



Türk Bilim ve Mühendislik Dergisi Turkish Journal of Science and Engineering

www.dergipark.org.tr/tjse

Ekonominin Termodinamik Yasaları Üzerine Bir Deneme

Ünal Çamdalı^{1*}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

*Sorumlu yazar: u.camdali@aybu.edu.tr

MAKALE BİLGİSİ

Alınış tarihi: 22/01/2024

Kabul tarihi: 22/05/2024

Anahtar Kelimeler: Analoji, Ekonomi, Ekonominin termodinamik yasaları, Termodinamik, Termodinamik Yasaları

DOI: 10.55979/tjse.1423784

ÖZET

Bu çalışmada önce termodinamik biliminin önemi ve temel yasaları ortaya konmuştur. Ayrıca termodinamik yasalardan özellikle sıfırıncı, birinci ve ikinci yasalarla ilgili temel matematiksel denklemler de tanımlanmıştır. Daha sonra bu yasaların ekonomi bilimi ile olan ilişkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu ilişkiler belirlenirken söz konusu yasaların matematiksel ifadeleri dikkate alınmış ve bunların ekonomi bilimi içerisindeki benzeşimleri (analogileri) tespit edilmeye çalışılmıştır. Benzeşim için ısı pompaları gibi termodinamik sistemler ile banka gibi ekonomik sistemlerin ortak çalışma prensiplerinden yararlanılmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda bir ısı pompası çevrimi için aynı prensiple periyodik olarak örneğin 1 kWh enerji (iş) harcayarak veya enerji yatırımı yaparak 5 kWh enerji (ısı) üretmek mümkün olacaktır. Bankalar da benzer şekilde periyodik olarak tasarruflardan örneğin %5 faizden kaynak toplayarak bunları yatırımcılara %10 faizden kullanarak bir kazanç elde eder. Buradan pazar gibi ekonomik ve makina (motor) gibi termodinamik süreçlerin, benzer yasalara tabi oldukları sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın Türkçe literatürdeki alana küçük de olsa bir katkı yapması hedeflenmektedir.

An Essay on the Thermodynamics Laws of Economics

ARTICLE INFO

Received: 22/01/2024

Accepted: 22/05/2024

Keywords: Analogy, Economics, Thermodynamic laws of economics, Thermodynamics, thermodynamics laws

DOI: 10.55979/tjse.1423784

ABSTRACT

In this study, first the significance and main principles of thermodynamics are introduced. In addition, the laws of thermodynamics, especially the basic mathematic equations regarding the zeroth, first and the second laws of thermodynamics are given in thermodynamics terminology. Then, the relationship between these laws and economics is defined. When these relationships are defined, the mathematical expressions of the laws have been taken into account and the analogies of these laws for economics have been determined. Thermodynamic systems like a heat pump and economic systems like a bank have been used in the analogy. In this context, for a heat pump cycle, it will be possible to periodically produce, for example, 5 kWh of energy (heat) by consuming 1 kWh of energy (work) or by investing in energy, with the same principle. Similarly, banks also periodically collect resources from savers, for example at 5% interest, and make a profit by making them available to investors at 10% interest. It follows that economic processes such as the market and thermodynamic processes such as the engine are subject to similar laws. This study aims at making a small contribution to the Turkish literature in this area.

1. Giriş

Eski Yunanda bir evin mal varlığını yönetme sanatı anlamına gelen ve bir ev ile sınırlandırılan ekonomi (veya iktisat), günümüzde çok daha büyük bir ev olan dünyayı ilgilendirmekte hatta onu etkisi altına almaktadır (Barber, 2007). Kaldı ki bu etki sadece dünya ile sınırlı da değildir hatta evrenseldir. Zira evrenin çalışma prensiplerinin içerisinde üstün bir “ekonomiklik” ilkesinin mevcut olduğu gerçeği de evren bilimciler tarafından ortaya konmaktadır (Barrow, 1998). Ayrıca ekonomi bilimi felsefeden psikolojiye, matematikten istatistik bilimlerine kadar pek çok bilimlerle bağlantıları güçlü olan bir disiplin şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Bu bilimde özellikle neoklasiklerle başlamış olan bir mühendislik boyutunun varlığı da bir realitedir. Bununla birlikte F. H. Knight, mekaniği iktisadın kardeş bilimi nitelendirmesi bu noktada dikkate değerdir (Ateş, 1993).

17–19. yüzyılları arasındaki mekanik epistemolojinin gelişimi, termodinamik biliminin doğmasına da zemin

hazırlamıştır. Bu gelişmeler, iktisat biliminin hassas konusu kabul edilen *değere*, dönemin iktisatçıları tarafından mekanik bir bakış açısı kazandırılmasına neden olmuştur. Bu noktada Einstein'ın vurguladığı gibi tüm yasalar içerisinde en sarsılmaz yasa niteliğinde olan termodinamik yasalar, ekonomi bilimine de önemli katkılar sağlamıştır (Ateş, 1993). Ayrıca termodinamik, ekonomi bilimi ile mühendislik arasında, bir bağ kurulmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Termodinamik, enerji bilimidir. Bu bilim mikro organizmalardan, ev aletlerine; ulaşım araçlarından, güç üretim sistemlerine hatta felsefeye kadar çok geniş bir uygulama alanına sahiptir (Çengel & Boles, 2008). Yasaları evrenin en temel yasalarındandır yani evrenseldir (Çamdalı, 2012). Bu yasalar, bilindiği üzere *Termodinamiğin Sıfırıncı, Birinci, İkinci ve Üçüncü yasalarıdır*. Bu yasalardan Sıfırıncı Yasa, iki farklı sistemin üçüncü bir sistemle ayrı ayrı ısı dengede olmaları halinde, kendi aralarında da ısı dengenin var olması gerektiği gerçeğinden hareket ederek, sıcaklık

ölçümünün prensibini ortaya koymaktadır. *Enerjinin Korunumu Yasası* olarak da bilinen Birinci Yasa ve *Entropi Yasası* olarak da bilinen İkinci Yasa; enerji dönüşümünün ve bu dönüşümün bedelinin, esaslarını belirlemektedir. Üçüncü Yasa ise kimyasal bakımdan homojen ve mükemmel kristal halinde bulunan maddelerin, mutlak sıfır sıcaklığa (0 K: -273 °C) doğru yaklaştıkça, entropi değerlerinin de sıfıra yaklaşacağını, diğer bir ifadeyle bu sıcaklıkta söz konusu maddelerde, düzensizliğin ve hareketin mevcut olamayacağını ifade etmektedir (Çamdalı, 2012).

Enerjinin Korunumu Yasası, tıpkı Maddenin Korunumu Yasası gibi yaygın bilinen bir yasadır. Bu yasaya göre enerji yoktan var edilemez, varsa da yok edilemez. Enerji sadece form değiştirir. Termodinamiğin Birinci Yasasına göre enerjinin her dönüşümü sonucunda, toplam enerji miktarı değişmeyerek sabit kalmasına rağmen Termodinamiğin İkinci Yasasına (entropi yasası) göre ise her dönüşümün sonucunda, tersinmezliklere bağlı olarak enerjinin bir kısmı, faydalı formdan faydasız forma dönüşecek, bunun sonucunda da yoktan bir miktar düzensizlik, kaos veya termodinamikteki ismi ile entropi üretilmiş olacaktır (Çamdalı, 2012). Bu bağlamda enerjiyi faydalı form (*ekserji*) ve faydasız form (*anerji*) şeklinde ikiye ayırmak mümkündür. Enerjinin maksimum faydalı formu yani ekserjisi ne kadar fazlaysa ikinci yasa açısından söz konusu enerjinin, o kadar değerli olduğu anlamı da ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla elektrik, kinetik, potansiyel gibi enerjilerin ekserji kısmı, ısı kaynaklı (*termal*) enerjilere göre daha fazladır. Isı kaynaklı enerjinin maksimum iş değeri (ekserjisi), Sadi Carnot'un önerdiği *Carnot ısı makinasından* elde edilen iş (veya güç) ile sınırlıdır. Carnot'un ısı makinalarının maksimum verimliliğinin elde edilmesi ile ilgili yaptığı çalışmaların sonuçları, aynı zamanda *maksimum ekonomik verimliliğin* belirlenmesine de esas teşkil eden, *ekonometrik* bir prensibin oluşmasına neden olmuştur. Söz konusu prensip; belirli bir ısı (enerjisi) kullanılarak maksimum ürünün, hangi koşullarda elde edileceğini belirlemektedir. Carnot bu çalışmasıyla bir anlamda, termodinamik yasalarla iktisadi değer arasında bağlantı kurmuştur. Dolayısıyla bazı iktisatçılar tarafından Carnot'a *ilk ekonometrist* unvanının verilmesi anlamlıdır (Gergescu-Roegen, 1971; Ateş, 1993). Carnot'un ortaya koyduğu söz konusu evrensel prensipten yararlanılarak enerjinin ekserjistik kısmı ile iktisadi değer arasında bir ilişki kurulmuştur. Zira tüm makro sistemler, üretim süreçleri yoluyla kullandıkları enerjinin bir kısmını, faydalı enerjiye dönüştürürken diğer kısmı ile de entropinin artmasına, neden olmaktadır. Bir süreçte entropi üretimi ne kadar az olursa üretilen ekonomik değer de o oranda daha fazla olacaktır (Ateş, 1993). Bu ilke (veya bakış açısı), ekonomi ile termodinamik veya diğer bir anlamda ekonomi ile mühendislik arasındaki ilişkinin kurulmasında, en önemli etkenlerden biri olmuştur.

Literatürde Termodinamik ile Ekonomi bilimleri arasındaki benzeşime dayalı Türkçe kaynaklı yayınlar

oldukça sınırlı olmasına karşın yeterli sayıda İngilizce kaynaklı yayınlar mevcuttur. Türkçe yayınlardan Ateş tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tezinin (Ateş, 1993) son bölümünde, iktisadi değerler ile termodinamik yasalar arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Ağaoglu da yaptığı bir çalışmada (Ağaoglu, 1994) kaos kuramının temel felsefesini ve Ekonomi Bilimindeki yansımaları ile ilgili hususları, termodinamikten de yararlanarak ortaya koymaya çalışmıştır. İngilizce kaynaklı yayınlardan bazıları da aşağıda özetlenmiştir. Georgescu-Roogen entropi kavramını ilk defa ekonomide kullanmıştır (Georgescu-Roogen, 1971). Berry vd. (Berry vd., 1974), ekonomik ve termodinamik bakış açısına dayalı en uygunluk konusundaki ilişki üzerine bir çalışma yapmıştır. Araştırmacılar bu çalışmada, minimum maliyetle üretim yapan bir sistemin, termodinamik koşullarını ortaya koymuştur. Saslow (Saslow, 1999) ekonomik sistemlerle termodinamik sistemler arasında bir benzeşim (analoji) kurduktan sonra denge durumundaki ekonomik niceliklerin, ekonomik sistemin yapısını nasıl karakterize edeceğini ortaya koymuştur. Çalışmada, araştırmacı ayrıca termodinamik denge durumundaki bir fiziksel sistem ile ekonomik sistem arasındaki ilişkiyi, entropi üzerinden kurduktan sonra termodinamikte çok sık kullanılan serbest enerji ve Maxwell denklemlerinin, ekonomideki benzeşimlerini oluşturmuştur. Lozada da (Lozada, 2006) çalışmasında entropi, serbest enerji ve diğer termodinamik özelliklerin, ekonomideki karşılıklarını tartışmıştır.

Bu makalenin gerçekleştirilmesinde temel alınan ve Mimkes tarafından gerçekleştirilen (Mimkes, 2006) çalışmada da araştırmacı özellikle klasik termodinamik yasaların ve istatistik termodinamikte kullanılan kavramların, ekonomideki analogilerini anlaşılır ve somut örneklerle ortaya koymuştur. Bunlar, aşağıda farklı başlıklar altında verilmiştir.

Bu çalışmada da termodinamik biliminin genel karakteristik yapısı, ekonomi bilimi ile ilgili ilişkisi ortaya konmuş; *Termodinamiğin Birinci ve İkinci yasalarının* matematik ifadeleri kapalı ve açık sistemler için belirtilmiş; sonrasında da ekonomideki termodinamik yapılar tanımlanarak kurumlar ve makinelerin bağlamında termodinamik bilimi ile ekonomi biliminin analogisi sıfırcı, birinci ikinci ve üçüncü yasalara göre kurulmaya çalışılmıştır.

2. Termodinamik Yasaların Matematik İfadeleri

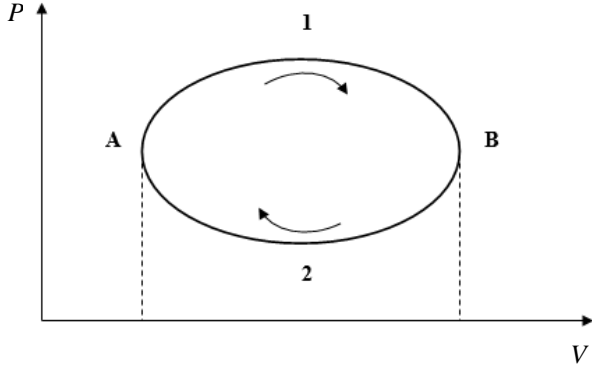
2.1. Termodinamiğin birinci yasası

Şekil 1'de verilen bir güç (veya iş) çevrimi için Termodinamiğin Birinci Yasasının matematiksel ifadesi, Denklem (1) ile verilebilir.

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (1)$$

Bu eşitliğe göre, özellikle iş (veya güç) üreten sistemlerde, sistemin bir çevrim boyunca çevresiyle yaptığı net ısı alışverişi, çevresiyle yaptığı net iş alışverişine eşittir (Eğrican & Atılgan, 1985).

Süreçler (hal değişimleri) için ise Termodinamiğin Birinci Yasasının kapalı ve açık sistemler için matematiksel ifadeleri ise aşağıda verilmiştir.

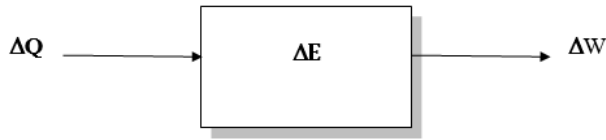


Şekil 1. Bir güç (veya iş) A1B2A (veya ısı pompası A2B1A) çevrimi (P: Basınç, V: Hacim)
Figure 1. A power (or work) A1B2A (or heat pump A2B1A) cycle (P: Pressure, V: Volume)

Kapalı sistemler (kontrol kütlesi) için Birinci Yasa ifadesi

Kapalı sistemler çevresiyle kütle alışverişi yapmayan sistemlerdir. Şekil 2’de verilen kapalı bir sistem için yasa, Denklem (2)’deki gibi elde edilebilir.

$$\Delta Q - \Delta W = \Delta E = E_2 - E_1 \quad (2)$$



Şekil 2. Kapalı bir sistemin (kontrol kütlesi) çevresiyle yaptığı enerji etkileşimi
Figure 2. The energy interaction of a closed system (control mass) with its environment

Burada:

$\Delta Q = Q_{giren} - Q_{çıkan}$:Sistemin çevresiyle yaptığı net ısı alışverişi

$\Delta W = W_{çıkan} - W_{giren}$:Sistem tarafından dönüştürülen (üretilen) net iş

$\Delta E =$ Sistemin enerji değişimi $(E = U + \frac{1}{2}mV^2 + mgz$: iç enerji + kinetik enerji + potansiyel enerji)

Açık sistemler (kontrol hacmi) için Birinci Yasa ifadesi

Açık sistemler çevresiyle madde etkileşiminde bulunan sistemlerdir. Şekil 3’te verilen açık bir sistem için ise yasa, Denklem (3)’deki gibi elde edilebilir.

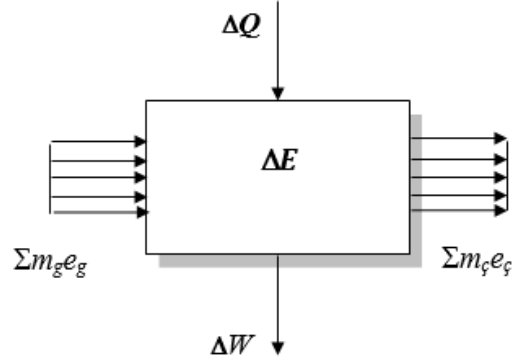
$$\Delta Q - \Delta W + \sum m_g e_g - \sum m_ç e_ç = \Delta E \quad (3)$$

Burada:

$\sum m_g e_g$: Sisteme giren kütlelerin, sisteme taşıdığı enerjilerin toplamı

$\sum m_ç e_ç$: Sistemi terk eden kütlelerin, sistemden taşıdığı enerjilerin toplamı

$e = h + \frac{1}{2}V^2 + gz$: entalpi + kinetik enerji + potansiyel



enerji

Şekil 3. Açık bir sistemin (kontrol hacminin) çevresiyle yaptığı enerji etkileşimi
Figure 3. The energy interaction of an open system (control volume) with its environment

2.2. Termodinamiğin ikinci yasası

Termodinamiğin İkinci Yasası, entropi adı verilen yeni bir özelliğin tanımlanmasına olanak vermiştir. Entropinin sözcük anlamı dönüşüm, değişim olsa da teknik anlamda bir sistemin mikroskobik düzeydeki düzensizliğinin, nicel ölçüsüdür. Termodinamiğin ikinci yasasının matematiksel ifadesi, *Clausius Eşitsizliği* ile ortaya konmuştur. Bu Denklem (4),

$$\oint \frac{\partial Q}{T} \leq 0 \quad (4)$$

ifadesiyle verilmektedir. Bunun anlamı, bir sistemin bir çevrim boyunca, çevresiyle yapmış olduğu ısı alışverişlerinin, ısı alışverişlerin gerçekleştirildiği sıcaklığa oranı sıfır veya sıfırdan küçüktür. Burada *eşitlik* durumu tersinir hal değişimleri (veya süreçleri) için, *eşitsizlik* durumu ise tersinmez hal değişimleri (veya süreçleri) için geçerlidir.

Bir çevrim boyunca integrali sıfır olan bir büyüklük bir özellik olduğundan, entropiyi tersinir süreçler için Denklem (5)’deki gibi tanımlamak mümkündür.

$$dS = \frac{\partial Q}{T} \quad (5)$$

Clausius eşitsizliği ile entropinin tanımı birlikte değerlendirildiğinde, *Entropinin Artışı* denen bir ilke elde edilir. Bu ilke, Denklem (6) şeklinde tanımlanır.

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \text{ veya } dS \geq 0 \quad (6)$$

Bu tanım, sistem ve çevresinin toplam entropilerinin değişimi, tersinir süreçler için sıfır, gerçek süreçler için ise sıfırdan büyüktür anlamına gelmektedir. Bir sistemin veya çevresinin entropisi, bir süreç boyunca azalabilir. Ancak sistem ve çevresinin entropilerinin değişimlerinin toplamı, tersinir süreçler için sıfır, gerçek sistemler için ise mutlaka sıfırdan büyüktür yani *artı işaretli* olmak zorundadır. Bu ilke, kapalı ve açık sistemler için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

Kapalı sistemler (kontrol kütlesi) için İkinci Yasa ifadesi

Kapalı sistemler için İkinci Yasa, entropi üretimi bağlamında Denklem (7-9) şeklinde yazılabilir.

$$S_{\text{üretim}} = \Delta S_{\text{toplam}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{çevre}} \geq 0 \quad (7)$$

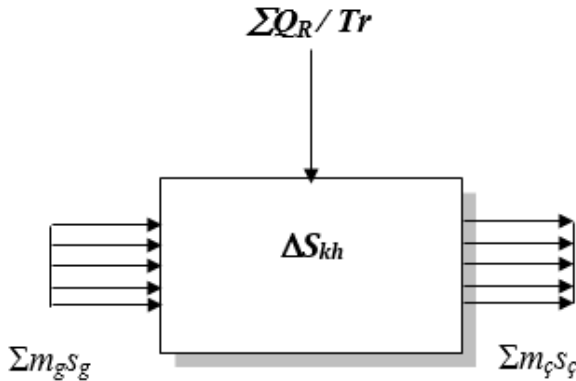
$$\Delta S_{\text{sistem}} = S_2 - S_1 = m(s_2 - s_1) \quad (8)$$

$$\Delta S_{\text{çevre}} = \sum \frac{Q_R}{T_R} \quad (9)$$

Burada Q_R ısı deposuyla yapılan ısı alışverişini, T_R ise ısı alışverişinin yapıldığı sıcaklığı göstermektedir.

Açık sistemler (kontrol hacmi) için ikinci yasa ifadesi:

Şekil 4'de gösterilen açık bir sistem (kontrol hacmi) için entropi üretimi ifadesi ise Denklem (10) ile verilebilir.



Şekil 4. Açık bir sistemin (kontrol hacmi) entropi dengesi
Figure 4. Entropy balance of an open system (a control volume)

$$S_{\text{üretim}} = \sum m_{\text{ç}} s_{\text{ç}} - \sum m_{\text{g}} s_{\text{g}} - \sum \frac{Q_R}{T_R} + \Delta S_{\text{kh}} \quad (10)$$

Burada:

$\sum m_{\text{g}} s_{\text{g}}$: Sisteme giren kütlelerin, sisteme taşıdığı toplam entropi

$\sum m_{\text{ç}} s_{\text{ç}}$: Sistemden çıkan kütlelerin, sistemden taşıdığı toplam entropi

3. Ekonomideki Termodinamik Yapılar

Klasik ekonomi teorilerinin küresel boyutta ortaya çıkan krizlere, çözüm üretmesi hususunda sıkıntı çektiği (Rifkin & Howard, 2010) konusu, sık sık gündeme getirilmektedir. Dolayısıyla mevcut teorilerin, termodinamiğin yasaları çerçevesinde revize edilmesi ve ekonomik olaylara yeni bakış açılarının getirilmesi

gerektiği bir gerçektir. Son yıllarda mühendislerin ve fen bilimcilerin de katkılarıyla ekonomi ve sosyal bilimlerle ilgili entropi esaslı modeller ve bu modellere dayalı analizler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bunlar disiplinler arası çalışmaların geliştirilmesine katkı da sağlamaktadır. Bu çalışmada termodinamik yasaların matematik ifadelerinin, ekonomi bilimindeki benzeşimleri (analojileri) ortaya konmaya çalışılmıştır.

Ekonomideki termodinamik yasalar, diğer bilimlerde olduğu gibi matematik denklemlerle ifade edilebilir. Bunları ifade etmeden önce termodinamikteki bazı kavramların ana hatlarıyla ortaya konması, konunun anlaşılması açısından faydalı olacaktır. Bu bağlamda örneğin ısı (Q) iki değişkene bağlı olabilen ve diferansiyeli tam diferansiyel olmayan (δQ) (Mimkes, 2006), bir büyüklük şeklinde tanımlanabilir. Tanım, söz konusu büyüklüğün değerinin yola veya diğer bir ifade ile sürece bağlı olduğu anlamına gelmektedir. Bu tür büyüklüklerin integralinin sınır değeri değişirse bile sürecin yolu değiştiğinde, değeri değişecektir. Sonucun ekonomideki karşılığı, Şekil 1'den de anlaşılacağı üzere çevrimsel (döngüsel) bir süreçte, çevrimin bir sürecini daha az bir yatırım (maliyeti) yaparak gerçekleştirirken çevrimi tamamlayan diğer süreçte, daha çok kazanç elde etmenin mümkün olacağı anlamına gelmektedir. İşlem periyodik olduğunda, kazanç da periyodik olacaktır. Bu prensip, enerji üretiminde kullanılan güç santralleri, ısı pompaları gibi sistemler ile ekonomideki üretimin hatta büyümenin temelini teşkil etmektedir. Bununla birlikte termodinamikte $dS = \delta Q / T$ veya $S = k \ln p$ şeklinde tanımlanan entropi değişimi veya entropi, ekonomide üretim fonksiyonu olarak tanımlanırken sıcaklık (T) ise ülkelerin pazar endeksini veya yaşam standardını yansıtan, kişi başına düşen gayri safi milli hâsılası (GNP per capita) olarak ifade edilebilir. Bu bağlamda ekonomik büyümenin ve sermaye (kapital) üretiminin, ısı pompaları ve elektrik jeneratörleri gibi petrol, doğal gaz gibi kaynaklara bağlı olduğu ifade edilebilir. Dolayısıyla buradan pazar gibi ekonomik ve makina (motor) gibi termodinamik süreçlerin, benzer yasalara tabi oldukları sonucu ortaya çıkmaktadır (Mimkes, 2006).

Son yıllarda fizik ve mühendislik gibi teknik bilimlerin metotları kullanılarak ekonomi ve sosyal bilimlere, yeni yaklaşımlar ve yeni bakış açıları geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ekonomi bilimi ile ilgili örneğin ekonomik büyüme, gelir dağılımı ve işsizlik gibi problemler için teknik bilimlerin metotları kullanılarak geliştirilen yeni anlayışlar, çözüm olabilecektir. Dolayısıyla sosyal sistemlerin dinamikleri kavramı, Weidlich tarafından; ekonofizik kavramı da Stanley tarafından bu tür problemlere çözüm olması amacıyla ortaya atılmıştır. Sosyo-ekonomik sistemlerin modellenmesindeki termodinamik yaklaşımlar da Foley, Mimkes ve Dragulescu ve Yakovenko gibi araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir (Mimkes, 2006).

4. Benzeşimin (Analojinin) Çevrim Özeliindeki Dayanağı

Termodinamik ile ekonomi arasında makro seviyede analogik (benzeşim) bir ilişki kurmak mümkündür. Yukarıda da ifade edildiği gibi literatürde bu konuda yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Bu konuda genel bir fikir vermesi açısından Saslow (Saslow, 1999) tarafından yapılmış analogi, Çizelge 1’de verilmiştir.

Bu çalışmada da daha özellikli (spesifik) termodinamik kavramlarla ekonomik kavramlar arasında, bir benzerlik kurulmaya çalışılmıştır. Bu noktada ısı yukarıda da ifade edildiği gibi en az iki özelliğe bağlı olarak (örneğin sıcaklık ve basınç gibi) tanımlanabilir. Ayrıca diferansiyeli tam diferansiyel olmayan (δQ) bir büyüklük olup yola (sürece) bağlı bir fonksiyondur. Bunun anlamı: Şekil 1’de görüldüğü üzere A ile B noktaları arasındaki herhangi bir yol üzerinden ısının diferansiyelinin integrali, B ile A noktaları arasındaki farklı bir yol üzerinden gerçekleşince farklı olmaktadır. Bu prensibin periyodik şekilde çalışan makinalara uygulanmasında, çok önemli bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Şekil 1’deki gibi başlangıç ve bitiş noktaları A ve B olan ve iki süreçten oluşan bir çevrimde B2A süreci belli bir enerji (iş) harcanarak gerçekleştirilirken; A1B sürecinde diğer sürece göre daha fazla enerji (iş) üretilmektedir. Dolayısıyla burada çevrimden hem de periyodik olarak

net enerji (ısı veya iş) üretme olanağı doğmaktadır. Bu bağlamda bir ısı pompası çevrimi için aynı prensiple periyodik olarak örneğin 1 kWh enerji (iş) harcayarak (veya enerji yatırımı yaparak) 4 ila 5 kWh enerji (ısı) üretmek mümkün olacaktır (Mimkes, 2006).

Ekonomik büyüme de tıpkı termodinamikteki ısıya benzer şekilde, ekonomi bilimi açısından emek ve sermaye gibi en az iki değişkenin veya termodinamikteki ismi ile özelliğın fonksiyonudur. Bu büyüklüğün diferansiyeli de yine ısı gibi tam diferansiyel değildir. Yani bu ifadenin A1B yolu boyunca alınan diferansiyelinin integrali, B2A yolu üzerindeki integralinden farklıdır. Bu prensip ekonomideki periyodik üretim uygulamaları için cazip görünmektedir. Bir çevrimin bir yolu boyunca, daha düşük bir yatırım yaparken çevrimin diğer yolundan daha fazla kazanç elde etmek hem de periyodik olarak mümkündür. Bu duruma ekonomik alandan banka veya firmalardan örnek verilebilir. Bankalar periyodik olarak tasarruflardan örneğin %5 faizden kaynak toplayarak bunları yatırımcılara %10 faizden kullanarak bir kazanç elde edebilir. Benzer şekilde firmalar da mümkün olduğu kadar düşük maliyetle üretim yapıp, bunları mümkün olduğu kadar yüksek fiyattan satarak benzer bir işlevi, periyodik olarak yerine getirmektedir (Mimkes, 2006).

Çizelge 1. Termodinamik ve ekonomi arasındaki temel benzerlikler (Saslow, 1999)

Table 1. Basic similarities between thermodynamics and economics (Saslow, 1999)

Termodinamik	-A	-E	TS	μ	N
Ekonomi	S	F	Q=U-W	F	N
	(servet)	(fayda)	(artık değer)	(fiyat)	(ürün miktarı)

A: N adet özdeş parçacığa sahip bir sistemin, Helmholtz serbest enerjisi, $A = -PV + \mu N$, E: enerji, TS: sıcaklık (çarpı) entropi, μ : parçacıkların kimyasal potansiyeli, N: miktar

4. Ekonominin Termodinamik Yasaları

4.1. Ekonominin sıfıncı yasa

Sıfıncı yasa, ortalama kişisel zenginliğin miktarını (varlığını) verir. Toplumda ölçülmesi zor da olsa kişisel servet dengesinin tanımlanmasına yardımcı olur. Farklı kişisel servete sahip iki tüketici, evlilik, evlat edinme vd. aile olma yollarıyla servetlerini paylaşabilir. Yasaya göre toplumda eşit kişisel servete yaklaşım, yavaş da olsa sağlanmalıdır. Mülkiyet harcamayla veya harcama olmadan, çalışma süresine bağlı olmaksızın, devredilebilir. Ekonomik fayda da temasla (veya faaliyetle) aktarılabilir (Gumjudpai, 2020).

4.2. Ekonominin birinci yasa

Ekonomik faaliyet gösteren bir kurumda örneğin bir tekstil, bir otomobil fabrikasında, bir tıp merkezinde veya bir bankada ekonomik değer, uzun çabalar sonucunda gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bu sistemlerde üretilen ürünler, doğal olarak üretim biçimine (yöntemine) bağlıdır. Yani üretim biçimi değişince ürünler de farklılık

göstermektedir. Her sistemin kendine has bir üretim süreci (veya yöntemi) mevcuttur.

Matematiksel olarak ifade edilmek istenirse: ürünler entegrasyon yoluna bağlıdır. Bu yol o ürünü elde etmek için kullanılan üretim sürecidir. Dolayısıyla her bir üretim, üretimin gerçekleştirildiği spesifik üretim sürecine bağlıdır. Üretim bu anlamda aşağıdaki matematiksel Denklem (11) ile ifade edilebilir (Mimkes, 2006).

$$-\oint \partial W = \oint \partial Q \quad (11)$$

Denklemden işin eksi işaretli olması ($-\partial W$), ısı pompası gibi sistemler için gerekli olan işin işaretinden kaynaklıdır. Artık değer olarak ifade edilen Q giren işin (veya enerjinin) bir sonucudur. Yukarıdaki eğrisel integral ifadesi, Şekil 1 dikkate alındığında (ve yola bağlı olarak), A dan B ye giden yol (süreç) ile tekrar B den A ya gelen diğer bir yol (süreç) esas alınarak yeniden düzenlenirse Denklem (12) ile yazılabilir (Mimkes, 2006).

$$-\oint \partial W = \oint \partial Q = \int_A^B \partial Q_1 - \int_A^B \partial Q_2 = Y - C = \Delta Q \quad (12)$$

Bu denklemden de anlaşılacağı üzere ekonomik süreç, kazanç (ürün, Y) ile girdileri (maliyetleri, C) içermektedir. Bunlar arasındaki fark da *artık değer* (δQ) olarak ortaya çıkmaktadır. Kazanç (ürün) ile maliyetin (girdilerin) her ikisi de üretimin kapalı eğrisinin yani çevriminin birer parçalarıdır. Bunlar aynı zamanda üretimin ve tüketimin yoluna veya sürecine bağlıdır. Aralarındaki fark olan artık değer ile ekonomik büyüme, tüm süreç bilinmediği sürece baştan hesaplanamayabilir (Mimkes, 2006).

Yukarıda bir ekonomik çevrim için yazılan birinci yasa denklemi, diferansiyel formda da yazılabilir. Bir çevrim boyunca birbirine eşit olan $-\partial W$ ve ∂Q denklemlerin bir süreç boyunca birbirinden farkı, tam diferansiyel bir büyüklük olan dE 'ye eşit olacaktır. Bu durum, Denklem (13-14) ile ifade edilebilir (Mimkes, 2006).

$$\partial Q = dE - \partial W \quad (13)$$

$$dE = dU + d\left(\frac{1}{2}mV^2\right) + d(mgz) \quad (14)$$

Denklem (13), bir süreç için *Ekonominin Birinci Yasasının diferansiyel formu* şeklinde tanımlamak mümkündür. Denkleme göre artık değer (δQ), sermayeyi (dE) artırırken aynı zamanda işe ($-\delta W$) ihtiyaç duymaktadır. Bu yasanın en önemli özelliklerinden birinin, sermaye üretim dengesinin (capital balance of production), belirli fonksiyonlarla ifade edilememesidir. Yasada da ifade edildiği gibi sermaye dengesi, tam diferansiyel olmayan formlarla verilmektedir. Bunlar aşağıda biraz daha detaylı verilmiştir (Mimkes, 2006).

4.2.1. İş (∂W)

İş (W), emek (effort) ile teknik bilginin (know-how) toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bununla birlikte iş, genel bir fonksiyon ve tam diferansiyel olarak ifade edilemez. İş fonksiyonu integralin yoluna bağlıdır. Buradaki yol daha önce de belirtildiği üzere üretimin gerçekleştirildiği süreçtir. Bundan dolayı işi, başta hesap etmek gerçekten zordur. İş, süreçteki çalışan insanların niteliğine ve sayısına da eşit değildir. Emeğe değil üretim sürecine eşdeğerdir. İş, sermaye (E) ve artık değer (∂Q) gibi kapital boyutundadır (Mimkes, 2006).

Termodinamikte W fonksiyonu makinaların işi olarak ifade edilirken, ekonomide W fonksiyonu çalışanların ve makinaların toplam işi olarak ifade edilebilir. Bu noktada ekonominin termodinamik formülasyonu, modern üretimin bir problemini de ortaya koymaktadır. Söz konusu problem, insan ve makine işinin aynı formül ile yani Denklem (11)'deki gibi ifade edilmesidir. Bu durum, insanların verimli çalışmaması halinde, onların yerini makinaların alabilmesinin, mümkün olması şeklinde de açıklanabilir. Örneğin inşaat gibi yapım işlerinde çalışan işçilerin yapacakları işlerin bir kısmı, vinçler ve makinalar tarafından gerçekleştirilecekken; bazı ofis işleri de bilgisayarlar tarafından gerçekleştirilebilecektir (Mimkes, 2006).

4.2.2. Artık değer (∂Q)

Artık değer (∂Q), işin bir sonucudur (Denklem 12). Tam diferansiyel bir formda olmadığından, ilk başta hesaplanması zordur. İntegrali, iş gibi yola yani üretim sürecine bağlıdır (Mimkes, 2006).

Ekonominin termodinamik formülasyonu, ekonomik üretimi termodinamikteki iş ile karşılaştırma olanağını vermektedir (Mimkes, 2006).

4.3. Ekonominin ikinci yasa

Tam diferansiyel formda olmayan ve yola bağlı olan δQ , integral faktörü T 'ye bölüldüğünde, tam diferansiyel forma dönüşür. Dönüşüm, tersinir süreçler için ikinci yasa olarak tanımlanır ve Denklem (15) yardımıyla gösterilir:

$$dS = \frac{1}{T} \partial Q = \frac{\partial Q}{T} \quad (15)$$

Denklemdaki S , mühendislik, fizik ve diğer bilimlerde *entropi* olarak tanımlanan bir büyüklüktür ve nokta (sistem) fonksiyonudur. Ekonomistler genellikle bu fonksiyonu üretim veya fayda fonksiyonu olarak tanımlar. $1/T$, sermaye dengesinin integral faktörüdür. Denklem (16)'da verildiği gibi T spesifik bir ekonomik sistemin, N adet temsilcisinin (agents), ortalama sermayesi (E) ile orantılıdır (Mimkes, 2006):

$$E = cNT \quad (16)$$

Denklemdaki c orantı katsayısıdır. T 'yi ekonomik sıcaklık olarak da ifade etmek mümkündür. N ürünlü bir pazarda T , ortalama fiyat seviyesi ile orantılıdır. N haneden oluşan bir toplumda ise T , hane başına düşen ortalama sermaye ve yaşam standardı ile orantılıdır. Bir ülkede ise kişi başına düşen gayri safi milli hâsıla (GDP per capita) ile orantılıdır. T , ikinci yasa tarafından tüm ekonomik fonksiyonlarda ana değişken olarak tanımlanmıştır (Mimkes, 2006).

Denklem (15)'deki δQ ifadesini, Denklem (11)'de yerine yazarsak aşağıdaki Denklem (17) elde edilir.

$$-\oint \partial W = \oint T dS \quad (17)$$

Entropi veya üretim fonksiyonu olarak tanımlanan S , iş fonksiyonu olan W ile yakın ilişki içerisinde. Fakat W 'nin tersine, S üretim sürecinden bağımsızdır, üretim (sayı) boyutundadır ve önceden belirlenebilir. W ve S fonksiyonları tüm ekonomik süreçlerdeki, mekanizmayı ve hesabı temsil etmektedir. Entropi veya üretim fonksiyonu sisteme bağlıdır ve ekonomik sürecin önceden hesaplanmasını mümkün kılar (Mimkes, 2006).

İş fonksiyonu ise üretim sürecine bağlı olarak tanımlanır ve yukarıda da belirtildiği üzere her bir farklı süreç için farklı bir değer alır. Bu durum, çevrimin bir sürecinde daha küçük bir yatırım yaparak çevrimin diğer sürecinde daha büyük bir kazanç elde ederek *artık değer* yaratmayı mümkün hale getirir. Tam diferansiyel bir fonksiyon olan entropi, tam diferansiyel fonksiyon olmayan δQ ile

tanımlanmaktadır. Yani $\delta Q = TdS$ dir. Benzer şekilde Denklem 18'de görüldüğü gibi tam diferansiyel formda olmayan üretim (δW) de tam diferansiyel bir form olan dV ile ifade edilir (Mimkes, 2006).

$$-\delta W = PdV \quad (18)$$

Burada P basınç, V ise mahal (hacimsel alan) veya kişisel özgürlük olarak tanımlanır. V dış ekonomiden (external economics) veya toplumsal baskıdan (social pressure) dolayı azalabilir (Mimkes, 2006).

Yukarıdaki Denklem (13), (15) ve (18) dikkate alındığında, entropi için Denklem (19-20) yazılabilir:

$$dS(T, V) = \frac{\partial S}{\partial T} dT + \frac{\partial S}{\partial V} dV = \frac{1}{T} [dE(T, V) + P(T, V)] dV \quad (19)$$

Bu ifade aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$dS(T, V) = \frac{1}{T} \frac{\partial E}{\partial T} dT + \frac{1}{T} \left[\frac{\partial E}{\partial V} + P \right] dV \quad (20)$$

Tam diferansiyel olan dS , integrasyon yolundan bağımsız integre edilebilir. Yukarıdaki denklemden de anlaşılacağı üzere entropi değişimi; üretim fonksiyonu $S(T, V)$, sermayeye $E(T, V)$ ve ekonomik basınç (baskı) olan $P(T, V)$ 'ye bağlı hesap edilir (Mimkes, 2006).

4.4. Ekonominin üçüncü yasası

Kişisel servetin sıfır olduğu bir durumda, kişisel servet birimi başına fayda da sıfır olacaktır. Sıfır kişisel servete ulaşmak ise sonsuz adımlar gerekecektir. Zenginlik mutluluk içerse de onu tamamen ortadan kaldırmanın imkânı yoktur. Eğer kişisel zenginlik sıfırsa, yani hiçbir biçimde mutluluk yoksa tüketici için de sıfır fayda olacaktır. Termodinamiğin terminolojisi açısından, $T=0$ K'deki bir sistem için $S=0$ olacaktır. Dolayısıyla gelişmemiş bir ekonomik sistemde, artık değer ve ekonomik sıcaklık sıfır olduğundan, söz konusu sistemin sıfır ekonomik entropiye sahip olduğunu gerçeği veya benzeşimi, üçüncü yasa bağlamında ifade edilebilir (Saslow, 1999; Gumjudpai, 2020).

5. Termodinamik Sistemler ile Ekonomik Sistemlerin Karşılaştırılması

Isı Pompaları: Bir ısı pompası ısı kaynağı olarak tanımlanan hava, nehir, akarsu veya toprak gibi enerji kaynaklarının ısını (enerjisini) alıp, farklı ortamlara aktaran sistemlerdir. Bu sistemler işlevini bir çevrim boyunca çalışarak gerçekleştirir. Bunlar çevrimin bir süreci boyunca örneğin 1 kWh enerji (yani iş) tüketirken çevrimi tamamlayan diğer süreçte ise 5 kWh enerji (yani ısı) üretebilmektedir. Bu sistemlerde üretilen ısı (Q), harcanan işten (W) büyüktür (Mimkes, 2006).

Isı pompaları, ısı kaynaklarından ısı çekerek onların soğumasına neden olurken ısıyı pompaladıkları ortamın da ısıtılmasına neden olurlar. Bu sistemlerde üretilen ısı (enerji) ile harcanan enerji arasındaki fark, ısı kaynağından karşılanmaktadır (Mimkes, 2006).

Bankalar: Bankalar da ısı pompalarına benzer şekilde tasarrufların birikimlerini kullanan ekonomik sistemlerdir. Bu sistemler periyodik olarak birikimlere (tasarruflara) örneğin %5 oranında faizle bir anlamda yatırım yaparak, %10 oranında faizle kazanç elde etmektedirler. Sistemden çıkış (Q) tıpkı ısı pompalarında olduğu gibi sisteme girişten (W) daha fazladır. Bankalar için artık değer, her bir çevrim (cycle) için tasarrufların artışından kaynaklanmaktadır (Mimkes, 2006).

Sermaye (Kapital, E): Sermayeyi (E) ekonomik çevrimin temeli kabul etmek mümkündür. Bir çiftlik çiftçinin, bir üretim yeri de firmanın sermayesi iken bir yatırım da yatırımcının sermayesidir. Emek (δW) olmadan, sermaye büyüyemez. Dolayısıyla sermaye emekle artabilir denilebilir. Kötü bir yönetim ise sermayeyi azaltabilir. Ancak her ekonomik sistem, hayatta kalmak için artı bir *artık değer* üretmek zorundadır. Her bir üretim çevriminden sonra artık değer (δQ), yatırım sermayesi (E) ile makul bir ilişki içerisinde olmak zorundadır. Bu ilişki, aşağıdaki üretim çevriminin verimi (r) şeklinde tanımlanan, Denklem (21) ile ifade edilebilir (Mimkes, 2006):

$$r = - \oint \frac{\partial W}{\partial E} = \oint \frac{\partial Q}{\partial E} = \frac{Q_{net}}{\Delta E} \quad (21)$$

Buradaki r , faiz oranıdır (interest rate). Faiz oranının verimi, üretim çevriminin başarısının (δW) bir ölçüsüdür ve aynı zamanda spesifik bir üretim sürecinde, insanların mı yoksa makinelerin mi çalıştırılacağı konusunda bir saptama yapar (Mimkes, 2006).

6. Sonuç

Hemen hemen tüm bilimlerle ilişki içerisinde olan ekonominin, mühendislikle olan ilişkisi bir hayli anlamlıdır. Ayrıca mühendislikte, ekonomik üretim anlayışının önemi de tartışmasız bir gerçektir. Zira mühendislik sistemlerinin enerji, mekanik, malzeme ve diğer açılardan verimli olmasının beklenilmesinin yanında, ekonomik olarak da verimli olması, arzu edilen hatta önemli bir husustur. Bu bakımdan ekonomiklik, mühendislik sistemlerinin vazgeçilmez koşuludur. Kaldı ki ekonomide, değer üreten madde ve enerjinin, termodinamik yasalara tabi olması, ekonomi ile mühendisliğin en temel bilimlerinden olan termodinamik bağlamında yakın bir benzeşimin kurulmasının en önemli dayanağıdır. Bu noktada ısı enerjisinin mekanik işe çevrilmesinin üst limitini ortaya koyan, ünlü termodinamikçi Sadi Carnot'un, ilk ekonometrist kabul edilmesi anlamlıdır.

Bu çalışmada termodinamiğin özellikle birinci ve ikinci yasaları ile termodinamik kavramların ekonomi bilimindeki analogilerinin matematik ifadeleri araştırılıp, ortaya konmaya çalışılmıştır. Ülkemizde bu konudaki çalışmalar henüz yeterli seviyede değildir.

Her disiplinin diğerlerinden ayrı ayrı değerlendirilmesi, parçadan bütüne geçme noktasında bazı kavramların yeterince anlaşılabilmesi veya eksik anlaşılması gibi sorunların doğmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla

çalışmanın özellikle Türkçe literatürdeki eksikliğin giderilmesine hizmet etmesi, hedeflenen amaçlardan en önemlisidir.

Son olarak bir şirketin sermayesi artsa da ömür sermayesinin sürekli azalacağını Termodinamiğin İkinci Yasası tarafından tespiti, hayati ve farklı bir gerçeğin ortaya konması açısından manidardır.

7. Kaynaklar

- Ağaoğlu, A. (1994). Kaos kuramı. *İşletme ve Finans Dergisi*, 9(101-102), 4-17.
- Ateş, S. (1993). *Ekonomi Biliminde Değer Kuramlarına Bakış: Çağdaş Yaklaşımlar, Entropi Olgusu ve Kapalı Sistemler*. (Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü)
- Barber, W. J. (2007). *İktisadi Düşünce Tarihi*. Metropol Yayınları.
- Barrow, J. D. (1998). *Evrenin Kökeni*. Varlık Yayınları.
- Berry, R. S., Salamon, P., & Heal, G. (1978). On a relation between economic and thermodynamic optima. *Resources and Energy*, 1(2), 125-137.
- Çamdalı, Ü. (2012). Termodinamik ve sosyal sistemlerin yakın çevre ilişkilerindeki ilginç benzeşim, değişim ve bir sonuç-bir ümit. *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 67(2), 213-221. https://doi.org/10.1501/SBFder_0000002252
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2008). *Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla*. İzmir Güven Kitabevi.
- Eğrican, N., & Atılğan, H. (1985). *Çözümlü Termodinamik Problemleri*. Emin Ofset.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge.
- Gumjudpai, B. (2020). Thermodynamics Formulation of Economics. *IAISAE 2020 International Conference on Thermodynamics 2.0*. June 22-24, Worcester, USA, 1-4.
- Lozada, G. A. (2006). Entropy, free energy, work, and other thermodynamic variables in economics. *Ecological Economics*, 56, 71-78.
- Mimkes, J. (2006). A Thermodynamic Formulation of Economics. In *Econophysics and Sociophysics: Trends and Perspective*. (pp. 1-33)
- Rifkin, J., & Howard, T. (2010). *Entropi Dünyaya Yeni Bir Bakış*. İstanbul İz Yayıncılık.
- Saslow, W. (1999). An economic analogy to thermodynamics. *American Journal of Physics*, 67(12), 1239-1247.