

21. YÜZYILIN ENERJİSİ: HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİ

T. NEJAT VEZİROĞLU* - Ö. FARUK NOYAN**

**Prof. Dr., Müdür, Miami Üniversitesi Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü, Miami
Başkan, Uluslararası Hidrojen Enerjisi Derneği
veziroglu@miami.edu*

***Yrd. Doç. Dr., Celâl Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Manisa
Başkan Yardımcısı, Bilimsel Araştırmalar Derneği (BİAD, Manisa)
omer.noyan@bayar.edu.tr*

ÖZET

Bugün dünya enerji talebinin büyük kısmını karşılayan fosil yakıtlar (petrol, doğalgaz ve kömür) hızla tükeniyor. Bunların yanma ürünleri de, çevremiz ve gezegenimizdeki hayat için büyük tehlike arzeden sera etkisi, ozon tabakasında delinme, asit yağmurları ve kirlilik gibi global problemlere yol açıyor. Birçok mühendis ve bilim adamı, bu problemlerin çözümünün, mevcut yakıt sisteminin yerine Hidrojen Enerji Sistemi'ni geçirmek olduğu konusunda hemfikir. Hidrojen çok verimli ve temiz bir yakıttır. Yandığında sera gazları, ozon tabakasına zarar veren kimyasallar, asit yağmuru ögeleri ve kirlilik üretmez. Yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş vs) üretilen hidrojen, bize bundan sonra asla değiştirmek zorunda kalmayacağımız sürekli bir enerji sistemi sağlayacaktır.

Bununla birlikte, sentetik fosil yakıt sistemi gibi, petrol-sonrası dönem için teklif edilen başka enerji sistemleri de vardır. Bu sistemde, sentetik gasoline ve sentetik doğalgaz büyük kömür rezervleri kullanılarak üretilmektedir. Bu, bir şekilde, mevcut fosil yakıt sisteminin devam etmesi anlamına gelecektir.

Bu çalışmada, petrol-sonrası dönem için öngörülen bu iki mümkün enerji sistemi (güneş-hidrojen enerji sistemi ve sentetik fosil yakıt sistemi), üretim maliyetleri, çevrenin gördüğü zarar ve kullanım verimliliği açısından mukayese ediliyor. Sonuçlar, sürdürülebilir bir gelecek için en iyi enerji sisteminin güneş-hidrojen enerji sistemi olduğunu gösteriyor, ve bu sistemin 21. Yüzyıl bitmeden fosil yakıt sisteminin yerini alması gerekiyor.

1. ENERJİYLE İLGİLİ GLOBAL PROBLEMLER

1860’larda buhar makinasının icadından hemen sonra, Sanayi Devrimi tabiattaki enerji kaynaklarıyla insan ve sığır gücünün yerini almaya başladığında, insanlığı parlak bir geleceğin beklediği anlaşıldı. Giderek daha fazla tabîi enerji, başlangıçta odun ve kömür, daha sonra petrol ve doğalgaz şeklinde insanların yararına iş görür duruma geldi. Bu da büyük miktarlarda mal üretimi, dolayısıyla fiyatlarda düşüş ve hayat standartlarında yükselme sağladı.

İnsan toplulukları fabrikalar, demiryolları, otoyollar, denizlimanları ve havalimanları talep etti. Bu da, daha fazla iş, daha fazla gelir, daha fazla mal ve eşya ve daha fazla hizmet anlamına geldi. Dünyada hayat standardı yükseliyordu. Sanayi Devrimi başladığında, dünyada kişi başına yıllık gayr-i safî millî hâsıla on dolar civarında iken, bu bugün 6,600 \$ civarında ve üssel olarak artıyor.

Bu şaşırtıcı ekonomik kalkınmayı besleyen fosil yakıtlar mahrumiyeti tedavi eden bir ilaç gibiydi; fakat test edilmemiş bir ilaç. Dünya giderek daha fazla fosil yakıt tükettiğinden, iki önemli problem su yüzüne çıkmaya başladı: (1) fosil yakıtlar öngörülebilir bir gelecekte tükeneyecekti, ve (2) fosil yakıtlar ve yanma ürünleri global çevre problemlerine yolaçıyordu.

1.1. Fosil Yakıtların Tükenmesi

Enerji talebi başlıca iki sebepten dolayı artmaya devam ediyor: (a) dünya nüfusunda devam eden artış, ve (b) gelişmekte olan ülkelerin hayat standartlarını iyileştirme taleplerindeki artış. Mevcut durumda, dünya enerji talebinin büyük bir kısmı (yaklaşık %65), kolay bulunmaları ve kullanıma uygun olmaları sebebiyle sıvı fosil yakıtlarla (meselâ petrol ve doğalgaz) karşılanıyor. Bununla birlikte, dünya fosil yakıt üretiminin süratle en üst seviyeye tırmanacağı ve ardından düşmeye başlayacağı tahmin ediliyor [1-4]. Şekil 1, fosil yakıtların üretim oranları ve dünya talebiyle ilgili tahminleri gösteriyor. Buradan, dünya genelinde sıvı fosil yakıt üretiminin gelecek 15 yıl zarfında artmaya devam edeceği ve daha sonra azalmaya başlayacağı görülebilir. Kömür üretiminin – çevreyle ilgili sebeplerden dolayı – gelecek on yılda yaklaşık sabit kalması ve ardından düşmeye başlaması bekleniyor.

Bu arada, dünya nüfusundaki artışın, insanların hayat standartlarını iyileştirme arzularının bir sonucu olarak dünyanın sıvı yakıt talebi artıyor (Fig. 1). Bugün 6 milyar civarında olan ve yılda %1.5 oranında artan dünya nüfusundaki büyümenin yavaşlayacağı ve yüzyılın sonunda yaklaşık 10-12 milyara ulaşacağı tahmin ediliyor

[5]. Sonuç itibariyle, dünya sıvı fosil yakıt talebindeki artış da yavaşlayacak, ve yılda yaklaşık 1.6×10^{12} GJ değerine ulaşacak. Fakat sıvı fosil yakıtlara olan talep ile üretim arasında gelecek on yılda büyük bir uçurum ortaya çıkmaya başlayacak.

1.2. Çevrenin Gördüğü Zarar

Fosil yakıtlarla ilgili ikinci sıkıntı, bunların ve yanma ürünlerinin çevreye verdiği zarardır. Fosil yakıtların üretilmesi, nakledilmesi, belli işlemlerden geçirilmesi ve bilhassa nihaî safhada kullanılması, çevre üzerinde zararlı etkiler yapmakta, bu da ekonomi üzerinde doğrudan ve dolaylı olarak olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.

Kömür madenciliği tabiatı yıkıma uğratmakta, yeniden çevre düzenlemesi yapmayı gerektirmekte, ve tabii çevre yıllarca kullanım dışı kalmaktadır. Petrol ve gazın üretim, nakil ve depolanması sırasında, sızıntılar ve yayılmalar olmakta, bu da su ve hava kirliliğine yolaçmaktadır. Rafinasyon proseslerinin de çevre üzerinde olumsuz etkileri vardır. Fakat, fosil yakıtların çevreye verdiği zararın çok büyük bir kısmı son kullanım sırasında olmaktadır. Bütün fosil yakıtların son kullanımı esas amaca (yani ısıtma, elektrik üretimi veya taşımacılıkta hareket gücü) bakılmaksızın gerçekleştirilen yanma işlemidir. Fosil yakıtların ana bileşenleri karbon ve hidrojen-dir; fakat bunların yanısıra, başlangıçta yakıtta bulunan (kükürt vs), veya rafinasyon sırasında eklenen (kurşun, alkol vs) maddeler de içermektedir. Fosil yakıtların yanmasıyla çeşitli gazlar (CO_x , SO_x , NO_x , CH), kurum ve kül, katran damlacıkları ve diğer organik bileşikler meydana gelir; bunların hepsi atmosfere serbestlenir, ve hava kirliliğine yolaçar. Hava kirliliği; atmosferin tabii bileşeni olmayan bazı gazların ve taneciklerin, hatta anormal bir konsantrasyona ulaşmış tabii bileşenlerin mevcudiyeti olarak tarif edilir. Hava kirliliği insan sağlığına, hayvanlara, tarlalara, yapılara zarar verir, görünürlüğü azaltır, vs.

Yukarıda sözü edilen birincil kirleticiler atmosferde, güneş ışığının tetikleme-siyle veya su ile diğer atmosferik bileşenlerin karma etkisiyle kimyasak reaksiyona uğrar, formları değişir, ve ozon, aerosoller, peroksiasil nitrat (PAN), çeşitli asitler gibi ikincil kirleticiler hâline gelir. Bulutlarda ve yağmur damlacıklarında sülfürik ve nitrik asit oluşturmak üzere çözelmiş olan kükürt ve azot oksitlerin yeryüzüne inmesi asit yağmuru olarak isimlendirilir; ayrıca asit çiyi, asit sisi ve asit karı da kaydedilmiştir. Su ile denge halindeki karbon dioksit ise zayıf karbonik asit meydana getirir. Asit çökelişi (kuru veya nemli) toprağın ve suyun asitlenmesine sebep olur, su ve kara ekosistemlerinin zarar görmesini netice verir, insanlar, hayvanlar, bitki örtüsü ve yapılar üzerinde zararlı etkilerde bulunur.

Yanmanın atmosfere bırakılan ürünleri, başta karbondioksit olmak üzere diğer sera gazları (metan, azot oksitler ve klorofluorokarbonlar) Yeryüzü'nün atmosfere yaydığı kızılötesi enerjiyi soğurarak, ve bir kısmını Yeryüzü'ne geri göndererek ısı değişikliklerine ve sonuçta global sıcaklıkların artmasına yolaçar. Sıcaklık artışının sonuçları ise, kutup buzullarının erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi ve iklim değişiklikleridir; bu sonuncu sıcak hava dalgaları, kuraklıklar, seller, şiddetli fırtınalar, daha büyük yangınları da içine alır.

Çevre bilimcilerin çalışmaları rakamsal olarak gözönüne alınarak, yukarıda sözü edilen zararlar fosil yakıtların herbiri için ayrı ayrı hesaplanmıştır [6]. Tablo I, 1998 itibarıyla her tip zarar için ABD doları cinsinden sonuçları göstermektedir. Burada, kömür için zararın, tüketilen GJ miktar kömür başına 14.51 \$; petrol için zararın, tüketilen GJ miktar petrol başına 12.52 \$; doğalgaz için zararın, tüketilen GJ miktar doğalgaz başına 8.26 \$, ve dünyadaki ağırlıklı ortalama zararın GJ miktar fosil yakıt tüketimi başına 12.05 \$ olduğu görülebilir. Bu zararların maliyetleri fosil yakıtların fiyatına dahil edilmemektedir, fakat insanlar tarafından, vergi, sağlık giderleri, sigorta primleri, ve hayat kalitesindeki azalmayla doğrudan veya dolaylı olarak ödenmektedir. Bir başka deyişle, bugün fosil yakıtların açığı ciddi şekilde dışarıdan kapatılmaktadır. Çevrenin gördüğü zararın herbiri fosil yakıtların fiyatlarına eğer ayrı ayrı katılırsa, bu, hidrojen gibi temiz yakıtların ekonomiye ve çevreye olan sayısız faydalarıyla kullanıma daha erken girmelerini sağlayacak.

Tablo II, fosil yakıtların çevreye verdiği zararın dünya genelinde boyutlarını görebilmek için hazırlanmıştır. Toplam zararın %37'sine kömürün yolaçtığı, kömür tüketiminin ise, toplam fosil yakıt tüketiminin %31'ini teşkil ettiği görülebilir. Diğer yandan, zararın sadece %20'si doğalgazdan kaynaklanmaktadır, ve bu sonuncusunun pazar payı %29'dur. Şurası açıktır ki, doğalgaz tüketiminin kömür ve petrol aleyhine artması çevre açısından yararlı olacaktır. Bu ayrıca, gaz yakıtların geniş halk kitlelerince benimsenmesinin yolunu açacaktır; bu da, bir gaz yakıt olan hidrojene yumuşak geçişle sonuçlanacaktır. Yine Tablo II'den görülebilir ki, fosil yakıtların dünya genelinde çevreye verdiği zarar, 1998 itibarıyla 4 trilyon 345 \$, veya dünya gayr-i safi hâsılasının %11'ine karşılık gelmektedir. Bu çok büyük bir rakamdır. Hidrojen gibi temiz bir yakıtla geçişle, dünya bu büyük bedeli ödemekten kurtulacak, ve belki de, bunu dünya genelinde hayat kalitesinin iyileştirilmesinde kullanacaktır.

2. NEDEN “HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİ” ?

Enerji araştırmacıları fosil yakıtların yerine ikame edecekleri mümkün alternatif enerji kaynaklarına bakıyorlar. Termonükleer enerji, nükleer üreticiler, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, okyanus akıntıları, gel-git ve dalga enerjileri gibi birçok birincil enerji kaynağı mevcuttur.

Son kullanıcıda (tüketici), birincil enerjinin yaklaşık dörtte biri elektrik, dörtte üçü de yakıt olarak kullanılmaktadır. Yukarıda zikredilen birincil enerji kaynaklarının, bu yüzden, tüketicinin ihtiyaç duyduğu bu enerji taşıyıcılarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Fosil yakıtların tersine, yeni birincil enerji kaynaklarından hiçbiri hava ve kara taşımacılığında yakıt olarak doğrudan kullanılamamaktadır. Dolayısıyla, bunlar elektrik üretimi için, bir yakıt veya yakıtlar üretmek üzere kullanılmalıdırlar.

Fosil yakıt sonrası dönem için bir yakıt geliştirmemiz gerektiğinden, mümkün olan en iyi yakıtı seçmek durumundayız. Sentetik benzin, sentetik doğalgaz (metan), metanol, etanol ve hidrojen gibi birçok aday var. Seçilecek yakıt aşağıdaki şartları sağlamalıdır [7]:

Taşımacılık için uygun olmalıdır.

Çok yönlü olmalıdır veya son kullanıcıda diğer enerji şekillerine kolaylıkla dönüştürülmelidir.

Yüksek kullanım verimliliğine sahip olmalıdır.

Kullanım güvenliği olmalıdır.

Bunlara ilâveten, sonuçta ortaya çıkan enerji sistemi çevreye uyumlu ve ekonomik olmalıdır.

2.1. Taşımacılığın Yakıtı

Kara taşıtları ve uçaklar, belli bir mesafe için kullanacakları yakıtlarını taşımak zorundalar. Uzun taşımacılığında ise, uzay araçları hem yakıtlarını hemde oksijeni birlikte taşımak zorundalar. Bu yüzden, taşımacılıkta kullanılacak yakıt mümkün olduğunca hafif olmalı ve olabildiğince az yer işgal etmeli. Bu gereklilikleri, hareket faktörü denilen boyutsuz bir sayıda birleştirebiliriz [8]:

$$\phi_M = \frac{\left(\frac{E}{M}\right)\left(\frac{E}{V}\right)^{2/3}}{\left(\frac{E_h}{M_h}\right)\left(\frac{E_h}{V_h}\right)^{2/3}} \quad (1)$$

Burada E, yakıtın ürettiği enerji; M, yakıtın kütlesi; V yakıtın hacmi olup, h hidrojene karşılık gelmektedir. Hareket faktörü ne kadar yüksekse, yakıt taşımacılık için o kadar iyidir. Tablo III, bazı yakıtların ilgili özelliklerini, ayrıca (1) nolu denklem kullanılarak hesaplanan hareket faktörlerini vermektedir. Sıvı yakıtlar arasında en iyi hareket faktörüne LH_2 'nin, en düşük hareket faktörüne ise metanolün sahip olduğu görülebilir. Gaz yakıtlar arasında, GH₂ en iyi hareket faktörüne sahiptir.

Hidrojenin kullanım verimliliğinin sağladığı avantaj da gözönüne alındığında, en iyi taşımacılık yakıtı olarak hidrojenin itibarını artırmaktadır. Tabii ki bu, hidrojenin dünya genelinde uzay programları için neden tercih edilen yakıt olduğuyla ilgili sebeplerden bir tanesidir (her ne kadar bugün için, hidrojen fosil yakıtlardan daha pahalı ise de.).

2.2. Çok Yönlülük

Son kullanıcıda, bütün yakıtlar bir proses ile (yanma gibi), termal enerji, mekanik enerji ve elektrik enerjisi (ve diğerleri) gibi diğer enerji formlarına dönüştürülmelidir. Eğer bir yakıt birden fazla prosesle son kullanıcıda çeşitli enerji şekillerine dönüştürülebilirse, kullanım açısından çok yönlü ve daha uygun bir hâle gelir. Tablo IV, son kullanıcıda diğer enerji şekillerine dönüşebilen çeşitli yakıtları ve prosesleri göstermektedir. Hidrojen hariç, bütün yakıtların sadece yanma prosesiyle dönüştürülebildiği tablodan görülebilmektedir. Buna karşılık hidrojen ise, alevli yanmanın yanı sıra, beş farklı yoldan diğer enerji şekillerine dönüştürülebilir. Doğrudan buhara, katalitik yanma ile ısıya dönüştürülür, kimyasal reaksiyonlar yoluyla bir ısı kaynağı ve/veya ısı havuzu gibi davranır, ve elektrokimyasal proseslerle doğrudan elektrığe elektrığe dönüştürülür [9]. Bir başka deyişle, hidrojen çok yönlü olma noktasında en iyi yakıttır.

2.3. Kullanım Verimliliği

Yakıtlar mukayese edilirken, son kullanıcıdaki kullanım verimliliğinin hesaba katılması önemlidir. Kullanıcı tarafından kullanılmak için, yakıtlar ısı, mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülürler. Çalışmalar göstermektedir ki, neredeyse her kullanım durumunda hidrojen, istenen enerji şekline diğer yakıtlara göre çok daha verimli şekilde dönüştürülebilmektedir [6].

Tablo V, çeşitli uygulamalar için, fosil yakıt kullanım verimliliğinin hidrojen kullanım verimliliğine oranı şeklinde tanımlanan kullanım verimlilik faktörlerini göstermektedir. Hidrojenin en verimli yakıt olduğu görülebilir. Bu durum, enerjinin korunmasının yanı sıra, kaynakların da korunması sonucunu doğurur.

2.4. Güvenlik

Yakıtların güvenlik özellikleri bir yandan toksisiteleriyle, diğer yandan da yangında verdikleri zararın özellikleriyle ilgilidir. Yanma ürünlerinin toksisitesine ilaveten, yakıtların kendisi de toksik olabilir. Karbon/hidrojen oranı arttıkça toksisite artar. Hidrojen ve hidrojenin ana yanma ürünü olan su veya su buharı ise toksik değildir. Yine de, hidrojenin (ve tabii, fosil yakıtların da) alevli yanması sırasında meydana gelebilen NO_x 'in toksik etkileri vardır.

Tablo VI'da, yakıtların yolaçtığı yangın zararlarının karakteristikleri görülmektedir. Az yoğunluk, bir sızıntıya yolaçacak kadar küçük bir aralıktan yakıtın hızla dağılması için sıvının kaldırma kuvvetini artırdığından, yakıtı daha güvenli kılar. Aynı sebepten dolayı, yüksek difüzyon katsayıları yararlıdır. Yüksek özgül ısı, belli bir ısı girişi için sıcaklık artışlarını yavaşlattığından, bir yakıtın daha güvenli olmasını sağlar. Geniş tutuşma sınırları, düşük tutuşma enerjileri ve düşük tutuşma sıcaklıkları, yangının başlayabileceği sınırları genişlettiği için yakıtları daha az güvenli kılar. Yüksek alev sıcaklığı, yüksek patlama enerjisi, ve yüksek alev yayılma kapasitesi de, yangını daha zarar verici hâle getirdiği için, yakıtı daha az güvenli hâle getirir.

Tablo VII yakıtların güvenlik özelliklerini mukayese etmektedir. Toksik elementlerin ve yangın zarar özelliklerinin her biri için, en güvenli olan 1, ve en az güvenli olan 3 olmak üzere, yakıtlar 1'den 3'e kadar sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma, daha kapsamlı ve ayrıntılı bir sınıflandırma yapabilmek açısından her yakıt için özet olarak verilmiştir. Hidrojenin sıralamadaki yerinin diğer herhangi bir yakıtın yerine oranı şeklinde tanımlanan güvenlik faktörleri bu şekilde elde edilmiştir. Buradan, hidrojenin en güvenli, benzinin en az güvenli olduğu, metanın ise, bu ikisinin arasında yer aldığı görülebilir.

2.4. En İyi Yakıt

Yukarıda verilen kriterler esas alınarak, yakıt seçeneklerine baktığımızda, hidrojenin en iyi taşımacılık yakıtı, çok yönlü olma açısından en iyi yakıt, en verimli yakıt ve en güvenli yakıt olduğu açıkça ortaya çıkar. Kısacası, hidrojen en iyi yakıttır.

3. HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİ

Yukarıdaki mukayeselerin bir sonucu olarak, herhangi veya bütün birincil enerji kaynaklarını kullanarak, bunların kusurlarını da bu yoldan telafi edecek şekilde

hidrojen üretmek, en uygun çözüm olacaktır. Böyle bir enerji sistemi “Hidrojen Enerji Sistemi” olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 2’de, teklif edilen hidrojen enerji sisteminin şematik bir diyagramı yer almaktadır. Bu sistemde, hidrojen (ve oksijen), birincil enerji kaynağının (güneş, nükleer, hatta fosil), suyun (H_2O), ve hammaddenin mevcut olduğu büyük sanayi tesislerinde üretilir. Büyük ölçekli depolama için, hidrojen yeraltındaki eski maden ocaklarında, mağaralarda ve akiferlerde (yeraltı su tablası) depolanabilir. Ve buradan boru hatları veya süpertankerlerle enerji tüketim merkezlerine nakledilir. Daha sonra, elektrikte, taşımacılıkta, sanayide, evlerde ve ticarî sektörlerde yakıt ve/veya enerji taşıyıcısı olarak kullanılır. Yanürün su veya su buharıdır. Hidrojen eğer alevli yanma işlemiyle kullanılmak istenirse, biraz NO_x de meydana gelir. Su ve su buharı yağmur, akarsu, göl ve okyanuslar yoluyla geri kazanılır, ve yine hidrojen üretiminde kullanılır.

Hidrojen üreten sanayi tesisinde meydana gelen oksijen ise ya atmosfere bırakılır, veya yakıt hücrelerinde elektrik üretiminde (hava yerine) kullanılmak üzere sanayi ve şehir merkezlerine gemiyle veya boru hatlarıyla nakledilir. Bu, kullanım verimliliğini artıran bir avantaj sağlar. Oksijen, sanayi tarafından enerji-dışı uygulamalar için, ayrıca kirlenmiş nehirleri temizlemek, veya atıksu arıtma işlemini hızlandırmak için de kullanılabilir.

Hidrojen enerji sisteminde, hidrojenin birincil bir enerji kaynağı olmadığını unutmamak gerekir. Hidrojen bir ara veya ikincil enerji şekli veya bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen, birincil enerji kaynaklarını tamamlamakta, ve bunları tüketiciye istenen yer ve zamanda uygun bir şekilde takdim etmektedir.

Hidrojen enerji sisteminin, üretim, depolama, nakliye, dağıtım, kullanım, çevresel etki ve ekonomi gibi detayları THEME ve Dünya Hidrojen Enerji Konferansları’nın bildiri kitaplarında [10-22], Bockris, Veziroglu ve Smith’in [23], ayrıca Veziroglu ve Barbir’in [24] kitaplarında bulunabilir.

4. REKABET EDEN ENERJİ SİSTEMLERİ

Bugün için, birbirleriyle rekabet eden üç enerji sistemi mevcut: 1) mevcut fosil yakıt sistemi, 2) kömür/sentetik fosil yakıt sistemi, ve 3) güneş-hidrojen enerji sistemi. Bu sonuncu hidrojen enerji sistemidir.

4.1. Fosil Yakıt Sistemi

Bugünkü enerji sisteminin basitleştirilmiş bir versiyonu Şekil 3’de gösterilmiştir. Fosil yakıtlar (özellikle petrol ürünleri) taşımacılıkta, evlerde, ticaret ve sanayi sektöründe ısı üretiminde, ayrıca elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Taşımacılıkta en fazla petrol ürünleri kullanılmaktadır (benzin, mazot, uçak yakıtı, vs). Isı üretimi, mekanların ısıtılması, evlerde su ısıtılması, mutfak işleri, buhar üretimi, ve çeşitli sanayi proseslerinde doğrudan ısıtma ve/veya kurutma uygulamalarını ihtiva etmektedir. Fosil yakıtların her üçü şekli bu amaçlar için kullanılmaktadır. Elektrik üretiminde kömür esas olarak düşük üretimde, doğalgaz ve petrol ise pik üretimde kullanılmaktadır. Elektriğin bir kısmı hidroelektrik ve nükleer güç santralleriyle üretilmektedir.

Diğer enerji sistemleriyle karşılaştırıldığında, birincil enerjinin (fosil yakıt eşdeğer birimi olarak) %40’ının ısı enerjisi üretiminde, %30’unun ise taşımacılıkta (2/3’ü kara ve deniz, 1/3’ü hava) kullanıldığı varsayılmaktadır [23]. Hidroelektrik ve nükleer güç santrallerinden sağlanan enerjinin (büyük kısmı itibariyle elektrik şeklinde), ayrıca diğer fosil-dışı yakıt kaynaklarıyla üretilen enerjinin hesaba katılmasına gerek yoktur. Çünkü bunun dikkate alınan her üç sistem için de aynı olduğu kabul edilmektedir. Gelecekte bu kaynaklardan daha fazla elektrik enerjisinin üretilmesi beklenmektedir.

İkibinli yılların başını düşündüğümüzde, ısı enerjisinin yaklaşık yarısının doğalgazla, kalan kısmının ise petrol (fuel oil ve artık petrol) ve kömürle karşılanacağı tahmin edilmektedir. Kömürün elektrik üretimi için, benzinin kara taşımacılığı, jet yakıtının ise hava taşımacılığı için ana enerji kaynağı olduğu varsayılmaktadır. Tabii ki bu, fosil yakıt enerji sisteminin basitleştirilmiş bir versiyonudur, fakat mevcut enerji tüketim şekillerine de oldukça yakındır, ve mukayeselere esas teşkil edebilir.

4.2. Kömür/Sentetik Fosil Yakıt Sistemi

Fosil yakıt rezervleri, özellikle de petrol ve doğalgaz rezervleri birgün tüenecek. Bilinen petrol ve doğalgaz rezervleri yaklaşık 8,000 EJ (1 EJ veya 1 Ectajoule = 10¹⁸ J) olup, mevcut tüketim hızı devam ettiği takdirde, gelecek 40 yıldaki talebi karşılayacaktır [24]. Eğer üssel nüfus artışı ve talep artışı hesaba katılırsa, bu ikisi 25 yıl kadar yetecektir. Henüz keşfedilmemiş tahminî kaynaklar ilave edilse bile, bu, akışkan yakıtlar için

ancak 30 yıl kadar ek süreyle ihtiyacı karşılayacaktır. Kömür rezervleri daha büyüktür; bilinen rezervler 20,000 EJ civarındadır, tahminî ilavelerle bu rakam 150,000 EJ'ye kadar çıkabilecektir. Bu büyük kömür miktarı sentetik sıvı yakıt üretiminde kullanılabilir, ve bu da, toplumların mevcut enerji sistemini sürdürmesine imkân verecektir. Kömür, elektrik üretimi için doğrudan kullanılabilir gibi, sentetik fosil yakıtların üretiminde de kullanıldığı için, bu sistem kömür/sentetik fosil yakıt sistemi olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda, mevcut fosil yakıt sisteminin, nerede uygun ve/veya gerekli olursa, kömürden türetilmiş sentetik fosil yakıtların devreye girmesiyle devam edeceği varsayılabilir. Enerji tüketim şekillerinin de değişmeyeceği varsayılmaktadır (bkz. Şekil 4). Kömür, sentetik yakıtlardan çok daha ucuz olduğu için, ısı ve elektrik üretiminde yaygın şekilde kullanılacaktır. Fakat bazı son-kullanımlar akışkan yakıtları gerektirmektedir. Bu yüzden, sentetik doğalgazın (SNG) bir kısım ısı enerjisi üretiminde (en başta evlerin ısıtılması), ayrıca kara taşımacılığı yakıtı olarak kullanılacağı varsayılmıştır. SNG burada pazarı sentetik benzinle paylaşacaktır. Sentetik jet yakıtı ise hava taşımacılığında kullanılacaktır.

4.3. Güneş/Hidrojen Enerji Sistemi

Eğer güneş enerjisi, doğrudan ve/veya dolaylı formlarıyla (meselâ hidrolik, rüzgâr, vs) hidrojen üretiminde kullanılırsa, bu sistem “güneş/hidrojen enerji sistemi” olarak adlandırılır. Bu sistemde, hem birincil hem ikincil enerji kaynakları yenilenebilir özelliktedir, çevreyle uyumludur, ve sonuçta temiz ve sürekli bir enerji sistemini ortaya çıkarmaktadır. Şekil 5 güneş/hidrojen enerji sisteminin şemasını göstermektedir.

Bu durumda, hidrojen enerjisine dönüşümün gerçekleşeceği, ve ihtiyaç duyulan hidrojenin üçte birinin hidrolik güçten (ve/veya rüzgâr gücünden), üçte ikisinin ise doğrudan veya dolaylı (hidrolik güç dışındaki) güneş enerjisi şekillerinden üretileceği varsayılabilir. Yukarıdaki sistemlerde sektörlerin enerji taleplerinin aynı oranda olduğu kabul edilmektedir. Bunlardan başka, ısı enerjisinin yarısının alevli yanmayla, dörtte birinin hidrojen/oksijen buhar üretimine dayalı buharla, diğer dörtte birin ise, katalitik yanmayla elde edileceği söylenebilir. Elektrik üretimi yakıt hücreleriyle gerçekleştirilecek; kara taşımacılığının yarısı gaz hidrojen yakan içten yanmalı motorları, diğer yarısı ise yakıt hücrelerini kullanacaktır. Hava taşımacılığında, hem ses-altı hem sesden hızlı uçaklar sıvı hidrojen kullanacaklar.

5. ÇEŞİTLİ ENERJİ TÜRLERİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu konu, kirlenme; buhar üretimi ve çevresel zarar şeklinde üç kısımda ele alınabilir.

5.1. Kirlenme

Tablo VIII, tanımlanan üç enerji sistemi için kirleticilerin listesini vermektedir. Kömür/sentetik fosil yakıt sisteminin çevre açısından en kötüsü, hidrojen enerji sisteminin ise en iyisi olduğu görülebilir. Güneş/hidrojen enerji sistemi, biraz NO_x hariç, hiçbir CO_2 , CO , SO_x , hidrokarbonlar veya tanecikler üretmez. Fakat güneş/hidrojen sisteminin ürettiği NO_x diğer enerji sistemlerinin ürettiğinden çok azdır. Bu, güneş/hidrojen enerji sisteminde, hidrojenin sadece havadaki alevli yanmasının NO_x üretecek olmasından dolayıdır. Diğer kullanım prosesleri (doğrudan buhar üretimi, hidrojenin yakıt hücrelerinde kullanımı, hidridleme prosesleri, vs gibi) herhangi bir NO_x üretmeyecektir.

5.2. Buhar Üretimi

Yakıtı saf hidrojen olduğundan, hidrojen enerji sisteminin, diğer enerji sistemlerinden daha fazla su buharı ürettiği şeklinde bir anlayış vardır. Probleme yakından bakıldığında bunun böyle olmadığı görülür.

Yakıtların sadece havada veya oksijen ortamındaki alevli yanmaları su buharı üretir. Hidrojenin yukarıda sözü edilen diğer prosesleri su buharı üretmez. Sonuçta, genel kanaatin aksine, güneş/hidrojen enerji sistemi diğer sistemlerden daha az su buharı üretir.

Fosil yakıtların kullanılmasından kaynaklanan küresel ısınma da su buharı oluşumunu artırır. Yeryüzü ortalama sıcaklığının Sanayi İnkılâbı'nın başlangıcından bu yana 0.5°C kadar arttığı varsayılarak [25], bu ilâve su buharı oluşumu ve yakıtların yanmasıyla oluşan su buharı miktarı hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo IX'da verilmiştir. Buradan görülmektedir ki, (1) fosil yakıt sistemleri güneş/hidrojen enerji sisteminden çok daha fazla ilâve su buharı meydana getirmektedir; (2) küresel ısınmayla meydana gelen ilâve su buharı yakıtların yanmasıyla meydana gelenden daha büyük miktarlardadır; (3) yakıtlardan dolayı meydana gelen su buharı miktarı tabii olarak oluşanla kıyaslandığında çok azdır; ve (4) buhar oluşumundaki en küçük artışa güneş/hidrojen sistemi yolaçmaktadır. Yine, ilâve buhar oluşumu gözönüne alındığında, güneş/hidrojen sistemi çevresel bakımdan en uyumlu sistem olmaktadır.

5.3. Çevresel Zarar

Tablo X, dikkate alınan üç enerji sisteminden herbiri için, ayrıca bunların 1998 itibarıyla ABD doları cinsinden yakıt bileşenleri için, ayrıca hidrojen enerji sisteminin kaynaklanan çevresel zararın diğer belli bir enerji sisteminden kaynaklanan zarara oranı şeklinde tanımlanan “çevresel uygunluk faktörleri” için, tüketilen gigajoule enerji başına çevresel zararı göstermektedir. Güneş/hidrojen enerji sistemi için çevre zararı, meydana gelen NO_x ’den dolayıdır. Görülmektedir ki, güneş/hidrojen enerji sistemi çevre bakımından en uyumlu sistemdir.

Hidrojenin, bilhassa klorofluorokarbonların sebep olduğu ozon tabakasındaki delinmeye de cevabı vardır. Hidrojenin hidridlenme özelliğine dayanan soğutma ve iklimlendirme sistemleri klorofluorokarbonlara değil hidrojene ihtiyaç duyar, ve hidrojen sızıntısı ozon tabakasında delinmeye yolaçmaz. Bu soğutma sistemleri, hareketli kısımları olmadığından, ayrıca oldukça sessizdir.

6. ENERJİ ALTERNATİFLERİNİN EKONOMİK MUKAYESESİ

Rekabet eden enerji sistemleri arasında yapılacak ekonomik bir mukayese, bu yakıtların sağladığı efektif maliyetlere dayandırılmalıdır. Efektif maliyetler kullanım enerjisini, yakıtın maliyetini, yakıt tüketimine bağlı fakat yakıtın fiyatına dahil edilmeyen maliyetleri de içine alır (bunlara dış maliyetler denir). Dış maliyetler, zararlı emisyonlardan, petrol yayılma ve sızıntılarından, açık ocak kömür madenciliğinden dolayı insanların, hayvanların, bitkilerin gördüğü fizikî zararın maliyetlerini, ayrıca hükümetlerin kirliliği azaltmak için yaptıkları harcamalarla, petrol kaynaklarının askerî nitelikli korunmasına yönelik harcamaları içine almaktadır.

Ekonomik açıdan, hidrojenin gelecekteki maliyetlerini (pazar ve teknolojiye gelişmelerden dolayı, gelecekte bugünküne göre önemli ölçüde düşük olacak) fosil yakıtların gelecekteki (iç ve dış) maliyetleriyle (bunlar ise, rezervlerin azalmasından, milletlerarası çatışmalardan ve çevre üzerindeki zararlı etkilerinden dolayı gelecekte, kaçınılmaz şekilde daha yüksek olacak) mukayese etmek de önemlidir.

Bir yakıtın efektif maliyeti aşağıdaki ilişki kullanılarak hesaplanabilir:

$$C_r = (C_i \square C_e) \frac{\eta_{fk}}{\eta_{sk}} \quad (2)$$

Burada C_i yakıtın iç veya klasik maliyetidir; C_e yakıtın sebep olduğu çevre zararını içine alan dış maliyetdir; η_{fk} ise k uygulaması için fosil yakıt kullanım verimliliği; ve η_{sk} 'ye gelince, aynı uygulama veya son kullanım için (hidrojen meydana getiren) sentetik yakıtın kullanım verimliliğidir.

Topluman ödediğı toplam maliyeti (C_0) hesaplamak için, daha önce zikredilen üç senaryo kullanılacaktır. Bu maliyet aşağıdaki ilişkiden hesaplanabilir:

$$C_0 = \sum_{n=1}^n \alpha_n C_n \quad (3)$$

Burada, elektrik üretimi, ısı üretimi, kara taşımacılığı, ses-altı hava taşımacılığı ve sestten hızlı hava taşımacılığı gibi herhangi bir n enerji sektörü için kullanılan enerji kesri α_n 'dir. α_n ise bir kesir olduğundan, bunların toplamı

$$\sum_{n=1}^n \alpha_n = 1 \quad (4)$$

olur. Denklem (2) denklem (3)'te yerine konursa, aşağıdaki gibi bir denklem elde edilir.

$$C_0 = \sum_{n=1}^n \alpha_n \left[(C_i + C_e) \frac{\eta_{fk}}{\eta_{sk}} \right]_n \quad (5)$$

Denklem (2)-(5) kullanılarak, üç enerji senaryosu için, yani fosil yakıt sistemi, kömür/sentetik fosil yakıt sistemi, ve güneş/hidrojen enerji sistemi için 1998 itibariyle ABD doları cinsinden Tablo XI-XIII hazırlanmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında, güneş/hidrojen enerji sisteminin en efektif-maliyet enerji sistemi olduğu ve topluma en düşük toplam maliyet getirdiğı açıkça ortaya çıkar.

7. HİDROJEN VE GÜNEŞ/HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİNİN AVANTAJLARI

Yukarıda sunulan araştırmanın sonucunda, bir yakıt olarak hidrojenin ve güneş/hidrojen enerji sisteminin, sırasıyla, fosil yakıtlara ve fosil yakıt sistemine göre sayısız avantajları söz konusudur.

7.1. Hidrojen

Hidrojenin fosil yakıtlar karşısındaki avantajları aşağıdaki gibidir:

- a. Benzin, jet yakıtı ve alkollerle karşılaştırıldığında sıvı hidrojen, gaz yakıtlarla karşılaştırıldığında da gaz hidrojen en iyi taşımacılık yakıtıdır.
- b. Hidrojen son tüketici aşamasında beş farklı prosesle kullanışlı enerji formlarına (ısı, mekanik ve elektrik) dönüştürülebilirken, fosil yakıtlar sadece tek bir prosesle, alevli yanma yoluyla enerjiye dönüştürülebilir. Bir başka deyişle, hidrojen çok yönlü yakıt bir yakıttır.
- c. Hidrojen son tüketicide kullanışlı enerji şekillerine (ısı, mekanik ve elektrik) dönüştürülürken en yüksek kullanma verimliliğine sahiptir. Hidrojen fosil yakıtlardan %39 daha verimlidir. Başka bir ifadeyle, hidrojen birincil enerji kaynaklarını da kurtaracak olan hidrojen, en iyi enerji koruyucu yakıt olarak da isimlendirilebilir.
- d. Yangın zararları ve zehirlilik dikkate alındığında ise, hidrojen en güvenli yakıttır.

7.2. Güneş/Hidrojen Enerji Sistemi

Güneş/hidrojen enerji sisteminin mevcut fosil yakıt ve sentetik fosil yakıt sistemleri karşısındaki üstün yanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a. Çevre üzerindeki etkiler de gözönüne alındığında, güneş/hidrojen enerji sistemi çevreyle en uyumlu enerji sistemi olarak ortaya çıkmaktadır. Sera gazlarına, ozon tabakasına zararlı kimyasallara, petrol yayılmalarına, iklim değişikliğine, asit yağmuru oluşturmalarına ve kirliliğe yolaçmamaktadır. Bu sistem global ısınmayı tersine çevirecektir, ve atmosferdeki CO₂'yi Sanayi İnkılabı öncesi seviyesine düşürerek Yeryüzü'nü normal sıcaklık değerine geri döndüreceklerdir.
- b. Çevrenin gördüğü zarar, ve hidrojenin yüksek kullanım verimliliği dikkate alındığında, güneş/hidrojen enerji sistemi en düşük efektif maliyete sahip sistemdir. Bir başka deyişle, güneş/hidrojen enerji sistemi, mevcut fosil yakıt ve sentetik fosil yakıt sistemleriyle mukayese edildiğinde topluma en az maliyetli sistemdir.

KAYNAKÇA

1. M. A. Elliot and N. C. Turner. "Estimating the Future Rate of Production of the World' s Fossil Fuels," presented at the American Chemical Society's 163rd National Meeting, Division of Fuel Chemistry Symposium on "Non-Fossil Chemical Fuels," Boston, 13 April (1972).
2. D. Root and E. Attanasi, in The American Association of Petroleum Geologists Bulletin (1978).
3. J. D. Parent. "A Survey of the United States and Total World Production, Proves Reserves, and Remaining Recoverable Resources of Fossil Fuels and Uranium as of December 31,,1977," Institute of Gas Technology, Chicago, March (1979).
4. J. O.M. Bockris and T. Nejat Veziroglu. Int. J. Hydrogen Energy 8, 323 (1983).
5. T. N. Veziroglu and O. Basar. "Dynamics of a Universal Hydrogen Fuel System, Hydrogen Energy. Part B, Plenum Press, pp. 1309-1326 (1974).
6. F. Barbir, T. N. Veziroglu and H. J. Plass, Jr. "Environmental Damage Due to Fossil Fuels Use," Int. J. Hydrogen Energy 10, 739 (1990).
7. T. N. Veziroglu and F. Barbir. "Hydrogen: The Wonder Fuel," Int. J. Hydrogen Energy 17, 391 (1992).
8. T. N. Veziroglu and Frano Barbir. "Transportation Fuel-Hydrogen," Energy Technology and the Environment, Vol. 4, Wiley Interscience, 2712-2730 (1995).
9. T. N. Veziroglu. "Hydrogen Technology for Energy Needs of Human Settlements," Int. J. Hydrogen Energy 12(2) (1987).
10. T. N. Veziroglu, ed. Hydrogen Energy, Parts A and B. Proceedings Hydrogen Economy Miami Energy Conference (THEME), Plenum Press, New York, 1975.
11. T. N. Veziroglu, ed. Proc. 1st World Hydrogen Energy Conference (WHEC), 3 volumes, Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL, 1976.
12. T. N. Veziroglu and W. Seifritz, eds. Hydrogen Energy Progress (4 vols.), Proceedings of the 2nd WHEC, Pergamon Press, Oxford, 1979.
13. T. N. Veziroglu, K. Fueki and T. Ohta, eds. Hydrogen Energy Progress (4 vols.), Proceedings of the 3rd WHEC, Pergamon Press, Oxford, 1981.
14. T. N. Veziroglu, W. D. Van Varst, and J. H. Kelley, eds. Hydrogen Energy Progress IV (4 vols.), Proceedings of the 4 tı WHEC, Pergamon Press, Oxford, 1982.
15. T. N. Veziroglu and I. B. Taylor, eds. Hydrogen Energy Progress V (4 vols.), Proceedings of the 5th WHEC, Pergamon Press, Oxford, 1984.
16. T. N. Veziroglu, N. Getoff and P. Weinzierl, eds. Hydrogen Energy Progress VI (3 vols.), Proceedings of the 6th WHEC, Pergamon Press, Oxford, 1986.
17. T. N. Veziroglu and A. N. Protsenka, eds. Hydrogen Energy Progress VII (3 vols.), Proceedings of the 7th WHEC, Pergamon Press, Oxford, 1988.
18. T. N. Veziroglu and P. K. Takahashi, eds. Hydrogen Energy Progress VII/(3 vols.), Proceedings of the 8th WHEC, Pergamon Press, Oxford, 1990.
19. T. N. Veziroglu, C. Derive and J. Pottier, eds. Hydrogen Energy Progress IX (3 vols.), Proceedings of the 9th WHEC, International Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL, 1992.

20. D. L. Block and T. N. Veziroglu, eds. Hydrogen Energy Progress X (3 vols.), Proceedings of the 10th WHEC, International Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL, 1994.
21. T. N. Veziroglu, c.-J. Winter, J. P. Baselt and G. Kreysa, eds. Hydrogen Energy Progress XI (3 vols.), Proceedings of the 11th WHEC, International Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL, 1996.
22. J. C. Bolcich and T. N. Veziroglu, eds. Hydrogen Energy Progress XII (3 vols.), Proceedings of the 12th WHEC, International Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL, 1998.
23. John O'M. Bockris and T. N. Veziroglu with Debbi Smith. Solar Hydrogen Energy: The Power to Save the Earth, Optima, London, 1991.
24. T. Nejat Veziroglu and Frano Barbir, Hydrogen Energy Technologies, UNIDO, A1400. Vienna, Austria, 1998.
25. T. N. Veziroglu and F. Barbir. "Hydrogen Energy System: A Permanent Solution to the Global Energy-Environmental Problems," 35th IUPAC Congress Proceedings, Istanbul, Turkey, 13-15 August 1995.
26. W. Fulkerson, R. J. Judkins and M. K. Sanghvi. "Energy from Fossil Fuels," *Scientific American*, 263 (3), pp. 129-135, 1990.
27. T. N. Veziroglu, I. Gurkan and M. M. Padki, "Remediation of Greenhouse Problem through Replacement of Fossil Fuels by Hydrogen," *Int. J. Hydrogen Energy* 14(4) (April 1989).

Tablo I. Fosil Yakıtlardan Herbirinin Yolaçtığı Çevre Zararı

Zarar Tipi (n)	1998 itibariyle GJ başına çevre zararı (\$ cinsinden)					
	Kömür		Petrol		Doğalgaz	
	Ayrıntılı Zarar	Ara Toplam	Ayrıntılı Zarar	Ara Toplam	Ayrıntılı Zarar	Ara Toplam
İnsanlar üzerindeki etki		5.16		4.19		3.09
Prematüre ölümler	1.75		1.42		1.05	
Tıbbi harcamalar	1.75		1.42		1.05	
Çalışma verimi kayıpları	1.66		1.35		0.99	
Hayvanlar üzerindeki etki		0.75		0.63		0.45
Evcil hayat stok kaybı	0.25		0.21		0.15	
Vahşi hayat kaybı	0.50		0.42		0.30	
Bitkiler ve ormanlar üzerindeki etki		1.99		1.61		1.20
Tarla veriminde azalma –ozon	0.25		0.21		0.15	
Tarla veriminde azalma - asit yağmurları	0.13		0.10		0.07	
Vahşi flora üzerindeki etki (bitkiler)	0.77		0.62		0.46	
Orman kaybı (ekonomik değer)	0.27		0.22		0.16	
Orman kaybı (biyolojik çeşitlilik üzerindeki etki)	0.53		0.43		0.33	
Eğlence gelirlerinden kayıp	0.04		0.03		0.03	
Su ekosistemleri üzerindeki etki		0.26		1.55		0.16
Petrol yayılmaları	-		0.44		-	
Sualtı tanklarından sızıntılar	-		0.90		-	
Kireçlenen göller	0.04		0.03		0.03	
Balık popülasyonlarında kayıp	0.04		0.03		0.03	
Biyolojik çeşitlilik üzerindeki etki	0.18		0.15		0.10	
İnsan-yapısı yapılar üzerindeki etki		1.66		1.34		0.98
Tarihi binalar ve anıtlar						
Bozulma	0.18		0.15		0.10	
Bina ve evlerin zararı	0.37		0.30		0.22	
Çelik yapılar ve korozyon	0.99		0.80		0.59	
Elbiselerin, arabaların, vs kirlenmesi	0.12		0.09		0.07	
Diğer hava kirlilik maliyetleri		1.45		1.16		0.88
Görüş azalması	0.30		0.23		0.18	
Hava kirliliğini azaltma maliyeti	1.15		0.93		0.70	
Açık ocak madenciliğinin etkisi		0.73		-		-
İklim değişikliklerinin etkisi		2.04		1.66		1.22
Sıcak dalgalar – insanlar üzerindeki etki	0.27		0.22		0.16	
Kuraklıklar -						
Zirai kayıplar	0.16		0.13		0.10	
Çiftlik hayvanlarındaki kayıp	0.13		0.10		0.07	
Orman kayıpları	0.16		0.13		0.10	
Yabani bitki ve hayvan kayıpları	0.93		0.75		0.56	
Su açıkları ve güç üretimi						
Problemler	0.25		0.21		0.15	
Taşkınlar	0.07		0.06		0.04	
Fırtınalar, kasırgalar, hortumlar	0.07		0.06		0.04	
Deniz seviyesindeki yükselmeye etkisi		0.47		0.38		0.28
TOPLAMLAR		14.51		12.52		8.26

Tablo II. Dünya genelinde fosil yakıt tüketimi ve çevre zararı (1998 için)

Fosil yakıt tüketimi	(10 ¹⁸ J/yıl)
Dünya kömür tüketimi	112
Dünya petrol tüketimi	148
Dünya doğalgaz tüketimi	105
Dünya fosil yakıt tüketimi	365
Çevre zararı tahmini	(1998 milyar \$)
Kömürden ileri gelen zarar	1,625
Petrolde ileri gelen zarar	1,853
Doğalgazdan ileri gelen zarar	867
Toplam zarar	4,345
Nüfus ve ekonomi verileri	5.96
Dünya nüfusu (milyar)	\$
Kişi başına zarar	730
Dünya gayr-ı safi hasılası (milyar \$)	\$39,340
Kişi başına gelir	\$ 6,600
Zarar/Dünya gayr-ı safi hasılası	0.11

Tablo III. Sıvı ve gaz yakıtlar için enerji yoğunlukları (HHV) ve “hareket” faktörleri

Yakıt	Kimyasal formül	Birim kütle başına enerji $\left(\frac{E}{M}\right)$ J/kg	Birim hacim başına enerji $\left(\frac{E}{V}\right)$ J/m	Hareket faktörü ϕM
Sıvı yakıtlar				
Fuel oil	$C_{\leq 20}H_{\leq 42}$	45.5	38.65	0.78
Benzin	$C_{5-10}H_{12-22}$	47.4	34.85	0.76
Jet yakıtı	$C_{10-15}H_{22-32}$	46.5	35.30	0.75
LPG	$C_{3-4}H_{8-10}$	48.8	24.40	0.62
LNG	$\sim CH_4$	50.0	23.00	0.61
Metanol	CH_3OH	22.3	18.10	0.23
Etanol	C_2H_5OH	29.9	23.60	0.37
LH ₂	H_2	141.9	10.10	1.00
Gaz yakıtlar				
Doğalgaz	$\sim CH_4$	50.0	0.040	0.75
GH ₂	H_2	141.9	0.013	1.00

Tablo IV. Fosil yakıtların çok yönlülüğü (dönüştürülebilirliği)

Dönüştürme prosesi	Hidrojen	Fosil yakıtlar
Alevli yanma	Evet	Evet
Doğrudan buhar üretimi	Evet	Hayır
Katalitik yanma	Evet	Hayır
Kimyasal dönüştürme (Hidridleme)	Evet	Hayır
Elektrokimyasal dönüştürme (Yakıt hücreleri)	Evet	Hayır

Tablo V. Fosil yakıtların ve hidrojenin kullanım verimlilik mukayeseleri

Uygulama	Kullanım verimlilik faktörü $\phi_v = \eta_F \cdot H$
Isı enerjisi	
Alevli yanma	1.00
Katalitik yanma	0.80
Buhar üretimi	0.80
Elektrik enerjisi, Yakıt hücreleri	0.54
Kara ve deniz taşımacılığı	
İçten yanmalı motorlar	0.82
Yakıt hücreleri/Elektrik motoru	0.40
Ses-altı jet taşımacılığı	0.84
Sesten hızlı jet taşımacılığı	0.72
Ağırlıklı ortalama	0.72
Hidrojen kullanım verimliliği faktörü	1.00
Fosil yakıt kullanım verimliliği faktörü	0.72

Tablo VI. Yakıtların yangın zararlarıyla ilgili özellikler

Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk ^a (kg/m ³)	4.40	0.65	0.084
Havada difüzyon katsayısı ^a (cm ² /sn)	0.05	0.16	0.610
Sabit basınçta özgül ısı ^a (J/gK)	1.20	2.22	14.89
Havadaki tutuşma limitleri (%hacim)	1.0 - 7.6	5.3 - 15.0	4.0 - 75.0
Havadaki tutuşma enerjisi (mj)	0.24	0.29	0.02
Tutuşma sıcaklığı (°C)	228 - 471	540	585
Havadaki alev sıcaklığı (°C)	2197	1875	2045
Patlama enerjisi ^a (g TNT/kJ)	0.25	0.19	0.17
Alev yayma yeteneği (%)	34 - 43	25 - 33	17 - 25

a Normal sıcaklık ve basınçta. b Teorik olarak maksimum; teorik değerin bugün %10'u.

Tablo VII. Yakıtların güvenlik sıralaması değerleri

Özellikler	Yakıt sıralaması ^a		
	Benzin	Metan	Hidrojen
Yakıt toksisitesi	3	2	1
Yanmanın toksisitesi (CO, SO _x , NO _x , HC, PM)	3	2	1
Yoğunluk	3	2	1
Difüzyon katsayısı	3	2	1
Özgül ısı	3	2	1
Tutuşma limiti	1	2	3
Tutuşma enerjisi	2	1	3
Tutuşma sıcaklığı	3	2	1
Alev sıcaklığı	3	1	2
Patlama enerjisi	3	2	1
Alev yayma yeteneği	3	2	1
TOPLAM	30	20	16
Güvenlik faktörü	0.53	0.80	1.00

a 1, en güvenli; 2, daha az güvenli; 3, en az güvenli.

Tablo VIII. Üç enerji sisteminin ürettiği kirleticiler

Kirleticisi	Fosil yakıt sistemi (kg/GJ)	Kömür/sentetik fosil yakıt sistemi (kg/GJ)	Güneş-hidrojen sistemi (kg/GJ)
CO ₂	72.40	100.00	0
CO	0.80	0.65	0
SO ₂	0.38	0.50	0
NO _x	0.34	0.32	0.10
HC	0.20	0.12	0
PM*	0.09	0.14	0

* Tanecik madde.

Tablo IX. Üç enerji sisteminin su buhar üretiminin karşılaştırması (1998 yılı enerji tüketimi için)

Kalem	Birim	Fosil Yakıt Sistemi	Kömür/sentetik fosil yakıt sistemi	Güneş/hidrojen sistemi
Enerji sisteminin yıllık su buharı üretimi	10 ¹² kg	8.9	9.300	6.0
Küresel ısınmadan ileri gelen yıllık su buharı oluşumu	10 ¹² kg	3,900	3,900.000	0
Enerji sisteminden ve küresel ısınmadan ileri gelen toplam su buharı oluşumu	10 ¹² kg	3,909	3,909.000	6.0
Tabii olarak oluşan su buharının bir kesri olarak toplam su buharı oluşumu	%	0.782	0.782	0.001

Not: Güneş ısınmasından ileri gelen yıllık su buharı oluşumu 5 X 10¹⁷ kg.

Tablo X. Çevre zararı ve çevreye uyum faktörleri

Enerji sistemi ve yakıt	Çevre zararı (1998 US \$/GJ)	Çevreye uyum faktörü, ϕ_p
Fosil yakıt sistemi	12.4 7	0.055
Kömür	14.51	
Petrol	12.52	
Doğalgaz	8.26	
Kömür/Sentetik fosil yakıt sistemi	15.46	0.044
Sen-Gaz	20.34	
SNG	13.49	
Güneş/hidrojen enerji sistemi	0.68	1.000
Hidrojen	0.68	

Tablo XI. Fosil yakıt sisteminin efektif maliyeti

Uygulama	Yakıt	Enerji tüketim faktörü	Efectif maliyet (1998 US \$/GJ)
Isı enerjisi	Doğalgaz	0.20	17.46
	Petrol yakıtları	0.10	27.56*
	Kömür	0.10	17.75
Elektrik enerjisi	Kömür	0.30	17.25
Kara ve deniz taşımacılığı	Benzin	0.20	31.61
Hava taşımacılığı	Jet yakıtı	0.10	25.98
KESIRLER TOPLAMI		1.00	
TOPLAM EFEKTİF MALİYET			22.11

* Ev ve sanayi sektörü için ortalama değer.

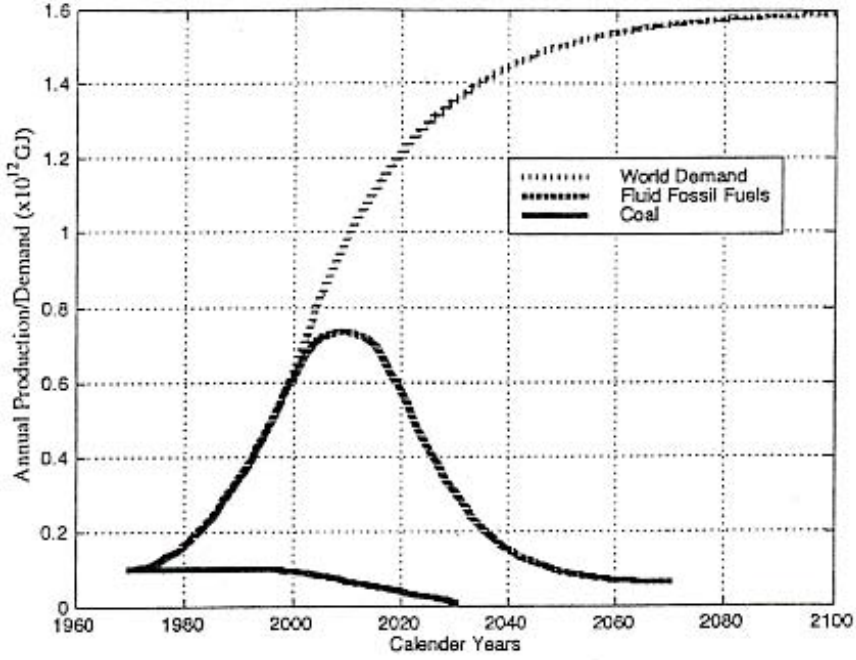
Table XII. Kömür/sentetik yakıt sisteminin efektif maliyeti

Uygulama	Yakıt	Enerji tüketim faktörü	Efektif maliyet (1998 US \$/GJ)
Isı enerjisi	Kömür SNG	0.30 0.10	17.75 36.64
Elektrik enerjisi	Kömür	0.30	17.25
Kara ve deniz taşımacılığı	SNG Syn-benzin	0.10 0.10	36.64 51.65
Hava taşımacılığı	Syn-jet	0.10	45.45
KESİRLER TOPLAMI		1.00	
TOPLAM EFEKTİF MALİYET			27.55

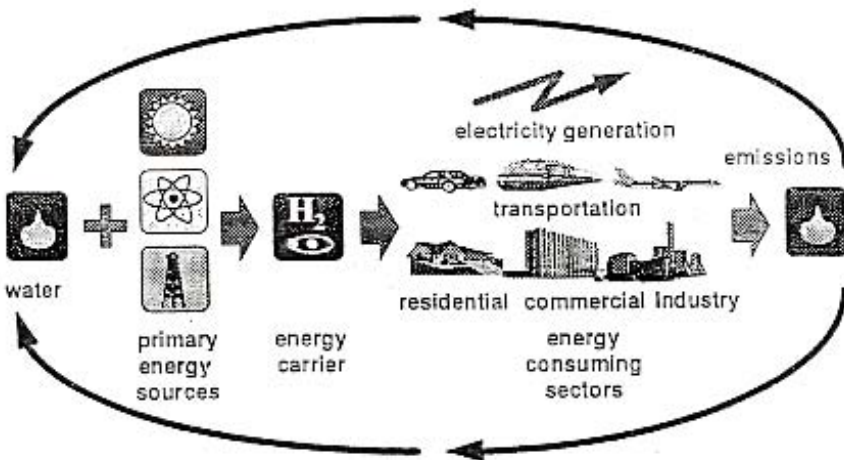
Table XIII. Güneş/hidrojen enerji sisteminin efektif maliyeti

Uygulama	Yakıt ^a	Enerji tüketim faktörü	Efektif maliyet (1998 US \$/GJ)
Isı enerjisi			
Alevli yanma	GH ₂	0.20	26.04
Buhar üretimi	GH ₂	0.10	20.83
Katalitik yanma	GH ₂	0.10	20.83
Elektrik enerjisi			
Yakıt hücreleri	GH ₂	0.30	14.06
Kara ve deniz taşımacılığı			
İçten yanmalı motorlar	GH ₂	0.10	21.36
Yakıt hücreleri	GH ₂	0.10	10.41
Hava taşımacılığı			
Ses-altı	LH ₂	0.05	26.26
Sesten hızlı	LH ₂	0.05	22.51
KESİRLER TOPLAMI		1.00	
TOPLAM EFEKTİF MALİYET			19.23

^a Hidrojenin 1/3'ünün hidrolik ve/veya rüzgar enerjisiyle, 2/3'ünün ise güneş enerjisi ile üretileceği varsayılmıştır.



Şekil 1. Dünya Fosil Yakıt Üretimi Tahminleri



Şekil 2. Hidrojen Enerji Sisteminin Şematik Diyagramı

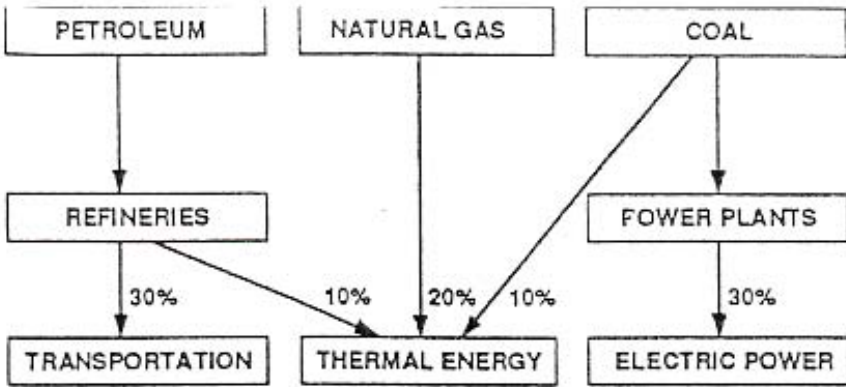
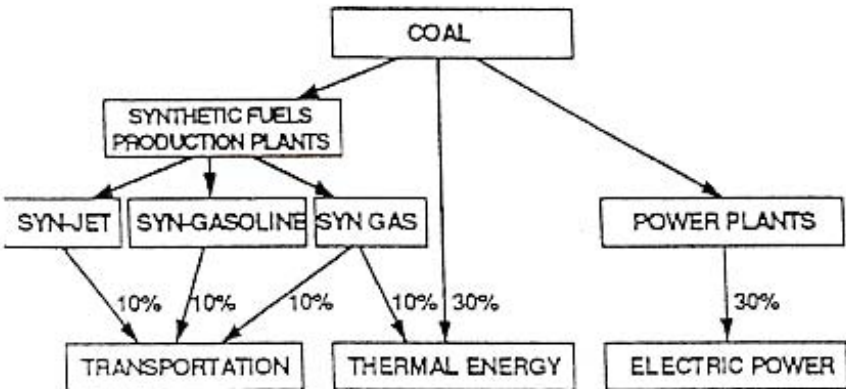
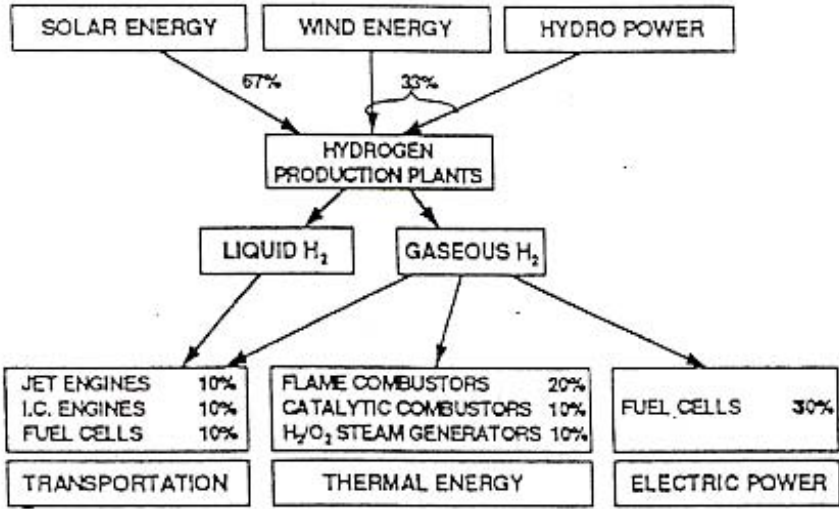


Figure 3. Fosil Yakıt Sistemi



Şekil 4. Kömür/Sentetik Fosil Yakıt Sistemi



Şekil 5. Güneş-Hidrojen Enerji Sistemi