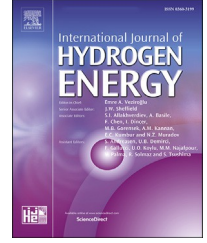




Çevrimiçi olarak www.sciencedirect.com adresinde mevcuttur.

ScienceDirect

dergi ana sayfası: www.elsevier.com/locate/he



Burdur, Türkiye için kentsel tekno-ekonomik hidrojen penetrasyon senaryo analizi

Tanay Sıdkı Uyar^a, İğ ancan Bes' ikci^a, Egemen Sulukan^{b,*}

^a Marmara Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

^b Milli Savunma Üniversitesi, Deniz Harp Okulu, Makine Mühendisliği Bölümü, 34942, İstanbul, Türkiye

ARTICLE INFO

Makale geçmişi:

Alındı 30 Mart 2019 Gözden
geçirilmiş haliyle alındı 13
Mayıs 2019
Kabul tarihi 16 Mayıs 2019
Çevrimiçi erişilebilir xxx

Anahtar kelimeler:

Kentsel enerji sistemi modellemesi
Hidrojen
Cevap-TİMES Burdur
Türkiye

ABSTRACT

Bu çalışmada, Türkiye'nin mevcut enerji karışımı ve enerji üretim altyapısı analiz edilmiş ve 2016-2031 döneminde ekonomik ve çevresel sonuçları öngörmek için Burdur TIMES enerji modeli üzerinde iki farklı hidrojen bazlı alternatif senaryo uygulanmıştır.

Burdur mevcut enerji ağını göstermek ve enerji taşıyıcıları ile ilgili teknolojiler arasındaki ilişkileri belirlemek için geliştirilmiş bir YEK oluşturulmuş ve daha sonra bu yapı, kara taşımacılığı talep tarafına entegre edilen yakıt pili ile çalışan kara taşıtı teknolojileri de dahil olmak üzere ilgili verilerle belirlenmiştir.

Bu makale, sürdürülebilir ekonomik büyümeyi sağlamak, ilgili çevresel emisyonları en aza indirerek enerji güvenliğini artırmak ve hidrojen tedarik zincirinin ve ilgili yakıt pili son kullanım teknolojilerinin şehir düzeyinde bir enerji modellemesi perspektifinde tanıtılmasının olası etkilerini göstermek için Burdur Şehrinde elektrik üretimi için yakıt karışımında alternatif bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojenin fizibilitesini analiz etmektedir. Burdur, hidrojen teknolojileri ile belirlenen kara taşımacılığı yolcu talebi seviyesini uygulamak için hedef şehir olarak seçilmiştir ve 2020 yılında hidrojen arabalarının uygulanmasından sonra; sadece 0,09 PJ hidrojen arabası faaliyetinin toplam

Burdur'da 43,44 kT CO₂ emisyonu, analiz zaman ufku arasında baz senaryodaki toplam emisyonun %8'ine karşılık gelmektedir. Son olarak hidrojen, Burdur'un mevcut enerji tedarik sistemindeki enerji karışımını çeşitlendirmek için temiz ve güvenilir bir seçenek olarak değerlendirilmiştir.

© 2019 Hydrogen Energy Publications LLC. Elsevier Ltd. tarafından yayınlanmıştır. Tüm hakları saklıdır.

Giriş

İnsan faaliyetlerine dayalı enerji üretim ve tüketim süreçleri atmosferdeki sera gazı (GHG) emisyonlarında önemli bir artışa neden olmuş ve bu durum küresel mekanizmaları daha temiz bir gelecek için ciddi önlemler alma konusunda tetiklemiştir. Bu kaygıyla 148 ülke Paris İklim Anlaşmasını onaylamıştır.

Anlaşması'nı 2015 yılında imzalamış ve sera gazı emisyonlarının mümkün olan en kısa sürede sınırlandırılması konusunda görüş birliğine varmıştır [1].

Enerji-gelişme-çevre etkileşimi açısından, hem enerji üretim hem de tüketim süreçlerinde kullanılan enerji taşıyıcılarının, çevre dostu teknolojiler kullanılarak sürdürülebilir kalkınmayı destekleyecek bir mühendislik yaklaşımıyla dikkatlice planlanması gerekmektedir.

* Sorumlu yazar.

E-posta adresi: esulukan@dho.edu.tr (E. Sulukan). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.144>

0360-3199/© 2019 Hydrogen Energy Publications LLC. Elsevier Ltd. tarafından yayınlanmıştır. Tüm hakları saklıdır.

Tüm enerji taşıyıcıları arasında hidrojen, dostu bir çözüm sunarken, daha yüksek verimlilikte enerji kullanımına katkıda bulunmakta ve iklim değişikliğiyle mücadelede destek olmaktadır. Hidrojen, doğada en kolay bulunabilen, kokusuz ve toksik olmayan bir elementtir. Ayrıca hidrojen bir enerji taşıyıcısıdır ve benzinin yaklaşık üç katı ile ağırlıkça yaygın yakıtlar arasında en zengin enerji içeriğine sahiptir. Yine de doğada serbest olarak bulunmaz ve fosil, yenilenebilir, nükleer enerjiden veya suyun elektrolizi yoluyla elde edilmesi gerekir [2]. Elde etme yöntemi açısından bakıldığında; hidrojen çoğunlukla fosil enerji taşıyıcılarından buhar metan reformu (SMR), kısmi oksidasyon (POX) ve oto-termal reform (ATR) yoluyla; SMR ve POX yöntemlerinin bir kombinasyonu olarak elde edilmektedir. Hidrojen, enerji, sanayi, ulaşım ve konut sektörleri gibi geniş ölçekli uygulamalarda kullanılmak üzere hidrojen ve oksijen ile sürekli çalışacak yakıt hücresi teknolojisi ile üretildikten sonra elektriğe dönüştürülebilir. Yakıt pilleri elektrik, ısı ve su çıktıları ile farklı boyutlarda tasarlanabilmektedir. Hidrojen, enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının azaltılmasında kullanıma potansiyeli ile tanınmıştır. Ayrıca, hidrojen üretimi için yenilenebilir kullanım seçenekleri oldukça makuldür çevresel bakış açısından [2].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki muazzam artış göz önüne alındığında, yenilenebilir kaynaklı elektriğin su elektrolizi yoluyla depolanması için hidrojen kullanımı enerji piyasalarında büyük bir değişim yaratacak gibi görünmektedir. Hidrojen ve elektrik birbiriyle uyumlu enerji taşıyıcılarıdır; hidrojen elektriğe dönüştürülebilir ya da tam tersi, sayılabilir bir rezerv olarak hareket eder ve enerji arz güvenliğini destekler. Hidrojenin uzun vadede düşük maliyetli yenilenebilir enerji kaynakları ile şebeke dışı elektrolizörlerde yer alarak dağıtık enerji sistemlerine entegre edilmesi beklenmektedir. Enerji teknolojilerinde zorlu bir konu olan hidrojen, şu anda geleneksel güç teknolojilerini kullanan uygulamaları elektrikleştirmek için bir ikame olarak kullanılabilir.

Türkiye gibi etrafı denizlerle çevrili ülkelerin

Bol miktarda hidrojen kaynağı, hidrojen ve ilgili teknolojileri kullanmak için büyük bir fırsatı sahip olacaktır, özellikle Karadeniz, deniz suyunun neredeyse %90'ının anaerobik olduğu dünyanın en büyük anoksik havzasıdır [3]. Ancak, hidrojen üretimi ve depolama teknolojileri, hidrojenin ulusal elektrik altyapısına dahil edilmesi ve yaygınlaştırılması açısından büyük zorluklarla karşı karşıyadır.

Bir ülkenin, hatta bir şehrin tüm enerji altyapısı oldukça karmaşık ve analiz edilmesi zor olabilir. Bu nedenle, ilk analiz edilen sistemin enerji ağının mevcut durumunu gösteren bir temel senaryo geliştirmek için enerji karar destek araçları kullanılmıştır. Daha sonra, bir şehrin enerji profili üzerindeki ilgili sonuçları öngörmek için farklı teknoloji veya politika seçeneklerini uygulamak üzere bir dizi alternatif senaryo geliştirilecektir.

Daha geniş bir ölçekte, ulusal ekonomiler, enerji karışımındaki seçenekleri çeşitlendirmek, yenilenebilir enerji kaynaklarının ek yüklerini ve yatırım maliyetlerini azaltmak ve iklim değişikliğiyle mücadele amacıyla güneş, rüzgar, jeotermal vb. yeni enerji üretim yöntemlerini uygulamak için alternatif yollar aramaktadır. Seçilen analiz alanı olarak Türkiye'nin enerji üretimi büyük ölçüde hidroelektrik kaynaklara dayanmaktadır,

kömür, doğal gaz ve petrol ve Türkiye güneş, rüzgar ve jeotermal alanlarındaki yenilenebilir potansiyelini değerlendireceğini ilan etmiştir.

Türkiye, 2009 yılında onaylanan "Türkiye Devlet Planlama Teşkilatı" koordinasyonundaki "Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi"nde enerji ile ilgili öncelikleri ve hedefleri belirlemiştir [4]. Bu strateji belgesi, uzun vadede arz güvenliği ve elektrik üretim hedeflerinin sağlanması için atılacak adımlar ile toplam elektrik üretiminin %30'unun yenilenebilir enerjiden sağlanması ana hedefini belirlemiştir. Ulusal enerji yol haritasını da içeren "Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı" 2014 yılında yayınlanmış ve toplam kurulu güç hedefleri 2023 yılı sonuna kadar 5000 MW güneş, 1000 MW jeotermal, 20000 MW rüzgar ve 34000 MW hidrolik güç olarak revize edilmiştir [5]. Hem yukarıda bahsedilen strateji belgesi hem de ulusal eylem planı, Türkiye Cumhuriyeti'nin yüzüncü yılı olan 2023'e kadar yenilenebilir enerji entegrasyonunun dikkatli bir şekilde planlanması ve verimli bir şekilde geliştirilmesi için bir yol haritası niteliğinde hedefler belirlemiştir. Bu çalışmanın kapsamına baktığımızda; hidrojen ilk olarak Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Stratejik Planı'nda (2015-2019) yer almış ve tam teşekküllü bir hidrojen teknolojileri laboratuvarı kurulması hedeflenmiştir [6]. Bunu takiben, toplu taşıma sistemlerini teşvik etmek için bir çerçeve oluşturmak amacıyla çevre dostu, hafif, elektrikli veya hibrit, hidrojen, doğal gaz yakıtlı araçların kullanımını teşvik etmek için ulaşım seçeneklerine hidrojen entegrasyonuna özel bir odaklanma ile Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023) 2018 yılında yayınlanmıştır. Bu eylem planının uygulanmasına şu yıl içinde başlanması hedeflenmektedir

2020 [7].

Tüm bu gerçekleri akılda tutarak; bu makale, resmi eylem planının yönlendirdiği şekilde 2016-2031 dönemi için geliştirilen Burdur enerji modeli üzerinde uygulanan iki alternatif senaryo aracılığıyla hidrojen kullanımına ilişkin resmi hedeflerin ilgili sonuçlarını analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bildiğimiz kadarıyla bu analiz, Türkiye'de kentsel enerji sistemi analizine dayalı bir yaklaşımla uzun vadeli bölgesel aşağıdan yukarıya modelleme uygulamasına yönelik ilk girişimdir. Bu analiz aynı zamanda Türkiye'de hidrojen tedarik zinciri ve ilgili yakıt pili teknolojilerini içeren bir kentsel enerji veri tabanına dayalı entegre bir optimizasyon modeli öneren ilk girişimdir.

Enerji sistem analizi ve modelleme çalışmaları, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından Enerji Teknolojisi Sistem Analizi Programı (ETSAP) kapsamında 20 ülke, resmi makamlar, üniversiteler ve özel kuruluşların katılımıyla geliştirilmiştir. TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System); uzun vadeli enerji senaryoları ve derinlemesine ulusal, çok bölgesel ve küresel enerji ve çevre politikası analizleri oluşturmak için bir enerji-ekonomi-çevre modeli üreticisi olarak ETSAP'ın son çıktısıdır. TIMES, sürdürülebilir enerji sistemleri için en düşük maliyetli politika değerlendirmeleri elde etmek için kullanılabilir ve esas olarak düşük emisyonlu kalkınma stratejilerinin ve ulusal olarak belirlenen katkılarının ve ilgili yol haritalarının hazırlanması için uygundur.

TİMES bir referans enerji sistemi (RES) yapısına dayanmaktadır. ture, analiz edilen kapsamın mevcut enerji-ekonomi-çevre dinamiklerini tanımlamaktadır. Teknoloji açısından zengin detaylı bir

enerji veritabanı, ilgili enerji sisteminin çok dönemli bir zaman aralığında olası etkileşimlerini ve karşılıklı ilişkilerini değerlendirmek ve öngörmek için uzun vadeli olarak oluşturulur. TIMES, MARKAL (MARKet ALlocation'ın kısaltması) model üreticisinin halefi olarak yeni nesil enerji sistemi analiz ve modelleme platformudur [8].

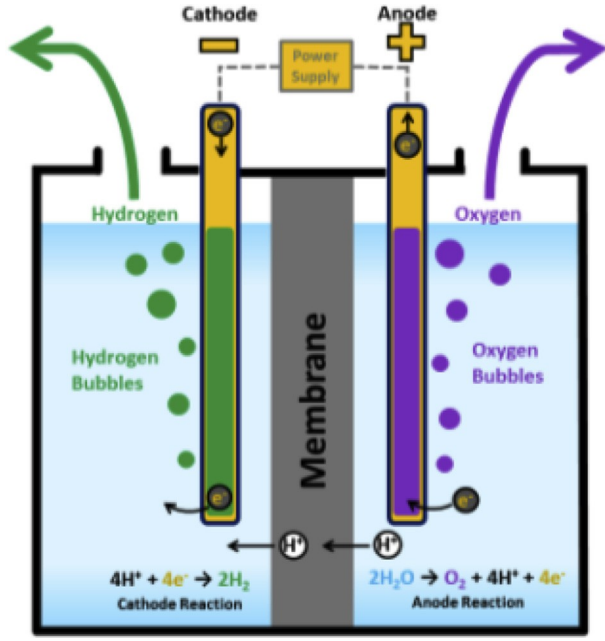
Hidrojen enerjisi alanında farklı perspektiflerden yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Karapekmez ve Dincer, jeotermal enerji santrallerinde hidrojen sülfürden hidrojen üretimini modellemiş ve hidrojen sülfür ve cıva emisyonunun azaltılması için AMIS (AMIS® - İtalyanca "Cıva ve Hidrojen Sülfürün Azaltılması" kısaltması) teknolojisini öncelikle H_2S 'den hidrojen üretmek için kullanmıştır [9]. Li ve arkadaşları hidrojen yakıt hücresi araç satışları ile yakıt ikmal istasyonlarının sayısı arasındaki ilişkiyi araştırmayı amaçlamış ve entegre bir optimizasyon modeli önermiştir [10]. Kougias ve arkadaşları, 20 yıllık bir dönem boyunca (2016-2036) Ege Denizi'ndeki belirli ada şebekelerini analiz ederek, birbirine bağlı olmayan Akdeniz adalarının sürdürülebilir bir enerji modellemesini geliştirmiştir [11]. Nagasawa ve arkadaşları, hafif hizmet araçları için potansiyel hidrojen talebini tahmin etmek ve doğrusal bir programlama modeli aracılığıyla rüzgar enerjisinden geçici yenilenebilir hidrojen üretimini ölçmek için hidrojen talebi ve üretim potansiyelini analiz etmiştir [12]. Mah ve arkadaşları Malezya'daki hidrojen ekonomisinin gelecekteki yönelimlerini incelemiş ve yenilenebilir hidrojenin Malezya pazarına girerek hidrojenin kimya endüstrileri için hammadde olarak kullanılmasını önermiş ve hidrojenin yakıt hücreleri kullanılarak otomobiller için yakıt olarak kullanılmasını tavsiye etmiştir [13]. McDowall, hidrojen ekonomisini değerlendirmek için hibrit bir yaklaşım önermiştir.

İngiltere'de hidrojen geçişleri, nicel enerji sistemleri modellemesi ile nitel sosyo-teknik senaryolar [14]. Dincer ve Acar, akıllı hidrojen enerji çözümleri portföyünü tanıtmaya ve vurgulamaya odaklanarak akıllı enerji çözümlerini analiz etmiştir [15]. Chapman ve arkadaşları hidrojenin gelecekteki potansiyelini değerlendirmiş ve hidrojenin benimsenmesinin önündeki ekonomik engellerin azaltılmasına yardımcı olacak araştırma alanlarına ışık tutmuştur [16]. Welder ve arkadaşları, fazla elektriği kullanma ve hidrojeni elektrige dönüştürme seçeneklerini araştırmak ve ekonomik olarak değerlendirmek için mekansal ve zamansal olarak çözümlenmiş bir optimizasyon modeli kullanmıştır [17]. Groppi ve arkadaşları, farklı senaryolar üzerinde HOMER yazılımını kullanarak küçük adalarda hidrojen ve batarya depolamanın entegrasyonu ile ilgili ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği incelemiştir [18]. Huang ve arkadaşları, konut kullanımı için PV-hidrojen- REVB hibrit enerji sisteminin tasarım ve boyutlandırma optimizasyonunu incelemiştir [19]. Colber- taldo ve , ülke ölçeğinde gelecekteki enerji senaryolarını analiz etmiş ve enerji ve ulaşım sektörleri arasındaki etkileşime odaklanarak bütünsel enerji sistemini temsil eden çok düğümlü bir model geliştirmiştir [20]. Parra ve arkadaşları, güçten güce, güçten gaza, hidrojen yakıt ikmal ve sabit yakıt hücrelerini içeren hidrojen enerji sistemlerinin tekno-ekonomik bir incelemesini sunmuştur [21]. Blazquez-Diaz, bir hidrojen yakıt ikmal istasyonunun en iyi tasarımını bulmak için yolları analiz etmiştir [22]. İsmail ve arkadaşları, üretilen hidrojen miktarını artırmak için MATLAB'da bir akış şeması çalıştırarak Mısır'daki küresel güneş radyasyonu yoğunluğunu tahmin etmek ve öngörmek için matematiksel bir model geliştirmiştir [23]. Hanley ve arkadaşları, hidrojenin diğer düşük karbonlu teknolojilere kıyasla ortaya çıkmasına neden olan itici güçleri ve politika senaryolarını gözden geçirmiş, ardından karbonsuzlaştırılmış bir enerji sistemine doğru ilerlemek için hidrojenle ilgili olarak dikkate alınması gereken çeşitli seçenekleri değerlendirmeyi önermiştir [24]. Kavadias ve arkadaşları bir simülasyon algoritması

geliştirerek

Tablo 1 Türkiye'nin enerji rezervleri [40].				
Kaynaklar	Kanıtlanmış Muhtemel			Toplam
	Mümkün			
Taş Kömürü (Milyon Ton)	506.5	425	368.4	1308.50
Linyit (Milyon Ton)				
Elbistan	4845.50			4845.50
Diğer	9146.00	768.9	4.5	9919.40
Toplam	13991.50	768.9	4.5	14764.90
Asfaltit (Milyon ton)	82			82
Bitümlü (Milyon ton)	1641.40			1641.40
Ham Petrol (Milyon varil)	7167			7167
Doğal Gaz (Milyon m ³)	23.2			23.2
Nükleer Kaynaklar (Ton)				
Uranyum	9129			9129
Toryum	380.000			380.000

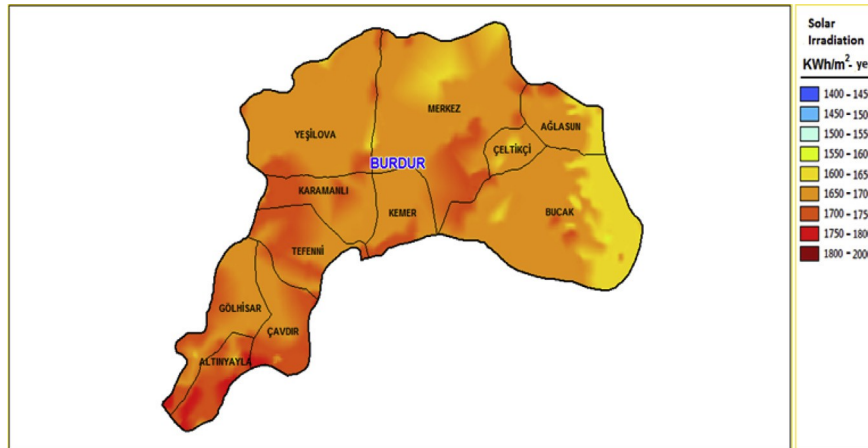
Tablo 2 Türkiye'nin elektrik üretimi [42].						
Yıl	Toplam (GWh)	Kömür	Sıvı yakıtlar	Doğal Gaz	Hidro	Yenilenebilir Enerji ve Atıklar
				(%)		
2010	211208	26.1	1.0	46.5	24.5	1.9
2011	229395	28.8	0.4	45.4	22.8	2.6
2012	239497	28.4	0.7	43.6	24.2	3.1
2013	240154	26.6	0.7	43.8	24.7	4.2
2014	251963	30.2	0.9	47.9	16.1	4.9
2015	261783	29.1	0.9	37.9	25.6	6.5
2016	274408	33.7	0.7	32.5	24.5	8.6



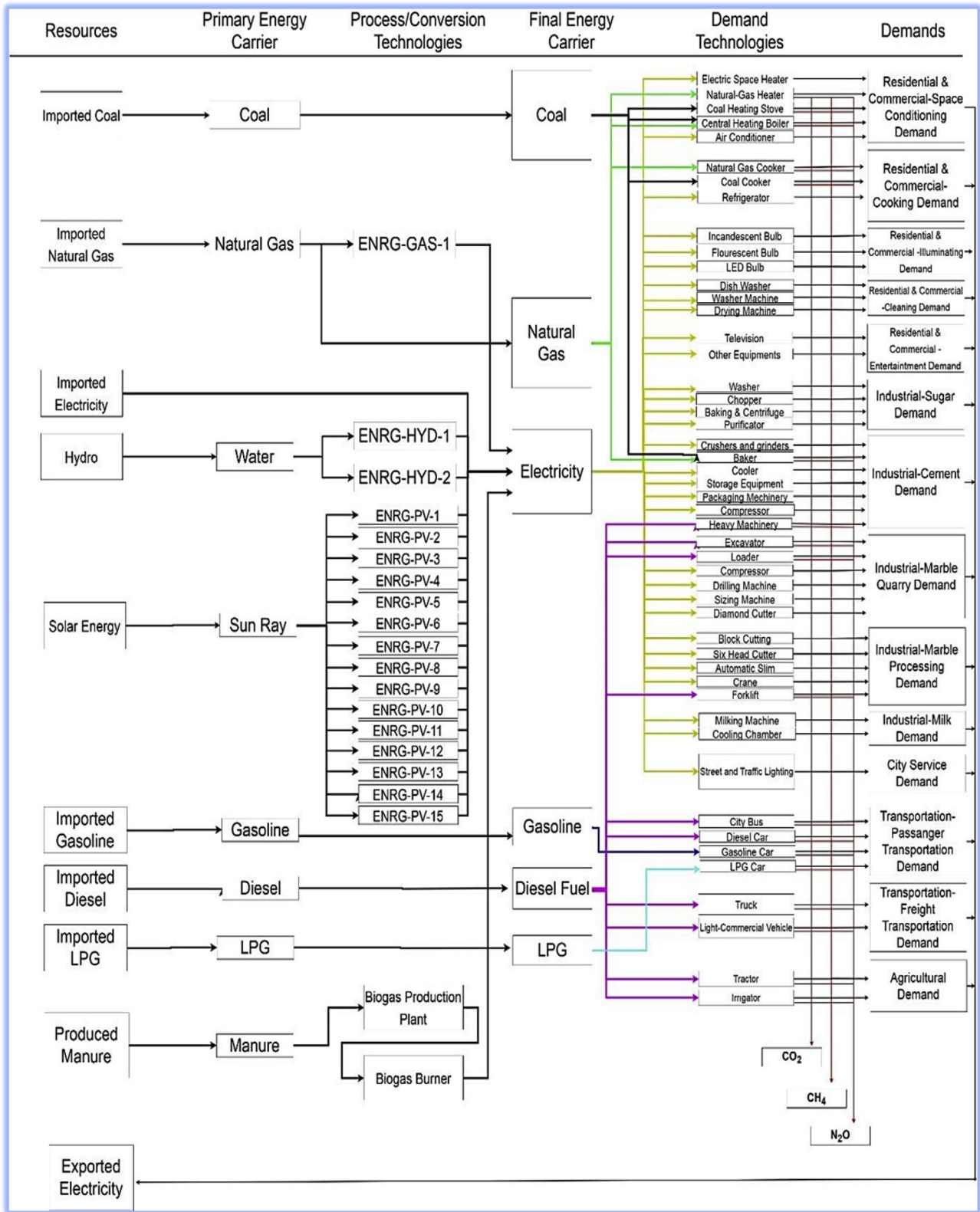
Şekil 1 PEM'de elektroliz işlemi [52].

daha yüksek fotokimyasal ozon oluşturma potansiyelinin yanı sıra 0,0043 kg PO₄eq/kg H₂ ötrofikasyon potansiyeline sahiptir [28]. Ishaq ve Dincer, döngülerin modellenmesi ve simülasyonu için kullanılan Aspen plus yazılım aracı ile umut verici bir hidrojen üretim yöntemi olarak CuCl termokimyasal döngüsünün üç farklı konfigürasyonunu analiz etmiş ve termal yönetimin iyileştirilmesi ve ekserji yıkımlarının azaltılmasıyla döngü performansının değerlendirmiştir [29]. Öztürk ve Dincer, kombine çevrim yoluyla elektrik üretmek için farklı yakıtların çevresel etkilerinin karşılaştırmalı bir yaşam döngüsü değerlendirmesini (LCA) değerlendirmiş ve çalışmanın sonuçlarının hidrojenin çevresel etkilere göre en iyi yakıt seçeneği olduğunu gösterdiğini bildirmiştir [30]. Ishaq ve arkadaşları, Engineering Equation Solver ve Aspen Plus simülasyon yazılım paketleri ile termal yönetim yoluyla bir cam üretim sürecine bağlı hidrojen üretimi için çok jenerasyonlu bir sistemi analiz etmiş ve

genel sistemin enerji verimliliğinin %36,5, ekserji verimliliğinin ise %38,1 olduğunu bildirmiştir [31]. Bir başka çalışmada Ishaq ve Dincer, termokimyasal olarak temiz hidrojen üretmek ve bunu amonyağa dönüştürmek için çimento cürufu atık ısısını kullanan yeni bir entegre enerji sistemi önermiştir. Aspen Plus simülasyon yazılımı kullanılarak farklı çalışma koşulları altında sistem performansını araştırmak için çok sayıda parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir [32]. Ahmed ve Dincer, fotoelektrokimyasal hidrojen üretim sistemlerini gözden geçirmiş ve fotoelektrokimyasal süreçlerin modellenmesi ve sayısal simülasyonunun güncel çok ölçekli analize dayandığını vurgulamıştır. Yarı iletken fotoelektrot malzemelerinde elde edilen başarıları ve güneşten hidrojen verimliliğini artırmak için gereken mühendislik yöntemlerini değerlendirmişlerdir [33]. Yüksel ve arkadaşları, daha çevre dostu çoklu nesil çıktıları için hidrojen üretimi ve sıvılaştırma ile güneş enerjisi kulesi destekli çoklu üretim sisteminin termodinamik bir incelemesini gerçekleştirmiştir. Çoklu üretim sisteminin enerji ve ekserjetik verimliliğini sırasıyla %65,17 ve %62,35 olarak hesaplamışlardır. Güneş ışınımı yoğunluğunun diğer koşullar ve faktörler arasında en etkili parametre olduğu sonucuna varmışlardır [34]. Safari ve Dincer, fazla elektrik üretimi durumunda elektrokimyasal hidrojen üretimi için bir pro- ton değişim membranı (PEM) elektrolizörünün kullanıldığı, çürütme işleminden üretilen biyogaz ile işletilen çoklu jenerasyon için atık su arıtma tesisinden AAT) gelen kanalizasyon çamurunun anaerobik çürütülmesinin (AD) enerji ve ekserji analizlerini araştırmıştır [35]. Acar ve Dincer, hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlar bağlamında hidrojenin ulaşım sistemleri için ana yakıt olma olasılığını, CO₂ ve SO₂ emisyonları, karbonun sosyal maliyeti, enerji ve ekserji verimlilikleri, yakıt tüketimi, yakıt fiyatı ve sürüş menzilleri açısından geleneksel, hibrit, elektrik, biyoyakıt, yakıt pili ve hidrojen yakıtlı İYM araçları üzerinde bir değerlendirme yaparak araştırmıştır. Bu kriterlere göre, yakıt pilli araçların en yüksek ortalama performans sıralamasına sahip olduğunu, bunu hidrojen yakıtlı İYM ve biyoyakıtlı araçların izlediğini, konvansiyonel araçların ise en düşük ortalama performans sıralamasına sahip olduğunu, bunu elektrikli araçlar ve hibrit araçların izlediğini bildirmişlerdir [36].



Şekil 2 Burdur'un güneş ışıması haritası [53].



Şekil 3 Burdur'un referans enerji sistemi.

Shah ve arkadaşları, Pakistan'ın Belucistan eyaleti için kırsal elektrifikasyon ele alarak bölgenin potansiyelini ve kırsal elektrifikasyon için solar PV kullanımının ekonomik fizibilitesini değerlendirmiştir [37]. Mirjat ve enerji ve güç planlamasına odaklanmıştır.

MARKAL/TIMES; LEAP, ENPEP BALANCE, MESSAGE ve EnergyPLAN gibi enerji modelleme araçları kullanılarak Pakistan'da entegre enerji planlaması konusunda yapılan çalışmalar, bu tür araçların sürdürülebilir enerjinin geliştirilmesine yardımcı olacağını vurgulamıştır.

Tablo 3. Sektörel talepler (PJ).

Talep Grubu	Talep	2016	2021	2026	2031
Konut ve ticari	Temizlik	0.130	0.162	0.202	0.252
	Yemek pişirme	0.401	0.499	0.622	0.775
	Eğlence	0.130	0.162	0.202	0.252
	Aydınlatma	0.035	0.044	0.055	0.068
	Alan koşullandırma	1.244	1.551	1.933	2.408
Endüstriyel	Çimento	0.668	0.832	1.037	1.292
	Mermer işleme	0.682	0.850	1.059	1.320
	Mermer ocağı	0.343	0.428	0.533	0.664
	Süt Ürünleri	0.177	0.221	0.275	0.343
	Şeker	0.041	0.050	0.063	0.078
Şehir hizmetleri	Sokak aydınlatması ve trafik ışıkları	0.016	0.020	0.025	0.032
Ulaşım	Yük taşımacılığı	3.631	4.525	5.639	7.027
	Yolcu taşımacılığı	0.911	1.135	1.415	1.763
Tarımsal	Tarım	0.107	0.133	0.166	0.207

politikalarının ülke ölçeğinde değerlendirilmesi [38]. Bir diğer dikkat çekici çalışmada Mirjat ve arkadaşları, enerji modellemesi bağlamında geliştirilen dört senaryo alternatifini uygulayarak uzun vadeli elektrik planlaması için enerji modelleme sonuçlarının sürdürülebilirlik değerlendirmesi için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) metodolojisini kullanmışlardır [39].

Son dönemdeki literatür, enerji modelleme araçlarının enerji sisteminin enerji-ekonomi-ekoloji-çevre boyutlarında çeşitli yaklaşımlarla hidrojene odaklanan bir dizi çalışmada kullanıldığını göstermektedir.

Bu çalışma dört bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde Türkiye'nin ve Burdur ilinin enerji potansiyeli ile mevcut hidrojen üretim teknolojileri ve analiz bölgesi hakkında kısaca bilgi verilirken, ikinci bölümde Burdur'un enerji sistemi hakkında TIMES metodolojisi ile geliştirilen mevcut ve alternatif senaryolar hakkında bir fikir verilmektedir. Bölüm 3'te analiz ve sonuçlar tanıtılmakta, son bölümde ise çalışmanın temel bulgularına yer verilmektedir.

Türkiye'de enerji potansiyeli ve elektrik üretimi

Türkiye, Avrupa'nın altıncı büyük elektrik pazarıdır ve enerji ihtiyacının %70'ini diğer ülkelerden ithal etmektedir. Bu da Türkiye'nin kendi linyit potansiyeline rağmen enerjide dışa bağımlılığının yüksek olduğunu kanıtlamaktadır. Tablo 1 konvansiyonel rezervleri, Tablo 2 ise Türkiye'nin elektrik üretimini göstermektedir.

Türkiye büyük bir yenilenebilir enerji potansiyeline sahiptir. Resmi hedefler toplam hidrolik kapasiteyi %30, rüzgar kapasitesini üç katına çıkarmayı ve güneş ve biyokütle kapasitesini iki katına çıkarmayı amaçlamaktadır. Bununla birlikte, Türkiye'de jeotermal enerji ulusal hedeflerine çoktan ulaşmıştır [41]. Tablo 2, Türkiye'de 2010 ve 2016 yılları arasında kaynaklara göre enerji üretimini göstermektedir. Toplam üretim, kömür ve yenilenebilir enerji kaynaklarındaki artış eğilimiyle eş zamanlı olarak artarken, hidro bazlı elektrik üretimi istikrarlı bir seyir izlemiştir.

Yerli enerji piyasasına yeni giren teknolojilere bir örnek olarak, Türkiye'nin güneş enerjisi kapasitesi 2010 yılında sadece 6 MW idi. Güneş enerjisine yapılan yatırımlar 2005 yılında 5346 sayılı kanunla yapılan düzenlemeden sonra biraz artmıştır. Bu kanun, yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretimi konularını düzenlemiştir [43]. Daha sonra bu kanun

2010 yılında güncellenen ve daha sonra 6094 sayılı kanunla yürürlüğe giren, kWh başına üretilen elektriğe verilen teşvikler, hidroelektrik ve rüzgar için 7,3 ABD doları sent, jeotermal için 10,5 ABD doları sent, biyokütle ve güneş dayalı elektrik üretimi için 13,3 ABD doları sent olarak revize edilmiştir. Ancak, hidrojen bazlı üretim ve ilgili teknolojiler Türkiye'deki bu resmi teşvik mekanizmalarında yer almamaktadır [44].

Hidrojen-enerji proses zinciri

Hidrojen-enerji proses zinciri temel olarak üç ana adımdan oluşur. İlk adım hidrojen evrimidir. Tan ve arkadaşları, bilyleye öğütülmüş MgMg₂Si kompozitinin deiyonize suda ve MgCl₂ çözeltisinde hidrolizi yoluyla hidrojen üretiminin performansını ve mekanizmasını analiz etmiştir. Elde edilen MgMg₂Si kompozitinin saf magnezyumdan nispeten daha yüksek hidrojen üretim performansı sunduğunu bildirmişlerdir [45]. Bir diğer dikkat çekici çalışmada, Ma ve arkadaşları dielektrik bariyer deşarj plazma destekli öğütmenin (P-öğütme) Mg-grafit kompozitlerinin hidrojen üretim özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sundukları bulgular, yüksek hidrojen yoğunluğuna ve düşük maliyete sahip P-öğütülmüş Mg-EG kompozitinin umut verici bir hidrojen üretim malzemesi olabileceğini göstermiştir [46].

Evrimi takiben, ikinci adım hidrojenin depolanmasıdır. Ouyang ve arkadaşları, Mg bazlı malzemelerin yüksek kapasiteli hidrojen depolama için umut verici adaylar olduğunu bildirmişlerdir. Ancak, zayıf hidrojenasyon/dehidrojenasyon kinetiği ve yüksek desorpsiyon sıcaklığı bu uygulamaların önündeki başlıca engellerdir. Hidrürleme/dehidrürleme işleminin, yerinde oluşan son derece ince CeH₂/CeH_{2.73} ve Ni'nin Mg/MgH₂ye kombinasyonu ile katalize edildiğini bulmuşlar ve malzemenin 500'den fazla hidrojenasyon/dehidrojenasyon döngüsü için yüksek performansını koruyabildiğini bildirmişlerdir [47]. Bu doğrultuda, Zhu ve arkadaşları Mg ve MgNi alaşımlarının hidrojen absorpsiyon/desorpsiyon kinetik özelliklerini geliştirmek için toz ve film formunda kompozit hidrojen depolama alaşımları sentezlemiş ve incelemişlerdir. Mg ve Mg_{0.5}Ni_{0.5} bazlı alaşımların hidrojen sorpsiyon özelliklerinin, uygun mikroyapı özelliklerine sahip kompozitler oluşturularak önemli ölçüde geliştirilebileceğini değerlendirmişlerdir [48]. Cao ve arkadaşları La_{0.95}Sm_{0.05}Mg_{0.40}Ni_{0.25}Al_{0.42}Co_{0.32} alaışımının yapısal özelliklerini ve elektrokimyasal özelliklerini analiz etmiş ve sonuçları rapor etmiştir

Tablo 4. Senaryolardaki sınırlar ve serbestlik.

Senaryo	Sınırlar	Özgürlük	Maliyet
BAZ (BAU) HYD-1 HYD-2	2031'e kadar aynı eğilim Yolu taşımacılığı talebinin %10'u hidrojenli araçlarla yer değiştirdi. Yolu taşımacılığı talebinin %10'u hidrojenli araçlarla yeniden konumlandırıldı.	Aynı eğilim Hidrojenli araç kullanımı araç kullanımı	İstatistiksel veriler Düşük maliyetli hidrojen üretim yöntemi Yüksek maliyetli hidrojen üretim yöntemi

yüksek deşarj kapasitesi ve mükemmel döngüsel özellik gösterir [49]. Hidrojenin rejenerasyonu, hidrojen-enerji sürecinde üçüncü adım olarak kabul edilir. Ouyang ve , mükemmel hidrojen üretilen malzeme olarak sodyum borohidür (NaBH_4) üzerine odaklanmış ve indirgeme işlemi için başlangıç malzemesi olarak kullanılan hidrürler olmadan NaBH_4 rejenerasyonu için uygun ve ekonomik bir yöntem geliştirmişlerdir [50]. Daha sonra, Zhong ve arkadaşları ucuz MgAl alaşımının H^+ NaBH_4 'te H^- ye dönüştüren bir indirgeyici ajan olarak çalışmasını analiz . Bu, metal hidrürlerin kullanıldığı yonteme kıyasla maliyeti 20 kat azaltarak NaB(OH)_4 ten kullanılmış NaBH_4 'ün rejenerasyonu için basit bilyalı öğütme işlemlerinin ticari olarak [51] uygulanmasına kapı açmaktadır .

Hidrojen şu anda rafineri işlemlerinde hidrokraking ve destülürizasyon için kullanılmaktadır. Kimya endüstrisinde amonyak üretiminde ve tarım sektöründe gübre yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca metal üretimi ve imalatı, metanol üretimi, gıda işleme ve elektronik endüstrilerindeki uygulamalar için de kullanılmaktadır.

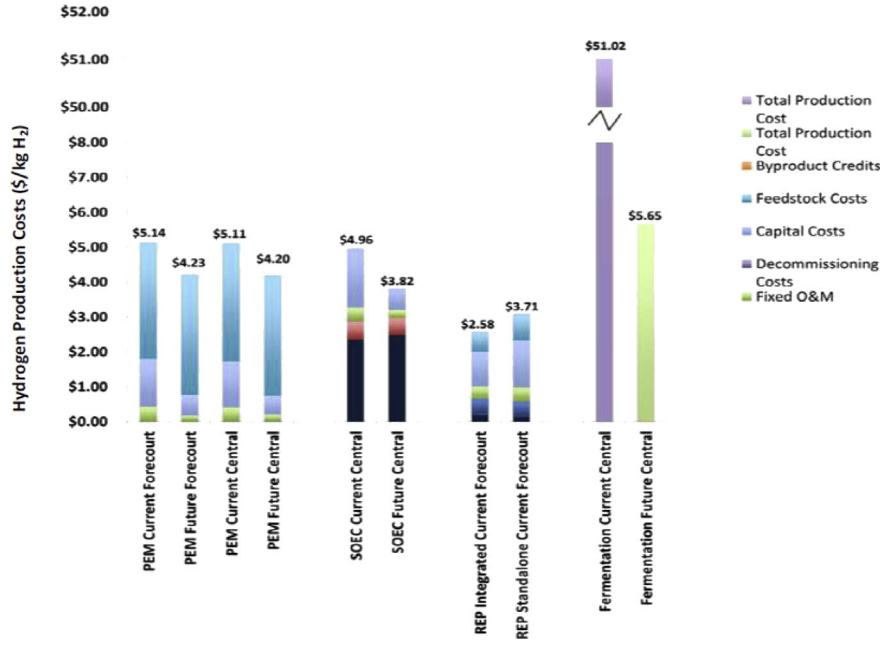
Hidrojen içeren sentez gazı kömür gazlaştırma işleminin bir ürünüdür. Kömür, 18. yüzyılın sonlarında aydınlatma, ısıtma ve pişirme amaçlı kömür gazı üretmek için gazlaştırılmıştır. Günümüzde, en endüstriyel hidrojen ürünü doğal gaz gibi fosil enerji taşıyıcılarındaki metandan elde edilmektedir ve suyun alkali elektrolizörler aracılığıyla elektroliz edilmesi hidrojen üretimi için bir başka yöntemdir.

Elektroliz farklı termal koşullar altında ve kilovat ile megavat arasında değişen ölçeklerde gerçekleştirilebilir. Polimer elektrolit membran (PEM), Şekil 1'de gösterildiği gibi ve alkali teknolojiler düşük sıcaklıklar altında çalıştırılır. PEM elektrolizi, alkali elektrolize göre daha yüksek sermaye harcamasına sahiptir, daha kompakt bir yapıya sahiptir ve özellikle yenilenebilir enerji ile kullanılmaya uygundur ve karbon ayak izi bırakmaz. Yakıt hücreleri ve elektrolizörler temel olarak basit ve ters işlemlere dayanır: elektroliz suyu hidrojen ve oksijene ayırırken, yakıt hücreleri elektrik üretmek için hidrojen ve oksijeni işler. Yakıt hücreleri, elektrolizörlere benzer şekilde kapsamlı sistemlere entegre edilebilecek ve kullanılabilecek şekilde ölçeklendirilebilir. Yakıt pilleri, çalışma koşulları, katalizör ve yakıt türleri ve hidrojenin saflığı açısından polimer elektrolit membran veya proton değişim membranı (PEM), doğrudan metanol yakıt pili (DMFC), alkali yakıt pilleri, fosforik asit yakıt pilleri (PAFC), katı oksit yakıt pilleri (SOFC), erimiş karbonat yakıt pilleri (MCFC) olmak dört segmentte sınıflandırılmaktadır [43].

Burdur Şehri Hakkında Bilgi

Burdur şehri, 2017 yılı sonu itibariyle 264776 kişilik nüfusuyla Türkiye'nin güneybatı kesiminde yer almaktadır. Burdur'un en önemli gelir kaynağı olan mermer, kente özgü mermer türleri ile tanınmaktadır. Bunun dışında tarım ve süt ürünleri şehrin ikincil gelir kaynağıdır. Burdur, konumu itibariyle yenilenebilir enerji potansiyeli açısından büyük bir avantaja sahiptir ve özellikle güneş enerjisi hidrojen üretiminde kullanılabilir. Şekil 2'de Burdur'un güneş ışınımı haritası gösterilmektedir.

Burdur'da 2017 yılı sonu itibariyle ikisi hidrolik, biri doğalgaza dayalı ve on beşi güneş fotovoltaik olmak on sekiz adet faal elektrik santrali bulunmaktadır. Hidrolik santraller elektrik üretiminin yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır.



Şekil 4. Hidrojen üretim yöntemleri ve maliyetleri [56].

Üretim. Burdur Şeker Fabrikası'nın doğal gaz santrali elektrik üretiminin yaklaşık %10'unu, güneş enerjisi santralleri ise yıllık üretimin yaklaşık %30'unu oluşturmakta olup, güneş enerjisi tesislerinin kurulu güçleri 80260 kW arasında değişmektedir. Buna ek olarak, inşa halinde olan iki yeni güneş enerjisi santrali ve lisanslama sürecinde olan bir güneş enerjisi santrali bulunmaktadır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'na göre, elektrik santralleri 2016 yılında toplam tüketimin yalnızca üçte birini üretmiştir. Operasyonel elektrik üretim altyapısı açısından Burdur'un elektriğe büyük ölçüde bağımlı olduğu açıktır.

Materyaller ve yöntemler

TIMES'in ana yapısı ve amaç fonksiyonu

Bu çalışmada, analizlerde MARKAL tabanlı bir Answer-TIMES platformu kullanılmıştır. Temel olarak, TIMES bir optimizasyon

enerji-ekonomi-çevre modelleri için kullanılan bir yöntemdir. Geliştirilen bir model çoklu bölge ve çoklu dönem düzeyinde çalışabilir, bu da birden fazla farklı bölgenin birden fazla farklı zaman dilimi ile simüle edilebileceği anlamına gelir. Model temel olarak verilen koşullar altında ekonomik, çevresel ve teknolojik parametrelere göre en düşük maliyetli yöntemi hesaplar ve seçer.

TIMES enerji modeli yapısı modelleyici tarafından tasarlanır ve ardından ilgili enerji taşıyıcıları, teknolojiler, çevresel emisyonlar ve talepler her bir ayrı bölüm için ilgili nitel ve nicel veri girdisi ile belirtilir. Belirtilen ögeler hem enerji sisteminde şu anda var olanları hem de belirtilen zaman ufkunda gelecekteki adayları karakterize eder. Belirtilen zaman serisi ve zamandan bağımsız veriler, belirlenen bölge ve zaman ufkunda üzerindeki ekonomik ve teknoloji temelli politika varsayımlarını içerir. Referans yıl geçmiş bir yıl olarak ve istatistiksel değerler modelleyici tarafından bu yıla sabitlenir.

Bir TIMES çalışmasının amaç fonksiyonu, bir dizi tanımlanmış maliyeti karşılarken sistemin net toplam maliyetini en aza indirmektir.

Tablo 5. PEM elektrolizi için H₂ üretim maliyeti kırılımları [56]

	Öngörülen Mevcut Ön Avlu (1500 kg/gün)	Öngörülen Gelecek Ön Avlu (1500 kg/gün)	Öngörülen Mevcut Merkez (50000 kg/gün)	Öngörülen Gelecek Merkez (50000 kg/gün)
Yığın sermaye maliyeti BOP	\$0.42	\$0.16	\$0.48	\$0.17
sermaye maliyeti	\$0.61	\$0.25	\$0.53	\$0.26
Dolaylı sermaye	\$0.32	\$0.16	\$0.32	\$0.10
Maliyet Hizmetten	\$0.02	\$0.01	\$0.00	\$0.00
Çıkarma Sabit	\$0.42	\$0.18	\$0.40	\$0.20
İşletme ve Bakım	\$3.34	\$3.46	\$3.38	\$3.46
Elektrik				
hammadde	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01
Değişken İşletme ve	\$5.14	\$4.23	\$5.12	\$4.20
Bakım Toplam H ₂ üretim maliyeti				

Tablo 6 8. Reformer-elektrolizör-saflaştırıcı yönteminin maliyet dökümü [56].

İlişkili maliyetler	Entegre REP (\$/kg)	Bağımsız REP (\$/kg)
Sermaye maliyetleri	\$0.99	\$1.34
Hizmetten Çıkarma maliyetler	\$0.01	\$0.01
Sabit İşletme ve Bakım	\$0.34	\$0.41
Hammadde maliyetleri	\$0.57	\$0.76
Hammadde maliyetleri	\$0.00	\$0.00
Yan ürün kredileri	\$0.00	\$0.00
Diğer değişken maliyetler	\$0.67	\$0.58
Toplam	\$2.58	\$3.10

kısıtlamaları; indirgenmiş sistemin tüm bölgelerinin toplamı olarak
yıllık maliyetlerin bugünkü değeri, önceden belirlenmiş bir zaman ufku. Bu nedenle:

$$= \sum_{r=1}^R \frac{1}{1 + \text{REFYR} \cdot y} \cdot \text{ANNCOST}(r; y) \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de modelin NPV'si Net Bugünkü Değer) modellenen enerji sisteminin toplam değerini göstermektedir. ANNCOST yıllık maliyeti ifade etmektedir. Genel iskonto oranı "d" ile gösterilir. REFYR iskonto için referans yılı, YEARS her bir "t" dönemindeki yıl sayısını ve "R" harfi ise bölge sayısını ifade etmektedir.

$$\text{VAR OBI}_{(z)} = \sum_{r=2}^{\text{REG}} \text{REG OBI}_{(z; r)} \quad (2)$$

Eşitlik (2) tüm bölgeleri içeren genel amaç fonksiyonunu temsil eder ve her bir bölgesel amaç OBJ(z,r) aşağıdaki Eşitlik (3)'te verildiği gibi dokuz elemanın toplamından oluşur.

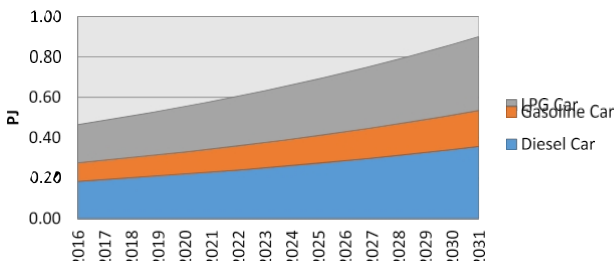
$$\text{REG OBI}_{(z; r)} = \sum_{y=2(-\infty; +\infty)}^{\infty} \text{DISC}(y; z) * \text{INVCOST}(y) + \text{INVTAXSUB}(y) + \text{INVDEC}(y) + \text{FIXCOST}(y) + \text{FIXTAX}(y) + \text{VARCOST}(y) + \text{ELASTCOST}(y) - \text{LATEREVENUES}(y) - \text{SALVAGE}(z) \quad (3)$$

Nerede?

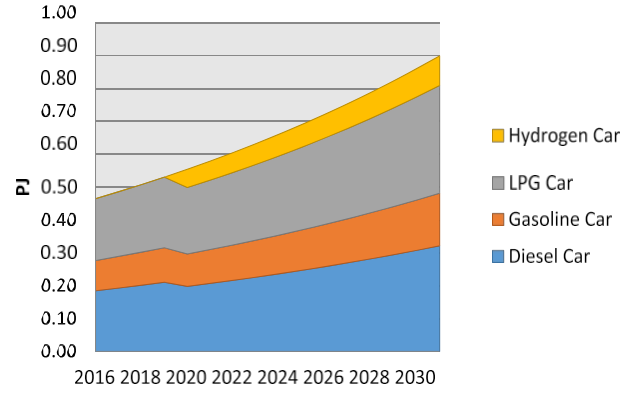
O(z): Yıl başına indirgenmiş toplam sistem maliyeti

z,

VAR_O(z): Tüm bölgelerin z yılına indirgenmiş toplam maliyeti,
REG_O(z, r): r bölgesinin z yılına indirgenmiş toplam maliyeti.
INVCOST(y): Yatırım maliyetidir,



Şekil 5 8. Baz senaryoda benzinli, LPG'li ve dizel araçların toplam talepleri.



Şekil 6 8. Alternatif senaryoda hidrojen, LPG, benzinli ve dizel araç talepleri.

INVTAXSUB(y): Vergi ve sübvansiyon maliyetleri,

INVDEC(y): Hizmetten çıkarma sermaye maliyetleri, FIXCOST(y):

O

sabit yıllık maliyettir,

FIXTAX(y): Sabit yıllık vergi ve sübvansiyon, VARCOST(y):

Tüm değişken maliyetler (bazı faaliyetlerle orantılı),

ELASTCOST(y): Fiyat esnekliği nedeniyle talep azaldığında ortaya çıkan maliyet,

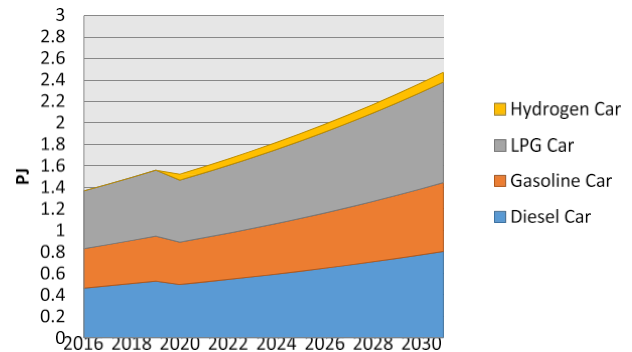
SONRAKİ GELİRLER(y): Ufuk döneminin bitiminden sonra gerçekleşen emtia geri dönüşümü için gelir hesapları,

SALVAGE(z): Tüm ömrü ufkun sonunun ötesine uzanan teknolojilerin tüm sermaye maliyetlerinin kurtarma değeri [54].

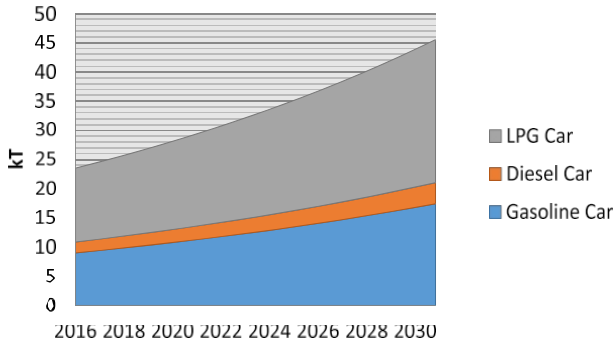
Burdur'un referans enerji sistemi

Bir referans enerji sistemi (RES), dönüşüm veya proses de dahil olmak üzere analiz edilen enerji sisteminin ayrıntılı bir şemasıdır.

süreçleri ve enerji sistemi boyunca enerji taşıyıcılarının akışları. Kapsamlı bir enerji veri tabanı ve modeli geliştirmek için ilk aşama; yani ayrıntılı bir YEK oluşturulmuştur



Şekil 7 8. Hidrojen arabası uygulandıktan sonra süreç etkinliği.



Şekil 8 Baz senaryoda LPG, benzin ve dizel araçların yıllık CO₂ emisyonu.

Burdur'un mevcut enerji sistemini, proses-dönüşüm teknolojilerinin, de- mand cihazlarının ve enerji mallarının taleplerinin girdi-çıkış etkileşimini temsil eden analiz edilen enerji sisteminin ayrıntılı bir şeması olarak temsil etmektedir. Aynı zamanda emtiaların madencilik, ithalat ve ihracat yoluyla bölgeye nasıl girdiğini veya bölgeden nasıl çıktığını da temsil etmektedir. İthal edilen veya çıkarılan emtialar proses veya dönüşüm teknolojilerinde veya tesislerinde işlenebilir. Burdur ili RES'te tek bir bölge olarak modellenmiştir. İşlenmiş emtialar (kömür, ham petrol, doğal gaz, vb.) veya bölge dışında halihazırda işlenmiş emtialar, talep cihazları veya son kullanım teknolojileri tarafından kömür, doğal gaz, dizel yakıt, benzin, LPG, elektrik, düşük sıcaklıkta ısı veya yüksek sıcaklıkta ısı, vb. olarak kullanılmaktadır. YEK'in son bölümünde, son kullanım teknolojileri ilgili taleplerle ilişkilendirilmiştir. Şekil 3, Burdur ilinin referans enerji sistemini temsil etmektedir.

Burdur kömür, benzin, dizel yakıt, LPG ve iki- elektriğinin üçte birini ulusal şebekeden almaktadır. Elektriğin son üçte biri ise iki hidroelektrik santrali, bir doğal gaz santrali ve on beş fotovoltaik güneş enerjisi tesisi tarafından üretilmektedir. Doğal gaz ve hidroelektrik santralleri enerji veri tabanına sırasıyla ENRG-GAZ-1, ENRG-HYD-1 ve ENRG-HYD-2 olarak kaydedilmiştir. Güneş PV santralleri, mevcut elektrik üretim altyapısının mevcut durumunu yansıtacak şekilde ENRG-PV-1 ile PV-15 olarak YEK'e eklenmiştir.

Burdur'un talep tarafı yapısı beş ana sektöre ayrılmıştır. Konut ve ticari talep grubu; iklimlendirme, pişirme, aydınlatma, temizlik ve eğlence taleplerini içermektedir. Ana sanayi sektörleri; şeker üretimi, çimento üretimi, mermer ocağı, mermer işleme ve süt ürünleridir. Bu talep grupları ağırlıklı olarak sanayi talep grubundan oluşmaktadır. Diğer sektör grupları ise şehir hizmetleri, yolcu ve yük taşımacılığı olarak belirtilmiştir.

ulaşım ve tarımsal talepler. Talep hizmetleri veya son kullanım teknolojileri Şekil 3'teki "Talep Teknolojileri" sütunu altında görülebilir.

Burdur'un enerji veri tabanı

Sektörel parametreler ve ilgili veriler, YEK'i oluşturmak için Burdur'daki Bakanlık Ofislerinin yerel Müdürlüklerinden uzmanlarla yapılan toplantılardan ve Elektrik Piyasası Düzenleme ve Türkiye İstatistik Kurumu (TURK- STAT) veri tabanının resmi raporlarından toplanmıştır. İlgili emisyon faktörleri Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) metodolojisi ve Ulusal Sera Gazı Envanter Raporları kullanılarak hesaplanmıştır [55].

Talep projeksiyonları için resmi istatistiklerden elde edilen talep artışları, nüfus artış oranı ve gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) tahminleri kullanılmıştır. Tablo 3, PJ'deki talep gruplarını ve talep miktarlarını göstermektedir.

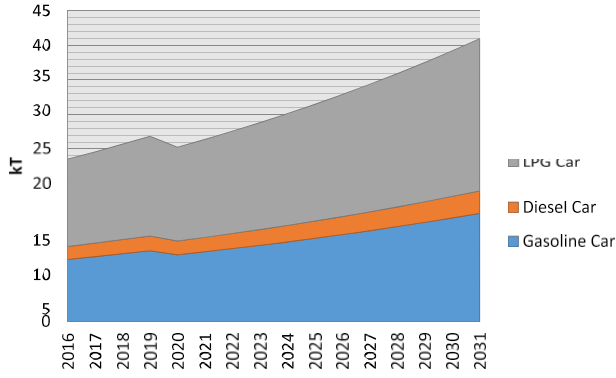
Enerji talepleri beş ana bileşende toplanmıştır; yani konut ve ticari, endüstriyel, şehir hizmetleri, ulaşım ve tarımsal talepler. Konut ve ticari talep, konut ve ticari binalardaki temizlik, yemek pişirme, eğlence, aydınlatma ve alan iklimlendirmesinden oluşmaktadır. Çimento üretimi, mermer üretimi ve taş ocakları, süt ve şeker sanayi talepleri altında sınıflandırılırken, şehir hizmetleri sokak aydınlatması ve trafik ışıklarını, ulaşım talebi ise yük ve yolcu taşımacılığını içermektedir. Toplam talepler Tablo 3'te verilmiştir ve Burdur-TIMES modelinin zaman ufku 2016'da başlayıp 2031'e kadar uzanmaktadır.

Alternatif senaryoların tanımı (HYD-1 ve HYD-2)

Bu çalışmanın amacı, hidrojen üretiminin ve hidrojenli araçların Burdur'un enerji sistemine girmesinin ekonomik ve çevresel etkilerini araştırmaktır. Bu amaçla, 2020 yılında Burdur'un enerji sistemine hidrojen üretimi ve ardından yakıt pili teknolojilerine sahip hidrojenli otomobiller dahil edilmiştir. İki farklı alternatif senaryo geliştirilmiş ve Business as Usual (BAU) senaryosuna karşı uygulanmıştır. BAU senaryosu, enerji politikasında, enerji taşıyıcılarında, enerji teknolojilerinde ve taleplerde süregelen eğilimlerin büyümesiyle enerji sisteminin mevcut durumunu temsil etmektedir. HYD-1 senaryosunda, Türkiye'deki nüfus artışı eğilimine paralel olarak artan bir hızla sisteme tanımlanan dizel, benzinli ve LPG'li araç talepleri, yolcu taşımacılığı talebinin neden olduğu artan toplam emisyonlarla ilişkilendirilmiştir. HYD-2 senaryosu, hidrojenli arabalar aracılığıyla orta fiyat seviyesinde hidrojen üretimidir. Bu senaryoda, yolcu taşımacılığı talebinin %10'u

Tablo 7 PEM ve REP'in maliyet karşılaştırması.

	Maliyetler (Mİ ABD \$)	2016	2020	2026	2031	Maliyet artışı (%)
Proton Değişim Membrani	Yatırım maliyeti	0	0,098	0,128	0,159	9,63%
	Sabit İşletme ve Bakım maliyetleri	0	1,737	2,264	2,823	170,60%
	Değişken İşletme ve Bakım maliyetleri	0	0,005	0,006	0,007	0,45%
Reformer-Elektrolizör-Saflaştırıcı	Yatırım maliyeti	0	0,072	0,093	0,116	7,03%
	Sabit İşletme ve Bakım maliyetleri	0	0,42	0,548	0,683	41,28%
	Değişken İşletme ve Bakım maliyetleri	0	0,309	0,403	0,503	30,38%



Şekil 9. Alternatif senaryoda LPG, benzin ve dizel araçların yıllık CO₂ emisyonu.

hidrojen arabaları için yeniden konumlandırılmış ve hesaplanmıştır. Hidrojen arabalarına yakıt ikmali yapmak için, hidrojen üretim tesisinin tam miktarı sisteme uygulanmıştır.

Senaryolarda belirtilen sınırlar ve serbestlik konuları Tablo 4'te gösterilmiştir. Baz Senaryo kapsamında, yakıtların ve teknolojilerin payının modelleme dönemi boyunca aynı şekilde devam edeceği ve bunun da hükümetin enerji politikalarının ve teknolojik eğilimlerin devamını temsil ettiği varsayılmaktadır. Hem HYD-1 hem de HYD-2 Senaryolarında, modelin, dizel, benzin ve LPG ile çalışan otomobiller tarafından karşılanan yolcu taşımacılığı talebinin %10'unu tahsis ederek hidrojenli otomobillerin payını artırması beklenirken; HYD-1 senaryosu düşük maliyetli, HYD-2 senaryosu ise yüksek maliyetli hidrojen üretim yöntemlerini ele almaktadır.

Şekil 4 hidrojen üretim yöntemlerini ve maliyetlerini göstermektedir. İlk alternatif senaryoda proton değişim membranı elektroliz (PEM) teknolojisi kullanılmıştır. Temel olarak su, elektrolizördeki elektrik akımı ile H^+ ve O^{2-} iyonlarına ayrılır. H^+ katyonları katottan geçer ve katotta H_2 iyonları diatomik hidrojene dönüşür. Bu yöntem ile hidrojen üretim maliyeti 4,20 ile 5,14 \$/kg- H_2 . PEM merkezi yıllık ihtiyaçtan daha yüksek olan 50000 kg/gün hidrojen üretebilmektedir. Bu senaryoda, 5,14 \$/kg- H_2 maliyetle PEM öngörülen mevcut ön saha seçilmiş ve enerji modeli veritabanında belirtilmiştir. Tablo 5, PEM üretim yönteminin maliyet dağılımını göstermektedir. Toplam maliyet yığın sermayesi, tesis dengesi (BOP) sermayesi, dolaylı sermaye, işletmeden çıkarma, sabit işletme ve bakım, elektrik hammaddesi, değişken işletme ve bakım maliyetlerini içermektedir.

HYD-2 senaryosu, mevcut enerji sistemine reformer-elektrolizör-safılaştırıcı (REP) hidrojen üretim yönteminin eklenmesine dayanmaktadır. REP yöntemi, hidrojen üretmek için ters yönde çalışan bir yakıt hücresine dayanmaktadır. Bu yöntemde elektrolit karbon iyonlarını geçirir; su, elektrik ve doğal gaz beslemesi girdilerdir ve REP %95 saflıkta hidrojen çıktısı verir. REP yönteminin maliyetleri 2,58 ile 3,71 \$/kg H_2 [47]. Elektrolizör bacasının her beş yılda bir değiştirilmesi gerekmektedir. Bu senaryoda, hesaplamalarda entegre REP sistemi kullanılmış ve sermaye maliyeti, işletmeden çıkarma, sabit işletme ve bakım, hammadde ve değişken maliyetler

Tablo 6'da gösterildiği gibi Burdur'un enerji veri tabanında tanımlanmıştır.

Sonuç analizi

Şekil 5, dizel, benzin ve LPG araç işleme faaliyetleri tarafından karşılanan yolcu taşımacılığı talebinin temel senaryo sonuçlarını temsil etmektedir. Baz senaryo sonuçlarının talep tarafına göre, bu üç yolcu taşımacılığı teknolojisi 2016 yılında 0,45 PJ ve 2031 BAU trendlerinde 0,9 PJ tüketmektedir. Proses faaliyeti tarafında, üç teknoloji 2016 yılında 1,4 PJ ve 2031 BAU trendlerinde 2,7 PJ kullanmaktadır.

Benzin, dizel ve LPG talebinin %10'u hidrojen bazlı teknolojiler tarafından yeniden karşılanmıştır. Şekil 6, hidrojenli otomobilin 2020 yılında 0,0554 PJ ile pazara girdiğini ve toplam talebin 2031 yılında 0,9 PJ'ye yükseldiğini göstermektedir.

10'talebin geleneksel otomobil teknolojilerine kaydırılması sistemi büyük ölçüde etkilemiştir. BAU senaryosunda, geleneksel teknolojiler tarafından 2,7 PJ işlem faaliyeti gerçekleşmiştir. Yüksek verimli hidrojen arabalarının 2020 yılından itibaren uygulanmaya başlanmasının ardından, toplam süreç faaliyeti 2031 yılında 2,5 PJ'e düşmüştür. Bu, Şekil 7'de görülebileceği gibi, 0,09 PJ hidrojen arabası kullanımının 2031'de toplam faaliyeti 0,2 PJ azalttığı anlamına gelmektedir. Bu 0,2 PJ'lük düşüşü daha anlaşılır kılmak için, 6,3 MW'lık enerji santralinin 0,2 PJ'lük enerjiyi karşılamak için 8760 saat (1 yıl) sürekli çalışması gerektiği düşünülebilir.

Burdur-TIMES modeli, bu çalışmanın bir diğer sonucu olarak ekonomik sonuçlar vermektedir. Bu analizde iki farklı hidrojen üretim teknolojisi değerlendirilmiştir. HYD-1 senaryosunda PEM teknolojisi kullanılmakta olup, hidrojenin bu teknoloji ile üretilmesi durumunda 2020 yılında 0,005 mi \$ değişken O&M, 1,737 mi\$ sabit O&M ve 0,098 mi\$ yatırım maliyeti oluşmakta olup, bunun temel nedeni artan hidrojen ihtiyacıdır. 2031 yılında 0,007 mi \$ değişken İşletme ve Bakım, 2,823 mi\$ sabit İşletme ve Bakım ve 0,159 mi \$ yatırım maliyeti söz konusudur. HYD-2 senaryosunda hidrojen üretmek için REP teknolojisi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, 0,309 mi\$ değişken İşletme ve Bakım, 0,42 mi\$ sabit İşletme ve Bakım ve 2020 yılında 0,072 mi\$ yatırım maliyeti oluşmaktadır. Bu maliyet 2031 yılında 0,503 mi\$ değişken, 0,683 mi\$ sabit ve 0,116 mi\$ yatırım maliyetine yükselmektedir. PEM'in yüksek maliyetine rağmen, bu teknoloji doğal gaz hammaddesi gerektirmektedir. İnşaat yerinin doğal gaz boru hattına uzak olması durumunda REP yöntemi PEM yöntemine göre avantajını kaybetmektedir. Proton değişim membranı yöntemi sistemi beslemek için sadece elektrik ve suya ihtiyaç duymaktadır Tablo 7.

Emisyonlar, Şekil 8'de gösterildiği gibi bu analizin üçüncü sonucudur. Temel senaryo sonuçlarında, üç geleneksel teknoloji 2016 yılında 23,52 kT, 2031 yılında ise 46 kT toplam CO₂ emisyonuna neden olmakta ve artan bir eğilim göstermektedir.

Hidrojenli araçların 2020'de uygulanmaya başlamasından sonra toplam emisyonlar azalmıştır. Sistemin toplam eşdeğer CO₂'si

2016'da 23,5 kT ve 2019'da 26,83 kT. Hidrojenli otomobil sisteme girdikten sonra, toplam CO₂ emisyonu 2020 yılında 25,26 kT'a düşmekte ve olağan eğilimle 2031 yılında 41 kT CO₂ salınmaktadır.

Alternatif ve baz senaryolar arasındaki yıllık CO₂ emisyonu üretim farkları Şekil 9'da gösterilmektedir. 2020 ve 2031 yılları arasında, sadece 0,09 PJ hidrojenli otomobil faaliyeti Burdur'da toplam 43,44 kT CO₂ emisyonunu engelleyerek, Burdur'un %8'ine hitap etmektedir. baz senaryodaki toplam emisyonu eşittir.

Sonuç

Türkiye'deki Burdur Şehri için Baz Senaryo, mevcut hükümet politikaları altında 2016-2031 modelleme döneminde enerji karışımını ve elektrik üretim teknolojilerini sağlamak için AnswerTIMES enerji modelleme çerçevesi kullanılarak geliştirilmiş ve modelleme döneminde 2016 yılı için kalibre edilmiştir. Bu senaryo, elektrik talebinin karşılanmasına yönelik başlangıç koşulunu karşılamakta ve aynı modelleme çerçevesine dayalı olarak hidrojen teknolojisi senaryoları HYD-1 ve HYD-2 altında geliştirilen iki alternatif senaryonun geliştirilmesi için bir referans senaryo görevi görmektedir.

Temel senaryo sonuçlarındaki talep projeksiyonuna göre, yolcu taşımacılığı teknolojilerinden üçü 2016 yılında 0,45 PJ ve 2031 BAU trendlerinde 0,9 PJ; bu analizde iki farklı hidrojen üretim teknolojisi değerlendirilmiştir. HYD-1 senaryosu PEM teknolojisini kullanmaktadır ve hidrojenin bu teknoloji ile üretilmesi durumunda 0,005 mi\$ değişken İşletme ve Bakım, 1,737 mi\$ sabit İşletme ve Bakım ve 0,098 mi \$ yatırım maliyeti 2020 yılında, esas olarak artan hidrojen gereksinimlerinden kaynaklanmaktadır. 2031 yılında 0,007 mi \$ değişken İşletme ve Bakım, 2,823 mi \$ sabit İşletme ve Bakım ve 0,16 mi \$ yatırım maliyeti söz konusudur. HYD-2 senaryosu hidrojen üretmek için REP teknolojisini kullanmaktadır. Bu yöntemde 2020 yılında 0,3 mi \$ değişken İşletme ve Bakım, 0,42 mi \$ sabit İşletme ve Bakım ve 0,072 mi\$ yatırım maliyeti oluşmaktadır. Bu maliyetler 2020 yılında 0,5 mi\$ değişken İşletme ve Bakım, 0,7 mi\$ sabit ve 0,116 mi\$ 2031 yılında yatırım maliyetleri.

Baz senaryo sonuçlarına göre, üç geleneksel trans-portasyon teknolojisi artan bir eğilimle 2016 yılında 23,52 kT, 2031 yılında ise 46 kT toplam CO₂ emisyonu yaratmaktadır. Çevresel bir bakış açısıyla; analiz edilen enerji sistemindeki toplam CO₂ emisyonu eşdeğeri, 2016 yılında 23,5 kT'a ve 2020 yılında hidrojen arabalarının uygulanmasından sonra 2031 yılında 41 kT CO₂ye karşılık gelmektedir. Sadece 0,09 PJ hidrojenli araç faaliyeti toplam CO Burdur'da 43,44 kT CO₂ emisyonu, analiz dönemi arasında baz senaryodaki toplam emisyonların %8'ine karşılık gelmektedir.

Sonuç olarak, PEM teknolojisi REP teknolojisine göre avantajlı bir yatırım ve değişken işletme ve bakım maliyetleri sağlarken, PEM genel enerji sistemi profiliyle karşılaştırıldığında nispeten daha yüksek sabit işletme ve bakım maliyetleri getirmektedir. Hidrojen enerjisinin illerde kullanımının yaygınlaştırılması için resmi bir politika olmamasına rağmen, Burdur Şehri'nin mevcut enerji tedarik sisteminde enerji karışımını çeşitlendirmek için temiz, güvenilir bir seçenek olarak hidrojenin yaygınlaştırılması için sıkı bir düzenleme gerektiği açıktır.

Ayrıca, politika yapıcılarını desteklemek amacıyla enerji sistemi analizlerinde karar-destek için enerji modelleme araçlarının kullanımı hem üniversitelerde hem de hükümet düzeyinde uygulanmalıdır. Yukarıdaki öneriler ışığında, hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak şehir enerji sistemine dahil edilmesi yönündeki çabaların Burdur ilinde enerji güvenliği ve iklim değişikliğine olumlu katkı sağlaması beklenmektedir.

Sorumluluk Reddi

Burada yer alan görüş ve sonuçlar yazarlara aittir ve Türk Silahlı Kuvvetleri, Türk Deniz Kuvvetleri'nin resmi politikalarını veya onaylarını açık veya zımnı olarak temsil ettiği şeklinde yorumlanmamalıdır,

Lütfen bu makaleyi şu şekilde alıntılayınız: Uyar TS et al., An urban techno-economic hydrogen penetration scenario analysis for Burdur, Turkey, In-ternational Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.144>

Milli Savunma Üniversitesi, Marmara Üniversitesi ve bunlara bağlı herhangi bir kuruluş veya hükümet.

Teşekkür

Yazarlar, Mert Madencilik A.Ş.'den Sayın Mehmet Cengiz Yenen'e uzman görüşlerini ve ebru makine parkının özel teknik verilerini paylaştıkları için teşekkür eder. A.Ş.'ye uzman görüşlerini ve ebru makineleri araç parkının özel teknik verilerini paylaştıkları için ve IEA/ETSAP işletme temsilcilerine yakın destek ve işbirlikleri için teşekkür eder. Bu araştırma, kamu, ticari veya kâr amacı gütmeyen sektörlerdeki finansman kuruluşlarından herhangi bir özel hibe almamıştır.

REFERENCE

- [1] Paris anlaşması. Birleşmiş Milletler; 2017. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. [Erişim tarihi: 7 Mayıs 2019].
- [2] Hidrojen için küresel eğilimler ve görünüm. IEA Hydrog 2017. web sitesi, http://ieahydrogen.org/pdfs/Global-Outlook-and-Trends-for-Hydrogen-Dec2017_WEB.aspx. [Erişim tarihi: 23 Mart 2019].
- [3] Petrov K, Baykara ZS, Ebrasu D, Gulın M, Veziroglu A. Karadeniz sularında H₂S'den elektrolitik hidrojen üretiminin değerlendirilmesi. Int J Hydrogen Energy 2011;36(15):8936-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.04.022>.
- [4] Elektrik enerjisi piyasası ve arz güvenliği strateji belgesi. Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı; 2009. <https://www.eigm.gov.tr/File/?path=ROOT%2f4%2fDocuments%2fEnerji%20Politikası%20C4%B1%2fElectricity%20Market%20and%20Security%20of%20Supply%20Strategy%20Paper.pdf>. [Erişim tarihi 26 Mart 2019].
- [5] Türkiye için ulusal yenilenebilir enerji eylem planı. Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı; 2014. https://www.eigm.gov.tr/File/?path=ROOT%2f4%2fDocuments%2fEnerji%20Politikası%20C4%B1%2fNational_Renewable_Energy_Action_For_Turkey.pdf. [Erişim tarihi 25 Mart 2019].
- [6] 2015-2019 stratejik planı. Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı; 2015. <https://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2f1%2fDocuments%2fStratejik%20Plan%202015-2019.pdf>. [Erişim tarihi 25 Mart 2019].
- [7] Ulusal enerji verimliliği eylem planı (2017-2023). Türkiye Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü; 2018. http://www.yegm.gov.tr/document/20180102M1_2018_eng.pdf [Erişim tarihi 25 Mart 2019].
- [8] TIMES modeli için dokümantasyon, enerji teknolojisi sistemleri analiz programı. 2019. web sitesi, <http://iea-etsap.org/docs/TIMESDoc-Intro.pdf>. [Erişim tarihi 18 Ocak 2019].
- [9] Karapekmez A, Dincer I. Jeotermal enerji santrallerinde hidrojen sülfürden hidrojen üretiminin modellenmesi. Int J Hydrogen Energy 2018;43(23):10569-79. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.020>.
- [10] Li Y, Cui F, Li L. Hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının yeri için entegre bir optimizasyon modeli. Int J Hydrogen Energy 2018;43(42):19636-49. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.215>.
- [11] Kougias I, Szabo S, Nikitas A, Theodossiou N. Birbirine bağlı olmayan Akdeniz adalarının sürdürülebilir enerji modellemesi. Renew Energy 2019;133:930-40. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.090>.
- [12] Nagasawa K, Davidson FT, Lloyd AC, Webber ME. Elektrik piyasalarında rüzgar enerjisinden yenilenebilir hidrojen üretiminin hafif hidrojen için potansiyel hidrojen talebi üzerindeki etkileri

- görev araçları. Appl Energy 2019;235:1001e16. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.067>.
- [13] Mah AXY, Ho WS, Bong CPC, Hassim MH, Liew PY, Asli UA ve diğerleri. Malezya'da hidrojen ekonomisinin gözden geçirilmesi ve ileriye dönük yolu. Int J Hydrogen Energy 2019;44(12):5661e75. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.077>
- [14] McDowall W. Hidrojen enerjisi için olası geçiş yollarının araştırılması: sosyo-teknik senaryolar ve enerji sistemi modellenmesi kullanan hibrit bir yaklaşım. Futures 2014;63:1e14. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.07.004>.
- [15] Dincer I, Acar C. Hidrojen seçenekleri ile akıllı enerji çözümleri. Int J Hydrogen Energy 2018;43(18):8579e99. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.120>
- [16] Chapman A, Itaoka K, Hirose K, Davidson FT, Nagasawa K, Lloyd AC, . Gelecekteki enerji sistemine hidrojen penetrasyonu potansiyelini değerlendiren dört vaka çalışmasının gözden geçirilmesi. Int J Hydrogen Energy 2019;44(13):6371e82. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.168>
- [17] Welder L, Stenzel P, Ebersbach N, Markewitz P, Robinius M, Emonts B, Stolten D. Mekansal ve zamansal olarak çözümlenmiş enerji sistemi optimizasyonu kullanarak ulusal enerji sistemlerinde hidrojen elektriğine dönüşüm yollarının tasarımı ve değerlendirilmesi. Int J Hydrogen Energy 2019;44(19):9594e607. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.194>.
- [18] Groppi D, Garcia DA, Basso GL, Cumo F, Santoli LD. Küçük adaların enerji bağımsızlığını artırmak için batarya ve hidrojen enerji depolarının kullanımıyla ilgili ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğin analizi. Energy Convers Manag 2018;177:64e76. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.063>.
- [19] Huang Z, Xie Z, Zhang C, Chan SH, Milewski J, Xie Y, vd. Bağımsız bir PV-hidrojen-emekli EV pil hibrit enerji sisteminin modellenmesi ve çok amaçlı optimizasyonu. Energy Convers Manag 2019;181:80e92. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.079>.
- [20] Colbertaldo P, Guandalini G, Campanari S. Entegre güç ve ulaşım enerji sisteminin modellenmesi: İtalya için uzun vadeli senaryolarda güçten gaza ve hidrojenin rolü. Energy 2018;154:592e601. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.089>.
- [21] Parra D, Valverde L, Pino FJ, Patel MK. Derin dekarbonizasyon için hidrojen enerji sistemlerinin rolü, maliyeti ve değeri üzerine bir inceleme. Renew Sustain Energy Rev 2019;101:279e94. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.010>.
- [22] Blazquez-Diaz C. Hidrojen yakıt istasyonlarının tekno-ekonomik modellenmesi ve analizi. Int J Hydrogen Energy 2019;44(2):495e510. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.001>.
- [23] Ismail TM, Ramzy K, Elnaghi BE, Abelwhab MN, El-Salam MA. Hidrojen üretmek için bir fotovoltaiik sistemi modellemek ve simüle etmek MATLAB kullanımı. Energy Convers Manag 2019;185:101e29. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.108>.
- [24] Hanley ES, Deane JP, O' Gallachóir BP. Hidrojenin vücuttaki rolü Düşük karbonlu enerji geleceğiMevcut perspektiflerin gözden geçirilmesi. Renew Sustain Energy Rev 2018;82:3027e45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.034>.
- [25] Kavadias KA, Apostolou D, Kaldellis JK. Otonom bir elektrik şebekesinde hidrojen bazlı bir enerji depolama sisteminin modellenmesi ve optimizasyonu. Appl Energy 2018;227:574e86. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.050>.
- [26] Han Y, Zhang G, Li Q, You Z, Chen W, Liu H. PV/hidrojen/batarya adası DC mikro şebekesi için hiyerarşik enerji yönetimi. Int J Hydrogen Energy 2019;44(11):5507e16. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.135>.
- [27] Touili S, Merrouni AA, Azouzoute A, Hassouani YE, Amrani A. Fas'ta güneş enerjisinden hidrojen üretim potansiyelinin teknik ve ekonomik değerlendirmesi. Int J Hydrogen Energy 2018;43(51):22777e96. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.136>.
- [28] Siddiqui O, Dincer I. Bazı hidrojen üretim yollarının yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesini pompalamak için bir kuyu. Int J Hydrogen Energy 2019;44(12):5773e86. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.118>.
- [29] Ishaq H, Dincer I. Hidrojen üretimi için üç CuCl döngüsünün karşılaştırmalı değerlendirilmesi. Int J Hydrogen Energy 2019;44(16):7958e68. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.249>.
- [30] Öztürk M, Dinçer İ. Kombine çevrim için çeşitli yakıtların ve güneş ısısının karşılaştırmalı çevresel etki değerlendirmesi. Int J Hydrogen Energy 2019;44(10):5043e53. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.003>.
- [31] Ishaq H, Dincer I, Naterer GF. Hidrojen üretimi için bir CuCl döngüsü ile bağlantılı endüstriyel bir cam yapım sürecinin çok jenerasyonlu sistem ekserji analizi ve termal yönetimi. Int J Hydrogen Energy 2019;44(20):9791e801. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.140>.
- [32] Ishaq H, Dincer I. Karbon emisyonunun azaltılması ve hidrojen ve amonyak üretimi için endüstriyel termal yönetim seçeneklerine sahip entegre bir sistemin incelenmesi. Int J Hydrogen Energy 2019;44(26):12971e82. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.067>.
- [33] Ahmed M, Dincer I. Fotoelektrokimyasal hidrojen üretim sistemleri üzerine bir inceleme: zorluklar ve gelecekteki yönler. Int J Hydrogen Energy 2019;44(5):2474e507. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.037>.
- [34] Yüksel YE, Öztürk M, Dincer I. Hidrojen üretimi ve sıvılaştırma ile yeni bir güneş enerjisi kulesi tabanlı çoklu jenerasyon sisteminin enerjetik ve ekserjetik değerlendirmeleri. Int J Hydrogen Energy 2019;44(26):13071e84. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.263>.
- [35] Safari F, Dincer I. Hidrojen üretimi ile çoklu jenerasyon için yeni bir biyokütle bazlı entegre sistemin geliştirilmesi ve analizi. Int J Hydrogen Energy 2019;44(7):3511e26. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.101>.
- [36] Acar C, Dincer I. Küresel ısınmayla mücadelede sürdürülebilir bir ulaşım yakıtı olarak hidrojenin potansiyel rolü. Int J Hydrogen Energy 2019 (In Press, Corrected Proof). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.149>.
- [37] Shah SAA, Valasai GD, Memon AA, Laghari AN, Jalbani NB, Strait JL. Pakistan, Belucistan'ın kırsal bölgelerine güneş enerjili pv elektrik tedarikinin tekno-ekonomik analizi. Energies 2018;11(7):1777. <https://doi.org/10.3390/en11071777>.
- [38] Mirjat HN, Uqaili MA, Harijan K, Valasai GD, Shaikh F, Waris M. Pakistan'ın enerji ve güç planlaması ve politikaları üzerine bir inceleme. Renew Sustain Energy Rev 2017;79:110e27. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.040>.
- [39] Mirjat HN, Uqaili MA, Harijan K, Mustafa MW, Rahman MM, Khan MWA. Sürdürülebilir enerji için elektrik üretim senaryolarının çok kriterli analizi Pakistan'da planlama. Energies 2018;11(4):757. <https://doi.org/10.3390/en11040757>.
- [40] Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2019. Web sitesi, <http://www.enerji.gov.tr>. [Erişim 18 Ocak 2019].
- [41] Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2019. Web sitesi, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Mavi-Kitaplar>. [Erişim tarihi 18 Ocak 2019].
- [42] Elektrik üretim ve iletim istatistikleri. Türkiye Elektrik İletim A.Ş.; 2019. Web sitesi, <https://www.teias.gov.tr/en/node/145> . [Erişim tarihi 18 Ocak 2019].

- [43] Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının İlişkin Kanun. Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına Off J Republ Turk 2005. Kanun No: 5346.
- [44] Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının İlişkin Kanun. Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına Off J Republ Turk 2010. Kanun No: 6094.
- [45] Tan Z, Ouyang L, Liu J, Wang H, Shao H, Zhu M. Mg-Mg₂Si kompozitinin hidrolizi ile hidrojen üretimi ve MgCl₂ ve Si'nin eklenmesiyle geliştirilmiş kinetik performans. Int J Hydrogen Energy 2018;43(5):2903-2912. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.163>.
- [46] Ma M, Yang L, Ouyang L, Shao H, Zhu M. Plazma destekli öğütme ile Mg-Grafit kompozitlerinin hidrolizinden hidrojen üretiminin teşvik edilmesi. Energy 2019;167:1205-1211. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.029>.
- [47] Ouyang LZ, Yang XS, Zhu M, Liu JW, Dong HW, Sun DL, vd. CeH_{2.73}-MgH₂-Ni nanokompozitlerinde yerinde oluşan CeH_{2.73} ve Ni'nin sinerjik etkileriyle geliştirilmiş hidrojen depolama kinetiği ve kararlılığı. J Phys Chem C 2014;118(15):7808-7820. <https://doi.org/10.1021/jp500439n>.
- [48] Zhu M, Wang H, Ouyang LZ, Zeng MQ. Mg-bazlı alaşımlarda kompozit yapı ve hidrojen depolama özellikleri. Int J Hydrogen Energy 2006;31(2):251-257. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.030>.
- [49] Cao Z, Ouyang L, Li L, Lu Y, Wang H, Liu J, et al. Nikel-metal hidrit pil için yüksek samaryumlu, praseodim/neodim içermeyen ve düşük kobaltlı A2B7 elektrot malzemelerinde gelişmiş deşarj kapasitesi ve döngü özellikleri. Int J Hydrogen Energy 2015;40(1):451-455. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.016>
- [50] Ouyang L, Chen W, Liu J, Felderhoff M, Wang H, Zhu M. Hidrojen depolama için tüketilen NaBH₄'ün rejenerasyon sürecinin geliştirilmesi. Adv Energy Mater 2017;7:1700299. <https://doi.org/10.1002/aenm.201700299>
- [51] Zhong H, Ouyang L, Zeng M, Liu J, Wang H, Shao H, vd. Harcanan NaBH₄'ün Mg₂Al alaşımı ile kolay rejenerasyonunun gerçekleştirilmesi. J Mater Chem A 2019;7:10723-10738. <https://doi.org/10.1039/C9TA00769E>.
- [52] Elektrolizden hidrojen üretimi için teknik hedefler. ABD Enerji Bakanlığı; 2011. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-hydrogen-production-electrolysis>. [Erişim tarihi 23 Mart 2019].
- [53] Güneş enerjisi potansiyel atlası. Türkiye Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü; 2019. <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/pages/15.aspx>. [Erişim tarihi 23 Mart 2019].
- [54] Loulou R, Lehtila A, Kanudia A, Remme U, Goldstein G. TIMES modeli için dokümantasyon Bölüm II. 2016. https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-II_July-2016.pdf. [Erişim tarihi 26 Mart 2019].
- [55] Ulusal sera gazı envanterleri için IPCC kılavuzları. Hayama, Kanagawa, JP: Küresel Çevre Enstitüsü Stratejileri ; 2006.
- [56] Nihai rapor: hidrojen üretim yolları maliyet analizi (2013-2016). Strategic Analysis Inc; 2016. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1346418>. [Erişim tarihi 23 Mart 2019].