

ENERJİ DÖNÜŞÜMLERİNİN KULLANILABİLİRLİK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU

ÖZET

Çeşitli fosil ve yenilenebilir enerji kaynakları; benzer dönüştürme koşullarında, elektriksel güç ve ısı güç üretimi açısından karşılaştırıldığında “verimlilik” tanımının, “sürdürülebilirlik” çabasında yetersiz kaldığı görülmektedir. Örneğin; “jeotermal” ve “rüzgar” kaynaklarının her ikisinin de yeterli olduğu bir yörede, bu kaynakların hangisinin ne amaçla (doğrudan elektrik enerjisi üretimi, hidrojen üretimi, ısı pompası uygulamaları) dönüştürüleceği konusunda verilecek olan karar, “etkinlik” ölçütüne bağlı olmalıdır. Etkin olan kaynak “sürdürülebilir” de olacaktır. “Verimli” dönüştürülemeyen kömür kaynaklarının, “reform” edilerek hidrojen üretilmesi ile yeni teknolojiler kullanılarak “verimli” yakılması, “sürdürülebilirlik” açısından karşılaştırıldığında da aynı sonuca ulaşılır.

Bu çalışmada, “enerji”, “verimlilik” ve “çevre” arasındaki ilişki, termodinamik ve sürdürülebilirlik açısından ele alınmakta; “verimlilik” ve “etkinlik” kavramları arasındaki ayrımın, enerji dönüşümü projelerindeki etkisi irdelenmektedir. Bir kaynağın “sürdürülebilirlik” özelliğini kazanması için; “enerji dönüşüm sistemi”, o kaynağın ve alternatiflerinin iş yapma potansiyellerindeki değişim ve çevre etkileri açısından karşılaştırmalı olarak tasarlanmalıdır.

Bu bağlamda, çalışmada, “etkinlik” ve “hayat boyu değerlendirme” kavramları birleştirilerek “Toplam Hayat Boyu Etkinlik” (THBE) şeklinde isimlendirilen bir ölçüt geliştirilmiştir. THBE değerlendirmesi, çeşitli dönüşümlere uygulanmış, sayısal örneklerle tartışılmıştır. Bu dönüşümlerin yanısıra; enerji tasarrufunun, “toplam etkinlik artışı”na katkısı da açıklanmıştır. Böylece, enerji üreten ve kullanan sistemlerinin tasarımı ve yatırımlarında teknik açıdan gözetilmesi gereken ölçütlerin genişletilmesi gereği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Kullanılabilirlik, Yenilenebilir enerji, Toplam Hayat Boyu Etkinlik (THBE)

ABSTRACT

The interaction between the efficiency, effectiveness and sustainability has been investigated based on technical and environmental aspects. It has been concluded that none of these concepts are sufficient to define the sustainability of an energy conversion system. For example, generating hydrogen via steam reforming or wind source electricity should be evaluated based on effectiveness, as well as efficiency. Assuming, sustainability as keeping the availability of the sources for the near future, the criteria called Total Life Long Effectiveness (TLLE) has been defined and explained. In addition to the comparison of the several conversion systems, and the hydrogen generation technologies, TLLE values for energy saving via insulation has also been calculated.

Key Words: Sustainability, Availability, Renewable Energy, Total Life Long Effectiveness (TLLE)

1. GİRİŞ

Enerji, dünya gündeminde sürekli olarak, iki nedenden dolayı yer almaktadır: Birincisi; herkesin bildiği gibi kaynakların yetersizliği; ikincisi ise dönüşüm teknolojilerinin çevreye verdikleri zarar. Gerekli olup olmadığı başka bir tartışma konusu olan “hayat standartları” ile enerji tüketimi arasındaki ilişki düşünüldüğünde, kaynakların miktarının hiç bir zaman yeterli olamayacağı; yeterli miktarın “sonsuz miktar” anlamına geleceği açıktır. Neyse ki, bu “sonsuz” a ulaşmanın olanakları var: Doğal ve tekrarlanabilir kaynaklar. Dünyanın güneşin ve kendisinin çevresinde dönmesinden ve yerçekiminden kaynaklanan kaynaklar. Ancak; “yenilenebilir” olarak adlandırılan bu kaynakların dönüşüm teknolojilerinin de, “yenilenebilir” ve “sürdürülebilir” olması gerekmektedir.

Bu açıdan, “yenilenebilir” enerji literatüründeki bazı kavramlara açıklık getirmek gerekir. “Alternatif enerji” tanımı, günün birinde bitecekleri kesin olan “fosil” yakıtların yerlerini dolduracak kaynaklar için kullanılarak, bu kaynaklara, aynı zamanda “sürdürülebilir enerji” vurgusu da yapılmaktadır. Çoğu kez, bir kaynağın, “yenilenebilir” olması, “alternatif” ve “sürdürülebilir” olması ile aynı çağrışımı yapmaktadır.

Oysa; “yenilenebilir” enerji kaynağı, yalnızca, “en azından tüketildiği kadar çoğalan” enerji kaynağıdır. Bu kaynak, fosil yakıtlarla karşılanan ihtiyacı giderebilecek şekilde dönüştürüldüğünde “alternatif” olabilir. Fakat; bu dönüşümün doğanın sürdürülebilirliğine olumsuz etkisinin olmaması gerekir. Örneğin; güneş sonsuz bir enerji kaynağıdır. Fakat; güneş enerjisini, elektrik enerjisine dönüştürmede gerekli olan panellerin üretimi için harcanan fosil enerji miktarı da değerlendirmeye alınmalı [1], bu üretim sırasında çevreye verilecek zararın doğanın sürdürülebilirliği üzerindeki etkileri irdelenmelidir.

Genel olarak, yenilenebilir bir enerji kaynağının, fosil yakıtlara alternatif olabilmesi için, bu kaynağın dönüşümünün, çevrenin “sürdürülebilir” olma özelliğine zarar vermemesi gerekir. Tablo 1.1’de bu açıdan bir sınıflandırma yapılmıştır. Hidrolik, biyolojik ve tarımsal kaynaklar (hidroelektrik, biyokütle, orman ürünleri) çağlardır kullanılmaktadır. Tablo 1’de, bu kaynakların geleneksel dönüşümlerinin, örneğin akarsu düşüşünü, tarımsal gübre miktarını, orman alanını azaltmayacağına güvencesini kimse veremez. Zaten; yüzyıllardır yaşanan olumsuzlukların bir yönü de, bilinçsizce dönüştürülen doğal kaynakların tüketilmesi, doğadan uzak gündelik hayatın daha fazla enerji tüketimi odaklı olmasıdır.

Tablo 1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.

	Birincil fosil kaynaklar	Birincil yenilenebilir kaynaklar	Fosil tabanlı ikincil kaynaklar	Yenilenebilir tabanlı ikincil kaynaklar
Geleneksel	-Kömür -Petrol -Gaz	-Hidrolik (Küçük ölçekli) -Biyo kütleli (hayvan atıkları) -Tarımsal -Güneş (Kullanım suyu)	-Kömür, petrol ürünleri ve gazdan üretilen elektrik -Kömür, petrol ürünleri ve gazdan üretilen elektrik ile elektroliz yapılarak elde edilen hidrojen	-Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen elektrik -Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen elektrik ile elektroliz yapılarak elde edilen hidrojen
Modern		-Hidrolik (Büyük barajlar) -Jeotermal -Rüzgar -Güneş (Doğrudan elektrik üretimi) -Biyoyakıtlar -Enerji ormanları	-Fosil yakıtların reformasyonu ile elde edilen hidrojen	

2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI

“Sürdürülebilirlik” tanımı, birçok alanda kullanılmaktadır. Anlamı, bugünü, yarını engellemeden yaşamak olan [2] “sürdürülebilirlik”; enerji üretim teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda, enerji kaynağının yenilenebilirliği ile birlikte sorgulanmaya başlanmıştır. Ancak; enerji dönüşümlerinin sürdürülebilirliği, daha çok Hayat Boyu Değerlendirme (Life Cycle Analysis, LCA) ve “ekserji” (kullanılabilirlik) analizleri ile birlikte ele alınmaktadır. Termodinamik literatüründe LCA ile kullanılabilirlik analizlerini birleştiren gelişmiş yöntemler bulunmaktadır [3]. LCA, yönteminde, bir üretim sürecine giren ve bu süreç sonunda çıkan malzeme, enerji, madde salımı, katı atık ve maliyet ile çevrenin etkileşimi değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme kriteri, termodinamik açıdan ele alındığında, sistem ve çevresinin kullanılabilirliğindeki azalmanın hesaplanması gerekmektedir. Literatürde bu konuda çok sayıda yayın bulunmakla birlikte, “kullanıcısı”nın ve “karar vericisi”nin bakış açısından, enerji dönüşüm süreçlerinin dinamik yapısını yeniden ele almakta fayda vardır.

Sürdürülebilirlik, “üretebilme yeteneğinin yakın gelecekte korunması” olarak da tanımlanmaktadır [4]. Enerji üretimi açısından, bu durum, elbette, kaynakların kullanılabilirliği ile özdeşdir. Bir başka “sürdürülebilirlik” tanımı ise, “yeryüzünde hayatın tümleşikliğinin sağlanması ve iyileştirilmesi”dir [5]. Enerji üretiminin sürmemesi durumunda, bu tümleşikliğin gittikçe bozulacağı açıktır. Bu açıdan Hayat Boyu Değerlendirme (HBD) yaklaşımı ile “Kullanılabilirliğin Az Harcanması” birbirlerini tamamlayan yöntemlerdir. Her iki yaklaşımın birlikte ele alınması, örneğin, biyoyakıt kullanımının, zaman zaman benzin kullanımından daha fazla kullanılabilirlik kaybına yol açacağını gösterebilmektedir [6]

3. VERİM, ETKİNLİK VE TOPLAM HAYAT BOYU ETKİNLİK

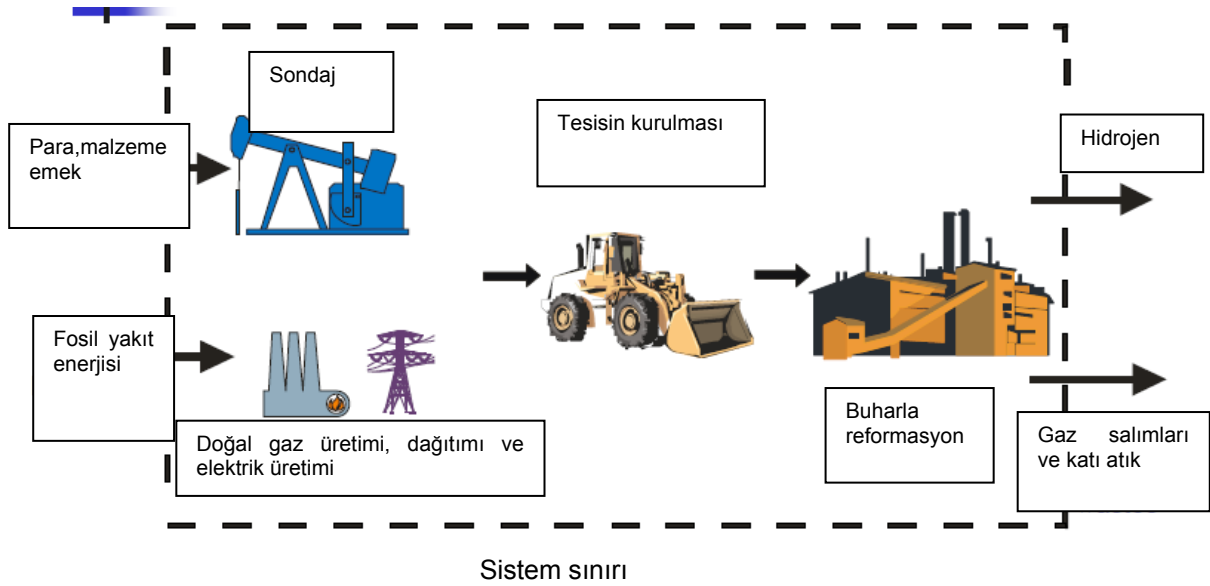
Elektrik enerjisi üretimi amacıyla yapılan belli başlı enerji dönüşümlerinin verim ve etkinlik tanımlarının listelendiği Tablo 2 incelendiğinde, görülmektedir ki, bir enerji dönüşüm sisteminin kullandığı kaynağın sürdürülebilirliğine etkisinin ölçütü “verim” değil; “etkinlik” olmaktadır. Ancak; etkinlik kavramını oluşturan “kullanılabilirlik” de, tek başına “sürdürülebilirlik” niteliğini sisteme kazandıramamaktadır.

Tablo 2. Elektrik Enerjisi Elde Etmek İçin Kullanılan Kaynaklar ve Verim.

Dönüşüm Sistemi	Enerji Kaynağı	İdeal Verim Tanımı	Gerçek Verim Değerleri	Etkinlik
Buhar ve Gaz Çevrimleri	Fosil Jeotermal	Carnot	Fosil yakıtlar için ~%40 Jeotermal kaynak için ~%10	Elde edilen elektriksel güç /kaynağın kullanılabilirliğinde birim zamandaki azalma
Rüzgar Türbinleri	Kinetik	Betz	~%40	Elde edilen elektriksel güç /rüzgarın kinetik enerjisinden elde edilebilecek güç
Güneş Panelleri	Foton	Kısa devre akımı x açık devre gerilimi/Gelen ışınım x panel alanı	~%20	Elde edilen elektriksel güç / Birim alana gelen güneş ışınımı x panel alanı
Yakıt Pilleri	Kimyasal	Gibbs serbest enerjisi/Çalışma akışkanının oluşum entalpisi	~%40-80 (çalışma sıcaklığına göre)	Elde edilen elektriksel güç / Çalışma akışkanının kullanılabilirliğinde birim zamandaki azalma

İç enerji ve kimyasal enerji kaynaklı dönüşümlerde, kaynağın kullanılabilirliğinin bir bölümünü saklamak olanaklı iken (sırasıyla buhar ve gaz çevrimlerinde ve yakıt pillerinde); kinetik enerji ve foton enerjisi kaynaklı dönüşümlerde (rüzgar türbini ve güneş panellerinde), kaynağın tüm potansiyeli harcanmaktadır. Bu durumda, önerilen tasarım, üretilecek elektrik enerjisinin maksimum olması yönündedir. Tablo 2’de yakıt pilleri olarak, yalnızca anot-kanot-elektrolitten oluşan “göze”nin ele alındığını, çalışma akışkanının (çoğu kez hidrojen) üretimi için gerekli düzeneğin değerlendirilmediği de vurgulanmalıdır.

Gerek bu sistemlerde, gerekse diğer enerji dönüşümlerinde yapılacak bir Hayat Boyu Değerlendirme (HBD) de, kaynak ile birlikte toplam çevrenin de sürdürülebilirliği konusunda yeterli bilgiyi sağlayamayacaktır. HBD, yukarıda belirtildiği gibi, bir dönüşüm sistemine giren ve çıkan malzeme, enerji, madde salımı, katı atık ve maliyet ile çevrenin etkileşimini (Şekil 1); Ekserji Odaklı Hayat Boyu Değerlendirme (EHBD) ise, bu değerlere ilave olarak toplam kullanılabilirlik değişimini incelemektedir [7].



Şekil 1. İkincil Enerji Kaynağı Üretiminde HBD İçin Seçilen Sistem Ve Çevre Etkileşimleri.

Ancak; buradaki toplam maliyet, salım, malzeme ve kullanılabilirlik değişiminin yanısıra; varolan ve öngörülen dönemdeki koşullarda bu değişimlerin gereklilikleri de değerlendirilmelidir. Örneğin; bir güç santrali tasarımı ve kurulumu için tera joule mertebesinde enerji ve kullanılabilirlik harcaması gerekiyorsa, bu harcamaların karşılığında kazanılan potansiyeli değerlendirmek; bu harcamalardan vazgeçilmesi ya da alternatif bir çözüm uygulanması durumunda oluşacak etkiyi kurgulamak gerekir. “Toplam hayat boyu etkinlik” (THBE) şeklinde özetlenebilecek bu yaklaşımda, dönüşüm sonucunda ortaya çıkan olumsuz etmenlerin (maliyet, salım, katı atık gibi), farklı dönüşüm koşullarındaki payları da göz önüne alınır:

$$THBE = \epsilon \left(1 - \prod_{k=1}^n \frac{F_k \varphi_c}{A_{k,alternatif}} \right) \quad (1)$$

Burada; ϵ , kurulması düşünülen sistemin etkinlik değeri (Tablo 2), F_k , birim güç veya birim enerji başına olumsuzluk etmeni (örneğin, yatırım maliyeti/kurulu güç, salım miktarı/toplam enerji, kullanılabilirlik kaybı/soğutma yükü...); φ_c , aynı etkinlik değerinde, alternatif sistemden elde edilecek kullanılabilir enerji, A_k ise alternatif sistemin toplam olumsuzluk etmenidir. Böylece, sistemin tek başına etkinlik değeri değil; diğer sistemlerle etkinlik ve çevre etkisi değerlendirmesini de yapmak mümkün olacak; güneş ve rüzgar gibi sonsuz kaynak kullanımlarında, etkinlik artışı yalnızca üretilen kullanılabilirliğin artışına değil; alternatif çözümlerdeki olumsuzlukların miktarına bağlı olarak değerlendirilebilecektir.

Örneğin; güneş panelleri uygulamasında, malzemenin “dolgu faktörü”nü artırarak, etkinlik yükseltilebilir. Fakat; aynı etkinlik değerinde elektriksel güç üretebilecek alternatif bir uygulamada, salım, maliyet, katı atık vb.’nin miktarı, güneş panellerinden oluşan sistemdeki miktarlara göre düşük ise, güneş panelleri sisteminin alternatif sisteme göre THBE değeri negatif çıkabilir.

Bu ilişkiyi çeşitli örnek uygulamalarla göstermek mümkündür.

3.1. Elektrik Enerjisi Üretiminde THBE Karşılaştırması

Bu uygulamada, yarı iletken malzemelerin, foton enerjisinin tetikleme ile gösterdikleri davranıştan yararlanan “güneşten doğrudan elektrik enerjisi üretimi” sistemi ile jeotermal kaynaklı, kömür kaynaklı ve rüzgar enerjisi kaynaklı sistemler karşılaştırılacaktır. Ele alınan “Güneşten doğrudan elektrik enerjisi üretimi” sistemindeki gözelerden her biri 0.125 x 0.125 m² alana sahiptir ve 1000 W/m² güneş ışınımı altında 2.53 W elektrik gücü sağlamaktadırlar. 4 MW elektrik gücüne gereksinim duyulan bir yerde, bu hücrelerden yaklaşık 1 milyon 600 bin tane olması gerekir. Kurulacak sistemin etkinliği:

$$\epsilon = \frac{4 \times 10^6}{1000 \times 0.125 \times 0.125 \times 1.6 \times 10^6} = 0.16 \quad (2)$$

olarak bulunur. Bu etkinlik değeri, jeotermal enerji kaynakları için ulaşılabilir bir değerdir. Güneş panellerinin yatırım gideri olarak, literatürde 3\$/W kabul edilmektedir [8]. Böylece,

$$A_{GP} = 1.2 \times 10^7 \text{ \$} \quad (3)$$

olur. (GP: Güneş panelleri)

25,000 m² alanda, 12 milyon \$ harcanarak yapılacak %16 etkinlik değerine sahip bu sistemin kurulacağı yerde, 225°C sıcaklığında, 8 bar basınçta jeotermal enerji kaynağı bulunsun. Kuyu açma maliyetleri gözönüne alınmayıp, yalnızca üretim ve dönüş kuyularının koşullarına göre hesap yapılsın.

Bu kaynak kullanılarak elektrik enerjisi üretildiğinde dönüş (re-enjeksiyon) kuyusuna giden suyun sıcaklığı 75°C, basıncı 40 kPa’dır [9]. Bu sistemde 0.16 etkinlik ile elde edilecek elektriksel güç;

$$W_e = \eta_e = 0.16 \times (\varphi_{225^\circ\text{C}, 8 \text{ MPa}} - \varphi_{75^\circ\text{C}, 40 \text{ kPa}}) \cong 4.6 \text{ MW} \quad (4)$$

olarak bulunur.

Kuyu açma maliyetleri (tek bir kuyu 3 milyon doları geçebilmekte [10]) düşünülmediğinde, bir jeotermal güç üretim sisteminin kurulum maliyeti 5000 \$/kW [11] olarak hesaplanmaktadır.. Denklem (1)’de değerler yerine konduğunda, güneş panelleri yerine, verilen koşullarda jeotermal güç üretim sisteminin bir alternatif olduğu görülmektedir:

$$\epsilon = 0.16 \left(1 - \frac{3 \left(\frac{\$}{\text{m}^2} \right) \times 4,600,000}{5 \left(\frac{\$}{\text{m}^2} \right) \times 4,600,000} \right) = 0.16 \times 0.4 \quad (5)$$

Burada, kuyu açma maliyeti göz önüne alınmadığı için, özgün sistemin etkinlik değerinde, birim maliyet oranı şeklinde bir azalma olacağı izlenimi doğmaktadır. Oysa (1) denklemindeki parantezin içindeki çarpan (π) terimi “olumsuzluk oranını” vermektedir. Bu örnekte, kuyu açma maliyeti de gözönüne alınsaydı,

$$\epsilon = 0.16 \left(1 - \frac{3 \left(\frac{\$}{\text{m}^2} \right) \times 4,600,000}{5 \left(\frac{\$}{\text{m}^2} \right) \times 4,600,000 + 3,000,000 \text{ \$}} \right) = 0.16 \times 0.47 = 0.0752 \quad (6)$$

olacaktı (Tablo 3).

Bu demektir, ki alternatif sistemdeki olumsuzluklar arttıkça, özgün sistemin etkinliği daha az azalmaktadır. Toplam olumsuzluk çarpanı, maliyet dışındaki etmenlerle birlikte farklı değerler alabilir. Örneğin, açığa çıkan gaz salımları, güneş panelleri ve burada ele alınan jeotermal sistem için, sırasıyla, 100 g/kWh ve 125 g/kWh olarak hesaplanmışlardır [12]. Enerji dönüşümlerinin gerçekleştirildiği tesislerin kurulması aşamasında harcanan çelik miktarı ise, yaklaşık olarak, güneş panelleri için 1117 ton/MW, jeotermal güç sistemleri için 25 ton/MW olarak verilmektedir [12]. İki sistemin karşılaştırılması sonucu negatif çıkan THBE değeri, bu uygulama için jeotermal kaynaklı sistemin, sürdürülebilirlik açısından, güneş panelleri ile kurulan sisteme göre daha olumlu olduğu sonucunu göstermektedir.

Tablo 3. Güneş panelleri ile doğrudan elektrik üretimi sisteminin jeotermal enerji sistemlerine göre toplam hayat boyu etkinlik (THBE) değerlendirmesi.

Olumsuzluk etmeni k	GP F_k	Jeotermal sistem F_k	A_k	Olumsuzluk oranı	Olumsuzluk çarpanı
Maliyet (\$/W)	3	5	$5 \times 4.6 \times 10^6 + 3 \times 10^6 = 2.6 \times 10^7$ [\$]	$3 \times 4.6 \times 10^6 / 2.6 \times 10^7 = 0.53$	1-0.53=0.47
Salım (Küresel ısınma etkili gaz) g/kWh	100	125	$125 \times 4.6 \times 10^3 \times \text{süre} = 5.75 \times 10^3 \times \text{süre}$ [g]	100/125=0.8	1-0.8=0.2
Malzeme (Çelik) ton/MW	1117	25	$25 \times 4.6 = 115$ ton	1117/25=44.68	1-44.68=-43.68
Toplam olumsuzluk oranı ve çarpanı				~18	-17

Alternatif dönüşüm kömür kaynaklı bir güç santrali ise, yakıtın ısı değeri 20,000 kJ/kg olması kabulü ile, 0.16 etkinlik değerinde, yaklaşık 2 MW güç elde edilebilir. Bu nedenle amaçlanan enerji miktarı/sağlanan enerji miktarı oranı olumsuzluk etmeni olarak ilave edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Güneş panelleri ile doğrudan elektrik üretimi sisteminin kömür kaynaklı güç sistemine göre toplam hayat boyu etkinlik (THBE) değerlendirmesi.

Olumsuzluk etmeni k	GP F_k	Kömür kaynaklı güç üretim sistemi F_k	A_k	Toplam olumsuzluk oranı	Toplam olumsuzluk çarpanı
Maliyet (\$/W)	3	1	2 \$	1.5	-0.5
Salım (Küresel ısınma etkili gaz) g/kWh	100	1250	0.25 x süre	0.08	0.92
Malzeme (Çelik) ton/MW	1117	80	160 ton	~14	-13
Amaçlanan enerji miktarı/sağlanan enerji miktarı	1	2	4	0.5	0.5
Toplam olumsuzluk oranı ve çarpanı				0.672	0.328

Güneş kaynaklı ve rüzgar kaynaklı sistemlerin karşılaştırmasını yapmak amacıyla; güç katsayısı, güneş panelleri için elde edilen etkinlik değerine eşit olan bir rüzgar türbininin, ortalama rüzgar hızında üreteceği güç hesaplanmıştır. Rüzgarın kinetik enerjisinden yararlanma oranı olarak tanımlanan ve ideal değeri Betz limiti (Tablo 2) olan güç katsayısı için, 0.16, düşük bir değerdir. 3 kanatlı düşey rüzgar türbinlerinde, ancak çok düşük kanat ucu hızı/rüzgar hızı oranlarında (tip speed ratio, tsr) sözkonusu olan bu değerle, nominal 13 m/ s rüzgar hızında 70 m çapında bir rotorla yaklaşık 800 kW güç üretebilir. Tesisin kurulumu sırasında tüketilen malzemenin yanısıra, gaz salımlarının da az olması, güneş panellerinin rüzgar türbinine göre THBE değerini negatif yapmakta, bir diğer deyişle rüzgar kaynaklı sistemin sürdürülebilirlik açısından burada ele alınan olumsuzluk etkenleri içerisinde, güneş kaynaklı sisteme tercih edilmesi gerektiği sonucu çıkmaktadır.

Tablo 5. Güneş panelleri ile doğrudan elektrik üretimi sisteminin rüzgar türbinlerinden oluşan elektrik üretim sistemine göre toplam hayat boyu etkinlik (THBE) değerlendirmesi.

Olumsuzluk etmeni k	GP F _k	Rüzgar kaynaklı güç üretim sistemi	A _k F _k	Toplam olumsuzluk oranı	Toplam olumsuzluk çarpanı
Maliyet (\$/W)	3	4	2.4million \$	0.75	0.25
Salım (Küresel ısınma etkili gaz) g/kWh	100	10	8 x süre	10	-9
Malzeme (Çelik) ton/MW	1117	110	880 ton	~10	-9
Amaçlanan enerji miktarı/sağlanan enerji miktarı	1	5	4	0.2	0.8
Toplam çarpan				15	-14

Yukarıda verilen örneklerde, amaç elektrik işi olduğu için, kullanılabilirlik ile iş özdeş olarak alınmıştır. Bu nedenle, (1) eşitliğindeki çarpan işlecinin içindeki

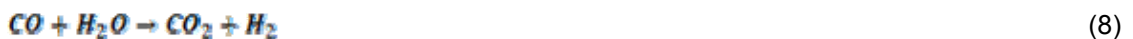
$$\frac{F_k \Phi_{ait}}{A_k}$$

terimi, birim olumsuzluk etmeni oranına dönüşmektedir. Amaçlanan enerjinin kullanılabilirlikle özdeş olmadığı durumlarda bu indirgeme söz konusu değildir. Örneğin, ısı enerjisi amaçlı dönüştürmelerde THBE hesapları daha ayrıntılı yapılmalıdır. Hidrojen üretimi sistemlerinin seçimi ve yalıtım malzemelerinin belirlenmesi iki uygulama olarak aşağıda verilmiştir.

3.2. Hidrojen Üretim Sistemlerinin Karşılaştırılması

İkincil enerji kaynağı olan hidrojenin üretiminin, sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi, hem bu üretim aşamasının, hem de fosil kaynakların çevresel etkileri açısından önemlidir. Fosil kaynakların yakılarak enerji üretilmesi yerine, reforme edilerek (FYR) açığa çıkacak hidrojenin yakılması ya da yakıt hücrelerinde kullanılması önerilen bir yöntemdir [13]. Şekil 1.'de bu sistemin hayat boyu değerlendirilmesi için oluşturulan sistem ve sınırı görülmektedir.

Reforme işlemi aşağıdaki reaksiyonlardan oluşmaktadır:



(7) sayılı eşitlik ile verilen reaksiyon için kmol başına 206 kJ ısı gerekmektedir. CO gazından hidrojen elde edilmesi sırasında ise kmol başına 41 kJ ısı elde edilir.

Bu bilgilerin ışığında, fosil yakıttan hidrojen elde edilmesi sırasında, 1 MJ fosil yakıt enerjisine karşılık, üretilen hidrojenin enerjisinin 0.64 MJ olduğu; buna karşılık, hidrojenin, rüzgar türbininden elde edilen elektrikle elektroliz yapılması yoluyla üretilmesinde, tüketilen her 1 MJ fosil yakıt enerjisi için 20 MJ hidrojen enerjisi elde edildiği hesaplanmıştır [13]. Rüzgar kaynaklı hidrojen elde edilmesinde fosil yakıt, sistemin kurulumu sırasında harcanmaktadır. Yine sistemin kurulması sırasında, kurulan sistemin üreteceği hidrojenin her 1 kg'ı için 650 g CO₂ salımı olduğu ve bunun fosil yakıtlardan reformasyon yoluyla hidrojen elde edilmesi sırasında açığa çıkan CO₂'nin yalnızca, %5'i olduğu bilinmektedir. Fosil yakıtın reformasyonu ile hidrojen üretilmesini, rüzgar kaynaklı elektrik ile hidrojen üretilmesine üstün kılan tek etmenin maliyet olduğu vurgulanmaktadır [13].

Konuya THBE açısından yaklaşıldığında, farklı bir sonuca ulaşılır.

Fosil yakıt reformasyonu için etkinlik tanımı:

$$\epsilon_{FYR} = \frac{\text{elde edilen hidrojenin kullanılabilirliği}}{\text{reformasyon edilecek fosil kaynağın kullanılabilirliğindeki azalma}} \quad (10)$$

şeklinde dir.

(10) eşitliğindeki değerin rüzgarın teorik gücü ile çarpımı, aynı etkinlikte rüzgar enerjisinden elde edilen elektrikle elektroliz yapılarak (Rüzgar enerjisi ile elektroliz, REE) üretilen hidrojenin kullanılabilirliğini verir:

$$\varphi_{REE} = \epsilon_{FYR} \frac{1}{2} P_{teo} \quad (11)$$

Hidrojen üretimi sırasında oluşan olumsuzluk etkenleri, maliyet (c), CO₂ miktarı (e), harcanan malzeme (s) şeklinde sıralandığında, FYR ile hidrojen üretiminin Toplam Hayat Boyu Etkinliği

$$THBE_{FYR} = \epsilon_{FYR} \left(1 - \frac{1}{\epsilon_{REE,1} \epsilon_{REE,2} \epsilon_{REE,3}} \epsilon_{FYR}^3 P_{teo}^3 \right) \quad (12)$$

P_{teo} (rüzgarın teorik gücü), rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan, yüksek rüzgar hızlarında REE yöntemi, düşük rüzgar hızlarında ise FYR uygun hidrojen üretim yöntemidir. (Yüksek rüzgar hızlarında THBE_{FYR} değeri negatif çıkacaktır.)

3.3. Enerji Tasarrufu ve THBE

Herhangi bir yöntemle tasarruf edilen enerjinin kullanılabilirliğinin, bu tasarruf miktarı için harcanan enerjinin kullanılabilirliğine oranı, tasarrufun ısı açıdan etkinliğini verir. Herhangi bir dönüşüm sisteminin etkinliği, tasarruf için harcanan kullanılabilirlikle çarpıldığında (1) eşitliğindeki φ_{alt} terimi tasarruf için elde edilebilir. Enerji tasarrufu uygulamalarında amaçlanan enerjinin/sağlanan enerjiye oranı düşük olacak; dolayısıyla, tüm enerji dönüşüm sistemleri için, enerji tasarrufu uygulamaları ile karşılaştırmalı THBE değerleri azalacaktır.

Bir enerji dönüşümündeki veya gereksinilen enerji miktarını azaltmak için uygulanacak yalıtım malzemesinin üretimindeki olumsuzluk etmenleri maliyet (c), CO₂ miktarı (e), harcanan malzeme (s) ve yukarıda belirtildiği gibi amaçlanan enerjinin/sağlanan enerjiye oranı (o) olsun. Enerji dönüşüm sisteminin yalıtıma göre THBE değeri

$$THBE_{EDS} = \epsilon_{EDS} \left(1 - \frac{\epsilon_{EDS,1} \epsilon_{EDS,2} \epsilon_{EDS,3} \epsilon_{EDS,4}}{\epsilon_{YAL,1} \epsilon_{YAL,2} \epsilon_{YAL,3} \epsilon_{YAL,4}} \epsilon_{EDS}^4 (\Delta\varphi)_{YAL}^4 \right) \quad (13)$$

olacaktır.

Burada $A_{YAL,o}$, amaçlanan enerjinin/sağlanan enerjiye oranı ($F_{YAL,o}$) değeri ile yalıtım üretiminde harcanan enerjinin çarpımıdır. Bu oran, enerji dönüşüm sistemindeki karşılığına göre çok düşük olacaktır. Bu durumda, enerji dönüşüm sisteminin THBE değerinin yalıtım uygulamasına göre negatif değer verebilmesi için yalıtım malzemesi üretiminin maliyeti ($A_{YAL,c}$), bu üretim sırasındaki gaz salımı ($A_{YAL,g}$) ve harcanan malzeme ($A_{YAL,m}$) değerlerinin de enerji dönüşüm sistemindeki karşılıklarına göre çok düşük olmaları gerekir. Uluslararası ISO 14040 standartlarına [14], Ardante etal.] göre yapılacak bir analiz, bir enerji dönüşüm sisteminin yalıtım uygulamalarına göre THBE değerinin belirlenmesini sağlayacaktır.

SONUÇ

Bu çalışmada enerjinin üretimine ve tasarrufuna yönelik sistem ve yöntemler, sürdürülebilirlik açısından irdelenmiş; uygulamaların birbirlerine göreceli olarak değerlendirilmeleri için bir ölçüt geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

- Verim ve kullanılabilirlik temelinde yapılan değerlendirmeler, enerji sorununun çözümü için yeterli değildir.
- Enerji kaynağının yenilenebilir olmasının yanı sıra, enerji dönüşüm sisteminin de sürdürülebilir olması gereklidir.
- Etkin enerji dönüşümü, kaynağın sürdürülebilirliğini sağlar.
- Etkinlik ve Hayat Boyu Değerlendirme kavramları göreceli olarak ilişkilendirilerek bir ölçüt oluşturulmuştur.
- Bir enerji dönüşüm sisteminin ya da uygulamasının bir diğerine göre karşılaştırmasında tanımlanan bu ölçüt (THBE) negatif ise, karşılaştırmanın yapıldığı sistem ya da uygulama tercih edilmelidir.
- THBE tanımındaki olumsuzluk etmenleri maliyet, gaz salımı, malzeme girdisi ile sınırlı kalmamalı, “biyolojik çeşitlilik”, “sosyal değişimler”, “estetik” gibi disiplinler arası ölçütlerle genişletilmelidir.
- Yalıtım uygulamalarındaki HBD değerleri ayrıntılı olarak belirlenerek THBE ölçütlerinde yer almalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] MONBIOT G, “Heat: How to Stop the Planet from Burning?”, Doubleday of Canada, 2006.
- [2] BRUNTLAND, G. (ed.), “Our common future: The World Commission on Environment and Development”, Oxford, Oxford University Press, 1987.
- [3] SZARGUT J, MORRIS DR, STEWARD FR. “Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes”. New York:Hemisphere; 1988.
- [4] SOLOW, R. “An Almost Practical Step Toward Sustainability. Wash. D.C.: Resources for the Future”; 1992.
- [5] FUWA, K., “The meaning of sustainability. The bio-gophysical aspects.In Munasinghe M., and Shearer W., (ed.), Defining and Measuring Sustainability: The bio-gophysical Foundations, 1995.
- [6] RODRIGUEZ M.A. , RUYCK J. De, DIAZ P. Roque, VERMA V.K., BRAM S., “An LCA based indicator for evaluation of alternative energy routes”, Applied Energy 88, pp 630-635, 2011.
- [7] CORNELISSEN R.L, HIRS GG., , “The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA”, Energy Conversion and Management 43, pp. 1417–1424, 2002.
- [8] www.solarbuzz.com/StatsCosts.htm
- [9] HODGE BK, “Alternative Energy Systems and Applications”, John Wiley and Sons, 2010.
- [10] GORE AI, “Our Choice: A Plan to Solve the Climate Crisis”, Rodale Books, 2009.
- [11] www1.eere.energy.gov/geothermal/faqs.html

- [12] SULLIVAN, J., CLARK, C., HAN, J., WANG M. “Life Cycle Assessment of Electricity Generation: Conventional, Geothermal and Other Renewables,” GRC 2010 Annual Meeting. Sacramento, CA. October 24-27, 2010.
- [13] TESTER JWT, DRAKE EM, DRISCOL MJ, GOLAY MW, PETERS WA, “Sustainable Energy: Choosing Among Options, The MIT Press, 2005.
- [14] ARDANTE F, BECCALI M, CELLURA M, MISTRETTA M, “Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board”, Energy and Buildings 40, pp. 1–10, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU

İTÜ Makina Fakültesi'nden 1988'de lisans, 1990'da yüksek lisans, 1993'te doktora derecesi aldı. 1998 yılında doçent, 2004 yılında profesör oldu. Yenilenebilir Enerji Teknolojileri ve Isı ve Kütlevin Sayısal Modellemesi alanlarında yurtiçi ve yurtdışı projeler yürütmekte, proje hakemlikleri (Avrupa Birliği projeleri ve diğerleri) yapmakta, önemli bir bölümü üniversite/sanayi işbirliği kapsamında olan tezler yönetmektedir.