**The University of Tehran Press**

**Journal of Sustainable Energy Systems** Online ISSN: 2980-8693
Home Page: https://ses.ut.ac.ir

# Modeling and Simulation of Green Hydrogen Production via Seawater Desalination for Decarbonizing the Steel Sector

**Majid Zarezdeh[1*] | Hoda Mansouri[2]**

1. Corresponding Author, Expert in Energy Audit, Department of Energy and Environment, Iranian National Standard Organization, Bandar Abbas, Iran. Email: majid_zarezadeh_nu@yahoo.com
2. Expert in Energy Audit, Department of Energy and Environment, Iranian National Standard Organization, Bandar Abbas, Iran. Email: h.mansouri1010@gmail.com

**ARTICLE INFO**

**Article type:**
Research Paper

**Article History:**
**Received:** 22 June 2025
**Revised:** 27 July 2025
**Accepted:** 26 November 2025
**Published Online:** 28 May 2026

**Keywords:**
Electrolysis,
Floating Solar Panels,
Green Hydrogen,
Green Steel,
Seawater Pretreatment.

**ABSTRACT**

Steel production, as a foundational industry and one of the earliest segments in the value chain of goods and services, remains essential to economic development. Given the historically high environmental impact associated with steel manufacturing, the use of green hydrogen as both an energy source and a means for decarbonizing the final product has seen a significant rise globally. Hormozgan Province, due to its proximity to the Persian Gulf and access to seawater, offers considerable potential for the production of green hydrogen. The use of floating solar panels combined with electrolysis technology provides a promising pathway for sustainable hydrogen generation. In this study, after identifying suitable locations for the installation of seawater pretreatment systems, the desalination process was modeled using the WAVE software. The required energy for the electrolysis process and initial hydrogen production was then calculated. Subsequently, the configuration of the floating solar panel arrays was simulated using PVSOL software. Based on the simulation results, under a daily operational schedule of 8 hours, and with the proposed floating solar segments supplying the required energy, it is possible to produce over 18.5 tons of hydrogen annually. By expanding the buffer storage tanks and increasing the number of floating solar sectors, the system's production capacity can be scaled up to meet higher consumption demands.

**Cite this article:** Zarezdeh, M. & Mansouri, H. (2026). Modeling and Simulation of Green Hydrogen Production via Seawater Desalination for Decarbonizing the Steel Sector. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (2), 235-250. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.398963.1170

© Majid Zarezdeh, Hoda Mansouri **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.398963.1170

## Introduction

Currently, the steel industry is among the top three global emitters of carbon dioxide ($CO_2$), with a significant portion of greenhouse gas emissions originating from a relatively small number of concentrated sites. As a result, steel plants are prime candidates for deep decarbonization. While the industry must adapt to these emerging conditions, this transition can also be viewed as an opportunity to maintain its long-term license to operate. According to the World Steel Association's 2018 report, the production of one ton of steel results in an average emission of 1.85 tons of $CO_2$, accounting for approximately 8% of global $CO_2$ emissions. Steelmaking is inherently a carbon-intensive and globally scaled industry. In its 2021 statement, the World Steel Association reported that 1,860 million tons of steel were produced in 2020, resulting in the emission of approximately 2.6 billion tons of $CO_2$, which represents between 7% and 9% of anthropogenic global $CO_2$ emissions. One of the most debated challenges in green hydrogen production is the scarcity of freshwater and the high cost of renewable energy sources. However, in Iran—specifically in the city of Bandar Abbas—these challenges are mitigated due to its proximity to the sea, abundant solar radiation, and the existing infrastructure for seawater desalination. These factors make the process economically viable, sustainable, and mutually beneficial. Numerous studies conducted in Hormozgan

Province confirm the high efficiency and productivity potential of solar panel installations and solar power plants in the region, indicating its strong capacity for renewable energy generation.

## Material and Method

A critical step in conducting this research involves examining the raw input material required to establish the infrastructure for seawater distillation, which serves as the primary feedstock. Due to the high regional temperatures and limited freshwater inflow, the Persian Gulf exhibits elevated salinity levels and a higher concentration of suspended solids compared to the open ocean. Therefore, for applications such as hydrogen production and seawater distillation, it is essential to reduce both salinity and particulate matter. The primary objective of the seawater pretreatment process is to reduce the salinity to levels comparable to brackish water. This not only reduces energy consumption in subsequent processing stages but also minimizes the salinity and pollutant load in the brine discharged back into the sea, thereby mitigating the environmental impact of the overall process. To achieve this, a reverse osmosis (RO) system incorporating semipermeable membranes, high-pressure pumps, and piping infrastructure was modeled using specialized software. After simulation and data processing, performance outputs were obtained. Following the estimation of energy requirements for both electrolysis and desalination, the next step was to determine an appropriate renewable energy source. Given the project's focus on green hydrogen production and considering Bandar Abbas's high solar energy potential, the energy demand is proposed to be met using solar photovoltaic (PV) systems. Among recent innovations, floating solar panel systems have gained prominence as a viable solution for maximizing solar energy utilization, especially in coastal and water-rich regions.

## Results and Discussion

The amount of energy generated by the system varies throughout the year due to changes in solar angle, sun elevation, and ambient temperature, all of which significantly affect the performance of photovoltaic panels. Nevertheless, the system is capable of supplying over 95% of the required energy for green hydrogen production, with only approximately 5% needing to be supplemented by the national power grid. Based on simulation results, using floating solar panel segments and operating the system for 8 hours per day, it is possible to produce more than 18.5 tons of hydrogen annually. By expanding the number of floating panel sectors and buffer storage tanks, hydrogen production can be scaled up to meet specific consumption requirements. However, the most critical outcome of this process is the significant reduction in $CO_2$ emissions. According to calculations, if the same amount of hydrogen were to be produced using fossil fuels or non-renewable energy sources, it would result in the emission of approximately 460,000 kilograms (460 metric tons) of $CO_2$ annually. Therefore, this system offers a substantial contribution to greenhouse gas mitigation and supports compliance with the goals of the Paris Agreement on Climate Change.

## Conclusions

Undoubtedly, the advancement and development of the country's major industrial infrastructure largely depend on the steelmaking industry. As a sector situated at the upstream of the value chain for products and services, the absence or underdevelopment of this industry would pose significant challenges to national economic growth. On the other hand, widespread concerns have been raised regarding the high energy intensity and environmental emissions associated with steel production, which have considerable ecological consequences. Leveraging the proximity of the Persian Gulf to Bandar Abbas and the steel plants in Hormozgan Province presents a valuable opportunity for the production of green hydrogen, contributing directly to the realization of green steel. Since the brine discharge from the pretreatment system is only slightly less saline than the intake seawater, its return to coastal waters poses minimal environmental risk. The implementation and expansion of this process not only support the transition toward green industry in Hormozgan but also promote employment opportunities for highly educated professionals and individuals with research experience. Emerging technologies are rapidly advancing toward the integration of hydrogen-based systems into industrial applications. In addition to seawater, the use of industrial wastewater and biomass residues within existing steel plant facilities can help establish a fully circular and low-emission system, enabling progress toward sustainable, environmentally responsible development in the region.

انتشارات دانشگاه تهران

**فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار**

**سایت نشریه:** https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

# محاسبهٔ عددی شیرین‌سازی آب دریا و شبیه‌سازی تولید هیدروژن سبز برای به‌کارگیری در صنایع فولاد

**مجید زارع‌زاده[1*] | هدا منصوری[2]**

۱. نویسندهٔ مسئول، دکتری هیدرولوژی دریا، ادارهٔ کل استاندارد هرمزگان، سازمان ملی استاندارد، بندرعباس، ایران. رایانامه: majid_zarezadeh_nu@yahoo.com

۲. کارشناسی ارشد متالورژی، ادارهٔ کل استاندارد هرمزگان، سازمان ملی استاندارد، بندرعباس، ایران. رایانامه: h.mansouri1010@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ‌های مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۴/۰۱
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۵/۳۰
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۹/۰۵
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

**کلیدواژه:**
الکترولیز،
پنل خورشیدی شناور،
پیش‌تصفیهٔ آب دریا،
فولاد سبز،
هیدروژن سبز.

**چکیده**

تولید فولاد به عنوان صنعت مادر و یکی از بخش‌های نخست زنجیرهٔ ارزش، کالا و خدمات، امری ضروری است. از آنجا که تولید این محصول همواره با آلایندگی زیست‌محیطی همراه بوده، در جهان امروز به‌کارگیری هیدروژن سبز برای تأمین سوخت و همچنین، کربن‌زدایی محصول نهایی به شکل چشمگیری افزایش یافته است. پتانسیل استان هرمزگان در نزدیکی به ساحل خلیج فارس و استفاده از آب آن برای تولید هیدروژن و نیز به‌کارگیری پنل خورشیدی شناور به منظور تولید هیدروژن با استفاده از روش الکترولیز، موقعیت مناسبی برای این فرایند است. در این پژوهش پس از مکان‌یابی موقعیت مناسب برای نصب تجهیزات پیش‌تصفیهٔ آب دریا، با استفاده از نرم‌افزار WAVE فرایند کاهش شوری آب دریا مدل‌سازی شده است. پس از محاسبهٔ انرژی مورد نیاز برای الکترولیز و تولید اولیهٔ هیدروژن، با استفاده از نرم‌افزار PVSOL، نحوهٔ چیدمان پنل خورشیدی شبیه‌سازی شده است. بر اساس نتایج خروجی با قطاع‌های شناور پنل خورشیدی و تأمین انرژی مورد نیاز و ۸ ساعت کار روزانه برای این سیستم، می‌توان در سال بیش از ۱۸٫۵ تن هیدروژن تولید کرد. با افزایش مخازن آرامش و این قطاع‌ها پنل خورشیدی شناور، این میزان به مقدار دلخواه و مصرف مورد نیاز افزایش خواهد یافت.

**استناد:** زارع‌زاده، مجید و منصوری، هدا (۱۴۰۵). محاسبهٔ عددی شیرین‌سازی آب دریا و شبیه‌سازی تولید هیدروژن سبز برای به‌کارگیری در صنایع فولاد. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۲) ۲۳۵-۲۵۰.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.398963.1170

© مجید زارع‌زاده، هدا منصوری

**ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.398963.1170

## ۱. مقدمه

با تغییر و بهبود چشم‌اندازها و استانداردهای زندگی طی سه دههٔ اخیر، خط‌مشی استفاده از انرژی و به‌کارگیری آن تغییر اساسی یافته است. سیستم انرژی جهانی برای دستیابی به اهداف توافقنامهٔ پاریس باید دستخوش دگرگونی عمیقی شود. در این بین، تولید انرژی کم‌کربن از انرژی‌های تجدیدپذیر ممکن است به حامل انرژی ترجیحی تبدیل شود. غلظت $CO_2$ در جو مدام در حال افزایش است و طول عمر آن بیش از ۱۰۰۰ سال است. این‌ها دلایل اصلی است که چرا دانشمندان و دولت‌ها تلاش خود را برای کاهش سطح $CO_2$ در جو متمرکز می‌کنند. یکی از راه حل‌های ممکن برای جلوگیری از افزایش غلظت $CO_2$ در جو و در نتیجه، کاهش اثر گرمایش جهانی، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی جایگزین است [۱]. هیدروژن می‌تواند حلقهٔ مفقودشده در انتقال انرژی باشد. برق تجدیدپذیر می‌تواند برای تولید هیدروژن استفاده شود، که به نوبهٔ خود این قابلیت را دارد که انرژی بخش‌هایی را تأمین کند. در غیر این‌صورت، کربن‌زدایی از طریق برق‌رسانی دشوار است. امروزه، صنعت هیدروژن به‌خوبی تثبیت شده است و دهه‌ها تجربه در بخش‌های صنعتی استفاده از هیدروژن به عنوان مادهٔ اولیه دارد. بیش از ۹۵ درصد از تولید هیدروژن فعلی مبتنی بر سوخت فسیلی است. ۴ درصد از عرضهٔ جهانی هیدروژن از طریق الکترولیز، عمدتاً با فرایندهای کلر قلیایی تولید می‌شود که می‌توان آن را از طیف گسترده‌ای از منابع انرژی تولید کرد. هیدروژن ($H_2$) فراوان‌ترین مادهٔ شیمیایی موجود در جهان است که منبع انرژی نیست، بلکه یک حامل انرژی است که می‌تواند تولید و ذخیره شود. انرژی ذخیره‌شده در مولکول هیدروژن را می‌توان مستقیم با احتراق آن و یا با استفاده از یک سلول سوختی که انرژی شیمیایی هیدروژن و اکسیژن را به الکتریسیته تبدیل می‌کند، دوباره استفاده کرد. یک کیلوگرم $H_2$ سه برابر بیشتر از یک کیلو بنزین انرژی آزاد می‌کند. در حالی که هیدروژن سبز را می‌توان به یک یا چند روش تولید کرد، در حال حاضر رایج‌ترین روش از طریق الکترولیز است. این فرایند از یک الکترولیزور استفاده می‌کند، دستگاهی که آب را با استفاده از برق به هیدروژن و اکسیژن تقسیم می‌کند. سه فناوری الکترولیز وجود دارد که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند: الکترولیزهای قلیایی (ALK)، غشاهای تبادل پروتون (PEM) و الکترولیزهای اکسید جامد (SOEC). از این سه، ALK و PEM به صورت تجاری در دسترس هستند، و SOEC در مرحلهٔ توسعه است. هیدروژن دارای یکی از انرژی‌های بالای ویژه (۱۴۲ مگاژول بر کیلوگرم) می‌تواند جایگزین بسیار خوبی برای سوخت‌های فسیلی باشد [۲]. فناوری‌های فعلی الکترولیز نمی‌توانند از آب دریا به طور مستقیم به عنوان خوراک استفاده کنند، بلکه به آب تصفیه‌شده با رسانایی کم نیاز دارند. ارزان‌ترین ذخایر خوراک برای تولید هیدروژن آب است. یک چالش عمده برای تولید هیدروژن مبتنی بر آب، سطح خلوص آب مورد نیاز برای الکترولیز است. بنابراین، تصفیهٔ آب دریا یا فرایند نمک‌زدایی باید قبل از تولید هیدروژن از طریق الکترولیز انجام شود [۲].

در حال حاضر، صنعت فولاد یکی از سه تولیدکنندهٔ بزرگ دی‌اکسید کربن است. بنابراین، کارخانه‌های فولاد کاندیدای خوبی برای کربن‌زدایی هستند. در حالی که صنعت باید خود را با این شرایط جدید تطبیق دهد، می‌تواند از آن به عنوان فرصتی برای حفظ مجوز خود به منظور ادامهٔ فعالیت در درازمدت استفاده کند. بر اساس بیانیهٔ انجمن جهانی فولاد در سال ۲۰۱۸، هر تن فولاد تولیدشده به طور متوسط ۱/۸۵ تن دی اکسیدکربن منتشر می‌کند که معادل حدود ۸ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن جهانی است. شکل‌دهی و آهنگری فولاد یک صنعت جهانی و کربن فشرده است. انجمن جهانی فولاد در سال ۲۰۲۱ نشان داد ۱۸۶۰ میلیون تن فولاد در سال ۲۰۲۰ تولید شده است که در مجموع مسئول انتشار ۲/۶ میلیارد تن دی‌اکسید کربن ($CO_2$) بوده و بین ۷ تا ۹ درصد از انتشار جهانی $CO_2$ انسانی را نشان می‌دهد [۳]. یکی از چالش‌های مهم و پربحث در تولید هیدروژن سبز، کمبود آب و هزینهٔ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر است، اما این چالش در کشور ایران و شهر بندرعباس به علت نزدیکی به آب دریا و همچنین، پتانسیل بسیار مناسب این شهر در تولید انرژی خورشیدی، وجود تجهیزات و زیرساخت شیرین‌سازی آب دریا است. این امر فرایند را به‌صرفه، اقتصادی و دارای منافع متقابل خواهد کرد. بر اساس تحقیقات زیادی که در شهر بندرعباس و استان هرمزگان صورت پذیرفته است، نصب پنل خورشیدی و ایجاد نیروگاه‌های خورشیدی در استان هرمزگان بهرهٔ مناسبی دارد و توان بالایی را تولید خواهد کرد [۴ ـ ۶]. یک چالش عمده برای تولید هیدروژن بر پایهٔ آب، سطح خلوص آب مورد نیاز برای الکترولیز است. بنابراین، تصفیهٔ آب دریا یا فرایند نمک‌زدایی باید قبل از تولید هیدروژن از طریق الکترولیز انجام شود. الکترولیزهای آب با استفاده از الکتریسیته، آب را به

اکسیژن (آند) و هیدروژن (کاتد) تقسیم می‌کنند و در صورت استفاده از برق سبز (منابع تجدیدپذیر) کمترین انتشار گازهای گلخانه‌ای را دارند. خلوص هیدروژن تولیدی بالاست و بنابراین، نیازی به پس‌فرآوری پس از تولید نیست. به طور کلی، دو راه برای استفاده از هیدروژن (سبز) در تولید فولاد وجود دارد: نخست، می‌توان از آن به عنوان یک مادهٔ تزریق جایگزین برای PCI به منظور بهبود عملکرد کورهٔ بلند معمولی استفاده کرد. اگرچه استفاده ازPCI رایج است، اولین نیروگاه‌های آزمایشی با استفاده از تزریق هیدروژن اخیراً برای ارزیابی پتانسیل کربن‌زدایی راه‌اندازی شده‌اند. با این‌حال، در حالی که تزریق هیدروژن (سبز) به کوره‌های بلند می‌تواند انتشار کربن را تا ۲۰ درصد کاهش دهد، این امر تولید فولاد کربن خنثی را ارائه نمی‌دهد، زیرا زغال سنگ کک معمولی هنوز یک عامل احیاکنندهٔ ضروری در کوره بلند است. دوم، هیدروژن می‌تواند به عنوان یک احیاکنندهٔ جایگزین برای تولید DRI استفاده شود که می‌تواند با استفاده از EAF بیشتر به فولاد تبدیل شود. این مسیر DRI/EAF یک فرایند تولید ثابت‌شده است که در حال حاضر با استفاده از گاز طبیعی به عنوان یک کاهنده، توسط کشورهای خاورمیانه با دسترسی به منبع گاز طبیعی ارزان استفاده می‌شود. با این‌حال، فرایند احیای مستقیم را می‌توان با هیدروژن نیز انجام داد. بر این‌اساس، استفاده از هیدروژن سبز و همچنین، برق تجدیدپذیر از باد، خورشید یا آب، یک راه‌اندازی DRI/EAF تولید فولاد تقریباً بدون کربن را امکان‌پذیر می‌کند. از نظر تاریخی، گاز متانی که برای تولید هیدروژن خاکستری استفاده می‌شد، ارزان‌تر از برق تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن سبز بود، به طوری که در گذشته به‌ندرت از الکترولیز استفاده می‌شد.

در این پژوهش ابتدا مکان مناسب برای نصب تجهیزات با به‌کارگیری نرم‌افزار ArcGIS تعیین شده، سپس داده‌های مربوط به ویژگی آب دریا در منطقه اخذ شده است. با استفاده از نرم‌افزار WAVE ساختار و الزامات شیرین‌سازی آب مدل و در نهایت، پنل خورشیدی مورد نیاز برای تأمین انرژی این تأسیسات برآورد و از لحاظ فنی و اقتصادی شبیه‌سازی شده است (شکل ۱).

**شکل ۱. فرایند مدل‌سازی و تحلیل دادهٔ تولیدی هیدروژن سبز**

## ۲. پیشینهٔ تحقیق

امروزه، صنعت انرژی و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی به‌شدت در حال توسعهٔ ایده‌ها و روش‌هایی برای کاهش و یا حذف انتشار دی‌اکسید کربن برای کنترل مشکل گرمایش جهانی هستند. این راه‌حل به یافتن منابع انرژی سبز جایگزین برای کاهش وابستگی جهان به انرژی هیدروکربنی فسیلی مرسوم متکی است. گاز هیدروژن سبز از آب در صدر منابع جایگزین قرار دارد زیرا هنگام سوختن دی‌اکسید کربن تولید نمی‌کند و در عوض به گرمایش جهانی نمی‌افزاید. از آنجا که آب دریا بزرگ‌ترین منبع روی زمین است، این امر تولید هیدروژن از آب دریا را به اقتصادی‌ترین راه‌حل جذاب تبدیل می‌کند. روش مستقیم برای تولید هیدروژن سبز از آب دریا، تکنیک الکترولیز است. این تکنیک به منبع تغذیهٔ جریان مستقیم برای الکترودهای مثبت و منفی نیاز

دارد. نتیجهٔ الکترولیز، تجزیهٔ آب شور به یون‌های هیدروژن و سدیم با بار مثبت در الکترود منفی و یون‌های اکسیژن و کلر با بار منفی در الکترود مثبت است. به طور سنتی در تجزیه‌وتحلیل الکترولیز آب، هر دو الکترود از فلز ساخته شده‌اند. در الکترود مثبت، هم اکسیژن و هم کلر باعث خوردگی زیاد آن الکترود می‌شوند. این امر به قطع فرایند الکترولیز، وضعیت بد آب به دلیل رسوبات خوردگی و بار هزینه‌ای ناشی از نیاز به تعویض دوره‌ای الکترودهای خورده‌شده و یا استفاده از آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی گران‌قیمت منجر می‌شود. در پژوهشی جدید یک راه حل کم‌هزینه، اما قدرتمند برای مشکل خوردگی معرفی، آزمایش و به صورت تجربی اثبات شده است. نوآوری این راه حل به جایگزینی الکترود مثبت فلزی ویژه و گران‌قیمت کلاسیک با یک الکترود غیرفلزی و بدون هزینه متکی است. الکترود غیرفلزی از بخش‌هایی از سنگ سطحی ساخته شده است که تخلخل و حجم منافذ و نفوذپذیری و اتصال منافذ بالایی دارند و با آب شور اشباع شده‌اند. سنگ‌های سطحی با خواص یادشده مقاومت بسیار کمی از خود نشان می‌دهند و از این‌رو مانند الکترودهای فلزی، الکتریسیته را هدایت می‌کنند. ولتاژ و جریان هدایت‌شده توسط چنین الکترودی توسط هندسهٔ الکترود، اتصال و خواص فیزیکی آن کنترل می‌شود [۷]. تولید هیدروژن سبز از طریق الکترولیز آب دریا با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی مزایای بی‌شماری را ارائه می‌دهد. با این‌وجود، ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی و فناوری‌های الکترولیز هنوز به وضعیت تجاری نرسیده است. در پژوهشی با انجام یک مقایسهٔ چندمعیاره، که در آن عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، بررسی شده که کدام فناوری الکترولیز بهترین چشم‌انداز کاربرد را در کوتاه‌مدت ارائه می‌دهد. با توجه به ماهیت متفاوت عوامل دخیل، تجزیه‌وتحلیل ذاتاً پیچیده است. برای ساده‌سازی آن، از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. این ترکیب امکان بررسی سازگاری رتبه‌بندی و استحکام آن را فراهم می‌کند و به نتایج قابلیت اطمینان بالاتری می‌دهد. نتایج این مطالعه نشان داد الکترولیز غشای تبادل پروتون در دریا بهترین چشم‌انداز کاربرد را در کوتاه‌مدت ارائه می‌دهد [۸]. در یک مطالعه بر اساس مدل سیستمی، برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فناوری یکپارچه نمک‌زدایی آب دریا از طریق تقطیر غشایی و تولید هیدروژن از طریق الکترولیز آب قلیایی، اقتصاد فنی ارزیابی عوامل کلیدی مؤثر بر مزایای اقتصادی سیستم کوپلینگ انجام شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد افزایش توان الکترولیزر و راندمان انرژی، میزان آب خالص را کاهش می‌دهد. افزایش راندمان انتقال حرارت تقطیر غشایی می‌تواند باعث شکستن تعادل مصرف آب و تولید شود و به توان الکترولیزر بالاتری برای مصرف آب تولیدشده توسط تقطیر غشایی نیاز دارد. هزینه‌های ترازشدهٔ آب خالص و هیدروژن به‌ترتیب ۱/۲۸ دلار آمریکا در هر تن و ۱/۳۷ دلار در هر کیلوگرم $H_2$ است [۹]. پژوهش دیگری با هدف بررسی اقتصادی فرایند شیرین‌سازی آب دریا صورت پذیرفته است که در آن چهار پیکربندی پیشنهاد می‌شود که الکترولیز آب غشای الکترولیت پلیمری (PEM) را با روش‌های نمک‌زدایی با انرژی تجدیدپذیر ترکیب می‌کند و قادر به عملیات مداوم و متناوب است. مطالعل یادشده پیامدهای هزینهٔ سرمایه (CAPEX) ادغام انرژی خورشیدی یا بادی با نمک‌زدایی آب دریا به روش اسمز معکوس (SWRO) و تقطیر چندمرحله‌ای (MED) را برای تولید هیدروژن سبز ارزیابی می‌کند. این مطالعه ظرفیت‌های منابع انرژی تجدیدپذیر، اثربخشی راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی و عملکرد روش‌های مختلف نمک‌زدایی، به‌ویژه تأثیر ترکیبی آن‌ها بر سودآوری اقتصادی و هزینه‌های کلی پروژه را بررسی کرده و نشان داده یک سیستم SWRO که به طور متناوب با انرژی باد کار می‌کند، به عنوان به‌صرفه‌ترین سیستم شناسایی شده است و CAPEX را ۴۶ درصد کاهش می‌دهد [۱۰]. نگرانی‌های زیست‌محیطی اخیر ناشی از رشد مداوم انتشار $CO_2$ و افزایش معاصر قیمت سوخت‌های فسیلی در بازارهای بین‌المللی، دو عامل مهمی هستند که توجه را به سمت سوخت‌های سبز و بدون کربن سوق می‌دهند. از این نظر، تولید هیدروژن سبز از الکترولیز، گزینه‌ای بسیار امیدوارکننده به عنوان راهی برای ذخیرهٔ انرژی الکتریکی از منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) به عنوان سوخت است. با این‌حال، دو ورودی ضروری هستند: انرژی الکتریکی و آب. در حالی که در سناریوی اتحادیهٔ اروپا، هزینه‌های انرژی الکتریکی مواردی هستند که بیشتر بر امکان‌پذیری تأثیر می‌گذارند، در سناریوی آفریقا، در دسترس بودن RES، به‌ویژه انرژی خورشیدی، در بسیاری از کشورها بیشتر است و امکان هزینه‌های انرژی پایین‌تر را فراهم می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر، سه ریزشبکهٔ مختلف واقع در آفریقا (کنیا، مالی و آفریقای جنوبی) با در نظر گرفتن نصب فتوولتائیک خورشیدی، سه گزینهٔ مختلف برای جذب آب (آب زیرزمینی، آب سطحی و آب دریا) و تأثیر فرایند تصفیهٔ آب بر کل نیروگاه از نظر انرژی و اقتصادی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته‌اند. این

تجزیه‌وتحلیل برای سه سناریو با فرض اندازهٔ الکترولیز یکسان (۱ مگاوات)، با در نظر گرفتن سیستم‌های تجاری PEM و ارزیابی امکان‌سنجی در سه سناریو، بهینه‌سازی اندازهٔ نیروگاه فتوولتائیک (محدودهٔ ۱ تا ۱۰ مگاوات) برای به حداقل رساندن هزینهٔ تولید $H_2$ انجام شده است [۱۱]. در سناریویی با ظرفیت بالای نصب الکترولیزر، ارزیابی تأثیر مصرف آب بر منابع آب شیرین، برای ۲/۳ گیگاتن هیدروژن پیش‌بینی‌شده در سطح جهان، انتظار می‌رود سالانه حدود ۲۰/۷ گیگاتن آب مصرف شود. در مناطقی که آب شیرین منبع محدودی است، تولید بالای هیدروژن می‌تواند تأثیر عمیقی بر سیستم آب محلی داشته باشد. یک راه‌حل امیدوارکننده برای تولید هیدروژن بدون مصرف آب شیرین، الکترولیز آب دریا است. دو رویکرد برای تولید هیدروژن از آب دریا، الکترولیز غیرمستقیم آب دریا و الکترولیز مستقیم آب دریا است. در حالی که الکترولیز غیرمستقیم آب دریا یک فرایند دومرحله‌ای است که در آن آب دریا ابتدا در یک واحد نمک‌زدایی قبل از الکترولیز تصفیه و خالص‌سازی می‌شود، الکترولیز مستقیم آب دریا یک فناوری جدید است که از آب دریا مستقیم به عنوان خوراک الکترولیز استفاده می‌کند. عموماً دو روش الکترولیز مستقیم آب دریا و الکترولیز غیرمستقیم آب دریا است. در روش مستقیم آب دریا مستقیم در سلول الکترولیز قرار می‌گیرد. از آنجا که آب دریا حاوی مقدار زیادی نمک (NaCl) و یون‌های دیگر مثل $Mg^{2+}$، $Ca^{2+}$، $SO_4^{2-}$ هست، در کاتد هیدروژن و در آند، به علت غلظت بالای کلریدها، به جای آزاد شدن اکسیژن، بیشتر گاز کلر ($Cl_2$) آزاد می‌شود. در روش غیر مستقیم، آب دریا ابتدا تصفیه یا پیش‌فرآوری شده، سپس آبی با خلوص بالاتر (مثلاً آب‌نمک رقیق یا آب نسبتاً شیرین‌شده) وارد سلول الکترولیز می‌شود. از آنجا که غلظت کلرید به‌شدت کاهش یافته، محصول اصلی در آند اکسیژن خواهد بود. در این زمینه، این مطالعه به بررسی مصرف آب و انرژی هیدروژن سبز در بخش انرژی، با تمرکز بر الکترولیز آب دریا به عنوان جایگزینی پایدار برای مصرف آب شیرین می‌پردازد. این تجزیه‌وتحلیل با در نظر گرفتن کل فرایند تبدیل انرژی به برق، شامل تولید انرژی تجدیدپذیر، الکترولیز آب و تولید برق با استفاده از سلول‌های سوختی اکسید جامد انجام شد. تأثیرات آب و انرژی الکترولیز غیرمستقیم و مستقیم آب دریا در نه کشور با سطوح مختلف تنش آبی و ترکیبات انرژی مختلف ارزیابی و مقایسه می‌شود. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد جایگزینی سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی با هیدروژن سبز در بخش انرژی می‌تواند به طور قابل توجهی برداشت آب را کاهش دهد. با توجه به تولید انرژی از ژنراتورهای سوخت فسیلی مرسوم، برداشت آب برای کل فرایند تبدیل انرژی به برق بین ۳۰ تا ۹۰ درصد در زمانی که الکترولیزها توسط سیستم‌های فتوولتائیک تغذیه می‌شوند و بین ۳۷ تا ۹۱ درصد در زمانی که الکترولیزها توسط سیستم‌های بادی تغذیه می‌شوند، کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش‌ها هنگام جایگزینی نفت، به‌ویژه با انرژی باد همراه با الکترولیزکننده‌های قلیایی، مشاهده می‌شود. علاوه بر این، الکترولیز آب دریا یک راه حل مناسب برای مناطقی با منابع محدود آب شیرین است. الکترولیز غیرمستقیم آب دریا، با استفاده از نمک‌زدایی اسمز معکوس قبل از تجزیهٔ آب، در مقایسه با الکترولیز مستقیم آب دریا، حداقل افزایش مصرف انرژی ۱/۸ درصدی را نشان داد. در نتیجه، الکترولیز مستقیم آب دریا فقط در کاربردهای خاص مطلوب است [۱۲].

فولاد یکی از کالاهای مهم برای توسعهٔ جهانی است، بنابراین تولید فولاد را نمی‌توان متراکم کرد، با این‌حال، فرایند ساخت فولاد را می‌توان با سوخت کم‌کربن متحول کرد. صنعت فولاد یک بخش بسیار انرژی‌بر است که به‌تنهایی مسئول استفاده از ۸ درصد از تقاضای انرژی جهانی و ۹ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی است. هیئت بین دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC)، اهداف توسعهٔ پایدار سازمان ملل متحد – ۲۰۳۰ (SDG)، کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییرات اقلیمی و توافق پاریس، دستورالعمل‌هایی برای انجام اقدامات لازم برای محدود کردن افزایش دمای جهانی به زیر ۲ درجهٔ سانتی‌گراد تا سال ۲۰۵۰ صادر کرده‌اند. هیدروژن سبز برجسته‌ترین حامل انرژی است و با کمک برق آبی تجدیدپذیر برای تولید آن، نپال پتانسیل تبدیل شدن به ارزان‌ترین تولیدکننده و صادرکنندهٔ هیدروژن سبز را دارد. در سال ۲۰۲۰، شمش به ارزش ۸۶۵ دلار برای تأمین تقاضای سالانه ۱/۲ تا ۱/۴ میلیون تن فولاد وارد شد. نپال ذخایر آهن (هماتیت) با پتانسیل بازیابی کل ۷۰ درصد آهن را کشف کرده که برای تأمین تقاضای فولاد ۵۰ تا ۱۰۰ سال در داوبادی، نوالپاراسی کافی است، و ذخایر آهن غالب در سایر نقاط نپال نیز دارد. وضعیت تقاضا و عرضهٔ انرژی در نپال و مسائل مربوط به مدیریت انرژی در نپال طی فصل مرطوب به عنوان فرصت‌هایی برای ایجاد تولید هیدروژن سبز در نپال شناسایی شده‌اند. ضرورت ایجاد صنعت فولاد و نیاز به رعایت توافق‌نامه‌های

تغییرات اقلیمی، انگیزه‌ای برای اتخاذ فرایند تولید فولاد سبز برای نپال است [۱۳]. در پژوهشی یک مدل ریاضی برای تعیین هزینهٔ هیدروژن، با در نظر گرفتن زنجیرهٔ تأمین، شامل تولید، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی، توسعه داده شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی در شرایط سناریوی داده‌شده برای سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰، زنجیره‌های تأمین هیدروژن نویدبخشی ایجاد شده‌اند. تحت شرایط سناریوهای مختلف، تولید هیدروژن تا سال ۲۰۵۰ با روش تبدیل بخار متان با هزینهٔ ۸/۸۵ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم $H_2$ ترجیح داده می‌شود. با این‌حال، به دلیل اثرات زیست‌محیطی، الکترولیز نیز با هزینهٔ ۱۷/۸۴ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم هیدروژن، همچنان یک فناوری امیدوارکننده است [۱۴]. در پاسخ به اهداف کاهش گازهای گلخانه‌ای (GHG) تعیین‌شده توسط توافقنامهٔ پاریس، هیدروژن سبز به یک راه‌حل کلیدی برای کربن‌زدایی جهانی تبدیل شده است. با این‌حال، تحقیقات در مورد طراحی تأسیسات تولید هیدروژن سبز، به‌ویژه در برزیل، همچنان محدود است. در پژوهشی در این کشور با توسعهٔ یک طرح جامع برای یک کارخانهٔ تولید هیدروژن سبز که با یک سیستم فتوولتائیک 81 (PV) مگاواتی در Ceará، برزیل کار می‌کند، این شکاف را پر شده است. طرح تأسیسات، اندازهٔ تجهیزات و نیازهای منابع با استفاده از روش برنامه‌ریزی طرح‌بندی سیستماتیک (SLP)، بر اساس انرژی موجود برای تولید روزانهٔ هیدروژن تعیین شد. این طرح همچنین مقررات ایمنی، از جمله استانداردهای محلی در Ceará و نیز نیازهای مواد اولیه و ظرفیت تولید را ادغام می‌کند. این مطالعه یک طرح تأسیسات دقیق ارائه می‌دهد که محل قرارگیری تجهیزات و ظرفیت را بر اساس خروجی کارخانهٔ PV مشخص می‌کند و در عین حال انطباق با پروتکل‌های ایمنی را تضمین می‌کند. این تحقیق با ارائهٔ یک روش ساختاریافته برای طراحی تأسیسات، به عنوان مرجعی برای پروژه‌های آینده و تقویت پیشرفت فناوری هیدروژن سبز، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه، به ادبیات هیدروژن سبز کمک می‌کند [۱۵].

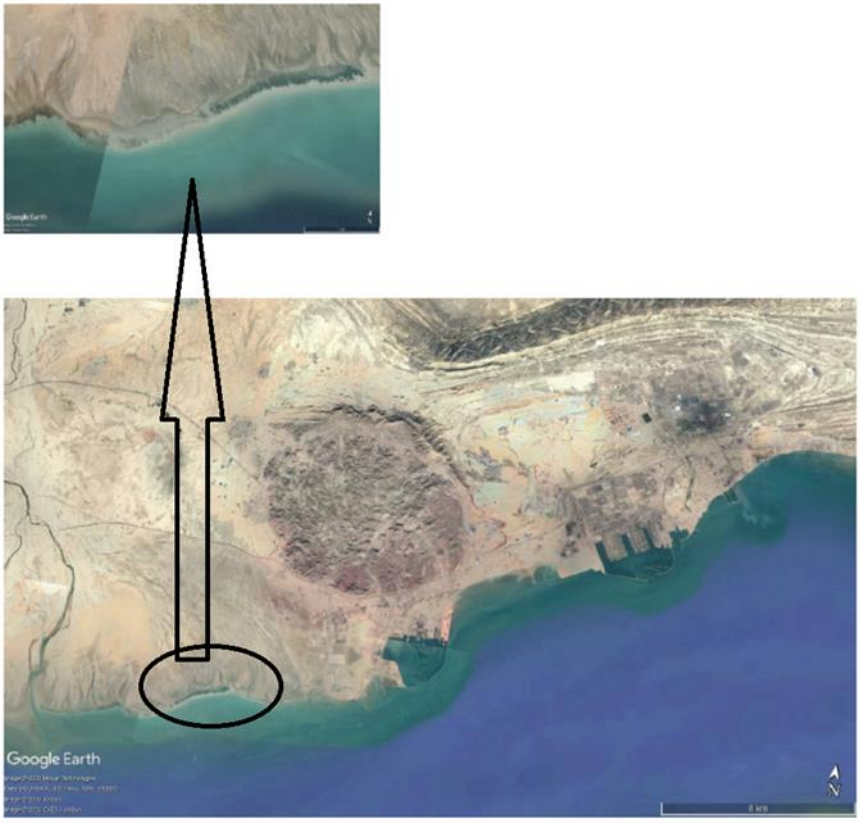
تولید و به‌کارگیری هیدروژن سبز در صنایع فولادسازی، به‌ویژه در اقتصاد بین‌الملل و به دست آوردن بازارهای جهانی اهمیت دارد. کاهش هزینه‌های تولید صنعت فولاد و پراهمیت کردن مبحث ردپای کربن خواهد شد. مطالعات انجام‌شده در این حوزه، نشان از اهمیت موضوع و نوین بودن این مبحث در مجامع علمی و صنعتی است.

## ۳. روش انجام پژوهش

مهم‌ترین گام در انجام پژوهش پیش رو، بررسی مادهٔ اولیه لازم برای ایجاد ساختار تجهیزات تقطیر از آب دریا به عنوان مادهٔ خام اولیه است. از آنجا که آب خلیج فارس به واسطهٔ دمای بالای منطقه و میزان کم آب ورودی شیرین به آن، دارای ذرات معلق و شوری بیشتری نسبت به آب‌های آزاد است. لذا برای به‌کارگیری در تولید هیدروژن و تقطیر آب، الزامی است کمی از شوری و ذرات معلق آن کاسته شود [۱۶ و ۲]. لذا در اولین گام باید منطقهٔ مورد نظر برای نصب تجهیزات شیرین‌سازی آب دریا، مطابق با الزامات فنی و ایمنی انتخاب شود. الزاماتی که در انتخاب منطقهٔ مناسب نصب تجهیزات آب‌شیرین‌کن باید مد نظر قرار داده شود عبارت‌اند از: نزدیکی به آب دریا برای کاهش سیستم لوله‌کشی، تعیین مساحت مؤثر برای نصب تجهیزات، عمق آب در نزدیکی منطقهٔ ساحلی، بررسی نمونه‌های داده میدانی آب دریا، تعیین الزامات ایمنی و زیست‌محیطی [۱۷ ـ ۱۹]. با توجه به این الزامات منطقه‌ای در جادهٔ بندرعباس به بندرخمیر و فاصلهٔ حدودی ۳۰ کیلومتر از منطقهٔ ویژه اقتصادی معدنی انتخاب شده است (شکل ۲). از آنجا که رعایت ایمنی در نگهداری و سیستم لوله‌کشی گاز هیدروژن الزامی است، باید این منطقه از دیگر صنایع و مناطق دارای ارزش زیست‌محیطی و محل زندگی و منازل مسکونی دور باشد [۲۰ و ۲۱].

از آنجا که بخشی از تأسیسات آب‌شیرین‌کن و سیستم لوله‌کشی درون آب دریا قرار دارد، لذا بررسی عمق منطقه برای امکان‌سنجی نصب سیستم و سازهٔ مناسب الزامی است. داده‌های عمق منطقه با استفاده از داده‌های پایگاه داده GEBCO[1] که با تخمین مناسبی امکان عمق‌سنجی را مهیا می‌کند، اخذ شده است. به منظور یافتن داده‌ها ویژگی آب دریا از داده‌های نمونه‌برداری‌شدهٔ مرکز اقیانوس‌شناسی که طی سال توسط شناور مطالعاتی هر سال اقدام به اندازه‌گیری این پارامترها طی محدودهٔ خلیج‌فارس تا دریای عمان می‌کند، استفاده شده است.

1. General Bathymetric Chart of the Oceans

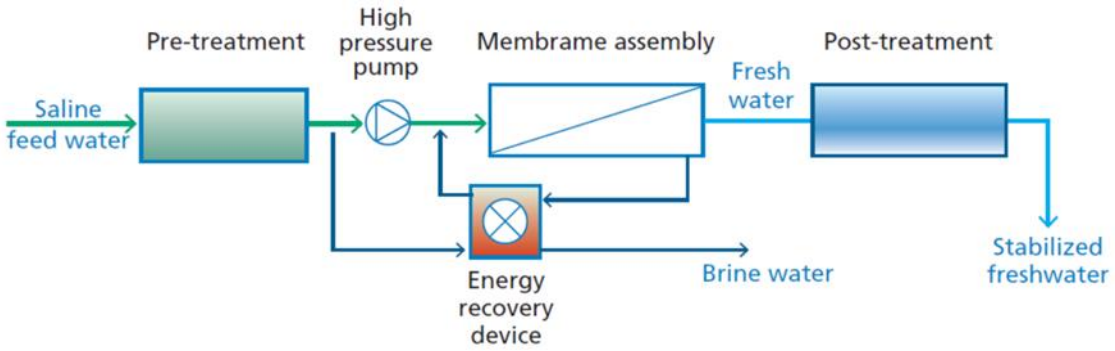



**شکل ۲. موقعیت تعیین‌شده برای نصب تجهیزات تقطیر و تولید هیدروژن سبز**

نرم‌افزار WAVE[1] از جمله نرم‌افزارهایی است که برای محاسبه و شبیه‌سازی فرایندهای تولید آب‌شیرین‌کن و تصفیهٔ آب دریا بر اساس حجم، تعیین مقدار کاهش شوری، و... به کار می‌رود. با استفاده از داده‌های اخذشده مواد و یون‌های موجود در آب دریا در خلیج فارس، این داده‌ها به عنوان دادهٔ اولیه به نرم‌افزار داده شده است. هدف از فرایند پیش‌تصفیهٔ آب دریا، تنها کاهش میزان شوری آب و تبدیل آن به آب لب‌شور است. این موضوع باعث می‌شود از انرژی مصرف در فرایندهای بعدی و همچنین، میزان آلایندگی و شوری آب برگشتی از سیستم به دریا کم شده و آثار زیان‌بار زیست‌محیطی این فرایند کاسته شود. پیش‌تصفیه در فرایند شیرین‌سازی آب دریا معمولاً شامل مراحلی مثل فیلتراسیون مکانیکی، حذف مواد معلق، کنترل زیستی (باکتری‌ها و جلبک‌ها)، و کاهش شوری اولیه است. در روش‌های سنتی، شوری آب برگشتی[2] معمولاً ۲ برابر آب دریا است. این افزایش شوری به‌شدت روی پلانکتون‌ها، جلبک‌ها و ماهی‌های تخم‌ریز تأثیر منفی دارد. در صورتی که پیش‌تصفیه انجام شود، تنها بخشی از نمک‌ها جدا می‌شود و آب برگشتی نزدیک به شوری طبیعی دریا خواهد بود. این امر موجب کاهش استرس اسمزی در موجودات دریایی خواهد شد. حجم و شوری کمتر Brine برگشتی باعث می‌شود این آب در جریان‌های دریایی سریع‌تر پخش شود و تجمع غلظتی[3] ایجاد نکند. این یعنی کاهش نقاط مرگ[4] در کف دریا است. برای تمیز نگه داشتن غشاها و تجهیزات، معمولاً از ضد رسوب‌ها، کلر، یا بیوسایدها استفاده می‌شود. اگر پیش‌تصفیهٔ مناسبی صورت پذیرد، رسوبات $Ca^{2+}$ و $Mg^{2+}$ زودتر گرفته می‌شوند و نیاز به مواد شیمیایی کمتر خواهد شد. در نتیجه، مقدار مواد شیمیایی مضر که همراه آب برگشتی وارد دریا می‌شوند، کاهش پیدا می‌کند.

به این‌منظور یک سیستم غشای نیمه‌تروا RO اسمز معکوس، پمپ فشار و همچنین، سیستم‌های لوله‌کشی، وارد این نرم‌افزار شده و پس از اجرا و پردازش نهایی داده‌ها، خروجی آن به دست آمده است. این سیستم نسبت به یک سیستم کامل، انرژی کمتری مصرف می‌کند و بر اساس حداقل‌های مورد نیاز طراحی شده است (شکل ۳).

1. Water Application Value Engine
2. Brine
3. Salt Plume
4. Dead Zones




**شکل ۳. شماتیک طراحی فرایند تصفیهٔ آب دریا برای ورود به فرایند الکترولیز**

به ولتاژ مورد نیاز برای انجام الکترولیز، ولتاژ تجزیه[1] گفته می‌شود. فرایند اصلی در برقکافت، تبادل یون‌ها به وسیلهٔ حذف یا اضافه کردن الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی است. به کمک الکترودهایی که در الکترولیت قرار داده شده‌اند، یک ولتاژ الکتریکی اعمال می‌شود. هر الکترود، یون‌های با بار ناهمنام را به خود جذب می‌کند. یون‌های با بار مثبت، به طرف کاتد و یون‌های با بار منفی، به طرف آند حرکت می‌کنند. انرژی الکتریکی که باید به سیستم داده شود عبارت‌است از: تغییرات انرژی آزاد گیبس در واکنش به علاوه هدررفت انرژی در سیستم: هدررفت انرژی + تغییرات انرژی آزاد گیبس = انرژی الکتریکی مورد نیاز [۲۲].

بعد از اعمال ولتاژ عمل الکترولیز انجام شده و واکنش اکسایشی ـ کاهشی انجام می‌شود. در مجاورت الکترود آند، آب اکسید شده و اکسیژن تولید می‌شود که به صورت حباب از ظرف خارج می‌شود. در مجاورت کاتد آب کاهش می‌یابد و حباب‌های هیدروژن تولید می‌کند. در این الکترولیز به ازای یک مول اکسیژن تولیدشده، دو مول هیدروژن تولید می‌شود. در هر فرایند الکترولیز واکنش‌های اکسایشی ـ کاهشی انجام می‌شود که شامل دو نیم واکنش اکسایش و کاهش است. نیم‌واکنش اکسایشی در آند و نیم‌واکنش کاهشی در کاتد انجام می‌شود. در الکترولیز آب، در آند با اکسایش آب پروتون، الکترون و اکسیژن طبق نیم‌واکنش زیر انجام می‌شود (رابطهٔ ۱) [۲۲].

$$۲H_۲O \rightarrow O_۲ + ۴H^+ + ۴e^- \quad (۱)$$

در کاتد نیم‌واکنش کاهش صورت می‌گیرد. الکترون‌های حاصل از نیم‌واکنش اکسایشی، به طرف الکترود کاتد می‌رود و یون‌های هیدروژنی با حرکت به سمت الکترود کاتد و به وسیلهٔ الکترون‌های مهاجرت می‌کند از طریق محلول الکترولیت کاهش می‌یابد و گاز هیدروژن تولید می‌کند (رابطهٔ ۲) [۲۲]:

$$۲H_۲O + ۲e^- \rightarrow H_۲ + ۲OH^- \quad (۲)$$

واکنش کلی الکترولیز به شکل رابطهٔ ۳ خواهد بود [۲۳]:

$$۲H_۲O \rightarrow ۲H_۲ + O_۲ \quad (۳)$$

کمینهٔ انرژی لازم برای سلول ولتاژ در الکترولیز و برای آستانهٔ فرایند الکترولیز با نماد $E^o_{cell}$، تحت شرایط استاندارد مقدار فشار و دمای ثابت با رابطهٔ ۴ ارائه می‌شود:

$$E^o_{cell} = \frac{-\Delta G^o}{nF} \quad (۴)$$

که در آن $\Delta G^o$ تغییرات انرژی آزاد گیبس در شرایط استاندارد، n تعداد الکترون منتقل شده است. در مورد یک سلول الکتروشیمیایی بسته، شرایط کمی از شرایط استاندارد تغییر می‌کند. در الکترولیز آب برای تولید یک متر مکعب هیدروژن و نیم متر مکعب اکسیژن ۶ کیلووات ساعت انرژی لازم است. هزینه‌های عملیاتی فرایند الکترولیز به چهار خدمات اصلی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: انرژی، نیروی کار، جایگزینی و مواد شیمیایی. تقریباً ۵۰ درصد از هزینه‌های عملیاتی صرف انرژی‌های حرارتی و الکتریکی خواهد شد. این هزینهٔ بالای انرژی برای نمک‌زدایی تعجب‌آور نیست، زیرا در سال ۲۰۱۴، نمک‌زدایی به عنوان پرانرژی‌ترین فرایند تصفیهٔ آب طبقه‌بندی شد که ۷۵/۲ تراوات ساعت انرژی در سال مصرف می‌کند [۲۴]. مقدار انرژی

1. Decomposition Potential

مورد نیاز برای یک فرایند نمک‌زدایی به کیفیت آب خوراک، سطح تصفیهٔ آب، فناوری تصفیه مورد استفاده توسط تأسیسات و ظرفیت کارخانه بستگی دارد. نمک‌زدایی آب دریا (SW) بیشترین مصرف انرژی را دارد. اگرچه هزینه‌های انرژی برای تصفیهٔ آب‌های زیرزمینی و سطحی کمتر است، اما عرضه از این منابع برای پاسخ‌گویی به تقاضای فزاینده برای آب شیرین کافی نیست. بنابراین، به نظر می‌رسد نمک‌زدایی SW مناسب‌ترین راه حل جهان برای کمبود آب بدون توجه به هزینه‌های انرژی مرتبط با آن باشد [۲۵]. بر اساس پژوهش‌های صورت‌گرفته، میزان انرژی مصرفی برای تولید آب با میزان تصفیهٔ متفاوت، از لب شور تا شیرین و قابل شرب، انرژی مورد نیاز در محدودهٔ ۸/۵ تا ۲/۵۸ کیلووات ساعت بر مترمکعب است [۲۶]. انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ انتشار جهانی از فرایندهای نمک‌زدایی به ۰/۴ میلیارد تن معادل $CO_2$ در سال برسد. به طور کلی، محاسبهٔ انرژی مورد نیاز برحسب ($kW\text{-}h/m^3$) برای جداسازی آب شیرین از آب شور می‌تواند به منظور محاسبهٔ حداقل انرژی مورد نیاز برای هر فرایند نمک‌زدایی مورد استفاده قرار گیرد، جایی که خوراک، محصول و آب‌نمک در دما و فشار محیط هستند:

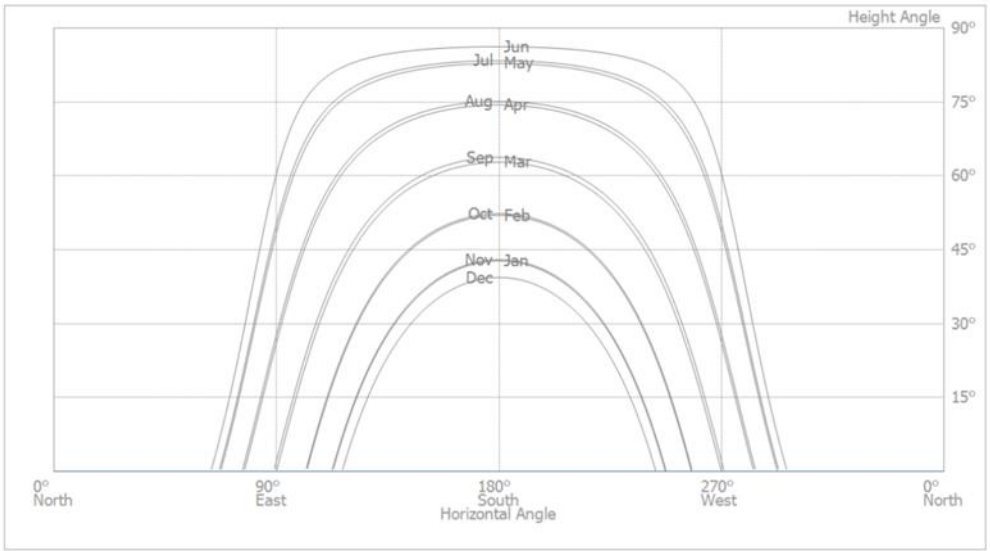
$$\text{انرژی مورد نیاز} = RT\ln a_W \quad (۵)$$

در جایی که T دمای مطلق ( بر حسب K) است، R یک ثابت (۸/۳۱۴ J/mol·K) و $a_W$ فعالیت محتویات در آب است [۲۷]. انرژی آزادسازی با رابطهٔ ۶ ارائه می‌شود [۲۷]:

$$-d\left(\Delta G_{mix}\right) = \pi V_m dn_w \quad (۶)$$

که در آن $\Delta G_{mix}$ انرژی آزاد ترکیب بر حسب (J/mol)، $\pi$ فشار اسمزی آب اولیه بر حسب پاسکال، $V_m$ حجم مول آب بر حسب (m3/mol)، و $n_W$ تعداد مول‌های آب است.

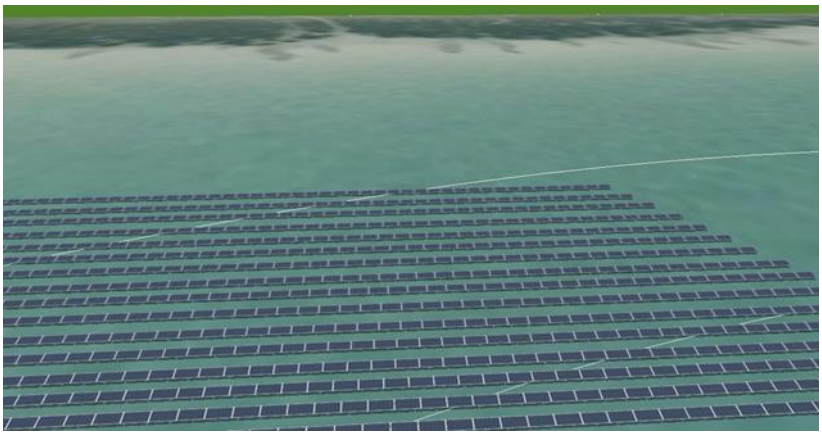
با محاسبهٔ میزان انرژی مورد نیاز برای الکترولیز و شیرین‌سازی، منبع این انرژی باید تأمین شود. با توجه به اینکه هدف اصلی تولید هیدروژن سبز است، لذا با توجه به پتانسیل مناسب بندرعباس در به‌کارگیری از انرژی خورشیدی، تأمین انرژی مورد نیاز با استفاده از پنل‌های خورشیدی است. امروزه یکی از فناوری‌های نوین و پرکاربرد در به‌کارگیری از پنل‌های خورشیدی، به‌کارگیری سیستم شناور آن‌ها است [۲۸ ـ ۳۱]. مسیر خورشید طی یک سال در منطقهٔ مورد مطالعه و ساحل شرق بندرعباس، نشان‌دهندهٔ وضعیت بسیار مناسب زاویهٔ خورشیدی، ارتفاع خورشید است که این امر موجب ارتقای توان خروجی پنل‌های خورشیدی می‌شود (شکل ۴). اما بر اساس مطالعات انجام‌شده دیگر نوع انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد، جریان کشندی و گرما زمین در شهر بندرعباس بازدهی مناسبی ندارد. لذا در فرایند شبیه‌سازی برای تأمین انرژی و تولید هیدروژن سبز، از این منبع نامحدود استفاده شده است. یکی از معایب به‌کارگیری پنل‌های خورشیدی، مساحت زیاد اشغال‌شده توسط پنل‌های نصب‌شده است، که این امر نیز با فناوری پنل خورشیدی شناور و امتیاز نزدیکی پروژه به دریا حل می‌شود.




**شکل ٤. محاسبهٔ مسیر خورشید در منطقهٔ مورد مطالعه**

با توجه به نزدیکی این پروژه به دریا و وجود منطقهٔ کاو مانند در ساحل که می‌تواند به عنوان حفاظی برای جلوگیری از آسیب امواج دریا به این سازهٔ شناور در حوضچه آرامش و محل ورودی آب دریا به سیستم تصفیه‌خانه نصب کرد. این نوع پنل‌های خورشیدی مزایای بسیار زیادی نسبت به پنل‌های نصب‌شده روی زمین دارند. بهرهٔ خروجی مناسب‌تر پنل‌های خورشیدی به علت گردش جریان دمایی در زیر و اطراف پنل، جلوگیری از رشد جلبک و میکروجلبک‌ها در اطراف حوضچه آرامش با کاهش نوررسانی به سطح زیر آب دریا، کاهش سطح مساحت مفید به‌کاررفته برای نصب پنل خورشیدی، و عدم استفاده از زمین و اشغال فضای زیاد در فرایند نصب پنل خورشیدی است. نصب پنل‌های خورشیدی روی سطح آب، شدت تابش نور خورشید به لایه‌های زیرین آب را کاهش می‌دهد. این موضوع به کاهش فتوسنتز جلبک‌ها و میکروجلبک‌ها در اطراف حوضچهٔ آرامش منجر می‌شود. برای شبیه‌سازی فرایند نصب از نرم‌افزار PVSOL نسخهٔ ۲۰۲۱ استفاده شده است. این نرم‌افزار به واسطهٔ به‌کارگیری در اکثر مراکز علمی و تحقیقاتی و با به‌کارگیری پایگاه داده مناسب و قوی، نتایج خروجی مناسب و با عدم قطعیت کوچکی را ایجاد می‌کند.

برای شبیه‌سازی قطاع‌هایی با نحوهٔ نصب شرق ـ غرب[1] پنل خورشیدی و با توان‌هایی حدود ۵۰۰ کیلووات که روی پایه‌های شناور نصب شده‌اند و مساحتی حدود ۲۲۰۰ متر مربع را اشغال کرده، استفاده شده است. ضریب عملکرد مناسب این پنل‌های شناور، به علت نصب روی آب دریا، انرژی مناسب و قابل توجهی تولید می‌کند. در این شبیه‌سازی برای هر قطاع ۸۰۰ پنل خورشیدی و ۲۵ مبدل استفاده شده است (شکل ۵).



**شکل ۵. نمایی از خروجی شبیه‌سازی تجهیزات شناور نصب‌شده پنل خورشیدی**

## ۴. نتایج

پس از انتخاب موقعیت مناسب برای نصب تجهیزات، این موقعیت برای شبیه‌سازی سایر فرایندها مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت این امکان‌سنجی موقعیت مکانی در این است که با توجه به فاصلهٔ بهینه با صنایع غرب شهرستان بندرعباس از آلایندگی‌هایی که روی فرایند تولید هیدروژن سبز تأثیرگذار است، می‌تواند بهرهٔ خروجی مناسبی داشته باشد. نزدیکی به دریا و دوری از سواحلی که دارای ارزش زیست‌محیطی بالایی هستند، شاخصهٔ اصلی این انتخاب موقعیت است. بر اساس شبیه‌سازی انجام‌شده و نتیجهٔ خروجی نرم‌افزار WAVE، میزان شوری آب مقدار کمی کاهش می‌یابد و آب برگشتی به دریا پس از تصفیهٔ جزئی آب، خسارت‌های زیست‌محیطی کمی خواهد داشت. شوری آب خلیج فارس در فصل‌های مختلف سال متفاوت است و به میزان بارندگی، دمای هوا و اقلیم منطقه بستگی دارد. این مقدار از psu ۳۸ تا psu ۵۰ متغیر است. خروجی مدل WAVE مقدار این شوری را به psu ۱۰ تغییر داده، که به آب مناسبی برای فرایند الکترولیز تبدیل شده است. بر اساس خروجی نرم‌افزار WAVE و آنالیز صورت‌گرفته با پمپ آب فشار bar ۳۰، و خطوط انتقال برابر با $kwh/m^3$ ۲٫۵ است.

در بخش فرایند الکترولیز و با توجه به مقدار لب‌شوری آب بر اساس محاسبات انجام‌شده و میزان مواد و یون‌های موجود در آب دریا در خلیج فارس و منطقهٔ مورد بررسی، در شرایط عالی، تولید ۱ کیلوگرم هیدروژن به ۳۹/۴ کیلووات ساعت برکیلوگرم نیاز

1. Delta-Wing

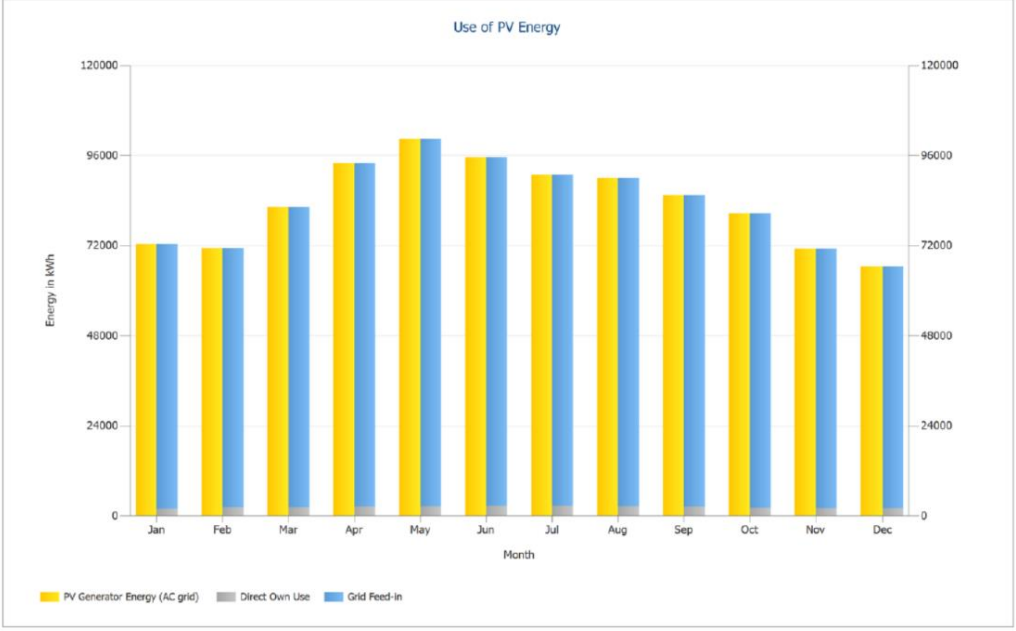
دارد. در واقع و به دلیل ناکارآمدی‌های مختلف، الکترولیز آب به طور متوسط بین ۵۰ تا ۵۵ کیلووات ساعت بر کیلوگرم مصرف می‌کند.

حال با توجه به این میزان انرژی مورد، نتایج خروجی پنل‌های خورشیده شناور نصب‌شده بررسی می‌شود. عوامل مؤثر در شبیه‌سازی پنل خورشیدی شناور که روی بهرهٔ خروجی آن تأثیر دارند در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس این مقادیر، بهرهٔ خروجی این مدل‌سازی مقادیر مناسبی است که با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری و محاسباتی، باز هم مقادیر قابل توجه و مؤثری است.

**جدول ۱. پارامترهای خروجی مدل‌سازی نرم‌افزار PVSOL**

| ضریب عملکرد (٪) | اثر کاهندگی سایه‌اندازی (٪ در سال) | انرژی تولیدی (kWh/year) | بهرهٔ سالیانهٔ ویژه (kWh/kWp) |
|---|---|---|---|
| ۸۹٫۶ | ۰٫۴ | ۱۰۰۰۰۱۱ | ۱۹۸۴ |

میزان انرژی تولیدی در ماه‌های متفاوت سال با توجه به زاویه و ارتفاع خورشید و دمای محیطی که در عملکرد این پنل‌ها تأثیرگذار است، متفاوت بوده و بیش از ۹۵ درصد از انرژی لازم برای تولید انرژی سبز را مهیا می‌کند و تنها حدود ۵ درصد از انرژی باید از شبکهٔ برق سراسری تأمین شود (شکل ۶).




**شکل ٦. انرژی تولیدی در ماه‌های متفاوت سال با استفاده از پنل‌های خورشیدی شناور**

بر اساس نتایج خروجی با قطاع‌های شناور پنل خورشیدی و تأمین انرژی مورد نیاز و ۸ ساعت کار روزانه برای این سیستم، می‌توان در سال بیش از ۱۸/۵ تن هیدروژن تولید کرد. با افزایش مخازن آرامش و این قطاع‌ها پنل خورشیدی شناور، این میزان به مقدار دلخواه و مصرف مورد نیاز افزایش خواهد یافت.

اما مهم‌ترین مسئله در این فرایند کاهش چشمگیر و تأثیرگذار گاز $CO_2$ است. بر اساس محاسبات انجام‌شده در صورت تأمین انرژی برای تولید همین میزان انرژی و همین مقدار تولید هیدروژن، از سایر منابع فسیلی و غیر تجدیدپذیر ۴۶۰ هزار کیلوگرم در سال گاز $CO_2$ تولید خواهد شد. لذا این فرایند کمک شایانی به کاهش میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و پایبندی به اجلاسیهٔ کنوانسیون پاریس خواهد شد.

## ۵. نتیجه‌گیری

بدون شک، پیشرفت و توسعهٔ زیرساخت عمدهٔ صنایع کشور، صنعت فولاسازی و تولید فولاد است. نبود این صنعت که بیشتر در ابتدای چرخهٔ ارزش محصولات و خدمات قرار دارد، چالش عمده‌ای برای کشور محسوب خواهد شد. از سوی دیگر، انتقادی که به میزان آلایندگی و انرژی‌بر بودن این صنعت می‌شود نیز اهمیت زیادی دارد و به تبعات زیست‌محیطی منجر خواهد شد. به‌کارگیری پتانسیل وجود دریا در نزدیکی شهر بندرعباس و صنایع فولادسازی استان هرمزگان برای تولیدی هیدروژن سبز کمک مؤثری در راستای تولید فولاد سبز است. از آنجا که آب برگشتی از سیستم تصفیه تنها کمی از شوری کاسته شده، برگشت و توزیع آن در آب‌های ساحلی تبعات زیست‌محیطی کمی خواهد داشت.

راه‌اندازی و پیشبرد این فرایند علاوه بر توسعهٔ صنعت سبز در صنایع استان هرمزگان، به افزایش اشتغال افراد با تحصیلات تکمیلی و رزومهٔ پژوهشی منجر خواهد شد. فناوری‌های نوین به‌سرعت درحال‌توسعه و حرکت به سمت استفاده و به‌کارگیری از هیدروژن در صنایع خود هستند. علاوه بر استفاده از آب دریا، استفاده از پساب‌های موجود در این صنایع و به‌کارگیری زیست‌توده‌های موجود در مخازن موجود در این صنایع، به ایجاد چرخه‌ای کاملاً سبز با کمترین میزان آلایندگی و دست یافتن به توسعهٔ پایدار و به دور از آلایندگی در منطقه منجر خواهد شد.

## منابع


[1] Dokhani, S., Asadi, M., Pollet, B, G., "Techno-economic assessment of hydrogen production from seawater". international journal of hydrogen energy, (2023), 48, 9592-9608. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.200.

[2] Yilin, Zh., Zhipeng, Y., Aimin, G., Lujia, L., Joaquim, L, F., Guiyin, X., Meifang Z., "Direct seawater splitting for hydrogen production Recent advances in materials synthesis and technological innovation". Green Energy & Environment, (2024), https://doi.org/10.1016/j.gee.2024.02.001.

[3] Steward, E., Quigley, J., Roberts, J.J., Sherlock, A.," THE ROLE OF HYDROGEN IN DECARBONISING THE STEEL INDUSTRY: UPSTREAM AND DOWNSTREAM IN THE UK AND ONTARIO", (2023), International Green Energy Conference, Glasgow, United Kingdom.

[4] Zarezadeh, M., Mansouri, H., "Estimation of Sustainable Energy Supply in Bandar Abbas Industrial Estate No. 2 Using Solar Panel Installed on the Roof of the Building", Journal of Sustainable Energy Systems, (2023), 2(2), 167-181. 10.22059/ses.2024.369849.1047.

[5] Zarezadeh, M., "Modeling the Required Energy Supply in the Frozan Area of Bandar Abbas Using Solar Panels Installed on the Roofs of Buildings", Journal of Sustainable Energy Systems, (2023), 2(3), 215-235. 10.22059/ses.2024.372473.1051.

[6] Zarezadeh, M., "Feasibility Construction of a 4 MW PV Power Plant to Provide Sustainable Electricity to Bandar Abbas Industrial Estate", Journal of Solar Energy Research, (2023), 8(1), 1250-1263. 10.22059/jser.2022.349199.1256.

[7] Oraby, M., Shawqi, A., "Green Hydrogen Production Directly from Seawater with No Corrosion Using a Nonmetallic Electrode: A Novel Solution and a Proof of Concept", International Jornal of Energy Research, (2024), 5576626, https://doi.org/10.1155/2024/5576626.

[8] d Amore-Domenech, R.,Santiago, O., Leo, T.," Multicriteria analysis of seawater electrolysis technologies for green hydrogen production at sea", Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2020), 113, https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110166.

[9] Xu, X., Zhao, Zh., Song, Ch., Xi, L., Zhang, W.," Seawater Membrane Distillation Coupled with Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production: Parameter Influence and Techno-Economic Analysis", Membranes, (2025), 15, 60. https://doi.org/10.3390/membranes15020060.

[10] Arunachalam, M., Yoo, Y., Al-Ghamdi, A, S., Park, H., Han, D, S.," Integrating green hydrogen production with renewable energy-powered desalination: An analysis of CAPEX implications and operational strategies", International Journal of Hydrogen Energy, (2024), 84, pp.344-355, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.250.

[11] Rivarolo, M., Barberis, S., Portesine, A., Massardo, A, F.," Evaluation of water/energy intensity of green hydrogen production plants in Africa scenario", Journal of Physics: Conference Series, (2024), Ser. 2893 012074, DOI 10.1088/1742-6596/2893/1/012074.

[12] Micheletto, D.,Migliari, L., Cocco, D.," ASSESSING THE ENERGY AND WATER IMPACTS OF SEAWATER ELECTROLYSIS FOR GREEN HYDROGEN PRODUCTION", 37 th INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, 30 JUNE - 4 JULY, 2024, RHODES, GREECE, https://doi.org/10.52202/077185-0111.

[13] Mahat, Ch. Jibran, J, A., Sharma, N., Thapa, B.," Challenges and prospects of steel production using green hydrogen in Nepal", Journal of Physics: Conference Series, (2023), doi:10.1088/1742-6596/2629/1/012026.

[14] Kindra, V., Maksimov, I., Oparin, M., Zlyvko, O., Rogalev, A.,"Hydrogen Technologies: A Critical Review and Feasibility Study", Energies, (2023), 16(14), 5482, https://doi.org/10.3390/en16145482.

[15] Caiafa, C., Romijn, H, A., Coninck, H., "Identifying opportunities and risks from green hydrogen: a framework and insights from a developing region in Brazil", Climate Policy, (2025), 25(4), https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2407848.

[16] Berry, K., "Hydrogen Production from Seawater Electrolysis: Investigation of Potential Processes and Technologies", A thesis submitted in partial fulfilment for the requirement of degree in Master

of Science in Sustainable Engineering: Renewable Energy Systems and the Environment, (2021), Department of Mechanical and Aerospace Engineering University of Strathclyde.
[17] Tsiourtis, N, X., "Criteria and procedure for selecting a site for a desalination plant". conference on Desalination and the Environment. Sani Resort, Halkidiki, Greece. (2007).
[18] Lin, T, Ch., chen, F., "An energy-efficient vertical-shaft seawater desalination plant", Desalination and Water Treatment, 174, (2020), 38–45. doi:10.5004/dwt.2020.24847.
[19] Elimelech, M., Phillip, W, A., "The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment", Science, 333, (2011), 712–717.
[20] Perelli, S., Genna, G., "Hazards Identification and Risk Management of Hydrogen Production and Storage Installations", Chemical Engineering Transactions, 96, (2022), 193-198 DOI:10.3303/CET2296033.
[21] Calabrese, M., Portarapillo, M., and et al, "Hydrogen Safety Challenges: A Comprehensive Review on Production, Storage, Transport, Utilization, and CFD-Based Consequence and Risk Assessment", Energies (2024), 17, 1350. https://doi.org/10.3390/en17061350.
[22] Yepez-Madrigaal, A,J., Sosa-Villalobos, C,A., Dominguez-Sanchez, G., "PRODUCTION OF HYDROGEN THROUGH SEAWATER ELECTROLYSIS USING AN EXPERIMENTAL PROTOTYPE", RASAYAN Journal of Chemistry, (2024), 17(2), 466-471. http://doi.org/10.31788/RJC.2024.1728685.
[23] Meier, K.," Hydrogen production with sea water electrolysis using Norwegian offshore wind energy potentials", Int J Energy Environ Eng, (2014) 5:104.1-12. DOI 10.1007/s40095-014-0104-6.
[24] M.W. Shahzad, M. Burhan, L. Ang, K.C. Ng, "Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability", Desalination, 413 (2017) 52-64. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.009.
[25] A. Al-Karaghouli, L.L. Kazmerski, Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24 (2013) 343-356. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064.
[26] B.P. Walsh, S.N. Murray, D.T.J. O'Sullivan, The water-energy nexus, an ISO50001 water case study and the need for a water value system, Water Resources and Industry, 10 (2015) 15-28. https://doi.org/10.1016/j.wri.2015.02.001.
[27] Gude, V, G.," Exergy Evaluation of Desalination Processes", ChemEngineering 2018, 2(2). 1-27. https://doi.org/10.3390/chemengineering2020028.
[28] M. Zarezadeh, Investigating the Installation of Solar Panels in Reducing the Evaporation of Canal Water. Journal of Water and Wastewater; (2024) Vol34. No6:58-68 . doi: 10.22093/wwj.2023.382886.3317.
[29] M. Zarezadeh, The Feasibility of Installing FPV on the Reservoirs of Dams in Hormozgan Province to Produce Energy and Reduce the Amount of Water Evaporation, Journal of Sustainable Energy Systems, (2023), Volume 2, Issue 4, Pages 369-387. Doi: 10.22059/ses.2024.373539.1055.
[30] A. Alhejji, A. Kuriqi, J. Jurasz, F. K. Abo-Elyousr, Energy Harvesting and Water Saving in Arid Regions via Solar PV Accommodation in Irrigation Canals, Energies 2021, 14, 2620. https://doi.org/10.3390/en14092620.
[31] Sh. El Barddei, M. Al Sadeq, Effect of Solar Canals on Evaporation, Water Quality, and Power Production: An Optimization Study, Water 2020, 12, 2103; doi:10.3390/w12082103.