



◀ مقدمه:

هیدروژن، به‌عنوان فراوان‌ترین عنصر در جهان، از دیرباز در فرآیندهای صنعتی و تولید انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. اما در دهه‌های اخیر، نقش این گاز در انتقال جهانی به سیستم‌های انرژی پایدار برجسته‌تر شده است. این مقاله با تمرکز بر مزایا، چالش‌ها و سیاست‌های مرتبط با توسعه هیدروژن، مسیرهای جدیدی برای کربن‌زدایی در صنایع و انرژی پیشنهاد می‌کند.

◀ ویژگی‌های منحصر به فرد هیدروژن، راه‌گشای دنیای انرژی:

هیدروژن به دلیل ساختار شیمیایی ساده (H_2)، به یکی از مولکول‌های کلیدی در شیمی انرژی تبدیل شده است. برخی ویژگی‌های کلیدی آن عبارت‌اند از:

– سبکی و دانسیته انرژی بالا

هر کیلوگرم هیدروژن حدود سه برابر انرژی بیشتری نسبت به بنزین تولید می‌کند.

– قابلیت ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل

هیدروژن می‌تواند به‌صورت فشرده یا مایع ذخیره شود، هرچند نیازمند فناوری پیشرفته برای ایمنی و بهینه‌سازی است.

– مصرف پاک

محصول اصلی احتراق هیدروژن، بخار آب است و هیچ گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌کند.

◀ روش‌های تولید هیدروژن و پیامدهای زیست‌محیطی:

تولید هیدروژن به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که هر کدام از منظر تأثیرات زیست‌محیطی و هزینه‌های اقتصادی تفاوت‌های قابل توجهی دارند. این روش‌ها به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: هیدروژن خاکستری، آبی، و سبز. در ادامه، به جزئیات این روش‌ها و پیامدهای آن‌ها می‌پردازیم:



۱. هیدروژن خاکستری، روش رایج اما آلاینده

هیدروژن خاکستری با استفاده از فرآیند ریفرمینگ بخار متان (Steam Methane Reforming) تولید می‌شود. این روش شامل واکنش گاز طبیعی (عمدتاً متان) با بخار در دمای بالا و تولید هیدروژن و دی‌اکسید کربن است.

مزایا:

- ارزان‌ترین و ساده‌ترین روش تولید.
- زیرساخت‌های موجود برای این روش در بسیاری از کشورها در دسترس است.

معایب:

- انتشار حجم زیادی از گاز CO₂، که یکی از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی است.
- وابستگی به سوخت‌های فسیلی، که منابعی غیرقابل تجدید هستند.

پیامد زیست‌محیطی:

این روش به ازای هر کیلوگرم هیدروژن تولیدی، بین ۹ تا ۱۲ کیلوگرم دی‌اکسید کربن تولید می‌کند. بنابراین، از نظر زیست‌محیطی چندان پایدار نیست و آینده استفاده از آن محدود خواهد بود.

۲. هیدروژن آبی: ترکیب فناوری‌های نوین با تولید پایدارتر

هیدروژن آبی نیز از ریفرمینگ بخار متان تولید می‌شود، اما در این روش، از فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن (Carbon Capture and Storage) برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده می‌شود.

مزایا:

- کاهش انتشار دی‌اکسید کربن تا ۹۰٪.
- استفاده از منابع گاز طبیعی به‌عنوان ماده اولیه.

معایب:

- هزینه‌های بالای فناوری CCS.
- عدم دسترسی به زیرساخت‌های کافی برای ذخیره‌سازی کربن در بسیاری از مناطق جهان.

• پیامد زیست‌محیطی:

اگرچه این روش انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد، اما همچنان به منابع فسیلی وابسته است و در مقایسه با هیدروژن سبز، تأثیرات زیست‌محیطی بیشتری دارد.

۳. هیدروژن سبز: رویکرد آینده‌نگرانه و پاک‌ترین روش

هیدروژن سبز با فرآیند الکترولیز آب تولید می‌شود که در آن، آب با استفاده از جریان برق به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود. این فرآیند در صورتی که از برق تولیدشده توسط انرژی‌های تجدیدپذیر (مانند خورشید و باد) استفاده کند، هیچ گونه انتشار کربنی ندارد.

مزایا:

- کاملاً پاک و بدون کربن.
- استفاده از منابع تجدیدپذیر و بی‌پایان مانند خورشید و باد.
- مناسب برای کشورهای دارای منابع غنی انرژی تجدیدپذیر.

معایب:

- هزینه بالای تولید نسبت به روش‌های خاکستری و آبی.
- نیاز به سرمایه‌گذاری کلان در زیرساخت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های الکترولیز.

• پیامد زیست‌محیطی:

هیدروژن سبز بدون تولید گازهای گلخانه‌ای، تنها آب مصرف می‌کند و کاملاً با اهداف زیست‌محیطی جهانی همخوانی دارد

◀ مقایسه روش‌ها از منظر هزینه و تأثیرات زیست‌محیطی:

روش	هزینه تولید (به ازای هر کیلوگرم)	انتشار CO ₂ به ازای هر کیلوگرم هیدروژن	پایداری زیست‌محیطی
هیدروژن خاکستری	۱-۲ دلار	۹-۱۲ کیلوگرم	کم
هیدروژن آبی	۲-۳ دلار	۱-۲ کیلوگرم	متوسط
هیدروژن سبز	۳-۷ دلار	۰	بسیار بالا



فناوری‌های نوین برای کاهش هزینه‌ها:

کاهش هزینه‌های الکترولیز

پیشرفت‌هایی در تولید الکترولیزهای پلیمری و الکترولیزهای غشایی باعث افزایش بازده و کاهش هزینه هیدروژن سبز شده است.

ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر

توسعه نیروگاه‌های هیبریدی خورشیدی-بادی که انرژی مازاد را برای الکترولیز استفاده می‌کنند، می‌تواند قیمت هیدروژن سبز را به رقابتی‌ترین سطح برساند.

هر روش تولید هیدروژن بسته به شرایط اقتصادی و زیرساختی منطقه‌ای، می‌تواند کاربرد خاصی داشته باشد. با این حال، در درازمدت، هیدروژن سبز به دلیل تطابق کامل با اهداف زیست‌محیطی، نقش کلیدی در اقتصادهای پایدار و کربن خنثی ایفا خواهد کرد.

کاربردهای گسترده هیدروژن در صنایع مختلف:

هیدروژن به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردش، در طیف وسیعی از صنایع کلیدی به کار گرفته می‌شود. این کاربردها، فراتر از تولید انرژی، شامل حمل‌ونقل، صنایع شیمیایی، تولید فلزات و ذخیره‌سازی انرژی می‌شوند. در ادامه، هر کدام از این کاربردها با جزئیات بیشتری بررسی شده‌اند:

۱. حمل‌ونقل: تحول در سیستم‌های جابه‌جایی

یکی از امیدوارکننده‌ترین کاربردهای هیدروژن، استفاده از آن در بخش حمل‌ونقل است. با ظهور فناوری پیل‌های سوختی، هیدروژن به یک منبع انرژی پاک و پرکاربرد برای وسایل نقلیه تبدیل شده است.

• پیل‌های سوختی هیدروژنی (Hydrogen Fuel Cells):

این سیستم‌ها با تبدیل هیدروژن و اکسیژن به برق، انرژی لازم برای خودروها، قطارها، و حتی کشتی‌ها را تأمین می‌کنند. از مزایای این فناوری می‌توان به عملکرد بی‌صدا، راندمان بالا، و کاهش آلاینده‌های هوا اشاره کرد.

• چالش‌ها:

— زیرساخت‌های ناکافی: ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژنی در سطح جهانی محدود هستند.

— هزینه تولید: هنوز هزینه تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن برای خودروها به اندازه سوخت‌های فسیلی اقتصادی نیست.

مثال‌های عملی:

— خودروهای Toyota Mirai و Hyundai Nexa از جمله محصولات تجاری مبتنی بر پیل سوختی هستند.

— قطارهای هیدروژنی مانند Coradia iLint در اروپا مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲. صنایع شیمیایی: هیدروژن به‌عنوان ماده اولیه حیاتی

هیدروژن یکی از پایه‌های اصلی تولید مواد شیمیایی مهم مانند آمونیاک و متانول است.

• تولید آمونیاک (NH_3):

آمونیاک عمدتاً برای تولید کودهای شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند که به چرخه هابر-بوش (Haber-Bosch Process) معروف است، هیدروژن را با نیتروژن ترکیب می‌کند.

— **چالش‌ها:** فرآیند تولید آمونیاک به انرژی بسیار بالایی نیاز دارد و انتشار CO_2 قابل توجهی دارد.

• تولید متانول (CH_3OH):

متانول، که به‌عنوان سوخت و ماده اولیه در صنایع پتروشیمی استفاده می‌شود، از واکنش هیدروژن و کربن‌دی‌اکسید تولید می‌شود.

— **مزایا:** استفاده از هیدروژن سبز می‌تواند فرآیند تولید متانول را کربن خنثی کند.

۳. ذخیره‌سازی انرژی: پل ارتباطی میان تولید و مصرف

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید، ناپایداری تولید است. هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی (Energy Carrier) این مشکل را حل می‌کند.

— ذخیره‌سازی طولانی‌مدت:

انرژی مازاد تولیدی توسط نیروگاه‌های خورشیدی یا بادی می‌تواند برای تولید هیدروژن از طریق الکترولیز استفاده شود. این هیدروژن سپس به‌عنوان منبع ذخیره انرژی به کار می‌رود. برخلاف باتری‌ها، هیدروژن می‌تواند برای ماه‌ها بدون کاهش کیفیت ذخیره شود.



– بازگشت انرژی:

در زمان نیاز، هیدروژن ذخیره شده می تواند از طریق پیل های سوختی یا احتراق مستقیم، برق تولید کند.

• چالش ها:

- راندمان پایین در چرخه تولید و بازگشت انرژی.
- هزینه بالای ذخیره سازی هیدروژن مایع یا فشرده.

۴. صنایع فولاد و فلزات: کاهش انتشار کربن در تولید فلزات

صنایع فولاد یکی از بزرگ ترین تولیدکنندگان گازهای گلخانه ای است. هیدروژن می تواند جایگزین کک (Coke) به عنوان عامل احیاکننده در فرآیند تولید فولاد شود.

• فرآیند احیای مستقیم با هیدروژن (Hydrogen Direct Reduction):

این روش با حذف کربن از فرآیند تولید، فولاد بدون کربن تولید می کند. کشورهای اروپایی، از جمله آلمان و سوئد، در حال سرمایه گذاری در کارخانه های فولاد هیدروژنی هستند.

۵. هوا و فضا: سوخت آینده برای مأموریت های فضایی

هیدروژن مایع به دلیل چگالی انرژی بالا، یکی از اصلی ترین سوخت های مورد استفاده در موشک ها است. برای مثال:

- در مأموریت های ناسا، هیدروژن مایع به عنوان سوخت اصلی موشک های Saturn V استفاده شد.
- شرکت هایی مانند اسپیس ایکس و آریاناسپیس از این فناوری برای مأموریت های فضایی خود بهره می برند.

۶. تولید انرژی در نیروگاه ها: هیدروژن در جایگزینی گاز طبیعی

هیدروژن می تواند به عنوان جایگزین گاز طبیعی در نیروگاه های برق استفاده شود.

- توربین های گازی هیدروژنی: شرکت هایی مانند Siemens و GE در حال توسعه توربین هایی هستند که می توانند از هیدروژن یا مخلوط آن با گاز طبیعی استفاده کنند. این فناوری باعث کاهش انتشار کربن در نیروگاه ها می شود.

► سیاست های جهانی در حمایت از هیدروژن:

چارچوب ها و استراتژی ها

با گسترش استفاده از انرژی های پاک و تعهد کشورها به اهداف خنثی سازی کربن تا سال ۲۰۵۰، سیاست های جهانی در حمایت از هیدروژن به ویژه هیدروژن سبز اهمیت فزاینده ای یافته اند. هیدروژن سبز، که از الکترولیز آب با استفاده از انرژی های تجدیدپذیر تولید می شود، یکی از کلیدی ترین گزینه ها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و جایگزینی سوخت های فسیلی در بخش های صنعتی و حمل و نقل است.

۱. چارچوب های ملی و استراتژی ها

بیش از ۵۰ کشور تا سال ۲۰۲۴ استراتژی های ملی هیدروژن خود را تدوین کرده اند. این استراتژی ها اهداف مشخصی از جمله نصب ۱۱۳.۵ گیگاوات ظرفیت الکترولیزر تا سال ۲۰۳۰ و ۲۸۷ گیگاوات تا سال ۲۰۵۰ را تعیین کرده اند. استراتژی های ملی معمولاً شامل شناسایی موانع فنی، اقتصادی و قانونی و ارائه راهکارهایی برای غلبه بر این موانع هستند.

۲. سیاست های صنعتی

هیدروژن سبز هنوز به لحاظ هزینه قابل رقابت با هیدروژن خاکستری نیست و به همین دلیل نیازمند حمایت های سیاستی است. این حمایت ها شامل مشوق های مالی، معافیت های مالیاتی و الزام به استفاده از سوخت های کم کربن در صنایع کلیدی مانند فولادسازی، پالایشگاه ها و صنایع شیمیایی می شود.

۳. سیستم حکمرانی و استانداردها

یکی از الزامات کلیدی برای ترویج هیدروژن، ایجاد سیستم های شفاف برای برچسب گذاری و صدور گواهی اصالت تولید است. این سیستم ها باید انتشار کربن طی چرخه عمر تولید و توزیع هیدروژن را نشان دهند تا مصرف کنندگان و صنایع تشویق به استفاده از این سوخت پاک شوند.

۴. همکاری های بین المللی

سازمان هایی مانند اتحادیه اروپا، آژانس بین المللی انرژی های تجدیدپذیر (IRENA) و کشورهای پیشرفته نظیر ژاپن، با انعقاد تفاهم نامه ها و همکاری های چندجانبه، در توسعه بازار جهانی هیدروژن نقش دارند. برای مثال، اتحادیه اروپا و ژاپن در توسعه استانداردهای مشترک، سرمایه گذاری در نوآوری و افزایش ظرفیت تولید هیدروژن سبز همکاری دارند.



۵. چالش‌ها و موانع

- هزینه بالای تولید هیدروژن سبز به دلیل نیاز به مقادیر عظیم برق تجدیدپذیر.
 - محدودیت‌های تکنولوژیکی در تولید، ذخیره‌سازی و انتقال.
 - نیاز به هماهنگی سیاستی در سطح جهانی برای جلوگیری از رقابت ناسالم بین کشورها.
- پشتیبانی از هیدروژن سبز به‌عنوان یک راه‌حل کلیدی برای گذار انرژی نیازمند تلاش‌های متمرکز در سیاست‌گذاری، نوآوری و همکاری بین‌المللی است. اجرای استراتژی‌های جامع می‌تواند هیدروژن را به یکی از ستون‌های اصلی آینده انرژی پاک تبدیل کند و مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده‌ای به همراه داشته باشد.

۶. آینده هیدروژن: فرصت‌ها و دستاوردها

هیدروژن به‌عنوان یک عنصر کلیدی در گذار به اقتصاد کم‌کربن، پتانسیل عظیمی برای تغییر صنایع مختلف و کاهش اثرات زیست‌محیطی دارد. آینده هیدروژن به سیاست‌ها، پیشرفت‌های فناوریانه و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها بستگی دارد. در ادامه، فرصت‌ها و دستاوردهای احتمالی در بخش‌های کلیدی بررسی می‌شوند:

۱. نقش هیدروژن در تولید انرژی پاک

هیدروژن سبز، که از الکترولیز آب و با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تولید می‌شود، یکی از پاک‌ترین راه‌حل‌های انرژی است.

• فرصت‌ها:

- جایگزینی گاز طبیعی در نیروگاه‌ها با هیدروژن می‌تواند به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن کمک کند.
- استفاده از هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی (Energy Carrier) باعث بهبود ذخیره‌سازی و انتقال انرژی می‌شود.

• دستاوردها:

- پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، تقاضای هیدروژن به ۶۱۳ میلیون تن برسد و تقریباً ۷۰ درصد آن از منابع تجدیدپذیر تأمین شود.
- پروژه‌های پایلوت مانند HyNet در انگلستان و H₂Med در اروپا نمونه‌هایی از اقدامات موفق در این زمینه هستند.

۲. هیدروژن در حمل‌ونقل

• وسایل نقلیه سنگین:

هیدروژن به دلیل چگالی انرژی بالا، به‌ویژه برای حمل‌ونقل سنگین مانند کامیون‌ها، قطارها و کشتی‌ها ایده‌آل است.

• فرصت‌ها:

کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش آلاینده‌های NOx و SOx

• دستاوردها:

استفاده از قطارهای هیدروژنی مانند Coradia iLint در اروپا، نشان‌دهنده پیشرفت فناوری پیل سوختی است.

• چالش‌ها:

هزینه زیرساخت‌های سوخت‌گیری هیدروژنی و مشکلات مرتبط با ذخیره‌سازی.

۳. هیدروژن در صنایع سنگین

صنایع فولاد، سیمان، و پالایشگاه‌ها که به‌عنوان بخش‌های سخت‌کاشی (Hard-to-Abate) شناخته می‌شوند، از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان هیدروژن خواهند بود.

• فرصت‌ها:

جایگزینی کک در فرآیند تولید فولاد با هیدروژن به کاهش انتشار مستقیم کربن کمک می‌کند.

• دستاوردها:

پروژه‌های آزمایشی مانند HYBRIT در سوئد، فولاد سبز را با استفاده از هیدروژن تولید کرده‌اند.

• چالش‌ها:

هزینه بالای تولید هیدروژن و توسعه زیرساخت‌های صنعتی.

۴. تقویت اقتصادهای محلی

سرمایه‌گذاری در زنجیره ارزش هیدروژن (شامل تولید، ذخیره‌سازی، و توزیع) می‌تواند به ایجاد اشتغال و رشد اقتصادی منجر شود.

• فرصت‌ها:

پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، اقتصاد هیدروژن بتواند ۳۰ میلیون شغل در سراسر جهان ایجاد کند.



• **دستاوردها:**

کشورهایی مانند ژاپن و آلمان پیشرو در ایجاد استراتژی‌های ملی هیدروژن هستند و نقش کلیدی در توسعه این صنعت دارند.

۵. **سیاست‌گذاری و همکاری بین‌المللی**

برای موفقیت هیدروژن در مقیاس جهانی، هماهنگی میان سیاست‌ها و همکاری‌های بین‌المللی حیاتی است.

• **فرصت‌ها:**

- استانداردسازی تولید و توزیع هیدروژن.
- همکاری کشورهای پیشرفته در توسعه زیرساخت‌های مشترک مانند H₂Med pipeline

• **دستاوردها:**

- سیاست‌های حمایتی اتحادیه اروپا شامل سرمایه‌گذاری ۹۰ میلیارد یورویی برای توسعه هیدروژن سبز تا سال ۲۰۳۰ است.

► **منابع:**

- <https://www.irena.org/Publications/۲۰۲۴/Nov/Enabling-global-trade-in-renewable-hydrogen-and-derivative-commodities>
- <https://www.irena.org/Publications/۲۰۲۴/Nov/A-Quality-Infrastructure-Roadmap-for-green-hydrogen>
- <https://www.irena.org/Publications/۲۰۲۴/Oct/Green-hydrogen-auctions-A-guide-to-design>
- <https://news.mit.edu/۲۰۲۲/۳-questions-emre-gencer-blue-hydrogen-۱۰۱۷>
- <https://climate.mit.edu/explainers/hydrogen>
- <https://extension.psu.edu/unraveling-the-hydrogen-rainbow-green-blue-and-gray-hydrogen-production>
- https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/pictures/HydrogenProduction_CGEP_FactSheet_۰۵۲۶۲۱.pdf