment. In S. Gorgoni, A. Amighini, & M. Smith (Eds.), *Networks of international trade and investment* (pp. 25-48). Vernon Press. <https://vernonpress.com/index.php/file/6079/5064e8114cb473f8eed60063843ec28e/1528872547.pdf>
- Song, Z., Che, S., & Yang, Y. (2018). The trade network of the belt and road initiative and its topological relationship to the global trade network. *Journal of Geographical Sciences*, 28(9), 1249-1262. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1523-8>
- Strange, R. (2020). The 2020 Covid-19 pandemic and global value chains. *Journal of Industrial and Business Economics*, 47(3), 455-465. <https://doi.org/10.1007/s40812-020-00162-x>
- Toroczkai, Z. (2005). Complex networks: The challenge of interaction topology. *Los Alamos Science*, 29, 94-109. <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-04-7345>
- Wisskirchen, G., Biacabe, B.T, Bormann, U., Muntz, A., Niehaus, G., Soler, G. J., & von Brauchitsch, B. (2017, April 4). *Artificial intelligence and robotics and their impact on the workplace* [Report]. IBA Global Employment Institute. <https://www.ibanet.org/Article/NewDetail.aspx?ArticleUid=012a3473-007f-4519-827c-7da56d7e3509>
- World Bank. (2020). Research and development expenditure. Retrieved January 2, 2020, from, <https://data.worldbank.org/indicator/GB.XPD.RSDV.GD.ZS>

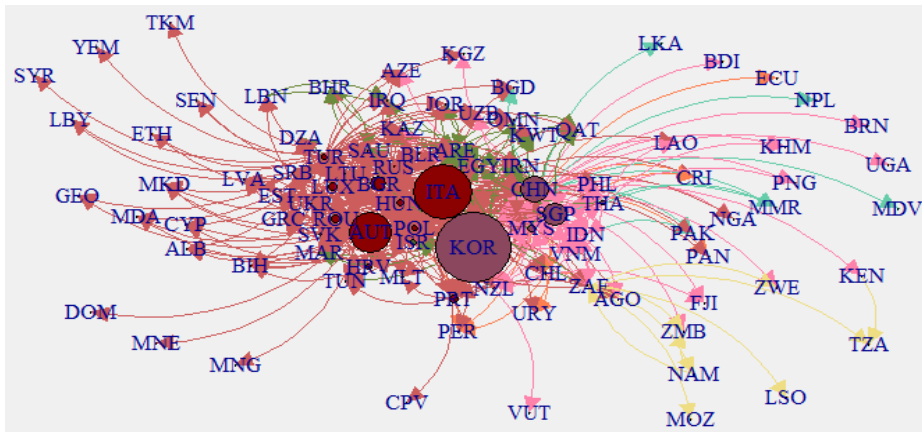
Appendices

Appendix A. The BRI Countries (with 3-digit country codes)

Afghanistan (AFG), Angola (AGO), Albania (ALB), United Arab Emirates (ARE), Armenia (ARM), Antigua and Barbuda (ATG), Austria (AUT), Azerbaijan (AZE), Burundi (BDI), Benin (BEN), Bangladesh (BGD), Bulgaria (BGR), Bahrain (BHR), Bosnia-Herzegovina (BIH), Belarus (BLR), Bolivia (BOL), Barbados (BRB), Brunei Darussalam (BRN), Bhutan (BTN), Chile (CHL), China (CHN), Cote d'Ivoire (CIV), Cameroon (CMR), Congo (COG), Cook Islands (COK), Comoros (COM), Cabo Verde (CPV), Croatia (HRV), Cuba (CUB), Cyprus (CYP), Czechia (CZE), Djibouti (DJI), Dominica (DMA), Dominican Republic (DOM), Algeria (DZA), Ecuador (ECU), Egypt (EGY), Estonia (EST), Ethiopia (ETH), Fiji (FJI), FS Micronesia (FSM), Gabon (GAB), Georgia (GEO), Ghana (GHA), Guinea (GIN), Gambia (GMB), Equatorial Guinea (GNQ), Greece (GRC), Grenada (GRD), Guyana (GUY), Costa Rica (CRI), Hungary (HUN), Indonesia (IDN), Iran (IRN), Iraq (IRQ), Israel (ISR), Italy (ITA), Jamaica (JAM), Jordan (JOR), Kazakhstan (KAZ), Kenya (KEN), Kyrgyzstan (KGZ), Cambodia (KHM), South Korea (KOR), Kuwait (KWT), Laos (LAO), Lebanon (LBN), Liberia (LBR), Libya (LBY), Sri Lanka (LKA), Lesotho (LSO), Lithuania (LTU), Latvia (LVA), Luxembourg (LUX), Morocco (MAR), Moldova (MDA), Madagascar (MDG), Maldives (MDV), Macedonia (MKD), Mali (MLI), Malta (MLT), Myanmar (MMR), Montenegro (MNE), Mongolia (MNG), Mozambique (MOZ), Mauritania (MRT), Malaysia (MYS), Namibia (NAM), Niger (NER), Nigeria (NGA), Niue (NIU), Nepal (NPL), New Zealand (NZL), Oman (OMN), Pakistan (PAK), Panama (PAN), Peru (PER), Philippines (PHL), Papua New Guinea (PNG), Poland (POL), Portugal (PRT), Palestine (PSE), Qatar (QAT), Romania (ROU), Russia (RUS), Rwanda (RWA), Saudi Arabia (SAU), Sudan (SDN), Senegal (SEN), Singapore (SGP), Solomon Islands (SLB), Sierra Leone (SLE), El Salvador (SLV), Somali (SOM), Serbia (SRB), South Sudan (SSD), Suriname (SUR), Slovakia (SVK), Seychelles (SYC), Syria (SYR), Chad (TCD), Togo (TGO), Thailand (THA), Tajikistan (TJK), Turkmenistan (TKM), Timor Leste (TLS), Tonga (TON), Trinidad and Tobago (TTO), Tunus (TUN), Turkey (TUR), Tanzania (TZA), Uganda (UGA), Ukraine (UKR), Uruguay (URY), Uzbekistan (UZB), Venezuela (VEN), Vietnam (VNM), Vanuatu (VUT), Samoa (WSM), Yemen (YEM), South Africa (ZAF), Zambia (ZMB), Zimbabwe (ZWE)

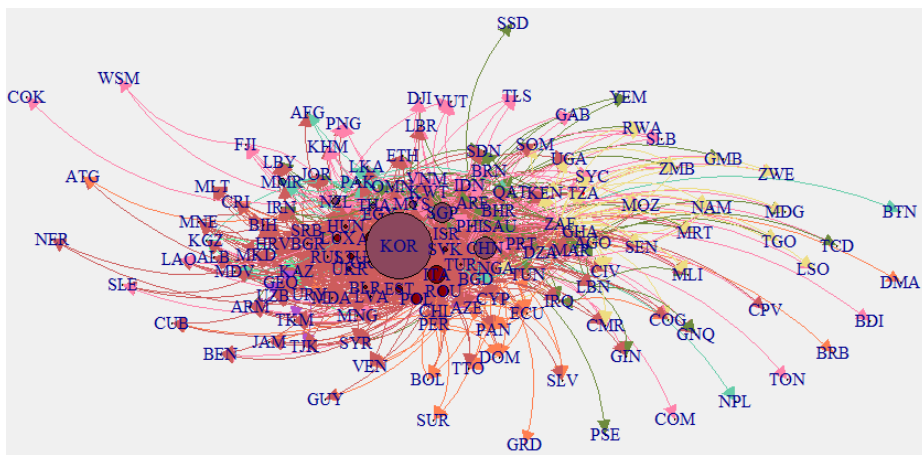
Appendix B. Network Visualizations According to Hub Centralities

Figure B.1. Industrial Robots



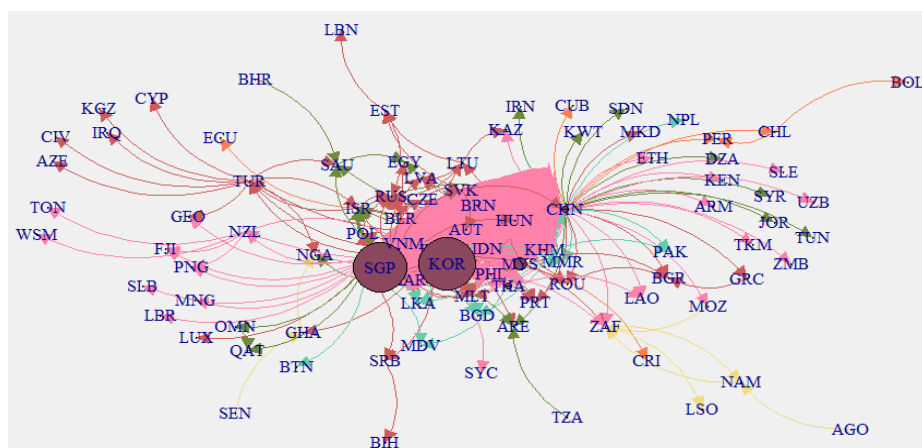
Source: Authors' draw (The data have been obtained from the UN Comtrade)

Figure B.2. Lifting Machinery



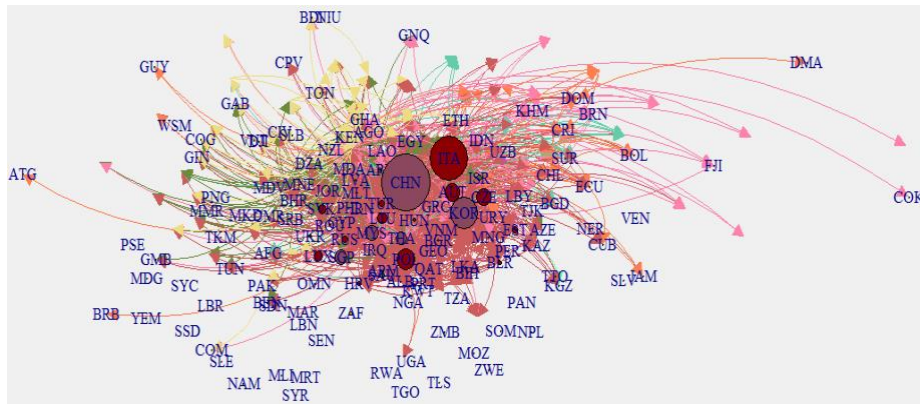
Source: Authors' draw (The data have been obtained from the UN Comtrade)

Figure B.3. Machines and Apparatus



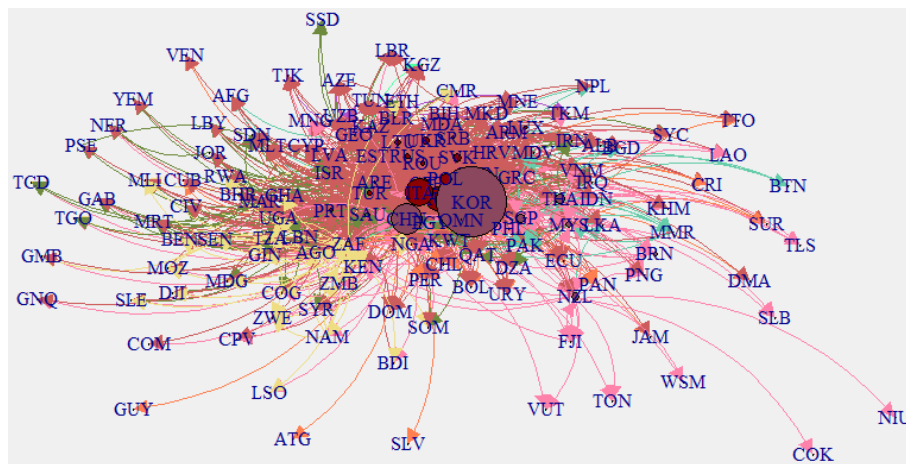
Source: Authors' draw (The data have been obtained from the UN Comtrade)

Figure B.4. Mechanical Appliances



Source: Authors' draw (The data have been obtained from the UN Comtrade)

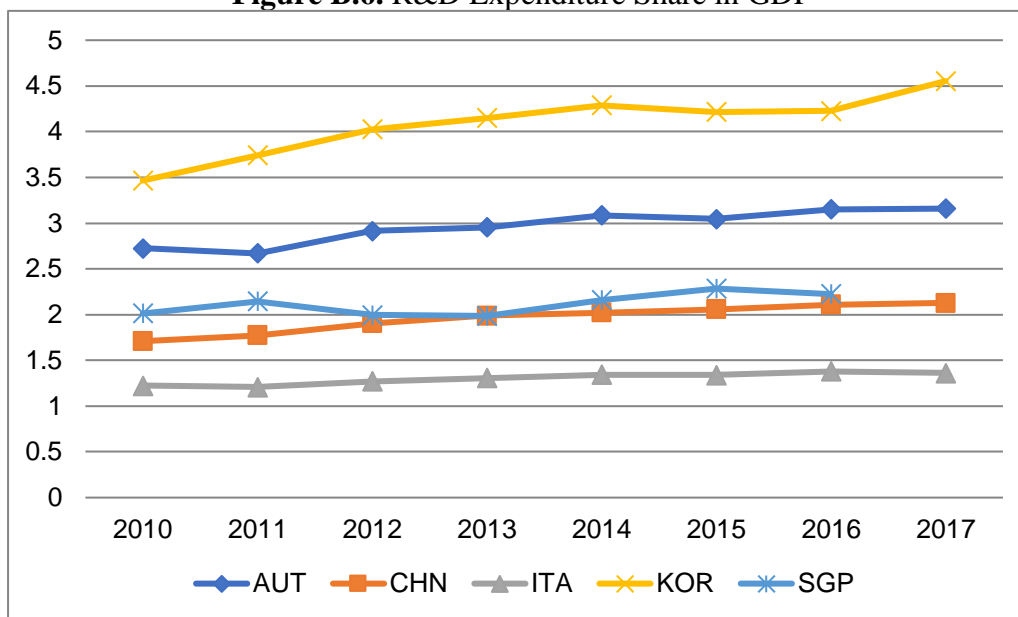
Figure B.5. Welding Machines



Source: Authors' draw (The data have been obtained from the UN Comtrade)

Appendix C. R&D Indicators

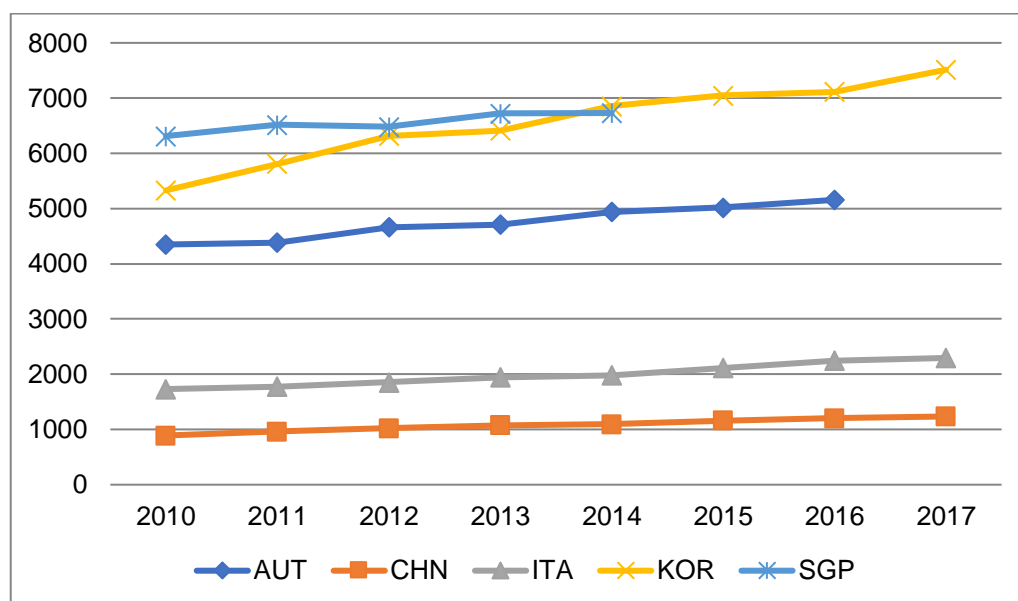
Figure B.6. R&D Expenditure Share in GDP



Source: World Bank (2020)

Note: 2017 data for Singapore was not available.

Figure B.7. R&D Researchers per Million



Source: World Bank (2020)

Note: 2017 data for Austria and the data from 2015 to 2017 for Singapore were not available.



Kompleks Sistemler ve Veri Bilimi

Complex Systems and Data Science

Uzay ÇETİN^a

Araştırma Makalesi/Research Article

Başvuru/Received: 30.11.2020; Kabul/Accepted: 29.12.2020

ÖZ

Kompleks Sistemler, kendi kendini örgütleyebilen ve değişen şartlara uyum gösterebilen organik sistemlerdir. Kompleks bir sistem, nispeten basit kuralları takip eden çok sayıda etmenin birbiriyle olan yoğun etkileşimi neticesinde ortaya çıkar. Burada asıl olan etmenler değil, onlar arasındaki ilişkililerdir. Kompleks sistem bilimsel bakış açısında yarattığı paradigma değişiminin, çok daha fazlasını derin öğrenme modelleri mühendislik problemlerinin çözümünde yaratmıştır. Katmanlı bir yapıya sahip olan veriye aç bu modellerde, ilk katmanlar en basit öznitelikleri otomatik bir biçimde çıkarırken, sonraki katmanlar hiyerarşik bir biçimde basitten daha karmaşığa doğru üst seviye öznitelikleri çıkarabilme yeteneğine sahiptir. Özel derin öğrenme algoritmaları zamansal ve uzamsal ilişkileri yakalayabilmektedir. Bu çalışmanın amacı veri bilimi, yapay öğrenme ve karmaşık sistemler yaklaşımlarının evreni anlamak için bize birbirini tamamlayan bakış açıları kazandıracağını vurgulamaktır.

Anahtar kelimeler: kompleks sistemler, veri bilimi, derin öğrenme, anomali tespiti

ABSTRACT

Complex Systems are organic systems that can self-organize themselves and adapt to changing conditions. A complex system results from a huge amount of interactions of many agents following simple rules. It is not the agents that are essential, but the relationships between them. Deep learning models created a much greater paradigm change in solving engineering problems than the one created by complex systems in science. Deep learning models are composed of a layered structure. The first layers automatically learn the simplest features, while the next layers have the ability to extract high-level features in a hierarchical manner from simple to more complex. Special deep learning algorithms can even capture temporal and spatial relationships. The purpose of this article is to emphasize the fact that data science, machine learning and complex systems will provide us a complementary perspective to study our universe.

Keywords: complex systems, data science, deep learning, anomaly detection

^a Bilgi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, uzay.cetin@bilgi.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0784-253X

1. Giriş

Bilgisayar mühendisliğinin temelinde yatan algoritmik yaklaşıma göre, tarif edebildiğimiz her şeyi programlayabiliriz. Peki ya tarif edemediğimiz şeyler? Canlılığı nasıl tanımlarsınız? Bilinç nedir? Kompleks sistem bilim dalının temellerinde yatan ana fikir, “*bütün, parçaların toplamından daha fazladır*” ilkesidir. Bu parçalarda bulunmayan bir özelliğin, bütünde *zuhur* edebileceğini ifade eder. Örneğin tek başına bir karınca zeki değildir, ama bir bütün halinde koloni en kısa yol problemini çözecek zekâ belirtisini gösterir. Yapay öğrenmenin başarısının arkasında ise “*bol miktardaki örneklerden hatayı minimize eden hipotezi bulmak*” yatar. Bu sayede, bir sürecin nasıl oluştuğuna dair elimizde algoritma olmasa bile, elimizdeki örnek çıktı verileri ile tahminimiz arasındaki hatayı minimize eden parametreleri bularak, tarifini bilemediğimiz fakat kolayca yapabildiğimiz yüz tanıma, ses tanıma gibi işleri bilgisayarlara yaptırabiliriz. Bu çalışma, veri bilimi, yapay zekâ ve kompleks sistemler bilim dallarının bir arada ele alınması gerektiğini ve yapay zekaya dair çalışmaların geleceğinde, kompleks sistem yaklaşımının büyük bir rol üstleneceğini iddia eder. Denetimsiz bir yapay sinir ağı çeşidi olan kendi kendine örgütlenebilen haritalar özelinde etmen temelli modellemeye olan benzerliğine vurgu yapılmış ve anomali tespiti gibi çeşitli alanlardaki uygulamaları incelenmiştir. Bu çalışmada kompleks sistemler ve karmaşık sistemler aynı anlama gelecek şekilde kullanılmıştır.

Yapay zekaya dair ilk çalışmalar başladığında, yapay zekâ ile ilgili çalışmaların insan zekasının ne olduğuna dair bizleri aydınlatacağını sanıyorduk. Bugün geline nokta, araştırmacılar bu idealden büyük ölçüde vaz geçmiş görünüyorlar. Doğadan esinlenen, insan gibi düşünen ve insan gibi davranan modeller yerine rasyonel düşünen ve rasyonel davranan modellere doğru bir eğilim olduğunu görmekteyiz (Russell & Norvig, 2009). Zor, karmaşık fakat evrenin işleyişi hakkında ipucu veren yaklaşımlar yerine, evrenin işleyişinden bağımsız, basit ama işe yarayan indirgemeci yaklaşımlar ağırlıklı olarak tercih edilmektedir. Araştırmacılar olarak, bir an önce sonuç elde etmeye fazlaca odaklanmanın doğal sonucu olarak bu noktadayız. Ama evreni anlamak istiyorsak, farklı bir bakış açısı geliştirmek zorundayız.

1.1. Evrene Bakış Açısı

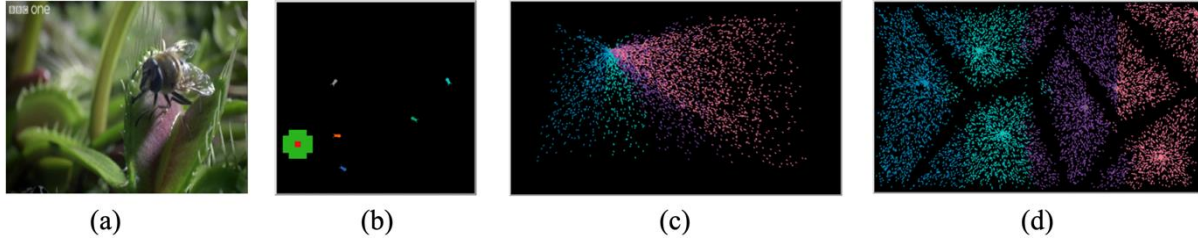
Seth Lloyd, 2006 yılında basılmış *Programming the Universe* adlı kitabında şöyle söylüyor: “Evrendeki her atom, her parçacık bilgi kaydeder. Bu parçacıklar arasındaki her bir çarpışma, ne kadar küçük olursa olsun, meydana gelen her bir etkileşim sistematik bir biçimde o bilginin işlenmesidir.” Buradaki iki kritik nokta, *bilginin kaydı* ve *bilginin işlenmesidir*. Bilindiği üzere bunlar modern programlamanın temel unsurlarıdır. Demek ki, sadece bilgisayarlar bilgi depolayan ve o bilgiyi işleyen aygıtlar değildir. *Evrenin kendisi de baştan sona bilgi işleyen devasa bir sistemdir*. Bu bakış açısı bizi doğal olarak, *düşüncenin* de bir bilgi sayım işlemi olduğu sonucuna götürür. Düşüncenin bir bilgi sayım işlemi olduğuna dair inancımız olmasaydı, yapay zekâ çalışmaları belki de hiç başlamazdı. Daha fazla ilerlemeden, doğadaki bilgi-sayım bir örnek verelim. Şekil 1 (a)’da görülen bitki Venus-flytrap adıyla bilinir (Attenborough, 2009).

Bu bitki, sinekleri cezbeden bir salgı üretir ve içinde bulunan tetikleyici tele bir sinek 20 saniye içinde iki kez dokunduğunda birden kapanır. Diğer bir ifadeyle bu bitki, beyni olmamasına rağmen, bilgi sayım yapar. Şekil 1 (b)’de, bu bitkinin işleyişini taklit eden bir simülasyonu görmekteyiz. Bu simülasyonu NetLogo dili ile yazdık. Sistemin nasıl işlediğini, yani algoritmasını bildiğimiz için, bitki ve sineğin simülasyonunu rahatça yapabiliyoruz, bakınız Şekil 2.

Simülasyonun kuralları,

- Böcekler en yakın cezbedici noktaya gider.
- Eğer böcek bitkinin merkezindeki tele dokunursa,
 - Bitki kapanır ve böceği sindirir!

Şekil 1. (a) Venus-Flytrap Bitkisi (b) Bitkinin ve Birkaç Böceğin Basit Simülasyonu (c) Böcek Sayısı Arttırılarak Yapılan Simülasyon (d) Hem Böcek Hem Bitki Sayısı Arttırılarak Yapılan Simülasyon.



Dikkat ederseniz burada, basitleştirmelere gittik. Modellemenin başarısı, önemli olan noktaları seçmek kadar önemsiz olanları da göz ardı etmeye dayanır. Gerçek o kadar karmaşıktır ki, seçici bir şekilde basitleştirmeye gitmek zorunludur. Bilgisayar temelli simülasyon, bize farklı senaryoları denemek için muhteşem bir laboratuvar imkânı sunar. Böcek sayısını arttırsak ne olur acaba? Şekil 1 (c)'de görüldüğü gibi simülasyonda, bitki karadeliği andırır hale gelir ve bütün böcekleri yutar. Peki hem böcek sayısını arttırır hem de bitki sayısını arttırsak ne olur? Şekil 1 (d)'de görüldüğü gibi, böcekler tıpkı yapay öğrenmede sıkça kullanılan K-Means kümeleme algoritmasını andıracak bir biçimde en yakın bitki merkezlerine doğru yönelir (Jain, 2010). Belirli bir süre için, merkez noktası farklı bitkiler olan kümelenmeler ortaya çıkar. Oldukça basit bir modelin, ufak değişikliklerle bu kadar zengin sonuçlar doğurması şaşırtıcı derecede güzeldir. Yeri gelmişken belirtmekte fayda var, teleskop astronomiyi, mikroskop biyoloji temellerinden değiştirdi. Bilgisayar ve simülasyon ise tüm bilimlere kökünden değiştirmektedir. Alternatif senaryoları deneme gücü, simülasyonun en önemli artlarından biridir.

2. Doğal Zekanın Simülasyonu Olarak Yapay Zekâ

John McCarthy 1956'da Dartmouth Üniversitesinde 10 kişilik bir ekip ile 2 aylık bir çalıştay düzenledi. Bu çalıştayda ilk kez yapay zekâ adı kullanılmış ve yapay zekâ bilimi resmen doğmuştur. Burs başvurusunda, McCarthy yapay zekâyı şöyle tanımlamıştır: “Bu araştırma, zekâ gerektiren öğrenmenin tüm yönleri ile birlikte bir makine tarafından *simüle* edilebileceği varsayımından yola çıkar.”

Daha yapay zekanın, dünyaya ilk adımlarını atışında bile simülasyon kendini hissettirir. Amaç insan zekasının bir benzerini makinelerde ortaya çıkarmaktır. Yapay zekâ alanındaki ilk çalışma, şaşırtıcı bir biçimde bugün de yapay zekâ alanını neredeyse tamamıyla etkisi altına almış olan, yapay sinir ağlarına dair bir çalışmadır. 1943 yılında McCulloch ve Pitts, beyin yapısından esinlenerek, ilk yapay sinir hücresi modelinin temellerini atmışlardır. Ne var ki, 1969 yılında Minsky ve Papert, Perceptrons adlı kitaplarında bu sinir ağı modelinin sadece çok basit bazı problemler dışında kullanışlı olmadığını göstermiştir. Rumelhart ve arkadaşlarının 1980'lerde Nature dergisinde yayınlanan makalelerinde ortaya koydukları, neredeyse tamamen türevde zincir kuralına dayanan, geri-yayılım algoritmasına kadar yapay sinir ağ modelleri rafa kaldırılmıştır (Rumelhart vd., 1986). Bugün ise, rüzgâr tamamen tersine dönmüş ve yapay sinir ağlarındaki katman sayısı arttırılarak elde edilen derin öğrenme yöntemi, yapay zekâ dünyasını adeta kasıp kavurmaya başlamıştır. Bugün artık yapay öğrenme ve derin öğrenmeyi eş anlamlı kullanan araştırmacılara rastlamak mümkündür.

Yapay sinir ağları, katmanlı bir yapıya sahiptir. Girdi katmanındaki nöron sayısı, gözlem verisindeki özellik sayısına eşittir. Çıktı katmanındaki nöron sayısı ise, çıktı verisinin boyutu kadardır. Ara katmanlar da ise, gözlem verileri hakkında soyutlama yapabilen nöronlar bulunur. Ağın mimarisinde belirli tasarım kuralları sabittir. Örneğin aynı katman içindeki nöronlar birbiriyle bağlantı kuramaz ve ileri katmanlardaki nöronlardan önceki katmanlardaki nöronlara (genelde) geriye doğru yönlü bağlantı kurulmaz. Bu kurallar, geri-yayılım algoritmasındaki

hatanın türev alınarak geriye doğru yayılmasını kolaylaştırmak içindir. Yapay sinir ağları da tıpkı insanlar gibi tecrübe olarak nitelendirebileceğimiz örnek verilerden öğrenir.

Başlangıç,

- Nöronlar arasındaki bağlantı ağırlık değerleri modelin parametreleridir. Gelişigüzel parametrelerle başlanır.

Her örnek girdi-çıkı çifti için,

- İleri yayılım
 - Her nöron önceki katmandan gelen girdilerin ağırlıklı toplamını alır.
 - Bu toplam, doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonuna (sigmoid vb.) sokularak ileri katmandaki nöronlara iletilir. Böylece veri içindeki doğrusal olmayan karmaşık ilişkiler yakalanabilir.
- Hata hesabı
 - İleri yayılım sona erdiğinde, çıktı katmanında üretilen değer ile gerçek değer arasındaki fark türevi alınabilir konveks bir fonksiyona verilir. Fonksiyonun çıktı değeri hata olarak belirlenir.
- Geri Yayılım
 - Nöronlarda gerçekleştirilen aktivasyon ve ağırlıklı-toplam işlemlerinin ayrıca bağlantı ağırlıklarının genel hataya olan katkıları türevde zincir kuralı ile, çıktı katmanından girdi katmanına geriye doğru, tek tek hesaplanır.
 - Hatayı minimize eden en iyi parametreleri bulmak için eğimle (gradyan) iniş algoritması temel alan bir optimizasyon algoritması kullanılır. En basit haliyle, parametreler türevin tersi yönde, türevle orantılı olarak, güncellenerek hatayı minimize eden parametre değerleri hesaplanır.

Yukarıdaki işlemler, hata belirli bir değerin altında kalıncaya dek tekrar edilir. Yapay sinir ağları, ilk kez gören araştırmacılara zor görünebilir fakat temelde yapılan şey, matris çarpımları ve türev alma gibi işlemlerin tekrarına dayanır. Çoğu deneyimli araştırmacı ise, bu kadar basit bir modelin, problem çözmede bu kadar başarılı olabilmemesine şaşırıldıklarını itiraf etmektedirler. Bu başarının arkasında yatanı anlamak için, karmaşık sistemler bakış açısının oldukça faydalı olacağını düşünüyoruz. Sistem düşüncesine geçmeden önce, eğimle (gradyan) iniş algoritmasının ya da geri yayılım algoritmasının başarısındaki simülasyonun rolünü vurgulamak istiyoruz. Bu algoritmalar, analitik çözümün doğrudan bulunamadığı durumda kullanılan yinelemeli algoritmalarlardır. Her yinelemede, ağırlıklar türevin rehberliğinde güncellenir. Dolayısıyla bu algoritmalar gücünü matematiğin alanına giren kalkülüs ve simülasyonun alanına giren yinelemenin iş birliğinden alır.

2.1. Derin Öğrenme Devrimi

Yapay Sinir Ağları katmanlı bir yapıya sahiptir. Katman sayısı fazla olduğu derin bir mimari kullanan yapay sinir ağları ile yapılan yapay öğrenme işlemine derin öğrenme adı verilir. Yapay Öğrenme kavramı, bilgisayarların bir problemi çözmekte örnek veri ya da deneyimi kullanacak biçimde programlanması olarak tanımlanmıştır (Alpaydın, 2011). Herbert Simon'a göre bir problemi çözmek büyük ölçüde problemi doğru temsil etmek ile ilgilidir. Simon'a göre problem doğru temsil edilebilirse, çözüm de görünür hale gelmiş olur. Yapay Öğrenme her ne kadar deneyim yani veri üzerinden örüntü ve kuralları bulabilse de problemin doğru temsili için insana ihtiyaç duyar. Yapay öğrenmenin bir alt kolu olan Derin Öğrenme ise farklı olarak, problemin doğru temsili kendisi bulabilir. Bu yapay öğrenme çalışmalarında çok büyük bir dönüşüme neden olmuştur. Derin öğrenme öncesinde doğal dil işleme çalışan bir araştırmacının, görüntü işleme çalışması pek mümkün değildi. Öznitelik çıkarımı ya da doğru temsil problemi araştırmacılar açısından bir tür bariyer işlevi görüyordu. Çünkü bir disipline özel bilginin transferi oldukça zahmetliydi. Derin öğrenme bu bariyeri ortadan kaldırdı.

Derin öğrenmedeki katmanlı yapıda, ilk katmanlar en basit öznelikleri otomatik bir biçimde çıkarırken, sonraki katmanlar hiyerarşik bir biçimde basitten daha karmaşığa doğru üst seviye öznelikleri çıkarabiliyor. Özel bir yapay sinir ağı olan, Evrişimsel Sinir Ağları (CNN) ile yapılan görüntü işlemi örneğinde bu durum en net şekilde görülmektedir. Örneğin yüz tanıma probleminde, ilk katmanlar kenar, çizgi gibi basit şekilleri algılayarak sonraki katmanlar göz, burun, dudak gibi formları algılayabiliyor ve en sondaki katman bunları birleşimi olan yüzü seçebiliyor.

Evrişimsel Sinir Ağları (CNN) piksellerden oluşan bir resimdeki, piksellerin komşuları ile ilgili alansal ilişkilerini otomatik olarak yakalama üzerine kuruludur. Özellikle doğal İşleme alanında kullanılan, Yinelemeli Sinir Ağları (RNN)'ler ise bir kelimenin ne olduğunu, öncesinde gelen kelimelerden çıkarır. Genel olarak CNN'ler alansal ya da mekânsal komşuluk ilişkisini kullanırken, RNN'ler zamansal sekans ilişkisini kullanır. Bir sonraki bölümde daha detaylı değineceğimiz Kompleks Sistem yaklaşımının temelinde parçalardan ziyade, parçalar arasındaki ilişkiler yatar. Dolayısıyla Kompleks Sistem ve Yapay Öğrenme tahmin edilenin çok ötesinde ortaklıklara sahiptir.

2.2. Verinin Önemi

Daha önceleri karmaşık ve zor problemleri yapay öğrenme ile bilgisayarlara çözdürmek için yepyeni algoritmik yaklaşımlara ihtiyaç duyduğumuza inanıyorduk. Gelişmeler gösterdi ki yepyeni bir yaklaşımdan ziyade, büyük miktarlardaki veriyi halihazırda elimizde olan modellere doğru şekilde dahil etmek başarımızı oldukça arttırabiliyor (Çetin, 2020). Özellikle Derin Öğrenme modelleri veriye aç modellerdir. Ne kadar veri artarsa, başarı da o kadar artar. İşte tam da bu nedenle, yeni çağın petrolü veridir. Veri, sinyal artı gürültü olarak düşünülmelidir. Ham veri içindeki değerli ve anlamlı bilgiye sinyal, geri kalana ise gürültü deriz. Önemli olan, veri işleme ile veriyi gürültüden temizleyerek değerli sinyali elde edebilmektir (Çetin & Gündoğmuş, 2019). Bugünün en modern derin öğrenme mimarileri bile öncelikli olarak ön eğitim dediğimiz aşamada daha fazla eğitim verisine ihtiyaç duyar. Fakat ancak ince ayar ile adlandırılan ikinci aşamada, eğitilmiş model az veri ile yeni bir görevi tamamlayabilir hale gelir. Ön eğitim aşamasındakinden sonra gelen bu ince ayar aşaması, bir nevi algoritmalar arası öğrenim aktarımıdır.

3. Sistem Düşüncesi

En basit tanımıyla, birbiriyle ilişkide olan elemanlar topluluğuna sistem denir. Sistemleri doğrusal sistemler ve doğrusal olmayan sistemler diye ikiye ayırmak mümkündür. Doğrusal bir şekilde bir araya gelmiş parçaların oluşturduğu sistemlere Türkçe'de dizge diyebiliriz. Fakat, doğrusal olmayan yani karmaşık ya da kompleks bir biçimde bir araya gelmiş parçalar bütününe *birge* demek gerektiğini düşünüyoruz.

Birge: Belirli bir amaca ulaşmak için, *özel bir biçimde*, bir araya gelen çok sayıdaki bileşenin oluşturduğu bütüne birge denir.

Zuhur: Sistemi oluşturan parçaların karşılıklı etkileşimi ile ortaya çıkan artı güç/iş yapabilme yeteneği.

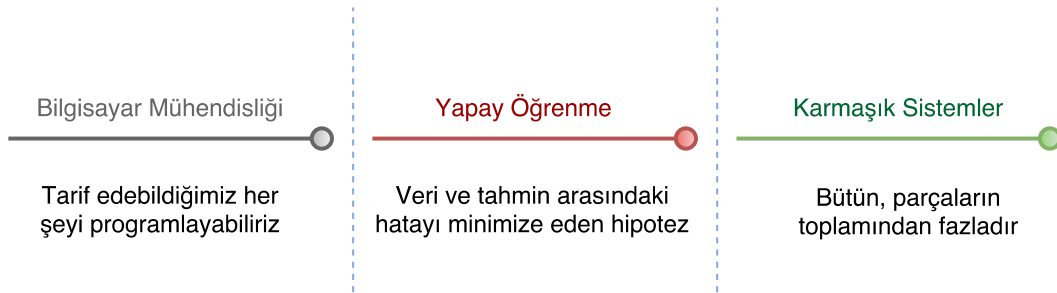
Doğrusal sistemler, $f(ax + by) = af(x) + bf(y)$ şeklinde ifade edilebilir. Doğrusal bir sistemde, bütünü çözmek ile bütünü oluşturan parçaları tek tek çözmek aynı şeydir. Dolayısıyla doğrusal sistemler anlaşılması kolay, tahmin edilebilir sistemlerdir. Girdideki ufak bir değişim, çıktıda da ufak bir değişime neden olur. Tüm bir kalkülüs bu gözleme dayanır. Ne var ki, doğrusal olmayan bir sistemde girdideki değişim, çıktıda beklenmedik değişimlere yol açabilir. Espriyle karışık bir iki örnek vermek gerekirse, bir kediyi köşeye sıkıştırırsanız kaçmaya çalışacaktır. Daha çok üzerine giderseniz, daha çok kaçacaktır. Fakat bir noktadan sonra, eğer sıkıştırmaya devam ederseniz, kaçmak yerine size saldırır. Kedileri tanımayanlar için bu çok şaşırtıcı olabilir. Şimdi de bir hükümdarın halktan aldığı vergileri arttırdığı durumu düşünelim.

Vergiler ilk birkaç kez arttığında halk perişan olup ağlaşır. Ama bir noktadan sonra, vergiler artmaya devam ederse halk oynamaya başlar. Bu davranış değişikliği, girdideki değişimin çıktıda orantılı bir değişime yol açtığı doğrusal sistemlerden beklenmeyen bir durumdur. Aynı şeyi yapıp farklı sonuçlar beklemek, doğrusal olmayan sistemlerin karakteridir. Kontrolü zor olan bu sistemlerden bilim bugüne kadar uzak durmayı tercih etmiştir.

Birge'yi parçalara ayırırsanız sistemin birliği bozulur ve bütüne ait işlev yok olur. Dizgeyi parçalara ayırmak ise işlev kaybına neden olmaz. Batı uygarlığının bir ürünü olan pozitif bilimin temeli, analitik düşüncedir. Bu bakış açısına göre, bütün kendini oluşturan daha basit parçalara bakarak anlaşılabilir. Bu yaklaşım, çoğu zaman işe yarasa da parçalar arasındaki ilişkiyi yok saydığı anda gerçek hayattaki birçok sistemi anlama da yetersiz kalır. Örneğin, atomlar hakkında bilinebilecek her şeyi bilmek, atomlardan meydana gelen tek hücreli bir canlıyı anlamaya yeter mi? Başka bir evrenden gelip ilk defa hidrojen ve oksijen görüyor olsaydık, onların bileşiminden ortaya çıkan suyun akışkanlık özelliğine sahip olacağını tahmin edebilir miydik? Akışkanlık, canlılık, bilinç ve benzeri zuhur eden birçok özellik, birge'yi oluşturan parçalarda bulunmaz ama bütünde ortaya çıkar. İlkokuldan üniversiteye tüm bir eğitim sistemi dünyanın karmaşıklığını görmezden gelen indirgemeci bir anlayışa göre dizayn edilmiş durumdadır. Bunun sebebi doğrusal olmayan sistemleri çalışmada matematiğin yetersiz kalmasıdır. Gerçek hayatın karmaşıklığı ile baş edebilecek yeni bir bilimsel araca ihtiyacımız vardır. Bu araç bilgisayarın artan gücünü kullanan etmen temelli modelleme ve simülasyondur. Bu yeni bilimsel yaklaşım genel olarak karmaşık sistem yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır (Çetin & Bingöl, 2015).

Kompleks Sistemler, kendi kendini örgütleyebilen ve değişen şartlara uyum gösterebilen organik sistemlerdir. İnternette ekonomiye, beyinden hayvan sürülerine kadar birçok farklı sistem, merkezi bir planlayıcısı olmadan, nispeten basit kuralları takip eden çok sayıda işlemci birim'in birbiriyle olan yoğun etkileşimi ve geribildirimleri neticesinde ortaya çıkar.

Şekil 2. Bilgisayım, Yapay Zekâ ve Karmaşık Sistemler



Karmaşık sistemler yaklaşımının özellikle sosyal bilimlerde gittikçe artan bir şekilde kullanıldığına tanık oluyoruz (Çetin & Bingöl, 2014). Fakat bu yaklaşımın, karmaşıklığı katlanarak artan dünyamızda giderek bütün bilim dallarına yayılacağına inanıyoruz. Özellikle yapay sinir ağları, genetik algoritmalar, sürü optimizasyonu gibi temel yapay zekâ algoritmalarının etmen-temelli modellemedeki kökleri ve karmaşık sistemler ile bağlantılarının daha derinden irdelenmesi gerektiğini düşünüyoruz. Örneğin, yayınladığımız bir çalışmada, o şekilde programlanmalarına rağmen evrimsel süreçte nesiller zararlı ajanlara karşı belleklerini arttırmaları gerektiğini kendileri buldular (Çetin & Bingöl, 2016). Bahsi geçen çalışmada, mahkûm ikilemi oynayan etmenler, evrimsel sürecin sonunda kendiliğinden adeta bir bağışıklık mekanizması geliştirdi. Ve bu zuhur eden bir mekanizma olarak ortaya çıktı. Kullandığımız genetik algoritma, bu sonucun ortaya çıkmasında büyük bir rol oynadı. Üzerinde çalıştığımız yeni bir çalışmada, parametre optimizasyonunu geri yayılım algoritması yerine genetik algoritmalar ile yapan ve bu sayede ağın yapısını kendisi dizayn edebilen hibrit bir yapay sinir ağı üzerine çalışıyoruz. Ağın sabit katmanlı yapısına dokunulmadan, bu tür çalışmalar yapıldığını biliyoruz (Lehman & Miikkulainen, 2013). Ağın kendi kendisini organize ettiği yapay sinir ağlarına bir sonraki bölümde değineceğiz. Şekil 2'de görülmekte

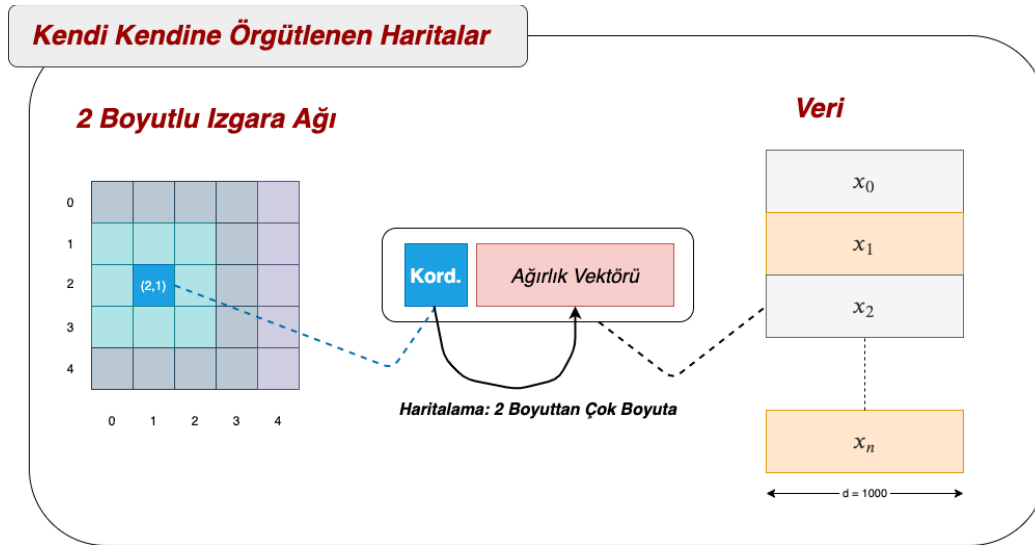
olan bilgi sayım, yapay öğrenme ve karmaşık sistemler yaklaşımlarının evreni anlamak için bize birbirini tamamlayan bakış açıları kazandıracığını düşünüyoruz.

Yapay zekâ, yapay öğrenmeyi yani istatistiksel makine öğrenmesini de kapsayan oldukça geniş bir konu. Kompleks sistemler ile bağlantı kurulabileceğimiz en heyecanlandırıcı konulardan biri kolektif zekâ algoritmalarıdır. Bu algoritmalar genel olarak doğadan esinlenen algoritmalar oluyor. Mesela karınca kolonisi algoritması yardımıyla en kısa yol problemini çözülmektedir. Genetik algoritmalar ile planlama ve optimizasyon problemlerini çözülebilmektedir. Bir sonraki bölümde detaylandıracağımız Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar yardımıyla verinin boyutunu azaltmak ve anomali tespit etmek mümkündür. Kolektif zekâ ile, basit etmenler birlikte çalışarak zor problemleri kendiliğinden çözme yetisi gösterebilirler. Büyük bir problem, beklenmedik şekilde küçük ajanların birlikte çalışması ile çözülebilmektedir. Kompleks sistem, yapay zekâ ve veri biliminin kesişiminde bulunan bu doğadan esinlenen algoritmalara daha çok önem vermek gerektiğini düşünüyoruz.

4. Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar (SOM)

Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar beyinin yaşamsal çalışma yapılarından biri olan işlevsel yakınlık düzenlenişini taklit eden bir algoritmadır. Vücudumuzda birbirine yakın olan organlarla ilgilenen beynimizdeki nöronal yapılar da birbirine yakındır. Vücudumuzdaki uzamsal yakınlık, beynimizde de karşılık bulur (Schultz, 2001). Örneğin ayak ve ayak tabanı ile ilgili sinir hücreleri beyinde uzamsal olarak birbirine yakın bulunan hüreselleridir. Teuvo Kohonen 1981 yılında, bu yakınlık ilişkisini modelleyen bir yaklaşım olan Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar'ı geliştirdi ve bilim dünyası ile paylaştı.

Şekil 3. Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar



Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar, türev olarak hata düzeltme yaklaşımı yerine Kompleks Sistem araştırmacılarının aşına olduğu biçimde, birbiri ile ilişkili nöronlar arasında yarışmacı bir öğrenme yaklaşımını benimser. Bu öğrenme modeli tamamen veri odaklı denetimsiz bir öğrenme modelidir. Denetimsiz öğrenme, çıktı verisi olmadan sadece girdi verisinin elimizde bulunduğu daha zor bir problemidir.

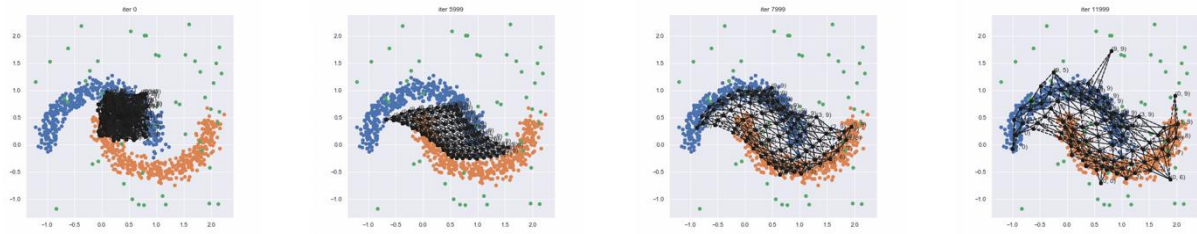
Nöronları, etmen temelli modellemedeki etmenler gibi düşünebiliriz (Çetin & Bingöl, 2015). Şekil 3'te görüldüğü gibi, nöronlar genellikle ızgara tipi bir ağ yapısı içinde bulunur. Köşe ve kenardaki nöronlar hariç, her nöronun 8 komşusu bulunur. Nöronların ızgara ağında kendi koordinatları ve komşuları bulunmaktadır. Aynı zamanda her nöronun haritalandığı çok boyutlu bir ağırlık vektörü daha bulunur. Dolayısıyla, her nöronun 2 boyutlu nöronal bir koordinatı ve eşlendiği çok boyutlu bir ağırlık vektörü bulunur. Nöron bu ağırlık vektöründen sorumludur. Beynimizdeki gerçek nöronların, vücudumuzdaki gerçek organlardan sorumlu

olmasını taklit eden bir modelleme yapılmıştır. Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar algoritmasının genel şeması aşağıdaki gibidir.

- Ağırlık vektörlerine başlangıç değerlerini ver
- Döngü içinde
 - Rastgele bir veri noktası x_i seç
 - Bütün nöronlarla mesafesini ölç
 - (En kısa mesafeye sahip) Kazanan nöronu belirle
 - Kazanan nöron ve komşularının ağırlık vektörlerini x_i 'ye daha yakın olacak şekilde güncelle

Yukarıda tarif edilen algoritma yardımı ile, başlangıçta nöronların sorumlu olduğu ağırlık değerleri rastgele atanır. Tamamen veri odaklı olan bu algoritmada, rastgele bir veri noktası x_i seçilir. Ve bu veri noktasına en yakın olan ağırlık değerine sahip olan nöron belirlenir. Bu nöron kazanan nörondur. Kazanan nöron ve onun ızgara tipi ağdaki komşu nöronlarının ağırlık değeri, bu veri noktasına daha yakın hale gelecek şekilde güncellenir. Kazanan nöron ve komşuları çok boyutlu veri uzayında adeta veri noktası x_i 'ye doğru çekilir.

Şekil 4. Veri Topografyası



Her farklı (mavi, turuncu ve yeşil renkteki) veri noktası, (siyah renkteki) nöronların ağırlık değerlerini kendi üzerine doğru biraz daha çeker. Nöron ağırlıkları, adeta konulduğu kabın şeklini alan bir su gibi, çok boyutlu verinin gizli topografyasına uyum sağlar (Şekil 4).

Bu tekrar eden döngüdeki amaç, beynimizdeki yerel bir bölgede bulunan nöronların benzer işlev görme özelliğini taklit etmektir. Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar'da beynimizi simgeleyen ızgara tipi ağdaki komşu nöronlar, benzer ağırlıklara sahip olarak, benzer işlev görme özelliğine sahip olur. Böylece ızgara tipi ağda, yerel kümelenmeler kendiliğinden oluşur. Her bir küme, verideki bir örüntü grubuna denk gelir. Dolayısıyla çok boyutlu verinin topografyası olduğu gibi iki boyutlu ızgara tipi nöronal ağa yansıtılır. Detaylarına girmeden kabaca anlattığımız bu yaklaşım, boyut indirme, görselleştirme, kümeleme, anomali tespiti gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

5. Anomali Tespiti

Anomaliler, düzenliliği bozma amacıyla üretilmiş bir bakıma anti-örüntülerdir. Beklenene anlamlı bir biçimde aykırı değerlere sahiptirler. Her gürültü bir anomalidir, ama her anomali bir gürültü değildir. Gürültü yanlışlıkla kaza sonucu üretilmiştir. Anomali ise belirli bir amaca yönelik bilinçli olarak üretilmiş de olabilir. Normal veriler ve anomaliler arasındaki en temel fark niceliktir. Anormal veriler oldukça seyrekken, normal veriler ezici çoğunluğa sahiptir.

Yapay öğrenme kavramı, bilgisayarların bir problemi çözmekte örnek veri ya da deneyimi kullanacak biçimde programlanması olarak tanımlanmıştır (Alpaydın, 2011). Yapay öğrenme algoritmaları genellikle, veri içindeki düzenlilikleri ve örüntüleri yakalamaya odaklanır. Peki düzen yıkıcıları, çizginin dışındakileri, aykırı değerleri yani anomalileri nasıl yakalanabilir? Bu iş için, K-Sigma (Çetin & Taşgın, 2020), *Isolation Forest* (Liu vd., 2008) gibi çok çeşitli yöntemler mevcuttur. Biz bu çalışmada Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar'ın anomali tespiti için nasıl kullanılabileceğine kısa bir bakış yapmak istiyoruz.

Şekil 4'te görüldüğü gibi, 2 tane ters yarım ay biçiminde olan doğrusal olmayan bir verinin topografyasına, siyah renkle gösterilen nöronal ızgara ağının iterasyonlar neticesinde nasıl serildiğini görmekteyiz. Bu aşamadan sonra, her bir nöronun ağırlık değerleri ızgara tipi ağdaki komşularının ağırlık değerleri ile karşılaştırılır. Komşu nöronlar arası ortalama mesafesi en yüksek olan nöronlar, potansiyel anomali merkezleridir. Çünkü algoritma bu mesafeyi veri odaklı bir biçimde küçültme üzerine kuruludur. Şekil 4'teki en sağdaki görselde, (9,9), (0,9), (0,6), (0,0) koordinatlarına sahip nöronların fark edilir biçimde dışarıda kaldığını görebiliyoruz. Bu nöronlara atanan veri noktaları, veri içindeki potansiyel anomali noktaları olarak tespit edilecektir.

Hayatın her alanında ender rastlanan, beklenmeyen sıra dışı olaylarla karşılaşabiliriz. Nassim Taleb bu tür olayları, yani anomalileri, siyah kuğu olarak niteliyor (Taleb, 2007/2008). Taleb'e göre şimdiye kadar etrafımızda gördüğümüz tüm kuğuların beyaz olması nedeniyle, siyah bir kuğunun var olabileceğini hayal etmememiz oldukça zordur (Hogarth vd., 2012). Siyah kuğu ile karşılaşmanın, diğer bir ifadeyle beklenmeyen bir duruma maruz kalmanın yıkıcı sonuçları olabilir. Bu durumu kavramak için Bertrand Russell'ın Tümevarımcı Hindi Hikayesi'ni hatırlamak faydalı olacaktır (Russell, 1912/2017). Bu hikâyede, yemi her gün aksatılmadan verilen bir hindinin insanın dost olduğuna dair inancı her geçen gün daha da pekişmektedir. Şükran Günü geldiğinde, elinde yem yerine bıçak ile gelen insanı gördüğü zaman, hindi geçmişe bakarak gelecek tahmininde bulunmanın fena halde yanıltıcı olduğunu anlar. Fakat artık hindi için çok geçtir. Ana soru: Hindi açısından bakıldığında kelimenin tam anlamıyla düzen yıkıcı bu olay gerçekten tahmin edilemez bir olay mıydı? Yapay öğrenme mühendislerinin, Russell'ın tümevarımcı hindisinin durumuna düşmemesi için ne yapması gerekiyor?

Veri zenginleştirme ya da veriyi çeşitlendirme, bizi hindinin düştüğü tuzaktan kurtarabilir. Modelimize, yem ile birlikte hindiye besleyen insanın davranışlarındaki değişimi de ölçmenin ve eklemenin bir yolunu bulmamız gerekmektedir. Ayrıca, çevredeki diğer veri kaynakları ile kendi verimiz arasında ilişki kurmak da faydalı olacaktır. Daha önceki yıllarda, çevredeki farklı hindilerin başına neler gelmişti?

İnsan doğası gereği siyah kuğuları tanımak için programlanmamıştır ve hayatın doğrusal ilişkiler ile ilerlediğine inanmayı ister. Aksi takdirde hayat dayanılmaz olacaktır. Hayatın karmaşıklığına göz kapamayı isteriz. Ders kitaplarımız bile, sadece baş edebildiği doğrusal sistemleri anlatır. Halbuki ne tarih ne toplum ne de başka bir kompleks sistem aşamalar halinde düz ve pürüzsüz bir şekilde ilerler. Varlığını hissettirmeyen küçük değişimler birikerek, ani kırılmalara ve seviyeler arası sıçramalara neden olur. Bu nedenle doğrusal olmayan, kompleks sistemler bakış açısı geliştirmemiz gerekmektedir. Bugünün ve önümüzdeki on yılın bilimi veri bilimidir. Ama bu bilim dalı geleceğin bilimi olan karmaşık sistemler ile birleştirilmelidir.

6. Sonuç

Bu çalışmada, çok önemli olduğuna inandığımız bilgi sayım, veri bilimi, yapay zekâ ve karmaşık sistem yaklaşımlarını Türk bilim dünyasının dikkatine sunmayı hedefledik. Bu çalışmadaki amacımız, farklı yaklaşımlarının evreni anlamak için bize birbirini tamamlayan bakış açıları kazandıracağını vurgulamaktır. Bu yaklaşımlara yapılan eleştiriler iki başlıkta toplanmaktadır. Birincisi, yapay öğrenmede, çoğu zaman, problemin kaynağını derinlemesine kavramadan, o probleme çözüm getirmekle yetinilmesidir. Bu çalışmada bu eleştirinin o kadar da doğru olmadığını, RNN, CNN ve SOM algoritmalarının verideki ilişkileri yakalama konusunda ne kadar başarılı olduğunu anlatmaya çalıştık. İkinci eleştiri ise, Kompleks Sistemler disiplinine yapılan bir eleştiriydi. Kompleks Sistemler evrendeki sorunlarımızla ilgili bize derin bir kavrayış, güçlü bir sezgi, sağladığı halde problemlere çözüm getirmekte şimdilik biraz zorluk çektiğine dair bir eleştiriydi. Bu eleştiri cevap vermek için de esas itibari ile denetimsiz bir derin öğrenme modeli olan Kendi Kendine Örgütlenen Haritalar'ı ayrıntılı bir şekilde inceledik. Bu algoritma Kompleks Sistem araştırmacılarının aşına olduğu biçimde,

birbiri ile ilişkili nöronlar arasında yarışmacı bir öğrenme yaklaşımını benimser. Nöronlar kendi kendine organize olarak, konulduğu kabın şeklini alan bir su gibi, çok boyutlu verinin gizli topogafyasına uyum sağlar.

Karmaşıklığı giderek artan sorunlarla boğuşan dünyamızda birbirini tamamlama potansiyeli çok yüksek, bu disiplinleri birbiriyle buluşturmak yönünde adımlar atmalı, çalıştaylar düzenlemeli ve Santa Fe'ye benzer enstitüler kurmalıyız. Bu yönde atılacak her adımın çok değerli olduğuna inanıyoruz. Sizleri de Karmaşık Sistemler ve Veri Bilimi topluluğumuza bekleriz (KaVe, 2017).

Teşekkür

Bu çalışmada, Sarıyer Belediyesi Kültür Eğitim Destek Merkezi bünyesinde yürütmekte olduğum Liseler için Yapay Zekaya Giriş Eğitiminde kullandığım materyallerden faydalandım. Ayrıca Tübitak 1512 BIGG ile desteklenen Summarify Yazılım Tek. Ar. Ge. A. Ş. ve KKB Kredi Kayıt Bürosu bünyesinde Tübitak Teydeb programı ile desteklenen MPP-62 Proaktif Denetimsiz Sistem Verisinde Anomali Tespiti projesini kapsamında yürütülen çalışmalardan da faydalandım. Her iki kurumun ARGE departmanlarına, İstanbul Bilgi Üniversitesi'ne, Karmaşık Sistemler ve Veri Bilimi Topluluğu'na ve Sarıyer Akademi'ye teşekkürü borç biliriz.

Kaynakça

- Alpaydın, E. (2011). *Yapay öğrenme*. Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi.
- Çetin, U. (2020). *Yapay öğrenme ile anomali tespiti: Siyah kuğuları yakalamak*. İdeaport.
- Çetin, U., & Bingöl, H. O. (2014). Attention competition with advertisement. *Physical Review E*, 90(3), Article 032801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.032801>
- Çetin, U., & Bingöl, H. O. (2015, 15 Aralık). *Karmaşık sistemler ve etmen temelli benzetim* [Complex systems and agent-based simulation]. Akademik Bilişim Konferansları. <https://ab.org.tr/ab16/bildiri/370.pdf>
- Çetin, U., & Bingöl, H. O. (2016). The dose of the threat makes the resistance for cooperation. *Advances in Complex Systems*, 19(08), Article 1650015. <https://doi.org/10.1142/S0219525916500156>
- Çetin, U., & Gündoğmuş, Y. E. (2019). Feature selection with evolving, fast and slow using two parallel genetic algorithms. IEEE (Ed.), *2019 4th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)* içinde (ss. 699-703). <https://doi.org/10.1109/ICSE47897.2019.00070>
- Çetin, U. & Taşgın, M. (2020). Anomaly detection with multivariate K-sigma score using Monte Carlo. IEEE (Ed.), *2020 5th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)* içinde (ss. 94-98). <https://doi.org/10.1109/ICSE47897.2020.00094>
- Hogarth, R. M., & Soyer, E. (2012, Kasım). Belirsizliğin doğası: Siyah kuğular ve sisli mayın tarlaları. *Harvard Business Review - Turkey Edition*, 23-25. <https://hburturkiye.com/dergi/belirsizligin-dogasi-siyah-kugular-ve-sisli-mayin-tarlalari>
- Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 31(8), 651-666. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>
- Lehman, J., & Miikkulainen, R. (2013). Neuroevolution. *Scholarpedia*, 8(6), Article 30977. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.30977>
- Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z. H. (2008). Isolation forest. IEEE (Ed.), *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining* içinde (ss. 413-422). <https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.47>
- Lloyd, S. (2006). *Programming the universe: A quantum computer scientist takes on the cosmos*. Vintage.
- Karmaşık Sistemler ve Veri Bilimi Topluluğu. (2017). *Home*. [LinkedIn sayfası]. <https://www.linkedin.com/company/kavetr> adresinden 02.11.2020 tarihinde erişildi.
- Kohonen, T. (1982). Automatic formation of topological maps of patterns in a self-organizing system. *Proceedings of the 2nd Scandinavian Conference on Image Analysis* içinde, (ss. 214-220).
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115-133. <https://doi.org/10.1007/BF02401793>
- Minsky, M., & Papert, S. A. (1969). *Perceptrons, expanded edition: An introduction to computational geometry*. MIT Press.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, 533-536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>
- Russell, B. (2017). *Felsefe sorunları* (V. Hacıkadiroğlu, Çev.). Kabcacı Yayınları. (Orijinal eserin yayım tarihi 1912)
- Russell, S., & Norvig, P. (2009). *Artificial intelligence: A modern approach*. Prentice Hall Press.

- Schultz, S. K. (2001). Principles of neural science. *American Journal of Psychiatry*, 158(4), 662. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.4.662>
- Spillenger, P. (Writer), & Lucas, N. (Producer). (2009). Plants (Episode 9) [Documentary]. In M. Gunton (Executive Producer), *Life*. BBC Earth. <https://www.bbc.co.uk/programmes/b00p90d6>
- Taleb, N. N. (2008). *Siyah kuğu: Olasılıksız görünenin etkisi* (N. Arıbaş Erbil, Çev.). Varlık Yayınları. (Orijinal eserin yayım tarihi 2007)