



مروری بر ریسک‌های تولید هیدروژن سبز با استفاده از منابع تجدیدپذیر در ایران و جهان

محمدرضا حقانی

کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

معصومه زینال نژاد

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

طاهره علی حیدری بیوکی

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک و تجدیدپذیر می‌تواند نقش مهمی در کاهش دی اکسیدکربن موجود در هوا و حفظ اکوسیستم و توسعه پایدار داشته باشد. تولید هیدروژن سبز نیازمند تامین منابع مالی و جذب سرمایه است اما جذب سرمایه در تولید این انرژی مهم با ریسک‌هایی همراه است و همین امر تولید هیدروژن سبز در کشورهای در حال توسعه از قبیل ایران را با مشکلاتی مواجه کرده است. براساس مطالعه مطالعات انجام شده این مقاله ریسک‌های فنی، ریسک‌های خط‌مشی‌گذاری و نظارتی و ریسک‌های محیطی- زیستی را به‌عنوان مهم‌ترین ریسک‌های سرمایه‌گذاری در تولید هیدروژن سبز در ایران و سایر کشورها معرفی کرده است.

واژگان کلیدی: هیدروژن سبز، منابع تجدیدپذیر، ریسک‌های تولید هیدروژن سبز



۱- مقدمه

موضوع انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور فزاینده‌ای از سوی متخصصان و همچنین عموم مردم مورد توجه قرار گرفته است و مطالعات علمی و پژوهشی در مورد منابع انرژی تجدیدپذیر در سال‌های اخیر افزایش یافته است (Momete, 2018).

به‌دنبال رشد اقتصاد جهانی، افزایش جمعیت و پیشرفت تکنولوژی تقاضای جهانی برای انرژی اولیه، افزایش تقاضا برای خدمات انرژی تا سال ۲۰۴۰ هر سال ۱.۳ درصد در حال افزایش است از این نظر، سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز طبیعی و زغال‌سنگ) به‌طور گسترده برای تولید انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و پیش‌بینی می‌شود حداقل تا سال ۲۰۵۰ همچنان به عنوان منبع اصلی انرژی باقی بماند. موضوع مهم در چنین شرایطی این است که استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی یا مواد شیمیایی منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و سایر ترکیبات فرار و ذرات جامد در جو می‌شود که به تغییرات آب و هوایی جهانی منجر می‌شود (Megía et al., 2021) در چنین شرایطی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند نقش مهمی در کاهش سوخت فسیلی و گرم شدن کره زمین ایفا کند (Momete, 2018). و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ هیدروژن مکمل سایر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر باشد و نقشی کلیدی در مسیر انتقال انرژی ایفا کند. اما با وجود اهمیت تولید و توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر همچون هیدروژن سبز از سوی پژوهشگران و سیاست‌گذاران، در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸، سرمایه‌گذاری‌های جهانی (جریان‌های خالص سرمایه) در پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی به ترتیب ۱ و ۳ درصد کاهش یافته است و این خطر وجود دارد که حتی بیشتر نیز کاهش یابد (Erfani and Tavakolan, 2023, Taghizadeh-Hesary and Yoshino, 2020, Sachset al., 2021). ادبیات پژوهش حاکی از این است که دو مانع عمده، نرخ بازده کمتر در مقایسه با پروژه‌های سوخت فسیلی و ریسک بالای سرمایه‌گذاری در مقایسه با پروژه‌های سوخت فسیلی در توسعه پروژه‌های تولید انرژی سبز وجود دارد (Taghizadeh-Hesary and Yoshino, 2018).

از آنجایی که انرژی‌های تجدیدپذیر یک صنعت سرمایه‌بر و تکنولوژی‌بر است که نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد و سطح بالایی از نوآوری در فناوری دارد، سرمایه‌گذاران هنگام تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری در پروژه‌های تجدیدپذیر با عدم قطعیت‌های متفاوتی روبرو هستند. بنابراین، ارزیابی ریسک‌ها در پروژه‌های سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر و سپس اتخاذ بهترین تصمیم‌های سرمایه‌گذاری برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت زیادی دارد (Liu, Zeng, 2017).

موانع اساسی بازار و همچنین ذهنیتی که از ریسک بالای سرمایه‌گذاری در این بخش وجود دارد، موجب گردیده تا توسعه و تأمین مالی برای انجام پروژه‌های تجدیدپذیر محدود شود. ریسک‌های پروژه‌ها می‌توانند به شکل‌های مختلف نمایان شوند که از آن جمله می‌توان به ریسک‌های سرمایه‌گذاری و مالی، ریسک‌های سیاسی و قانونی، ریسک‌های موجود در خطوط انتقال و شبکه سراسری، ارز، نقدینگی، میزان بهره و همچنین ریسک موجود در منابع اشاره نمود. (شیرودی، ۱۳۹۵). مهم‌ترین عوامل مؤثر در یک سرمایه‌گذاری موفق، توجه به ریسک و بازده سرمایه‌گذاری است. سرمایه‌گذاران می‌کوشند منابع مالی خود را در جایی سرمایه‌گذاری نمایند که بیشترین بازده و کمترین ریسک را داشته باشد. بنابراین باید در کنار تمرکز بر افزایش سود، بر ریسک سرمایه‌گذاری نیز به‌عنوان عامل محدودکننده توجه نمود. برخلاف بازده، ریسک دارای مفهومی ذهنی و غیر کمی است (ستاد توسعه فناوری حوزه انرژی^۱، ۱۳۹۶). بنابراین می‌توان گفت ریسک‌های سرمایه‌گذاری مسئله‌ای مهم در عرصه تولید هیدروژن سبز و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. و در ایران نیز این مسئله وجود دارد.

¹ Energy Technology Development Council



در حالی که ایران از منابع طبیعی فراوان برخوردار است، با چالش‌های کاهش منابع انرژی، حفاظت از محیط زیست و توسعه پایدار با ناامنی مواجه است. با توجه به تنوع اقلیم در مناطق مختلف و کشت انواع محصولات زراعی و غذایی، این کشور پتانسیل قابل توجهی برای تنوع بخشیدن به ترکیب انرژی به ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. ایران علاوه بر جنگل‌های شمال و غرب کشور که حدود ۷ درصد از مساحت کشور را تشکیل می‌دهد، محصولات و ضایعات کشاورزی دیگری نیز دارد که می‌توان از آنها برای تولید سوخت زیستی استفاده کرد. ایران به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی مطلوب خود دارای منابع تجدیدپذیر متنوع و قابل دسترسی است که جایگزین‌های مناسبی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است (سلیمانی و همکاران، ۲۰۲۱). اما باوجود پتانسیل‌های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر ایران نتوانسته است از تمامی ظرفیت‌های استفاده کند و این ضعف و کاستی می‌تواند ریشه در مسائلی همچون عدم سیاست‌گذاری صحیح هزینه سرمایه اولیه بالا؛ عدم آگاهی در مورد منابع تجدیدپذیر و دانش ناکافی در مورد مزایای داشته باشد. با این حال، کشور نیازمند دستیابی به تنوع منابع انرژی و امنیت انرژی است که گام‌های اساسی در جهت رشد اقتصادی پایدار و توسعه اجتماعی است. بنابراین اتخاذ سیاست‌های مناسب از سوی سازمان‌ها و نهادهای ذیربط می‌تواند گامی موثر جهت توسعه و تولید منابع انرژی تجدیدپذیر همچون هیدروژن سبز محسوب شود (عریانی و همکاران، ۲۰۲۱).

همچنین یکی دیگر از راهبردهای توسعه و تولید انرژی‌های تجدیدپذیر تامین مالی پروژه است. اما تامین منابع مالی و جذب سرمایه در پروژه‌های تولید انرژی تجدیدپذیر در کشورهای در حال توسعه با چالش‌هایی مواجه است (Barroco and Herrera, 2019). که همین امر سرمایه‌گذاری در تولید این انرژی‌ها را با ریسک‌های مواجه کرده است. برای تسهیل سرمایه‌گذاری مولد، ارزیابی ریسک‌های سرمایه‌گذاری به عنوان پیش نیاز برای توسعه یک نقشه راه ملی ضروری است. چنین ارزیابی به سیاست‌گذاران دولت این امکان را می‌دهد که نقش نظارتی مؤثرتری را ایفا کنند و بسته‌ای قانع کننده به سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی ارائه دهند (رسولی و همکاران، ۲۰۲۳). از اینرو با شناسایی و بررسی مهم‌ترین موانع، سیاست‌های اتخاذی و ریسک‌های سرمایه‌گذاری، سیاست‌گذاران و دست‌اندرکاران می‌توانند منابع را به طور مؤثر برای کاهش خطرات با بیشترین پتانسیل برای تأثیر منفی تخصیص دهند. توسعه راهبردهای کاهش موثر بر اساس این تجزیه و تحلیل کلیدی برای کاهش احتمال شکست پروژه‌های پرهزینه است (آزادیا و همکاران، ۲۰۲۳). براین اساس پژوهش حاضر درصدد است با مروری کتابخانه‌ای سیاست‌های اتخاذ شده جهت تولید هیدروژن سبز و ریسک‌های سرمایه‌گذاری در تولید انرژی سبز را مورد بررسی و مطالعه قرار دهد.

۲- ادبیات تجربی پژوهش

۲-۱- ادبیات تجربی پژوهش در ایران

رسولی و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی با عنوان "ارزیابی عوامل خطر در سرمایه‌گذاری انرژی خورشیدی: رویکردی استراتژیک برای بازار ایران" انجام داده‌اند. هدف این تحقیق معرفی یک رویکرد استراتژیک جدید برای تحلیل ریسک‌های سرمایه‌گذاری در سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر با تمرکز ویژه بر انرژی خورشیدی است، این مطالعه از تحلیل کیفی برای اولویت‌بندی ریسک‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری انرژی خورشیدی در ایران استفاده کرد. در مجموع پنجاه و پنج ریسک در شش دسته شناسایی شد و هر ریسک بر اساس معیارهای تحلیل اثر حالت شکست (FMEA)، اثربخشی استراتژی‌های پاسخ، و پتانسیل آن برای ایجاد یک تهدید یا ارائه یک فرصت ارزیابی شده است. متعاقباً، ریسک‌ها به شبکه‌های دو عاملی و سه عاملی طبقه‌بندی شدند و همه ریسک‌های شناسایی شده در ۹ سطح رتبه‌بندی شدند تا یک برنامه واکنش استراتژیک ایجاد شود. در نهایت نتایج پژوهش حاکی از این است که ریسک‌های فنی و بازار فرصت‌های بیشتری را ارائه می‌کنند، در حالی که ریسک‌های مرتبط با سیاست‌گذاری، جنبه‌های مالی، عوامل عملیاتی و ملاحظات اجتماعی به طور کلی تهدیدهای مهمی هستند.



کاکاوند و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی با عنوان "ارزیابی فنی-اقتصادی تولید هیدروژن سبز و آمونیاک از انرژی باد و خورشید در ایران" انجام داده‌اند. این مقاله یک ارزیابی فنی و اقتصادی جامع از نیروگاه‌های بالقوه تولید هیدروژن و آمونیاک سبز در نقاط مختلف ایران با منابع قوی باد و خورشید ارائه می‌کند. مطالعه در پنج مرحله سازماندهی شده است. ابتدا با توجه به چگالی باد و داده‌های پتانسیل PV خورشیدی، سه مکان در ایران با بالاترین قدرت باد، تابش خورشیدی و ترکیبی از هر دو انرژی باد/خورشید انتخاب شدند. برای مقایسه، یک مورد پایه نیز در کنار بندر صادراتی با پتانسیل طبیعی خورشیدی و بادی، اما بدون فاصله از بندر صادراتی در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم، تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ مشابه تسهیلات با الکترولیزهای غشای تبادل پروتون برای همه این مکان‌ها با استفاده از پلتفرم شبیه‌سازی HOMER Pro مدل‌سازی شد. در مرحله بعد، هیدروژن تولید شده و نیتروژن به دست آمده از یک واحد جداسازی هوا به فرآیند Haber-Bosch عرضه می‌شود تا آمونیاک را به عنوان یک حامل هیدروژن سنتز کنند. از آنجایی که الکترولیز آب دریا از نزدیکترین فاصله دریا در یک نمک‌زدایی تصفیه می‌شود، نیاز به مقدار قابل توجهی آب با کیفیت خاص دارد و از آنجایی که ایران از کمبود آب رنج می‌برد، این مقاله برخلاف بسیاری از مطالعات تحقیقاتی مشابه، به چالش‌های مرتبط با سیستم تامین آب در فرآیند تولید هیدروژن می‌پردازد. در این راستا در گام چهارم این مطالعه، فرض شده است که از کارخانه به مکان‌های سایت ارسال می‌شود. در نهایت، از آنجایی که این مطالعه قصد دارد امکان هیدروژن سبز را بررسی کند صادرات از ایران، یک مدل لوله کشی دقیق برای انتقال آب، هیدروژن و آمونیاک به محل تولید و بندر صادراتی در مرحله آخر ایجاد شده است که مسیرهای واقعی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در نظر می‌گیرد و تمام پمپ‌ها را در ایستگاه‌های فشرده‌سازی مورد نیاز برای انتقال این رسانه‌ها نظر می‌گیرد.

قریشی و مرانلو پژوهشی (۲۰۲۱) با عنوان "زیرساخت‌های ضروری و سیاست‌های مرتبط برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای در حال توسعه نفت‌خیز: مورد ایران" انجام داده‌اند. هدف این مقاله، معرفی زیرساخت‌های حیاتی مورد نیاز، اعم از سخت و نرم، و شناسایی آن دسته از سیاست‌های غالب است که بیشترین ارتباط را برای توسعه‌های RE در کشورهای نفت‌خیز مانند ایران است. زیرساخت‌های معرفی شده از طریق بینش‌های انتقادی تخصصی در رویکردهای RE در برخی از کشورهای در حال توسعه به عنوان نمونه‌های الگویی برای راه حل‌های تشخیصی کمکی و دستورالعمل‌های حل مسئله ارائه شده در این مقاله تحقیقاتی تأیید شده‌اند. نتایج تحلیل داده‌های به دست آمده در این پژوهش حاکی از آن است که حمایت‌های دولت از سرمایه‌گذاران خارجی، قرارداد خرید نیرو و خوراک تعرفه فعلی به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۵۲ و ۰/۶۸ اثرات مثبت بر بازار انرژی‌های برق ایران دارند.

سلیمانی (۲۰۲۱) پژوهشی با عنوان "مروری بر سیاست‌های انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران" انجام داده است. این مطالعه در گام نخست مروری است بر وضعیت فعلی انرژی و سیاست‌های انرژی در ایران و سپس از تحلیل علیت گرنجر برای آزمایش روابط بین متغیرهای در نظر گرفته شده استفاده می‌کند. نتایج این مطالعه حاکی از این است که فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در حال حاضر نقش مهم و مناسبی در تامین انرژی ایران ندارند. تحلیل علیت گرنجر همچنین نشان می‌دهد که یک رابطه علی یک طرفه بین رشد اقتصادی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و غیر قابل تجدید وجود دارد.

فیروزجانی و همکاران (۲۰۱۸) با عنوان "تجزیه و تحلیل میانگین وزنی مرتب شده مبتنی بر GIS ارزیابی انرژی خورشیدی در ایران: شرایط فعلی و برنامه ریزی آینده" انجام داده‌اند. در این مطالعه، از روش میانگین وزنی مرتب شده (OWA) برای ادغام ایده ریسک در تحقیقات پایه GIS برای تعیین مناطق بهینه استفاده شده است و از یک تحلیل مبتنی بر OWA به دلیل توانایی آن در داشتن استراتژی‌های مختلف از بسیار بدبینانه تا بسیار خوش بینانه استفاده شده است.



نتایج این پژوهش حاکی از این است که بخش‌های شمالی و غربی سطح تابش خورشیدی کمتری دارند در حالی که نواحی شرقی و جنوبی انرژی بیشتری دارند.

۲-۲- ادبیات تجربی در سایر کشورها

سارکر و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی با عنوان " چشم انداز تولید هیدروژن سبز از منابع انرژی تجدیدپذیر ترکیبی: بررسی" انجام داده‌اند. این مطالعه بر ارزیابی انتقادی فناوری‌های الکترولیز خورشیدی، بادی و هیبریدی در تولید هیدروژن متمرکز شده است و چالش‌ها و فرصت‌های کلیدی مرتبط با استقرار در مقیاس تجاری مورد توجه قرار داده است. در نهایت، کاربردهای بالقوه و دامنه آنها برای تجزیه و تحلیل موانع مهم برای توسعه تجاری کلی سیستم‌های تولید هیدروژن مبتنی بر باد خورشیدی مورد بحث قرار گرفته است. این مطالعه نشان داده است که به نظر می‌رسد تولید هیدروژن بهترین گزینه برای استفاده برای اهداف متعدد است که نقش حامل انرژی سوخت و روش ذخیره‌سازی انرژی را ترکیب می‌کند. این مطالعه بیان می‌کند که به نظر می‌رسد تولید هیدروژن بهترین گزینه برای استفاده برای اهداف متعدد است که نقش حامل انرژی سوخت و روش ذخیره‌سازی انرژی را ترکیب می‌کند.

کو و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی با عنوان " از خطرات تا پاداش: راهنمای جامع برای تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری پایدار در انرژی‌های تجدیدپذیر با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری فازی مبتنی بر حالت چهره ترکیبی" انجام داده‌اند. در این تحقیق به بررسی ریسک‌ها و مزایای تصمیمات سرمایه‌گذاری پایدار برای پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته شده است. در این محدوده، یک مدل جدید با ادغام تکنیک‌های مختلف ارائه شده است. در این پژوهش اول، ارزیابی‌های برای تصمیم‌های سرمایه‌گذاری پایدار در انرژی‌های تجدیدپذیر با تصمیم‌گیری عصبی و فیلتر مشارکتی انجام شده است. در مرحله دوم، وزن عوامل خطر سرمایه‌گذاری انرژی پایدار با فازی گروهی عصبی کوانتومی DEMATEL (QNSLF) با برش طلایی محاسبه شده است. ثالثاً، جایگزین‌های پاداش برای تصمیم‌گیری پایدار با Neuro QNSLF TOPSIS تجزیه و تحلیل شده‌اند. نکته مهم دیگر این مطالعه این است که تکنیک جدیدی به نام تصمیم‌گیری عصبی نیز ایجاد شده است. در این تکنیک حالت چهره کارشناسانی که ارزیابی می‌کنند در نظر گرفته می‌شود. تعریف شده است که تغییرات تکنولوژیکی بیشترین اهمیت را دارند. علاوه بر این در این مطالعه مشوق‌های دولتی به عنوان اساسی‌ترین پاداش برای بهبود سرمایه‌گذاری‌های پایدار در انرژی‌های تجدیدپذیر معرفی شده‌اند.

عرفانی و توکلان (۲۰۲۳) پژوهشی با عنوان " مدل ارزیابی ریسک پروژه‌های سرمایه‌گذاری انرژی بادی با استفاده از تصمیم‌گیری گروه فازی اصلاح شده و شبیه‌سازی مونت کارلو" انجام داده‌اند. این مقاله مدلی را پیشنهاد می‌کند که با در نظر گرفتن دانش و سوابق کارشناسان، ریسک‌های پروژه‌های سرمایه‌گذاری در منابع انرژی تجدیدپذیر از قبیل انرژی بادی را ارزیابی می‌کند. سپس، یک مدل یکپارچه از ارزیابی ریسک و برآورد هزینه ایجاد می‌شود. این مدل از سه مرحله اصلی تشکیل شده است: شناسایی ریسک بر اساس مرور ادبیات سیستماتیک (SLR)؛ تجزیه و تحلیل ریسک فاز ۱ بر اساس تصمیم‌گیری گروه فازی اصلاح شده. و تجزیه و تحلیل ریسک فاز ۲ بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو. مزایای اصلی مدل پیشنهادی عبارتند از: (الف) ارائه یک شناسایی ریسک جامع در پروژه‌های سرمایه‌گذاری انرژی بادی. (ب) استفاده از یک مدل فازی اصلاح شده برای بهبود فرآیند ارزیابی ریسک با در نظر گرفتن صلاحیت متخصص در پروژه‌های انرژی بادی. و (ج) ایجاد یک مدل یکپارچه برای ارزیابی جریان نقدی سرمایه‌گذاری. در نهایت نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مهم‌ترین ریسک‌ها «تغییر در مقررات و سیاست‌ها» است. «وابستگی به بازار بین‌المللی برای واردات مواد خام» و «رقابت در بازار». از سوی دیگر، ارزیابی مالی در شرایط عدم قطعیت نشان می‌دهد که سودآوری سرمایه‌گذاری می‌تواند متفاوت باشد و بر اهمیت فرآیند مدیریت ریسک مناسب برای تضمین موفقیت سرمایه‌گذاری تأکید می‌کند.



خو و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی با عنوان "ارزیابی ریسک سرمایه‌گذاری برای نیروی بادی خشکی و فراساحلی بر اساس روش دینامیک سیستم" انجام داده‌اند. در این مطالعه، یک چارچوب تحقیقاتی را پیشنهاد کرده است که یک روش پویایی سیستم چند سطحی را با هدف تحلیل ریسک سرمایه‌گذاری پروژه‌های انرژی بادی ایجاد می‌کند. از طریق کوش در روابط متقابل بین عوامل کلیدی مانند ریسک بازار، ریسک فنی و ریسک سیاست، این مطالعه روند ریسک سرمایه‌گذاری برای انرژی بادی خشکی و فراساحلی را در یک دوره ۱۵ ساله شبیه‌سازی کرده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که (۱) ریسک سرمایه‌گذاری انرژی بادی خشکی و فراساحلی یک تغییر ثابت را نشان می‌دهد، با ریسک سیاست و ریسک فنی که در طول زمان روند نزولی را نشان می‌دهد و ریسک بازار یک روند نزولی کلی با نوسانات را نشان می‌دهد (۲). در مرحله اولیه شبیه‌سازی، ریسک سرمایه‌گذاری انرژی بادی خشکی کمتر از نیروی بادی فراساحلی است. با این حال، پس از ده سال، ریسک سرمایه‌گذاری انرژی بادی فراساحلی کاهش می‌یابد. این مطالعه نشان می‌دهد که ریسک سیاست، عامل اصلی ریسک سرمایه‌گذاری برای انرژی بادی در مراحل اولیه است، اما با بهبود فناوری و تکامل سیاست، ریسک بازار به ریسک اصلی سرمایه‌گذاری تبدیل می‌شود. یافته‌های این پژوهش می‌توانند به شبیه‌سازی و ارزیابی تأثیر سیاست‌های مربوطه کمک کنند و راهنمایی‌های حیاتی برای توسعه انرژی بادی ارائه دهند.

الملحم و یوسف (۲۰۲۳) پژوهشی با عنوان "تحلیل سناریو برای سرمایه‌گذاری انرژی تجدیدپذیر با استفاده از چارچوب ترکیبی: مطالعه موردی در عربستان سعودی" انجام داده‌اند. این مطالعه با هدف تجزیه و تحلیل سناریوهای بالقوه سرمایه‌گذاری انرژی های تجدیدپذیر در آینده و معیارهای ارزیابی که بر انتخاب یک سناریوی بهینه تأثیر می‌گذارد، می‌باشد. برای اولین بار در مطالعه بخش انرژی های تجدیدپذیر، یک چارچوب ترکیبی برای رسیدگی به فرآیند انتخاب پیشنهاد شده است. چارچوب ترکیبی پیشنهادی این رویکردهای چند رشته‌ای را ترکیب می‌کند: در نظر گرفتن مفروضات اقتصاد کلان، استفاده از اطلاعات تاریخی به عنوان داده‌های کمی و استخراج قضاوت از کارشناسان تصمیم‌گیری به عنوان داده‌های کیفی. علاوه بر این، با استفاده از نظریه مجموعه فازی شهودی، عدم قطعیت در مورد جهت آینده سرمایه‌گذاری‌های انرژی تجدیدپذیر را برطرف می‌کند. کاربرد چارچوب ترکیبی پیشنهادی برای یک مورد در عربستان سعودی در سه مرحله انجام شد. فاز اول مدل ورودی-خروجی لئونتیف را اعمال کرد و سه سناریوی سرمایه‌گذاری را تا سال ۲۰۳۰ پیشنهاد کرد: «سناریوی مبتنی بر» (سرمایه‌گذاری ۱۱۲ میلیارد ریال سعودی)، یک «سناریوی جایگزین ۱» (سرمایه‌گذاری ۷۵ میلیارد ریال سعودی) و سناریوی جایگزین ۲ (سرمایه‌گذاری ۲۵ میلیارد ریال سعودی). مرحله دوم پنج معیار تصمیم‌گیری را ایجاد کرد که هنگام انتخاب یک سناریوی سرمایه‌گذاری بهینه در نظر گرفته می‌شوند، یعنی: "اقتصادی"، "محیط زیست"، "اجتماعی"، "ترجیحات عمومی" و "ریسک". مرحله سوم از مدل پشتیبانی تصمیم گروه فازی برای رتبه‌بندی سناریوها استفاده کرد. نتایج نشان می‌دهد که «سناریوی مبتنی بر» و «سناریوی جایگزین ۱» همیشه سناریوهای سرمایه‌گذاری سازش هستند و «سناریوی جایگزین ۲» ترجیح داده نمی‌شود. برای تایید نتایج از تحلیل حساسیت استفاده شد.

عزیز و جهان (۲۰۲۳) پژوهشی با عنوان "عوامل تعیین‌کننده سرمایه‌گذاری های توسعه بین المللی در انرژی های تجدیدپذیر در کشورهای در حال توسعه" انجام داده‌اند. این تحقیق به بررسی نقش محیط نظارتی، اقتصادی و اجتماعی سیاسی کشورهای در حال توسعه در جذب سرمایه‌گذاری از منابع مالی توسعه بین المللی می‌پردازد. این مطالعه از داده‌های تابلویی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ برای ۸۶ کشور در حال توسعه از مناطق مختلف جهان استفاده می‌کند. همچنین ناهمگونی عوامل را در کشورهای دارای سطوح مختلف توسعه اقتصادی بررسی می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که حمایت نظارتی برای انرژی‌های تجدیدپذیر، مانند FIT ها، مناقصه و سرمایه‌گذاری عمومی نقش مهمی ایفا می‌کند، محققین این مطالعه دریافتند که عدم دسترسی به الکتریسیته یا انرژی پاک پخت و پز، یا سطوح پایین انرژی های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی، بودجه



توسعه را جذب نمی‌کند. با این حال، وابستگی زیاد به انرژی تأثیر مثبتی دارد. ابزارهای سیاست و ویژگی‌های کشور به طور متفاوتی بر جریان ورودی وام‌ها و کمک‌های بلاعوض تأثیر می‌گذارد.

ایل‌بهار و همکاران (۲۰۲۲) پژوهشی با عنوان "ارزیابی ریسک سرمایه‌گذاری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر: تحلیل اثر و حالت شکست اصلاح‌شده بر اساس تئوری چشم‌انداز و AHP فازی شهودی" انجام داده‌اند. از آنجایی که ارزیابی ریسک فرآیندی مبتنی بر قضاوت‌های متخصص است، عدم تصمیم‌گیری و سوگیری شناختی کارشناسان باید حذف شود. بنابراین، در این مقاله یک حالت شکست و تجزیه و تحلیل اثر تغییر یافته است (FMEA) بر اساس تئوری چشم‌انداز و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی شهودی با ارزش فاصله‌ای (AHP) برای ارزیابی ریسک‌های سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر برای اولین بار معرفی شده است. در نتیجه رویکرد ارزیابی ریسک پیشنهادی، ریسک‌های سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر با غلبه مؤثر بر عدم تصمیم‌گیری و سوگیری شناختی کارشناسان اولویت‌بندی شده‌اند.

آبا و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با عنوان "چارچوب مدیریت ریسک جامع برای سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر" انجام داده‌اند. این مقاله به بررسی ریسک‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی و کاهش ریسک برای کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه با تمرکز بر کشورهای جنوب صحرای آفریقا (SSA) می‌پردازد. این بررسی نشان می‌دهد که، در حالی که تجزیه و تحلیل و ارزیابی ریسک عمدتاً از روش‌های تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره نیمه کمی (MCDA) و پویایی سیستم (SD) برای کشورهای در حال توسعه استفاده می‌کنند، روش‌های کیفی نیز برای شناسایی ریسک‌های فنی و اقتصادی اقدامات کاهش استفاده شده است. در حالی که روش‌های MCDA و SD می‌توانند ریسک‌های اجتماعی، سیاسی و سیاستی را ارزیابی می‌کنند، اثربخشی نیز با استفاده از روش‌های SD و کمی مانند مدل سازی مبتنی بر عامل و شبیه‌سازی مونت کارلو مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این مقاله همچنین یک "چارچوب مدیریت ریسک سرمایه‌گذار چند بعدی جامع" را معرفی می‌کند که می‌تواند برای شناسایی اقدامات برای بهبود ریسک‌های سرمایه‌گذاری به روشی ساختاریافته استفاده شود. این چارچوب به چهار محدودیت اساسی مشاهده شده در ادبیات موجود می‌پردازد، و تشخیص می‌دهد که ریسک‌های RE پیچیده هستند و شامل دیدگاه‌های چند رشته‌ای است که دارای تعامل و بازخورد با سایر ریسک‌ها، بازیگران و اقدامات آنها است. این بررسی مرجع ارزشمندی برای سرمایه‌گذاران، سیاست‌گذاران و محققان ارائه می‌کند و فهرستی از ریسک‌ها، روش‌های به کار رفته در ادبیات، از جمله چارچوبی برای شناسایی اقدامات تأثیرگذار برای بهبود سطوح ریسک ارائه می‌دهد.

ژو و همکاران (۲۰۲۱) پژوهشی با عنوان "تجزیه و تحلیل اولویت‌های ریسک برای پروژه‌های سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری فازی مردد هیبریدی IT2 با کاهش آلفا" انجام داده‌اند. هدف از این مطالعه شناسایی ریسک‌های مهم برای پروژه‌های سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر است. در این راستا، یک مدل جدید تصمیم‌گیری چند معیاره ترکیبی (MCDM) بر اساس اصطلاحات زبانی مردد پیشنهاد شده است. مجموعه‌های سطح آلفا. این مدل دارای سه فاز مختلف است. ابتدا ابعاد و معیارها در رابطه با ریسک‌های سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر تعریف شده است. در بخش دوم، سطوح معنی‌داری این عوامل با کمک ANP مبتنی بر DEMATEL (DANP) فازی نوع ۲ (IT2F) محاسبه می‌شود. در نهایت، انواع سرمایه‌گذاران بر اساس آگاهی از ریسک با عنوان بالا، متوسط و پایین در هنگام استفاده از IT2F QUALIFLEX مردد رتبه‌بندی می‌شوند. در تمام تحلیل‌ها، مجموعه‌های سطح آلفا در نظر گرفته می‌شوند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اثربخشی سازمانی و کارایی هزینه مهم‌ترین عوامل سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. از سوی دیگر، در این پروژه‌ها باید ریسک متوسطی را پذیرفت. در این پژوهش موفقیت بیشتر پروژه‌های سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر، توصیه می‌شود بخش‌های درون شرکت با یکدیگر سازگار باشند. برای این منظور باید



اقدامات لازم برای بهبود ارتباطات بین بخش‌ها انجام شود. نکته مهم دیگر این است که کنترل هزینه باید به طور موثر انجام شود تا به عملکرد پروژه‌های سرمایه‌گذاری انرژی تجدیدپذیر کمک کند.

تقی زاده حصاری و یوشینو (۲۰۲۰) پژوهشی با عنوان "راه حل‌های پایدار برای تامین مالی سبز و سرمایه‌گذاری در پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر" انجام داده‌اند. هدف این مقاله برجسته کردن چالش‌های تامین مالی سبز و سرمایه‌گذاری در پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و ارائه راه‌حل‌های عملی برای پر کردن شکاف تامین مالی سبز می‌باشد. راهکارهای عملی ارائه شده در این پژوهش جهت تامین منابع مالی شامل افزایش نقش مؤسسات مالی عمومی و مؤسسات مالی غیربانکی (صندوق بازنشستگی و شرکت‌های بیمه) در سرمایه‌گذاری‌های سبز بلندمدت، استفاده از مالیات سرریز برای افزایش نرخ بازده پروژه‌های سبز، توسعه طرح‌های تضمین اعتبار سبز است. از سوی دیگر این مقاله استراتژی‌های مدیریت ریسک سرمایه‌گذاری از قبیل کاهش ریسک اعتباری، ایجاد صندوق‌های اعتماد مبتنی بر جامعه، و پرداختن به ریسک‌های سرمایه‌گذاری سبز از طریق کاهش ریسک مالی و سیاستی را معرفی کرده است.

اگلی (۲۰۲۰) پژوهشی با عنوان "ریسک سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر: بررسی تغییرات در طول زمان و محرک‌های اساسی" انجام داده است. این مطالعه پنج نوع ریسک سرمایه‌گذاری RET مرتبط (کاهش، سیاست، قیمت، منبع و فناوری) را شناسایی کرده است. این پژوهش نشان داده است که حق بیمه و ریسک سرمایه‌گذاری برای فتوولتائیک خورشیدی و فناوری‌های بادی خشکی در هر سه کشور کاهش یافته است. این پژوهش سیاست‌های: افزایش قابلیت اطمینان فناوری با هزینه کمتر، در دسترس بودن داده‌ها، ابزارهای ارزیابی بهتر و سیاست‌های معتبر و پایدار را به عنوان عناصر مهم کاهش ریسک سرمایه‌گذاری معرفی کرده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که، در حالی که ریسک‌های سیاست و فناوری در طول زمان اهمیت نسبتاً کمتری پیدا کرده‌اند، ریسک‌های کاهش و قیمت اهمیت نسبتاً بیشتری پیدا می‌کنند.

ژنگ و دانگ (۲۰۲۰) پژوهشی با عنوان "مدل شماره اولویت خطر وزن دار آنتروپی دنگ برای تحلیل حالت شکست و اثرات" انجام داده‌اند. در این مطالعه مطرح شده است که تجزیه و تحلیل حالت و اثرات شکست یک پارامتر حیاتی در اولویت ریسک است که حاصل ضرب وقوع (O)، شدت (S) و تشخیص (D) یک حالت خرابی است. برای مقابله با عدم قطعیت در ارزیابی‌های ارائه‌شده توسط متخصصان حوزه، یک عدد اولویت خطر وزن آنتروپی جدید دنگ برای تجزیه و تحلیل حالت و اثرات شکست در چارچوب نظریه شواهد (DST) Dempster-Shafer پیشنهاد شده است. یک عدد اولویت خطر وزن آنتروپی جدید دنگ اهمیت نسبی را در عوامل خطر و کارشناسان تجزیه و تحلیل حالت و اثرات شکست در نظر می‌گیرد. درجه نامطمئن ارزیابی‌های عینی که از سوی کارشناسان به دست می‌آید با آنتروپی دنگ اندازه‌گیری می‌شود. وزن یک متخصص از وزن سه عامل خطر تشکیل شده است که به طور مستقل از ارزیابی‌های متخصص به دست می‌آید. در مدل شماره اولویت خطر وزن دار آنتروپی دنگ، استراتژی تخصیص وزن برای هر متخصص انعطاف‌پذیر و سازگار با موقعیت واقعی تصمیم‌گیری است. وزن نسبی مبتنی بر آنتروپی نماد اهمیت نسبی است. به طور جزئی، هر چه درجه نامطمئن بودن یک عامل خطر از سوی یک متخصص بیشتر باشد، وزن عامل خطر مربوطه کمتر خواهد بود و بالعکس.

لیو و ژنگ (۲۰۱۷) پژوهشی با عنوان "مدل ارزیابی ریسک سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر بر اساس پویایی سیستم" انجام داده‌اند. موضوع ریسک سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر در این مقاله با استفاده از پویایی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش اول کار، سه ریسک اصلی در سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر، ریسک فنی، ریسک سیاست و ریسک بازار مورد بحث قرار گرفته و سپس نمودار حلقه علی ریسک سرمایه‌گذاری و مدل ارزیابی ریسک با روش دینامیک سیستم ایجاد شده است. پس از آن یک مثال عددی در قسمت آخر مقاله آورده شد. نتیجه مثال عددی نشان داد که



ریسک سیاست عامل اصلی تأثیرگذار بر سرمایه‌گذاری در مرحله توسعه اولیه بوده است، در حالی که ریسک سیاست و ریسک فناوری به تدریج کاهش می‌یابد، ریسک بازار به تدریج به اصلی‌ترین عدم اطمینان مؤثر بر سرمایه‌گذاری در مرحله توسعه بالغ تبدیل شده است.

۳- ادبیات نظری

۳-۱ هیدروژن سبز

یکی از بهترین گزینه‌ها برای ذخیره انرژی از منابع تجدیدپذیر، هیدروژن است که می‌تواند برق را با کمترین هزینه برای روزها، هفته‌ها یا حتی ماه‌ها ذخیره کند. هیدروژن فراوان‌ترین عنصری است که در کیهان یافت می‌شود و بنابراین، بسیاری از دانشمندان آن را سوخت پاک آینده می‌دانند. هیدروژن حدود ۷۳ درصد از جرم مشاهده شده کیهان را تشکیل می‌دهد و رایج‌ترین عنصر در جهان است (Koyuncu et al., 2020).

در سال ۱۷۶۶، هنری کاوندیش گاز سبک وزنی را کشف کرد که وقتی در هوا می‌سوخت، به آب تبدیل می‌شد. در سال ۱۷۸۷، آنتوان لاولازیه این گاز جدید را «هیدروژن» نامید، که ترکیبی از ریشه‌های هیدروژن و ژن‌ها است که به معنای واقعی کلمه «آب‌ساز» است. چندی بعد، دانشمندان دریافتند که با افزودن الکتریسیته به آب، می‌توان هیدروژن را با واکنش معکوس تولید کرد. امروزه از هیدروژن به عنوان ماده اولیه برای سنتز شیمیایی استفاده می‌شود، اما کاربردهای دیگر از جمله ذخیره انرژی و سوخت‌های حمل و نقل به واقعیت تبدیل شده‌اند. اگر هیدروژن از برق تجدیدپذیر تولید شود، هیچ‌گونه گاز گلخانه‌ای منتشر نمی‌کند، به این معنی که می‌تواند یک بازیگر کلیدی در نبرد علیه تغییرات آب و هوایی باشد (Beswick et al., 2021).

یکی از مشکلات مرتبط با منابع انرژی تجدیدپذیر، جدای از وقفه در تولید انرژی، مشکل ذخیره سازی برق تولید شده به طور عملی است زیرا ذخیره آن از طریق باتری به دلیل ظرفیت محدود در فناوری فعلی، گزینه مناسبی نیست، حتی اگر بسیاری از آنها مطالعات روی آن کار می‌کنند. این مشکل را می‌توان با تولید هیدروژن سبز که می‌تواند در هر زمان ذخیره و استفاده شود حل کرد. علیرغم اینکه هیدروژن برای احتراق بدون شعله مناسب است و مستقیماً در موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود، توسعه فناوری هیدروژن در سراسر جهان عمدتاً بر روی فناوری پیل سوختی متمرکز شده است. اگرچه هیدروژن هنگام استفاده برای کاربردهای انرژی گازهای گلخانه‌ای را تخلیه نمی‌کند، اما پایداری آن به تمیزی مسیر تولید هیدروژن و انرژی مورد استفاده در طی فرآیند به دست آوردن بستگی دارد (Dawood et al., 2020). هیدروژن به شکل مولکولی را می‌توان از منابع مختلفی مانند سوخت‌های فسیلی، زیست توده و آب به دست آورد (Megía et al., 2021). هیدروژن یک منبع انرژی ثانویه (ذخیره‌ای) است و باید با استفاده از یک منبع انرژی اولیه تولید شود و واکنش همیشه از طریق فرآیندهای تبدیل متحمل تلفات می‌شود، بنابراین هزینه تولید هیدروژن بیشتر از هزینه انرژی مورد استفاده برای تولید هیدروژن است. هیدروژن پتانسیل قابل توجهی برای کربن زدایی صنعت دریایی با استفاده از انرژی باد فراساحلی خارج از شبکه برای تولید فراهم می‌کند (Ishaq et al., 2022).

هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی سازگار با محیط زیست در راستای رفع مشکل عدم قطعیت حضور انرژی‌های تجدیدپذیر و وابستگی آن‌ها به زمان و شرایط جوی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این ماده از منابع متفاوت و با روش‌های متنوعی قابل تهیه است. در پژوهش‌های گذشته، از سوخت‌های فسیلی در تولید هیدروژن استفاده شده است. اما با توجه به محدودیت‌های متعددی علی‌الخصوص محدودیت در دسترسی به این دسته از مواد در آینده‌نچندان دور و همچنین مشکل بزرگ خروج گازهای گلخانه‌ای در حین تولید هیدروژن در اثر به کارگیری این روش‌ها، روش جدیدی مبتنی بر استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و سبز به عنوان انرژی پیشران تولید هیدروژن از مورد توجه قرار گرفته است (کاکاوند و همکاران، ۲۰۲۳).

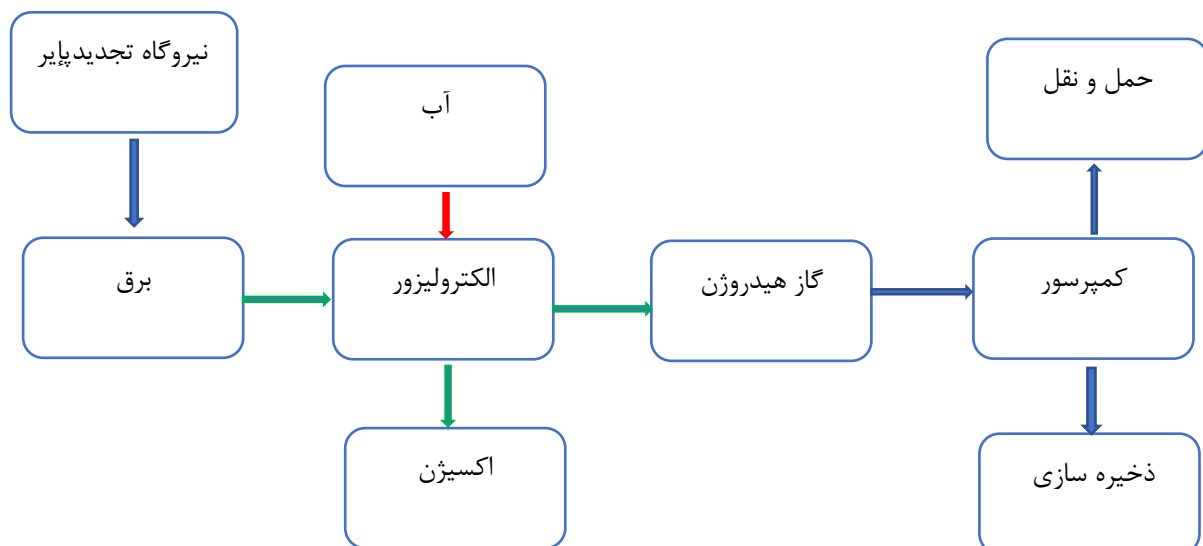


هیدروژن سبز شکلی از گاز هیدروژن است که با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد یا انرژی خورشیدی از طریق فرآیندی به نام الکترولیز تولید می‌شود. زنجیره تامین هیدروژن سبز شامل چندین نهاد به هم پیوسته مانند ارائه دهندگان انرژی‌های تجدیدپذیر، امکانات توزیع و مصرف کنندگان الکترولیزها می‌شود. هیدروژن سبز یک راه حل آزمایشی برای کربن زدایی بخش‌هایی است که به سختی کاهش می‌یابد مانند صنایع فولاد، شیمیایی، سیمان و پالایشگاه (آزادانیا و همکاران، ۲۰۲۳).

در گذشته، الکترولیز به برق زیادی احتیاج داشت که تولید هیدروژن از آن طریق چندان منطقی نبود. به دو دلیل وضعیت در حال تغییر است. اول، مقادیر قابل توجهی از انرژی تجدیدپذیر اضافی در مقیاس شبکه در دسترس است. به جای ذخیره کردن برق اضافی در آرایه‌های باتری، می‌توان از برق اضافی برای هدایت الکترولیز آب، برق به شکل هیدروژن استفاده کرد. دوم، الکترولیزرها کارایی بیشتری دارند. شرکت‌ها در حال کار برای تولید الکترولیزرهایی هستند که بتوانند هیدروژن سبز را به همان ارزانی مانند هیدروژن خاکستری یا آبی تولید کنند و تحلیلگران انتظار دارند در دهه آینده به این هدف برسند. اگرچه هیدروژن سبز هنوز در مراحل ابتدایی است، کشورهای - به ویژه کشورهای دارای انرژی تجدیدپذیر ارزان - در این فناوری سرمایه‌گذاری می‌کنند.

اگرچه هیدروژن پتانسیل زیادی برای استفاده برای تولید انرژی پاک دارد، در حال حاضر تنها مقدار کمی از هیدروژن تولید شده به عنوان حامل انرژی استفاده می‌شود. باقیمانده هیدروژن تولید شده به عنوان ماده خام و خوراک شیمیایی برای صنایع مختلف مانند پالایشگاه، شیمیایی و تولید فولاد استفاده می‌شود. هیدروژن را می‌توان از طریق روش‌های مختلفی تولید، ذخیره و تبدیل کرد که در اصطلاحات ساده رنگی مانند هیدروژن سبز، آبی، خاکستری و قهوه‌ای طبقه‌بندی و نمادسازی شده‌اند. این رنگ‌ها اغلب برای نشان دادن سطوح متغیر غلظت کربن از انواع مختلف تولیدشان استفاده می‌شود (آزادانیا و همکاران، ۲۰۲۳).

شکل یک شماتیک تولید هیدروژن را نشان می‌دهد. در مرحله اول، برق از یک منبع تجدیدپذیر ترکیبی (ترکیبی از توربین بادی و خورشیدی) تولید می‌شود. در مرحله دوم از الکترولیزور استفاده می‌شود. در الکترولیز، آب به عنوان محصول اصلی به گاز هیدروژن تقسیم می‌شود و گاز اکسیژن به عنوان محصول جانبی آزاد می‌شود. گاز هیدروژن بیشتر از طریق یک کمپرسور برای اهداف ذخیره سازی عبور داده می‌شود. این هیدروژن فشرده را می‌توان برای مقاصد تجاری حمل کرد. از نظر عملکرد، هیدروژن سبز تولید شده توسط الکترولیز را می‌توان برای رفع کمبود برق هیبریدی خورشیدی و باد استفاده کرد.





شکل ۱ نمودار شماتیک تولید هیدروژن سبز Sarker et al., 2023

هیدروژن علاوه بر مزایای دارای معایبی نیز می‌باشد که ساکر و همکارانش (۲۰۲۳) در پژوهش خود بطور مفصل آنها را مورد بررسی قرار داده است که در جدول ۱-۲ نیز ارائه شده‌اند.

مزایا	معایب	فرآیند تولید هیدروژن
بازده هیدروژن بالاتر، نسبت هیدروژن به کربن بالاتر، تولید هیدروژن تمیز، فرآیندهای سازگار با محیط زیست، بخار فراوانو بدون نیاز به اکسیژن.	انتشار گازهای گلخانه‌ای بالاتر، نرخ تبدیل کمتر، افزایش هزینه‌های عملیاتی، افزایش مصرف انرژی و نیاز به تامین حرارت ثابت.	اصلاح متان بخار
قابل اعتماد در عملیات، آسان و سریع در تعمیر و نگهداری، و بسیار آسان در عملیات.	ارزش گرمایی کم، رطوبت بالا و تولید قطران جامد.	گازسازی زیست توده
فشرده‌گی و کارایی خوب و پاسخ سریع.	گرانتر و ماندگاری کمتر.	الکترولیز
تمیز و قابل اعتماد با اکسیژن به عنوان محصول جانبی.	هزینه سرمایه بالا، خوردگی و سمیت.	تبادل پروتون
تمیز و اکسیژن به عنوان محصول جانبی.	راندمان پایین، قابلیت اطمینان کم و نور خورشید مورد نیاز.	فوتولیز

۲-۳ روش‌های تولید هیدروژن

• ریفورمینگ سوخت فسیلی

فرآیندهای کاتالیستی ریفورمینگ از جمله مهمترین روشهای تولید گاز سنتز و هیدروژن در صنایع به شمار می‌روند. خوراک این فرایندها هیدروکربنها میباشد که در دهه‌های اخیر گاز طبیعی با توجه به قیمت کمتر نسبت به نفت خام و فراورده‌های هیدروکربنی دیگر و فراوانی بیشتر به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای استفاده در فرآیندهای ریفورمینگ مطرح شده است. مبنای کلی فرآیندهای ریفورمینگ یکسان است ولی در بعضی از شرایط عملیاتی تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود (Holladay et al., 2008).

ریفورمینگ به سه صورت عمده صورت می‌گیرد:

۱. ریفورمینگ با آب بخار
۲. ریفورمینگ خودگرما
۳. ریفورمینگ با دی اکسید کربن

• گازی سازی زغال سنگ



هیدروژن را می‌توان همچنین با گازسازی زغالسنگ (اکسیداسیون جزئی آن) تولید کرد. در این روش زغالسنگ با اکسیژن و یا بخار آب در فشار و دمای بالا وارد واکنش شده و در نهایت گاز سنتز به وجود می‌آید.

گاز تولیدی عاری از هرگونه ناخالصی است. در ادامه فرایند منواکسیدکربن در اثر واکنش با بخار آب تحت عنوان واکنش جابجایی آب-گاز باعث تولید هیدروژن بیشتر و گاز دی اکسید کربن خواهد شد. هیدروژن تولیدی با استفاده از یک سیستم جداسازی جدا خواهد شد و دی اکسیدکربن با غلظت بالا به جا مانده نیز در مراحل بعد مورد ذخیره سازی قرار خواهد گرفت (Higman, Ch., Tam, 2014). گازی سازی زغال سنگ یک روش قابل توجه برای تولید هم زمان الکتریسیته و هیدروژن در سیستم گازی سازی با چرخه ترکیبی یکپارچه است. اگرچه هنوز این سیستم به صورت تجاری مورد بکارگیری قرار نگرفته است و تنها مطالعات تئوری و شبیه‌سازی کامپیوتری بازگوکننده قدرت بالای طرح پیشنهادی این چرخه ترکیبی است (Aranda et al., 2016).

• گازی سازی زیست توده

این فرایند به عنوان یک مسیر تکنولوژی بزرگ شناخته شده است که با به کارگیری فرایندهای کنترل شده شامل حرارت، بخار و اکسیژن منجر به تبدیل زیست توده به هیدروژن و محصولات دیگر بدون عمل سوختن خواهد شد. بنابراین میزان تولید دی اکسیدکربن نهایی کاهش خواهد یافت. این میزان به مقدار کمیت خود خواهد رسید وقتی این یک سیستم جمع آوری و ذخیره سازی کربن در کنار سیستم تولید هیدروژن قرار گیرد. این سیستم مورد توجه بسزایی قرار گرفته چرا که یک کشور می‌تواند با استفاده از زباله های آلی و یا حتی تولیدات کشاورزی بیش از حد نیاز کشور، همچنین ضایعات این صنایع تولیدی به تولید انرژی بپردازد (Heidenreich, and Foscolo, 2015).

چرخه ترموشیمیایی هیبریدی

در این روش روی روشهای تولید هیدروژن بوسیله تجزیه آب به اکسیژن و هیدروژن توسط مجموعه ای از واکنش های شیمیایی کار می‌شود. این واکنش‌های شیمیایی تنها با استفاده از حرارت دادن انجام میگیرند. با اضافه نمودن آب و حرارت به مجموعه واکنش های ترموشیمیایی، حرارت اضافی و اجزای سازنده اولیه واکنش تولید خواهند شد. این مجموعه واکنش‌ها سیکل یا فرایند تجزیه ترموشیمیایی آب خوانده می‌شود. از مشکلات موجود در این روش، محدوده قابل قبول انجام واکنش‌های ترموشیمیایی است که در آن راندمان حرارتی تبدیل انرژی باید بالاتر از الکترولیز آب باشد و مشکل دیگر استفاده از مواد قلیایی و اسیدی قوی در واکنش‌های میانی مجموعه واکنش‌های ترموشیمیایی است که معمولاً در دمای بالا کار می‌کنند تا راندمان بالاتری داشته باشند (Yamauchi et al., 2009).

• الکترولیز

زمانی که جریان الکتریکی مستقیم از محلول آبی یک الکترولیت عبور داده می‌شود هیدروژن از یک الکترود و اکسیژن از الکترود دیگر آزاد می‌شود (Wendt and Imarisio, 1998). یک سلول الکترولیز شامل یک ظرف، رو الکترود، یک محلول الکترولیت و یک جداکننده است. الکترود ها باید هادی الکتریسیته باشند و سطح مناسبی برای آزاد کردن یون ها داشته باشند. الکترولیت باید هدایت یونی بالایی داشته و از لحاظ شیمیایی پایدار و غیرقابل فرار باشد. جداکننده که از تماس الکترودها و اختلاط هیدروژن و اکسیژن جلوگیری می‌کند، باید نسبت به محلول الکترولیت سانای یونی باشد، در مقابل خوردگی مقاوم و از لحاظ مکانیکی پایدار باشد (Kato et al., 2009). الکتریسته مورد نیاز برای فرایند می‌تواند از یکسری منابع تجدیدپذیر نظیر خورشیدی، بادی و یا هسته‌ای تامین شود.



۳-۳ ارزیابی ریسک‌های سرمایه‌گذاری تولید هیدروژن سبز و انرژی‌های تجدیدپذیر

انرژی‌های تجدیدپذیر یک بخش کاملاً امیدوارکننده اما نسبتاً جدید و پرخطر است. از آنجایی که پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر جوهره نوسان و تصادفی بودن را دارند و عدم قطعیت‌های قابل توجهی را برای فعالیت‌های سرمایه‌گذاری به همراه می‌آورند، این عدم قطعیت می‌تواند منجر به زیان‌های بزرگی برای سرمایه‌گذاران شود. انرژی‌های تجدیدپذیر بخشی است که نیاز به نوآوری در سطح بالا در فناوری و مقادیر زیادی سرمایه‌گذاری، چرخه‌های سرمایه‌گذاری بلندمدت با مزایای غیرقابل پیش‌بینی دارد (Ibaha et al., 2022). از اینرو سرمایه‌گذاری در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر بطور عام و هیدروژن سبز بطور خاص با ریسک‌های همراه است. از آنجایی که تولید هیدروژن سبز در مراحل اولیه است، عوامل خطر خاصی وجود دارد که می‌تواند زنجیره تامین را تحت تأثیر قرار دهد. شناسایی و ارزیابی عوامل خطر مرتبط با زنجیره تامین هیدروژن سبز برای اجرای موفقیت‌آمیز بسیار مهم است. بنابراین، انجام یک ارزیابی ریسک کامل برای زنجیره تامین هیدروژن سبز با در نظر گرفتن مراحل حمل و نقل، ذخیره‌سازی و تولید، برای شناسایی عوامل خطر بالقوه و اثرات آنها بر محیط زیست و جامعه ضروری است (آزادینیا و همکاران، ۲۰۲۳).

عوامل خطر واقعی و درک شده بر ریسک سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر تأثیر می‌گذارد. ادراک ریسک تابعی از قضاوت ریسک (تعریف سطوح ریسک) و نگرش ریسک (منعکس‌کننده نگرش احساسی سرمایه‌گذار نسبت به ریسک قضاوت شده است (Abba et al., 2020). اکثر کشورهایی که قصد دارند منابع انرژی سنتی را با منابع انرژی تجدیدپذیر جایگزین کنند، سرمایه‌گذاری‌های عمده‌ای را در این زمینه انجام داده‌اند. از آنجایی که انرژی‌های تجدیدپذیر بخشی است که به هزینه‌های سرمایه‌گذاری زیادی نیاز دارد، ارزیابی ریسک‌های سرمایه‌گذاری برای اتخاذ بهترین تصمیمات سرمایه‌گذاری بسیار مهم است (Ibaha et al., 2022).

با افزایش تعداد سرمایه‌گذاری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، نیاز به اندازه‌گیری ریسک و عدم قطعیت مرتبط از دیدگاه ذینفعان مختلف در طول مراحل برنامه‌ریزی، ساخت و ساز و عملیات افزایش یابد (گاتزرت و کوسب، ۲۰۱۶). توسعه‌دهندگان انرژی، سرمایه‌گذاران و سیاست‌گذاران با آینده‌ای روبرو هستند که به طور ضمنی شامل ریسک‌ها و عدم قطعیت‌های فنی، مالی و سیاسی است. اگرچه فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر به طور بالقوه دارای مشخصات ریسک پایین‌تری نسبت به منابع انرژی متعارف هستند، زیرا آنها از قیمت سوخت‌های فسیلی جدا هستند، اما بسته به فناوری، کشور و رژیم نظارتی، همچنان مستلزم خطرات فنی، مالی و نظارتی قابل توجهی هستند. نوسان مولفه‌های بهای تمام شده واحدهای تولید برق، نوسان قیمت نفت خام، قیمت برق و هزینه کربن در چارچوب استراتژی کاهش تغییرات آب و هوایی جهانی، نمونه‌هایی از مولفه‌های عدم قطعیت هستند که توسعه‌دهندگان انرژی، سرمایه‌گذاران و سیاست‌گذاران سرمایه‌گذاران در بخش انرژی با آن مواجه هستند. ارزش سرمایه‌گذاری در فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر به سرعت در دهه گذشته به دلیل فشارهای سیاسی برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و مشوق‌های سیاستی برای افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی افزایش یافته است. با افزایش تعداد سرمایه‌گذاری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، نیاز به شناسایی، اندازه‌گیری و ارزیابی ریسک‌های مرتبط در طول برنامه‌ریزی، ساخت و بهره‌برداری از این فناوری‌ها نیز افزایش می‌یابد (Ioannou et al., 2017). برخی از محققین خطر حیاتی را که بر پروژه‌های انرژی بادی تأثیر می‌گذارد، شناسایی کردند. آنها ریسک‌ها را در هفت گروه اصلی طبقه‌بندی کردند: ریسک‌های تجاری، ساختمانی، عملیاتی، قانونی، بازاری، طرف مقابل و سیاسی. در نهایت، آنها پاسخ‌های خاصی را به خطرات شناسایی شده پیشنهاد کردند. آنها تأکید کردند که خطرات "قانونی و نظارتی" و "کسب و کار و بازار" موانع اصلی برای ساخت مزارع بادی خشکی و فراساحلی در اروپا هستند.



ژو و همکاران (۲۰۲۱) نیز در مطالعه خود به بررسی ریسک‌های سرمایه‌گذاری در انرژی بادی پرداختند و دریافتند که توسعه بازار انرژی، تعدادی از خطرات برای سرمایه‌گذاران در این بازار شروع شده است. در این زمینه، یکی از برجسته‌ترین ریسک‌ها رقابت است. با توجه به افزایش تقاضا و سرمایه‌گذاری در بازارهای انرژی، این بازار به طور جدی رقابتی شده است. از آنجایی که این محیط رقابتی بالا سودآوری سرمایه‌گذاران را تهدید می‌کند، توسعه استراتژی برای حل این مشکل ضروری است. در غیر این صورت امکان تداوم در بازار برای شرکت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر وجود نخواهد داشت. علاوه بر این، ناتوانی در همگامی با نوآوری‌های تکنولوژیکی نوع دیگری از ریسک است که برای سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر مهم است. تحولات در زمینه فناوری به طور مستقیم بر بخش انرژی‌های تجدیدپذیر تأثیر می‌گذارد. با توجه به این پیشرفت‌ها، ابزارها و تجهیزات مورد استفاده در زمینه انرژی نیز در حال تغییر هستند. تجهیزات جدید توسعه یافته نه تنها استفاده کارآمد از انرژی را افزایش می‌دهد، بلکه به کاهش هزینه‌ها در این فرآیند کمک می‌کند. بنابراین شرکت‌هایی که نتوانند این تحولات را دنبال کنند مزیت رقابتی خود را به میزان قابل توجهی از دست خواهند داد. همچنین برخی ریسک‌های مالی در سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر وجود دارد. به عنوان مثال اگر این پروژه سرمایه‌گذاری سودآور نباشد در دراز مدت باعث شکست پروژه می‌شود. در این زمینه عواملی وجود دارد که سرمایه‌گذاران انرژی‌های تجدیدپذیر باید به آنها توجه کنند. در این زمینه، هزینه‌ها باید تا حد امکان کاهش یابد.

آبا و همکارانش (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای ضمن شناسایی ریسک‌های تولید هیدروژن سبز، دسته‌بندی از هر نوع از ریسک را نیز به شرح زیر ارائه کرده است که می‌توان گفت این ریسک‌ها و پژوهش‌ها قابلیت تعمیم بالایی دارد:

۱. **ریسک‌های فنی** از عوامل مرتبط با نوع فناوری ناشی می‌شوند، به عنوان مثال بلوغ فناوری، ظرفیت منابع و عواملی که می‌توانند بر طراحی و اجرای فنی تأثیر بگذارند.
۲. **خطرات منابع**، خطر درآمدهای کمتر به دلیل برآورد نادرست پتانسیل منابع، مانند تغییرپذیری یا متناوب بودن تابش در توسعه خورشیدی است.
۳. **ریسک‌های خط‌مشی و نظارتی** به عدم قطعیت در دستیابی به اهداف پروژه به دلیل تغییرات چارچوب‌های قانونی، سیاست‌ها یا مقررات اشاره دارد.
۴. **خطرات سیاسی** از رویدادهای سیاسی ناشی می‌شوند که می‌توانند بر سرمایه‌گذاری‌ها تأثیر بگذارند، به عنوان مثال، تغییر دولت، اراده سیاسی، ساختارهای نهادی، رویدادهای امنیتی، تحریم‌ها و عدم تبدیل.
۵. **خطرات اقتصادی و مالی** ممکن است ناشی از عوامل اقتصادی یا مالی باشد که بر ارزش یا استقرار پروژه تأثیر می‌گذارد. این‌ها می‌تواند شامل تغییرات در محیط اقتصادی در سطح کلان باشد، به عنوان مثال، نوسانات ارز، عدم قطعیت در دسترسی به منابع مالی مناسب، عدم اطمینان درآمد.
۶. **ریسک‌های بازار** به عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات در بازارها اشاره دارد، به عنوان مثال، موانع دسترسی به بازار، تغییرات در شرایط بازار.
۷. **ریسک‌های کاهش** به دلیل کاهش غیرمنتظره، درآمدهای کمتری را به همراه دارند.
۸. **خطرات اجتماعی** به دلیل تغییرات در شرایط اجتماعی پدیدار می‌شوند، به عنوان مثال مقاومت عمومی بر الگوهای پذیرش، جمعیت‌شناسی.
۹. **خطرات زیست محیطی** ممکن است از تغییرات در مقررات زیست محیطی یا اثرات ناشی از ویژگی‌های سیستم‌های انرژی، به عنوان مثال زباله‌های سمی باشد.



مدیریت ریسک در پروژه‌های سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر شامل سه مرحله مهم است: شناسایی ریسک، ارزیابی ریسک و پاسخ به ریسک. این فرآیند به منظور افزایش احتمال وقوع خطرات مثبت و تأثیرات آنها یا کاهش احتمال وقوع خطرات منفی و تأثیرات آنها تکمیل می‌شود. از سوی دیگر، حجم زیادی از سرمایه‌گذاری‌ها در این نوع پروژه‌ها، لزوم یک فرآیند مدیریت ریسک مناسب را موجب می‌شود. ارزیابی ریسک از دو جزء اصلی تشکیل شده است که عبارتند از تجزیه و تحلیل ریسک و ارزیابی ریسک. در حالی که تجزیه و تحلیل ریسک استفاده سیستماتیک از اطلاعات موجود برای شناسایی خطرات است، ارزیابی ریسک عبارت است از بررسی قابل قبول بودن این خطرات با توجه به برخی عوامل. روش‌های ارزیابی ریسک اساساً مبتنی بر تجربه و دانش کارشناسان است (Ilbahar et al., 2022).

براساس مرور پیشینه تجربی پژوهش و مطالعه نتایج سایر پژوهش، ریسک‌های سرمایه‌گذاری تولید هیدروژن سبز با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر شناسایی و استخراج شده‌اند و در جدول شماره یک ارائه شده است. ریسک‌های سرمایه‌گذاری شناسایی شده توسط ساریر در این مقاله در قالب قالب ریسک‌های اصلی و فرعی دسته‌بندی شده‌اند.

جدول شماره یک ریسک‌های سرمایه‌گذاری تولید هیدروژن سبز با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر

ریسک‌های اصلی	ریسک‌های فرعی	محقق
ریسک فنی	ریسک فورس ماژور	Egli, 2020
	ریسک مدیریت	Egli, 2020, Rasouli et al., 2023, Angelopoulos et al., 2017
	ریسک استراتژیک	Egli, 2020, Gatzert and Kosub, 2016
	ریسک فناوری	Gatzert and Kosub, 2016, Egli, 2020, Angelopoulos et al., 2017, Li et al., 2022, Rasouli et al., 2023, Azadnia et al., 2023
	ریسک ساخت و ساز	Gatzert and Kosub, 2016, Egli, 2020, Li et al., 2022
	ریسک عملیاتی	Rasouli et al., 2023
	ریسک منابع	Egli, 2020
	ریسک ذخیره‌سازی	Azadnia et al., 2023
	ریسک حمل و نقل	Gatzert and Kosub, 2016, Egli, 2020,
	ریسک تعمیر و نگهداری	Rasouli et al., 2023, Azadnia et al., 2023
	ریسک بازار	Gatzert and Kosub, 2016, Egli, 2020, Angelopoulos et al., 2017, Li et al., 2022, Rasouli et al., 2023, Azadnia et al., 2023, Abba et al., 2022
ریسک خط‌مشی و نظارتی	ریسک اقتصادی	Azadnia et al., 2023, Abba et al., 2022
	ریسک مسئولیت قانونی	Rasouli et al., 2023, Abba et al., 2022, Egli, 2020, Gatzert and Kosub, 2016
	ریسک پذیرش اجتماعی	Rasouli et al., 2023, Abba et al., 2022, Azadnia et al., 2023
	ریسک سیاستی (سیاست‌ها)	Rasouli et al., 2023, Abba et al., 2022, Azadnia et al., 2023, Angelopoulos et al., 2017, Li et al., 2022, Rasouli et al., 2023, Azadnia et al., 2023



ریسک‌های اصلی	ریسک‌های فرعی	محقق
ریسک‌های محیط زیست (انسانی و جانوری و ...)	خطرات زیست محیطی	Abba et al., 2022, Egli, 2020
	خطرات مربوط به آب و هوا	Azadnia et al., 2023
	خطرات سلامتی	Azadnia et al., 2023

۳-۴ سیاست‌های توسعه تولید و توسعه هیدروژن سبز

سرمایه‌گذاری در صنعت انرژی‌های جدید سرمایه‌گذاری برای استقلال انرژی است و کشورهایی که بتوانند زیرساخت‌های جدید انرژی و شبکه برق خود را در رقابت برای تولید برق و توسعه اقتصادی سریع‌تر گسترش دهند، یک قدم جلوتر از رقبای خود خواهند بود (پوردربانی، ۲۰۲۰). سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی در ذخیره‌سازی انرژی برای ادغام سهم رو به رشد منابع انرژی تجدیدپذیر متغیر در سیستم‌های انرژی و تحقق اهداف بی‌طرفی آب و هوا مورد نیاز است. اتخاذ سیاست‌های صحیح و کارا ممکن است نقش مهمی در جذاب کردن سرمایه‌گذاری‌ها برای سرمایه‌گذاران خصوصی، به ویژه در مورد ذخیره‌سازی باتری و فناوری‌های کمتر بالغ مانند تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن سبز داشته باشند (Côté and Salm, 2022). سازمان‌های بین‌المللی توسعه و موسسات مالی، تامین مالی برای گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای در حال توسعه فراهم می‌کنند. واجد شرایط بودن و موفقیت این سرمایه‌گذاری‌ها تا حد زیادی به محیط نظارتی، اقتصادی و اجتماعی سیاسی در کشورهای دریافت‌کننده بستگی دارد.

کشورهای جهان اکنون در رقابتی با زمان برای کاهش اثرات تغییرات آب و هوایی و در عین حال رسیدن به اهداف توسعه پایدار هستند. سیاست‌هایی در سراسر کشورها برای افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مطابق با اهداف تعیین‌شده در توافق‌نامه پاریس وضع شده است، و بودجه‌های سرمایه‌گذاری در بسیاری از مشارکت‌های تعیین‌شده ملی (NDCs) پیشنهاد شده است تا سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی را افزایش دهد. در این بودجه‌های سرمایه‌گذاری، بسیاری از کشورهای در حال توسعه مبالغ جداگانه‌ای را برای دستیابی به اهداف مشروط و بدون قید و شرط اختصاص داده‌اند که هدف مشروط به دریافت جریان‌های مالی از سایر کشورها یا سازمان‌های توسعه برای گسترش بخش انرژی‌های تجدیدپذیر بستگی دارد. برای رفع این کسری سرمایه‌گذاری، جریان رو به رشدی از منابع مالی توسعه بین‌المللی به کشورهای در حال توسعه به منظور حمایت از آنها برای دستیابی به اهداف آب و هوایی وجود دارد. این فاینانس توسعه، همراه با فاینانس خصوصی، کشورهای در حال توسعه را قادر می‌سازد تا در پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر سرمایه‌گذاری کنند و سهم انرژی از منابع پاک را افزایش دهند. این وجوه همچنین به کشورهای در حال توسعه کمک می‌کند تا به اهداف SDG 7 تضمین انرژی مقرون به صرفه، قابل اعتماد، پایدار و مدرن برای همه دست یابند (Aziz and Jahan, 2023).

لو و ژانگ (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای جامع و قابل تعمیم به موارد مشابه سیاست‌های تشویقی کاربردی با هدف توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر همچون هیدروژن سبز ارائه کرده است که در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول شماره ۲: سیاست‌های تشویقی در مراحل مختلف توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر

مرحله توسعه	هدف سیاست	سیاست‌های تشویقی نهادی	سیاست‌های تشویقی مالی و سیاست تشویقی	های سرمایه‌گذاری و تامین مالی
			مالیاتی	سرمایه‌گذاری و تامین مالی



تحقیق و توسعه	پشتیبانی و کردن	قانون انرژی های تجدیدپذیر؛ برنامه ریزی استراتژیک توسعه؛ طرح توسعه فناوری	یارانه های ویژه ملی؛ ایجاد صندوق تحقیق و توسعه و بهره؛ استفاده سریع؛ سیاست اعتبار سرمایه گذاری؛ تخفیف مالیات بر درآمد؛ سیاست تخفیف مالی؛ یارانه های مالی به تولیدکنندگان؛ سیاست تدارکات دولتی؛	وام های سیاستی؛ وام تجاری ترجیحی؛ سرمایه گذاری سیاست
توسعه اولیه	پشتیبانی و کردن	سیاست تعرفه ورودی؛ سیستم مناقصه؛ اجرای تدریجی نظام سهمیه بندی معرفی تدریجی معاملات گواهی سبز.	یارانه های مالی؛ کاهش تعرفه فناوری و تجهیزات؛ سیاست کاهش مالیات؛	وام های سیاستی؛ سیاست های ترجیحی وام تجاری؛ سرمایه گذاری در سیاست؛ تامین مالی اوراق بهادار یا سهام؛ اوراق قرضه صادر کند.
توسعه در مقیاس بزرگ	پشتیبانی و کردن	بخشی از اجرای سیاست خوراک تعرفه و سیستم مناقصه رقابتی. اجرای سیستم سهمیه بندی و معاملات گواهی سبز. ایجاد تدریجی رقابت عادلانه در بازار انرژی.	کاهش تدریجی یارانه های مالی و مشوق های مالیاتی.	حذف تدریجی وام های مرتبط با سیاست، سیاست های ترجیحی وام تجاری، سرمایه گذاری سیاست، تامین مالی اوراق بهادار یا سهام و انتشار اوراق قرضه.
بلوغ	تنظیم مجدد	حذف تدریجی نظام مناقصه و سهمیه بندی؛ اجرای رقابت منصفانه در بازار انرژی.	بازاریابی	بازاریابی

۵-۳ وضعیت انرژی تجدیدپذیر در ایران

در منطقه خاورمیانه، ایران دارای دومین منبع انرژی است اما با این حال، آخرین ترازنامه های انرژی ایران تعادل بین عرضه و تقاضای برق را نشان می دهد (فیروزجانی و همکاران، ۲۰۱۸). انتخاب انرژی تجدیدپذیر مناسب در هر کشور به سه عامل موقعیت جغرافیایی، شرایط آب و هوایی و در دسترس بودن منابع تجدیدپذیر بستگی دارد (Rashidi et al., 2022). ایران به دلیل شرایط خاص جغرافیایی، ظرفیت های زیادی برای استفاده از انرژی های تجدیدپذیر دارد و اگر بتوان سرمایه گذاری های جدیدی انجام داد به نتایج بالارزش و مهمی می توان دست یافت. اما وجود ذخایر بزرگ نفت و گاز و انرژی



ارزان از طریق یارانه در ایران باعث شده است که کشورمان نسبت به کشورهای پیشرفته صنعتی از منابع جدید انرژی عقب نشینی کند. در سال‌های اخیر، عدم تخصیص اعتبارات کافی اجازه ساخت نیروگاه‌های بزرگ را نداده است، در حالی که به گفته کارشناسان این حوزه، می‌توان تمام برق مورد نیاز ایران را از طریق انرژی خورشیدی تامین کرد. چنین ظرفیت‌های بلااستفاده‌ای باعث می‌شود که تولید برق در ایران از جمله ساخت و نگهداری نیروگاه‌ها سالانه ده‌ها میلیارد دلار درآمد ارزی به همراه داشته باشد (پوردربانی، ۲۰۲۰). ایران با بهره‌مندی از تشعشعات خورشیدی فراوان، دارای زیرساخت طبیعی مناسب برای استقرار انرژی خورشیدی در اکثر مناطق است. با پتانسیل پیشی گرفتن از سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی این ظرفیت را دارد که به عنوان عامل اصلی تولید برق در ایران ظاهر شود. با این وجود، بازار انرژی خورشیدی در ایران آنچنان که شایسته آن است، ارتقاء پیدا نکرده است (Rasouli et al, 2023).

قرار گرفتن در جنوب غرب آسیا و به طور مشخص بین دو کانون اصلی انرژی جهان به نام خلیج فارس و دریای خزر، موقعیت استراتژیک در تامین انرژی و امنیت را برای ایران فراهم کرده است. در واقع، ایران که توسط ۱۵ همسایه زمینی و دریایی احاطه شده است، به عنوان یک مسیر تجاری و ترانزیتی سودمند در هر دو کریدور شمال-جنوب و شرق-غرب شناخته می‌شود. با توجه به این موقعیت جغرافیایی و اقلیم خاص، پتانسیل بالایی در انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. علیرغم داشتن پتانسیل‌های بسیار زیاد، هنوز نتوانسته به پیشرفت چشمگیری دست یابد که این مسئله نشان دهنده توجه کم دولت و سیاست‌گذاران به کشف منابع انرژی جایگزین (انرژی‌های تجدیدپذیر) می‌باشد (عریانی و همکاران، ۲۰۲۱).

ایران که دارای منابع فراوان انرژی تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر به ویژه منابع تجدیدنپذیر است، با چالش‌هایی مانند آلودگی هوا، تغییرات آب و هوا و امنیت انرژی مواجه است. به عنوان یک صادرکننده و مصرف‌کننده پیشرو سوخت‌های فسیلی شناخته می‌شود. این کشور همچنین در تلاش است تا از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان بخشی از ترکیب انرژی خود در جهت امنیت انرژی و پایداری استفاده کند (سلیمانی و همکاران، ۲۰۲۱). در ایران منابع انرژی تجدیدپذیر فراوانی مانند باد، خورشید، زمین گرمایی، زیست توده وجود دارد (ملاحسینی و همکاران، ۲۰۱۷؛ نجفی و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، ایران برای بخش‌های صنعتی، مسکونی و حمل‌ونقل کاملاً به سوخت‌های فسیلی وابسته است. نتیجه آن این است که این کشور در بین ۱۰ تولیدکننده اول گازهای گلخانه‌ای در جو قرار دارد. گازهای گلخانه‌ای را می‌توان با ترکیب منابع تجدیدپذیر برای تولید انرژی کنترل کرد. بنابراین، منابع انرژی تجدیدپذیر برای توسعه انرژی پایدار در ایران جذابیت بیشتری پیدا می‌کنند. با این حال، تبدیل از زیرساخت‌های سوخت فسیلی سنتی به فناوری‌های تجدیدپذیر پیشرفته نیاز به ملاحظات زیادی مانند برنامه ریزی استراتژیک و اصلی دارد (ملاحسینی و همکاران، ۲۰۱۷). اما واقعیتی که وجود دارد و در پژوهش‌های همچون سلیمانی و همکاران (۲۰۲۱) و پوردربانی (۲۰۲۰) نیز به آن اشاره شده است این است که، به دلیل وابستگی به نفت در ایران استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر اندک می‌باشد و سهم مصرف انرژی تجدیدپذیر در کل تقاضای انرژی‌های تجدیدپذیر از ۱.۵ درصد در سال ۱۹۸۰ به ۰.۵۸ درصد در سال ۲۰۱۸ کاهش یافته است که این رقم نشان می‌دهد که کشور به تولید انرژی‌های تجدیدپذیر از طریق سرمایه‌گذاری و ایجاد برخی محرک‌ها برای سرمایه‌گذاران خصوصی توجه بیشتری نکرده است در شرایطی که نیازمند دستیابی به تنوع منابع انرژی و امنیت انرژی است که گام‌های اساسی در جهت رشد اقتصادی پایدار و توسعه اجتماعی است.

۴- نتیجه گیری

هیدروژن سبز به هیدروژنی اشاره دارد که با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر تولید شده است، معمولاً از طریق فرآیندهایی مانند الکترولیز آب با استفاده از انرژی از منابعی مانند نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌های خورشیدی، یا سایر منابع تجدیدپذیر. به دلیل کاهش آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با روش‌های سنتی تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی.



هیدروژن سبز می‌تواند یک جایگزین پایدار و کم‌انرژی‌تر برای هیدروژن تولید شده از منابع فسیلی باشد، که می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و وابستگی به منابع انرژی غیرپایدار کمک کند.

اما با توجه به اهمیت هیدروژن سبز و نقش آن در حفظ محیط زیست و توسعه صنایع تولیدی و سنگین، تولید آن در کشورهای درحال توسعه و ایران با وجود ظرفیت‌های طبیعی با محدودیت مواجه است و سیری کند را طی کرده است. یکی از مهم‌ترین عوامل تولید انرژی‌های تجدیدپذیر همچون هیدروژن سبز سرمایه‌گذاری کلان است. اما به دلیل ریسک‌های موجود در تولید هیدروژن سبز جذب سرمایه‌گذار و تامین سرمایه یک مسئله اساسی است از اینرو به نظر می‌رسد شناسایی ریسک‌های سرمایه‌گذاری در قالب مطالعات پژوهشی و آکادمیک بتواند مقدمه و راهبردی جهت رفع این ریسک‌ها از سوی ذینفعان باشد.

در این پژوهش براساس بررسی مطالعات انجام شده سه ریسک اصلی ریسک فنی، ریسک خط‌مشی‌گذاری - نظارت و ریسک‌های محیطی - زیستی به عنوان مهم‌ترین ریسک‌های سرمایه‌گذاری در تولید هیدروژن می‌باشند که نیازمند تدوین برنامه‌های بلندمدت جهت رفع و کاهش این ریسک‌ها می‌باشد.



منابع:

- Abba, Z. Y. I., Balta-Ozkan, N., & Hart, P. (2022). A holistic risk management framework for renewable energy investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112305
- Azadnia, A. H., McDaid, C., Andwari, A. M., & Hosseini, S. E. (2023). Green hydrogen supply chain risk analysis: A european hard-to-abate sectors perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113371.
- Azadnia, A. H., McDaid, C., Andwari, A. M., & Hosseini, S. E. (2023). Green hydrogen supply chain risk analysis: A european hard-to-abate sectors perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113371.
- Aranda, Y. Li, Y. J. Liew, S. Baumgarten, O. Simakov, M. C. Wilson, J. Piel, H. Ashoor, S. Bougouffa, V. B. Bajic, T. Ryu, T. Ravasi, T. Bayer, G. Micklem, H. Kim, J. Bhak, T. C. LaJeunesse & C. R. Voolstra. (2016).
- Almulhim, T., & Al Yousif, M. (2023). Scenario Analysis for Renewable Energy Investment using A Hybrid Framework: A Case Study in Saudi Arabia. *Renewable Energy Focus*.
- Abba, Z. Y. I., Balta-Ozkan, N., & Hart, P. (2022). A holistic risk management framework for renewable energy investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112305
- Aziz, S., & Jahan, S. M. (2023). Determinants of international development investments in renewable energy in developing countries. *Energy for Sustainable Development*, 74, 215-230.
- Angelopoulos, D., Doukas, H., Psarras, J., & Stamtsis, G. (2017). Risk-based analysis and policy implications for renewable energy investments in Greece. *Energy Policy*, 105, 512-523
- Beswick, R. R., Oliveira, A. M., & Yan, Y. (2021). Does the green hydrogen economy have a water problem?. *ACS Energy Letters*, 6(9), 3167-3169.
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847-3869.
- Oryani, B., Koo, Y., Rezaia, S., & Shafiee, A. (2021). Barriers to renewable energy technologies penetration: Perspective in Iran. *Renewable Energy*, 174, 971-983.
- Solaymani, S. (2021). A review on energy and renewable energy policies in Iran. *Sustainability*, 13(13), 7328.
- Rasouli, M., Ayough, A., Khorshidvand, B., & Alemtabriz, A. (2023). Evaluating risk factors in solar energy investments: A strategic approach for Iran's market. *Solar Energy*, 262, 111884.
- Gatzert, N., & Kosub, T. (2016). Risks and risk management of renewable energy projects: The case of onshore and offshore wind parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 982-998
- Li, R., Xu, L., Hui, J., Cai, W., & Zhang, S. (2022). China's investments in renewable energy through the belt and road initiative stimulated local economy and employment: A case study of Pakistan. *Science of The Total Environment*, 835, 155308.
- Rashidi, N. A., Chai, Y. H., & Yusup, S. (2022). Biomass energy in Malaysia: current scenario, policies, and implementation challenges. *Bioenergy research*, 15(3), 1371-1386.
- Côté, E., & Salm, S. (2022). Risk-adjusted preferences of utility companies and institutional investors for battery storage and green hydrogen investment. *Energy Policy*, 163, 112821.
- Kato, S. Jung, J. Suenobua, T. Fukuzumi, Sh. (2013). Production of hydrogen peroxide as a sustainable solar fuel from water and dioxygen.
- Wendt, H., Imarisio, G. (1988). Nine years of research and development od advanced water electrolysis. A review of the research programme of the Commision of the European Communities.
- Holladay, J.D., Hu, J., King, D.L, Wang, Y. (2008). An overview of hydrogen production technologies.
- Egli, Florian. "Renewable energy investment risk: an investigation of changes over time and the underlying drivers." *Energy Policy* 140 (2020): 111428
- Mollahosseini, A., Hosseini, S. A., Jabbari, M., Figoli, A., & Rahimpour, A. (2017). Renewable energy management and market in Iran: A holistic review on current state and future demands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 774-788.
- Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Yusaf, T., & Azmi, W. H. (2015). Solar energy in Iran: Current state and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 931-942.
- Pourdarbani, R. (2020). Review of Current Status and Future Demand for Renewable Energy in Iran and its Marketing. *Journal of Renewable and New Energy*, 7(1), 118-124.



- Higman, Ch., Tam, S. (2014). Advances in Coal Gasification, Hydrogenation, and Gas Treating for the Production of Chemicals and Fuels.
- Genomes of coral dinoflagellate symbionts highlight evolutionary adaptations conducive to a symbiotic lifestyle.
- Heidenreich, S., Foscolo, P.U. (2014). New concepts in biomass gasification.
- Yamauchi, Y., Takeda, K., Nobuta, Y., Hino, T. (2009). Hydrogen and helium removal retained in stainless steel by neon glow discharge.
- Kou, G., Pamucar, D., Dinçer, H., & Yüksel, S. (2023). From risks to rewards: A comprehensive guide to sustainable investment decisions in renewable energy using a hybrid facial expression-based fuzzy decision-making approach. *Applied Soft Computing*, 142, 110365.
- Sarker, A. K., Azad, A. K., Rasul, M. G., & Doppalapudi, A. T. (2023). Prospect of Green Hydrogen Generation from Hybrid Renewable Energy Sources: A Review. *Energies*, 16(3), 1556.
- Xu, Y., Du, R., & Pei, J. (2023). The investment risk evaluation for onshore and offshore wind power based on system dynamics method. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, 103328.
- Erfani, A., & Tavakolan, M. (2023). Risk evaluation model of wind energy investment projects using modified fuzzy group decision-making and monte carlo simulation. *Arthaniti: Journal of Economic Theory and Practice*, 22(1), 7-33.
- Ilbahar, E., Kahraman, C., & Cebi, S. (2022). Risk assessment of renewable energy investments: A modified failure mode and effect analysis based on prospect theory and intuitionistic fuzzy AHP. *Energy*, 239, 121907.
- Zhou, P., Luo, J., Cheng, F., Yüksel, S., & Dinçer, H. (2021). Analysis of risk priorities for renewable energy investment projects using a hybrid IT2 hesitant fuzzy decision-making approach with alpha cuts. *Energy*, 224, 120184.
- [69] Taghizadeh-Hesary, F., & Yoshino, N. (2020). Sustainable solutions for green financing and investment in renewable energy projects. *Energies*, 13(4), 788.
- Liu, X., & Zeng, M. (2017). Renewable energy investment risk evaluation model based on system dynamics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 782-788.
- Koyuncu, I., Yilmaz, C., Alcin, M., & Tuna, M. (2020). Design and implementation of hydrogen economy using artificial neural network on field programmable gate array. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 20709-20720.
- Megía, P. J., Vizcaíno, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021). Hydrogen production technologies: From fossil fuels toward renewable sources. A mini review. *Energy & Fuels*, 35(20), 16403-16415.
- Ishaq, H., Dincer, I., & Crawford, C. (2022). A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26238-26264.
- Kakavand, A., Sayadi, S., Tsatsaronis, G., & Behbahaninia, A. (2023). Techno-economic assessment of green hydrogen and ammonia production from wind and solar energy in Iran. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(38), 14170-14191.



A review of evaluations of green hydrogen production using renewable sources in Iran and the world

Mohammadreza Haghani

Department of Industrial
Engineering, Islamic Azad
University, West Branch, Tehran,
Iran

Masoomeh Zeinalnezhad

Department of Industrial
Engineering, Islamic Azad
University, West Branch, Tehran,
Iran

Tahereh Aliheidari bioki

Department of Industrial
Engineering, Islamic Azad
University, West Branch,
Tehran, Iran

Abstract

Hydrogen as a clean and renewable energy carrier can play an important role in reducing carbon dioxide in the air and maintaining the ecosystem and sustainable development. The production of green hydrogen requires financial resources and attracting capital, but attracting capital in the production of this important energy is associated with risks, and this has caused problems in the production of green hydrogen in developing countries such as Iran. Based on the studies conducted, this article has introduced technical risks, policy-making and regulatory risks, and environmental-biological risks as the most important risks of investing in green hydrogen production in Iran and other countries.

Keywords: green hydrogen, renewable resources, risks of green hydrogen production