



International Journal of Eurasia Social Sciences
Vol: 11, Issue: 42, pp. (1115-1156).

Article Type: Review Article

Received: 28.07.2020

Accepted: 26.11.2020

Published: 15.12.2020

HYDROGEN ENERGY IN THE FUTURE OF SUSTAINABLE ENERGY POLICIES

Muhammed ORAL

Assist Prof., Karabuk University, Turkey, muhammedoral@karabuk.edu.tr

ORCID: 0000-0001-8608-4054

ABSTRACT

Especially in the last decade, global energy policies are undergoing transformations towards more efficient and efficient use of renewable energy sources. Both global climate change and environmental concerns and the energy policies implemented by countries on the basis of energy security include increasing the use of blue energies not only in electricity generation, but also in the industrial and transport sectors. Advances in energy technologies make it possible to obtain hydrogen at less cost, which leads to an increase in demand for hydrogen. In recent years, significant progress has been made in the transport sector and in the use of hydrogen in electricity generation. Hydrogen-powered cars, first produced as prototypes in the 1990s, have now become a commercial technology. In this sense, hydrogen energy has a strategic mission as a sustainable¹ resource capable of directly achieving zero emission targets. In the expansion of hydrogen use, the shipment of hydrogen to consumption geographies that can be transported by ships and railways as a result of the presence of suitable terminal conditions with pipelines as a gas and cryogenic trucks as a liquid will serve to the emergence of the hydrogen economy and the expansion of hydrogen use. The scope of the study focuses on global developments in hydrogen energy. The study aims to address the role of hydrogen energy as a rising resource in global energy policies. The research has a qualitative method and the document analysis method has been used as a data collection technique. According to the findings, hydrogen energy is becoming a rational actor in global energy policies.

Keywords: Energy Policies, Renewable Energy Sources, Hydrogen Energy

¹ In its current form, human / society needs are met without compromising the needs of future generations. The concept of "sustainable" was used in the Brundtland report (Chairman of the Commission: Gro Harlem Brundtland), also known as the report on our common future, prepared by the United Nations (UN) "World Commission on Environment and Development" in 1987. In addition, 17 objectives have been identified in the "2030 Agenda for Sustainable Development" agreed by the UN in 2015. Two of these goals are directly related to energy. These are (7) accessible and Clean Energy and (13) Climate Action.

INTRODUCTION

Hydrogen, a synthetic fuel that does not exist in a free state in nature, is the most abundant element in the universe. Hydrogen is the main source of the thermonuclear reaction in the sun and stars. Hydrogen, consisting of 1 proton and 1 electron, is colorless, odorless and nontoxic under standard conditions and is 14 times lighter than air. In addition, hydrogen does not cause danger as in other gases due to its rapid dispersion property. Hydrogen can be liquefied at -252.77°C . The volume of liquid hydrogen is $1/700$ of its gaseous volume.

In the early 1500s, Paracelsus discovered that the bubbles given off when iron chips were added to sulfuric acid were flammable. But this gas (not called hydrogen at the time) was first discovered by Robert Boyle in 1671. In 1766, Henry Cavendish revealed that this gas is a separate element. Hydrogen is the most common form of hydrogen in the world. Later, in 1783, Antoine-Laurent de Lavoisier, together with Pierre Simon de Laplace, synthesized water by burning hydrogen and oxygen on mercury in a glass fanus. Quantitative results show that water is not an element as thought for two thousand years, but consists of a combination of two gases. It was named hydrogen by Gasse Lavoisier, meaning water-forming (2 hydrogen atoms / H_2) (Inovatif Kimya Dergisi, 2017; Let's Talk Science, 2019; Royal Society of Chemistry, 2020). Research on hydrogen energy began during the Cold War. Because both powers (the United States and the USSR) had discovered that hydrogen was a great weapon. So much so that the first hydrogen bomb test was carried out by the USSR in 1953. A year later, the United States conducted a hydrogen bomb test. In this context, studies were started in both countries in 1955 on the use of hydrogen as an energy source alongside its military aspect.

Hydrogen has the highest energy content per unit mass of all known fuels. 1 kg of hydrogen has the energy of 2.1 kg of natural gas or 2.8 kg of oil. But its volume per unit of energy is high. In energy systems where hydrogen is used as fuel, which is clean and easy to use in all areas requiring heat and explosion energy, only water or water vapor is released into the atmosphere. Hydrogen is an average 33% more efficient fuel than petroleum fuels. During the production of energy from hydrogen, there is no production of gases and harmful chemicals that pollute the environment and increase the greenhouse effect, except for water vapor (ETKB, 2020). The widespread use of hydrogen, whose production costs on average three times higher than other fuels, depends on advances in energy technologies. In recent years, it is possible to see applications related to hydrogen in the energy sector. Especially in the transportation sector, the agenda of "clean transportation" targets makes hydrogen a strategic resource in energy policies.

Global climate change and environmental problems are often associated with the consumption of fossil energy sources. Energy consumption in the world has increased significantly due to technological developments and transformations in the 2000s, an increase in the number of population and vehicles, and an increase in urbanization all over the world. The increase in energy demand has increased both the demand for fossil fuels and the importance of energy security. Along with these, international climate-environment goals / criteria (Kyoto Protocol, Paris COP21 et al.) it can be said that there is also an increase in the demand for renewable energy sources in all countries to meet (Oral, 2020: 165). In this context, it is seen that renewable energy

sources have been a decisive element in energy policies and investments, especially in the last two decades. But the fact that renewable energy sources are intermittent sources and are not widespread due to the high cost of storage technologies also leads to a abstention on these resources. Therefore, it is not possible to base both the national and global energy systems solely on renewable energies. In terms of continuity and ability to perform given commands, thermal power plants and nuclear power plants are inevitable elements of the cycle sector. Although thermal power plants are considered to have a significant impact on global climate change, it is not possible to remove these power plants from the energy portfolio in accordance with energy demand. When all areas where energy resources are used (transportation, industry, cycle, Heat) are included, the share of the energy sector in greenhouse gas emissions is 73% according to 2016 data (WRI, 2020).

Global CO₂ emissions from energy set an all-time record in 2018 despite strongly positioned international climate targets. However, outdoor pollution, which causes an early death of about three million people each year, remains a major problem (WEC, 2019). In this sense, hydrogen reveals methods for decarbonization in sectors where it is difficult to reduce emissions, such as long-distance transport, chemicals and iron and steel. It improves air quality as well as helps to improve energy security.

In addition to being an element already used in industry, world hydrogen production has also shown a steady increase since the 1970s. However, hydrogen, apart from its use in the industrial sector, thanks to its emission-free oscillation feature, its use in other transport vehicles, especially cars, has become increasingly popular. In fact, hydrogen is used as an energy carrier through a fuel cell that is not a new technology, and electricity is generated, so it can also be used in transportation vehicles. In this sense, hydrogen can be characterized as the energy of the 21st century.

Advances in energy technologies have reduced the cost of using hydrogen and increased the demand for hydrogen in the energy sector. In recent years, significant progress has been made in the transportation sector and in electricity generation to benefit from hydrogen. Hydrogen-powered cars, first produced as prototypes in the 1990s, have now become a commercial technology. Since water or water vapor is ejected from hydrogen vehicles after use, these vehicles have a zero emission value. Hydrogen energy, given its range, is an important mission in combating global climate change because they are clean and environmental. For these reasons, hydrogen energy has a greater advantage over electric vehicles, which are considered today's innovative means of transportation. For example, the range of electric vehicles is about 300-500 km, while hydrogen vehicles can reach up to 600-700 km. This clearly points to the mobile revolution.

PURPOSE AND METHOD OF RESEARCH

The aim of this study is to demonstrate and analyze the growing importance of hydrogen energy in global energy policies, which has been a carrier / source² that has risen again in recent years. Although the history of

² Hydrogen is not found free in nature and is produced from various raw materials such as hydrocarbon sources, water, biomass. It is therefore expressed as an energy carrier because it has a secondary fuel property.

developments in hydrogen energy and fuel cells dates back to the 19th century, in recent years it stands out as a physical resource again due to advances in technology and production costs in the transportation sector, especially in the fuel cell sector. In climate change-oriented energy policies, the opportunities it offers to achieve targets themed “zero emissions and a carbon-free future” make hydrogen a more effective resource. In this context, companies such as Hyundai, Toyota, Honda, Mercedes-Benz, BMW, Iveco, Nikola operating in the transportation sector have carried out studies on hydrogen vehicles. Where these firms are located in South Korea, Japan, Germany, USA, China, France, the United Kingdom, Belgium, the Netherlands, Austria, Italy, Norway, Australia, New Zealand, India, Brazil, Saudi Arabia, South Africa and the European Union set targets for applications in the energy policy of hydrogen was observed. This, on the other hand, shows that hydrogen energy plays a growing role in global energy policy.

Qualitative research method was used as a method in the study. The pattern of the research is the case study. As a data collection technique, document analysis method was used in the study. In this context, data from organizations operating in the energy sector on a national and international scale were used together with relevant resources.

HYDROGEN USE AND STORAGE METHODS

Hydrogen energy is a source that can only be produced by electrolysis of water. But in addition to this, there are also forms of production of hydrogen. Hydrogen production is possible from fossil fuels or nuclear energy³ by thermochemical methods, especially by steam reformation⁴ from natural gas, as well as from biomass⁵ and solar energy⁶, or even from photosynthetic PNS bacteria (purple bacteria) by biochemical method organically. In this sense, hydrogen is easily obtained from various raw materials, making it an important energy carrier. At the same time, it can be said that hydrogen is important in policymaking an economy based on green or renewable energy sources, as it does not lead to greenhouse gas emissions and its transport can be reliably carried out through pipes and tankers (Aslan & Özcan, 2008: 159).

Accordingly, various methods are used in hydrogen production, including electrolysis, thermolysis, chemical, thermochemical, photolysis and biological. However, in the current situation, the most common method of producing hydrogen, based on technique and cost, is to obtain hydrogen from fossil fuels. In this sense, the most prominent fossil fuel is natural gas. In this way, the most hydrogen production is carried out on a global

³ Hydrogen is produced by the use of electricity produced in electrolysis or by heat from high Temperature Reactor (HTR). Hydrogen production with heat obtained from nuclear energy is carried out either by electrolysis or thermochemical processes. The thermochemical process provides higher efficiency than the electrolysis method (Polat et al., 2012:52). In the thermochemical method, water vapor undergoes thermal decomposition at a temperature of 1650 C-1750 °C and is broken down into oxygen by hydrogen.

⁴ Decomposition of methane in natural gas from carbon by steam between 700C-100 °C.

⁵ Hydrogen production from biomass is carried out by gasification of the source under high temperature and low pressure.

⁶ Hydrogen from renewable sources is obtained through the electrolysis of water thanks to the electricity generated from these sources. Hydrogen can also be produced from solar energy in this way. It is also possible to produce hydrogen from solar energy by thermolysis. In this method, using solar energy, water vapor undergoes thermal decomposition at a temperature of 1650 °C-1750 °C and is broken down into oxygen by hydrogen.

basis. 48% of hydrogen is derived from natural gas, 30% from oil, 18% from coal, and 4% from electrolysis (IRENA, 2018: 14). Hydrogen demand, which has more than tripled since 1975, continues to grow, and hydrogen production is almost entirely derived from fossil fuels. In this sense, 6% of gas and 2% of coal are used in hydrogen production on a global scale (IEA, 2019: 17) (Figure 1).

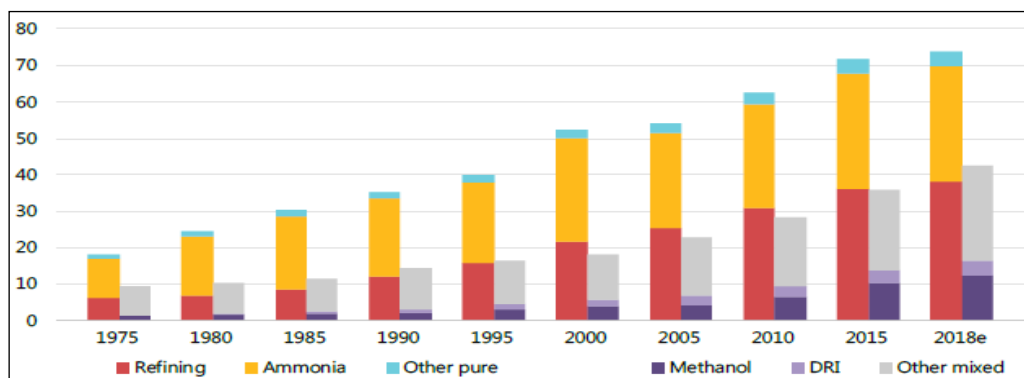


Figure 1. Global Hydrogen Production (according to the type it was obtained)

* estimated

** Direct Reduced Iron (Direct Reduced Iron)

Source: IEA, 2019: 18

Global hydrogen demand and production are growing steadily every year. An increase in the variety of sectoral uses of hydrogen is the most important reason for the increase in demand for hydrogen and hydrogen production. Hydrogen can be used for many purposes. Currently, thanks to hydrogen, there are technologies that can produce, store, transport and use energy in different ways. In addition to renewable and nuclear energy sources, it can produce hydrogen with fuels such as natural gas, coal and oil.

Hydrogen can be transported in liquid form by pipelines and ships. It is possible that natural gas pipelines already located all over the world can be used for hydrogen transport at a low cost. Hydrogen can be converted to electricity and methane, generating energy for homes, the feed industry, or used as fuel in cars, trucks, trains, ships, and aircraft (WEC, 2019: 1). Hydrogen can even be used in submarine vehicles operating in countries' defense areas.

Especially the industrial sector stands out in the use of hydrogen. The use of hydrogen in the industrial sector general industry (semiconductor, fuel, glass production, the cooling of the generators in the area of vegetable oils and hidrojenerasyon) 10%, iron and steel and refining operations (as in steel production and water purification in iron reduction⁷ as an antioxidant in the process gas) 25%, in the chemical industry {ammonia (fertilizer, pharmaceutical, paint-made), polymers (with chemical rekasiyon textile, medical, automotive,

⁷ From iron ore below the melting point by using it as fuel natural gas or hydrogen gas, production of a solid product containing high metallic iron by oxygen removal (direct reduced iron/DRI sponge iron or direct reduced iron/sponge iron) to be achieved that allows the method to "Direct Reduction/DR Processes" are called. The resulting solid product is also called "Sponge Iron/Sponge Iron" due to its high porosity, which gives it a spongy appearance (Iron Steel Store, 2020).

electronics, food, building materials production of numerous products in the fields of resin (product data consolidation and bonding)} 65% (IRENA, 2018: 14).

In a viable hydrogen infrastructure, hydrogen must be delivered from where it is produced to the end point of use, for example, to a fuel station. The infrastructure includes pipelines, trucks, storage facilities, compressors and distributors involved in the fuel distribution process. Distribution technology for hydrogen infrastructure is already commercially available, and several U.S. companies today supply bulk hydrogen. Because hydrogen has been used for a long time in industrial applications, some of the infrastructure is available. This alone is not enough to make the use of hydrogen as an energy carrier widely available to the consumer (EERE, 2020).

When considering the relationship of production and distribution of hydrogen (e.g., hydrogen pipeline transport network with the world's longest, most hydrogen used in the United States) where hydrogen is used, or close to, typically at large industrial sites are produced. What is necessary for the widespread use of fuel cell electric vehicles is the need to develop infrastructure that allows the distribution of hydrogen to the existing network of fuel stations across the country. Currently, hydrogen distribution is carried out in three ways. The first is through pipelines as a gas, the second is through the transport of compressed hydrogen gas in high-pressure tube trailers by truck, wagon, ship or barge, and finally, the transport of liquefied hydrogen again by truck, wagon, ship or barge. Another option is to produce hydrogen at fuel stations. This method reduces distribution costs, while on-site production techniques increase production costs due to the costs of creating hydrogen (AFDC Energy, 2020).

There are basically two types of hydrogen fuel stations. The first of these are stations where hydrogen is produced elsewhere and delivered to the filling point (as gas and liquid) for distribution to local storage and vehicles. The other is the stations where hydrogen is produced on-site and then stored for transfer to the hydrogen tank of vehicles. Some stations may be a combination of both types (Alazemi & Andrews, 2015: 488). A hydrogen fuel station (Figure 2).



Figure 2. Hydrogen Fuel Station⁸

Source: We Engineer Hightech (WEH), 2020

⁸ Hydrogen fuel stations can be found on their own, as well as in the same station with oil filling points.

The average storage time for stations using hydrogen delivered as gas is 180 kg / day and the estimated total cost of storage, equipment, design and construction and commissioning is \$ 2 million. For stations using hydrogen delivered as liquid, the average storage time is 350 kg / day, and the cost of commissioning with the operations required for this is 2.8 million dollars. The average storage time for on-site hydrogen generating stations using electrolysis of water (e.g. through solar power) is 120 kg / day and the estimated total construction and commissioning cost is \$ 3.2 million (CAFCP, 2020).

Hydrogen, which has been used in refineries and industrial areas such as fertilizer production in the process of processing oil to remove sulfur from its content for many years, has a wide network in Europe. Belgium and the Netherlands have one of the largest hydrogen networks in the world (HyLaw, 2019: 1). The lengths of the pipelines km of the country having a network of hydrogen are as follows; USA (2608 km), Belgium (613 km), Germany (390 km), France (303 km), the Netherlands (237 km), Canada (147 km) and the total length of 337 km of hydrogen pipelines in other countries (HyArc, 2016).

Hydrogen storage is very important in terms of making this resource more widely available. Although hydrogen can be stored in liquid or gas form, these processes are relatively costly. Falling costs with technical advances in storage will make hydrogen widespread in all areas and more accessible and available.

Hydrogen storage methods are as follows (ITO, 2009: 102; Özdemir & Mutlubas, 2019: 20-30);

Compressed gas is the most common form of storage. Hydrogen is stored in gaseous 50-liter tanks under a pressure of 200-700 bar.

Liquid hydrogen; hydrogen, which becomes liquid at -252.77°C , is stored in special tanks. Storage of liquid hydrogen is safer because it requires lower pressure values than gas hydrogen.

Hydrocarbons; hydrocarbon fuels such as methanol, ethanol have more hydrogen in unit volume and pressure than pure liquid hydrogen. Hydrogen can be decomposed from hydrocarbons using high-temperature water vapor. In this sense, hydrocarbons are used as a hydrogen arrestor.

Carbon nanotubes; storage of hydrogen in graphite-filled tanks under a certain pressure. Here, hydrogen is stored on the surface of super active porous graphite.

Metal hydrides; metal hydrides are known as metals that can easily absorb hydrogen. During the formation of Metal hydride, hydrogen molecules decompose and the resulting hydrogen atoms are kept in suitable metal lattices.

There is a strong link between the continuous development of hydrogen technologies and the demand for hydrogen. So much so that these two situations are both the cause and the result of each other. The

development of hydrogen technologies increases the demand for hydrogen, and the increase in the demand for hydrogen also creates an opportunity for the development of hydrogen technologies.

USE OF HYDROGEN IN TRANSPORTATION VEHICLES

Transportation is the act of people and objects reaching from one place to another, that is, the targeted point. Transport is the transfer of people (except on foot) and goods from one place to another by various means. Therefore, transportation and transportation activities are one of the most important elements of civilization reached by humanity. Because these activities include individuals within a purpose (business, trade, tourism, education, health, etc.) allows it to access from one place to another, and therefore transport and transport activities stand out as a vital area of activity.

However, the development of transport systems in a country or region is linked to economic development and changes. On the other hand, transportation activities have developed / developing under the influence of natural (landforms, climate) and human geographical factors (population, industry, transport investment activities, technological developments, etc.) (Aydın & Oral, 2018: 258). Transportation activity changed its size for the first time with the invention of the wheel in a historical sense (by the Sumerians in 3500 BC). As a result of technical developments that emerged over time, unlike land and waterways transportation, which are the oldest types of Transportation used by people, the railway from the 19th century, and air transportation from the 20th onwards, developed beyond what was envisaged. According to International Energy Agency (IEA) 2019, approximately 30% of the world's total energy consumption in 2017 was realized in the transportation sector. At the same time, the area that saw the greatest increase in energy consumption in the 1971-2017 range was the transportation sector (IEA, 2019: 8).

In the world, there are usually options for using public transport in freight and passenger transport. Road transport, which is one of the main types of transport, is preferred because it allows uninterrupted transport in modes (types of transport), has features such as flexible structure, speed and compatibility with transitions between modes. This trend has led to the gradual development of the road transport genre (TMMOB MMO, 2018: 1-2). In transportation, the demand for the highway will continue all over the world due to the ease of access it offers to each destination. In this context, hydrogen-powered vehicles stand out as a powerful option in transportation. In recent years, studies on hydrogen vehicles (fuel cells) in all transport and transport sectors have progressed at a significant level. To see these stages, you can look at the level of technology preparation of vehicles in transport and transport areas (Figure 3).

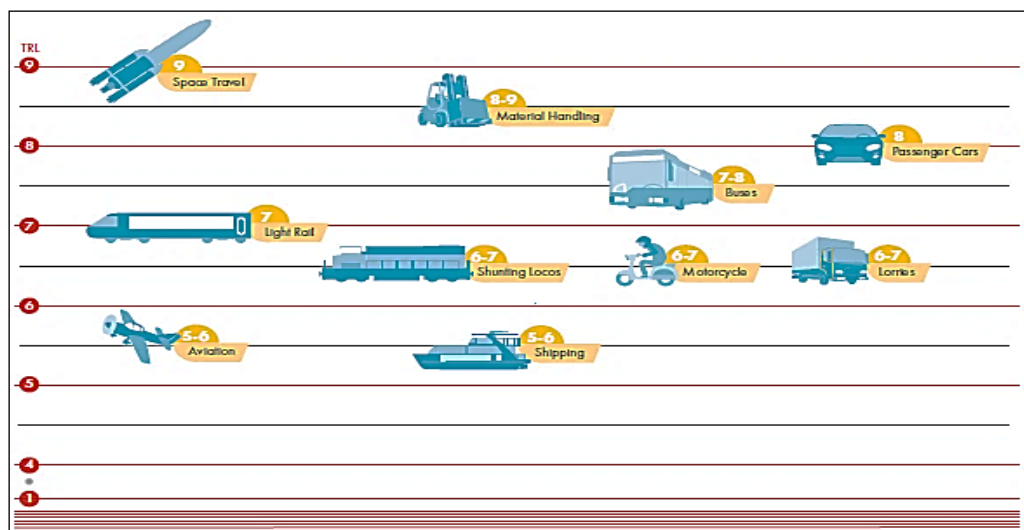


Figure 3. Technological Levels of Hydrogen Vehicles in Transport And Transport Sectors⁹

Source: Shell, 2017: 46

Fuel Cell Revolution In Transportation

Fuel cells (fuel cells) are devices that convert chemical energy into electrical energy. In a fuel cell consisting of an electrolyte¹⁰, anode, and cathode (conductive ends) in a basic sense, electricity generation occurs as follows; the fuel cell is given hydrogen gas fuel by the anode, and oxygen, that is, ambient air, by the cathode. Hydrogen decomposes into positive and negative ions on the anode side. Positive ions reach the cathode end by passing through the electrolyte, allowing only positively charged ions to pass through. Because the electrons remaining at the anode end tend to merge again with positively charged ions, they flow to the cathode side with an external circuit. Electricity generation occurs with this flow of electrons in the external circuit. Electrons passing to the cathode side combine with positive ions and air here, releasing pure water (Leblebicioglu, 2018). After all, the oscillating agent of hydrogen fuel cells is electricity and water. However, the energy production density of hydrogen is quite high (Yergin, 2014: 314). Fuel cells; coal, oil, and fossil fuels such as natural gas, refinery products, ammonia, methanol, such as chemical products, waste materials, biogas and alternative fuel sources such as hydrogen or hydrogen directly obtained with the help of a converter with oxygen as a result of the electrochemical reaction can produce (TUBITAK, 2020). In this sense, it is also possible to transport hydrogen using natural gas pipelines with the necessary technical infrastructure.

Fuel cells are quiet technologies that are clean and environmentally friendly, as well as high efficiency. Without the use of a steam boiler or turbine, electrical energy is generated only by chemical reaction. Fuel cells, which

⁹ According to Shell 2017 data, the provisions of technological readiness levels are as follows:

- (5) Basic technology elements tested.
- (6) Function test prototype stage. Technical feasibility.
- (7) Visual prototype. Almost ready to use product / system.
- (8) Qualified product / system whose functionality has been proven in the field of use.
- (9) Qualified product / system that has achieved success in use.

¹⁰ A medium that contains free ions and has electrical conductivity.

are obtained by an electrochemical reaction between hydrogen (H₂) and oxygen (O₂) and whose total efficiency can reach up to 80%, are also known as continuous-running batteries or electrochemical machines. Hydrogen-oxygen-based fuel cells get various names depending on the type of electrolyte used in their structure. These are;

- phosphoric acid fuel cell (operating temperature: 160--220 C, electrical efficiency 55 %)
- solid oxide fuel cell (operating temperature: 800--1000 C, electrical efficiency 60-65 %)
- molten carbonate fuel cell (operating temperature: 620--660 C, electrical efficiency 65 %)
- polymer electrolyte fuel cell (PEM) (operating temperature: room temperature--80 C, electrical efficiency 40 %)
- alkaline fuel cell (operating temperature: room temperature--250 C, electrical efficiency 60-70 %) (EVCED, 2019; Yildirim, 2011: 10).

The first developments related to fuel cells appeared in the 19th century. These developments are as follows in historical context;

The principles of the fuel cell first C. It was found by Friedrich Schönbein in 1838. In 1843, W. Robert Grove developed the first fuel cell, realizing that constant current and power are produced as a result of the reverse reaction of electrolysis of water. In 1955, W. Thomas Grubb made changes to the design of the fuel cell, and Leonard Niedrach worked on this design to improve it. Thus, the fuel cell, which is considered the "Grubb-Niedrach Fuel Cell", emerged. In 1958, General Electric (GE) conducted research on fuel cells with NASA, and the first commercial fuel cell was used in a space¹¹ project called "Gemini". In 1959, F. Thomas Bacon developed a fixed 5 kW fuel cell. In the same year, researchers led by Harry Ihrig produced another 15 kW fuel cell. In the 1960s, Bacon's patents were used to provide electricity and drinking water in the U.S. Space Exploration Program. In the 1970s, the Dupont Company produced the high-efficiency naphyon (SiO₂) membrane¹² for fuel cells as an electrolyte (2017). In this sense, studies on the use of hydrogen in the transportation sector continued strongly in the 1970s. As a matter of fact, awareness of hydrogen increased in this process and hydrogen energy congresses were held in the United States in 1974 and 1976.

The use of hydrogen in the transportation sector is one of the most remarkable technological developments in the world. Accordingly, there are four types of moving forces in transportation vehicles. The first of these is internal combustion engines and oil derivatives used in these engines, second, the use of hybrid technology in internal combustion engines (the presence of a battery and a small-diameter electric motor that can be charged together with an internal combustion engine from a wall outlet or only charged through regenerative

¹¹ Hydrogen in its liquid form continues to be used as fuel in spacecraft nowadays.

¹² A structure that allows some molecules and ions to pass to another segment, while others prevent their passage.

braking¹³), the third is the use of technology based on generating electricity using fully electric vehicles and finally fuel cells and thus moving the vehicle.

Hydrogen vehicles are briefly called "fuel cell electric vehicles / fuel cell electric vehicle (FCEV)". Denmark is the country where FCEVs are most common in the world, considering the average population. However, countries such as Britain, France, Norway, Iceland, Japan and Germany see hydrogen as the energy of the future and are leading the sector by making significant investments in this technology (Congar, 2020). Fuel cells will help transform the energy economy, especially in the field of mobility. The point to be reached here is to provide movement by obtaining electricity through hydrogen, not by hydrogen itself. Fuel cells generate electric energy, which is exactly this kind of energy (Montgomery, 2014: 288). According to this, in cars moving with hydrogen-based fuel cells, hydrogen is essentially used in the battery task, not in fuel. Because, similar to internal combustion engines in hydrogen vehicles, an electric motor is started by using hydrogen, not by burning hydrogen instead of oil. The most obvious difference between fuel cell vehicles and electric vehicles is the external storage of hydrogen used in these vehicles. Therefore, fuel cells in these vehicles are not charged (Sarigül, 2016). Oxygen that reacts with hydrogen comes from the ambient air.

In addition, manufacturers have generally designed fuel cell applications in cars in a similar way. In other words, the hydrogen tank is placed under the rear seats. The fuel cell is located under the driver's seat. The electric motor is also located in the front of the vehicle. Again, front-wheel drive was preferred as traction (Yilmaz et al., 2018: 214). The technical structure of hydrogen cars is as follows (Figure 4);

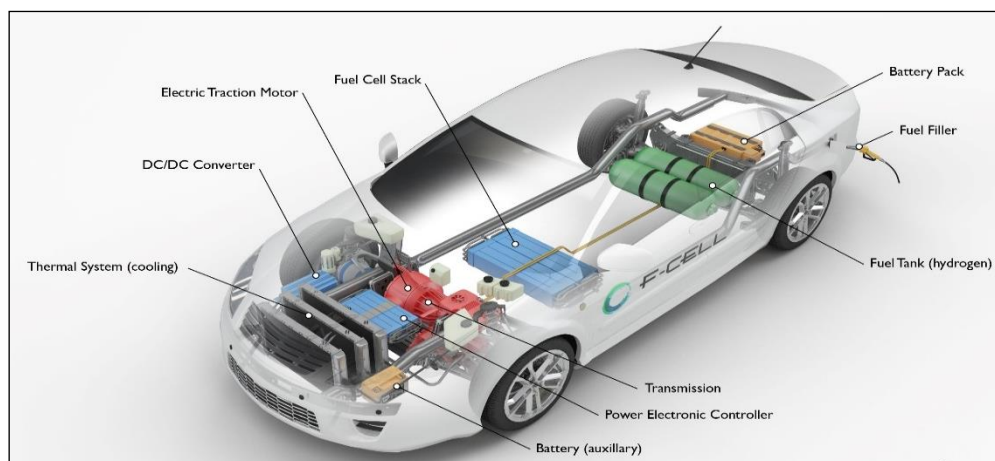


Figure 4. Mechanical Parts of A Hydrogen Car

Source: Alternative Fuels Data Center (AFDC) Energy, 2020

HYDROGEN ENERGY IN GLOBAL ENERGY POLICY

Investments in renewable energy sources are constantly increasing all over the world. Among renewable energies, the most invested resources are solar and wind energy. All renewable energy sources are examined

¹³ Regenerative braking (obtaining electrical energy from friction caused by braking) is also available in "Plug-in hybrid vehicles/PHEV". This energy is generated in the electric motor, which is connected to the wheels.

on the basis of hydrogen energy is the least investment source. But the importance attributed to hydrogen energy in global energy policy and the decrease in hydrogen energy costs indicate that this type of energy will be used in more widespread and high amounts than today, based on projections. So that global hydrogen demand, which was 56 million tons in 2015, is projected to approach 550 million tons in 2050 (Figure 5).

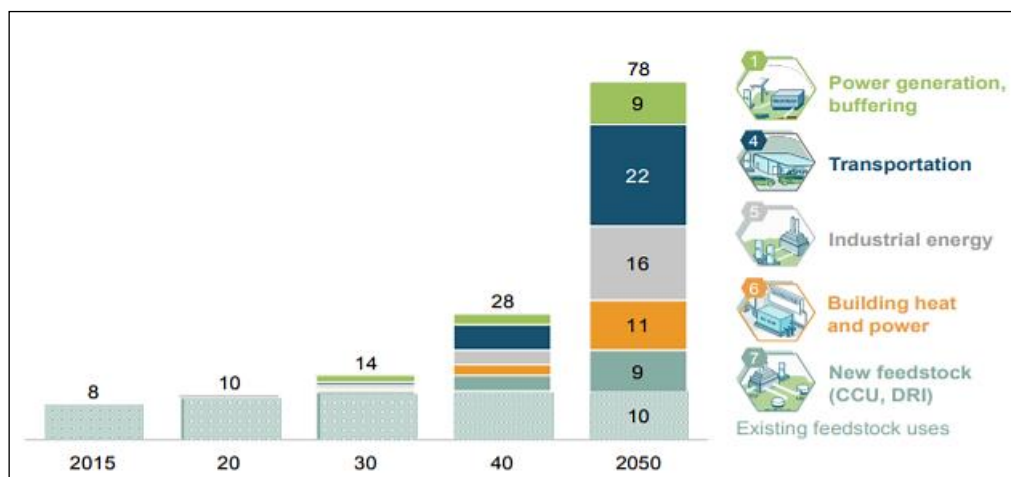


Figure 5. Demand Status Of Hydrogen Energy On A Global Basis

* Carbon Capture and Utilization

(Data; translated from Exajoule (EJ) to tone by David White. 1 EJ=7 million tons H₂)

Council comments by the hydrogen numbering of sectors: (1) Hydrogen, on the basis of large-scale renewable energy integration and the provision of electricity, (4) decarbonisation transportation, (5) the use of clean energy in the industry, (6) heating of buildings and use of electricity in carbonless Applications Support, (7) the provision of fresh raw materials to the industry.

Source: Hydrogen Council, 2017: 20

In order for the economy to decarbonize, hydrogen must be obtained from low or zero carbon sources. Depending on the source of production, hydrogen consists of green, grey and blue color codes. Hydrogen from electricity generated from renewable energy sources is described as “green hydrogen” and does not cause carbon emissions. Hydrogen produced from fossil fuels is called “gray hydrogen.” Blue hydrogen is produced in the same way as Gray. But here the goal is to capture and store emissions using Carbon Capture and Storage (CCS) technologies. This is a method that allows only low emissions to be achieved (Özcan, 2020). Although hydrogen is expensive compared to other fuels today, it is expected that it will take the first place among alternative fuels that can replace oil, coal and natural gas in energy use due to technological advances in the medium and long term (Bayrak, 2010: 251).

It is seen that the IEA draws attention to the importance of R&D in increasing the use of hydrogen. R&D; by benefiting from the cost advantages of economies of scale¹⁴ in the deployment of hydrogen fuel cells, hydrogen-based fuels and are elektrolizor (hydrogen production from water technology), including reducing costs and improving performance is very important. Government actions, including the use of public funds, are

¹⁴ Reducing unit costs by increasing the amount of production.

critical in setting the research agenda, taking risks and attracting private capital for innovation (IEA, 2019: 16). As global demand for hydrogen increases, the costs of economies of scale will fall. The National Renewable Energy Laboratory (NREL) predicts a cost per station similar to other alternative fuels over 10 years. In addition, lessons learned about design, engineering and construction will help reduce non-equipment costs (CAFCP, 2020).

At this point, the opportunities that governments will create on hydrogen will allow the dissemination of technologies for the production and use of hydrogen. So there is a strong link between policymakers and investment. In addition, creating a policy on the use of hydrogen in transport depends on the decisions of national governments. It can be predicted that hydrogen will be an important actor in global energy policy in the near future. Countries' hydrogen support is as follows (Table 1).

Table 1. Support For Hydrogen Applications Based On Countries And The European Union

Australia	The decision was made to use over 100 million Australian dollars to support hydrogen research and pilot projects. The scientific and Industrial Research Institution will conduct studies on hydrogen applications.
US	Studies and legislation on carbon capture and storage are ongoing. California changed its "Low-Carbon Fuel Standard" so that a more effective reduction in carbon intensity would occur by 2030, and encouraged the development of fuel stations. The California Fuel Cell Partnership has set targets for 1,000 hydrogen refueling stations and 1 million fuel cell vehicles by 2030, matching China's targets.
Germany	Funding is provided, including subsidies for publicly traded purchases of hydrogen fuel stations, fuel cell vehicles and micro cogeneration ¹⁵ , under the National Innovation Program for "Hydrogen and Fuel Cell Technologies". Hydrogen-powered commercial trains began to be used.
European Union	To promote the use of energy from renewable sources by making possible hydrogen produced from renewable sources related to the 2030 targets in the context of the carbon-free future theme. The EU has established a "Hydrogen Energy Network" as a platform for discussing hydrogen among its member states. EU member states, about 100 businesses, various institutions and organizations, as well as the Linz Declaration "Hydrogen Initiative", which promotes cooperation on sustainable hydrogen technology, have signed.
Austria	Steps are being taken to develop a hydrogen strategy based on renewable electricity in line with the 2030 Austrian climate and Energy Strategy targets.
Belgium	A Hydrogen Roadmap was published and specific targets were set. A 50m-euro regional investment plan has been presented to obtain hydrogen gas from electricity within the framework of the 2030 and 2050 targets.

¹⁵ It is based on electrical energy and has an installed power of 50 KW and below, allowing heat, cooling energy and electrical energy to be produced in one go with the same device (KOJENTÜRK, 2015). Fuel cells are examples of micro-cogeneration.

Table 1 (Continued)

United Kingdom	It plans to blend up to 20% hydrogen in one part of the UK's natural gas grid. Research is being done on hydrogen storage technologies. The decarbonisation project is being carried out, supported by a £ 170m public investment from the Industrial Strategy competition Fund.
Brazil	He included hydrogen in the Science, Technology and Innovation Plan for renewables and biofuels. He hosted and supported the 22nd World Hydrogen Energy Conference in 2018.
China	He took the decision to develop fuel cells and increase the number of hydrogen filling stations. In this context, China's goal is to reach 1 million fuel cell vehicles (FCEV) and 1000 fuel stations by 2030. A tax exemption was also introduced on fuel cell vehicles, including ships.
France	A "Hydrogen Delivery Plan" and 100 million euros in financing have been announced, as well as 2023 and 2028 targets for low-carbon hydrogen in industry, transport and renewable energy storage.
South Africa	As part of the "Green Transport Strategy", studies are being carried out on the use of fuel cell vehicles and buses, especially in public transport.
South Korea	A hydrogen economy roadmap has been published, including 2022 and 2040 targets for buses, FCEVs and refueling stations, and a vision to hydrogenate all commercial vehicles by 2025 has been set. Financial support was provided for refueling stations and regulatory issues were resolved. Studies on hydrogen technologies are ongoing in all application areas.
India	Funding for research on hydrogen applications and fuel cells was provided. Studies are being conducted on the use of fuel cell buses.
Netherlands	A hydrogen roadmap was published and the section on hydrogen was included in the Dutch Climate Agreement. He led the first meetings of the "Pentalateral Energy Forum" of the Netherlands, Belgium, Luxembourg, France, Germany and Austria in order to support cooperation on hydrogen in northwestern Europe.
Italy	As for increasing hydrogen fuel stations, legislation on investment and pressure amounts is being implemented.
Japan	Targets for reducing hydrogen and fuel cell costs and studies on the use of hydrogen in power plants are being carried out. An additional 80 hydrogen fuel stations are planned to be built by 2021. Programs for obtaining hydrogen through renewable energies continue.
Norway	Funding is provided for the development of a hydrogen-powered ferry and a ship. Fuel cell cars and other vehicles are planned to be expanded.
Saudi Arabia	Saudi Aramco and Air Products jointly built Saudi Arabia's first hydrogen fuel station.
New Zealand	A cooperation agreement was signed with Japan to work on joint hydrogen projects. A "Hydrogen Strategy" has been identified. A Green Investment Fund was created for firms to invest in hydrogen.

Source: IEA, 2019: 21-22

In this context, incentives provided with targets set by countries, targets set without any incentives, and incentives provided without any targets for applications supported by the number of countries offering hydrogen-related supports (Figure 6).

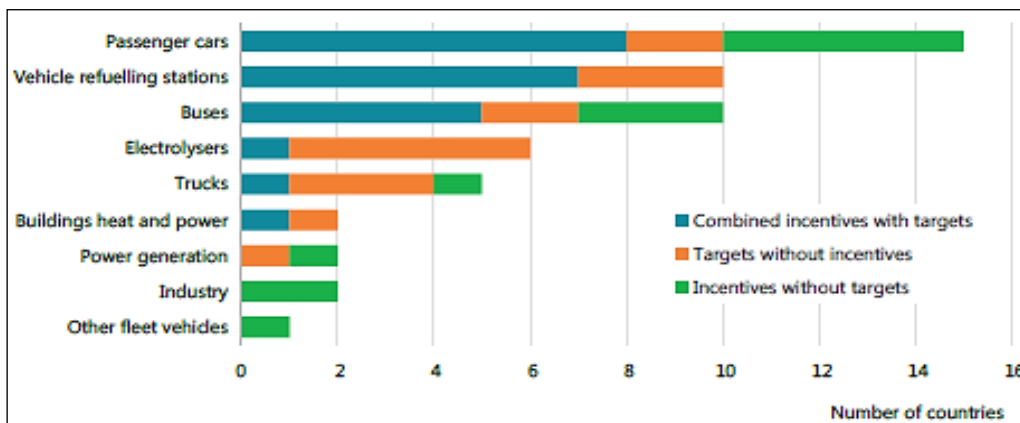


Figure 6. Support For Hydrogen Applications Based On Country Numbers

Source: IEA, 2019: 20

Along with hydrogen cars, vehicle fuel stations seem to be the most supported applications by countries. Accordingly, an increase in the number of hydrogen vehicles will cause less and less concern for users about refueling. There are two issues that are often mentioned for hydrogen vehicles. One is that the range distance of the vehicles in question is short, and the other is that these vehicles have a disadvantage due to the lack of fuel stations. Both of these approaches are not accurate, when thinking the advances in hydrogen technologies and fuel cells in recent years. So that as of the technological point, the range distance of hydrogen vehicles is greater than the range distance of electric vehicles. In addition, existing and planned hydrogen fuel stations around the world will increase the preference of these vehicles. For hydrogen fuel stations on a global scale (Figure 7) and for the development trend of hydrogen fuel stations on a regional basis (Figure 8).



Figure 7. Distribution Of Hydrogen Refueling Stations On A Global Basis

Source: H₂Stations, 2020

As can be seen from the map, the geographies with the most hydrogen fuel stations are the developed world, led by Europe (especially Germany), Japan, South Korea and the United States. However, in recent years, the development of hydrogen-based transport infrastructure has been examined, and Asia and Europe appear to be leading the way. According to H₂Station data, the number of hydrogen fuel stations worldwide in 2010 was 213, especially after 2015, and in 2019 the number of these plants increased to 434 (Figure 8).

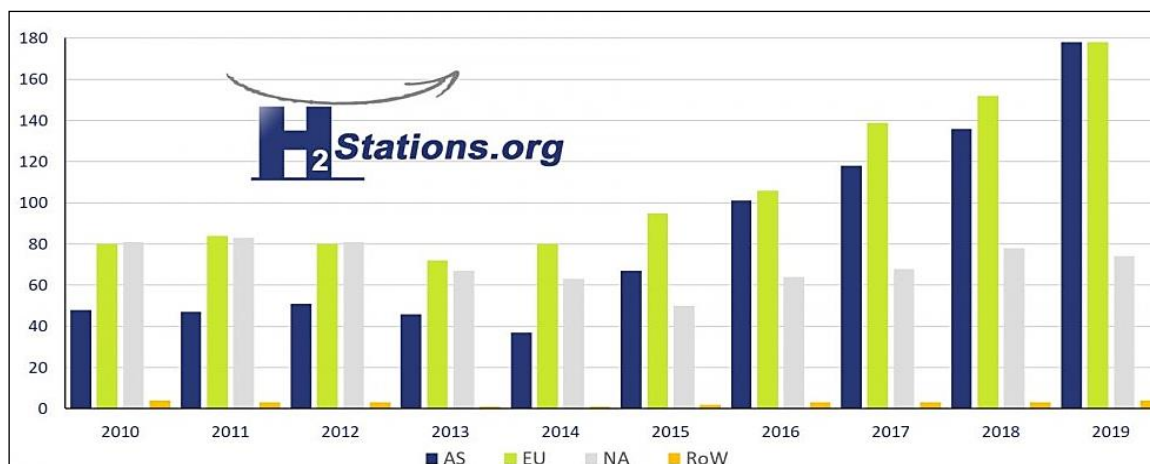


Figure 8. Numerical Development Of H₂ Refueling Infrastructure Based On Regions On A Global Scale (2010-2019)

Source: H₂Stations, 2020

As of the end of 2019, there are 177 hydrogen stations in Europe, 87 of which are in Germany. France ranks second in Europe with 26 hydrogen stations in operation and 34 planned. In addition, this number is expected to increase further. A significant increase is also projected in the Netherlands, where 21 new hydrogen fuel stations are planned. Switzerland plans to add 6 more stations to 4 already operating stations. Asia has a total of 178 stations, 114 of which are located in Japan and 33 in South Korea. The 27 designated hydrogen stations in China are used almost exclusively for refueling fleets of buses or trucks. The most ambitious growth in the short term is expected to take place in South Korea, where about 40 hydrogen stations are planned for cars and buses. New hydrogen stations in Malaysia and Saudi Arabia, as well as two other countries with hydrogen refueling infrastructure in Asia, have been added. In North America, the majority of the 74 planned hydrogen stations continue to be installed in California with 48 operating stations (H₂Stations, 2020). Given the existing hydrogen fuel stations in the United States, planned investments, the area of the United States and the range distances of vehicles, it can be said that hydrogen-based transportation will develop mainly in the East and west of the United States. Therefore, for the development of the hydrogen-based transportation system of the United States, investments must also be made in the states located in the middle section. A similar situation is observed in Canada. Current and planned hydrogen fuel stations are clustered in Vancouver and Quebec.

RESULT

In the context of global energy policy, hydrogen will find its place in the energy portfolio as a much stronger actor if it is produced through electricity derived from renewable energies instead of fossil fuels. Hydrogen is a more meaningful carrier / source when obtained from renewable sources. Beside, because it contains hydrogen sulfide and therefore less electrolysis costs, it will be much easier for hydrogen to become the largest and most strategic energy source if the production of hydrogen from seawater¹⁶ reaches a commercially competitive level. Hydrogen energy will become the most advantageous source within the scope of global climate change and the transportation opportunities it offers, with the production of electricity that will feed electrolysis systems from renewable energy sources, that is, with the production of green hydrogen.

Industry 4.0¹⁷ as a consequence of the process of emerging energy technologies and development of environmentally friendly energy production and combating global climate change increases in productivity as a result of environmental pollutants will be brought to high to be given to incentives and penalties, will disseminate the use of renewable energy sources (Peker & Arslanoğlu, 2018: 128). But targets to reduce carbon emissions may face problems due to the technological inadequacies of developing countries in switching to electric and hydrogen vehicles. Therefore, for the whole world, these situations need to be addressed separately in the dimension of policy-finance-technology.

However, as an energy carrier, hydrogen has had a strong impact on the media and government programs of countries with technological advances in the more efficient use of fuel cells in the transport sector in recent years. With the increase in the interest of the brands operating in the transportation sector in hydrogen, especially in the last five years, there have been remarkable developments in many countries towards this resource. This situation has been reflected in hydrogen investments and fuel station infrastructure, which is one of the most important parameters of investments in this regard, has steadily increased. The advantages of hydrogen vehicles and the increase in investment in this resource in regions such as Europe South America Japan USA China, as well as technical developments and policies for the greater availability of hydrogen by renewable means, have once again demonstrated the importance of this resource. In this sense, it is no longer a rational option to take a step back on hydrogen investments.

Although there are disadvantages such as the prevalence of stations in relation to hydrogen vehicles, the high prices of hydrogen vehicles, these vehicles seem to be more advantageous than battery vehicles. In this context, the fuel tank of hydrogen cars receives 5 kg of hydrogen and can be charged in a short period of time

¹⁶ Photovoltaic cells placed on the electrolysis device convert sunlight into electricity used to power the submerged electrolysis. The generated H₂ bubble collects inside the device as it floats upwards, while O₂ bubbles mix into the atmosphere (Demir, 2018).

¹⁷ All innovations such as artificial intelligence, autonomous machines, Internet of things, gene sequencing, nanotechnologies, new-technology renewable energies, quantum information processing are components of Industry 4.0. What makes this revolution different from previous industrial revolutions is the intertwining and merging of these technologies and their mutual interaction in the physical, digital and biological fields (Oral, 2020:97).

(around 3 min), as in internal combustion engines. The weight of 5 kg of liquid hydrogen in liters is about 70 liters. However, its use in vehicles is also possible as gas and can be filled and used in the tanks in the vehicle through fuel pumps. The equivalent of 5 kg of gas hydrogen in cubic meters is about 55 m³. Liquid and gaseous hydrogen is 10 times lighter than hydrocarbon fuels. The reason why it is stored in vehicles as more liquid is that it is safer than gas tanks and has less weight. In addition, since the batteries of electric vehicles are subjected to a continuous charge-discharge state, the life of the batteries is depleted in about 8-10 years. However, hydrogen vehicles do not have a high-cost component that cannot be used after a certain period of time and therefore must be changed. In addition, hydrogen vehicles do not have a battery system that completely covers the lower part of the vehicle. Also, hydrogen vehicles have more power in range than electric vehicles.

Companies such as Hyundai (the first brand in the world to produce hydrogen-based fuel cell series vehicles), Toyota, Mercedes-Benz, BMW, Honda, Shell, Siemens, Iveco, Nikola are conducting important studies on hydrogen applications. Based on hydrogen support and applications, Germany, Japan and South Korea will be the most decisive countries in global hydrogen policy. Germany, in particular, wants to become a leading country in hydrogen production and applications. So much so that Germany adopted a “National Hydrogen Strategy” in June 2020. In this sense, Germany plans to invest 9 billion euros in a financing package to implement hydrogen as the sustainable energy of the future. In Germany, which is the political and economic engine of the European Union (EU), the transformations in energy policy have the potential to provide significant breakthroughs in achieving climate goals for other countries in the union. In the current situation, the EU adopted a “European Hydrogen Strategy” in July 2020 to accelerate the long-teleported energy transformation (DW Turkish, 2020).

At the point of popularization of hydrogen use, the shipment of hydrogen that can be transported through pipelines as a gas and cryogenic trucks as a liquid, as well as ships and railways, as a result of the presence of appropriate terminal conditions, will serve to the emergence of the hydrogen economy and the expansion of hydrogen use. On the other hand, legislation preventing the spread of hydrogen in global and national energy policies should be regulated, and incentives or grants should be offered on green hydrogen production. Because almost all hydrogen production is currently carried out from fossil fuels, especially natural gas. Thanks to such regulations and pipeline shipments, hydrogen will gain a commercial dimension within global energy policies. In addition, it can be said that hydrogen will make a significant contribution to externally dependent countries in energy by obtaining composite fuel by pressing natural gas pipelines. Also, by producing hydrogen from natural gas through fuel cells, it can be made possible to provide for heat and electricity in residential buildings. This also makes a strategic contribution to the distributed energy system¹⁸. In this context, it is seen that hydrogen energy in all its dimensions will be one of the main actors of the 21st century energy system.

¹⁸ A different application from the central energy paradigm, which is based on its production at the point where electricity is consumed and corresponds to the interconnected system. Distributed generation, an energy generation pathway used to

ETHICAL TEXT

In this article, general research and publication ethics rules are followed along with the journal's writing guide, publication principles and ethics rules. In case of violation of the relevant ethical standards in the article, all responsibility rests with the author.

REFERENCES

- Alazemi, J. & Andrews, J. (2015). Automotive hydrogen fuelling stations: an international review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 483-499. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.085>
- Aslan, Ö. & Özcan, B. (2008). Sürdürülebilir kalkınma ve hidrojen enerjisi. *New World Sciences Academy*, 3(2), 152-160.
- Aydın, F. & Oral, M. (2018). Türkiye'de karayolu ulaşımının tarihsel gelişimi. *Journal of Awareness*, 3 (Özel Sayı), 257-266. <https://doi.org/10.26809/joa.2018548635>
- Bayraç, H.N. (2010). Enerji kullanımının küresel ısınmaya etkisi ve önleyici politikalar. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 229-259.
- California Fuel Cell Partnership (CAFCP) (2020). *Cost and financing*. H2Stations. <https://H2stationmaps.com/cost-and-financing>
- Congar, K. (2020, February 14). *Hidrojenli mi elektrikli mi? Çevre dostu araçlardan hangisi daha avantajlı?*. Euronews. <https://tr.euronews.com/2020/02/14/hidrojenli-mi-elektrikli-mi-cevre-dostu-araclardan-hangisi-daha-avantajli-hybrid-dizel>
- Demir Çelik Store (2020). *Direkt indirgeme prosesleri*. <http://www.demircelikstore.com/-1-3206-direkt-indirgeme--proseslerii.html>
- Demir, R. (2012). *Deniz suyundan hidrojen yakıtı üreten cihaz geliştirildi*. Elektrikport. <https://www.elektrikport.com/haber-roportaj/deniz-suyundan-hidrojen-yakiti-ureten-cihaz-gelistirildi/21409#ad-image-0>
- DW Türkçe (2020, October 9). *Hidrojen teknolojisi|Almanya'nın dünyada bir numara olmak istediği teknoloji*. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=SrGeLfdwGE>
- Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) (2020). *Hydrogen delivery*. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery#:~:text=>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) (2020). *Hidrojen enerjisi*. <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Hidrojen-Enerjisi>
- Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı (EVCED) (2019). *Yakıt pilleri*. http://www.yegm.gov.tr/teknoloji/h_yakit_pilleri.aspx
- H2Stations (2020). *Development of H2 refuelling infrastructure split by region*. <https://www.H2stations.org/statistics/>
- H2Stations (2020). *Presse release*. <https://www.H2stations.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-02-19-LBST-HRS-2019-en.pdf>
- H2Stations (2020). *Presse release*. <https://www.H2stations.org/wp-content/uploads/2020/10/world-2020-k.jpg>

generate on-site power, eliminates the cost, complexity, dependence, and inefficiencies associated with transmission and distribution. It can reduce electricity losses in transmission and distribution lines (KOJENTÜRK, 2010).

- Hydrogen Council (2017). *Hydrogen scaling up*. Hydrogen Council Publication.
- Hydrogen Analysis Research Center (HyARC) (2016). *Hydrogen tools*. <https://H2tools.org/hyarc/hydrogen-delivery>
- HyLaw (2019). *National policy paper – Belgium*. European Union Publication.
- International Energy Agency (IEA) (2019). *The future of hydrogen*. IEA Publication.
- International Energy Agency (IEA) (2019). *World energy balances (Overview)*. IEA Publication.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2018). *Hydrogen from renewable power: technology outlook for the energy transition*. IRENA Publication.
- İnovatif Kimya Dergisi (2017). *Antoine Laurent de Lavoisier*. <https://inovatifkimyadergisi.com/antoine-laurent-de-lavoisier>
- İstanbul Ticaret Odası (İTO) (2009). *Sürdürülebilir kalkınma, yenilenebilir enerji kaynakları ve hidrojen enerjisi: Türkiye değerlendirmesi*. İTO Yayını.
- Leblebicioğlu, E. (2018, September 25). *Yakıt pili nedir? Nasıl çalışır?*. Mühendistan. <https://muhendistan.com/yakit-pili-nedir/#:~:text=akit-pili-nedir/#:~:text=>
- Let's Talk Science (2019, August 31). *Hidrojenin tarihçesi ve kullanım alanları*. <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/history-and-uses-hydrogen>
- Montgomery, S.L. (2014). *Küresel enerjiye yön veren güçler*, (E.G. Şenol, Çev.). Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Yayını.
- Okumuş, E. (2017, February 26). *Yakıt pili ve kontrol sistemi*. TÜBİTAK. <https://challenge.tubitak.gov.tr/assets/yakit-pili-ve-kontrol-sistemi.pdf>
- Oral, M. (2020). *Gücün coğrafi bağlamı*. Pegem Akademi Yayıncılık.
- Özcan M. (2020, June 11). *Hidrojen hakkında neler biliyoruz? fosil yakıtlara alternatif olabilir mi?*. Temiz Enerji. <https://temizenerji.org/2020/06/11/hidrojen-hakkinda-neler-biliyoruz-fosil-yakitlara-alternatif-olabilir-mi/>
- Özdemir, Z.Ö. & Mutlubaş, H. (2019). Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ve hidrojen üretim yöntemleri. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 2(1). 16-34.
- Peker, H.S. ve Arslanoğlu, H. (2018). Sanayi 4.0'ın enerji güvenliğine olası etkileri. *Güvenlik Çalışmaları Dergisi*, 20(2), 121-133.
- Polat, T., Yalçın, A.H., Şahin, H.M. (2012). Hidrojenin nükleer enerji ile üretim yollarının incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 15(2). 49-69.
- Royal Society of Chemistry (2020). *Hydrogen*. <https://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen>
- Sarıgül, T. (2016, June 8). *Elektrikli araçlarla yakıt hücresi kullanılan araçlar arasındaki fark nedir?*. TÜBİTAK. <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/elektrikli-araclarla-yakit-hucresi-kullanilan-araclar-arasindaki-fark-nedir>
- Shell (2017). *Shell hydrogen study energy of the future? Sustainable mobility through fuel cells and H2*. Shell Publication.

- Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB) Makine Mühendisleri Odası (MMO) (2018). *Ulaşım ve trafik politikalarında planlama gerekliliği*. TMMOB MMO Yayını.
- Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (2020). *Yakıt pili teknolojileri*. <https://ee.mam.tubitak.gov.tr/tr/arastirma-alanlari/yakit-pili-teknolojileri>
- Türkiye Kojenerasyon Derneği (KOJENTÜRK) (2010). *Dağıtık üretim nedir?*. <http://kojenturk.org/tr/dagitik-uretim-nedir-25>
- Türkiye Kojenerasyon Derneği (KOJENTÜRK) (2015, October 12). *Mikro kojenerasyon nedir*. <http://kojenturk.org/uploads/dokumanlar/Milliyet%20Gazetesi%20Kojen&Trijen%20Eki.pdf>
- U.S. Department of Energy Alternative Fuels Data Center (AFDC) Energy (2020). *How do fuel cell electric vehicles work using hydrogen?*. <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>
- U.S. Department of Energy Alternative Fuels Data Center (AFDC) Energy (2020). *Hydrogen production and distribution*. https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html
- We Engineer Hightech (WEH) (2020, December 12). *H₂ dispenser components for fuel cell electric vehicles (FCEV)*. <https://www.weh.com/refuelling-components-hydrogen/h2-car-dispensers.html>
- White, D. (2018, September 27). *This week in hydrogen*. Ammonia Energy Association. <https://www.ammoniaenergy.org/articles/this-week-in-hydrogen/>
- World Energy Council (WEC) (2019). *Hidrojen enerjisinin geleceği*. WEC Publication.
- World Resources Institute (WRI) (2020). *World greenhouse gas emissions: 2016*. <https://www.wri.org/resources/data-visualizations/world-greenhouse-gas-emissions-2016>
- Yergin, D. (2014) *Enerjinin geleceği (iklim değişikliği, yeni enerjiler, geleceğin dünyası)*. (Ü. Şensoy, Çev.). Optimist Yayınları.
- Yıldırım, Y. (2011). *Yakıt pilleri ders notları*. DOCPLAYER. <https://docplayer.biz.tr/2697566-T-c-zonguldak-karaelmas-universitesi-muhendislik-fakultesi-cevre-muhendisligi-bolumu-cev-346-yakit-pilleri-ders-notlari-prof-dr.html>
- Yılmaz, A., Özlük, M. & Ünvar, S. (2018). *Otomobillerde kullanılan yakıt pillerinin özellikleri*. Batman Üniversitesi. <https://www.batman.edu.tr/Files/Scientific/ec7d2468-56e7-4217-a31c-4bde8da65577.pdf>

SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ POLİTİKALARININ GELECEĞİNDE HİDROJEN ENERJİSİ

ÖZ

Özellikle son on yılda, küresel enerji politikaları yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin ve verimli kullanımına yönelik dönüşümler geçirmektedir. Hem küresel iklim değişimi hem de çevresel kaygılar ve ülkelerin enerji güvenliği temelinde uyguladığı enerji politikaları, sadece elektrik üretiminde değil, aynı zamanda sanayi ve ulaşım sektörlerinde de yeşil enerjilerin kullanımını arttırmayı içermektedir. Enerji teknolojilerindeki gelişmeler, hidrojenin daha az maliyetle elde edilmesini mümkün kılmakta ve bu da hidrojene olan talebin artmasını sağlamaktadır. Son yıllarda, ulaştırma sektöründe ve elektrik üretiminde hidrojen kullanımı konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. İlk olarak 1990'larda prototip olarak üretilen hidrojenle çalışan otomobiller artık ticari bir teknoloji haline gelmiştir. Bu anlamda, hidrojen enerjisi, sıfır emisyon hedeflerine doğrudan ulaşabilen sürdürülebilir¹⁹ bir kaynak olarak stratejik bir misyona sahiptir. Hidrojen kullanımının yaygınlaşmasında, gaz olarak boru hatları ve sıvı olarak kriyojenik kamyonlar ile uygun terminal koşullarının varlığı neticesinde gemiler ve demiryolları aracılığıyla taşınabilen hidrojenin tüketim coğrafyalarına sevkiyatı hidrojen ekonomisinin ortaya çıkmasına ve hidrojen kullanımının yaygınlaşmasına hizmet edecektir. Çalışmanın kapsamı, hidrojen enerjisindeki küresel gelişmelere odaklanmaktadır. Çalışma, yükselen bir kaynak olarak hidrojen enerjisinin küresel enerji politikalarındaki rolünü ele almayı amaçlamaktadır. Araştırma, nitel bir yöntemle sahip olup veri toplama tekniği olarak ise doküman analizi metodu kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, hidrojen enerjisi küresel enerji politikalarında rasyonel bir aktör haline gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Politikaları, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Hidrojen Enerjisi

¹⁹ Mevcut haliyle insan / toplum ihtiyaçlarının gelecek nesillerin ihtiyaçlarından ödün vermeden karşılanmasıdır. "Sürdürülebilir" kavramı, 1987'de Birleşmiş Milletler (BM) "Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu"na hazırlanan Ortak Geleceğimiz Raporu olarak da bilinen Brundtland Raporu'nda (Komisyon Başkanı: Gro Harlem Brundtland) kullanılmıştır. Bunun yanında BM tarafından 2015'te üzerinde uzlaşılan "Sürdürülebilir Kalkınma için 2030 Gündemi"nde 17 amaç belirlenmiştir. Bu amaçlardan ikisi enerjiyle doğrudan ilgilidir. Bunlar; (7) Erişilebilir ve Temiz Enerji ile (13) İklim Eylemi'dir.

GİRİŞ

Doğada serbest halde bulunmayan bu nedenle de sentetik bir yakıt olan hidrojen, evrende en fazla bulunan elementtir. Güneş ve yıldızlardaki termonükleer tepkimenin temel kaynağı hidrojendir. 1 proton ve 1 elektrondan oluşan hidrojen, standart koşullarda renksiz, kokusuz ve zehirsiz olup havadan 14 kat daha hafiftir. Ayrıca hidrojen, hızlı dağılma özelliği nedeniyle diğer gazlarda olduğu gibi tehlikeye yol açmaz. Hidrojen, $-252,77^{\circ}\text{C}$ 'de sıvı hale getirilebilmektedir. Sıvı hidrojenin hacmi, gaz halindeki hacminin 1 / 700'ü kadardır.

1500'lerin başında Paracelsus, sülfürik aside demir talaşları eklendiğinde verilen kabarcıkların yanıcı olduğunu keşfetti. Ancak bu gaz (o dönem hidrojen olarak adlandırılmıyor), ilk kez 1671'de Robert Boyle tarafından keşfedilmiştir. 1766 yılında ise Henry Cavendish bu gazın ayrı bir element olduğunu ortaya koymuştur. Hidrojen tarihi açısından yapı taşı olan bu iki gelişmeyle birlikte hidrojen gazının yanıcı olduğu fark edilmiştir. Daha sonra 1783 yılında Antoine-Laurent de Lavoisier, Pierre Simon de Laplace ile birlikte cam fanus içinde cıva üzerinde hidrojen ve oksijen yakarak suyu sentezlemiştir. Niceliksel sonuçlar, suyun iki bin yıldan beri düşünüldüğü gibi bir element olmadığını ancak iki gazın birleşiminden oluştuğu görüşünü desteklemiştir. Bu gaza Lavoisier tarafından su oluşturu (2 hidrojen atomu / H_2) anlamına gelen *hidrojen* adı verilmiştir (İnovatif Kimya Dergisi, 2017; Let's Talk Science, 2019; Royal Society of Chemistry, 2020). Hidrojen enerjisi ile ilgili çalışmalar ise Soğuk Savaş döneminde başlamıştır. Çünkü her iki güç de (ABD ve SSCB) hidrojenin büyük bir silah olduğunu keşfetmişti. Öyle ki ilk hidrojen bombası denemesi SSCB tarafından 1953 yılında gerçekleştirilmiştir. Bundan bir yıl sonra da ABD, hidrojen bombası denemesini yapmıştır. Bu kapsamda hidrojenin askeri yönünün yanında bir enerji kaynağı olarak kullanılması hususunda 1955 yılında her iki ülkede çalışmalar başlatılmıştır.

Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. 1 kg hidrojen 2,1 kg doğal gaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Ancak birim enerji başına hacmi yüksektir. Isı ve patlama enerjisi gerektiren her alanda kullanımı temiz ve kolay olan hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji sistemlerinde, atmosfere yalnızca su ya da su buharı salınmaktadır. Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama %33 daha verimli bir yakıttır. Hidrojenden enerji elde edilmesi esnasında su buharı dışında çevreyi kirletici ve sera etkisini artırıcı hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde üretimi söz konusu değildir (ETKB, 2020). Üretimi diğer yakıtlara göre ortalama üç kat daha yüksek bir maliyete sahip olduğu için yaygın şekilde kullanımı enerji teknolojilerindeki gelişmelere bağlıdır. Son yıllarda enerji sektöründe hidrojene bağlı uygulamalar görmek mümkündür. Özellikle ulaşım sektöründe "temiz ulaşım" hedefleri, hidrojenin enerji politikaları içinde stratejik bir kaynak olduğunu ifade etmektedir.

Küresel iklim değişimi ve çevresel sorunlar fosil enerji kaynaklarıyla fazlaca ilişkilendirilmektedir. 2000'li yıllarla birlikte ise yaşanan teknolojik gelişmeler ve dönüşümler, nüfus ve araç sayısının artışı, kentleşme oranlarının tüm dünyada yükselmesi gibi sebepler neticesinde dünya enerji tüketimi önemli boyutlara ulaşmıştır. Artan enerji talebi bir taraftan fosil yakıtlara olan talebi daha da yükseltirken bir taraftan da enerji güvenliğini sağlamak ve uluslararası iklim-çevre hedeflerini / kriterlerini (Kyoto Protokolü, Paris COP21 vd.) yerine getirmek için yenilenebilir kaynaklara olan talebi de tüm ülkeler nezdinde artırmıştır (Oral, 2020: 165). Bu yüzden enerji

politikalarında ve yatırımlarında özellikle son yirmi yıllık süre zarfında yenilenebilir enerji kaynaklarının belirleyici olduğu görülmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili kaynaklar olmaları ve depolama teknolojilerinin maliyetleri nedeniyle yaygın olmayışı bu kaynaklara yönelik çeşitli kuşku da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla gerek ulusal gerekse de küresel enerji sistemini yalnızca yenilenebilir enerjilere dayandırmak mümkün değildir. Süreklilik ve emre amadelik açısından termik santraller ve nükleer santraller çevrim sektörünün kaçınılmaz unsurlarıdır. Her ne kadar termik santrallerin küresel iklim değişikliğinde kayda değer bir etkisinin olduğu kabul edilse de bu santrallerin enerji talebi doğrultusunda enerji portföyünden çıkarılması söz konusu değildir. Enerji kaynaklarının kullanıldığı tüm alanlar (ulaşım, sanayi, çevrim, ısı) dahil edildiğinde enerji sektörünün sera gazı salınımlarındaki payı 2016 verileri çerçevesinde %73 düzeyindedir (WRI, 2020).

Bu anlamda hidrojen, uzun mesafeli taşımacılık, kimyasallar ve demir-çelik gibi emisyonları azaltmanın zor olduğu sektörlerde dekarbonizasyonu sağlayacak yöntemler ortaya koymaktadır. Ayrıca hava kalitesini iyileştirmeye ve enerji güvenliğini artırmaya yardımcı olmaktadır. Enerji kaynaklı küresel CO₂ emisyonları, güçlü şekilde konumlandırılan uluslararası iklim hedeflerine rağmen 2018'de tüm zamanların rekorunu kırmıştır. Bununla birlikte her yıl yaklaşık üç milyon insanın erken yaşta ölümüne neden olan açık hava kirliliği de önemli bir sorun olmaya devam etmektedir (WEC, 2019).

1970'li yıllardan günümüze dek dünya hidrojen üretimi istikrarlı bir artış göstermiştir. Çünkü hidrojen endüstride zaten kullanılan bir elementtir. Ancak hidrojen, endüstri sektöründeki kullanımının haricinde sunmuş olduğu emisjonsuz salınım fırsatı sayesinde son yıllarda otomobiller başta olmak üzere diğer ulaşım araçlarındaki kullanımı doğrultusunda yeniden popüler bir gündeme sahip olmuştur. Esasen yeni bir teknoloji olmayan yakıt hücresi sayesinde hidrojen bir enerji taşıyıcısı olarak yararlanılmakta ve elektrik üretilmekte bu sayede de ulaşım araçlarında kullanılabilir. Bu anlamda hidrojen 21. yüzyılın enerjisi olarak nitelendirilme gücüne sahiptir.

Enerji teknolojilerindeki gelişmeler hidrojenin daha az maliyetle elde edilmesine imkân vermekte bu durum hidrojene olan talep artışını da beraberinde getirmektedir. Son yıllarda ulaşım sektöründe ve elektrik üretiminde hidrojenle yararlanmaya yönelik önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. İlk kez 1990'lı yıllarda prototip olarak üretilen hidrojenle çalışan otomobiller artık ticari boyut kazanan bir teknoloji haline gelmiştir. Hidrojenli araçlardan kullanım sonrası su ya da su buharı atıldığı için bu araçlar sıfır emisyon değerine sahiptirler. Hidrojen enerjisi, menzili dikkate alındığında, temiz ve çevreci olmaları nedeniyle küresel iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir misyon yüklenen ve günümüzün inovatif ulaşım araçları olarak kabul edilen elektrikli araçlara göre daha büyük bir avantaja sahiptir. Öyle ki elektrikli araçların menzili 300-500 km civarındayken bu değer hidrojenli araçlarda 600-700 km'ye dek çıkabilmektedir. Bu durum açık bir şekilde mobil devrime işaret etmektedir.

ARAŞTIRMANIN AMACI VE YÖNTEMİ

Bu çalışmada, son yıllarda yeniden yükselen bir taşıyıcı / kaynak²⁰ olan hidrojen enerjisinin küresel enerji politikalarında artan önemini ortaya koymak ve bu durumu analiz etmek amaçlanmıştır. Hidrojen enerjisi ve yakıt hücreleri konusundaki gelişmeler esasen 19. yüzyıla dek uzanmasına rağmen son yıllarda özellikle ulaşım sektöründe yakıt hücreleri sektöründe teknoloji ve üretim maliyetlerinde yaşanan gelişmeler sebebiyle yeniden fizibil bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. İklim değişimi eksenli enerji politikalarında “sıfır emisyon ve karbonsuz gelecek” temalı hedeflere erişmede sunduğu fırsatlar hidrojeni daha etkin bir kaynak haline getirmektedir. Bu bağlamda ulaşım sektöründe faaliyet gösteren Hyundai, Toyota, Honda, Mercedes-Benz, BMW, Iveco, Nikola gibi firmaların hidrojenli araçlar konusunda yürütmüş olduğu çalışmalar ve Güney Kore, Japonya, Almanya, ABD, Çin, Fransa, Birleşik Krallık, Belçika, Hollanda, Avusturya, İtalya, Norveç, Avustralya, Yeni Zelanda, Hindistan, Brezilya, Suudi Arabistan, Güney Afrika ve Avrupa Birliği'nin enerji politikalarında hidrojen uygulamalarına yönelik hedefler belirlemesi, hidrojen enerjisinin küresel enerji politikalarında yükselen bir rol üstlendiğini göstermektedir.

Çalışmada yöntem olarak nitel araştırma metodu kullanılmıştır. Araştırmanın deseni durum çalışmasıdır (case study). Çalışmada veri toplama tekniği olarak ise doküman analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda ilgili kaynaklarla birlikte enerji sektöründe ulusal ve uluslararası ölçekte faaliyet gösteren kuruluşların verilerinden yararlanılmıştır.

HİDROJEN KULLANIMI VE DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Hidrojen enerjisi denildiğinde akla yalnızca suyun elektrolizi yoluyla üretilebilen bir kaynak gelmektedir. Ancak hidrojenin bunun dışında üretim şekli de bulunmaktadır. Öyle ki hidrojen, fosil yakıtlardan veya nükleer enerjiden²¹ termokimyasal yöntemlerle özellikle doğal gazdan buhar reformasyonu²² yolu ile bunun yanında biyokütleden²³ ve güneş enerjisi²⁴ aracılığıyla da üretilmektedir. Hatta organik olarak biyokimyasal yöntemle fotosentetik PNS bakterilerden (mor bakteriler) bile hidrojen üretimi mümkündür. Hidrojenin bu anlamda çeşitli hammaddelerden kolayca elde edilmesi onu önemli bir enerji taşıyıcısı haline getirmektedir. Aynı zamanda hidrojenin, sera gazları salınımına yol açmaması ve taşınmasının ise, borular, tankerler aracılığı ile güvenilir bir

²⁰ Hidrojen, doğada serbest halde bulunmaz ve hidrokarbon kaynaklar, su, biyokütle gibi çeşitli hammaddelerden üretilir. Bu yüzden ikincil bir yakıt özelliği göstermesi nedeniyle bir enerji taşıyıcısı olarak ifade edilmektedir.

²¹ Üretilen elektriğin elektrolizde kullanılmasıyla veya yüksek sıcaklık reaktörlerinden (High Temperature Reactor/HTR) ısı yoluyla hidrojen üretimi sağlanmaktadır. Nükleer enerjiden elde edilen ısıyla hidrojen üretimi ya elektroliz ya da termokimyasal süreçlerle yapılmaktadır. Termokimyasal süreç elektroliz yöntemine göre daha yüksek verim sağlamaktadır (Polat vd., 2012:52). Termokimyasal yöntemde su buharı 1650 °C-1750 °C sıcaklıkta termik ayrışmaya uğrar ve hidrojen ile oksijene parçalanır.

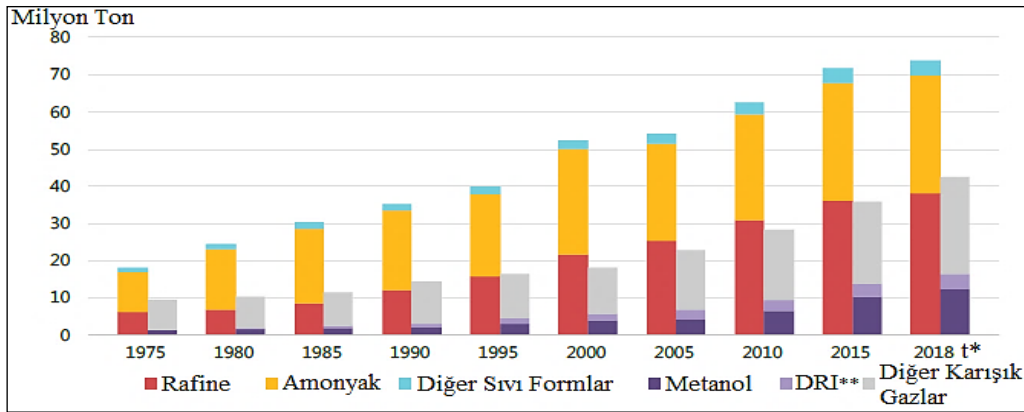
²² 700°C-100 °C arasındaki buhar ile doğal gazın içindeki metanın karbondan ayrıştırılması.

²³ Biyokütleden hidrojen eldesi söz konusu kaynağın yüksek sıcaklık ve düşük basınç altında gazlaştırılması yoluyla gerçekleştirilmektedir.

²⁴ Yenilenebilir kaynaklardan hidrojen eldesi, bu kaynaklardan üretilen elektrik sayesinde suyun elektrolizi yoluyla olmaktadır. Güneş enerjisinden de bu yolla hidrojen üretilebilmektedir. Ayrıca güneş enerjisinden termoliz yoluyla hidrojen üretilmesi de mümkündür. Bu yöntemde güneş enerjisinden yararlanarak su buharı 1650 °C-1750 °C sıcaklıkta termik ayrışmaya uğrayarak hidrojen ile oksijene parçalanır.

şekilde yapılabilmesi nedeniyle, yeşil ya da yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı bir ekonominin politikalandırılmasında oldukça büyük bir önem arz ettiği söylenebilir (Aslan & Özcan, 2008: 159).

Buna göre hidrojen üretiminde elektroliz, termoliz, kimyasal, termokimyasal, fotoliz ve biyolojik olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bununla birlikte mevcut durumda hidrojen üretiminde teknik ve maliyet esas alındığında en yaygın metot, fosil yakıtlardan hidrojen eldesidir. Bu anlamda en fazla öne çıkan fosil yakıt ise doğal gazdır. Küresel bazda en fazla hidrojen üretimi bu yolla gerçekleştirilmektedir. Hidrojenin %48'i doğal gazdan, %30'u petrolden, %18'i kömürden, %4'ü ise elektroliz yoluyla elde edilmektedir (IRENA, 2018: 14). 1975'ten günümüze üç kattan fazla büyüyen hidrojen talebi artmaya devam etmekte ve neredeyse hidrojen üretimi tamamen fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu anlamda küresel ölçekte gazın %6'sı, kömürün ise %2'si hidrojen üretiminde kullanılmaktadır (IEA, 2019: 17) (Şekil 1).



Şekil 1. Küresel Hidrojen Üretimi (elde edildiği türe göre)

* tahmini

** Doğrudan İndirgenmiş Demir (Direct Reduced Iron)

Kaynak: IEA, 2019: 18

Küresel hidrojen talebi ve üretimi her yıl istikrarlı bir artış göstermektedir. Hidrojenin sektörel kullanım çeşitliliğinin artması talep ve üretimdeki yükselişin en önemli sebebidir. Hidrojen birçok amaç için kullanılabilir. Günümüzde hidrojen sayesinde enerjiyi farklı şekillerde üretebilecek, depolayabilecek, taşıyabilecek ve kullanabilecek teknolojiler bulunmaktadır. Yenilenebilir ve nükleer enerji kaynakları ile doğal gaz, kömür ve petrol gibi yakıtlarla hidrojen üretebilmektedir.

Hidrojen, boru hatlarıyla ve gemilerle sıvı halde taşınabilir. Öyle ki hali hazırda tüm dünyada bulunan doğal gaz boru hatlarının düşük bir maliyete karşılık gelecek şekilde hidrojen taşımacılığında kullanılabilmesi mümkündür. Hidrojen, elektrığe ve metana dönüştürülerek evler veya yem sektörü için enerji üretebilir veya otomobillerde, kamyonlarda, trenlerde, gemilerde ve uçaklarda yakıt olarak kullanılabilir (WEC, 2019: 1). Hatta ülkelerin savunma alanlarında faaliyet gösteren denizaltı araçlarında da hidrojen kullanılabilir.

Hidrojenin kullanımında özellikle sanayi sektörü öne çıkmaktadır. Öyle ki hidrojenin kullanımı sanayi sektörü içindeki genel endüstride (yarı iletken, yakıt, cam üretimi, bitkisel yağların hidrojenerasyonu ve jeneratörlerin

soğutulması alanlarında) %10, demir çelik ve rafine işlemlerinde (çelik üretiminde demir indirgeme²⁵ işlemlerinde gaz olarak ve su arıtmada antioksidan olarak) %25, kimya sektöründe (amonyak (gübre, ilaç, boya yapımı), polimer (kimyasal rekasyonla tekstil, sağlık, otomotiv, elektronik, gıda, yapı malzemeleri alanlarında çok sayıda ürün üretimi, reçine (ürünlerin birleştirilmesi ve yapıştırılması)) %65'tir (IRENA, 2018: 14).

Bunun yanında uygulanabilir bir hidrojen altyapısı, hidrojenin üretildiği yerden son kullanım noktasına, örneğin bir yakıt istasyonuna teslim edilmesini gerektirir. Altyapı, yakıt dağıtım sürecinde yer alan boru hatlarını, kamyonları, depolama tesislerini, kompresörleri ve dağıtıcıları içermektedir. Hidrojen altyapısı için dağıtım teknolojisi hali hazırda ticari olarak mevcuttur ve birkaç ABD şirketi bugün toplu hidrojen tedarik etmektedir. Hidrojen endüstriyel uygulamalarda uzun süredir kullanıldığı için altyapının bir kısmı bu yüzden halihazırda mevcut, ancak bu, bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen kullanımının yaygın olarak tüketiciye sunulması için tek başına yeterli değildir (EERE, 2020).

Hidrojenin üretim ve dağıtım ilişkisi ele alındığında örneğin dünyanın en uzun hidrojen boru hattı taşıma ağına sahip olan ABD'de kullanılan hidrojenin çoğu, kullanıldığı yerde ya da bunun yakınında, genellikle büyük sanayi sitelerinde üretilmektedir. Yakıt hücreli elektrikli araçların yaygın olarak kullanılması için gerekli olan ülke çapındaki yakıt istasyonları ağına hidrojeni dağıtmak için gerekli altyapının geliştirilmesi gerekmektedir. Hali hazırda hidrojen dağıtımını üç şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlar; gaz olarak boru hatları yoluyla, sıkıştırılmış hidrojen gazının kamyon, vagon, gemi veya mavnaya marifetiyle yüksek basınçlı tüp treylerde taşınması yoluyla ve sıvılaştırılmış hidrojenin yine kamyon, vagon, gemi veya mavnaya yoluyla taşınması şeklindedir. Diğer yandan yakıt istasyonlarında hidrojen üretmek dağıtım maliyetlerini düşürürken yerinde üretim teknikleri oluşturma masrafları nedeniyle üretim maliyetlerini artırmaktadır (AFDC Energy, 2020).

Temelde iki hidrojen yakıt istasyonu türü vardır. Bunlardan ilki, hidrojenin başka bir yerde üretildiği, bu anlamda yerel depolama ve araçlara dağıtım için dolmuş noktasına teslim edildiği (gaz ve sıvı olarak) istasyonlardır. Diğer ise hidrojenin yerinde üretildiği ve daha sonra araçların hidrojen deposuna aktarılacak üzere depolandığı istasyonlardır. Bazı istasyonlar her iki türün bir kombinasyonu olabilir (Alazemi & Andrews, 2015: 488). Bir hidrojen yakıt istasyonu (Şekil 2).

²⁵ Demir cevherinden erime noktasının altında doğal gaz ya da hidrojen gazlarını yakıt olarak kullanarak, oksijenin uzaklaştırılması suretiyle yüksek oranda metalik demir içeren katı bir ürünün (direct reduced iron/DRI, direkt indirgenmiş demir veya sponge iron/sünger demir) elde edilmesini sağlayan yöntemlere "Direkt İndirgeme/DR Prosesleri" denir. Elde edilen katı ürüne, süngerimsi bir görünüm arzeden yüksek orandaki gözenekliliğinden dolayı "Sünger Demir/Sponge Iron" ismi de verilmektedir (Demir Çelik Store, 2020).



Şekil 2. Hidrojen Yakıt İstasyonu²⁶

Kaynak: We Engineer Hightech (WEH), 2020

Gaz olarak teslim edilen hidrojeni kullanan istasyonlar için ortalama 180 kg / gün depolamaya ve ekipman, tasarım, inşaat ile devreye alma dahil olmak üzere tahmini toplam maliyet 2 milyon dolardır. Sıvı olarak teslim edilen hidrojeni kullanan istasyonlar için ortalama depolaması 350 kg / gün ve tahmini toplam inşaat ile devreye alma maliyeti 2,8 milyon dolardır. Suyun elektrolizinden yararlanarak (örneğin güneş enerjisi yoluyla) yerinde hidrojen üreten istasyonlar için ortalama depolaması 120 kg / gün ve tahmini toplam inşaat ile devreye alma maliyeti 3,2 milyon dolardır (CAFCP, 2020).

Bunun yanında yıllardan beri içeriğindeki kükürtün uzaklaştırılması amacıyla petrolün işlenmesi sürecinde rafineleriler ve gübre üretimi gibi endüstriyel alanlarda kullanılan hidrojen Avrupa'da geniş bir ağa sahiptir. Belçika ve Hollanda'da dünyanın en büyük hidrojen ağlarından biri bulunmaktadır (HyLaw, 2019: 1). Hidrojen ağlarına sahip olan ülkelerin km olarak boru hatlarının uzunluğu şöyledir; ABD (2608 km), Belçika (613 km), Almanya (390 km), Fransa (303 km), Hollanda (237 km), Kanada (147 km) ve diğer ülkelerde bulunan hidrojen boru hatları toplamı 337 km'dir (HyArc, 2016).

Hidrojenin depolanması konusu bu kaynağın daha yaygın kullanılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Hidrojen sıvı ya da gaz formunda depolanabilmesine rağmen bu işlemler görece maliyetlidir. Depolama konusundaki teknik gelişmelerle düşen maliyetler hidrojeni her alanda yaygınlaştıracak ve daha erişilebilir, kullanılabilir hale getirecektir.

Hidrojen depolama yöntemleri şu şekildedir (İTO, 2009: 102; Özdemir & Mutlubaş, 2019: 20-30);

Sıkıştırılmış Gaz; en yaygın depolama şeklidir. Gaz halde 50 litrelik tanklarda 200-700 bar basınç altında depolanır.

²⁶ Hidrojen yakıt istasyonları bağımsız bulunabildiği gibi petrol dolum noktalarıyla birlikte aynı istasyon içerisinde de bulunabilir.

Sıvı Hidrojen; -252,77°C'de sıvı hale gelen hidrojen özel tanklarda depolanır. Sıvı hidrojenin depolanması, gaz hidrojene oranla daha düşük basınç gerektirdiği için daha güvenli olmaktadır.

Hidrokarbonlar; metanol, etanol gibi hidrokarbonlu yakıtlar birim hacim ve basınçta saf sıvı hidrojenden daha fazla hidrojene sahiptir. Hidrokarbonlardan yüksek sıcaklıkta su buharı kullanılarak hidrojen ayrıştırılabilir. Bu anlamda hidrokarbonlar bir hidrojen tutucu olarak kullanılmaktadır.

Karbon Nanotüpler; Basınç altında grafit dolu tanklarda hidrojenin depolanması. Burada hidrojen süper aktif gözenekli grafit yüzeyde depolanır.

Metal Hidritler; Metal hidritler hidrojeni kolaylıkla emebilen metaller olarak bilinir. Metal hidrit oluşum süresince hidrojen molekülleri ayrışıp, elde edilen hidrojen atomları uygun metal kafesler içerisinde tutulur.

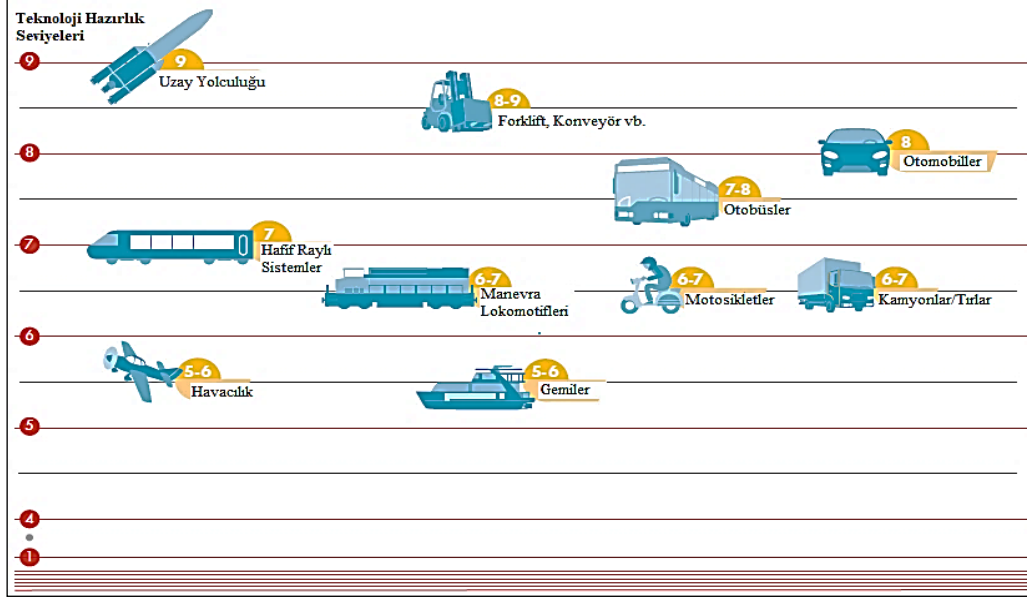
Hidrojen teknolojilerinin sürekli gelişim içinde olması ile hidrojen talebi arasında güçlü bir bağlantı vardır. Öyle ki bu iki durum birbirinin hem nedeni hem de sonucu olmaktadır. Hidrojen teknolojilerinin gelişim kaydetmesi hidrojen talebinin artmasına imkân verirken, hidrojen talebinin artması da hidrojen teknolojilerinin gelişmesine fırsat yaratmaktadır.

ULAŞIM ARAÇLARINDA HİDROJEN KULLANIMI

Ulaşım, insanların ve nesnelerin bir yerden başka bir yere yani hedeflenen noktaya erişmesi eylemidir. Ulaştırma ise insanların (yaya olarak yol kat etmesi haricinde) ve malların çeşitli araçlarla bir yerden başka bir yere aktarılmasıdır. Dolayısıyla ulaşım ve taşıma faaliyetleri insanlığın eriştiği en önemli medeniyet unsurlarından biridir. Çünkü bu faaliyetler, kişiler için bir amaç dahilinde (iş, ticaret, turizm, eğitim, sağlık vb.) bir yerden başka bir yere erişmesini sağlar ve dolayısıyla yaşamsal bir faaliyet alanı olarak öne çıkar. Bununla birlikte bir ülkede, bölgede ulaşım sistemlerinin gelişmesi ekonomik gelişim ve değişimlerle bağlantılıdır. Diğer taraftan ulaşım faaliyetleri *doğal* (yeryüzü şekilleri, iklim) ve *beşeri* (nüfus, sanayi, ulaşım yatırım faaliyetleri, teknolojik gelişmeler vb.) coğrafi etmenlerin etkisinde kalarak gelişmiştir / gelişmektedir (Aydın & Oral, 2018: 258). Ulaşım ve taşıma faaliyeti tarihsel anlamda tekerleğin icadıyla (M.Ö. 3500 Sümerler) ilk defa boyut değiştirmiştir. İnsanların en eski kullandığı ulaşım türleri olan kara yolları ve su yolları ulaşımından farklı olarak zamanla ortaya çıkan teknik gelişmeler sonucu 19. yüzyıldan itibaren demir yolu, 20. yüzyıldan itibaren hava yolu ulaşımları da öngörülenin ötesinde gelişme göstermiştir. International Energy Agency (IEA) 2019'a göre 2017'de dünya toplam enerji tüketiminin yaklaşık %30'u ulaşım sektöründe gerçekleşmiştir. Aynı zamanda 1971-2017 aralığında enerji tüketimi en fazla artış gösteren alan ulaşım sektörü olmuştur (IEA, 2019: 8).

Dünyada genellikle yük ve yolcu taşımacılığında, toplu ulaşım araçlarının kullanılmasına ilişkin seçenekler söz konusu iken, ana ulaşım türlerinden biri olan karayolu taşımacılığı; modlar (ulaşım türleri) içinde kesintisiz taşımaya olanak vermesi, esnek yapısı, hızı ve modlar arası geçişlere uyumlu olması nedeniyle tercih edilmesine ve bu ulaşım türünün giderek gelişmesine olanak vermiştir (TMMOB MMO, 2018: 1-2). Ulaşımda her noktaya sunduğu erişim kolaylıkları nedeniyle karayoluna olan talep tüm dünyada sürecektir. Bu bağlamda hidrojenle

çalışan araçlar ulaşımda güçlü bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Tüm ulaşım ve taşıma sektörlerinde hidrojenli araçlara (yakıt pilleri) yönelik çalışmalar son yıllarda önemli aşamalara ulaşmıştır. Bu bağlamda ulaşım ve taşıma alanlarında araçların teknoloji hazırlık seviyesi için (Şekil 3).



Şekil 3. Ulaşım ve Taşıma Sektörlerinde Hidrojenli Araçların Teknolojik Seviyeleri²⁷

Kaynak: Shell, 2017: 46

Ulaşımında Yakıt Pili / Hücresi Devrimi

Yakıt pilleri / hücreleri (fuel cell), kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Temel anlamda elektrolit²⁸, anot ve katottan (iletken uçlar) oluşan yakıt pillerinde elektrik üretimi şu şekilde gerçekleşmektedir; yakıt pilinin anot tarafından hidrojen gazı yakıtı, katot tarafından ise oksijen yani ortam havası verilir. Hidrojen anot tarafında pozitif ve negatif iyonlarına ayrışır. Pozitif iyonlar, sadece pozitif yüklü iyonların geçişine izin veren elektrolitten geçerek katot ucuna ulaşır. Anot ucunda kalan elektronlar ise pozitif yüklü iyonlarla tekrar birleşme eğiliminde olduğu için bunlarda harici bir devre ile katot tarafına akarlar. Harici devredeki bu elektron akışıyla elektrik üretilmiş olur. Katot tarafına geçen elektronlar burada pozitif iyonlar ve hava ile birleşerek saf su açığa çıkarırlar (Leblebicioğlu, 2018). Sonuçta hidrojen yakıt hücrelerinin salınım maddesi elektrik ve su olmaktadır. Ayrıca hidrojenin enerji üretim yoğunluğu oldukça yüksektir (Yergin, 2014: 314). Yakıt pilleri; kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar, rafineri ürünleri, amonyak, metanol gibi kimyasal ürünler, biyogaz ve atık materyaller gibi alternatif kaynaklardan bir yakıt dönüştürücü yardımıyla elde edilen *hidrojenin*

²⁷ Shell 2017 verilerine göre, teknolojik hazırlık seviyelerinin karşılıkları şu şekildedir:

- (5) Test edilmiş temel teknoloji unsurları.
- (6) İşlev testi prototip aşaması. Teknik fizibilite.
- (7) Görsel prototip. Kullanıma hemen hemen hazır hale gelmiş ürün/sistem.
- (8) Kullanım alanında işlevsellikleri kanıtlanmış nitelikli ürün/sistem.
- (9) Kullanımda başarı sağlamış nitelikli ürün/sistem.

²⁸ Serbest iyon barındıran ve elektriksiz iletkenliğe sahip olan ortam.

veya doğrudan hidrojenin, oksijen ile elektrokimyasal reaksiyona girmesi sonucunda enerji üretebilmektedir (TÜBİTAK, 2020). Bu anlamda gerekli teknik altyapının hidrojenin doğal gaz boru hatlarından yararlanarak taşınması da mümkündür.

Yakıt pilleri, temiz ve çevreci olmasının yanında yüksek verime sahip sessiz çalışan teknolojilerdir. Bir buhar kazanı veya türbin kullanılmadan, sadece kimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi üretilir. Hidrojen (H₂) ve oksijen (O₂) arasındaki elektrokimyasal reaksiyon ile elde edilen ve toplam verimlilikleri %80'lere kadar ulaşabilen yakıt pilleri, sürekli çalışan piller veya elektrokimyasal makinalar olarak da bilinir. Hidrojen-oksijen temelli yakıt pilleri, bünyesinde kullanılan elektrolitin cinsine göre çeşitli isimler alırlar. Bunlar;

- fosforik asit yakıt pili (çalışma sıcaklığı: 160--220 °C, elektriksel verim %55)
- katı oksit yakıt pili (çalışma sıcaklığı: 800--1000 °C, elektriksel verim %60-65)
- erimiş karbonat yakıt pili (çalışma sıcaklığı: 620--660 °C, elektriksel verim %65)
- polimer elektrolit yakıt pili (PEM) (çalışma sıcaklığı: oda sıcaklığı--80 °C, elektriksel verim %40)
- alkali yakıt pili (çalışma sıcaklığı: oda sıcaklığı--250 °C, elektriksel verim %60-70) şeklindedir (EVCED, 2019; Yıldırım, 2011: 10).

Yakıt pilleriyle ilgili ilk gelişmeler 19. yüzyılda ortaya çıkmıştır. *Bu gelişmeler tarihsel bağlamda şöyledir;*

Yakıt hücresinin prensipleri ilk olarak C. Friedrich Schönbein tarafından 1838'de bulunmuştur. 1843'te W. Robert Grove, suyun elektrolizinin ters reaksiyonu sonucunda sabit akım ve gücün üretildiğini fark ederek ilk yakıt hücresini geliştirmiştir. 1955'te, W. Thomas Grubb, yakıt pili tasarımında değişiklik yapmış ve bu tasarımın üzerine Leonard Niedrach da çalışarak gelişim sağlamıştır. Böylelikle "Grubb-Niedrach Yakıt Pili" olarak kabul edilen yakıt pili ortaya çıkmıştır. 1958'de General Electric (GE) NASA ile birlikte yakıt pili üzerine araştırmalar yapmış ve "Gemini" adlı uzay²⁹ projesinde ilk ticari yakıt pili kullanılmıştır. 1959'da F. Thomas Bacon 5 KW'lik sabit bir yakıt hücresi geliştirmiştir. Aynı yıl, Harry Ihrig liderliğindeki araştırmacılar 15 KW'lik bir yakıt pili daha üretmişlerdir. 1960'larda Bacon'un patentleri ABD'nin uzay araştırmaları programında elektrik ve içme suyu sağlamak için kullanılmıştır. 1970'lerde ise Dupont şirketi tarafından yakıt pili için yüksek verimli nasyon (SiO₂) membranı³⁰ elektrolit olarak üretilmiştir (Okumuş, 2017). Bu anlamda hidrojenin 1970'li yıllarda ulaşım sektöründe kullanımına yönelik çalışmalar güçlü bir şekilde sürmüştür. Nitekim bu süreçte hidrojen farkındalığı artmış ve 1974 ve 1976 yıllarında ABD'de hidrojen enerjisi kongreleri düzenlenmiştir.

Hidrojenin ulaşım sektöründe kullanımı tüm dünyada en dikkat çeken teknolojik gelişmelerden biridir. Buna göre ulaşım araçlarında dört tip hareket ettirici güç bulunmaktadır. Bunlardan ilki içten yanmalı motorlar ve bu motorlarda kullanılan petrol türevleri, ikincisi içten yanmalı motorlarda hibrit teknolojinin kullanımı (içten

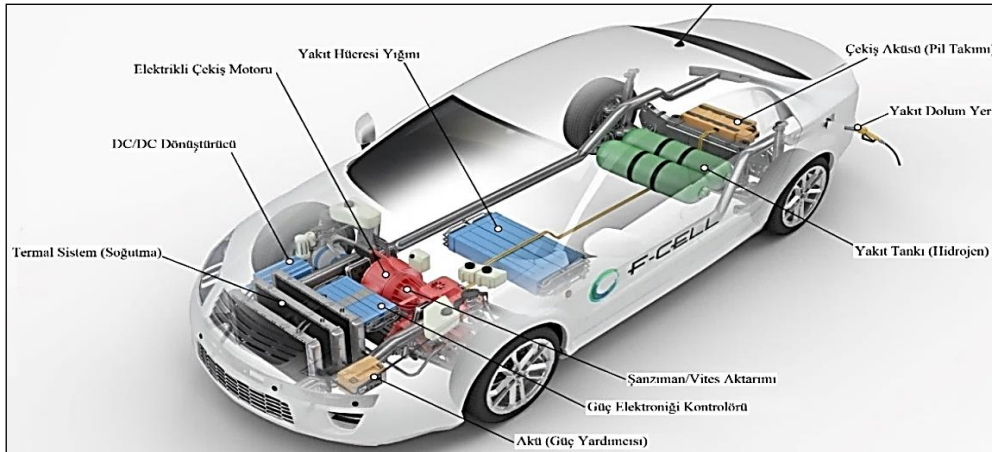
²⁹ Hidrojen sıvı haliyle, günümüzde uzay araçlarında yakıt olarak kullanılmaya devam etmektedir.

³⁰ Bazı molekül ve iyonların başka bir kesime geçişine imkân veren bazılarının ise geçişini engelleyen yapı.

yanmalı motorla birlikte prizden şarj edilebilen ya da sadece rejeneratif frenleme³¹ yoluyla şarj olan pil ve küçük çaplı bir elektrik motorunun bulunması), üçüncüsü tam elektrikli araçlar ve son olarak da yakıt pilleri kullanarak elektrik üretmek ve bu sayede aracı hareket ettirmeye dayanan teknolojinin kullanımınıdır.

Hidrojenli araçlara kısaca “yakıt hücreli elektrikli araçlar / fuel cell electric vehicle (FCEV)” da denilmektedir. FCEV’lerin nüfusa ortalaması göz önünde alındığında dünyada en yaygın olduğu ülke Danimarka’dır. Ancak İngiltere, Fransa, Norveç, İzlanda, Japonya, Almanya gibi ülkeler hidrojeni geleceğin enerjisi olarak görmekte ve bu teknolojiye önemli yatırımlar yaparak sektöre öncülük etmektedirler (Congar, 2020). Yakıt pilleri özellikle hareket kabiliyeti alanında enerji ekonomisinin dönüşümüne yardımcı olacaktır. Burada ulaşılmak istenen nokta hidrojenin kendisiyle değil hidrojen vasıtasıyla elektrik elde ederek hareket sağlamaktır. Yakıt pilleri işte tam da bu tür bir enerji, elektrik enerjisi üretir (Montgomery, 2014: 288). Buna göre hidrojen temelli yakıt pilleriyle hareket eden otomobillerde esasen hidrojen bir yakıt değil pil görevinde kullanılmaktadır. Çünkü hidrojenli araçlarda içten yanmalı motorlara benzer şekilde petrol yerine hidrojeni yakarak değil, hidrojenden faydalanarak elektrik motoru çalıştırılır. Yakıt hücreli araçların elektrikli araçlardan en belirgin farkı, bu araçlarda kullanılan hidrojenin harici olarak depolanmasıdır. Dolayısıyla bu araçlardaki yakıt hücreleri şarj edilmez (Sarigül, 2016). Hidrojen ile reaksiyona giren oksijen ise ortam havasından gelmektedir.

Bunun yanında üretici firmalar otomobillerde yakıt pili uygulamalarını genelde benzer biçimde tasarlamışlardır. Yani hidrojen tankı arka koltukların altına konulmuştur. Yakıt pili sürücü koltuğunun altına yerleştirilmiştir. Elektrik motoru da aracın ön kısmına yerleştirilmiştir. Yine çekiş olarak önden çekiş tercih edilmiştir (Yılmaz vd., 2018: 214). Hidrojenli otomobillerin teknik yapısı şu şekildedir (Şekil 4);



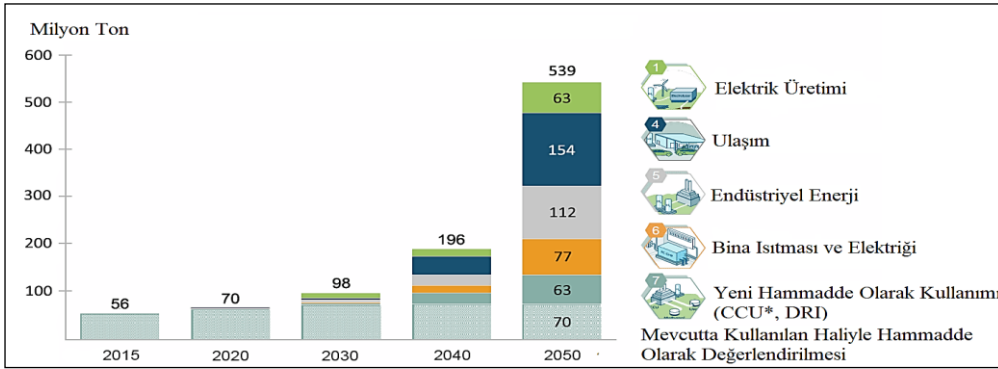
Şekil 4. Hidrojenli Bir Otomobilin Mekanik Aksamı

Kaynak: Alternative Fuels Data Center (AFDC) Energy, 2020.

³¹ Rejeneratif frenleme (frenleme yoluyla ortaya çıkan sürtünmeden elektrik enerjisi eldesi) “Plug-In Hibrit Araçlar/PHEV”da da mevcuttur. Bu enerji, tekerleklere bağlı olan elektrik motorunda üretilir.

KÜRESEL ENERJİ POLİTİKALARINDA HİDROJEN ENERJİSİ

Tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımlar devamlı artmaktadır. Yenilenebilir enerjiler içinde ise en fazla yatırım alan kaynaklar güneş ve rüzgâr enerjisidir. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları bazında incelendiğinde hidrojen enerjisinin en az yatırım alan kaynak olduğu görülmektedir. Ancak küresel enerji politikalarında hidrojen enerjisine atfedilen önem ve hidrojen enerjisi maliyetlerinin düşmesi projeksiyonlar bazında bu enerji türünün günümüze oranla daha yaygın ve yüksek miktarlarda kullanılacağını göstermektedir. Öyle ki 2015'te 56 milyon ton olan küresel hidrojen talebinin 2050'de 550 milyon tona yaklaşacağı öngörülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Hidrojen Enerjisinin Küresel Bazda Talep Durumu

* Carbon Capture And Utilization / Karbon Yakalama ve Kullanımı

(Veriler; David White tarafından Exajoule (EJ)'den Ton'a çevrilmiştir. 1 EJ=7 Milyon Ton H₂)

Sektörlere Dair Numaralandırmaların Hydrogen Council'e göre açıklamaları: (1) Hidrojen bazında büyük ölçekli yenilenebilir enerji entegrasyonunun ve elektrik üretiminin sağlanması, (4) Karbondan arındırılmış ulaşım, (5) Endüstride temiz enerji kullanımı, (6) Binaların ısıtılmasında ve elektrik kullanımında karbonsuz uygulamalara destek, (7) Endüstriye temiz hammadde sağlanması.

Kaynak: Hydrogen Council, 2017: 20

Ekonominin karbondan arındırması için hidrojenin düşük veya sıfır karbonlu kaynaklardan elde edilmesi gerekmektedir. Üretim kaynağına bağlı olarak hidrojen; yeşil, gri ve mavi renk kodlarından oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrikten elde edilen hidrojen "yeşil hidrojen" olarak tanımlanıyor ve karbon salımına neden olmuyor. Fosil yakıtlardan üretilen hidrojen "gri hidrojen" olarak adlandırılıyor. Mavi hidrojen de gri ile aynı şekilde üretiliyor. Ancak burada amaç, Karbon Yakalama ve Depolama (Carbon Capture and Storage / CCS) teknolojileri ile emisyonları yakalamak ve depolamaktır. Bu yöntem yalnızca düşük emisyonlara ulaşılmasını sağlayan bir yöntemdir (Özcan, 2020). Hidrojenin günümüzde diğer yakıtlara oranla pahalı olmasına rağmen orta ve uzun vadede teknolojik ilerlemelere bağlı olarak enerji kullanımında petrol, kömür ve doğalgazın yerini ikâme edilebilecek alternatif yakıtlar arasında birinci sırayı alması beklenmektedir (Bayraç, 2010: 251).

IEA'nın hidrojen kullanımının artırılması hususunda Ar-Ge'nin önemine dikkat çektiği görülmektedir. Ar-Ge; hidrojenin yaygınlaşmasında ölçek ekonomilerinin³² maliyet avantajlarından yararlanmak suretiyle yakıt pilleri, hidrojen bazlı yakıtlar ve elektrolizörler (sudan hidrojen üretim teknolojisi) dahil olmak üzere maliyetleri düşürmek ve performansını artırmak için çok önemlidir. Kamu fonlarının kullanımı dahil olmak üzere hükümet eylemleri, araştırma gündeminin belirlenmesinde, risklerin alınmasında ve yenilik için özel sermayenin çekilmesinde kritik öneme sahiptir (IEA, 2019: 16). Hidrojene olan küresel talep arttıkça, ölçek ekonomisi maliyetleri düşecektir. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 10 yıl içinde diğer alternatif yakıtlara benzer bir istasyon başına maliyet öngörmektedir. Buna ek olarak, tasarım, mühendislik ve inşaat hakkında öğrenilen dersler, ekipman dışı maliyetleri azaltmaya yardımcı olacaktır (CAFCP, 2020).

Bu alanda hükümetlerin hidrojen konusunda yaratacağı fırsatlar hidrojen üretim ve kullanım teknolojilerinin yaygınlaşmasını sağlayacaktır. Dolayısıyla politika yapıcılar ve yatırımlar arasında güçlü bir bağlantı vardır. Ulusal enerji politikalarında hidrojen uygulamalarına yer vermek dahası hidrojenin ulaşımında kullanılması hususunda politika üretmek ulusal hükümetlerin kararlarına bağlıdır. Küresel enerji politikaları içinde yakın gelecekte hidrojenin önemli bir aktör olacağı öngörülebilmektedir. Ülkelerin hidrojen destekleri şu şekildedir (Tablo 1).

Tablo 1. Ülkeler ve Avrupa Birliği Bazında Hidrojen Uygulamaları Destekleri

Avustralya	100 milyon Avustralya Doları üzerinde bir desteği hidrojen araştırmaları ve pilot projeleri desteklemek için kullanma kararı alındı. Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Kurumu, hidrojen uygulamaları konusunda çalışmalar yürütecek.
ABD	Karbon yakalama ve depolama konusunda çalışmalar ve mevzuat düzenlemeleri devam ediyor. Kaliforniya, "Düşük Karbonlu Yakıt Standardı"nı 2030 yılına kadar karbon yoğunluğunda daha etkin bir azaltma gerçekleştirecek şekilde değiştirdi ve yakıt istasyonlarının geliştirilmesini teşvik etti. Kaliforniya Yakıt Hücreleri Ortaklığı, Çin'in hedefleriyle eşleşen, 2030 yılına kadar 1000 hidrojen yakıt ikmal istasyonu ve 1 milyon yakıt hücreli araç için hedefler belirledi.
Almanya	"Hidrojen ve Yakıt Hücreleri Teknolojileri" için Ulusal Yenilik Programı çerçevesinde halka açık hidrojen yakıt istasyonları, yakıt hücreli araçlar ve mikro kojenerasyon ³³ satın alımları için sübvansiyonlar dahil olmak üzere finansman sağlanıyor. Hidrojenle çalışan ticari trenlerin kullanımına başlandı.
Avrupa Birliği	Karbonsuz gelecek teması bağlamında 2030 hedefleriyle ilgili yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojeni mümkün kılarak yenilenebilir kaynaklardan enerji kullanımının teşvik edilmesini sağlamak. AB, üye ülkeleri arasında hidrojenin tartışılması için platform olarak bir "Hidrojen Enerji Ağı" kurdu. AB üyesi ülkeler, yaklaşık 100 işletme, çeşitli kurum ve kuruluşların yanı sıra sürdürülebilir hidrojen teknolojisi konusunda iş birliğini teşvik eden Linz Deklarasyonu "Hidrojen Girişimi" imzaladı.

³² Üretim miktarını artırmak suretiyle birim maliyetleri aşağı çekmek.

³³ Elektrik enerjisine dayalı olup kurulu gücü 50 KW ve altı olan, ısı, soğutma enerjisi ve elektrik enerjisinin aynı cihazla tek seferde üretilmesine olanak sağlayan teknolojidir (KOJENTÜRK, 2015). Yakıt pilleri mikro kojenerasyona örnektir.

Avusturya	2030 Avusturya İklim ve Enerji Stratejisi hedefleri doğrultusunda yenilenebilir elektriğe dayalı bir hidrojen stratejisi geliştirmek için adımlar atılmaktadır.
Belçika	Bir hidrojen yol haritası yayınlandı ve belirli hedefler belirlendi. 2030 ve 2050 hedefleri çerçevesinde elektrikten hidrojen gazı elde etmek için 50 milyon avroluk bir bölgesel yatırım planı sunuldu.
Birleşik Krallık	İngiltere doğal gaz şebekesinin bir bölümünde %20'ye kadar hidrojeni harmanlamayı planlıyor. Hidrojen depolama teknolojileri üzerine araştırmalar yapılıyor. Endüstriyel Strateji Rekabet Fonu'ndan 170 milyon poundluk kamu yatırımı ile desteklenen karbondan arındırma projesi yürütülüyor.
Brezilya	Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Biyoyakıtlar için Bilim, Teknoloji ve Yenilik Planı'na hidrojeni dahil etti. 2018'de 22. Dünya Hidrojen Enerjisi Konferansı'na ev sahipliği yaptı ve destek verdi.
Çin	Yakıt hücrelerinin geliştirilmesi ve hidrojen dolun istasyonlarının sayıca artırılması kararını aldı. Bu kapsamda Çin'in hedefi 2030'a kadar 1 milyon yakıt hücreli araç (FCEV) ve 1000 yakıt istasyonuna ulaşmak. Ayrıca gemiler de dahil olmak üzere yakıt hücreli araçlara vergi muafiyeti getirildi.
Fransa	Bir "Hidrojen Dağıtım Planı" ve 100 milyon avroluk finansman ile endüstride, ulaşımda ve yenilenebilir enerji depolamada düşük karbonlu hidrojen için 2023 ve 2028 hedefleri açıklandı.
Güney Afrika	"Yeşil Ulaşım Stratejisinin" bir parçası olarak yakıt hücreli araçlar ve toplu taşımada özellikle otobüslerin kullanımı hususunda çalışmalar yürütülüyor.
Güney Kore	Otobüsler, FCEV'ler ve yakıt ikmal istasyonları için 2022 ve 2040 hedeflerini içeren bir hidrojen ekonomisi yol haritası yayınlandı ve tüm ticari araçları 2025 yılına kadar hidrojene geçirme vizyonu belirlendi. Yakıt ikmal istasyonları için mali destek sağlandı ve mevzuat sorunları giderildi. Tüm uygulama alanlarında hidrojen teknolojileriyle ilgili çalışmalar sürüyor.
Hindistan	Hidrojen uygulamaları ve yakıt hücreleri üzerine araştırma fonu sağlandı. Yakıt hücreli otobüslerin kullanımı konusunda çalışmalar yapılıyor.
Hollanda	Bir hidrojen yol haritası yayınlandı ve Hollanda İklim Anlaşması'na hidrojenle ilgili bölüm dahil edildi. Kuzeybatı Avrupa'da hidrojen konusunda iş birliğini desteklemek amacıyla Hollanda, Belçika, Lüksemburg, Fransa, Almanya ve Avusturya "Pentalateral Enerji Forumu"nun ilk toplantılarına öncülük etti.
İtalya	Hidrojen yakıt istasyonlarının artırılması hususunda yatırım ve basınç miktarları ile ilgili mevzuat düzenlemeleri yapılıyor.
Japonya	Hidrojen ve yakıt hücresi maliyetlerinin düşürülmesiyle ilgili hedefler ve enerji santrallerinde hidrojen kullanımına yönelik çalışmalar yürütülüyor.2021'e kadar 80 hidrojen yakıt

Tablo 1 (Devamı)

istasyonunun daha inşa edilmesi planlanıyor. Hidrojenin yenilenebilir enerjiler yoluyla elde edilmesine yönelik programlar devam ediyor.

Norveç

Hidrojenle çalışan bir feribot ve bir geminin geliştirilmesi için fon sağlanmaktadır. Yakıt hücreli otomobillerin ve diğer araçların yaygınlaştırılması planlanıyor.

Suudi Arabistan

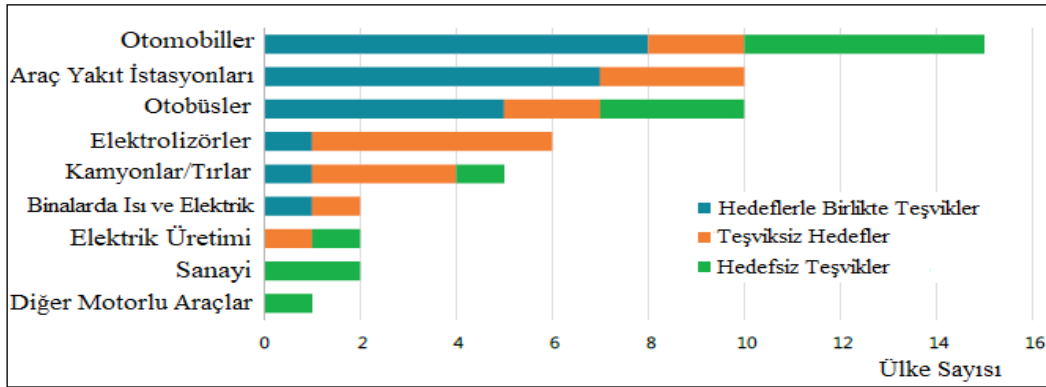
Saudi Aramco ve Air Products firmaları ortaklaşa şekilde Suudi Arabistan'ın ilk hidrojen yakıt istasyonunu inşa etti.

Yeni Zelanda

Japonya ile ortak hidrojen projeleri üzerinde çalışmak üzere bir iş birliği anlaşması imzalandı. Bir "Hidrojen Stratejisi" belirlendi. Firmalara hidrojen yatırımları yapmaları için Yeşil Yatırım Fonu oluşturuldu.

Kaynak: IEA, 2019: 21-22

Bu kapsamda, ülkeler nezdinde belirlenen hedeflerle birlikte verilen teşvikler, herhangi bir teşvik sunulmaksızın belirlenen hedefler ve herhangi bir hedef belirlenmeksizin verilen teşvikler kapsamında hidrojenle ilgili desteklemeler sunan ülke sayısı ile destek sağlanan uygulamalar için (Şekil 6).



Şekil 6. Ülke Sayıları Bazında Hidrojen Uygulamalarına Sağlanan Destekler

Kaynak: IEA, 2019: 20

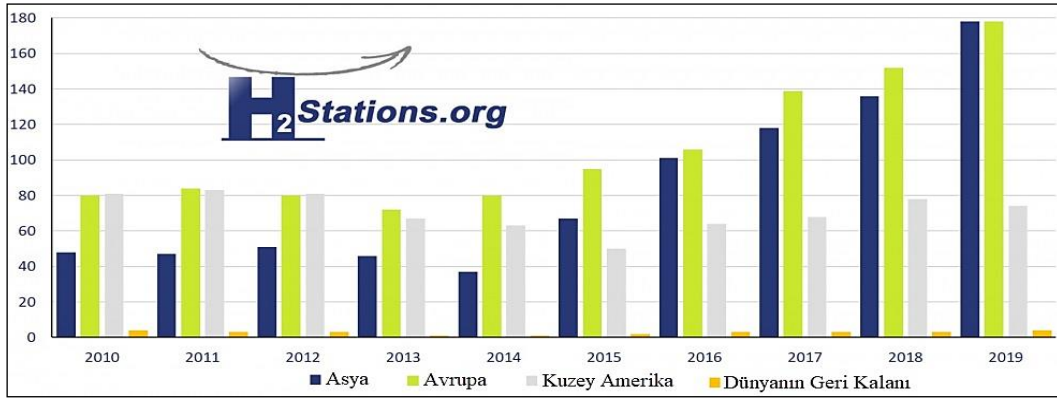
Hidrojenli otomobillerle birlikte araç yakıt istasyonlarının ülkeler tarafından en fazla destek gören uygulamalar olduğu görülmektedir. Buna göre hidrojenli araçların sayıca artması yakıt ikmali konusunda kullanıcılar açısından gittikçe daha az endişeye sebep olacağı görülmektedir. Hidrojenli araçlara yönelik olarak sıklıkla dile getirilen iki konu bulunmaktadır. Bunlardan biri söz konusu araçların menzil mesafesinin kısa olduğu diğeri ise bu araçların yakıt istasyonlarının yetersizliğine bağlı olarak dezavantaja sahip olduğu söylemidir. Bu iki yaklaşım da son yıllarda hidrojen teknolojileri ve yakıt pilleri konusundaki gelişmeler düşünüldüğünde isabetli değildir. Öyle ki gelinen teknolojik nokta itibarıyla hidrojenli araçların menzil mesafesi elektrikli araçların menzil mesafesine oranla daha fazladır. Ayrıca tüm dünyada hali hazırda olan ve planlanan hidrojen yakıt istasyonları bu araçların tercih edilirliliğini artıracaktır. Küresel ölçekte hidrojen yakıt istasyonları için (Şekil 7) ile bölgeler bazında hidrojen yakıt istasyonlarının gelişim trendi için (Şekil 8).



Şekil 7. Küresel Bazda Hidrojen Yakıt İkmal İstasyonlarının Dağılışı

Kaynak: H₂Stations, 2020

Haritada görüldüğü üzere en fazla hidrojen yakıt istasyonlarına sahip coğrafyalar; Avrupa (özellikle Almanya), Japonya, Güney Kore ve ABD'nin başını çektiği gelişmiş dünyadır. Ancak son yıllarda hidrojene dayalı ulaşım altyapısının gelişimi incelendiğinde Asya ve Avrupa'nın önde olduğu görülmektedir. H₂Stations verilerine göre, 2010'da tüm dünyada sayısı 213 olan hidrojen yakıt istasyonları özellikle 2015 sonrası büyük bir gelişme kaydetmiş ve 2019'da bu tesislerin sayısı 434'e yükselmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Küresel Ölçekte Bölgeler Bazında H₂ Yakıt İkmali Altyapısının Sayısal Olarak Gelişimi (2010-2019)

Kaynak: H₂Stations, 2020

2019 sonu itibariyle Avrupa'da, 87'si Almanya'da olmak üzere 177 hidrojen istasyonu mevcuttur. Fransa, işletmedeki 26 ve planlanan 34 hidrojen istasyonu ile Avrupa'da ikinci sırada yer almaktadır. Ayrıca bu sayının daha da artması beklenmektedir. 21 yeni hidrojen yakıt istasyonunun planlandığı Hollanda'da da önemli ölçüde artış öngörülmektedir. İsviçre ise halihazırda faaliyet gösteren 4 istasyona 6 istasyon daha eklemeyi planlamaktadır. Asya'da ise toplamda 178 istasyon bulunmakta bunların 114'ü Japonya'da, 33'ü Güney Kore'de yer almaktadır. Çin'de belirlenen 27 hidrojen istasyonu, neredeyse sadece otobüs veya kamyon filolarının yakıt ikmali için kullanılmaktadır. Kısa vadede en iddialı büyümenin ise otomobiller ve otobüsler için planlanan yaklaşık 40 hidrojen istasyonunun planlandığı Güney Kore'de gerçekleşmesi beklenmektedir. Malezya ve Suudi

Arabistan'da yeni açılan hidrojen istasyonları ile Asya'da hidrojen yakıt ikmal altyapısına sahip iki ülke daha eklenmiştir. Kuzey Amerika'da ise planlanan 74 hidrojen istasyonunun çoğunluğu, 48 işletim istasyonu ile Kaliforniya'da kurulmaya devam etmektedir (H₂Stations, 2020). ABD'deki mevcut hidrojen yakıt istasyonları, planlanan yatırımlar, ABD'nin yüzölçümü ve araçların menzil mesafeleri de göz önünde bulundurulduğunda hidrojene dayalı ulaşımın daha çok ABD'nin doğusunda ve batısında gelişeceği söylenebilir. Dolayısıyla ABD'nin hidrojene dayalı ulaşım sisteminin gelişmesi için orta kesimde yer alan eyaletlerde de yatırımlar yapılması gerekmektedir. Benzer durum Kanada'da da görülmektedir. Hali hazırda ve planlanan hidrojen yakıt istasyonlarının Vancouver ve Quebec'te kümelendiği görülmektedir.

SONUÇ

Küresel enerji politikaları bağlamında değerlendirildiğinde, hidrojen eğer fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerjilerden elde edilen elektrik yoluyla üretilirse çok daha güçlü bir aktör olarak enerji portföyünde kendine yer bulacaktır. Hidrojen yenilenebilir kaynaklardan elde edildiğinde daha anlamlı bir taşıyıcı / kaynak haline dönüşmektedir. Bunun yanında, hidrojen sülfür içermesi ve bu sayede daha az elektroliz maliyeti içermesi sebebiyle deniz suyundan³⁴ hidrojen eldesi, ticari anlamda rekabet edebilir düzeye ulaşırsa hidrojenin en büyük ve stratejik bir enerji kaynağı haline gelmesi çok daha kolay şekilde gerçekleşecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektroliz sistemlerini besleyecek elektrik üretimi yapılmasıyla yani yeşil hidrojen üretimiyle birlikte hidrojen enerjisi, küresel iklim değişimi ve sunduğu ulaşım olanakları kapsamında en avantajlı kaynak haline gelecektir.

Sanayi 4.0³⁵ sürecinin bir getirisi olarak gerek enerji teknolojilerindeki gelişim ve verimlilik artışları gerek küresel iklim değişimiyle mücadelenin bir sonucu olarak çevreye dost enerji üretimine getirilecek teşvikler ve çevre kirleticilerine verilecek yüksek cezalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştıracaktır (Peker & Arslanoğlu, 2018: 128). Ancak karbon salınımlarını azaltma hedefleri, gelişmekte olan ülkelerin elektrikli ve hidrojenli araçlara geçiş konusunda teknolojik yetersizlikleri nedeniyle sorunlarla karşılaşabilmektedir. Dolayısıyla tüm dünya için söz konusu durumların politika-finans-teknoloji boyutunda ayrıca ele alınması gerekmektedir.

Bununla birlikte hidrojen bir enerji taşıyıcısı olarak son yıllarda ulaşım sektöründe yakıt hücrelerinin daha etkin kullanımı konusunda yaşanan teknolojik gelişmelerle medyada ve ülkelerin hükümet programlarında güçlü bir etkiye sahip olmuştur. Ulaşım sektöründe faaliyet gösteren markaların özellikle son beş yıldır hidrojene olan ilgisinin artışıyla birlikte bu kaynağa yönelik olarak pek çok ülkede dikkat çekici gelişmeler yaşanmıştır. Bu

³⁴ Elektroliz cihazının üzerine yerleştirilen fotovoltaik hücreler güneş ışığını, su altında kalan elektrolizöre güç sağlamak için kullanılan elektriğe dönüştürüyor. Üretilen H₂ kabarcığı, yukarı doğru yüzüldükçe cihazın iç kısmında toplanıyor, O₂ kabarcıkları ise atmosfere karışıyor (Demir, 2018).

³⁵ Yapay zekâ, otonom makineler, nesnelere interneti, gen dizileme, nanoteknolojiler, yeni teknoloji yenilenebilir enerjiler, kuantum bilgi işleme alanları gibi tüm yenilikler Sanayi 4.0'ın bileşenleridir. Bu devrimi önceki endüstriyel devrimlerden farklı kılan şey, bu teknolojilerin, iç içe geçip kaynaşması ve fiziksel, dijital, biyolojik alanlarda karşılıklı etkileşimidir (Oral, 2020:97).

durum hidrojen yatırımlarına yansımış ve bu konuda yatırımların en önemli parametrelerinden olan yakıt istasyonu altyapısı istikrarlı bir şekilde artış göstermiştir. Hidrojenli araçların sahip olduğu avantajlar ve bu kapsamda Avrupa, Güney Amerika, Japonya, ABD, Çin gibi bölgelerde bu kaynağa yönelik yatırımların artması ve hidrojenin yenilenebilir yollarla daha fazla elde edilebilirliğine yönelik teknik gelişmeler ve politikalar bu kaynağın önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Bu anlamda artık hidrojen yatırımlarında geri adım atılması rasyonel bir seçenek değildir.

Hidrojenli araçlarla ilgili olarak istasyonların yaygınlığı, hidrojenli araçların fiyatlarının yüksek olması gibi dezavantajları olmasına rağmen söz konusu araçlar bataryalı araçlara oranla daha avantajlı görünmektedirler. Bu bağlamda hidrojenli otomobillerin yakıt tankı 5 kg hidrojen almakta ve içten yanmalı motorlarda olduğu gibi kısa bir süre içinde (3 dk civarında) şarj edilebilmektedir. 5 kg'lık sıvı hidrojenin litre cinsinden ağırlığı ise 70 litre civarındadır. Bununla birlikte araçlardaki kullanımı gaz olarak da mümkün olup bu gaz, araçta bulunan tanklara yakıt pompaları yoluyla doldurulup kullanılabilir. 5 kg gaz hidrojenin metreküp cinsinden karşılığı 55 m³ civarındadır. Sıvı ve gaz halindeki hidrojen hidrokarbon yakıtlara göre 10 kat daha hafiftir. Araçlarda daha çok sıvı olarak depolanmasının nedeni gaz tanklara göre daha güvenli olması ve daha az ağırlığa sahip olmasıdır. Bunun yanında elektrikli araçların bataryaları sürekli şarj-deşarj durumuna maruz kaldığı için bataryaların ömrü yaklaşık 8-10 yıl içinde tükenmektedir. Oysa hidrojenli araçlarda belirli bir süre sonra kullanılmayacak ve dolayısıyla değiştirilmesi gereken maliyeti yüksek bir aksam yoktur. Ayrıca hidrojenli araçlarda aracın alt kısmını tamamen kaplayan bir batarya sistemi de yoktur. Bunun yanında hidrojenli araçlar elektrikli araçlara göre menzil olarak daha fazla güce sahiptir.

Hyundai (dünyada hidrojen temelli yakıt hücreli seri araç üretimi yapan ilk marka), Toyota, Mercedes-Benz, BMW, Honda, Shell, Siemens, Iveco, Nikola gibi şirketler hidrojen uygulamaları konusunda önemli çalışmalar yürütmektedir. Hidrojen destekleri ve uygulamaları esas alındığında Almanya, Japonya ve Güney Kore'nin küresel hidrojen politikalarında en belirleyici ülkeler olacağı görülmektedir. Özellikle Almanya, hidrojen üretimi ve uygulamaları konusunda lider ülke haline gelmek istemektedir. Öyle ki Almanya, 2020 Haziran'da "Ulusal Hidrojen Stratejisini" kabul etmiştir. Bu anlamda Almanya hidrojeni geleceğin sürdürülebilir enerjisi olarak hayata geçirmek için 9 milyar avroluk bir finansman paketiyle yatırım yapmayı planlamaktadır. Avrupa Birliği'nin (AB) siyasi ve ekonomik lokomotif konumundaki Almanya'da enerji politikalarındaki dönüşümler birlik içindeki diğer ülkeler açısından da iklim hedeflerine ulaşmada önemli atılımlar sağlama potansiyeli bulunmaktadır. Mevcut durumda AB tarafından da 2020 Temmuz'da uzun zamandır talep edilen enerji dönüşümünü hızlandırmak için "Avrupa Hidrojen Stratejisi" kabul edilmiştir (DW Türkçe, 2020).

Hidrojen kullanımının yaygınlaşması noktasında, gaz olarak boru hatları ve sıvı olarak kriyojenik kamyonlar ile uygun terminal koşullarının varlığı neticesinde gemiler ve demiryolları aracılığıyla taşınabilen hidrojenin tüketim coğrafyalarına sevkiyatı hidrojen ekonomisinin ortaya çıkmasına ve hidrojen kullanımının yaygınlaşmasına hizmet edecektir. Diğer taraftan küresel ve ulusal enerji politikalarında hidrojenin yaygınlaşmasını engelleyen mevzuatlar düzenlenmeli ve yeşil hidrojen üretimi konusunda teşvikler veya daha üst seviyede olarak hibeler

sunulmalıdır. Çünkü hali hazırda hidrojen üretiminin neredeyse tümü başta doğal gaz olmak üzere fosil yakıtlardan gerçekleştirilmektedir. Bu tür düzenlemeler ve boru hatlarıyla sevkiyatı sayesinde hidrojen, küresel enerji politikaları içinde ticari bir boyut kazanacaktır. Bunun yanında hidrojenin doğal gaz boru hatlarına basılması yoluyla kompozit yakıt elde edilmesiyle enerjide dışa bağımlı ülkelere önemli bir katkı sunacağı söylenebilir. Ayrıca doğal gazdan yakıt hücresi yoluyla hidrojen üreterek konutlarda ısı ve elektrik ihtiyacının karşılanması mümkün hale getirilebilmektedir. Bu durum dağıtık enerji sistemine³⁶ de stratejik bir katkı sunmaktadır. Bu bağlamda her boyutuyla hidrojen enerjisinin 21. yüzyıl enerji sisteminin ana aktörlerinden biri olacağı görülmektedir.

ETİK METNİ

Makalede; derginin yazım kılavuzu, yayın ilkeleri ve etik kuralları ile birlikte, genel araştırma ve yayın etiği kurallarına uyulmuştur. Makalede ilgili etik standartların ihlali halinde, her türlü sorumluluk yazara aittir.

KAYNAKÇA

- Alazemi, J. & Andrews, J. (2015). Automotive hydrogen fuelling stations: an international review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 483-499. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.085>
- Aslan, Ö. & Özcan, B. (2008). Sürdürülebilir kalkınma ve hidrojen enerjisi. *New World Sciences Academy*, 3(2), 152-160.
- Aydın, F. & Oral, M. (2018). Türkiye’de karayolu ulaşımının tarihsel gelişimi. *Journal of Awareness*, 3 (Özel Sayı), 257-266. <https://doi.org/10.26809/joa.2018548635>
- Bayraç, H.N. (2010). Enerji kullanımının küresel ısınmaya etkisi ve önleyici politikalar. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 229-259.
- California Fuel Cell Partnership (CAFCP) (2020). *Cost and financing*. H₂Stations. <https://H2stationmaps.com/cost-and-financing>
- Congar, K. (2020, Şubat 14). *Hidrojenli mi elektrikli mi? Çevre dostu araçlardan hangisi daha avantajlı?*. Euronews. <https://tr.euronews.com/2020/02/14/hidrojenli-mi-elektrikli-mi-cevre-dostu-araclardan-hangisi-daha-avantajli-hybrid-dizel>
- Demir Çelik Store (2020). *Direkt indirgeme prosesleri*. <http://www.demircelikstore.com/-1-3206-direkt--indirgeme--proseslerii.html>
- Demir, R. (2012). *Deniz suyundan hidrojen yakıtı üreten cihaz geliştirildi*. Elektrikport. <https://www.elektrikport.com/haber-roportaj/deniz-suyundan-hidrojen-yakiti-ureten-cihaz-gelistirildi/21409#ad-image-0>
- DW Türkçe (2020, Ekim 9). *Hidrojen teknolojisi | Almanya’nın dünyada bir numara olmak istediği teknoloji*. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=SrGeLfdWGE>

³⁶ Elektriğin tüketildiği noktada üretimini esas alan ve enterkonnekte sisteme karşılık gelen merkezi enerji paradigmasından farklı bir uygulamadır. Yerinde güç üretmek için kullanılan bir enerji üretim yolu olan dağıtık üretim, iletim ve dağıtım ile ilişkili maliyet, karmaşıklık, bağımlılık ve verimsizlikleri ortadan kaldırır. İletim ve dağıtım hatlarındaki elektrik kayıplarını azaltabilir (KOJENTÜRK, 2010).

- Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) (2020). *Hydrogen delivery*. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery#:~:text=>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) (2020). *Hidrojen enerjisi*. <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Hidrojen-Enerjisi>
- Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı (EVCED) (2019). *Yakıt pilleri*. http://www.yegm.gov.tr/teknoloji/h_yakit_pilleri.aspx
- H2Stations (2020). *Development of H2 refuelling infrastructure split by region*. <https://www.H2stations.org/statistics/>
- H2Stations (2020). *Presse release*. <https://www.H2stations.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-02-19-LBST-HRS-2019-en.pdf>
- H2Stations (2020). *Presse release*. <https://www.H2stations.org/wp-content/uploads/2020/10/world-2020-k.jpg>
- Hydrogen Council (2017). *Hydrogen scaling up*. Hydrogen Council Publication.
- Hydrogen Analysis Research Center (HyARC) (2016). *Hydrogen tools*. <https://H2tools.org/hyarc/hydrogen-delivery>
- HyLaw (2019). *National policy paper – Belgium*. European Union Publication.
- International Energy Agency (IEA) (2019). *The future of hydrogen*. IEA Publication.
- International Energy Agency (IEA) (2019). *World energy balances (Overview)*. IEA Publication.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2018). *Hydrogen from renewable power: technology outlook for the energy transition*. IRENA Publication.
- İnovatif Kimya Dergisi (2017). *Antoine Laurent de Lavoisier*. <https://inovatifkimyadergisi.com/antoine-laurent-de-lavoisier>
- İstanbul Ticaret Odası (İTO) (2009). *Sürdürülebilir kalkınma, yenilenebilir enerji kaynakları ve hidrojen enerjisi: Türkiye değerlendirmesi*. İTO Yayını.
- Leblebicioğlu, E. (2018, Eylül 25). *Yakıt pili nedir? Nasıl çalışır?*. Mühendistan. <https://muhendistan.com/yakit-pili-nedir/#:~:text=>
- Let's Talk Science (2019, Ağustos 31). *Hidrojenin tarihçesi ve kullanım alanları*. <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/history-and-uses-hydrogen>
- Montgomery, S.L. (2014). *Küresel enerjiye yön veren güçler*, (E.G. Şenol, Çev.). Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Yayını.
- Okumuş, E. (2017, Şubat 26). *Yakıt pili ve kontrol sistemi*. TÜBİTAK. <https://challenge.tubitak.gov.tr/assets/yakit-pili-ve-kontrol-sistemi.pdf>
- Oral, M. (2020). *Gücün coğrafi bağlamı*. Pegem Akademi Yayıncılık.
- Özcan M. (2020, Haziran 11). *Hidrojen hakkında neler biliyoruz? fosil yakıtlara alternatif olabilir mi?*. Temiz Enerji. <https://temizenerji.org/2020/06/11/hidrojen-hakkinda-neler-biliyoruz-fosil-yakitlara-alternatif-olabilir-mi/>
- Özdemir, Z.Ö. & Mutlubaş, H. (2019). Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ve hidrojen üretim yöntemleri. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 2(1). 16-34.

- Peker, H.S. ve Arslanoğlu, H. (2018). Sanayi 4.0'ın enerji güvenliğine olası etkileri. *Güvenlik Çalışmaları Dergisi*, 20(2), 121-133.
- Polat, T., Yalçın, A.H., Şahin, H.M. (2012). Hidrojenin nükleer enerji ile üretim yollarının incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 15(2). 49-69.
- Royal Society of Chemistry (2020). *Hydrogen*. <https://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen>
- Sarıgül, T. (2016, Haziran 8). *Elektrikli araçlarla yakıt hücresi kullanılan araçlar arasındaki fark nedir?*. TÜBİTAK. <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/elektrikli-araclarla-yakit-hucresi-kullanilan-araclar-arasindaki-fark-nedir>
- Shell (2017). *Shell hydrogen study energy of the future? Sustainable mobility through fuel cells and H2*. Shell Publication.
- Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB) Makine Mühendisleri Odası (MMO) (2018). *Ulaşım ve trafik politikalarında planlama gerekliliği*. TMMOB MMO Yayını.
- Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (2020). *Yakıt pili teknolojileri*. <https://ee.mam.tubitak.gov.tr/tr/arastirma-alanlari/yakit-pili-teknolojileri>
- Türkiye Kojenerasyon Derneği (KOJENTÜRK) (2010). *Dağıtık üretim nedir?*. <http://kojenturk.org/tr/dagitik-uretim-nedir-25>
- Türkiye Kojenerasyon Derneği (KOJENTÜRK) (2015, Ekim 12). *Mikro kojenerasyon nedir*. <http://kojenturk.org/uploads/dokumanlar/Milliyet%20Gazetesi%20Kojen&Trijen%20Eki.pdf>
- U.S. Department of Energy Alternative Fuels Data Center (AFDC) Energy (2020). *How do fuel cell electric vehicles work using hydrogen?*. <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>
- U.S. Department of Energy Alternative Fuels Data Center (AFDC) Energy (2020). *Hydrogen production and distribution*. https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html
- We Engineer Hightech (WEH) (2020, Aralık 12). *H₂ dispenser components for fuel cell electric vehicles (FCEV)*. <https://www.weh.com/refuelling-components-hydrogen/h2-car-dispensers.html>
- White, D. (2018, Eylül 27). *This week in hydrogen*. Ammonia Energy Association. <https://www.ammoniaenergy.org/articles/this-week-in-hydrogen/>
- World Energy Council (WEC) (2019). *Hidrojen enerjisinin geleceği*. WEC Publication.
- World Resources Institute (WRI) (2020). *World greenhouse gas emissions: 2016*. <https://www.wri.org/resources/data-visualizations/world-greenhouse-gas-emissions-2016>
- Yergin, D. (2014) *Enerjinin geleceği (iklim değişikliği, yeni enerjiler, geleceğin dünyası)*. (Ü. Şensoy, Çev.). Optimist Yayınları.
- Yıldırım, Y. (2011). *Yakıt pilleri ders notları*. DOCPLAYER. <https://docplayer.biz.tr/2697566-T-c-zonguldak-karaelmas-universitesi-muhendislik-fakultesi-cevre-muhendisligi-bolumu-cev-346-yakit-pilleri-ders-notlari-prof-dr.html>
- Yılmaz, A., Özlük, M. & Ünvar, S. (2018). *Otomobillerde kullanılan yakıt pillerinin özellikleri*. Batman Üniversitesi. <https://www.batman.edu.tr/Files/Scientific/ec7d2468-56e7-4217-a31c-4bde8da65577.pdf>