

HİDROGEN ENERJİ TƏCHİZATI SİSTEMLƏRİNİN ARAŞDIRILMASI

Elşən Sultanov

<https://orcid.org/0009-0002-0002-7038>

Ruslan Əlicanov

<https://orcid.org/0009-0007-4117-2994>

Ramin Qəhrəmanzadə

<https://orcid.org/0009-0000-8448-3089>

Xülasə. Məqalədə hidrogen enerji təchizatu sistemləri elektrik energetikası mövqeyindən sistem səviyyəsində araşdırılmışdır. Hidrogen ayrıca yanacaq kimi deyil, güc elektronikasi çeviriciləri vasitəsilə şəbəkəyə qoşulan idarə olunan elektrik yükü, dispetçerləşdirilə bilən generasiya mənbəyi və uzunmüddətli enerji saxlama vasitəsi kimi nəzərdən keçirilir. Qələvi, proton mübadiləsi membranlı və bərk oksidli elektroliz xüsusi enerji sərfi, dinamik yük diapazonu və işə salınma xüsusiyyətlərinə görə müqayisə edilmiş, əsas saxlama variantları isə yaratdıqları əlavə elektrik enerji sərfi baxımından qiymətləndirilmişdir.

Açar sözlər: hidrogen, enerji təchizatu, yanacaq elementi, güc çeviricisi, enerji keyfiyyəti

¹Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent, Bakı, Azərbaycan

²Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, doktorant, Bakı, Azərbaycan

³Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, magistrant, Bakı, Azərbaycan

Məsul müəllif. E-poçt: elshen_sultanov@mail.ru

Daxil oldu: 14 aprel 2026; Qəbul edildi: 22 iyul 2026; Onlayn dərc edildi: 30 sentyabr 2026

RESEARCH ON HYDROGEN ENERGY SUPPLY SYSTEMS

Elshan Sultanov

<https://orcid.org/0009-0002-0002-7038>

Ruslan Alicanov

<https://orcid.org/0009-0007-4117-2994>

Ramin Gahramanzadeh

<https://orcid.org/0009-0000-8448-3089>

Abstract. The article examines hydrogen energy supply systems at the system level from the perspective of the electric power industry. Hydrogen is considered not merely as a fuel, but as a controllable electrical load, a dispatchable generation source, and a long-term energy storage medium connected to the grid via power electronic converters. Alkaline, proton exchange membrane, and solid oxide electrolysis technologies are compared based on specific energy consumption, dynamic load range, and start-up characteristics, while key storage options are evaluated in terms of the additional electrical energy consumption they entail.

Keywords: hydrogen energy supply, fuel cell, power converter, power quality

¹Azerbaijan State Marine Academy, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Baku, Azerbaijan

²Azerbaijan State Marine Academy, Doctoral candidate, Baku, Azerbaijan

³Azerbaijan State Oil and Industry University, Master's student, Baku, Azerbaijan

Corresponding author. E-mail: elshen_sultanov@mail.ru

Received: 14 April 2026; Accepted: 22 July 2026; Published online: 30 September 2026

Giriş

Hidrogen texniki ədəbiyyatda getdikcə daha çox adi yanacaq kimi deyil, istehsalı, hazırlanması və əks çevrilməsi, demək olar ki, tamamilə elektrotexniki amillərlə müəyyən olunan ikinci dərəcəli enerji daşıyıcısı kimi qiymətləndirilir. Sahənin miqyası bu məsələlərin nə dərəcədə ciddi qəbul edilməli olduğunu göstərir. 2024-cü ildə dünya üzrə hidrogen tələbatı təxminən 100 mln. tona çatmış, lakin onun bir faizdən azı aşağı emissiyalı üsullarla istehsal olunmuşdur; 2030-cu il üçün elan edilmiş aşağı emissiyalı istehsal həcmi 49 mln. t/il səviyyəsindən 37 mln. t/il-ə qədər azaldılmışdır. Eyni zamanda, ayrı-ayrı layihələrin gücü sürətlə artmış, 2025-ci ildə 500 MVt gücündə qurğu istismara verilmişdir (Ball & Wietschel, 2009).

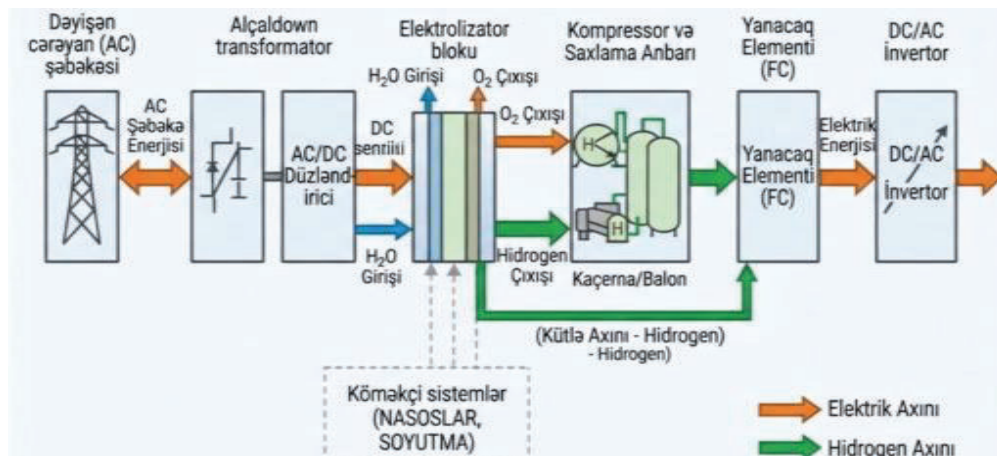
500 MVt gücündə bir elektrolizer orta ölçülü sənaye yarımstansiyasının yükü ilə müqayisə oluna bilər. IRENA (*international renewable energy agency*) – Beynəlxalq Bərpa Olunan Enerji Agentliyinin qiymətləndirilməsinə görə hidrogenin uzunmüddətli maya dəyəri kapital xərclərindən deyil, elektrik enerjisinin qiymətindən və stekin xüsusi enerji sərfindən asılıdır. Bu işə elektrik effektivliyini iqtisadi əsaslandırmanın mərkəzinə qoyur. Dövlət proqramlarında da eyni yanaşma tətbiq olunur və hidrogen elektroenergetikanı, sənayeni və nəqliyyatı birləşdirən vasitə kimi qiymətləndirilir (Züttel, 2003).

Metodlar

Araşdırma prosesində elmi ədəbiyyatın müqayisəli təhlili aparılmış, sistemli yanaşma, təsnifləşdirmə, ümumiləşdirmə metodlarından istifadə edilmişdir.

Nəticələr

Tam hidrogen enerji təchizatı sistemi bir-biri ilə elektriki əlaqədə olan alt sistemlərin ardıcılığı kimi təsvir oluna bilər. Zəncir enerji uçotu, giriş kommutasiya qurğuları və alçaldıcı transformatorların yerləşdiyi ümumi qoşulma nöqtəsindən başlayır. Orta gərginlikli şin elektrolizer steklərini qidalandıran düzləndirici blokları ilə yanaşı köməkçi sistemləri; suyun hazırlanması, dövretmə nasosları, soyuducu konturlar, qaz-maye ayırıcıları, qurutma qurğuları, çillər və ventilyasiyanı da təmin edir. Alınan qaz təmizlənir, qurudulur, sıxılır və balona, kavernaya və ya boru kəmərinə verilir. Əks çevrilmə zamanı hidrogen hazırlanaraq yanacaq elementinə ötürülür, onun çıxış gücü isə öz mühafizə və sinxronlaşdırma funksiyalarına malik şəbəkə invertoru vasitəsilə şəbəkəyə qaytarılır (Ball & Wietschel, 2009).



Şəkil 1. Şəbəkəyə inteqrasiya olunmuş hidrogen enerji təchizatı sisteminin ümumi blok-sxemi

Dünya istehsalının böyük hissəsini təmin edən metanın buxarla riforminqi kiçik köməkçi elektrik yükünə və uzun işə salınma müddətinə malik termokimyəvi prosesdir; hidrogen istehsalının əsas üsullarının müqayisəli icmal ədəbiyyatlarda verilmişdir (Winter & Nitsch, 1988; Koponen, et al, 2019).

Həmin üsulların iş xarakteristikalarından çıxan nəticə odur ki, şəbəkə xidmətləri üçün tələb olunan sürətli idarə olunmanı yalnız elektroliz üsulları təmin edə bilər.

Hidrogen bütün kimyəvi yanacaqlar arasında ən yüksək kütlə üzrə enerji sıxlığına aşağı istilikvermə qabiliyyəti üzrə təxminən 120 MC/kq malikdir, lakin normal şəraitdə həcm sıxlığı çox aşağıdır, ona görə də hər bir praktiki saxlama üsulu sistemin effektivliyindən çıxılmalı olan enerji itkisi yaradır (International Energy Agency, 2025).

Burada n politropa göstəricisi, M molyar kütlə, T_1 giriş temperaturu, η_{iso} isə maşının izentrop faydalı iş əmsalıdır. Aralıq soyutma ilə çox pilləli sıxılma 30 bardan 350 bara qədər hidrogenin öz enerji tutumunun iki-üç faizini, 700 bara qədər isə beş faizdən çoxunu istehlak edir (International Renewable Energy Agency, 2025).

Mayeləşdirmə zamanı saxlanılan enerjinin təxminən üçdə biri həcmində elektrik enerjisi tələb olunur. Metal hidridlərdə saxlama aşağı təzyiqdə yüksək həcmi sıxlıq verir və stasionar, eləcə də dəniz tətbiqləri üçün əlverişlidir, lakin istilik idarəetməsi tələb edir və kütlə üzrə tutumu məhdud qalır (Sørensen & Spazzafumo, 2018).

Cədvəl 1-də hidrogenin saxlanma üsulları və onların təxmini elektrik enerji itkisi ümumiləşdirilmişdir.

Cədvəl 1.

Saxlama üsulu	Şərait	Həcmi sıxlıq	Enerji itkisi (AİQ-dən)
Sıxılmış qaz	350 bar, ətraf mühit	$\approx 23 \text{ kq/m}^3$	2–3 %
Sıxılmış qaz	700 bar, ətraf mühit	$\approx 39 \text{ kq/m}^3$	4–6 %
Maye hidrogen	20 K, 1 bar	$\approx 71 \text{ kq/m}^3$	25–35 %
Metal hidrid	10–50 bar, 20–100 °C	$\approx 80\text{--}110 \text{ kq/m}^3$	10–15 % (istilik)
Duz kavernası	60–180 bar	$\approx 5\text{--}13 \text{ kq/m}^3$	2–4 %
Boru kəməri (xətt tutumu)	30–100 bar	$\approx 2\text{--}8 \text{ kq/m}^3$	1–3 %

Şəbəkə miqyaslı saxlama üçün geoloji variantlar həlledicidir. Bir duz kavernası bir neçə min ton hidrogen, yəni onlarla qavat-saat enerji saxlaya bilər və vahid enerjiyə düşən marjinal kapital xərcinə görə heç bir elektrokimyəvi texnologiya buna yaxınlaşmır. Karbonsuzlaşdırılmış enerji sistemində hidrogenin əsas üstünlüyü məhz budur: effektivlik deyil, saxlanılan enerjinin quraşdırılmış gücdən demək olar ki, tam ayrılması (Carmo et al, 2013; Buttler & Spliethoff, 2018).

2035-ci ilə qədər təxminən 37 000 km ixtisaslaşdırılmış hidrogen boru kəmərinin elan olunması, lakin bunların altı faizdən azının yekun investisiya qərarına çatması paylayıcı infrastrukturun həm iddialı olduğunu, həm də hələ formalaşmadığını göstərir.

Müzakirə

Gələcək perspektivlər. Çeviklik və uzunömürlülük bir-biri ilə ziddiyyətdədir, çünki bərpa olunan enerjinin üstünlük təşkil etdiyi bazarda dəyəri maksimuma çatdıran dinamik iş rejimi eyni zamanda degradasiyanı sürətləndirir, ona görə də optimum sırf texniki deyil, kommersiya kəmiyyətidir (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

Effektivlik və kapital xərci çevirici interfeysində ziddiyyət təşkil edir; baza yüklə işləyən qurğu üçün optimal topologiya ildə bir neçə min saat işləyən qurğu üçün yanlış ola bilər. Nəhayət, yerli və ümumi sistem üzrə nəticələr fərqlidir: hidrogenin istifadəsi emissiyaları istehlak nöqtəsində aradan qaldırır, lakin istehsal emissiyaları elektrik təchizatı sisteminə keçir. Gələcək tədqiqatlarda təklif olunan ardıcılıq konkret obyektə tətbiq edilməli, fərziyyələr, birxətli sxem, yük ssenariləri və həssaslıq təhlilinin nəticələri dərc olunmalıdır (Larminie & Dicks, 2003).

Nəticə

Nəticə olaraq qeyd edə bilərik ki, hidrogen enerji təchizatı sistemləri elektrik qoşulması olan kimya qurğusu kimi deyil, vahid integrasiya olunmuş elektrik qurğusu kimi layihələndirilməlidir. Ümumi qoşulma nöqtəsi, transformatorlar, qidalandırıcı çeviricilər, steklər, köməkçi sistemlər, sıxılma və saxlama alt sistemləri, əks çevrilmə blokları və idarəetmə arxitekturası bir-birindən asılı olmayan elementlər kimi seçilə bilməz, çünki onların hər biri digərlərinin yük paylanmasına, qısaqapanma rejiminə, dinamik cavabına və xüsusi enerji sərfinə təsir göstərir. Beynəlxalq standartlar qurğunun sərhədlərində təhlükəsizlik, qoşulma və enerjinin keyfiyyəti tələblərini müəyyən edir, enerji sistemləri üzrə mühəndis hesablamaları isə həmin tələbləri konkret layihə üçün avadanlığın güc göstəricilərinə və iş parametrlərinə çevirir.

Ədəbiyyat

- Ball, M. & Wietschel, M. (2009). *The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges*. Cambridge University Press.
- Ball, M. & Wietschel, M. (2009). The Future of Hydrogen-Opportunities and Challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2).
- Buttler, A. & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82.
- Carmo, M., Fritz, D.L., Mergel, J. & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12).
- International Energy Agency. (2025). *Global Hydrogen Review 2025*, IEA.
- International Renewable Energy Agency. (2025). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal*. IRENA.
- Koponen, J., Ruuskanen, V., Kosonen, A., Niemelä, M. & Ahola, J. (2019). Effect of converter topology on the specific energy consumption of alkaline water electrolyzers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(7).
- Larminie, J. & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed. John Wiley & Sons.
- Nikolaïdis, P. & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67.
- Sørensen, B. & Spazzafumo, G. (2018). *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging Technologies and Applications*. 3rd ed. Academic Press/Elsevier.
- Winter, C.J. & Nitsch, J. (1988). *Hydrogen as an Energy Carrier: Technologies, Systems, Economy*. Springer.
- Züttel, A. (2003). *Materials for Hydrogen Storage*. *Materials Today*, 6(9).