



# Sürdürülebilirlik Kavramı ve Ekserji Analizi: Binaların Isıtma Sistemlerine Yönelik Bir Uygulama

**Cem Tahsin Yücer\***

Milli Savunma Üniversitesi, Hava Astsubay MYO, İzmir  
[cyucer@msu.edu.tr](mailto:cyucer@msu.edu.tr) ORCID: 0000-0002-4848-867X, Tel: (232) 251 16 00 (5099)

**Hüseyin Kudak**

[hkudak@ttmail.com](mailto:hkudak@ttmail.com) ORCID: 0000-1234-5678-9012

Geliş: 01.10.2019, Revizyon: 21.12.2019, Kabul Tarihi: 27.01.2020

## Öz

*Sürdürülebilirliğin temel yaklaşımında, günümüz ihtiyaçlarının karşılanmasında gelecek nesillerin ihtiyaçlarının da düşünülmesi esas alınır. Sürdürülebilirlik günümüzde farklı uygulama alanları bulunduğu gibi, toplumsal olarak da kabul gören bir kavram haline gelmektedir. Sürdürülebilirlik kavramı, kırk yılı aşkın bir geçmişe dayansa da günümüzde daha çok sürdürülebilir kalkınma olarak ele alınır. Sürdürülebilir enerji uygulamaları kapsamında ele alınan hususlarından biri de ekserji kavramıdır. Bu kavram özellikle enerjiye dayalı hizmetlerin (ısıtma, aydınlatma vb.) sağlanmasına yönelik uygulamalarda öne çıkmaktadır. Çalışmada, sürdürülebilirlik kavramı açıklanarak, sürdürülebilirliğin önemli etmenleri vurgulanmıştır. Sürdürülebilirliğin geniş uygulama alanlarından biri olan sürdürülebilir enerji uygulamaları kapsamında, binaların ısıtma sistemlerine yönelik bir uygulama incelenmiştir. Ekserji analizi sonuçlarına göre düşük ekserji kaybetici basamağına aittir. Bununla birlikte en yüksek Ekserji Verimi, Ekserjetik Sürdürülebilirlik Endeksi değerleri ısıtıcı basamağı için %94,8 ve 18,287 olarak bulunmuştur. En düşük atık ekserji oranı ve çevresel etki faktörü %5,2 ve 0,055 olarak hesaplanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Sürdürülebilirlik; Sürdürülebilir Enerji; Ekserji Analizi; Enerji Verimliliği; Isıtma Sistemleri.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Sürdürülebilirlik, günümüzde sıkça duyulan bir kavram haline gelerek, kullanım alanları yaygınlaşmaktadır. Özellikle de sürdürülebilir kalkınma daha çok kullanılan bir kavram olmuştur. Bu çerçevede sürdürülebilir kalkınma, şirketlerin hatta ülkelerin öncelikli hedefleri arasında kendini göstermeye başlamıştır. Bu kapsamda şirketler kârlılıklarını ön planda buldurmanın yanında çevresel, sosyal ve kurumsal yönetime ilişkin yaklaşımları ile rekabet gücünü koruyabilirler. Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için katma değer yaratan faktörlerin belirlenebilmesi, bilginin artırılması ve şeffaflığın sağlanması şirket politikalarında zaruri hale gelmektedir (Borsa İstanbul, 2014).

Sürdürülebilirliğin yaygın kullanımı, özellikle geniş uygulama alanlarının bulunmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, günümüz üretim ve kurumsal politikalarında çevre anlayışının önem kazanması da etkin rol oynamıştır. Son zamanlarda, sektör bazında en hızlı büyüme görülen alanlar incelendiğinde: Enerji sektöründe rüzgâr enerjisi, turizm sektöründe eko turizm, yatırım alanında sosyal sorumluluk yatırımları ve tarımda organik tarımın bulunduğu görülmektedir (Hitchcock & Marsha Willard, 2006). Sürdürülebilirliğin yaygın kullanımının görüldüğü alanların, aynı zamanda sektöründe de kendini ön plana çıkardığı görülmektedir.

Günümüz toplumlarında teknoloji kullanımı, bizleri enerjiye tümüyle bağımlı hale getirmiştir. Enerji, günlük hayatın en temel gereksinimi haline gelmiştir. Bundan sadece otuz yıl öncesinde yaşanan elektrik kesintileri, bizleri sadece “ödev yapmaktan alıkoyarken”, artık bu durum toplumda kaos yaratabilmektedir. Enerji, ihtiyaçlarımızı karşılamamızın ötesinde, oluşumu ve kullanım şekli ile toplumsal değişimleri ortaya koyan, medeniyeti tanımlayan bir kavram olmuştur. Gerek sürdürülebilir enerjiler gerekse konvansiyonel enerjiler; kaynak temini,

depolama ve dönüşüm aşamalarında maliyeti yüksek ve teknoloji yoğun sistemlerdir. Söz konusu kısıtlar yeni yaklaşımları zaruri hale getirmektedir. Ülkelerin ekonomik kalkınmaları yolunda enerji bağımsızlıklarını elde etme arzuları ve iklim değişikliğinde geline tehlikeli nokta, sürdürülebilir enerjiyi gündeme taşımıştır. Sürdürülebilir enerji “yeşil devrim” ve “temiz teknoloji” gibi kavramlarla da ifade bulmaya başlamıştır (Montgomery, 2014). Sürdürülebilir enerji uygulamaları kapsamında ele alınan hususlardan biri de ekserji kavramıdır. Bu kavram özellikle enerjiye dayalı hizmetlerin (ısıtma, aydınlatma vb.) sağlanmasına yönelik uygulamalarda öne çıkmaktadır. Ekserji, enerjinin kullanılabilirlik ve kalitesinin ölçümü olarak tanımlanır. Ekserji yöntemi, daha verimli enerji kaynaklarına ulaşmada fayda sağlar ve böylece sürdürülebilirlik çabalarına da yardımcı olur (Rosen, 2009).

Bu çalışmada sürdürülebilirlik kavramının literatürde ne şekilde çalışıldığı anlatılmıştır. Devamında bir ısıtma sistemindeki ısı kayıpları, ekserji analizi yöntemiyle incelenmiştir. Ekserji analizi tüm ısıtma sistemi basamakları için uygulanmıştır. Elde edilen ekserji kayıpları dikkate alınarak ısıtma sisteminin sürdürülebilirliği analiz edilmiştir. Isıtma sisteminin ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri hesaplanmıştır. Böylece ısıtma sistemi basamakları arasında iyileştirmeye ihtiyaç duyulan alanlar belirlenmiştir.

## Materyal ve Yöntem

### Sürdürülebilirliğin Tanımı

Sürdürülebilirlik tanımına yönelik açıklamalar incelendiğinde, yaşam kalitesinin artırılırken etik anlayışının ve doğal kaynakların korunmasının esas alındığı görülür. (Şirketlerin 2014 Planları, Ekim 2013). Sürdürülebilirlik kavramı gerek bireysel gerekse kurumsal anlamda kârlılığın yanında itibar, etik unsurlar ve sosyal sorumluluk olarak yüksek katma değerlerin kazanımını sağlamaktadır. Bireysel

ve kurumsal farklılıkların yanında, ülkelerin planlama stratejilerinde de sürdürülebilirlik anlayışı yer alır.

Sürdürülebilir kalkınmanın en yaygın tanımı, Brundtland Raporunda; “Bugünün ihtiyacını karşılarken, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilmelerinden ödün vermemektir.” şeklinde yapılmıştır (Our Common Future, Brundtland Report, 1987). Sürdürülebilirlik temelde neyi, nasıl kullandığımıza ve geride ne bıraktığımıza dayanır. Bununla birlikte, ortaya konan bir şeyin sürdürülebilirliğini sağlayamamak, o şeyi değersiz kılar.

Sürdürülebilirlik hakkında faaliyet gösteren uluslararası organizasyonlar incelendiğinde, BM’in öncülüğünde oluşturulanlar başta olmak üzere öne çıkan kuruluşlar (Gönel, 2018):

- Birleşmiş Milletler Çevre Programı<sup>1</sup>,
- Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Konferansı<sup>2</sup>,
- Dünya Ticaret Örgütü<sup>3</sup>,
- Dünya Vahşi Hayat Fonu<sup>4</sup>,
- Dünya Doğal Kaynaklar Enstitüsü<sup>5</sup>
- Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya İş Konseyi<sup>6</sup>,
- Uluslararası Doğayı Koruma Birliği<sup>7</sup> sayılabilir.

Sürdürülebilirlik, yeni akım bir kavram olarak algılansa da aslında çok eski dönemlerden beri gündemdedir. Terim olarak belki kullanılmamış, ancak felsefesi veya işlerliği hep göz önünde bulundurulmuştur. Sürdürülebilirlik fikri kırk yılı aşkın bir geçmişe dayanır. Sürdürülebilirlik kavramının oluşumunda, farklı kavramlar da gündeme gelmiş olup, 1984 yılında “Çevresel Mükemmellik – Environmental Excellence”,

1986 yılında “Yeşil Tüketici – Green Consumer” kavramları ortaya konmuştur. Böylelikle çevresel hususlar konusunda hassasiyetler gün yüzüne çıkmaya başlamıştır (Elkington). Bu yaklaşım ile sürdürülebilirliğin tarihsel gelişimine ait dönüm noktaları Tablo 1’de incelenmiştir.

**Tablo 1.** Sürdürülebilirliğin Tarihsel Gelişimi.

Dönüm Noktaları	Kapsam
Uluslararası Doğayı ve Doğal Kaynakları Koruma Birliği (IUCN) 9. Genel Kurulu (1966)	Maksimum Sürdürülebilir Kazanım (Maximum Sustainable Yield) jargon olarak kullanılmıştır.
Uluslararası Doğayı ve Doğal Kaynakları Koruma Birliği (IUCN) 10. Genel Kurulu (1969)	Yeni zorunluluklar vurgulanmış. İnsan hayatının sürdürülebilir kalitesini en üst düzeyde tutmak için doğal kaynakların yönetimi ele alınmıştır.
Stokholm Konferansı (1972)	Gelişmiş ülkelerin, küresel kalkınmanın çevresel sonuçlarına yönelik kaygıları ile gelişmekte olan ülkelerin ekonomik kalkınmaya duydukları ihtiyaçlara yönelik ortak bir yol arayışı, sürdürülebilirlik kapsamında ilk hassasiyetler olarak belirmiştir.
Dünya Koruma Stratejisi (1980)	Canlı türlerinin ve ekosistemin sürdürülebilir bir şekilde kullanılması zorunluluğu belirtilerek, sürdürülebilir kalkınmanın yolunun, insan sağlığı ve esenliği için gerekli olan canlı kaynakları koruyan gelişim modellerini keşfetmek ve uygulamak olarak vurgulanmıştır.
Brundtland Raporu (1987)	Sürdürülebilirliğin en yaygın tanımının yapıldığı ve “Bizim Ortak Geleceğimiz” olarak da bilinen rapordur.
Rio Zirvesi (1992)	Sürdürülebilirliğin çevre boyutuna ilişkin çevre ve iklim değişikliği sorunları ele alınmıştır.
Kyoto Protokolü (1997)	BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında karbondioksit ve sera gazlarına ilişkin ülkelerin taahhütleri

<sup>1</sup> UNEP- United Nations Environment Programme.

<sup>2</sup> UNCSD- United Nations Conference for Sustainable Development.

<sup>3</sup> WTO- World Trade Organization.

<sup>4</sup> World Wide Life Fund.

<sup>5</sup> World Resources Institute.

<sup>6</sup> World Business Council on Sustainable Development.

<sup>7</sup> International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN).

	belirlenmiştir.
Küresel Raporlama Girişimi (1997)	Dünya çapındaki işletmelerin ve hükümetlerin iklim değişikliği, insan hakları, yönetim ve sosyal refah gibi kritik sürdürülebilirlik konularına olan etkilerini anlamalarına ve iletişim kurmalarına yardımcı olmaktadır. İlk defa Sürdürülebilirlik Raporlaması Rehberi yayınlanmıştır.
BM Küresel İlkeler Sözleşmesi (2000)	Şirketlere insan hakları, iş gücü, çevre ve yolsuzlukla mücadele konularında evrensel ilkeler ile stratejileri ve operasyonları uyumlu hale getirmek ve toplumsal hedefleri ilerletmek için harekete geçmek için yapılan çağrılardır.
BM Sorumlu Yatırım Prensipleri Girişimi (2005)	Yatırımları, toplumların daha geniş sürdürülebilir hedefleri ile uyumlu hale getirmelerini teşvik eden ve yardımcı olan program geliştirilmiştir.
BM Devletlerarası İklim Değişikliği Paneli IV (2007)	İklim değişikliğinin sürdürülebilir kalkınma politikaları ile bütünleşmesine dikkat çekilmiştir.
Sürdürülebilir Borsalar Girişimi (2009)	Borsaların paydaşları arasında sürdürülebilirliğe ilişkin farkındalığı artırmaya yönelik katkılar sunulmuştur.
Rio+20 Zirvesi (2012)	“İstedığımız Gelecek” raporu sürdürülebilir kalkınmaya ulaşmak için yeni bir ivme yaratmıştır.
Uluslararası Entegre Raporlama Çerçevesi (2013)	Sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin kuruluşların iş modeli ve stratejilerine entegresine kavramsal destek sunmuştur.
Dünyamızı Dönüştürmek (2015) Paris Anlaşması	17 sürdürülebilir kalkınma amacı ve 169 ilgili hedefle birlikte, evrensel, bütünlük ve dönüştürülebilir 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi geliştirilmiştir. Paris Anlaşması ile de küresel iklim çabasında yeni bir rota çizilmiştir.

## Sürdürülebilirlik Dinamikleri Nelerdir

Sürdürülebilirlik farklı şekillerde tanımlanabilirken, genelde üç temel bileşeni olarak ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarda değerlendirilir. Sadece ekonomik sürdürülebilirlikte başarı, diğer unsurlar göz ardı edildiğinde nihai başarıya ulaştırmaz. Birbirleri arasındaki dengenin sağlanabilmesi de zaruridir (Rosen, 2009).

Her üç boyutun karşılıklı etkileşimleri konusunda farklı çalışmalar sunulmaktadır. Çevre boyutunun sosyal boyut ile etkileşiminde yaşama ve çalışma koşulları ön plana çıkarken; ekonomi boyutu ile etkileşiminde çevresel verimlilik ön plana çıkmaktadır. Buna karşılık sosyal ve ekonomik boyutun, çevre üzerindeki etkileşiminde ise çevre kaynakları hususu öne çıkmaktadır (Gönel, 2018). Sosyal sorumluluk anlayışı temelde, toplumun hayat standardını yükseltip ekonomik kalkınmaya katkı sağlamaya yönelik girişimler olarak tanımlanır (Borsa İstanbul, 2014). Şirketler sürdürülebilir yaklaşıma, genelde çevresel sorunlara karşı hassasiyetlerini vurgulayarak gösterme eğilimindedirler. Ancak, sürdürülebilir yaklaşımın bütüncül, uygulanabilir projeler ile ele alınması gerekir. Bir etiket olarak değerlendirilmenin ötesinde gayret gerektirir.

Ülkelerin sürdürülebilirlikteki risk değerlendirmeleri, özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında farklı yaklaşımlar gösterebilmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkeler için sürdürülebilir kalkınma, uzun vadeli yatırımları gerektirir (Gönel, 2018). Sürdürülebilirlik kapsamında uluslararası alanda yasal düzenlemeler ve yaptırımlar konusunda halen netliğin sağlanamamış olması, ülkeleri her üç boyuta yaklaşımını farklılaştırmaktadır. Ülkelerin ekonomideki sürdürülebilirliğinin sağlanması, sosyal boyutta katkı sağlarken çevresel hassasiyetlerin bazen göz ardı edilmesine neden olabilmektedir. Bu alanda yaşanan çelişkilere verilebilecek örneklerden biri de, Paris Anlaşmasının, ABD'ye getireceği ekonomik yükten oluşan kaygılarından dolayı ABD'nin söz konusu anlaşmadan çekilme kararı almasıdır. Burada da görüleceği gibi ekonomik

boyut ele alınırken, diğer boyutlar tamamen göz ardı edilebilmektedir. Ancak, sürdürülebilirlikte temel yaklaşım tüm boyutlarda dengeli ve bütünlük şeklinde sağlanabilmesidir.

Elkington sürdürülebilirlikte yedi köklü değişikliği; pazarlar, değerler, şeffaflık, ömür devri teknolojisi, ortaklıklar, zaman ve kurumsal yönetim başlıklarında ele almıştır. Sürdürülebilirliğin, belirtilen alanlarda eski yaklaşımlardan ciddi değişimlere neden olması değerlendirilmektedir (Elkington,2018);

- İşletmeler rekabete daha açık pazarlarda iş görecektir.
- Dünya çapında insani ve sosyal değerlerde değişimler görülmektedir.
- Tüm faaliyetlerin uluslararası alanda yoğun bir değerlendirme baskısı altına girmesi, açıklık yaklaşımını yaygınlaştırırken, bilişim teknolojileri ve yeni değerler sistemi, şeffaflığı yönlendiren etmen olmaktadır. Şeffaflık, özellikle firmaların tüm faaliyetleri boyunca açık bir şekilde davranabilmeleri, sorumluluklarında hassasiyeti ve gelişimlerine yönelebilmelerini sağlamaktadır.
- Ürün ve teknolojilerin ömür devrinde, beşikten mezara anlayışıyla, ürünün hammaddeden itibaren elden çıkıncaya kadarki tüm sürecin fonksiyonları değerlendirilmelidir.
- Şirketler veya örgütler arasında oluşturulacak ortak yaşam anlayışında işbirliği yapılaşmaları sağlanmalıdır.
- Zaman anlayışı, gelecek nesillerin hatta yüzyılların dikkate alındığı uzun bir süreye bakışı gerekli kılar.
- Daha iyi bir kurumsal yönetim sistemi, gerçek sürdürülebilir sermayenin oluşturulmasında daha fazla şans demektir. Aynı zamanda sürdürülebilirlik hususu sadece süreç ve ürün tasarımı ile ilgili değil, şirketler ve bunların değer zincirlerini de kapsar.
- Kurumsal yönetimin ana ilkeleri; adillik, şeffaflık, hesap verebilirlik ve

paydaşlara karşı sorumluluktur (Borsa İstanbul, 2014).

Söz konusu değişimler, aynı zamanda sürdürülebilirlik dinamikleri olarak da ele alınabilir. Söz konusu dinamiklere ek olarak; ekosistem, yenilik (inovasyon), verimlilik, denge, adalet, bilinçlenme, toplumsal katılım, sosyal kabul edilebilirlik, estetik, nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler sürdürülebilirlikte önemli etmenler olarak ele alınır.

Sürdürülebilirliğin en temel dinamiği ekosistemdir. **Ekosistem** insanlık için sürdürülebilir gıda, sürdürülebilir yaşam, sürdürülebilir enerji kaynakları konusunda geniş bir kullanım alanı sunar. Bu sebeple ekosistemin dönüşümünün korunması, sürdürülebilirliğin sağlanmasında temel etkidir. Ekosistemin yenilenme hızının, insanlığın tüketim hızının üzerinde tutabilmek gerekir.

Yeni yöntem ve ürünler ile sürdürülebilirliğe önemli katkılarda bulunmaktadır (Yavuz, 2010). Yenilikçi (**İnovatif**) yaklaşımlar, özellikle sorunlara karşı yaratıcı çözümler sunarak ve teknolojik gelişimleri etkin kullanarak sürdürülebilirliğe katkı sağlar.

**Verimliliğin** artırılması ile fayda oranı artarken diğer yandan çevresel zararlar da azalır. Verimliliğin geliştirilmesinde kaynakların kullanımı, yönetimi ve kalitesini de içeren yaklaşımlar sunulur (Rosen, 2009).

Sürdürülebilirliğin temel unsurlarından ekonomik, çevre ve sosyal boyutlar arasında sürekli bir etkileşimi göz önünde tutan bir dinamiktir. Bir boyutta ileri adımlar atılırken, diğer boyutlardaki adımların ihmal edilmesi, sürdürülebilirlikte denge dinamiğini göz ardı etmek olacaktır.

Sürdürülebilirlikte **etik değerler**, sorumlulukları ve toplumsal eşitliği sağlayan ve sürdüren demokratik bir unsurdur. Bu unsur sadece sosyal sorumluluk olarak değil, çevresel düzen ve ekonomik başarı boyutunda da sürdürülebilirlikte önemli bir dinamiktir. Yasaların toplum ve şirketler üzerindeki sade yaptırımını ötesinde, sürdürülebilirlikte destekleyici düzenlemelerin sağlanabilmesi açısından önem kazanır. Sosyal adalette, alım gücünün korunabilmesi önem taşır.

Sürdürülebilirlik kültürünün yaygınlaşması için önemli etmenlerdir. **Bilinçlenme ve sosyal kabul edilebilirlik** yaklaşımlarının yaşam tarzlarındaki düzenlemeler ile sürdürülebilirliğe katkıları artmaktadır.

Şirketlerin sürdürülebilirlik yaklaşımları, hem çalışanları hem de diğer paydaşları üzerinde yüksek katma değerli **güven ve motivasyon** unsurlarını yaratır. Günümüzde kurumsal itibarın oluşmasında sürdürülebilirlik doğrusal bir yaklaşım sağlar.

Yukarıda ele alınan sürdürülebilirlik dinamiklerinde görüleceği gibi, sürdürülebilirlikte geniş bir kavram haritası ortaya konmakta, bu da geniş uygulama alanları yaratmaktadır. Ancak, söz konusu dinamiklerin incelenmesinde bazı yanlış anlamalara açıklık getirmekte fayda var. Örneğin, sürdürülebilir enerjinin sadece yenilenebilir enerji olarak düşünülmesi, bunun yenilenebilir kaynakların kullanımı ile kısıtlı kalabilecek bir yaklaşım olur. Ayrıca, yenilenebilir kaynaklardan enerjinin üretiminde, depolanmasında ve kullanımında da –ömür devri özelliği– sürdürülebilirliğin ele alınması gerekir. Örneğin, günümüzde özellikle Hidroelektrik Santrallerin (HES), çevresel ve sosyo-ekonomik tahribatının ciddi boyutlarda olduğu değerlendirilmektedir. Bu açıdan, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan HES’lerin kurulum ve işletme aşamalarındaki etkileri, onu sürdürülebilirlikten uzak kılmaktadır (Atak & Öztok, 2013). Bu sebeple, sürdürülebilirliğin tüm boyutları ile topyekûn olarak değerlendirilmesi bir zarurettir – denge dinamiği.

Sürdürülebilirliğin tanımı, gelişimi ve dinamiklerinin ele alınması sonrasında öne çıkan uygulama alanlarından birinin, enerjinin sürdürülebilirliğinin olduğu görülmektedir. Enerjinin yaygın kullanımı, ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarındaki önemi ve çevreye olan etkileri açısından enerjinin sürdürülebilirliği, diğer sürdürülebilirlik alanlarından daha büyük önem taşır. Enerjinin verimli kullanımında, enerjinin termodinamik yasaları ile nitelendirilmesi önem arz eder. Birinci kanun enerjinin korunumu, ikincisi de enerjinin kalitesi ile ilgili olup, entropi ve ekserji konseptlerini kapsar. Verimliliğin

artırılması termodinamiğin ikinci yasasında ortaya çıkan ekserji kavramı ile ele alınmaktadır (Rosen, 2009).

### **Binaların ısıtma sistemlerinde yapılan sürdürülebilir yaklaşım nedir?**

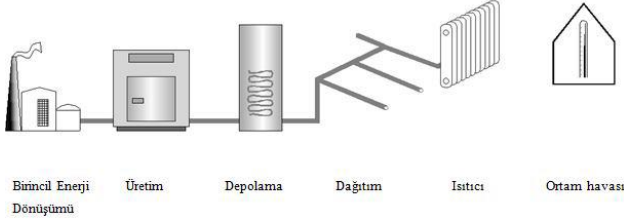
Enerji kaynaklarının verimli kullanımı, ısı sistemleri açısından son derece önemlidir. Bu kapsamda termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarından enerji kaynaklarının (petrol, doğal gaz, kömür vb.) etkin kullanımını sağlayacak şekilde yararlanılmaktadır. Bir ısı sistemine giren enerji farklı biçimlerde olabilir. Örnek olarak yakıt, elektrik veya madde akışı verilebilir. Termodinamiğin birinci kanununa göre enerji yok edilemez. Hâlbuki enerjinin bir bölümü kullanılamaz haldedir. Bu bölüm birinci kanun ile değil, ekserji kavramı ile açıklanabilir. Termodinamiğin ikinci kanunu enerjinin kullanılabilirliği hakkında bilgi vermektedir. Ekserji, enerji kalitesinin bir ölçüsüdür. 1 kJ elektrik ve 1 kJ ısı enerjisi eşit iş potansiyeline sahip değildirler. Ekserji, ortam şartları dikkate alınarak elde edilebilecek en yüksek iş potansiyelidir. Enerji kayıplarının yerini, nedenini ve büyüklüğünü doğru bir şekilde ifade eder.

Ekserji analizi ısı sistemlerinin sürdürülebilirlik performansının değerlendirilmesinde uygun bir araçtır. Söz konusu analiz ortam şartlarını da dikkate alarak enerjinin kullanılabilir kısmına odaklandığı için gerçekçi bir sürdürülebilirlik incelemesine imkân verir.

### **Ekserji Analizinin Isıtma Sistemine Uygulanması**

Ekserji analizi yönteminde termodinamiğin ikinci kanunu ile kütle ve enerjinin korunumu ilkeleri de uygulanmaktadır. Bir sisteme giren ve çıkan enerji akımlarının entalpi değerleri tamamen kullanılabilir değildirler. Tersinmezliklerin belirlenebilmesi için ortam şartları kullanılır. Tersinmezliklerin nedenlerine örnek olarak, sürtünme, dengesiz genişleme, iki akışın karışması, sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi verilebilir.

Bina ısıtma sistemlerine ekserji analizi uygulanması için öncelikle binanın sınır koşulları belirlenir. Bunlar iç ortam sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı, bina iç hacmi ve bina oturma alanıdır. Genel olarak bir binanın ısıtma sistemi basamakları Şekil 1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Bina ısıtma sistemi basamakları.

Bu çalışmada ısıtma sistemi üretim, dağıtım, ısıtıcı, iç ortam havası ve ısının binayı terk ettiği bina kabuğu basamaklarından oluşmaktadır. Üretim basamağında kazan, dağıtım sisteminde borular ve ısıtıcı basamağında radyatörler dikkate alınmıştır.

Isıtma sisteminin her bir basamağına gelen ısı enerji akımları ısı ihtiyacı belirlendikten sonra hesaplanır. Isıtma ihtiyacı aynı zamanda iç ortam havasını belirlenen sıcaklıkta tutabilmek için gereken ısı miktarıdır. Isıtıcı basamağındaki ısı akımı, ısı ihtiyacına ısıtıcı basamağındaki ısı kaybı akımı eklenerek bulunur.

$$\dot{Q}_{ısıtıcı} = \dot{Q}_{ihtiyaç} + \dot{Q}_{kayıp,ısıtıcı} \quad (1)$$

Benzer şekilde tüm basamaklardaki ısı değerler elde edilir. Bir ısıtma sisteminde incelenen enerji akımı için kinetik ve potansiyel enerjilerdeki değişim çok az olduğundan ihmal edilebilir. Tersinmezlikler ise verim tanımı yapıldıktan sonra elde edilmektedir. Isıtma sisteminde bir basamağın ekserji akımı ısı ekserji bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

$$\dot{Ex}_{Q,i} = \dot{Q}_i \cdot \left[ 1 - \frac{T_0}{T_i} \right] \quad (2)$$

Burada  $\dot{Q}$  ısıtma sistemi basamağının ısı akımını belirtmektedir. Eşitlik 2’deki diğer çarpan kısmı ise Carnot verimidir. Isıl enerjinin ne kadarının ısı ekserjiye dönüştürülebildiğinin bir ölçüsüdür.

Analiz sırasında, bina ısıtma sistemi basamaklarına gelen ekserji akımları bulunur. Isıl ekserji akımları ve ekserji kaybı akımları hesaplanır. Bina kabuğundan sonra ekserji akımı sıfır değerini almaktadır.

### Ekserjetik Sürdürülebilirlik Parametreleri

Ekserji analizi tamamlandıktan sonra elde edilen ekserji akımları ekserjetik sürdürülebilirlik parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri arasında ekserji verimi, atık ekserji oranı, çevresel etki faktörü ve ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi sayılabilir. Bu parametreler Midilli ve Dinçer (2009) tarafından tanımlanmıştır.

Ekserji Verimi (EV), ekserji analizinde elde edilen en önemli parametrelerden biridir. Farklı tanımlamalar yapılmakla beraber genellikle maksadımız olan ekserji akımı değerinin giren ekserji akımı değerine oranı olarak ifade edilmektedir.

$$EV = \frac{Ex_{kul}}{\dot{Ex}_{giren}} \quad (3)$$

Isıtma sistemi için her basamakta giren ekserji akım değeri ve o basamakta kullanılan ekserji akımı değerleri dikkate alınmıştır.

Atık Ekserji Oranı (AEO), bir sistemden atılan ekserjinin sisteme giren ekserjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. Isıtma sistemindeki atık ekserji, ilgili basamaktaki ısı kaybı olarak kabul edilmiştir.

$$AEO = \frac{\dot{Ex}_{yıkı} + \dot{Ex}_{kayıp}}{\dot{Ex}_{giren}} \quad (4)$$

Çevresel Etki Faktörü (ÇEF), atık ekserji oranının ekserji verimine oranı olarak ifade edilmektedir.

$$\zeta_{CEF} = \frac{AEO}{EV} \quad (5)$$

Ekserjetik Sürdürülebilirlik Endeksi (ESE), çevresel etki faktörünün çarpmaya göre tersi alınarak bulunur. Düşük çevresel etki yüksek sürdürülebilirlik anlamına gelmektedir.

$$ESE = \frac{1}{\zeta_{CEF}} \quad (6)$$

## Uygulama ve Başarımlar

Bu çalışmada bir binanın ısıtma sistemindeki ısı kayıpları, ekserji analizi yöntemiyle çalışılmıştır. Binanın sınır koşulları Tablo 2’de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Bina sınır koşulları

Veriler	Değerler
Binanın iç hacmi (m <sup>3</sup> )	86667,6
Net döşeme alanı (m <sup>2</sup> )	7222,3
İç ortam sıcaklığı (°C)	20
Dış ortam sıcaklığı (°C)	0

Anaiz edilen ısıtma sisteminde sıcak su kazanlarında kullanılan dizel yakıtın kimyasal ekserjisi ısıl ekserjiye dönüşmektedir. Suya aktarılan ekserji dağıtım hattında yer alan borular vasıtasıyla binanın çeşitli bölgelerine ulaşmaktadır. Isıtıcı olarak kullanılan fan coil sistemi ortam havasını ısıtmaktadır.

Sisteme ilişkin ekserji akımları ve ekserji kaybı akımları Yucer ve Hepbaşlı (2012)’dan uyarlanmış olup Tablo 3’te görülmektedir.

**Tablo 3.** Isıtma sisteminin ekserji analizi sonuçları

Basamak	Ekserji Akımı (kW)	Ekserji Kaybı Akımı (kW)
Üretim	1152,35	987,57
Dağıtım	164,78	49,06
Isıtıcı	115,72	6
İç Ortam Havası	109,72	66,54
Bina Kabuğu	43,18	43,18

Ekserji analizi sonuçları incelendiğinde; üretim basamağında en yüksek ekserji kaybının

meydana geldiği görülmektedir. Yakıtın kimyasal ekserjisi yanma işlemi sonrası tersinmezlikler nedeniyle ısıtıcı akışkana düşük oranda transfer edilmektedir. Üretim basamağındaki ekserjinin %85,7’si kaybedilmiş ve ancak 164,78 kW ekserji akımı dağıtım basamağına aktarılmıştır. Dağıtım basamağına giren ekserji akımının %70,2’si ısıtıcıya transfer edilmiştir. En düşük ekserji kaybı ısıtıcı basamağında olmuştur. Isıtıcıdan geçen akışkanın ekserjisinin yaklaşık %95’i iç ortam havasına aktarılmıştır. Bina kabuğundan 43,18 kW ekserji dış ortama geçmiş ve ekserji değeri sıfır olmuştur.

Ekserji analizi sonuçları kullanılarak ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri hesaplanmıştır. Yalçın (2016) bir evin enerji sisteminin ekserjetik sürdürülebilirlik analizini yapmıştır. Çalışma incelendiğinde fosil enerji kullanan evin çevresel etki faktörü 3,56, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi 0,28 iken, yenilenebilir enerji kullanan evin çevresel etki faktörü 1,25, ekserjetik sürdürülebilirlik indeksi ise 0,8 olarak hesaplanmıştır.

Stougie ve diğ. (2018) fosil ve yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel, ekonomik ve sürdürülebilirlik değerlendirmelerini yapmışlardır. Toplam kümülatif ekserji kaybı yöntemi uygulanmıştır. Güç santrali, biyoyakıt, rüzgar ve güneş enerji kaynakları incelenmiştir. Rüzgar ve güneşin atık ekserji oranları en düşük seviyelerde çıkmıştır. Güç santrali ve biyoyakıtın çevresel etkileri yüksek bulunmuştur.

Bu çalışmada sürdürülebilirlik değerlendirmesi için bulunan parametreler Tablo.4’te görülmektedir.

**Tablo 4.** Hesaplanan ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri

Isıtma Sistemi Basamakları	EV	AEO	ÇEF	ESE
Üretim	0,143	0,857	5,993	0,167
Dağıtım	0,702	0,298	0,424	2,359
Isıtıcı	0,948	0,052	0,055	18,287
İç ortam havası	0,394	0,606	1,541	0,649



Bina kabuğundan ekserji akımının tamamı dışarı atıldığı için sürdürülebilirlik parametreleri açısından değerlendirmeye alınmamıştır. En düşük ekserji verimi üretim basamağında elde edilmiştir. Bunun sonucunda atık ekserji oranı ise 0,857 ile en yüksek değer olmuştur. Çevresel etki faktörü açısından ise yine üretim basamağı 5,993 ile en yüksek olarak bulunmuştur. Sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde; ısıtıcı basamağı 18,287 ile en yüksek değere sahiptir. Ayrıca ekserji verimi 0,948 ve atık ekserji oranı 0,052 elde edilmiştir. İlk ele alınması gereken kısım üretim basamağı yani ısı enerjisinin temin edildiği kazandır. Radyatörlerden olan ısı kaybı nedeniyle meydana gelen çevresel etki faktörü oldukça düşük olup 0,055 olarak bulunmuştur.

Yakın dönemde ekserji analizi ve sürdürülebilirlik parametreleri kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde; Bangladeş'in kırsal bölgesindeki yerleşimin ısıtma sistemlerinin ekserji ve sürdürülebilirlik analizi incelendiğinde ekserji verimi değerleri %4,86 ile %8,42 aralığında bulunmuştur (Chowdhury ve diğ. 2019). AEO ve ESE değerleri de hesaplanmıştır.

Sayadi ve diğ. (2019) bina ısıtma sistemini inceleyerek enerji performansı ile bütün ekserji sonuçlarını dikkate almışlardır. Ekserji verimi sonuçları tüm yıl boyunca hesaplanmış ve %0,91 ile %6,94 aralığında bulunmuştur. Kullanılan kazan ve ısıtıcıların ekserji verimleri incelenmiş, sırasıyla Kazan 1, Kazan 2 ve Isıtıcı için 22,31 , 22,91 ve 57,59 bulunmuştur.

Gojak ve Bajc (2019) konut ısıtmasında kullanılan farklı enerji kaynaklarını incelemişlerdir. ÇEF ve ESE değerleri hesaplanmıştır. En yüksek EV %6 olarak bulunmuştur.

Yapılan çalışmalarda elde edilen parametre sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.** Hesaplanan ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri

Yayımlar	EV (%)	AEO	ÇEF	ESE
Midilli ve Dinçer (2009)	0,29-0,56	0,44-0,57		

Chowdhury ve diğ. (2019)	4,86-8,42	0,79-0,93		
Sayadi ve diğ. (2019)	0,91-6,94			
Gojak ve Bajc (2019)	6	15,37-50	0,065-0,028	

## Sonuçlar

Bu çalışmada bir bina ısıtma sisteminin basamakları ekserji analizi yöntemiyle incelenerek her basamağın sürdürülebilirlik potansiyelleri üzerinde durulmuştur.

Bina sınır koşulları dikkate alınarak tüm basamaklar arasındaki ısı ekserji akımları ve ekserji kayıpları bulunmuştur. Daha sonra elde edilen bulgular yardımıyla ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri hesaplanmıştır. Dikkate değer sonuçlar aşağıda verilmiştir;

a) Ekserji analizi sonuçlarına göre en yüksek ekserji kaybı üretim basamağında gözlenmiştir. 987,57 kW olarak bulunmuştur.

b) Ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri göstermiştir ki en düşük atık ekserji oranı ve çevresel etki faktörü ısıtıcı basamağında elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek ekserji verimi ve ekserjetik sürdürülebilirlik endeksi de ısıtıcıya aittir. Bu değerler sırasıyla %5,2, 0,055, %94,8 ve 18,287 olarak hesaplanmıştır.

c) Ekserji kayıpları değerleri incelendiğinde en düşükten en yükseğe doğru sıralama şu şekildedir: ısıtıcı, dağıtım, iç ortam havası ve üretim basamakları. Hesaplanan ekserji kayıpları 6kW, 49,06kW, 66,54 kW ve 987,57 kW'tır.

ç) Ekserjetik sürdürülebilirlik parametreleri dikkate alındığında, en yüksek EV değeri ısıtıcıya aittir. Onu takip edenler sırasıyla dağıtım, iç ortam havası ve üretim basamaklarıdır.

d) En yüksek AEO ve ÇEF değerleri üretim basamağında gözlenmiş olup 0,857 ve 5,993 olarak hesaplanmıştır.

e) ESE değerlerine bakıldığında en iyi performansa 18,287 ile ısıtıcı sahiptir.

f) Üretim basamağı sürdürülebilirlik açısından en kötü bileşendir. Öncelikle bu bileşenin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İleriye dönük araştırma konusu olarak ısı sistem sürdürülebilirlik performanslarının optimizasyonu planlanmaktadır.

## Kaynaklar

- Atak, E., & Öztok, D. WWF-Türkiye. 10 Soruda Hidroelektrik Santraller. www.wwf.org.tr (20.10.2018).
- Borsa İstanbul, Şirketler İçin Sürdürülebilirlik Rehberi. İstanbul: İMKB, 2014.
- Chowdhury, H., Chowdhury, T., Chowdhury, P., Islam M., Saidur R., Sait S.M., Integrating Sustainability Analysis with Sectoral Exergy Analysis: A Case Study of Rural Residential Sector of Bangladesh, Energy and Buildings 202, 109397, 2019.
- Elkington, J., *Enter The Triple Bottom Line*. "Enhttp://www.johnelkington.com/archive/TBL-elkington-chapter.pdf. (25.10.2018)
- Gojak M., Bajc T., Thermodynamic Sustainability Assessment for Heating of Residential Building, E3S Web of Conferences 111 CLIMA 2019, 04028, 2019.
- Gönel, F.D., Globalleşen Dünyada (Nasıl Bir) Sürdürülebilir Kalkınma. Feride Doğaner Gönel, "http://www.yildiz.edu.tr/~gonel/akademikdosyalar/yayinlar/globallesendunya. (30.10.2018)
- Hitchcock, D., & Marsha Willard., *The Business Guide to Sustainability: Practical Strategies and Tools for Organizations*. Earthscan Publishing. 2006.
- Midilli A., Dinçer I., Development of some exergetic parameters for PEM fuel cells for measuring environmental impact and sustainability, International Journal Of Hydrogen Energy 34, 3858-3872, 2009.
- Montgomery, S. L., Küresel Enerjiye Yön Veren Güçler: 21. Yüzyıl ve Sonrası. TÜBİTAK. 2014 Our Common Future, Brundtland Report. Oxford University Press, 1987.
- Rosen, M. A., Energy Sustainability: A Pragmatic Approach and Illustrations. Sustainability 1(1), 55-80, 2009.
- Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T., Dynamic Exergetic Assessment of Heating and Cooling Systems in a Complex Building, 561-576, 2019.
- Stougie L., Giustozzi N., Van der Kooi H., Stoppato A., Environmental, Economic and Exergetic Sustainability Assessment Of Power Generation From Fossil and Renewable Energy Sources, International Journal of Energy Research 42, 2916-2926, 2018.
- Şirketlerin 2014 Planları, Sürdürülebilirlik Dergisi - Sustainable Business, 2013.
- Yalçın S., Yenilenebilir Enerji Kullanan Bir Evin Ekserjetik Sürdürülebilirlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, 2012.
- Yavuz, V. A., Sürdürülebilirlik Kavramı ve İşletmeler Açısından Sürdürülebilir Üretim Stratejileri, Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 7(14), 63-86, 2010.
- Yucer C.T., Hepbasli A., Exergoeconomic analysis of a heating center from the generation stage to the envelope of the building, Energy and Buildings 47, 592-599, 2012.

## **Sustainability Concept and Exergy Analysis: An Application for Building Heating Systems**

### **Extended abstract**

*In the approach to sustainability, it is essential to consider the needs of future generations in meeting today's needs. Sustainability is becoming a socially accepted concept as well as finding different application areas in today's point of view. Sustainability concept has a 40 years history, but currently it is expressed as sustainable development more frequently. One of the issues addressed in the context of sustainable energy applications is the concept of exergy. This concept come into prominence especially in energy based service applications like heating, lighting etc. In this study, sustainability term is explained and important factors affecting sustainability were mentioned. Sustainable energy applications are widely experienced within sustainability issues. As an application area, a building heating system was investigated.*

*To apply exergy analysis to a building heating system, firstly the boundary conditions are determined. These include indoor temperature, outdoor temperature, volume and floor area of the building. Predesign sheet for an optimised building design is used. The heating system consists of stages. These are generation, distribution, heater and room air. Generation stage stands for the boiler equipment. The pipeline forms the distribution stage. The pipes carry the hot water to the heating equipment in rooms. Heater stage contains the heating equipment as fan coils. The room stage is for the room air.*

*The exergy analysis is based on second law of thermodynamics. The enthalpy of a system can not be converted into work totally. There are irreversibilities. These are due to some situations, namely friction, unbalanced expansion, mix of two flows, heat transfer at finite temperature difference etc. Kinetic and potential exergy values in the heating system components are neglected and assumed to be zero. Irreversibilities are considered in the calculations by defining the efficiencies. Heat losses in the heating system are calculated in exergy rates. The losses in every stage are investigated to obtain the performance parameters.*

*The sustainability performance of each stage is investigated by using four exergetic sustainability indicators. These are exergy efficiency, waste exergy ratio, environmental effect factor and exergetic sustainability index. Exergy efficiency (EE) is one of the most important factors that investigates the ratio between the availabilities of our purpose of energy and the input energy. Waste exergy ratio (WER) is defined as the ratio between the waste exergy and the input exergy. In the heating systems, the waste exergy represents the heat losses that can not be recovered. Environmental effect factor (EEF) is an important indicator. It investigates the environmental damage that the heating system causes because of the waste exergy output. Exergetic sustainability index (ESI) is defined as the inverse of the environmental effect factor.*

*The maximum exergy input rate, the maximum and minimum exergy loss rates were calculated. The best sustainability performance of stages were analyzed by obtaining the exergetic sustainability indicators. The best sustainability performances were identified for distribution stage for all of the four sustainability indicators. According to the exergy analysis, the worst component was generation stage. The highest exergy loss was observed in the boiler. It should be improved to make the heating system more efficient and sustainable.*

**Keywords:** Exergy, Sustainability, Energy Efficiency, Heating System.