

تحلیل محیط کلان سیاستی و نقش ذی‌نفعان در انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران

■ کاوه آلبا^۱

دانشجوی دکتری مدیریت تکنولوژی، گروه آموزشی مدیریت
تکنولوژی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

■ احمد رضا کسرائی⁺*

استادیار گروه آموزشی مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

■ حسین شیرازی^۲

استادیار گروه آموزشی مدیریت تکنولوژی، دانشکده علوم انسانی،
واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران.

■ محمود محمدی^۳

استادیار گروه آموزشی مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[10.22034/jtd.2026.2082805.2054](https://doi.org/10.22034/jtd.2026.2082805.2054)

چکیده

هدف این پژوهش بررسی امکان‌پذیری انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران با تأکید بر تحلیل محیط کلان و نقش ذی‌نفعان کلیدی است. این تحقیق از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت تحلیلی بوده و با رویکردی نظام‌مند به شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر انتقال این فناوری نوظهور می‌پردازد. در این راستا، از روش تحلیل عوامل محیطی در قالب چارچوب PESTEL و تحلیل ذی‌نفعان استفاده شده است. داده‌های پژوهش از طریق بررسی اسناد، مطالعات پیشین، گزارش‌های تخصصی و تحلیل خبرگانی گردآوری و تحلیل شده‌اند. در مجموع، ۳۵ عامل محیطی در ابعاد سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی و قانونی و همچنین ۱۹ ذی‌نفع کلیدی شامل دولت، صنایع فولادسازی، دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی، تأمین‌کنندگان انرژی و هیدروژن، بانک‌ها، سرمایه‌گذاران، نهادهای تنظیم‌گر و سازمان‌های غیردولتی شناسایی شدند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که انتقال موفق فناوری فولاد سبز در ایران به شدت متأثر از ثبات سیاست‌های صنعتی، دسترسی به منابع مالی، توسعه زیرساخت‌های انرژی و هیدروژن، ظرفیت‌های فناورانه و تحقیق و توسعه، و میزان هماهنگی و تعامل میان ذی‌نفعان است. همچنین نتایج حاکی از آن است که اجرای پروژه‌های پایلوت، طراحی مشوق‌های مالی و صادراتی، و ارتقای مهارت‌ها و توانمندی نیروی انسانی نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش ریسک‌های فناورانه و نهادی دارند. در نهایت، پژوهش نتیجه می‌گیرد که موفقیت انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران مستلزم برنامه‌ریزی راهبردی، همکاری میان‌بخشی و بهره‌گیری یکپارچه و عملیاتی از ظرفیت‌های مالی، فناورانه و انسانی کشور است.

واژگان کلیدی: فولاد سبز، فناوری هیدروژن، انتقال فناوری، تحلیل محیط کلان، ذی‌نفعان کلیدی، صنعت فولاد

^۱ آدرس پست الکترونیکی سازمانی: Kaveh.Alba@iaau.ac.ir

* عهده دار مکاتبات

⁺ آدرس پست الکترونیکی سازمانی: Ah.kasraee1349@iaau.ac.ir

^۲ آدرس پست الکترونیکی سازمانی: HosseinShirazi@iaau.ac.ir

^۳ آدرس پست الکترونیکی سازمانی: Mah.mohammadi@iauctb.ac.ir

۱- مقدمه

برآوردها نشان می‌دهد که اگر فناوری فولاد سبز در ایران پیاده‌سازی نشود، انتشار کربن این صنعت تا سال ۲۰۳۰ بیش از ۶۰ میلیون تن CO₂ در سال خواهد بود (Abdoos et al., 2025). از منظر قانونی، هنوز مقررات مشخصی برای حمایت از فناوری هیدروژن سبز در صنعت فولاد ایران تدوین نشده و این خلأ حقوقی یکی از موانع کلیدی در مسیر انتقال فناوری است (Basirat, 2024).

بر این اساس، تحلیل محیط کلان با استفاده از چارچوب PESTEL که ابعاد سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی و قانونی را شامل می‌شود، می‌تواند تصویری جامع از فرصت‌ها و چالش‌های ایران در مسیر انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن ارائه دهد (Abdoos et al., 2025). علاوه بر این، شناسایی و تحلیل ذی‌نفعان کلیدی نظیر دولت، شرکت‌های فولادی، نهادهای پژوهشی، سازمان‌های زیست‌محیطی و سرمایه‌گذاران، نقشی اساسی در تسهیل این فرایند ایفا می‌کند و می‌تواند با ایجاد هم‌افزایی میان بازیگران، ریسک‌های توسعه فناوری را کاهش دهد (Basirat, 2024).

در مجموع، اهمیت راهبردی این موضوع نه تنها به جنبه‌های زیست‌محیطی محدود نمی‌شود بلکه ابعاد اقتصادی، فناورانه و سیاستی را نیز در بر می‌گیرد. لذا این مقاله با تمرکز بر تحلیل PESTEL و تحلیل ذی‌نفعان در ایران، چارچوبی برای درک بهتر محیط کلان و شناسایی بازیگران کلیدی در انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن ارائه می‌دهد تا بتواند مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های سیاستی و راهبردی در این حوزه فراهم کند. این مقاله سعی دارد تا به سوالات زیر پاسخ دهد:

- چه عواملی و زیرعواملی از محیط کلان (سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی و قانونی) بر فرایند انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران تأثیرگذار هستند و چگونه می‌توان آن‌ها را در قالب مدل PESTEL شناسایی و ارزیابی کرد؟
- هر یک از عوامل محیطی شناسایی شده چه نقشی در تسهیل یا مانع‌سازی این فرایند ایفا می‌کنند؟
- ذی‌نفعان کلیدی در فرایند انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران کدام‌اند؟
- هر یک از ذی‌نفعان شناسایی شده با کدامیک از ابعاد PESTEL ارتباط پیدا می‌کند؟
- راهکارهای موثر جهت برداشتن موانع و پیشنهاد‌های کارآمد جهت تسهیل در انتقال فناوری صنعت فولاد سبز چیست؟

صنعت فولاد یکی از صنایع بنیادین و راهبردی در اقتصاد جهانی و ایران است، اما این صنعت حدود ۷ تا ۹ درصد از کل انتشار دی‌اکسید کربن جهان را به خود اختصاص می‌دهد و به‌عنوان یکی از منابع اصلی تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود (Basirat, 2022). در ایران، بر اساس گزارش انجمن تولیدکنندگان فولاد، تولید فولاد خام در سال ۲۰۲۳ حدود ۳۰ میلیون تن بوده است و این میزان صنعت فولاد را به یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های انرژی کشور تبدیل کرده است؛ به‌طوری که نزدیک به ۲۰ درصد مصرف گاز طبیعی ایران در این بخش استفاده می‌شود (Abdoos et al., 2025). روش‌های سنتی تولید فولاد مبتنی بر کوره‌های بلند و استفاده از زغال‌سنگ و کک، پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای به‌ویژه در زمینه انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند و به‌طور متوسط هر تن فولاد تولیدی در ایران منجر به انتشار ۱,۸ تا ۲ تن CO₂ می‌شود (Idrissov, 2025). در این میان، فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن که از مسیر کاهش مستقیم آهن و کوره قوس الکتریکی استفاده می‌کند، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گزینه‌ها برای کاهش انتشار و حرکت به سمت اقتصاد کم‌کربن مطرح شده است (Basirat, 2024).

از منظر سیاسی، بر اساس گزارش وزارت صمت (۲۰۲۳)، فولاد حدود ۱۰ درصد ارزش صادرات غیرنفتی ایران را تشکیل می‌دهد و یکی از صنایع راهبردی در برنامه هفتم توسعه شناخته می‌شود. از منظر اقتصادی، تحریم‌های بین‌المللی موجب کاهش دسترسی به فناوری‌های نوین شده و هزینه تولید فولاد سبز در ایران را تا ۳۰ درصد بالاتر از متوسط جهانی برآورد کرده است (Abdoos et al., 2025). از منظر اجتماعی، صنعت فولاد بیش از ۳۵۰ هزار شغل مستقیم و غیرمستقیم در کشور ایجاد کرده و هرگونه تغییر فناورانه در این صنعت اثرات اجتماعی قابل توجهی بر اشتغال خواهد داشت (Basirat, 2022).

از منظر فناورانه، ایران در حال حاضر فاقد ظرفیت صنعتی تولید هیدروژن سبز در مقیاس وسیع است و تنها چند پروژه آزمایشی در حوزه الکترولیز با ظرفیت کمتر از ۵ مگاوات اجرا شده است (Basirat, 2024). این در حالی است که کشورهای پیشرو در تولید فولاد سبز مانند سوئد و آلمان در سال ۲۰۲۳ ظرفیت‌هایی بیش از ۱ گیگاوات الکترولیز برای تولید هیدروژن سبز راه‌اندازی کرده‌اند (Idrissov, 2025). از منظر زیست‌محیطی، ایران در بین ۱۰ کشور اول جهان از نظر انتشار دی‌اکسید کربن قرار دارد و بخش فولاد یکی از اصلی‌ترین منابع این انتشار محسوب می‌شود.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱- فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن

صنعت فولاد یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان است و مسئول بیش از ۷٪ از کل انتشار CO₂ ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد (Durga et al., 2024). این وضعیت باعث شده است که تولید فولاد به‌عنوان یک چالش زیست‌محیطی جدی شناخته شود و توسعه فناوری‌های کم‌کربن در این صنعت اهمیت ویژه‌ای پیدا کند.

روش‌های سنتی تولید فولاد، مانند کوره بلند، عمدتاً از زغال‌سنگ و کک به‌عنوان سوخت و عامل احیاکننده استفاده می‌کنند که منجر به تولید حجم زیادی CO₂ می‌شود و به‌عنوان یکی از منابع اصلی تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود (RMI, 2023).

فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن، به‌ویژه فرآیند احیای مستقیم با هیدروژن (H₂-DRI)، جایگزینی برای فرآیندهای سنتی محسوب می‌شود. در این روش، هیدروژن به‌عنوان عامل احیاکننده عمل کرده و آب به‌عنوان محصول جانبی تولید می‌شود، که انتشار CO₂ را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (International Energy Agency, 2022). استفاده از هیدروژن سبز در تولید فولاد می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۹۵٪ نسبت به هیدروژن خاکستری و آبی کاهش دهد (Abdoos et al., 2025). این کاهش قابل توجه، فناوری فولاد سبز را به یک راهکار مؤثر برای مقابله با تغییرات اقلیمی تبدیل می‌کند.

با وجود مزایای زیست‌محیطی، توسعه فولاد سبز با چالش‌هایی همراه است. مهم‌ترین مانع، هزینه بالای تولید هیدروژن سبز است که در مقیاس‌های بزرگ تولید فولاد، اقتصادی بودن فناوری را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Basirat, 2024). علاوه بر این، استقرار فناوری فولاد سبز نیازمند زیرساخت‌هایی مانند تأسیسات تولید هیدروژن سبز، شبکه‌های انتقال انرژی پایدار و تجهیزات فولادسازی با هیدروژن است. توسعه این زیرساخت‌ها مستلزم سرمایه‌گذاری کلان و همکاری بین‌بخشی می‌باشد (Abdoos et al., 2025).

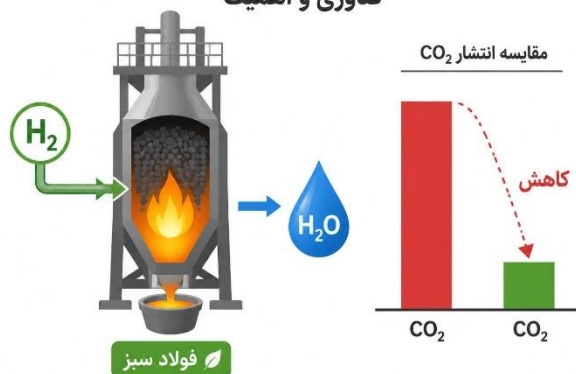
دولت‌ها می‌توانند با سیاست‌های حمایتی نقش مهمی در توسعه فولاد سبز ایفا کنند؛ این سیاست‌ها شامل ارائه یارانه، تسهیلات مالی، وضع قوانین زیست‌محیطی و حمایت از تحقیق و توسعه می‌شود (ArcelorMittal, 2023). علاوه بر نقش دولت، تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات پایدار و کم‌کربن نیز می‌تواند تولید فولاد سبز را تسریع کند. صنایع خودرو،

ساخت‌وساز و انرژی‌های تجدیدپذیر با ایجاد بازار برای محصولات کم‌کربن، توسعه فناوری را حمایت می‌کنند (World Steel Association, 2022).

با توجه به روند جهانی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، انتظار می‌رود استفاده از فناوری فولاد سبز در آینده افزایش یابد. این امر نیازمند همکاری‌های بین‌المللی، سرمایه‌گذاری و توسعه فناوری مداوم است (Durga et al., 2024). فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش CO₂ در صنعت فولاد اهمیت ویژه‌ای دارد و توسعه آن، با وجود چالش‌ها، گامی مهم در جهت اهداف اقلیمی و توسعه پایدار محسوب می‌شود (Basirat, 2024).

تولید فولاد با هیدروژن سبز

فناوری و اهمیت



شکل ۱: تکنولوژی فولاد سبز بر پایه هیدروژن جهت کاهش CO₂

۲-۲- تحلیل محیط کلان فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن

PESTEL یکی از ابزارهای کلیدی برای شناسایی عوامل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، زیست‌محیطی و قانونی است که بر انتقال فناوری تأثیر می‌گذارد (Yüksel, 2012). در زمینه فولاد سبز، این تحلیل به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا فرصت‌ها و تهدیدها را شناسایی کرده و راهبردهای مناسبی اتخاذ نمایند.

عوامل سیاسی و قانونی نقش حیاتی در امکان‌پذیری انتقال فناوری فولاد سبز دارند. سیاست‌های دولت در حوزه انرژی، محیط زیست و صنایع سنگین، حمایت‌های مالی، یارانه‌ها و قوانین محدودکننده انتشار CO₂، انگیزه تولیدکنندگان را برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک افزایش می‌دهند (World Steel Association, 2022). همچنین، چارچوب قانونی و استانداردهای زیست‌محیطی، تعرفه‌ها و حمایت‌های مالی می‌توانند موفقیت یا شکست انتقال فناوری را تعیین کنند؛ کشورهایی که دارای قوانین و مقررات قوی هستند، شانس

بیشتری برای پیاده‌سازی فولاد سبز دارند (Material Economics, 2019).

عوامل اقتصادی، از جمله هزینه‌های تولید هیدروژن سبز و زیرساخت‌های مرتبط، نرخ بازگشت سرمایه و شرایط بازار جهانی فولاد، از دیگر مؤلفه‌های تعیین‌کننده هستند. اقتصادهایی که از منابع انرژی تجدیدپذیر ارزان‌تر بهره‌مندند، شانس بالاتری برای پیاده‌سازی فناوری فولاد سبز دارند (Abdoos et al., 2025).

عوامل اجتماعی نیز می‌توانند انتقال فناوری را تسریع کنند. نگرش جامعه به محیط زیست، پذیرش محصولات کم‌کربن و فشار مصرف‌کنندگان اهمیت بالایی دارد و صنایع و دولت‌ها باید این تغییر نگرش را در استراتژی‌های خود لحاظ کنند (Basirat, 2024).

سطح توسعه فناوری هیدروژن و فرآیندهای فولادسازی کم‌کربن، ظرفیت تحقیق و توسعه و قابلیت انتقال دانش بین شرکت‌ها، از عوامل کلیدی برای موفقیت پروژه‌های فولاد سبز محسوب می‌شوند (Idrissov., 2025). همچنین، نیاز به کاهش انتشار CO₂، محدودیت‌های زیست‌محیطی و اهداف بین‌المللی برای مقابله با تغییرات اقلیمی فشار مضاعفی بر صنایع فولاد وارد می‌کند تا به سمت فناوری‌های سبز حرکت کنند (International Energy Agency, 2022).

عوامل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌طور همزمان بر تصمیمات سرمایه‌گذاری و پذیرش فناوری تأثیر می‌گذارند. تحلیل جامع محیط کلان، امکان شناسایی نقاط قوت و ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها را فراهم می‌کند و به برنامه‌ریزی مؤثر برای انتقال فناوری کمک می‌نماید (Yüksel, 2012). برای ارتقای دقت تصمیم‌گیری، استفاده از مدل‌های سناریویی و شبیه‌سازی، مانند سیستم دینامیک یا تحلیل چندمعیاره، به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد تا تأثیر عوامل مختلف بر موفقیت پروژه را ارزیابی کنند (Saaty, 2008; Sterman, 2000). درک دقیق این عوامل و تعامل آنها، موفقیت پیاده‌سازی فناوری هیدروژنی در ایران را تسهیل می‌کند (Abdoos et al., 2025).

بُعد سیاسی^۴

در ایران، نقش دولت در تعیین مسیر رشد فولاد و انرژی بسیار قوی است؛ تصمیم‌گیری‌ها درباره قیمت‌گذاری انرژی، تخصیص یارانه‌ها، و پروژه‌های ملی (مانند توسعه پارک‌های صنعتی و زیرساخت‌های برق/هیدروژن) به‌طور عمده در اختیار نهادهای دولتی و شرکت‌های دولتی یا شبه‌دولتی است.

⁴ Political

(Parliament Research Center, 2021).

در عمل، وجود یارانه‌های وسیع انرژی و قیمت‌گذاری غیررقابتی سوخت، انگیزه اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در هیدروژن سبز را کاهش می‌دهد؛ تا زمانی که سیاست قیمتی اصلاح نشود، فولادسازان کمتر به دنبال جایگزینی گاز طبیعی یا زغال با هیدروژن سبز خواهند رفت (International Energy Agency, 2022).

تحریم‌های بین‌المللی و موانع مالی/بانکی، دسترسی به فناوری‌های پیشرفته (الکترولیزر بزرگ مقیاس، توربین‌های بادی مدرن برای تغذیه الکترولیزر، تجهیزات وارداتی DRI با هیدروژن) و سرمایه خارجی را محدود کرده است؛ این موضوع باعث می‌شود پروژه‌های بزرگ ابتدا به بازیگران داخلی وابسته باشند یا به‌صورت تدریجی و مبتنی بر شرکای منطقه‌ای پیگیری شوند (Consilium, 2025; Niknami, 2025).

از سوی دیگر، سیاست‌های انرژی اعلامی و هدف‌گذاری افزایش سهم تجدیدپذیرها تا سال‌های پیش‌رو می‌تواند بستر حقوقی و برنامه‌ای برای توسعه هیدروژن ایجاد کند؛ اما موفقیت نیازمند همسوسازی وزارتخانه‌ها (نفت، نیرو، صمت) و ایجاد چارچوب‌های تشویقی مشخص است (International Energy Agency, 2022).

پروژه‌های نمونه و نمونه‌های منطقه‌ای در خاورمیانه و MENA نشان می‌دهد که سیاست‌های حمایتی (مشوق‌های سرمایه‌گذاری، تضمین خرید یا قراردادهای طولانی‌مدت خرید برق برای الکترولیزرها) می‌تواند ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش دهد؛ ایران برای رقابت نیاز دارد سازوکارهای مالی-قانونی مشابه طراحی کند (Basirat, 2024).

در سطح منطقه‌ای، رقابت بر سر تولید هیدروژن و فولاد کم‌انتشار بین کشورهای خلیج فارس و ترکیه می‌تواند انگیزه سیاست‌گذاران ایران را برای تسریع ایجاد کند؛ اما در شرایط تحریمی، ایران ممکن است بیشتر به بازارهای غیرغربی (آسیا، همسایگان) و راهکارهای صادراتی غیرمرسوم توجه کند (Niknami, 2025).

نهایتاً، ثبات سیاسی-اقتصادی و شفافیت در هدف‌گذاری (مثلاً سند ملی هیدروژن یا راهبرد ملی فولاد سبز) برای جلب سرمایه‌گذاری بلندمدت حیاتی است؛ نبود چنین اسناد یا تغییر سیاست‌ها در دوره‌های کوتاه‌مدت، ریسک پروژه‌ها را بالا می‌برد (Saberi and Nikkhah Nasab, 2023).

(Consilium, 2025).

از منظر تأمین مالی، بانک‌های داخلی به دلیل ریسک‌های کلان و محدودیت‌های ارزی، تمایل کمتری به تأمین مالی پروژه‌های بلندمدت و نوآورانه دارند؛ نیاز به سازوکارهای تضمین سرمایه‌گذاری، صندوق‌های سرمایه‌گذاری دولتی یا مشارکت‌های بین‌المللی احساس می‌شود (Niknami, 2025).

در مجموع، برای توجیه اقتصادی گذار به فولاد مبتنی بر هیدروژن در ایران باید مجموعه‌ای از اصلاحات همزمان انجام شود: تعدیل یارانه‌ها، تضمین بازار کم‌کربن، تسهیل مالی و کاهش ریسک‌های سیاسی-تحریمی (International Energy Agency, 2022; Abdoos et al, 2025).

بُعد اجتماعی^۹

آلودگی هوا و پیامدهای سلامت مرتبط با صنایع فولاد در ایران موضوع حساسی است؛ جوامع محلی در شهرهای صنعتی (مثلاً اصفهان، اهواز، کرمان) فشار اجتماعی برای کاهش آلودگی دارند؛ گذار به فناوری‌های پاک مانند هیدروژن می‌تواند منافع سلامتی و اجتماعی ملموسی ایجاد کند که حمایت محلی را افزایش می‌دهد (Taghizadeh et al., 2023).

با این حال، تغییرات فناورانه بزرگ می‌تواند منجر به جابجایی شغلی یا نیاز به بازآموزی گسترده شود؛ نیروی کار موجود در کوره‌های کک‌سازی یا خطوط ذوب باید مهارت‌های جدید (کار با الکترولیزر، فرایندهای DRI هیدروژنی، نگهداری تجهیزات) را بیاموزند که نیازمند برنامه‌های آموزشی دولتی/شرکتی است (Sharafi & Lorvand, 2025).

پذیرش عمومی برای هزینه‌های بالاتر اولیه (قیمت نهایی محصولات فولادی کم‌کربن) محدود است مگر آنکه تولیدکنندگان بزرگ (نظیر صنایع خودروسازی یا پروژه‌های عمرانی ملی) سیاست خرید سبز یا الزاماتی را اتخاذ کنند؛ در عمل، شکل‌گیری بازار «فولاد پاک» نیازمند تقاضای نهادی و اقدام هماهنگ مشتریان بزرگ است (Basirat, 2024).

فرهنگ صنعتی و مقاومت سازمانی نسبت به تغییر می‌تواند سرعت نهادینه‌سازی فناوری‌های جدید را کاهش دهد؛ شرکت‌های بزرگ فولادی دولتی یا شبه‌دولتی نیاز به انگیزه‌های قوی (مالی یا نظارتی) برای اجرای پروژه‌های پایلوت و سپس مقیاس‌بندی دارند (Basirat, 2024).

بُعد اقتصادی^۵

ساختار اقتصادی ایران (ارزشگذاری یارانه‌ای انرژی، نرخ‌های تبادل ارز متعدد، و تورم بالا) به شدت بر هزینه‌های سرمایه‌ای^۶ و هزینه‌های عملیاتی^۷ پروژه‌های فولاد بر پایه هیدروژن تأثیر می‌گذارد؛ مثلاً قیمت برق صنایع و دسترسی به گاز ارزان باعث می‌شود هزینه فرصت استفاده از هیدروژن سبز بالا باشد (International Energy Agency, 2022).

در کوتاه‌مدت، هزینه تولید هیدروژن سبز در ایران بالاتر از گاز-بنیاد (شامل DRI با گاز طبیعی) است مگر آنکه هزینه برق تجدیدپذیر به صورت هدفمند حمایت شود یا یارانه‌ها تعدیل گردند؛ بنابراین بدون مکانیزم‌های مالی مانند تضمین خرید^۸ یا یارانه سرمایه‌ای، جذابیت اقتصادی محدود خواهد ماند (Abdoos et al, 2025).

کاهش قیمت جهانی الکترولیزرها و تحقیقات داخلی/همکاری با بازیگران منطقه‌ای می‌تواند به کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای کمک کند؛ اما نرخ ارز و تحریم‌ها مانع سریع‌سازی واردات تجهیزات می‌شوند (Rahimirad & Sadabadi, 2023).

با وجود ظرفیت بالای بازار داخلی فولاد در ایران و پتانسیل ایجاد ارزش افزوده برای محصولات با ردپای کربن پایین، تحقق «پرمیموم» یا افزایش قیمت برای فولاد کم‌کربن منوط به ایجاد سازوکار رسمی گواهی‌گذاری و پذیرش بازار است؛ در غیر این صورت، ویژگی‌های زیست‌محیطی محصول ارزش افزوده‌ای ایجاد نمی‌کند و به بالفعل تبدیل نمی‌شود و بالقوه باقی می‌ماند. برای اینکه این افزایش قیمت (پرمیموم) واقعیت پیدا کند، بازار باید محصول را شناسایی کند و خریداران حاضر به پرداخت مبلغ اضافی شوند. بدون پذیرش بازار و شفافیت معیارها، ارزش افزوده صرفاً اثر اقتصادی واقعی ندارد (SteelRadar, 2025; OECD, 2023).

صادرات فولاد ایران نیز از حیث قیمت‌گذاری و دسترسی به بازارهای بین‌المللی تحت فشار تحریم‌ها و موانع تعرفه‌ای-اداره‌ای است؛ ابزارهایی مانند CBAM اتحادیه اروپا می‌توانند هم فرصتی (محصول کم‌کربن مزیت رقابتی) و هم تهدیدی (موانع صادراتی) ایجاد کنند، ولی دسترسی محدود ایران به بازار اتحادیه اروپا باعث می‌شود اثرات CBAM در کوتاه‌مدت پیچیده باشد.

⁸ higher offtake⁹ Social⁵ Economic⁶ CAPEX: Capital Expenditure⁷ OPEX: Operational Expenditure

الکترولایزرها، و راهکارهای استفاده بهینه از آب (برای الکترولیز) در مناطق کم‌آب ایران، کلیدی‌اند و باید در برنامه‌های فناوری ملی لحاظ شوند (Hosseini Dehshiri & Firoozabadi, 2024).

بُعد زیست‌محیطی^{۱۱}

آلودگی هوا و سلامت عمومی در مناطق صنعتی ایران به‌صورت تاریخی مسئله‌ای مهم بوده و کاهش انتشار CO₂ و آلاینده‌های محلی (ذرات معلق، NO_x، SO₂) از طریق حذف کوره‌های کک‌سوز و جایگزینی با DRI بر پایه هیدروژن می‌تواند مزایای بزرگ محیط‌زیستی و بهداشتی ایجاد کند (Taghizadeh et al., 2023).

تولید هیدروژن سبز از برق تجدیدپذیر «در نظریه» انتشار خالص تقریباً صفر را برای بخش آهن و فولاد فراهم می‌کند؛ اما در ایران باید به خالص‌شدن برق شبکه (محل تولید الکترولایزر) و رد پای آب مورد نیاز برای الکترولیز توجه شود در مناطق خشک، مصرف آب الکترولایزر می‌تواند مشکل‌ساز شود مگر آنکه از فناوری‌های بازچرخانی آب یا منابع نمک‌زدایی استفاده گردد (APCTT, 2024).

بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر داخلی برای تولید هیدروژن، در بلندمدت می‌تواند وابستگی به سوخت‌های فسیلی و نشت انتشارهای مرتبط با استخراج و فرآوری را کاهش دهد؛ با این حال، تحقق این هدف منوط به توسعه سریع ظرفیت تولید برق تجدیدپذیر و شبکه‌های انتقال است (International Energy Agency, 2022).

مسئله بازیافت و مدیریت پسماندهای فرایندی (خاکستری، اسلگ، شیمیایی) در فرایندهای جدید نیز باید از ابتدا در طراحی کارخانه‌ها لحاظ شود تا انتقال به فناوری‌های «سبز» خود، بار زیست‌محیطی جدیدی ایجاد نکند (Sharafi & Lorvand, 2025). گزارش‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد که جایگزینی تدریجی گاز با هیدروژن در واحدهای DRI می‌تواند کاهش قابل توجهی در انتشار CO₂ منطقه‌ای ایجاد کند و به بهبود کیفیت هوای شهری کمک نماید؛ این پیامدها می‌تواند به‌عنوان محرک اجتماعی و سیاسی برای تسریع پروژه‌ها به‌کار رود (Basirat, 2024).

بُعد حقوقی و مقررات^{۱۲}

در حال حاضر، قواعد و مقرراتی که مستقیماً «تولید فولاد کم‌کربن» را تشویق یا الزام‌آور کنند در ایران کامل و منسجم

به‌دلیل بحران‌های اقتصادی و فشار معیشتی در کشور، اولویت‌های اجتماعی-اقتصادی ممکن است کوتاه‌مدت‌نگر باقی بماند؛ بنابراین انتقال فقر و کارگران آسیب‌پذیر باید در سیاست‌ها لحاظ شود تا اعتراضات اجتماعی یا مقاومت نیروی کار رخ ندهد (Parliament Research Center, 2021). در نهایت، اطلاع‌رسانی شفاف درباره مزایا (اشتغال‌زایی جدید در زنجیره هیدروژن، کاهش آلودگی محلی) و سیاست‌های حمایت‌گرانه برای محافظت از مشاغل، کلید جلب اعتماد اجتماعی و تسهیل گذار خواهد بود (Taghizadeh et al., 2023).

بُعد فناوری^{۱۰}

ایران پتانسیل زیادی در منابع تجدیدپذیر (باد و خورشیدی) دارد که می‌تواند خوراک الکترولایزرها برای تولید هیدروژن سبز را فراهم کند؛ پروژه‌های تحقیقاتی داخلی و چند پیشنهاد فناورانه وجود دارد اما هنوز تولید الکترولایزرها و سیستم‌های بزرگ مقیاس به‌صورت بومی توسعه نیافته است (Basirat, 2024; Hosseini Dehshiri & Firoozabadi, 2024).

مراکز پژوهشی و دانشگاهی ایران در حوزه‌های مرتبط (الکترولیز، سیستم‌های برق و شبکه، مواد و متالورژی) فعال‌اند؛ اما مسیر صنعتی‌سازی فناوری‌ها (از آزمایشگاه تا کارخانه) نیازمند سرمایه‌گذاری، همکاری صنعت-دانشگاه و تسهیل انتقال فناوری است (Rahimirad & Sadabadi, 2023).

تجربیات جهانی نشان می‌دهد که راهبردهای تدریجی (استفاده ترکیبی از گاز و هیدروژن؛ پیلوت‌های DRI با درصد هیدروژن افزایشی) ریسک فناوری و اقتصادی را کاهش می‌دهد؛ این رویکرد متناسب با شرایط ایران خواهد بود که زیرساخت برق پایدار و ظرفیت تولید هیدروژن محدود است (Basirat, 2024).

محدودیت‌های تأمین قطعات و تجهیزات پیچیده به‌دلیل تحریم‌ها، شرکت‌ها را وادار کرده است به دنبال راهکارهای تعمیر-مهندسی معکوس و توسعه قطعات داخلی بروند؛ این می‌تواند در بلندمدت ظرفیت فناورانه داخلی را افزایش دهد اما مقطع انتقال طولانی و هزینه‌بر خواهد بود (Niknami, 2025). نیاز به استانداردسازی، گواهی‌گذاری و آزمایش ایمنی برای الکترولایزرها و حمل‌ونقل هیدروژن در ایران وجود دارد؛ فقدان چارچوب‌های ایمنی دقیق می‌تواند مانع پذیرش صنعتی و سرمایه‌گذاری شود (APCTT, 2024). در نهایت، فناوری‌های مکمل مانند ذخیره‌سازی انرژی، شبکه هوشمند برای مدیریت بار

¹² Legal

¹⁰ Technological

¹¹ Environmental

در ایران، فرصت‌ها شامل: ظرفیت منابع تجدیدپذیر بالا، بازار داخلی بزرگ فولاد، و نیاز اجتماعی/زیست‌محیطی به کاهش آلودگی هستند که می‌توانند محرک گذار به فولاد بر پایه هیدروژن باشند (International Energy Agency, 2022; Basirat, 2024).

از سوی دیگر موانع کلیدی عبارتند از: ساختار یارانه‌ای انرژی، تحریم‌ها و محدودیت‌های مالی، فقدان چارچوب حقوقی حمایتی/گزارش‌دهی کمی، نیاز به بازآموزی نیروی کار و دشواری‌های تأمین آب و برق پاک در برخی مناطق (Research Center, 2021; Abdoos et al, 2025).

سیاست‌گذاران ایرانی برای تسهیل گذار به فولاد سبز می‌بایست: بازار کم‌کربن داخلی/خارجی را تقویت کنند، مشوق‌های مالی و تضمین خرید فراهم آورند، برنامه‌های آموزش مهارتی برای نیروی کار طراحی کنند، و چارچوب‌های قانونی/ایمنی برای تولید و انتقال هیدروژن تدوین نمایند (Abdoos et al, 2025; Rahimirad & Sadabadi, 2023; APCTT, 2024).

۲-۳- ذی‌نفعان فولاد سبز

صنعت فولاد سبز با استفاده از هیدروژن به‌عنوان سوخت پاک، به‌عنوان راهکاری نوین برای کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی در صنعت فولاد مطرح است. در ایران، این صنعت به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و منابع آلاینده، نیازمند تحولی اساسی به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار است. در این راستا، ذی‌نفعان مختلفی نقش تعیین‌کننده‌ای در تحقق فولاد سبز ایفا می‌کنند (Abdoos et al., 2025).

دولت و نهادهای سیاست‌گذار کلان با تدوین سیاست‌های حمایتی، تسهیلات مالی و ایجاد زیرساخت‌های قانونی می‌توانند زمینه‌ساز توسعه فناوری‌های سبز در صنعت فولاد باشند. شرکت‌های فولادی بزرگ با سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین و به‌کارگیری روش‌های تولید کم‌کربن، می‌توانند الگوی موفق برای سایر واحدها ارائه دهند. تأمین‌کنندگان انرژی و زیرساخت با ارائه منابع انرژی تجدیدپذیر و پایدار، نقش حیاتی در تأمین انرژی موردنیاز این صنعت دارند (Rahimirad & Sadabadi, 2023).

نهادهای مالی و سرمایه‌گذاران با تأمین منابع مالی لازم، می‌توانند پروژه‌های تحقیقاتی و توسعه‌ای را در این حوزه پشتیبانی کنند. مراکز دانشگاهی و پژوهشی با انجام تحقیقات بنیادی و کاربردی، می‌توانند فناوری‌های نوینی را برای تولید فولاد سبز توسعه دهند. مصرف‌کنندگان صنعتی فولاد با تقاضای

نیست؛ الزام به گزارش انتشار، گواهی تطابق کم‌کربن یا بازار داخلی برای فولاد سبز به‌طور گسترده پیاده نشده است و این خلا حقوقی مانع شکل‌گیری بازاری برای محصولات «سبز» می‌شود (International Energy Agency, 2022).

چارچوب‌های بین‌المللی مانند CBAM اتحادیه اروپا ممکن است در آینده تأثیر غیرمستقیم بر صنایع صادرات‌محور ایران داشته باشند؛ اگر بازارهای هدف ایران تحت این مقررات قرار گیرند، لازم است تولیدکنندگان داخلی سازوکار گزارش‌دهی و کاهش انتشار را پیاده کنند تا از هزینه‌های اضافی جلوگیری شود (Consilium, 2025).

قوانین آب و مصرف منابع طبیعی نیز در ایران بسیار مهم‌اند؛ مجوزهای برداشت آب، مقررات تخلیه پساب و محدودیت‌های زیست‌محیطی می‌توانند بر دسترسی به منابع موردنیاز الکترولیزرها تأثیر بگذارند؛ بنابراین سازگاری طرح‌ها با مراجع زیست‌محیطی محلی ضروری است (APCTT, 2024).

فقدان ابزارهای مالی قانونی حمایتی (مانند تضمین خرید دولتی یا مشوق‌های مالیاتی مشخص برای فولاد کم‌کربن) به‌معنای آن است که بخشی از بار توسعه باید از طریق سیاست‌گذاری جدید یا اصلاح قوانین تشویق سرمایه‌گذاری رفع شود (Niknami, 2025).

در سطح شرکت‌ها، قراردادهای بلندمدت خرید برق (PPAs) برای الکترولیزر و شفافیت حقوقی در قراردادهای مشارکت‌های فناوری با طرف‌های خارجی (با توجه به ریسک تحریم) از اهمیت بالایی برخوردار است؛ تنظیم این قراردادها نیاز به حمایت و هدایت حقوقی دقیق دارد (International Energy Agency, 2022).

تحلیل فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران

فناوری و اهمیت



شکل ۲: تحلیل محیط کلان صنعت فولاد سبز مبتنی بر PESTEL

در مجموع، همکاری و هم‌افزایی میان این ذی‌نفعان می‌تواند زمینه‌ساز تحقق صنعت فولاد سبز در ایران باشد. تحقق این هدف نیازمند برنامه‌ریزی جامع، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، و ایجاد زیرساخت‌های لازم است. با توجه به ظرفیت‌های موجود و اراده ملی، می‌توان امیدوار بود که ایران در مسیر توسعه پایدار صنعتی گام بردارد (Rahimirad & Sadabadi, 2023).

۲-۴- پیشینه پژوهش

پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تحلیل محیط کلان و نقش ذی‌نفعان در امکان‌پذیری انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران نشان‌دهنده توجه روزافزون به ضرورت توسعه فناوری‌های پاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت فولاد است. با توجه به نوپایی این فناوری در ایران و محدودیت مطالعات پیشین، بسیاری از پژوهش‌ها ابتدا به شناسایی فرصت‌ها و تهدیدهای کلان پرداخته‌اند. مطالعات SWOT نشان می‌دهد که منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی، زیرساخت‌های انرژی موجود و سیاست‌گذاری‌های دولتی، به‌عنوان فرصت‌های اصلی توسعه هیدروژن سبز مطرح هستند و در مقابل محدودیت‌های اقتصادی، هزینه سرمایه‌گذاری بالا و ناپایداری سیاست‌های انرژی، از جمله تهدیدات کلیدی محسوب می‌شوند (Abdoos et al., 2025).

گزارش‌ها و تحلیل‌های بین‌المللی نیز به بررسی فناوری‌های نوین هیدروژن و کاربردهای آن در تولید فولاد پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها تأکید دارند که استفاده از هیدروژن به جای زغال سنگ در فرآیندهای تولید فولاد، کاهش چشمگیر انتشار کربن را امکان‌پذیر می‌سازد و توسعه این فناوری نیازمند همکاری بین دولت، صنایع، دانشگاه‌ها و سازمان‌های بین‌المللی است (Schultz-Zehden, 2023). مطالعات PESTEL و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز نشان می‌دهند که عوامل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی و قانونی نقش اساسی در پذیرش و توسعه هیدروژن سبز دارند و تحلیل دقیق این عوامل می‌تواند استراتژی‌های مؤثر برای انتقال فناوری در ایران ارائه دهد (Türkmen & Seçkiner, 2025).

علاوه بر این، پژوهش‌ها به شناسایی ذی‌نفعان کلیدی پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که هماهنگی و تعامل میان صنایع فولاد، نهادهای سیاست‌گذار، مراکز تحقیق و توسعه و سازمان‌های بین‌المللی، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت پروژه‌های هیدروژنی دارد. بررسی چالش‌های فنی، اقتصادی و زیرساختی نیز بیانگر

محصولات کم‌کربن، می‌توانند بازار مناسبی برای این نوع فولاد فراهم کنند (Ali et al, 2022).

شرکت‌های مهندسی و پیمانکاران EPC با طراحی و اجرای پروژه‌های صنعتی مطابق با استانداردهای زیست‌محیطی، می‌توانند در ساخت کارخانه‌های سبز مشارکت کنند. سازمان‌های استاندارد و مقرراتی با تدوین و نظارت بر استانداردهای تولید، می‌توانند کیفیت و انطباق محصولات را تضمین کنند. نهادهای بین‌المللی با ارائه راهکارهای جهانی و تبادل دانش فنی، می‌توانند به ارتقای سطح فناوری در این صنعت کمک کنند (Rahimirad & Sadabadi, 2023).

سازمان‌های مردم‌نهاد^{۱۳} با آگاهی‌بخشی و جلب مشارکت عمومی، می‌توانند نقش مؤثری در ترویج فرهنگ مصرف پایدار ایفا کنند. اتحادیه‌ها و تشکلهای صنعتی با هماهنگی و هم‌افزایی، می‌توانند به‌عنوان نمایندگان بخش خصوصی در فرآیند تصمیم‌سازی‌های کلان حضور یابند. جامعه و افکار عمومی با پذیرش و حمایت از محصولات سبز، می‌توانند تقاضا برای این نوع فولاد را افزایش دهند. رسانه‌ها و فضای مجازی با اطلاع‌رسانی و آموزش، می‌توانند آگاهی عمومی را در این زمینه ارتقا دهند (Ali et al, 2022).



شکل ۳: ذی‌نفعان کلیدی صنعت فولاد سبز

این تحقیق به بررسی امکان‌سنجی فنی و اقتصادی تولید هیدروژن سبز و آمونیاک در مناطق مختلف ایران پرداخته است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه تولید، از عوامل تعیین‌کننده در پذیرش فناوری هستند. مطالعه منابع انرژی تجدیدپذیر، ظرفیت‌های منطقه‌ای و نیازهای بازار، نشان می‌دهد که برخی مناطق ایران پتانسیل بالاتری برای تولید هیدروژن سبز دارند. علاوه بر این، پژوهش به بررسی الزامات زیرساختی، شبکه توزیع و امکان همخوانی با صنایع موجود اشاره دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای سیاست‌گذاران و سرمایه‌گذاران برای برنامه‌ریزی توسعه این فناوری باشد.

تحلیل PESTEL در توسعه هیدروژن

این پژوهش با بهره‌گیری از مدل Fuzzy و Cognitive Map به شناسایی عوامل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی و قانونی مؤثر بر توسعه هیدروژن پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که ثبات سیاست‌های انرژی، حمایت مالی دولت، پذیرش اجتماعی و ظرفیت تحقیق و توسعه داخلی، از مهم‌ترین عوامل مؤثر هستند. همچنین، فشارهای زیست‌محیطی و مقررات بین‌المللی می‌توانند نقش محرک یا محدودکننده داشته باشند. این تحقیق تأکید می‌کند که تحلیل جامع محیط کلان، ابزار موثری برای تصمیم‌گیری راهبردی و کاهش ریسک در توسعه فناوری هیدروژن است (Türkmen & Seçiner, 2025).

تحلیل ذی‌نفعان در پذیرش هیدروژن سبز

مطالعه‌ای به شناسایی و تحلیل ذی‌نفعان کلیدی در پذیرش فناوری هیدروژن سبز پرداخته است. ذی‌نفعان شامل دولت، صنایع فولاد، مراکز تحقیق و توسعه، دانشگاه‌ها و سازمان‌های بین‌المللی هستند. نتایج نشان می‌دهد که هماهنگی بین ذی‌نفعان و ایجاد شبکه همکاری بین‌بخشی، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت انتقال فناوری دارد. این پژوهش بر اهمیت شناسایی منافع و تضادهای احتمالی ذی‌نفعان و ایجاد سازوکارهای تسهیل‌گر برای همکاری‌های مشترک تأکید دارد. همچنین، آموزش و اطلاع‌رسانی برای جلب حمایت اجتماعی و صنعتی از فناوری جدید نیز مورد توجه قرار گرفته است (Abdoos et al., 2025; Basirat, 2024).

ارزیابی چالش‌ها و راه‌حل‌ها در تولید فولاد با هیدروژن

این مطالعه به شناسایی ۱۵ چالش اصلی در تولید فولاد با استفاده از هیدروژن (H_2 -DRI) پرداخته است. چالش‌ها شامل موانع فنی، محدودیت‌های اقتصادی، کمبود زیرساخت‌ها و مسائل مرتبط با تامین انرژی و تجهیزات است. پژوهش راهکارهایی برای

ضرورت برنامه‌ریزی راهبردی و سرمایه‌گذاری هوشمند در این حوزه است تا علاوه بر کاهش هزینه‌ها، امکان پذیرش فناوری و توسعه پایدار آن فراهم شود (European Commission, 2023).

به‌طور کلی، مجموعه پژوهش‌های موجود نشان می‌دهند که ایران از نظر منابع انرژی و ظرفیت تحقیق و توسعه، پتانسیل بالایی برای توسعه فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن دارد، اما تحقق این هدف مستلزم تحلیل جامع محیط کلان، شناسایی ذی‌نفعان و طراحی سیاست‌های حمایتی است. این پیشینه پژوهشی، زمینه‌ای فراهم می‌کند تا پژوهش حاضر با استفاده از رویکرد کیفی و تحلیل محیط کلان و نقش ذی‌نفع‌اسن، چالش‌ها و فرصت‌های موجود در انتقال فناوری فولاد سبز را به‌صورت علمی و نظام‌مند مورد بررسی قرار دهد. در زیر به برخی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اشاره می‌گردد:

تحلیل SWOT توسعه هیدروژن سبز در ایران

این مطالعه با استفاده از تحلیل SWOT به شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای توسعه فناوری هیدروژن سبز در ایران پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی، ظرفیت بالای تولید انرژی و زیرساخت‌های صنعتی موجود، از نقاط قوت اصلی کشور محسوب می‌شوند. از سوی دیگر، محدودیت‌های مالی، نبود سیاست‌های حمایتی جامع و ناپایداری قوانین، به عنوان نقاط ضعف و تهدیدها شناسایی شدند. این پژوهش تأکید می‌کند که توسعه هیدروژن سبز نیازمند برنامه‌ریزی راهبردی، سرمایه‌گذاری هوشمند و توجه به سیاست‌گذاری‌های بلندمدت است. همچنین، فرصت‌های بین‌المللی برای همکاری و انتقال فناوری، می‌تواند مسیر توسعه را تسهیل کند (Abdoos et al., 2025).

نوآوری‌های فناوری هیدروژن در ایران

گزارش APCTT به بررسی نوآوری‌ها و پروژه‌های فعال در حوزه هیدروژن در ایران پرداخته است. این مطالعه بر نقش استارت‌آپ‌ها، مراکز تحقیق و توسعه و همکاری‌های بین‌المللی در پیشبرد فناوری هیدروژن سبز تأکید دارد. تولید هیدروژن از طریق الکترولیز با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه در مناطقی مانند یزد و کرمان، به عنوان پروژه‌های موفق معرفی شده است. پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و توسعه ظرفیت تحقیق و توسعه داخلی، می‌تواند فرآیند انتقال فناوری و پذیرش آن در صنایع فولاد را سرعت بخشد. همچنین، گزارش بر لزوم تدوین سیاست‌های تشویقی و تسهیل سرمایه‌گذاری در این حوزه تأکید دارد (APCTT, 2024).

ارزیابی فنی و اقتصادی هیدروژن سبز در ایران

۳- روش‌شناسی پژوهش

۳-۱- رویکرد پژوهش و توجیه انتخاب روش

این پژوهش با توجه به ماهیت موضوع فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران، از رویکرد کیفی با رویکرد اکتشافی-تفسیری بهره می‌گیرد. دلیل انتخاب این رویکرد، جدید بودن موضوع و کمبود مطالعات پیشین در زمینه سیاست‌گذاری و تحلیل محیطی در حوزه فولاد سبز است. در چنین شرایطی، پژوهشگر نیازمند آن است که از طریق مصاحبه با خبرگان و سیاست‌گذاران، داده‌های عمیق و مبتنی بر تجربه زیسته افراد جمع‌آوری کند. پژوهش کیفی به پژوهشگر امکان می‌دهد که نه تنها نظرات صریح خبرگان، بلکه مفاهیم پنهان و ارزش‌های نهفته در پاسخ‌ها را نیز استخراج کند (Creswell & Poth, 2018). این امر سبب می‌شود که پژوهش بتواند به شناسایی فرصت‌ها و تهدیدهای واقعی در محیط سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی و قانونی بپردازد. در واقع، این رویکرد نسبت به روش‌های کمی برتری دارد زیرا انعطاف‌پذیری بیشتری دارد و به پژوهشگر اجازه می‌دهد پرسش‌های جدید را در حین جمع‌آوری داده‌ها مطرح کند (Merriam & Tisdell, 2016).

با توجه به ماهیت مسئله پژوهش، یعنی «امکان‌سنجی انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران»، این مطالعه از رویکرد کیفی با ماهیت اکتشافی-تفسیری بهره گرفته است. انتخاب این رویکرد مبتنی بر سه ملاحظه اصلی بوده است:

• نوظهور بودن پدیده در بستر ایران

فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران هنوز در مرحله توسعه اولیه قرار دارد و تجربه عملی گسترده‌ای در این حوزه وجود ندارد (APCTT, 2024؛ Abdoos et al., 2025). در چنین شرایطی، داده‌های کمی ساختاریافته، شاخص‌های استاندارد و پایگاه‌های آماری معتبر برای تحلیل‌های اقتصادسنجی یا مدل‌های کمی پیشرفته در دسترس نیست. مطابق دیدگاه Creswell & Poth (2018)، در شرایطی که یک پدیده جدید و کمتر مطالعه‌شده باشد، رویکرد کیفی برای کشف ابعاد پنهان و ساخت مفهومی اولیه مناسب‌تر است.

• پیچیدگی چندبعدی و وابستگی به بستر سیاستی-نهادی

انتقال فناوری فولاد سبز صرفاً یک مسئله فنی نیست، بلکه به شدت تحت تأثیر متغیرهای سیاسی، تحریم‌ها، سیاست‌های صنعتی، زیرساخت انرژی و الزامات بین‌المللی قرار دارد (OECD, 2023؛ Consilium, 2025؛ Saberi and Nikkhah Nasab, 2023). همچنین گزارش‌های بین‌المللی نشان می‌دهد گذار صنعت فولاد به سمت کربن‌زدایی فرآیندی سیستماتیک و وابسته به

غلبه بر این موانع ارائه می‌دهد که شامل سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، بهبود سیاست‌های حمایتی و توسعه زیرساخت‌های انرژی است. همچنین، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی راهبردی برای کاهش ریسک و افزایش کارایی در پذیرش فناوری پیشنهاد شده است. این تحقیق می‌تواند به سیاست‌گذاران و صنایع برای برنامه‌ریزی بهتر در مسیر فولاد سبز کمک کند (Durga et al., 2024).

پروژه‌های بین‌المللی در استفاده از هیدروژن در صنعت

فولاد

پروژه‌های متعددی در سطح بین‌المللی در حال توسعه هستند که استفاده از هیدروژن را به جای زغال‌سنگ در صنعت فولاد بررسی می‌کنند. نمونه شاخص، پروژه H₂ Green Steel در سوئد است که هدف آن کاهش ۹۵ درصدی انتشار کربن است. این پروژه‌ها نشان می‌دهند که فناوری هیدروژن عملیاتی و قابل پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی است. نتایج این پروژه‌ها می‌تواند به عنوان الگوی توسعه مشابه در ایران مورد استفاده قرار گیرد و نشان‌دهنده اهمیت همکاری بین‌المللی، انتقال دانش و سرمایه‌گذاری استراتژیک در این حوزه می‌باشد (Idrissov, 2025; Basirat, 2024).

شناسایی و اولویت بندی موانع انتقال تکنولوژی فولاد

سبز با استفاده از روش FBWM

این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت بندی چالش‌های انتقال فناوری فولاد سبز انجام شده است که از دیدگاه هدف کاربردی و به لحاظ روش آمیخته است. در این تحقیق در بخش نظری به منظور گردآوری اطلاعات مرتبط و تعاریف و مفاهیم مرتبط از مطالعات کتابخانه‌ای در قالب مقالات استفاده شده است. در بخش میدانی نیز به منظور گردآوری اطلاعات از پرسشنامه استفاده شده است. در بخش دلفی فازی به منظور شناسایی شاخص‌ها و مولفه‌ها از پرسشنامه نیمه باز دلفی فازی و مصاحبه به صورت ترکیبی استفاده شده است. در بخش رتبه بندی از روش FBWM استفاده گردید. در این پژوهش، روش نمونه‌گیری هدفمند می‌باشد. این مقاله سعی کرده تا مهم‌ترین موانع و چالش‌های اقتصادی، فناوری و سیاست‌گذاری را معرفی نماید. بررسی‌ها نشان داد که این صنعت با چالش‌های (۱) نبود سیاست‌های حمایتی (۲) هزینه‌های بالا (۳) بی‌ثباتی سیاست‌ها (۴) عدم حمایت مالی (۵) عدم هماهنگی بین نهادها (۶) سطح فناوری (۷) مشکلات فنی (۸) پایین بودن سطح تحقیق و توسعه (۹) بازار محدود روبرو است. در نهایت راهکارهایی در جهت حل این موانع نیز ارائه گردید (Shirazi and Alba, 2025).

کلان

پژوهش حاضر برای واکاوی محیط کلان و شناسایی موانع و پیشران‌های انتقال فناوری فولاد سبز در ایران، از مدل PESTELE استفاده نموده است. انتخاب این مدل بر اساس ضرورت‌های زیر صورت گرفت:

- ابعاد سیاسی و قانونی^{۱۵}: با توجه به جایگاه استراتژیک صنعت فولاد در اقتصاد ملی و تأثیرپذیری آن از سیاست‌های بین‌المللی و تحریم‌ها (Niknami, 2025; Consilium, 2025)، جداسازی عوامل سیاسی از الزامات حقوقی و استانداردهای گزارش‌دهی انتشار گازهای گلخانه‌ای (RMI, 2023) برای دقت در تحلیل ضروری بود.

- ابعاد اقتصادی^{۱۶}: گذار به فولاد سبز نیازمند سرمایه‌گذاری‌های عظیم و تحلیل فرصت‌های بازار در منطقه منا^{۱۷} است (Basirat, 2022, 2024) که در این مدل به دقت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- ابعاد اجتماعی^{۱۸}: پذیرش اجتماعی فناوری‌های نو و تغییر در اولویت‌های صنعتی تحت تأثیر آگاهی‌های اقلیمی، از ارکان کلیدی گذار انرژی در ایران محسوب می‌شود (Parliament Research Center, 2021).

- ابعاد فناورانه^{۱۹}: پیچیدگی‌های فنی تولید هیدروژن سبز و نیاز به زیرساخت‌های تحقیق و توسعه در مقیاس صنعتی، بررسی مجزای این بخش را الزامی می‌سازد (Idrissov, 2025; Hosseini Dehshiri & Firoozabadi, 2024).

- ابعاد زیست‌محیطی^{۲۰}: از آنجایی که محرک اصلی این فناوری، کاهش آلاینده‌ها و مقابله با تغییرات اقلیمی است (Sharafi & Lorvand, 2025)، و با توجه به چالش‌های منابع آبی در سایت‌های پتانسیل‌دار ایران (Abdoos et al., 2025)، این بعد به عنوان یک رکن مستقل در مدل PESTELE لحاظ گردید. استفاده از این مدل پیش‌تر در مطالعات مشابه بین‌المللی برای تحلیل موانع و پیشران‌های هیدروژن سبز در صنعت فولاد مورد تأیید قرار گرفته است (Schultz-Zehden, 2023). این چارچوب همچنین بستری مناسب برای تحلیل ذی‌نفعان مختلف فراهم می‌کند تا نقش هر یک در لایه‌های مختلف محیطی به درستی تبیین گردد (Sabeti and Nikkhah Nasab, 2023).

۳-۲- روش گردآوری داده‌ها

روش اصلی گردآوری داده‌ها در این تحقیق مصاحبه‌های

تعامل با بازیگران متعدد است (Material Economics, 2019; World Steel Association, 2022).

در چنین مسائل پیچیده و سیستماتیک، رویکردهای کیفی امکان درک تعاملات نهادی، تعارض منافع و ادراکات خبرگان را فراهم می‌کنند (Sternman, 2000; Merriam & Tisdell, 2016). بنابراین برای شناسایی عوامل محیطی و ذی‌نفعان کلیدی، استفاده از مصاحبه‌های عمیق با خبرگان صنعتی و سیاست‌گذاران ضروری تشخیص داده شد.

• نیاز به اجماع خبرگان و اولویت‌بندی در شرایط عدم قطعیت

با توجه به نبود داده‌های قطعی و وجود عدم قطعیت بالا در حوزه فناوری هیدروژن، پس از مرحله اکتشافی کیفی، از تکنیک دلفی فاز برای پالایش و اولویت‌بندی عوامل شناسایی‌شده استفاده شد. روش دلفی به‌طور گسترده برای دستیابی به اجماع خبرگان در موضوعات فناورانه نوظهور به کار می‌رود (Hasson & Keeney, 2011). نسخه فاز آن نیز امکان کاهش ابهام در قضاوت‌های ذهنی و تبدیل نظرات کیفی به مقادیر کمی را فراهم می‌کند (Ishikawa et al., 1993; Hsu et al., 2010).

کاربرد دلفی فاز در شناسایی و تحلیل موانع فناوری‌های سبز و صنعتی نیز در مطالعات پیشین تأیید شده است (Bouzon et al., 2016; Mahmoudzadeh Bakhtabad & Taji, 2019). همچنین در مطالعات مرتبط با سیاست‌گذاری هیدروژن در ایران از رویکردهای ترکیبی SWOT و MCDM استفاده شده است که نشان‌دهنده ضرورت بهره‌گیری از قضاوت خبرگان در این حوزه است (Rahimirad & Sadabadi, 2023).

• چرایی عدم انتخاب روش‌های کمی صرف

اگرچه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^{۱۴} در انتخاب فناوری یا مکان‌یابی کاربرد گسترده دارند (Ali et al., 2008; Saaty, 2008)، اما این پژوهش در مرحله «شناسایی و صورت‌بندی اولیه عوامل محیطی و ذی‌نفعان» قرار داشت. بنابراین پیش از هرگونه مدل‌سازی کمی، نیاز به استخراج ابعاد مفهومی و ساخت چارچوب تحلیلی وجود داشت. به همین دلیل، رویکرد اکتشافی-کیفی به عنوان مرحله بنیانی انتخاب شد و سپس با دلفی فاز تکمیل گردید.

۳-۲- دلیل بکارگیری مدل PESTEL در تحلیل محیط

¹⁸ Social

¹⁹ Technological

²⁰ Environmental

¹⁴ MCDM

¹⁵ Political & Legal

¹⁶ Economic

¹⁷ MENA

فهرست اولیه افزوده نشد؛ وضعیتی که نشان‌دهنده کفایت داده‌ها برای اهداف این مرحله بود (Guest et al., 2006). این حجم نمونه علاوه بر تأمین تنوع دیدگاه‌های تخصصی، از نظر عملیاتی نیز امکان تحلیل عمیق و نظام‌مند داده‌ها را فراهم ساخت و مبنای مناسبی برای ورود به مرحله دلفی فازی فراهم آورد.

۳-۶- روش تحلیل داده‌ها

برای تحلیل داده‌های گردآوری‌شده از مصاحبه‌ها و اسناد، از تحلیل مضمون^{۲۱} با رویکردی نظام‌مند استفاده شد. در این مرحله، هدف اصلی شناسایی و استخراج عوامل محیطی و ذی‌نفعان مؤثر بر انتقال فناوری فولاد سبز به‌منظور استفاده در مرحله دلفی فازی بود. در گام نخست، متن مصاحبه‌ها پیاده‌سازی و مرور شد و کدگذاری اولیه برای استخراج مفاهیم کلیدی انجام گرفت. در گام دوم، کدهای استخراج‌شده در قالب دسته‌بندی‌های مفهومی تجمیع و پالایش شدند. در گام سوم، هم‌پوشانی‌ها حذف و فهرست نهایی عوامل به‌عنوان متغیرهای ورودی مرحله کمی (دلفی فازی) نهایی گردید. لازم به ذکر است که این مرحله با الهام از منطق کدگذاری نظام‌مند انجام شد، اما هدف آن نظریه‌پردازی یا توسعه گراند تئوری نبود، بلکه صرفاً به‌عنوان یک مرحله اکتشافی برای ساخت‌دهی متغیرهای پژوهش به کار گرفته شد (Charmaz, 2014).

۳-۷- روش دلفی فازی

این تکنیک روشی پیمایشی مبتنی بر نظرهای متخصصان است و سه خصوصیت اصلی دارد که عبارت‌اند از: پاسخ بی نام تکرار و بازخورد کنترل‌شده و در نهایت پاسخ گروهی آماری (Hsu et al., 2010). در بسیاری از موقعیت‌های واقعی قضاوت متخصصان نمیتواند به صورت اعداد کمی قطعی بیان و تفسیر شود؛ به عبارت دیگر داده‌ها و اعداد قطعی به منظور مدل کردن سیستمهای دنیای واقعی به علت ابهام و عدم قطعیت موجود در قضاوت تصمیم‌گیرندگان ناکافی است (Kannan et al., 2014). در این راستا به منظور غلبه بر این مشکل نظریه مجموعه‌های فازی که به وسیله لطفی زاده ارائه شد، ابزار مناسبی در سال برای مقابله با ابهام و عدم قطعیت موجود در فرآیند تصمیم‌گیری است (Bouzon et al., 2016). بنابراین در این پژوهش از روش دلفی فازی به منظور تأیید شاخصهای شناسایی شده استفاده گردید. این روش ترکیبی از روش دلفی و نظریه مجموعه‌های فازی است که توسط (Ishikawa et al., 1993) ارائه شد. گامهای روش دلفی فازی عبارت‌اند از (Bouzon et al., 2016).

نیمه‌ساختاریافته است. این نوع مصاحبه به پژوهشگر این امکان را می‌دهد که ضمن داشتن چارچوب کلی از پرسش‌ها، به صورت انعطاف‌پذیر گفتگو را هدایت کرده و به پرسش‌های جدیدی که در خلال مصاحبه مطرح می‌شود، بپردازد. از آنجا که موضوع تحقیق چندبعدی است و ابعاد سیاسی، اقتصادی و فناورانه را در بر می‌گیرد، چنین روشی کمک می‌کند تا دیدگاه‌های جامع و متنوعی گردآوری شود (Kvale & Brinkmann, 2015). علاوه بر مصاحبه‌ها، تحلیل اسناد و مدارک سیاستی (مانند قوانین، گزارش‌های وزارت صمت، ایمیدرو، و مرکز پژوهش‌های مجلس) به‌عنوان یک منبع مکمل استفاده خواهد شد تا یافته‌ها اعتبار بیشتری پیدا کنند. این ترکیب روش‌ها نوعی مثلث‌سازی داده‌ها را شکل می‌دهد که روایی پژوهش را افزایش می‌دهد (Bowen, 2009).

۳-۴- روش نمونه‌گیری

روش نمونه‌گیری مورد استفاده در این پژوهش نمونه‌گیری هدفمند همراه با تکنیک گلوله‌برفی است. در مرحله نخست، پژوهشگر با شناسایی خبرگان کلیدی در حوزه‌های انرژی، صنعت فولاد، محیط‌زیست، فناوری و سیاست‌گذاری صنعتی، به انتخاب اولیه مشارکت‌کنندگان اقدام کرد. معیار اصلی انتخاب خبرگان، برخورداری از تجربه تخصصی، دانش حرفه‌ای و آشنایی با ابعاد مختلف انتقال فناوری در صنعت فولاد و حوزه انرژی بود. در ادامه، از هر یک از مصاحبه‌شوندگان درخواست شد افراد مطلع دیگری را که دارای تجربه یا دانش مرتبط هستند معرفی کنند تا دامنه خبرگان گسترش یابد. این رویکرد به شکل‌گیری شبکه‌ای از خبرگان و سیاست‌گذاران مرتبط با موضوع پژوهش کمک می‌کند و در حوزه‌هایی که دانش تخصصی در میان گروه محدودی از افراد متمرکز است، کارایی بالایی دارد (Biernacki & Waldorf, 1981). استفاده از این روش نمونه‌گیری به پژوهشگر امکان داد تا دیدگاه‌های متنوعی از بازیگران آگاه به موضوع را گردآوری کند و مجموعه‌ای نسبتاً جامع از عوامل محیطی و ذی‌نفعان مؤثر بر انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن را شناسایی نماید.

۳-۵- حجم نمونه

با توجه به ماهیت اکتشافی مرحله کیفی پژوهش، هدف اصلی دستیابی به کفایت مفهومی و پوشش مناسب دیدگاه‌های تخصصی در خصوص عوامل محیطی و ذی‌نفعان مؤثر بود، نه تعیین حجم نمونه از پیش به‌صورت قطعی. در این راستا، حدود ۱۵ مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با خبرگان حوزه فولاد، انرژی، سیاست‌گذاری و فناوری پیش‌بینی شد. فرایند انجام مصاحبه‌ها تا زمانی ادامه یافت که مفاهیم استخراج‌شده به تکرار رسید و عامل جدید معناداری به

²² Fuzzy Delphi

²¹ Thematic Analysis

توسط هر تصمیم گیرنده و J میانگین فازی ارزش هر شاخص است؛ همچنین میانگین مقادیر فازی محاسبه شده از طریق رابطه ۶ به روش مرکز ثقل فازی زدایی می شود (حسینی دهشیری و همکاران، ۱۳۹۷).

$$Crisp = \frac{a+4 \times b+c}{6} \quad (۶)$$

بعد از محاسبه مقادیر بالا اگر مقدار فازی زدایی شده $J \geq S$ باشد شاخص مورد نظر تأیید و به مرحله اصلی تصمیم گیری وارد میشود؛ ولی اگر مقدار دی فازی شده $J_1 \geq S$ باشد، شاخص مورد نظر رد می شود (حسینی دهشیری و همکاران، ۱۳۹۷؛ محمدرضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

جدول ۲: پل خبرگان

تجربه (سال)	نوع سازمان / محل خدمت	رشته تخصصی / حوزه کاری
۱۵	عضو هیات علمی دانشگاه	مهندسی شیمی / هیدروژن
۲۰	شرکت فولاد	مهندسی مواد / فولاد
۱۲	شرکت انرژی خصوصی	انرژی تجدیدپذیر / خورشیدی و بادی
۱۸	نهاد دولتی	مدیریت پروژه و سرمایه گذاری
۱۰	عضو هیات علمی دانشگاه	اقتصاد انرژی و مالی
۲۲	شرکت EPC	مهندسی مکانیک / تجهیزات صنعتی
۱۵	مشاور حقوقی صنعتی	حقوق مالکیت فکری / فناوری
۱۷	سازمان محیط زیست	محیط زیست و مقررات زیست محیطی
۱۲	مرکز پژوهشی خصوصی	اقتصاد بین الملل و تجارت
۱۴	شرکت تولید برق	مهندسی برق و سیستم های انرژی
۱۶	عضو هیات علمی دانشگاه	مهندسی شیمی / فرایند فولاد
۱۳	شرکت مشاوره فناوری	مدیریت فناوری و نوآوری
۱۹	شرکت فولاد	مهندسی صنایع / لجستیک

در این پژوهش، جامعه خبرگان شامل متخصصان و صاحب نظرانی است که در حوزه های مرتبط با فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن، سیاست گذاری علم و فناوری، انرژی های پاک، و صنعت فولاد ایران دارای تجربه، دانش تخصصی و سابقه فعالیت اجرایی یا پژوهشی می باشند. به منظور اطمینان از جامعیت دیدگاه ها، خبرگان از میان گروه های متنوع شامل اساتید دانشگاه، مدیران و کارشناسان ارشد صنعتی، و کارشناسان حوزه سیاست گذاری انرژی و محیط زیست انتخاب شدند. پژوهش حاضر در دو مرحله مکمل انجام شد:

در مرحله نخست، با استفاده از تحلیل کیفی نظام مند مبتنی بر مصاحبه های نیمه ساختاریافته و بررسی اسناد، عوامل محیط کلان و ذی نفعان مؤثر بر انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن شناسایی گردید. هدف این مرحله، استخراج و پالایش مفاهیم و تدوین فهرست اولیه متغیرهای پژوهش به منظور استفاده در مرحله کمی بود.

در مرحله دوم، عوامل شناسایی شده از طریق روش دلفی فازی

(۱) **گام اول:** گام اول شناسایی عوامل محیطی و ذی نفعان

صنعت فولاد سبز با مرور جامع مبانی نظری پژوهش

(۲) **گام دوم:** گام دوم جمع آوری نظرهای متخصصان تصمیم

گیرنده در این گام بعد از شناسایی عوامل و موانع انتقال فناوری در صنعت فولاد سبز، گروه تصمیم گیری متشکل از خبرگان مرتبط با موضوع پژوهش تشکیل شده و پرسشنامه ای به منظور تعیین مرتبط بودن شاخصهای شناسایی شده با موضوع اصلی پژوهش برای آنها ارسال می شود که در آن متغیرهای زبانی جدول زیر برای بیان اهمیت هر شاخص به کار می روند. در این پژوهش از اعداد فازی مثلثی استفاده میشود که به دلیل سادگی در فهم آن به دفعات مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است و در آن M یک عدد فازی مثلثی است U, M, L به ترتیب نمایانگر کوچک ترین، متوسط ترین و بزرگ ترین ارزش ممکن هستند.

جدول ۱: عبارتهای کلومی برای تأیید شاخص های تصمیم گیری

متغیر زبانی	عدد فازی
خیلی کم	(۰, ۰, ۰/۲۵)
کم	(۰, ۰/۲۵, ۰/۵)
متوسط	(۰/۲۵, ۰/۵, ۰/۷۵)
زیاد	(۰/۵, ۰/۷۵, ۱)
خیلی زیاد	(۰/۷۵, ۱, ۱)

(۳) **گام سوم:** تأیید شاخصهای پراهمیت از طریق مقایسه مقدار

ارزش اکتسابی هر شاخص با مقدار آستانه $\hat{S}$ صورت می پذیرد مقدار آستانه از چند طریق محاسبه میشود؛ ولی استفاده از مقدار میانگین ارزش شاخص ها به عنوان مقدار آستانه یکی از قابل اتکاترین روشها است. برای این کار ابتدا باید مقادیر فازی مثلثی نظرهای خبرگان محاسبه شده سپس برای محاسبه میانگین نظرات n پاسخ دهنده میانگین فازی آنها محاسبه شود. بدین منظور لازم است که عدد فازی مثلثی هر شاخص مورد محاسبه قرار گیرد محاسبه عدد فازی مثلثی برای هر یک از شاخص ها با استفاده از روابط (۱ تا ۵) صورت می گیرد (حسینی دهشیری و همکاران، ۱۳۹۷).

$$\tilde{a}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}); \forall i = 1, 2, \dots, n, \forall j = 1, 2, \dots, m \quad (۱)$$

$$\tilde{r}_j = (a_j, b_j, c_j) \quad (۲)$$

$$a_j = \min(a_{ij}) \quad (۳)$$

$$b_j = \left(\prod_{i=1}^n b_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (۴)$$

$$c_j = \max(c_{ij}) \quad (۵)$$

در روابط بالا اندیس به فرد خبره و اندیس i شاخص j تصمیم گیری اشاره دارد a_{ij} مقدار ارزش فازی اکتسابی هر شاخص

زنجیره ارزش شناسایی شدند. این فهرست به عنوان مجموعه اولیه متغیرها در اختیار پنل خبرگان قرار گرفت.

در گام بعدی پژوهش، این عوامل و ذی نفعان از طریق روش دلفی فازی مورد ارزیابی قرار گرفتند تا میزان اهمیت و اولویت هر یک بر اساس اجماع خبرگان تعیین شود.

۴-۱- شناسایی عوامل محیطی

شناسایی عوامل محیطی یکی از مراحل اساسی برای درک شرایط مؤثر بر توسعه صنعت فولاد سبز بر پایه هیدروژن در ایران محسوب می شود. استفاده از چارچوب PESTEL امکان بررسی جامع محیط خارجی را فراهم می کند و تأثیر عوامل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست محیطی و قانونی را بر موفقیت پروژه ها و سیاست گذاری ها تحلیل می نماید. این چارچوب کمک می کند تا عوامل مؤثر در خصوص فرصت ها یا تهدیدهای احتمالی برای توسعه صنعت فولاد سبز شناسایی گردد و اثرات آن ها را بر تصمیم گیری ها و استراتژی های کلان پیش بینی می کند. بررسی عوامل محیطی به ویژه در حوزه هایی مانند سرمایه گذاری در فناوری های نوین، بهره وری انرژی، توسعه زیرساخت ها و پذیرش اجتماعی، اهمیت حیاتی دارد.

در این پژوهش، شناسایی عوامل محیطی از طریق جمع آوری داده ها و نظرات خبرگان انجام شد و هر عامل در دو مرحله ارزیابی شد تا میانگین اهمیت و میزان تأثیرگذاری آن مشخص گردد. این فرآیند امکان تحلیل کمی و رتبه بندی عوامل را فراهم می کند و ثبات و اجماع نظر کارشناسان را افزایش می دهد. عوامل شناسایی شده شامل مواردی نظیر تحریم های بین المللی، ثبات سیاست گذاری دولتی، هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی، زیرساخت های انرژی تجدیدپذیر، مقررات زیست محیطی و استانداردهای صنعتی می باشند. با استفاده از داده های مرحله اول و دوم، می توان اهمیت هر عامل را به صورت کمی محاسبه و روند تغییرات آن را ارزیابی کرد. در نهایت، شناسایی و درجه بندی عوامل محیطی به مدیران و تصمیم گیرندگان کمک می کند تا استراتژی های توسعه صنعت فولاد سبز را بر اساس فرصت ها و تهدیدهای واقعی محیطی طراحی کنند و ریسک ها و موانع احتمالی را به حداقل برسانند. این تحلیل، پایه ای محکم برای تصمیم گیری راهبردی و برنامه ریزی بلندمدت در صنعت فولاد سبز بر پایه هیدروژن فراهم می کند.

شناسایی عوامل محیطی یکی از مراحل اساسی برای درک شرایط مؤثر بر توسعه صنعت فولاد سبز بر پایه هیدروژن در ایران محسوب می شود. استفاده از چارچوب PESTEL امکان بررسی جامع محیط خارجی را فراهم می کند و تأثیر عوامل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست محیطی و قانونی را بر موفقیت پروژه ها و سیاست گذاری ها تحلیل می نماید. این چارچوب کمک

دو مرحله ای مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفتند تا میزان اهمیت و سطح اجماع خبرگان درباره هر عامل تعیین شود.

با توجه به اینکه خبرگان مرحله نخست در فرایند شناسایی و تبیین اولیه مفاهیم نقش مستقیم داشتند، استفاده از همان گروه در مرحله دلفی فازی از نظر روش شناسی موجه تشخیص داده شد. دلایل این انتخاب عبارتند از:

- تداوم مفهومی و انسجام داده ها: خبرگان مرحله اول با مفاهیم استخراج شده آشنایی کامل دارند و در نتیجه می توانند در مرحله دلفی فازی ارزیابی دقیق تری ارائه دهند.
- کاهش احتمال تفسیر نادرست مفاهیم: استفاده از خبرگان جدید ممکن است منجر به برداشت های متفاوت از مفاهیم شود؛ حضور همان گروه موجب حفظ معنای اولیه و انسجام تحلیلی می گردد.
- افزایش دقت در ارزیابی فازی: آشنایی قبلی خبرگان با زمینه پژوهش و فرآیند استخراج عوامل، به ارائه قضاوت های واقع بینانه تر کمک می کند.
- پیوستگی منطقی مراحل پژوهش: طراحی پژوهش مبتنی بر یک فرایند پیوسته از مرحله اکتشافی تا مرحله اعتبارسنجی کمی بوده و ثبات ترکیب خبرگان به تقویت قابلیت اعتماد نتایج کمک می کند.

بر این اساس، در این پژوهش از یک پانل خبرگی واحد در هر دو مرحله استفاده شد تا انسجام مفهومی، دقت ارزیابی و اعتبار نهایی یافته ها تقویت شود.

۴-۲ تجزیه و تحلیل داده ها

در مرحله نخست پژوهش، به منظور شناسایی مجموعه اولیه عوامل مؤثر بر انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران، مصاحبه های نیمه ساختاریافته ای با گروهی از خبرگان حوزه صنعت فولاد، انرژی و سیاست گذاری صنعتی انجام شد. هدف از این مرحله استخراج دیدگاه های خبرگان درباره مهم ترین عوامل محیطی و بازیگران مؤثر در این حوزه بود.

متن مصاحبه ها پس از پیاده سازی مورد بررسی قرار گرفت و مفاهیم و عوامل تکرارشونده مرتبط با شرایط محیطی و نهادی صنعت فولاد شناسایی شد. این عوامل سپس در چارچوب ابعاد شش گانه محیط کلان (PESTEL) شامل عوامل سیاسی، اقتصادی، فناورانه، اجتماعی، زیست محیطی و قانونی طبقه بندی شدند. نتیجه این مرحله استخراج مجموعه ای از عوامل محیطی کلیدی بود که با کدهای POL، ECO، TEC، SOC، ENV و LEG مشخص شدند.

همچنین در همین مرحله، طیف گسترده ای از ذی نفعان مرتبط با توسعه فناوری فولاد سبز شامل نهادهای سیاست گذار، شرکت های صنعتی، نهادهای مالی، مراکز علمی و سایر بازیگران

کد	عامل محیطی
POL06	ریسک‌های امنیتی و ثبات منطقه‌ای
POL07	اهمیت همکاری‌های عمومی-خصوصی (PPP)
POL08	دسترسی به بازار صادراتی و موانع تجاری
ECO01	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای الکترولايزر
ECO02	هزینه عملیاتی و دسترسی به برق ارزان
ECO03	دسترسی به منابع مالی و بازار سرمایه
ECO04	قیمت جهانی فولاد و انگیزه بازار برای فولاد سبز
ECO05	هزینه آب و دسترسی به آب شیرین
ECO06	زنجیره تأمین داخلی (مواد، قطعات الکترولايزر، خدمات)
ECO07	ظرفیت لجستیک و حمل‌ونقل هیدروژن
ECO08	سیستم‌های بیمه و پوشش ریسک پروژه‌های بزرگ
ECO09	هزینه فرصت و رقابت با بخش‌های دیگر انرژی
ECO10	سازوکارهای تشویقی مالیاتی/یارانه‌ای برای فولاد سبز
ECO11	دسترسی به قطعات و مواد وارداتی (وابستگی)
TEC01	زیرساخت انرژی تجدیدپذیر (ظرفیت خورشیدی/بادی)
TEC02	وجود ظرفیت تحقیق و توسعه دانشگاهی و صنعتی
TEC03	مالکیت فکری و دسترسی به لیسانس‌ها
TEC04	قابلیت جذب و انتقال دانش داخلی ^{۲۴}
TEC05	ظرفیت شرکت‌های مهندسی داخلی
TEC06	وجود خوشه‌های صنعتی و زنجیره ارزش فولاد
SOC01	نیروی کار ماهر در هیدروژن و تولید فولاد مدرن
SOC02	فرهنگ سازمانی و مقاومت در برابر تغییر
SOC03	خواست و فشار اجتماعی برای کاهش آلاینده‌گی
SOC04	پذیرش بازار کارفرمایان بزرگ فولادی
ENV01	مقررات زیست‌محیطی و سقف انتشار CO ₂
ENV02	سازوکارهای قیمت‌گذاری کربن/مالیات زیستی
ENV03	ریسک‌های محیط‌زیستی محلی (آلودگی خاک/آب)
ENV04	تناسب زمین و مناطق صنعتی با دسترسی به برق/آب
LEG01	استانداردها و گواهی‌نامه‌های فولاد سبز برای صادرات
LEG02	استانداردهای ایمنی و مقررات کار با هیدروژن

جدول ۴: فراوانی هر یک از عوامل محیطی در دور اول دلفی فازی

عامل محیطی	فراوانی	فراوانی	فراوانی	فراوانی	فراوانی
POL01	۹	۴	۲	۰	۰
POL02	۸	۵	۲	۰	۰
POL03	۶	۶	۳	۰	۰
POL04	۷	۵	۳	۰	۰
POL05	۶	۶	۳	۰	۰
ECO01	۱۰	۴	۱	۰	۰

24 Learning Curve

می‌کند تا عوامل موثر در خصوص فرصت‌ها یا تهدیدهای احتمالی برای توسعه صنعت فولاد سبز شناسایی گردد و اثرات آن‌ها را بر تصمیم‌گیری‌ها و استراتژی‌های کلان پیش‌بینی می‌کند. بررسی عوامل محیطی به ویژه در حوزه‌هایی مانند سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، بهره‌وری انرژی، توسعه زیرساخت‌ها و پذیرش اجتماعی، اهمیت حیاتی دارد.

به منظور استخراج فهرست اولیه عوامل محیطی، ابتدا متن مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان بازبینی و مفاهیم مرتبط با موانع و پیشران‌های توسعه فولاد سبز استخراج گردید. این مفاهیم در یک فرآیند غربالگری اولیه^{۲۳} بر اساس میزان تکرار و ارتباط با موضوع پژوهش، پالایش و در قالب ابعاد شش‌گانه PESTEL دسته‌بندی شدند. خروجی این مرحله، مجموعه‌ای شامل ۳۶ عامل محیطی در شش بُعد (سیاسی، اقتصادی، فناورانه، اجتماعی، زیست‌محیطی و قانونی) و ۱۹ ذی‌نفع کلیدی بود که به‌عنوان ورودی مرحله دلفی فازی مورد استفاده قرار گرفت.

در این پژوهش، شناسایی عوامل محیطی از طریق جمع‌آوری داده‌ها و نظرات خبرگان انجام شد و هر عامل در دو مرحله ارزیابی شد تا میانگین اهمیت و میزان تأثیرگذاری آن مشخص گردد. این فرآیند امکان تحلیل کمی و رتبه‌بندی عوامل را فراهم می‌کند و ثبات و اجماع نظر کارشناسان را افزایش می‌دهد. عوامل شناسایی‌شده شامل مواردی نظیر تحریم‌های بین‌المللی، ثبات سیاست‌گذاری دولتی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر، مقررات زیست‌محیطی و استانداردهای صنعتی می‌باشند. با استفاده از داده‌های مرحله اول و دوم، می‌توان اهمیت هر عامل را به صورت کمی محاسبه و روند تغییرات آن را ارزیابی کرد. در نهایت، شناسایی و درجه‌بندی عوامل محیطی به مدیران و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا استراتژی‌های توسعه صنعت فولاد سبز را بر اساس فرصت‌ها و تهدیدهای واقعی محیطی طراحی کنند و ریسک‌ها و موانع احتمالی را به حداقل برسانند. این تحلیل، پایه‌ای محکم برای تصمیم‌گیری راهبردی و برنامه‌ریزی بلندمدت در صنعت فولاد سبز بر پایه هیدروژن فراهم می‌کند.

جدول ۳: کدبندی هر یک از عوامل محیطی

کد	عامل محیطی
POL01	تحریم‌های بین‌المللی و محدودیت همکاری فناورانه
POL02	ثبات و شفافیت سیاست‌گذاری دولتی در حوزه انرژی
POL03	جهت‌گیری برنامه‌های ملی انرژی
POL04	دیپلماسی صنعتی و توافقات انتقال فناوری
POL05	ثبات مقررات سرمایه‌گذاری خارجی و ضمانت‌ها

23 Initial Screening

مقدار CRISP	(l, m, u)	عامل محیطی
۰,۷۵۲۸	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۳۳۳)	ECO05
۰,۸۱۳۹	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	TEC01
۰,۷۶۶۷	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۳۳۳)	TEC02
۰,۷۵۲۸	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۳۳۳)	TEC03
۰,۸۰۰۰	(۰,۵۶۶۷,۰,۸۱۶۷,۰,۹۶۶۷)	SOC01
۰,۶۲۷۸	(۰,۳۸۳۳,۰,۶۳۳۳,۰,۸۵۰۰)	SOC02
۰,۷۶۹۴	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۵۰۰)	SOC03
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	ENV01
۰,۷۲۲۲	(۰,۴۸۳۳,۰,۷۳۳۳,۰,۹۱۶۷)	ENV02
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	LEG01
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	POL06
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	ECO06
۰,۷۰۸۳	(۰,۴۶۶۷,۰,۷۱۶۷,۰,۹۱۶۷)	ECO07
۰,۶۲۷۸	(۰,۳۸۳۳,۰,۶۳۳۳,۰,۸۵۰۰)	ECO08
۰,۷۶۶۷	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۳۳۳)	POL08
۰,۷۵۲۸	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۳۳۳)	POL07
۰,۷۶۶۷	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۳۳۳)	TEC06
۰,۷۲۲۲	(۰,۴۸۳۳,۰,۷۳۳۳,۰,۹۱۶۷)	ENV04
۰,۷۵۲۸	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۳۳۳)	LEG02
۰,۶۹۱۷	(۰,۴۵۰۰,۰,۷۰۰۰,۰,۹۰۰۰)	TEC04
۰,۶۴۴۴	(۰,۴۰۰۰,۰,۶۵۰۰,۰,۸۶۶۷)	ECO09
۰,۶۹۱۷	(۰,۴۵۰۰,۰,۷۰۰۰,۰,۹۰۰۰)	ENV03
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	TEC05
۰,۷۶۶۷	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۳۳۳)	SOC04
۰,۷۶۶۷	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۳۳۳)	ECO11
۰,۷۶۶۷	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۳۳۳)	ECO10

جدول ۶: فراوانی هر یک از عوامل محیطی در دور دوم دلفی فازی

عامل محیطی	بازیگر	تیم	میانگین	ح	ح
POL01	۱۰	۵	۰	۰	۰
POL02	۹	۶	۰	۰	۰
POL03	۸	۶	۱	۰	۰
POL04	۸	۶	۱	۰	۰
POL05	۸	۶	۱	۰	۰
ECO01	۱۱	۴	۰	۰	۰
ECO02	۱۰	۵	۰	۰	۰
ECO03	۹	۶	۰	۰	۰
ECO04	۷	۶	۲	۰	۰
ECO05	۵	۶	۴	۰	۰

عامل محیطی	بازیگر	تیم	میانگین	ح	ح
ECO02	۹	۵	۱	۰	۰
ECO03	۸	۵	۲	۰	۰
ECO04	۵	۶	۴	۰	۰
ECO05	۵	۶	۴	۰	۰
TEC01	۷	۶	۲	۰	۰
TEC02	۶	۵	۴	۰	۰
TEC03	۵	۶	۴	۰	۰
SOC01	۶	۷	۲	۰	۰
SOC02	۲	۵	۷	۱	۰
SOC03	۵	۷	۳	۰	۰
ENV01	۶	۶	۳	۰	۰
ENV02	۴	۶	۵	۰	۰
LEG01	۶	۶	۳	۰	۰
POL06	۶	۶	۳	۰	۰
ECO06	۶	۶	۳	۰	۰
ECO07	۳	۷	۵	۰	۰
ECO08	۲	۵	۷	۱	۰
POL08	۶	۵	۴	۰	۰
POL07	۵	۶	۴	۰	۰
TEC06	۶	۵	۴	۰	۰
ENV04	۴	۶	۵	۰	۰
LEG02	۵	۶	۴	۰	۰
TEC04	۳	۶	۶	۰	۰
ECO09	۲	۶	۶	۱	۰
ENV03	۳	۶	۶	۰	۰
TEC05	۶	۶	۳	۰	۰
SOC04	۶	۵	۴	۰	۰
ECO11	۶	۵	۴	۰	۰
ECO10	۶	۵	۴	۰	۰

جدول ۵: مقادیر فازی برای هر یک از عوامل محیطی در دور اول

عامل محیطی	(l, m, u)	مقدار CRISP
POL01	(۰,۶۱۶۷,۰,۸۶۶۷,۰,۹۶۶۷)	۰,۸۴۱۷
POL02	(۰,۶۰۰۰,۰,۸۵۰۰,۰,۹۶۶۷)	۰,۸۲۷۸
POL03	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	۰,۷۸۳۳
POL04	(۰,۵۶۶۷,۰,۸۱۶۷,۰,۹۵۰۰)	۰,۷۹۷۲
POL05	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	۰,۷۸۳۳
ECO01	(۰,۶۵۰۰,۰,۹۰۰۰,۰,۹۸۳۳)	۰,۸۷۲۲
ECO02	(۰,۶۳۳۳,۰,۸۸۳۳,۰,۹۸۳۳)	۰,۸۵۸۳
ECO03	(۰,۶۰۰۰,۰,۸۵۰۰,۰,۹۶۶۷)	۰,۸۲۷۸
ECO04	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۳۳۳)	۰,۷۵۲۸

مقدار CRISP	(l, m, u)	عامل محیطی
۰,۷۵۲۸	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۳۳۳)	ECO05
۰,۸۴۴۴	(۰,۶۱۶۷,۰,۸۶۶۷,۰,۹۸۳۳)	TEC01
۰,۸۱۳۹	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	TEC02
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	TEC03
۰,۸۳۰۶	(۰,۶۰۰۰,۰,۸۵۰۰,۰,۹۸۳۳)	SOC01
۰,۶۸۸۹	(۰,۴۶۶۷,۰,۷۰۰۰,۰,۸۶۶۷)	SOC02
۰,۷۶۹۴	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۵۰۰)	SOC03
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	ENV01
۰,۷۵۰۰	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۶۶۷,۰,۹۰۰۰)	ENV02
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	LEG01
۰,۸۱۱۱	(۰,۶۰۰۰,۰,۸۳۳۳,۰,۹۳۳۳)	POL06
۰,۸۱۳۹	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	ECO06
۰,۷۰۸۳	(۰,۴۶۶۷,۰,۷۱۶۷,۰,۹۱۶۷)	ECO07
۰,۶۸۸۹	(۰,۴۶۶۷,۰,۷۰۰۰,۰,۸۶۶۷)	ECO08
۰,۸۱۳۹	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	POL08
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	POL07
۰,۸۱۳۹	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	TEC06
۰,۷۲۲۲	(۰,۴۸۳۳,۰,۷۳۳۳,۰,۹۱۶۷)	ENV04
۰,۷۸۳۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	LEG02
۰,۷۵۰۰	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۶۶۷,۰,۹۰۰۰)	TEC04
۰,۶۴۴۴	(۰,۴۰۰۰,۰,۶۵۰۰,۰,۸۶۶۷)	ECO09
۰,۷۱۹۴	(۰,۵۰۰۰,۰,۷۳۳۳,۰,۸۸۳۳)	ENV03
۰,۸۱۳۹	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	TEC05
۰,۸۱۳۹	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	SOC04
۰,۸۱۳۹	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	ECO11
۰,۸۱۳۹	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	ECO10

جدول ۸: اختلاف میانگین مراحل اول و دوم فازی برای هر یک از عوامل

اختلاف (درصد)	اختلاف (واحد)	میانگین		عامل
		مرحله اول	مرحله دوم	
٪۵,۶۱	۰,۰۴۷۲	۰,۸۸۸۹	۰,۸۴۱۷	POL01
٪۵,۷۰	۰,۰۴۷۲	۰,۸۷۵۰	۰,۸۲۷۸	POL02
٪۷,۸۰	۰,۰۶۱۱	۰,۸۴۴۴	۰,۷۸۳۳	POL03
٪۵,۹۲	۰,۰۴۷۲	۰,۸۴۴۴	۰,۷۹۷۲	POL04
٪۷,۸۰	۰,۰۶۱۱	۰,۸۴۴۴	۰,۷۸۳۳	POL05
٪۳,۵۰	۰,۰۳۰۶	۰,۹۰۲۸	۰,۸۷۲۲	ECO01
٪۳,۵۶	۰,۰۳۰۶	۰,۸۸۸۹	۰,۸۵۸۳	ECO02
٪۵,۷۰	۰,۰۴۷۲	۰,۸۷۵۰	۰,۸۲۷۸	ECO03
٪۸,۱۲	۰,۰۶۱۱	۰,۸۱۳۹	۰,۷۵۲۸	ECO04
٪۰,۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۷۵۲۸	۰,۷۵۲۸	ECO05
٪۳,۷۵	۰,۰۳۰۶	۰,۸۴۴۴	۰,۸۱۳۹	TEC01
٪۶,۱۶	۰,۰۴۷۲	۰,۸۱۳۹	۰,۷۶۶۷	TEC02
٪۴,۰۶	۰,۰۳۰۶	۰,۷۸۳۳	۰,۷۵۲۸	TEC03

عامل محیطی	تجربه	تجربه	تجربه	تجربه	تجربه
TEC01	۰	۰	۱	۶	۸
TEC02	۰	۰	۲	۶	۷
TEC03	۰	۰	۳	۶	۶
SOC01	۰	۰	۱	۷	۷
SOC02	۰	۰	۴	۶	۴
SOC03	۰	۰	۳	۷	۵
ENV01	۰	۰	۳	۶	۶
ENV02	۰	۰	۲	۶	۶
LEG01	۰	۰	۳	۶	۶
POL06	۰	۰	۰	۶	۸
ECO06	۰	۰	۲	۶	۷
ECO07	۰	۰	۵	۷	۳
ECO08	۰	۰	۴	۶	۴
POL08	۰	۰	۲	۶	۷
POL07	۰	۰	۳	۶	۶
TEC06	۰	۰	۲	۶	۷
ENV04	۰	۰	۵	۶	۴
LEG02	۰	۰	۳	۶	۶
TEC04	۰	۰	۲	۶	۶
ECO09	۰	۱	۶	۶	۲
ENV03	۰	۰	۳	۶	۵
TEC05	۰	۰	۲	۶	۷
SOC04	۰	۰	۲	۶	۷
ECO11	۰	۰	۲	۶	۷
ECO10	۰	۰	۲	۶	۷

جدول ۷: مقادیر فازی برای هر یک از عوامل محیطی در دور دوم

عامل محیطی	(l, m, u)	مقدار CRISP
POL01	(۰,۶۶۶۷,۰,۹۱۶۷,۱,۰۰۰۰)	۰,۸۸۸۹
POL02	(۰,۶۵۰۰,۰,۹۰۰۰,۱,۰۰۰۰)	۰,۸۷۵۰
POL03	(۰,۶۱۶۷,۰,۸۶۶۷,۰,۹۸۳۳)	۰,۸۴۴۴
POL04	(۰,۶۱۶۷,۰,۸۶۶۷,۰,۹۸۳۳)	۰,۸۴۴۴
POL05	(۰,۶۱۶۷,۰,۸۶۶۷,۰,۹۸۳۳)	۰,۸۴۴۴
ECO01	(۰,۶۸۳۳,۰,۹۳۳۳,۱,۰۰۰۰)	۰,۹۰۲۸
ECO02	(۰,۶۶۶۷,۰,۹۱۶۷,۱,۰۰۰۰)	۰,۸۸۸۹
ECO03	(۰,۶۵۰۰,۰,۹۰۰۰,۱,۰۰۰۰)	۰,۸۷۵۰
ECO04	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	۰,۸۱۳۹

کاهش آلاینده‌گی و مقاومت سازمانی نیز، نشان‌دهنده چالش‌های غیرمالی و نیاز به تغییر فرهنگ صنعتی است. عوامل مرتبط با زنجیره تأمین و زیرساخت لجستیک، سیستم‌های بیمه و پذیرش بازار صادراتی، اهمیت آمادگی عملیاتی و پوشش ریسک در پروژه‌ها را نشان می‌دهند. در مجموع، افزایش جزئی میانگین‌ها بین دو مرحله نشان‌دهنده تثبیت نظر کارشناسان و توجه همزمان به جنبه‌های اقتصادی، سیاستی، فناوری، انسانی و اجتماعی است. نکته قابل توجه، افزایش مقادیر Crisp در دور دوم دلفی فازی عواملی همچون «همکاری‌های عمومی-خصوصی» و «وجود خوشه‌های صنعتی» است که بیانگر اهمیت ویژه تعامل بین بخش‌های مختلف و زیرساخت‌های صنعتی برای توسعه موفق هیدروژن و فولاد سبز است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انتقال فناوری و توسعه فولاد سبز نیازمند رویکرد جامع و همزمان در چهار محور: سرمایه‌گذاری، سیاست‌گذاری، زیرساخت فناوری و ظرفیت انسانی است و هر گونه بی‌توجهی به یکی از این محورها می‌تواند روند توسعه را کند می‌کند. همچنین، ثبات افزایش‌ها و کم بودن اختلاف‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی‌ها قابل اتکا و اجماع کارشناسی بین مرحله اول و دوم برقرار بوده است. در نهایت، بررسی عوامل کم‌میانگین‌تر هم برای پیش‌بینی مشکلات و برنامه‌ریزی برای بهبود پروژه ضروری است.

شناسایی ذی‌نفعان کلیدی

در بخش تجزیه و تحلیل داده‌ها، شناسایی ذی‌نفعان کلیدی یکی از مراحل حیاتی برای درک محیط اثرگذار بر توسعه صنعت فولاد سبز بر پایه هیدروژن در ایران محسوب می‌شود. ذی‌نفعان، افرادی یا سازمان‌هایی هستند که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر تصمیم‌گیری، اجرای پروژه‌ها و موفقیت استراتژی‌های صنعتی تأثیر می‌گذارند و یا از نتایج آن بهره‌مند می‌شوند. شناسایی دقیق این گروه‌ها امکان اولویت‌بندی منابع، برنامه‌ریزی راهبردی و مدیریت ریسک‌ها را فراهم می‌کند.

به منظور تدوین فهرست اولیه ذی‌نفعان، در مرحله نخست دیدگاه‌های خبرگان صنعت فولاد، انرژی و سیاست‌گذاری صنعتی مورد بررسی قرار گرفت و بازیگران تکرار شونده و مرتبط با زنجیره ارزش فولاد سبز استخراج شد. این بازیگران بر اساس نقش نهادی و جایگاه آن‌ها در فرآیند توسعه فناوری در قالب چند گروه اصلی شامل نهادهای سیاست‌گذار و تنظیم‌گر، بنگاه‌های صنعتی، نهادهای مالی و سرمایه‌گذاری، مراکز علمی و تحقیقاتی، شرکت‌های مهندسی و زنجیره تأمین، و همچنین بازیگران اجتماعی و بازار دسته‌بندی شدند. خروجی این مرحله شناسایی ۱۹ ذی‌نفع بالقوه بود که به‌عنوان ورودی مرحله دلفی مورد استفاده قرار گرفت.

در ادامه، برای ارزیابی میزان اهمیت و سطح اثرگذاری این

عامل	میانگین		اختلاف (واحد)	اختلاف (درصد)
	مرحله اول	مرحله دوم		
SOC01	۰,۸۰۰۰	۰,۸۳۰۶	۰,۰۳۰۶	۳,۸۲٪
SOC02	۰,۶۲۷۸	۰,۶۸۸۹	۰,۰۶۱۱	۹,۷۳٪
SOC03	۰,۷۶۹۴	۰,۷۶۹۴	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰٪
ENV01	۰,۷۸۳۳	۰,۷۸۳۳	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰٪
ENV02	۰,۷۲۲۲	۰,۷۵۰۰	۰,۰۲۷۸	۳,۸۵٪
LEG01	۰,۷۸۳۳	۰,۷۸۳۳	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰٪
POL06	۰,۷۸۳۳	۰,۸۱۱۱	۰,۰۲۷۸	۳,۵۵٪
ECO06	۰,۷۸۳۳	۰,۸۱۳۹	۰,۰۳۰۶	۳,۹۰٪
ECO07	۰,۷۰۸۳	۰,۷۰۸۳	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰٪
ECO08	۰,۶۲۷۸	۰,۶۸۸۹	۰,۰۶۱۱	۹,۷۳٪
POL08	۰,۷۶۶۷	۰,۸۱۳۹	۰,۰۴۷۲	۶,۱۶٪
POL07	۰,۷۵۲۸	۰,۷۸۳۳	۰,۰۳۰۶	۴,۰۶٪
TEC06	۰,۷۶۶۷	۰,۸۱۳۹	۰,۰۴۷۲	۶,۱۶٪
ENV04	۰,۷۲۲۲	۰,۷۲۲۲	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰٪
LEG02	۰,۷۵۲۸	۰,۷۸۳۳	۰,۰۳۰۶	۴,۰۶٪
TEC04	۰,۶۹۱۷	۰,۷۵۰۰	۰,۰۵۸۳	۸,۴۳٪
ECO09	۰,۶۴۴۴	۰,۶۴۴۴	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰٪
ENV03	۰,۶۹۱۷	۰,۷۱۹۴	۰,۰۲۷۸	۴,۰۲٪
TEC05	۰,۷۸۳۳	۰,۸۱۳۹	۰,۰۳۰۶	۳,۹۰٪
SOC04	۰,۷۶۶۷	۰,۸۱۳۹	۰,۰۴۷۲	۶,۱۶٪
ECO11	۰,۷۶۶۷	۰,۸۱۳۹	۰,۰۴۷۲	۶,۱۶٪
ECO10	۰,۷۶۶۷	۰,۸۱۳۹	۰,۰۴۷۲	۶,۱۶٪

تحلیل جدول فوق نشان می‌دهد که تمامی عوامل مؤثر بر توسعه هیدروژن و فولاد سبز در ایران در مرحله دوم ارزیابی، نسبت به مرحله اول افزایش اندکی داشته‌اند که همگی کمتر از ۱۰ درصد اختلاف دارند. این موضوع نشان‌دهنده ثبات نظر کارشناسان و تأیید مجدد اهمیت این عوامل است. عوامل اقتصادی و سرمایه‌گذاری مانند هزینه‌های CAPEX و OPEX، دسترسی به منابع مالی، و قیمت جهانی فولاد، همگی در سطح بالایی ارزیابی شده‌اند که اهمیت تأمین مالی و صرفه اقتصادی پروژه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر و ظرفیت تحقیق و توسعه دانشگاهی و صنعتی، نقش حیاتی در توسعه فناوری هیدروژن دارند.

عوامل سیاست‌گذاری و مقررات مانند ثبات سیاست‌ها، مقررات سرمایه‌گذاری خارجی، سازوکارهای قیمت‌گذاری کربن و استانداردهای زیست‌محیطی نیز افزایش جزئی داشته‌اند که بیانگر توجه به زمینه قانونی و حمایت‌های دولتی است. نیروی کار ماهر و قابلیت جذب دانش داخلی، هرچند کمی پایین‌تر از میانگین اقتصادی، اما با افزایش ۰,۰۳ واحد، اهمیت توسعه مهارت‌ها و یادگیری سازمانی را برجسته می‌کند.

عوامل اجتماعی و فرهنگی مانند خواست اجتماعی برای

کد ذی نفع	بازار	تولید	تجارت	کشور	نوع
S01	۱۰	۴	۱	۰	۰
S02	۵	۷	۳	۰	۰
S03	۴	۸	۳	۰	۰
S04	۲	۳	۷	۳	۰
S05	۹	۳	۲	۰	۰
S06	۴	۸	۳	۰	۰
S07	۲	۳	۸	۲	۰
S08	۳	۹	۳	۰	۰
S09	۴	۷	۳	۱	۰
S10	۱	۲	۶	۶	۰
S11	۰	۲	۷	۶	۰
S12	۱	۳	۸	۳	۰
S13	۱	۳	۷	۲	۱
S14	۲	۳	۸	۲	۰
S15	۳	۸	۴	۰	۰
S16	۱	۲	۸	۴	۰
S17	۰	۱	۵	۶	۳
S18	۱	۸	۳	۱	۲
S19	۱	۴	۷	۲	۱

جدول ۱۱: مقادیر فازی برای هر یک از ذی‌نفعان در دور اول

کد ذی نفع	(l, m, u)	مقدار CRISP
S01	(۰,۶۵۰۰۰,۹۰۰۰۰,۹۸۳۳)	۰,۸۷۲۲
S02	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۵۰۰)	۰,۷۶۹۴
S03	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۵۰۰)	۰,۷۵۵۶
S04	(۰,۳۱۶۷,۰,۵۶۶۷,۰,۷۸۳۳)	۰,۵۶۱۱
S05	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۱۶۷,۰,۹۰۰۰)	۰,۷۹۱۷
S06	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۵۰۰)	۰,۷۵۵۶
S07	(۰,۳۳۳۳,۰,۵۸۳۳,۰,۸۰۰۰)	۰,۵۷۷۸
S08	(۰,۵۰۰۰,۰,۷۵۰۰,۰,۹۵۰۰)	۰,۷۴۱۷
S09	(۰,۴۸۳۳,۰,۷۳۳۳,۰,۹۱۶۷)	۰,۷۲۲۲
S10	(۰,۲۱۶۷,۰,۴۶۶۷,۰,۷۰۰۰)	۰,۴۶۳۹
S11	(۰,۱۸۳۳,۰,۴۳۳۳,۰,۶۸۳۳)	۰,۴۳۳۳
S12	(۰,۲۸۳۳,۰,۵۳۳۳,۰,۷۶۶۷)	۰,۵۳۰۶
S13	(۰,۲۶۶۷,۰,۴۸۳۳,۰,۷۰۰۰)	۰,۴۸۳۳
S14	(۰,۳۳۳۳,۰,۵۸۳۳,۰,۸۰۰۰)	۰,۵۷۷۸
S15	(۰,۴۸۳۳,۰,۷۳۳۳,۰,۹۳۳۳)	۰,۷۲۵۰
S16	(۰,۲۵۰۰,۰,۵۰۰۰,۰,۷۳۳۳)	۰,۴۹۷۲
S17	(۰,۱۱۶۷,۰,۳۱۶۷,۰,۵۶۶۷)	۰,۳۲۵۰

بازیگران، از روش دلفی دو مرحله‌ای استفاده شد. این روش با بهره‌گیری از نظرات کارشناسان و خبرگان حوزه انرژی، فولاد و فناوری هیدروژن، به ارزیابی و اولویت‌بندی ذی‌نفعان بر اساس میزان تأثیر و اهمیت آن‌ها کمک می‌کند. استفاده از دلفی دو مرحله‌ای امکان دستیابی به اجماع کارشناسی و کاهش احتمال سوگیری‌های فردی را فراهم می‌سازد.

پس از جمع‌آوری نظرات خبرگان در دو مرحله دلفی، هر ذی‌نفع بر اساس معیارهایی مانند میزان نفوذ در تصمیم‌گیری، تأثیر بر موفقیت پروژه و توانایی بسیج منابع ارزیابی شد. نتایج این فرآیند امکان تحلیل کمی اهمیت هر ذی‌نفع و اولویت‌بندی آن‌ها را برای مراحل اجرایی و راهبردی توسعه صنعت فولاد سبز فراهم می‌کند. در نهایت، شناسایی و درجه‌بندی ذی‌نفعان، علاوه بر افزایش شفافیت محیط تصمیم‌گیری، به مدیران و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا تمرکز و منابع خود را بر ذی‌نفعان بسیار کلیدی و کلیدی متمرکز کرده و ریسک‌های اجرایی و موانع توسعه صنعت فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن را کاهش دهند.

جدول ۹: کدبندی هر یک از ذی‌نفعان

کد	ذی نفعان
S01	وزارت صنعت، معدن و تجارت
S02	وزارت نیرو
S03	وزارت نفت
S04	سازمان محیط زیست
S05	هلدینگ‌ها و مجتمع‌های فولادی
S06	تولیدکنندگان فناوری‌های هیدروژن و الکترولیزر
S07	بانک‌های دولتی و خصوصی
S08	صندوق توسعه ملی
S09	سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی
S10	دانشگاه‌های فنی و مهندسی
S11	پژوهشگاه‌ها و مراکز نوآوری
S12	سازمان ملی استاندارد ایران
S13	سازمان‌های نظارتی
S14	تولیدکنندگان قطعات و مواد اولیه
S15	شرکت‌های مهندسی و پیمانکاران EPC
S16	شرکت‌های لجستیک و حمل‌ونقل هیدروژن
S17	سازمان‌های مردم‌نهاد محیط زیستی
S18	بازار کارفرمایان بزرگ فولادی
S19	مصرف‌کنندگان نهایی و صنایع پایین‌دستی

جدول ۱۰: فراوانی هر یک از ذی‌نفعان در دور اول دلفی فازی

مقدار CRISP	(l, m, u)	کد ذی نفع
۰,۵۹۱۷	(۰,۵۶۶۷,۰,۸۱۶۷,۰,۹۶۶۷)	S14
۰,۷۳۸۹	(۰,۳۸۳۳,۰,۶۳۳۳,۰,۸۵۰۰)	S15
۰,۵۱۳۹	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۵۰۰)	S16
۰,۳۴۱۷	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	S17
۰,۶۱۳۹	(۰,۴۸۳۳,۰,۷۳۳۳,۰,۹۱۶۷)	S18
۰,۵۴۷۲	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	S19

جدول ۱۴: اختلاف میانگین مراحل اول و دوم فازی برای ذی‌نفعان

کد ذی نفع	میانگین		اختلاف (واحد)	اختلاف (درصد)
	مرحله اول	مرحله دوم		
S01	۰,۸۷۲۲	۰,۸۸۸۹	۰,۰۱۶۷	٪۱,۹۱
S02	۰,۷۶۹۴	۰,۷۸۳۳	۰,۰۱۳۹	٪۱,۸۱
S03	۰,۷۵۵۶	۰,۷۶۹۴	۰,۰۱۳۹	٪۱,۸۴
S04	۰,۵۶۱۱	۰,۵۷۷۸	۰,۰۱۶۷	٪۲,۹۷
S05	۰,۷۹۱۷	۰,۸۰۸۳	۰,۰۱۶۷	٪۲,۱۱
S06	۰,۷۵۵۶	۰,۷۶۹۴	۰,۰۱۳۹	٪۱,۸۴
S07	۰,۵۷۷۸	۰,۵۹۴۴	۰,۰۱۶۷	٪۲,۸۸
S08	۰,۷۴۱۷	۰,۷۵۵۶	۰,۰۱۳۹	٪۱,۸۷
S09	۰,۷۲۲۲	۰,۷۳۶۱	۰,۰۱۳۹	٪۱,۹۲
S10	۰,۴۶۳۹	۰,۴۸۰۶	۰,۰۱۶۷	٪۳,۵۹
S11	۰,۴۳۳۳	۰,۴۵۰۰	۰,۰۱۶۷	٪۳,۸۵
S12	۰,۵۳۰۶	۰,۵۴۴۴	۰,۰۱۳۹	٪۲,۶۲
S13	۰,۴۸۳۳	۰,۴۸۶۱	۰,۰۰۲۸	٪۰,۵۷
S14	۰,۵۷۷۸	۰,۵۹۱۷	۰,۰۱۳۹	٪۲,۴۰
S15	۰,۷۲۵۰	۰,۷۳۸۹	۰,۰۱۳۹	٪۱,۹۲
S16	۰,۴۹۷۲	۰,۵۱۳۹	۰,۰۱۶۷	٪۳,۳۵
S17	۰,۳۲۵۰	۰,۳۴۱۷	۰,۰۱۶۷	٪۵,۱۳
S18	۰,۵۸۶۱	۰,۶۱۳۹	۰,۰۲۷۸	٪۴,۷۴
S19	۰,۵۳۳۳	۰,۵۴۷۲	۰,۰۱۳۹	٪۲,۶۰

جمع‌بندی نتایج ذی‌نفعان صنعت فولاد سبز بر پایه هیدروژن در ایران نشان می‌دهد که میانگین تمامی ذی‌نفعان شناسایی شده در مرحله دوم دلفی نسبت به مرحله اول، با افزایش جزئی همراه است و بیانگر اجماع صاحب‌نظران و تأکید بر اهمیت همه ذی‌نفعان است. در میان ذی‌نفعان، وزارتخانه‌های سیاست‌گذار مانند وزارت صنعت، معدن و تجارت، وزارت نیرو، وزارت نفت و همچنین هلدینگ‌ها و مجتمع‌های فولادی و شرکت‌های مهندسی و پیمانکاران بیشترین میانگین اهمیت را دارند و به عنوان ذی‌نفعان بسیار کلیدی شناخته می‌شوند؛ این موضوع نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری دولت نقش حیاتی در توسعه فولاد سبز دارد و بدون حمایت و راهبری دولت، پیشرفت این صنعت با محدودیت مواجه خواهد شد.

شرکت‌های بزرگ فولادی و تولیدکنندگان فناوری‌های

مقدار CRISP	(l, m, u)	کد ذی نفع
۰,۵۸۶۱	(۰,۳۶۶۷,۰,۵۸۳۳,۰,۸۱۶۷)	S18
۰,۵۳۳۳	(۰,۳۰۰۰,۰,۵۳۳۳,۰,۷۶۶۷)	S19

جدول ۱۲: فراوانی هر یک از ذی‌نفعان در دور دوم دلفی فازی

کد ذی نفع	فراوانی	تعداد	درصد	میانگین	مقدار CRISP
S01	۱۰	۵	۰	۰	۰
S02	۶	۶	۳	۰	۰
S03	۵	۷	۳	۰	۰
S04	۲	۴	۶	۳	۰
S05	۹	۴	۱	۰	۰
S06	۵	۷	۳	۰	۰
S07	۲	۴	۷	۲	۰
S08	۴	۸	۳	۰	۰
S09	۵	۶	۳	۱	۰
S10	۱	۳	۵	۶	۰
S11	۰	۳	۶	۶	۰
S12	۲	۳	۷	۲	۰
S13	۱	۳	۷	۲	۲
S14	۳	۳	۶	۳	۰
S15	۴	۷	۴	۰	۰
S16	۱	۳	۷	۴	۰
S17	۱	۱	۴	۵	۴
S18	۱	۶	۷	۱	۰
S19	۱	۴	۷	۳	۰

جدول ۱۳: مقادیر فازی برای هر یک از ذی‌نفعان در دور دوم

مقدار CRISP	(l, m, u)	کد ذی نفع
۰,۸۸۸۹	(۰,۶۱۶۷,۰,۸۶۶۷,۰,۹۶۶۷)	S01
۰,۷۸۳۳	(۰,۶۰۰۰,۰,۸۵۰۰,۰,۹۶۶۷)	S02
۰,۷۶۹۴	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	S03
۰,۵۷۷۸	(۰,۵۶۶۷,۰,۸۱۶۷,۰,۹۵۰۰)	S04
۰,۸۰۸۳	(۰,۵۵۰۰,۰,۸۰۰۰,۰,۹۵۰۰)	S05
۰,۷۶۹۴	(۰,۶۵۰۰,۰,۹۰۰۰,۰,۹۸۳۳)	S06
۰,۵۹۴۴	(۰,۶۳۳۳,۰,۸۸۳۳,۰,۹۸۳۳)	S07
۰,۷۵۵۶	(۰,۶۰۰۰,۰,۸۵۰۰,۰,۹۶۶۷)	S08
۰,۷۳۶۱	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۳۳۳)	S09
۰,۴۸۰۶	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۳۳۳)	S10
۰,۴۵۰۰	(۰,۵۸۳۳,۰,۸۳۳۳,۰,۹۶۶۷)	S11
۰,۵۴۴۴	(۰,۵۳۳۳,۰,۷۸۳۳,۰,۹۳۳۳)	S12
۰,۴۸۶۱	(۰,۵۱۶۷,۰,۷۶۶۷,۰,۹۳۳۳)	S13

هیدروژن در ایران انجام شد. بدین منظور، ابتدا از طریق مصاحبه با خبرگان و بررسی دیدگاه‌های تخصصی، مجموعه‌ای از عوامل محیطی و ذی‌نفعان بالقوه شناسایی گردید و سپس با استفاده از روش دلفی فازی دو مرحله‌ای، میزان اهمیت و سطح اجماع خبرگان درباره این عوامل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که توسعه فولاد سبز در ایران تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل چندبعدی در ابعاد سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی و قانونی قرار دارد و موفقیت در انتقال و استقرار این فناوری مستلزم توجه هم‌زمان به الزامات سیاستی، زیرساختی، فناورانه و نهادی است.

تحلیل نتایج دلفی فازی نشان داد که اجماع خبرگان پیرامون برخی عوامل کلیدی در سطح بالایی قرار دارد و عوامل دارای بالاترین امتیاز فازی عمدتاً در حوزه سیاست‌گذاری، زیرساخت‌های انرژی و حمایت‌های قانونی متمرکز هستند. این یافته نشان می‌دهد که گذار به سمت تولید فولاد سبز در ایران بیش از آنکه صرفاً یک چالش فناورانه باشد، به شدت تحت تأثیر بسترهای نهادی و سیاستی قرار دارد. همچنین مقایسه میانگین مقادیر فازی در ابعاد شش‌گانه PESTEL بیانگر آن است که ابعاد سیاسی و قانونی از وزن نسبی بالاتری نسبت به سایر ابعاد برخوردارند؛ موضوعی که بر اهمیت وجود چارچوب‌های تنظیم‌گری شفاف، سیاست‌های حمایتی پایدار و سازوکارهای انگیزشی برای کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و تسهیل انتقال فناوری تأکید می‌کند. در مقابل، برخی عوامل اجتماعی و فرهنگی اگرچه مهم ارزیابی شدند، اما از سطح اجماع پایین‌تری برخوردار بودند که می‌تواند بیانگر عدم شکل‌گیری گفتمان عمومی منسجم درباره گذار صنعتی کم‌کربن در کشور باشد.

یافته‌های پژوهش همچنین نشان می‌دهد که علاوه بر زیرساخت‌های فناورانه و انرژی، نقش نهادهای سیاست‌گذار، شرکت‌های بزرگ فولادی، نهادهای مالی، مراکز تحقیقاتی و سایر بازیگران نهادی در شکل‌گیری و پیشبرد فرآیند انتقال فناوری بسیار تعیین‌کننده است. از این منظر، گذار به تولید فولاد کم‌کربن را می‌توان نوعی تحول سیستمی دانست که مستلزم هماهنگی میان سیاست‌های صنعتی، انرژی و محیط‌زیست و همچنین تعامل مؤثر میان ذی‌نفعان مختلف این حوزه است.

از نظر کاربردی، شناسایی و اولویت‌بندی عوامل محیطی و ذی‌نفعان می‌تواند مبنایی برای تدوین نقشه‌راه توسعه فناوری فولاد سبز، طراحی سازوکارهای حمایتی، تقویت همکاری میان صنعت و نهادهای علمی و برنامه‌ریزی برای توسعه زیرساخت‌های مرتبط با هیدروژن و انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم آورد. با این حال، باید توجه داشت که نتایج این پژوهش مبتنی بر دیدگاه خبرگان و شرایط نهادی و صنعتی ایران است؛ از این رو تعمیم آن به سایر

هیدروژن در رده بسیار کلیدی قرار دارند و نقش عملیاتی و راهبردی در تحقق پروژه‌ها دارند؛ هلدینگ‌هایی مانند ذوب‌آهن اصفهان و فولاد مبارکه و تولیدکنندگان الکترولایزر و فناوری‌های هیدروژن بدون مشارکت فعال آن‌ها، اجرای پروژه‌های فولاد سبز دشوار خواهد بود. بانک‌ها، صندوق توسعه ملی و سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی به عنوان ذی‌نفعان کلیدی، مسئولیت تأمین مالی و سرمایه‌گذاری را بر عهده دارند و نشان می‌دهند که موفقیت پروژه‌های فولاد سبز نیازمند دسترسی به منابع مالی پایدار و حمایت‌های اقتصادی است.

دانشگاه‌ها و مراکز تحقیق و توسعه نیز در رده کلیدی قرار دارند و ظرفیت نوآوری، تحقیق و توسعه فناوری هیدروژن و فولاد سبز را فراهم می‌کنند که نقش مهم تولید و انتقال دانش برای توسعه صنعتی را نشان می‌دهد. سازمان ملی استاندارد و سازمان‌های نظارتی نیز نقش کلیدی و حمایتی در تضمین کیفیت، استانداردها و رعایت مقررات ایمنی و زیست‌محیطی دارند و بدون نظارت آن‌ها، امکان صادرات و پذیرش محصولات فولاد سبز محدود خواهد شد.

شرکت‌های مهندسی، پیمانکاران EPC و تولیدکنندگان قطعات و مواد اولیه نیز ذی‌نفعان کلیدی هستند که مسئولیت اجرای پروژه‌ها و زنجیره تأمین را بر عهده دارند و موفقیت پروژه بدون توانایی فنی و لجستیکی این گروه‌ها دشوار خواهد بود. سازمان‌های مردم‌نهاد محیط زیستی، شرکت‌های لجستیک و مصرف‌کنندگان نهایی در رده کمتر کلیدی قرار دارند، اما نقش حمایتی و نظارتی آن‌ها در افزایش پذیرش اجتماعی و کاهش ریسک‌های محیط‌زیستی غیرقابل چشم‌پوشی است.

تحلیل کلی نشان می‌دهد که توسعه صنعت فولاد سبز در ایران نیازمند تعامل و هماهنگی میان سه دسته ذی‌نفع «بسیار کلیدی»، «کلیدی» و «کمتر کلیدی» است؛ همکاری دولت، بخش خصوصی بزرگ، نهادهای مالی و دانشگاه‌ها برای موفقیت پروژه ضروری است، در حالی که نقش سازمان‌های حمایت‌کننده و جامعه مدنی تکمیلی و پشتیبانی‌کننده محسوب می‌شود. افزایش جزئی میانگین‌ها در مرحله دوم دلفی، اجماع کارشناسان بر اهمیت همه ذی‌نفعان و تثبیت نظر خبرگان نسبت به مرحله اول را نشان می‌دهد و می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا اولویت‌بندی ذی‌نفعان و تخصیص منابع را بهینه انجام دهند. در نهایت، شناسایی و درجه‌بندی ذی‌نفعان به صورت کمی، ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی راهبردی و کاهش ریسک‌های اجرایی پروژه‌های فولاد سبز فراهم می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تحلیل عوامل محیطی و ذی‌نفعان کلیدی مؤثر بر توسعه فناوری فولاد سبز مبتنی بر

کشورها یا صنایع نیازمند انجام مطالعات تکمیلی است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی با بهره‌گیری از روش‌های تحلیلی تکمیلی، تعاملات میان ذی‌نفعان، سناریوهای توسعه فناوری و مسیرهای گذار به سمت تولید فولاد کم‌کربن در مقیاس صنعتی با دقت بیشتری بررسی شود.

عوامل محیطی

تحلیل دلفی فازی نشان داد که تمامی ۳۵ عامل محیطی شناسایی‌شده از دیدگاه خبرگان دارای اهمیت قابل توجهی هستند و میانگین مقادیر فازی در مرحله دوم نسبت به مرحله اول افزایش جزئی داشته است. این افزایش بیانگر شکل‌گیری همگرایی بیشتر در دیدگاه خبرگان و دستیابی به سطح قابل قبولی از اجماع در خصوص اهمیت عوامل مؤثر بر توسعه فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران است. بررسی میزان اختلاف بین دو مرحله نشان می‌دهد که تغییرات عموماً محدود و کمتر از ۰,۰۶ واحد بوده و در اغلب موارد کمتر از ۶ درصد است که نشان‌دهنده ثبات ارزیابی خبرگان در فرآیند دلفی است. نتایج همچنین نشان داد که بیشترین مقدار Crisp مربوط به عامل اقتصادی ECO01 با مقدار ۰,۹۰۲۸ در مرحله دوم است که بیانگر نقش محوری متغیرهای اقتصادی در توسعه فناوری فولاد سبز است. علاوه بر این، عواملی نظیر ثبات و شفافیت سیاست‌گذاری دولتی، دسترسی به منابع مالی، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه الکترولیزر و دسترسی به زیرساخت‌های انرژی از مقادیر بالایی برخوردار بودند که اهمیت شرایط نهادی، مالی و زیرساختی را در امکان‌پذیری انتقال این فناوری برجسته می‌کند. بر اساس مقادیر نهایی Crisp، عوامل محیطی در سه سطح اهمیت قابل دسته‌بندی هستند. در سطح نخست، عوامل با مقدار بالاتر از ۰,۸۵ قرار دارند که عمدتاً به حوزه سیاست‌گذاری، تأمین مالی و زیرساخت انرژی مربوط می‌شوند. در سطح دوم، عواملی با مقادیر بین ۰,۷۵ تا ۰,۸۵ قرار می‌گیرند که بیشتر نقش شرایط زمینه‌ای و پشتیبان از جمله ظرفیت‌های تحقیق و توسعه، زیرساخت انرژی تجدیدپذیر و زنجیره تأمین صنعتی را ایفا می‌کنند. در نهایت، گروه سوم شامل عواملی با مقدار کمتر از ۰,۷۵ است که هرچند از اهمیت کمتری برخوردارند، اما همچنان می‌توانند در مراحل توسعه و استقرار صنعتی فناوری فولاد سبز تأثیرگذار باشند.

جدول ۱۵: نقش هر یک از عوامل محیطی در انتقال فناوری

عامل محیطی	نقش در انتقال فناوری
تحریم‌های بین‌المللی و محدودیت همکاری فناورانه	مانع
ثبات و شفافیت سیاست‌گذاری دولتی در حوزه انرژی	تسهیل
دیپلماسی صنعتی و توافقات انتقال فناوری	تسهیل
ثبات مقررات سرمایه‌گذاری خارجی و ضمانت‌ها	تسهیل
اهمیت همکاری‌های عمومی-خصوصی (PPP)	تسهیل

عامل محیطی	نقش در انتقال فناوری
ریسک‌های امنیتی و ثبات منطقه‌ای	مانع
سرمایه‌گذاری اولیه برای الکترولیزر و زیرساخت	مانع
هزینه عملیاتی و دسترسی به برق ارزان	تسهیل/مانع
دسترسی به منابع مالی و بازار سرمایه	تسهیل
قیمت جهانی فولاد و انگیزه بازار برای فولاد سبز	تسهیل
هزینه آب و دسترسی به آب شیرین	مانع
سازوکارهای تشویقی مالیاتی/یارانه‌ای برای فولاد سبز	تسهیل
هزینه فرصت و رقابت با بخش‌های دیگر انرژی	مانع
خواست و فشار اجتماعی برای کاهش آلاینده‌گی	تسهیل
فرهنگ سازمانی و مقاومت در برابر تغییر صنعت فولاد	مانع
پذیرش بازار کارفرمایان بزرگ فولادی	تسهیل
زیرساخت انرژی تجدیدپذیر (ظرفیت خورشیدی/بادی)	تسهیل
وجود ظرفیت تحقیق و توسعه دانشگاهی و صنعتی	تسهیل
مالکیت فکری و دسترسی به لیسانس‌ها	تسهیل/مانع
نیروی کار ماهر در هیدروژن و تولید فولاد مدرن	تسهیل/مانع
قابلیت جذب و انتقال دانش داخلی	تسهیل
ظرفیت شرکت‌های مهندسی داخلی	تسهیل
دسترسی به قطعات و مواد وارداتی (وابستگی)	مانع
زیرساخت لجستیک و حمل‌ونقل هیدروژن	تسهیل/مانع
خوشه‌های صنعتی و زنجیره ارزش فولاد در ایران	تسهیل
مقررات زیست‌محیطی و سقف انتشار CO ₂	تسهیل
سازوکارهای قیمت‌گذاری کربن/مالیات زیستی	تسهیل
ریسک‌های محیط‌زیستی محلی (آلودگی خاک/آب)	مانع
تناسب زمین و مناطق صنعتی با دسترسی به برق/آب	تسهیل
استانداردها و گواهی‌نامه‌های فولاد سبز برای صادرات	تسهیل
زنجیره تأمین داخلی (مواد، قطعات الکترولیزر، خدمات)	تسهیل
دسترسی به بازار صادراتی و موانع تجاری	تسهیل/مانع
جهت‌گیری برنامه‌های ملی انرژی	تسهیل
سیستم‌های بیمه و پوشش ریسک پروژه‌های بزرگ	تسهیل
استانداردهای ایمنی و مقررات کار با هیدروژن	تسهیل/مانع

به‌منظور تفسیر بهتر نتایج تحلیل دلفی فازی، عوامل محیطی شناسایی‌شده بر اساس نقش آن‌ها در فرآیند انتقال فناوری به دو دسته عوامل تسهیل‌کننده و عوامل بازدارنده تقسیم شدند. همان‌گونه که در جدول نشان داده شده است، بخش قابل توجهی از عوامل تسهیل‌کننده به حوزه سیاست‌گذاری، زیرساخت انرژی، ظرفیت‌های فناورانه و سازوکارهای مالی مربوط می‌شود. در مقابل، عواملی نظیر تحریم‌های بین‌المللی، محدودیت همکاری‌های فناورانه، هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه، محدودیت دسترسی به آب و وابستگی به واردات برخی تجهیزات و قطعات به عنوان مهم‌ترین موانع بالقوه انتقال فناوری فولاد سبز در ایران شناسایی شدند. این الگو نشان می‌دهد که چالش‌های توسعه فولاد سبز در ایران عمدتاً ماهیتی نهادی، اقتصادی و زیرساختی دارند و کمتر

به محدودیت‌های علمی یا فناوریانه داخلی مربوط می‌شوند.

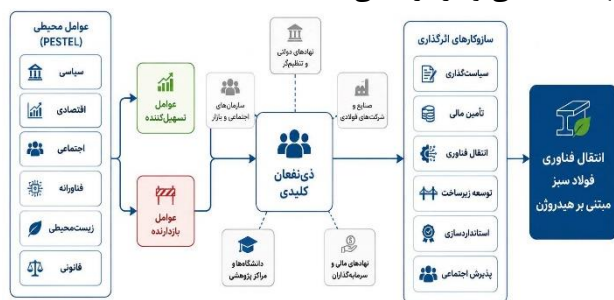
ذی‌نفعان کلیدی

نتایج شناسایی و اولویت‌بندی ذی‌نفعان با استفاده از روش دلفی فازی نشان داد که تمامی ذی‌نفعان شناسایی شده از دیدگاه خبرگان در توسعه فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران دارای سطحی از اهمیت هستند. مقایسه میانگین مقادیر فازی در دو مرحله دلفی نشان می‌دهد که در اغلب موارد مقدار مرحله دوم افزایش جزئی نسبت به مرحله اول داشته است. میزان اختلاف بین دو مرحله عموماً در حدود ۱ تا ۳ درصد بوده که بیانگر شکل‌گیری اجماع سریع و ثبات نسبی در ارزیابی خبرگان درباره اهمیت نسبی ذی‌نفعان مختلف است. در میان ذی‌نفعان، بالاترین مقدار Crisp مربوط به ذی‌نفع S01 با مقدار ۰,۸۸۸۹، در مرحله دوم است که بیانگر جایگاه محوری این بازیگر در هدایت سیاست‌گذاری و جهت‌دهی به توسعه صنعت فولاد سبز در کشور است. این یافته نشان می‌دهد که نهادهای سیاست‌گذار و تنظیم‌گر نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری شرایط نهادی لازم برای انتقال و توسعه این فناوری دارند. بر اساس مقادیر نهایی Crisp، ذی‌نفعان در سه سطح اهمیت قابل دسته‌بندی هستند. در سطح نخست، بازیگران بسیار کلیدی شامل وزارت صنعت، معدن و تجارت، وزارت نیرو، وزارت نفت، هلدینگ‌ها و مجتمع‌های فولادی بزرگ، تولیدکنندگان فناوری هیدروژن و الکترولیزر، صندوق توسعه ملی، شرکت‌های مهندسی و پیمانکاران EPC و سرمایه‌گذاران قرار دارند. این گروه نقش اصلی در سیاست‌گذاری، تأمین مالی، انتقال فناوری و اجرای پروژه‌های صنعتی را بر عهده دارند. در سطح دوم، ذی‌نفعانی نظیر بانک‌ها، تولیدکنندگان قطعات و مواد اولیه، سازمان حفاظت محیط زیست، مصرف‌کنندگان صنعتی فولاد و سازمان ملی استاندارد قرار می‌گیرند که بیشتر نقش پشتیبان، تنظیم‌گر و تسهیل‌کننده را در فرآیند توسعه این فناوری ایفا می‌کنند. در سطح سوم نیز ذی‌نفعانی مانند شرکت‌های لجستیک، دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و سازمان‌های مردم‌نهاد محیط‌زیستی قرار دارند که نقش آن‌ها عمدتاً در حوزه تولید دانش، توسعه ظرفیت‌های پژوهشی، نظارت اجتماعی و تقویت پذیرش اجتماعی فناوری تعریف می‌شود. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که توسعه فولاد سبز در ایران مستلزم تعامل و هماهنگی مؤثر میان بازیگران سیاستی، صنعتی، مالی و علمی است تا زمینه لازم برای انتقال فناوری و اجرای پروژه‌های مرتبط فراهم شود. در ادامه، به منظور تبیین نقش بازیگران اصلی در شکل‌گیری و مدیریت این عوامل محیطی، ذی‌نفعان کلیدی در ابعاد مختلف محیط کلان سیاستی (سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوریانه، زیست‌محیطی و قانونی) دسته‌بندی شدند.

جدول ۱۶: ارتباط هر یک از ذی‌نفعان با ابعاد محیطی PESTEL

ذی‌نفعان	سیاسی	اقتصادی	اجتماعی	فناورانه	زیست‌محیطی	قانونی
وزارت صنعت، معدن و تجارت	×	×				×
وزارت نیرو	×	×		×		
وزارت نفت	×	×		×		
سازمان محیط زیست	×			×	×	×
هلدینگ‌ها و مجتمع‌های فولادی		×	×	×	×	
تولیدکنندگان فناوری‌های هیدروژن و الکترولیزر		×		×	×	
بانک‌های دولتی و خصوصی	×	×				×
صندوق توسعه ملی	×	×		×		
سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی	×	×				×
دانشگاه‌های فنی و مهندسی		×	×	×		
پژوهشگاه‌ها و مراکز نوآوری		×	×	×		
سازمان ملی استاندارد ایران			×	×	×	×
سازمان‌های نظارتی	×					×
تولیدکنندگان قطعات و مواد اولیه		×		×	×	
شرکت‌های مهندسی و پیمانکاران EPC		×		×	×	
شرکت‌های لجستیک و حمل‌ونقل هیدروژن		×		×	×	
سازمان‌های مردم‌نهاد محیط زیستی	×		×		×	
بازار کارفرمایان بزرگ فولادی		×	×		×	
مصرف‌کنندگان نهایی و صنایع پایین‌دستی		×	×		×	

همچنین تحلیل نقش ذی‌نفعان در ابعاد مختلف محیط کلان نشان می‌دهد که بازیگران دولتی به‌ویژه وزارت صنعت، معدن و تجارت، وزارت نیرو و وزارت نفت نقش محوری در ابعاد سیاسی، اقتصادی و فناوریانه ایفا می‌کنند. در کنار آن‌ها، هلدینگ‌ها و مجتمع‌های بزرگ فولادی، سرمایه‌گذاران، صندوق توسعه ملی و بانک‌ها در بعد اقتصادی و تأمین مالی پروژه‌ها نقش تعیین‌کننده دارند. از سوی دیگر، دانشگاه‌ها، مراکز پژوهشی و شرکت‌های مهندسی و پیمانکاران صنعتی نقش مهمی در توسعه ظرفیت‌های فناوریانه و انتقال دانش ایفا می‌کنند. این توزیع نقش‌ها نشان می‌دهد که توسعه فناوری فولاد سبز مستلزم تعامل و هماهنگی چندسطحی میان نهادهای سیاست‌گذار، بازیگران صنعتی، نهادهای مالی و مراکز علمی است.



شکل ۴: چارچوب مفهومی تعامل عوامل محیطی و ذی‌نفعان در انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران

راهکارها و پیشنهادها

با توجه به یافته‌های پژوهش و تحلیل عوامل محیط کلان مؤثر بر انتقال فناوری فولاد سبز مبتنی بر هیدروژن در ایران، ارائه راهکارهای سیاستی و اجرایی در قالب چارچوب PESTEL می‌تواند به درک بهتر الزامات توسعه این فناوری کمک نماید. استفاده از این چارچوب امکان بررسی همزمان عوامل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی و قانونی را فراهم می‌کند و در مطالعات مرتبط با گذار صنعتی و انرژی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Yüksel, 2012; Schultz-Zehden, 2023).

در بعد سیاسی، نقش سیاست‌گذاری‌های کلان و حمایت‌های دولتی در توسعه فناوری هیدروژن بسیار تعیین‌کننده است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود دولت با تدوین نقشه راه ملی برای توسعه هیدروژن سبز در صنعت فولاد و ایجاد هماهنگی میان نهادهای مرتبط، زمینه لازم برای توسعه این فناوری را فراهم نماید. همچنین تقویت دیپلماسی فناوری و همکاری‌های علمی و صنعتی با کشورهای دارای تجربه در حوزه فولاد سبز می‌تواند به انتقال دانش فنی و کاهش شکاف فناوری کمک کند (APCTT, 2024; Rahimirad & Sadabadi, 2023).

در بعد اقتصادی، مهم‌ترین چالش توسعه فولاد سبز هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه و عدم قطعیت بازار است. بنابراین ایجاد مشوق‌های مالی، اعطای تسهیلات کم‌بهره، معافیت‌های مالیاتی و تشکیل صندوق‌های سرمایه‌گذاری سبز برای حمایت از پروژه‌های فولاد کم‌کربن پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، شناسایی بازارهای صادراتی و توسعه تقاضا برای فولاد کم‌کربن در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا می‌تواند انگیزه صنایع برای حرکت به سمت تولید فولاد سبز را افزایش دهد (Basirat, 2022; Basirat, 2024; OECD, 2023).

در بعد اجتماعی، توسعه منابع انسانی و افزایش آگاهی عمومی از اهمیت گذار صنعتی به فناوری‌های پاک اهمیت زیادی دارد. در این راستا، طراحی برنامه‌های آموزشی برای مهندسان و مدیران صنعت فولاد و همچنین توسعه دوره‌های تخصصی در دانشگاه‌ها برای حوزه هیدروژن و فناوری‌های کم‌کربن پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی درباره مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی فولاد سبز می‌تواند به افزایش پذیرش اجتماعی این فناوری کمک نماید (Parliament Research Center, 2021).

در بعد فناورانه، توسعه زیرساخت‌های تحقیق و توسعه و

اجرای پروژه‌های آزمایشی نقش کلیدی در کاهش عدم قطعیت‌های فنی دارد. ایجاد مراکز نوآوری و آزمایشگاه‌های تخصصی در حوزه هیدروژن، حمایت از پروژه‌های پایلوت در کارخانه‌های فولادسازی و توسعه زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر برای تأمین برق مورد نیاز تولید هیدروژن از جمله اقدامات ضروری در این حوزه محسوب می‌شوند (ArcelorMittal, 2023; Hosseini, 2023; Dehshiri & Firoozabadi, 2024; Idrissov, 2025).

در بعد زیست‌محیطی، با توجه به نقش صنعت فولاد در انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه فناوری فولاد سبز می‌تواند سهم مهمی در کاهش آلاینده‌ها داشته باشد. در این راستا، توجه به مکان‌یابی مناسب واحدهای تولید هیدروژن بر اساس دسترسی به منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع آبی پایدار اهمیت دارد. همچنین تدوین برنامه‌های کاهش انتشار و پایش مستمر آلاینده‌ها در صنعت فولاد می‌تواند در تحقق اهداف کربن‌زدایی مؤثر باشد (Abdoos et al., 2025; Ali et al., 2022; Sharafi & Lorvand, 2025).

در بعد قانونی، ایجاد چارچوب‌های مقرراتی و استانداردهای مشخص برای تولید و گزارش‌دهی انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت فولاد ضروری است. تدوین قوانین حمایتی، تسهیل فرآیندهای صدور مجوز برای پروژه‌های مرتبط با هیدروژن و انطباق با استانداردهای بین‌المللی گزارش‌دهی انتشار می‌تواند به تسریع توسعه فولاد سبز کمک نماید (RMI, 2023; OECD, 2023).

در نهایت، تحقق موفق انتقال فناوری فولاد سبز مستلزم همکاری و هماهنگی میان ذی‌نفعان مختلف از جمله دولت، صنعت، دانشگاه‌ها و سرمایه‌گذاران است. تشکیل یک سازوکار هماهنگی بین‌نهادهای برای مدیریت این تعاملات و پایش مستمر محیط کلان می‌تواند نقش مهمی در تسهیل فرآیند انتقال فناوری و تحقق اهداف توسعه پایدار در صنعت فولاد ایران ایفا نماید.

تشکر و قدردانی

نگارندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از راهنمایی‌ها و حمایت‌های ارزشمند اساتید گرانقدر و همچنین از داوران محترم مجله که با دقت علمی، نکات سازنده و پیشنهادهای ارزشمند خود در بهبود کیفیت این مقاله نقش مؤثری داشته‌اند، صمیمانه قدردانی نمایند. دیدگاه‌های دقیق و راهنمایی‌های علمی ایشان موجب شد تا بخش‌های مختلف پژوهش بازنگری و تقویت شده و انسجام و غنای علمی مقاله افزایش یابد. بی‌تردید نظرات سازنده ایشان سهم مهمی در ارتقای کیفیت نهایی این پژوهش داشته است.

فهرست منابع

- حسینی دهشیری، س. ج.، آقایی، م.، و تقوی فرد، م. ت. (۱۳۹۷). "شناسایی و اولویت‌بندی عوامل حیاتی کسب‌وکار الکترونیک بر اساس روش بهترین-بدترین". بازیابی شده از <https://civilica.com/doc/889977>
- شیرازی، حسین و آلبا، کاوه. (۱۴۰۴). "شناسایی و اولویت‌بندی موانع انتقال تکنولوژی فولاد سبز با استفاده از روش FBWM". فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی، ۲۳ (۶۰)، ۵۳-۷۴. doi: 10.22034/jtd.2025.2036185.1947
- صابری، علی و نیکخواه نسب، مرتضی. (۱۴۰۲). "بررسی لایحه برنامه هفتم توسعه (۱۷): بخش انرژی". (e19069). ماهنامه گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۳۱ (۴)، 20.1001.1.29809525.1402.1402.4.66.6.e19069
- محمدرضایی، مهدی و سرلک، محمد علی و فقیهی، ابوالحسن. (۱۴۰۰). "ارائه مدلی جهت ارزیابی بهره‌وری کارکنان دانشی با به کارگیری روش دلفی فازی و روش بهترین - بدترین فازی (مورد مطالعه: شرکت‌های دانش‌بنیان)". <https://civilica.com/doc/1550940>
- مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. (۱۴۰۰). "اصلاح قیمت حامل‌های انرژی (۱): تاب‌آوری صنعت فولاد ایران (گزارش شماره ۱۷۳۷)". تهران، ایران: دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن.
- Abdoos, M., Yousefi, H., & Shahee, A. (2025). "Green hydrogen development in Iran: A SWOT analysis of challenges and opportunities focusing on renewable energy resources". *Discover Sustainability*, 6(1), 435. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01327-1>.
- Ali, F., Bennui, A., Chowdhury, S., & Techato, K. (2022). "Suitable Site Selection for Solar-Based Green Hydrogen in Southern Thailand Using GIS-MCDM Approach". *Sustainability*, 14(11), 6597. <https://doi.org/10.3390/su14116597>.
- ArcelorMittal. (2023). "Hydrogen-based steelmaking: Paving the way to green steel". ArcelorMittal. Retrieved from: <https://corporate.arcelormittal.com/sustainability/innovation/hydrogen-based-steelmaking>.
- Asian and Pacific Centre for Transfer of Technology (APCTT). (2024). "Green hydrogen technology development in Iran". United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UNESCAP). Retrieved from: <https://apctt.org/sites/default/files/2024-11/Hydrogen%20Iran.pdf>.
- Basirat, S. (2022). "Green steel opportunity in the Middle East and North Africa". Institute for Energy Economics and Financial Analysis. Retrieved from: <https://ieefa.org/resources/green-steel-opportunity-middle-east-and-north-africa>.
- Basirat, S. (2024). "Leveraging green hydrogen to lower MENA steel sector emissions". Institute for Energy Economics and Financial Analysis. Retrieved from: <https://ieefa.org/resources/leveraging-green-hydrogen-lower-mena-steel-sector-emissions>.
- Biernacki, P., & Waldorf, D. (1981). "Snowball Sampling: Problems and Techniques of Chain Referral Sampling". *Sociological Methods & Research*, 10(2), 141-163. <https://doi.org/10.1177/004912418101000205>.
- Bouzon, M., Govindan, K., Rodriguez, C. M. T., & Campos, L. M. (2016). "Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP". *Resources, Conservation and Recyclin*.
- Bowen, G. A. (2009). "Document analysis as a qualitative research method". *Qualitative Research Journal*, 9 (2), 27-40. Retrieved from: <https://doi.org/10.3316/QRJ0902027>.
- Carnegie Middle East Center. (2025). "Social and economic priorities in Iran: Implications for energy and industrial transition". Carnegie Endowment for International Peace.
- Charmaz, K. (2014). "Constructing grounded theory (2nd ed.)". Sage Publications. Retrieved from: <https://collegepublishing.sagepub.com/products/constructing-grounded-theory-2-235960>.
- Consilium. (2025). "EU sanctions against Iran". Council of the European Union. Retrieved from: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/sanctions-against-iran>.
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). "Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches (4th ed.)". Sage publications.
- Durga, S., Speizer, S., & Edmonds, J. (2024). "The role of the iron and steel sector in achieving net zero U.S. CO₂ emissions by 2050". *Energy and Climate Change*, 5, 100152. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100152>.
- European Commission. (2023). "Hydrogen strategy for a climate-neutral Europe". European Commission. Retrieved from: https://energy.ec.europa.eu/topics/hydrogen_en.
- Guest, G., Bunce, A., & Johnson, L. (2006). "How many interviews are enough? An experiment with data saturation and variability". *Field Methods*, 18(1), 59-82. Retrieved from: <https://doi.org/10.1177/1525822X05279903>.

- Hasson, F., & Keeney, S. (2011). "Enhancing rigour in the Delphi technique research". *Technological Forecasting and Social Change*, 78(9), 1695–1704. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.04.005>.
- Hosseini Dehshiri, S. S., & Firoozabadi, B. (2024). "Wind energy integrated green hydrogen system as sustainable solution to decarbonize Iranian Industrial Cities". *Energy*, 306, Article 132450. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132450>.
- Howard, K. (2018). "Emergence of a new method: The grounded Delphi method". *Library and Information Research*, 42, 5–31. <https://doi.org/10.29173/lirg746>.
- Hsu, Y. L., Lee, C. H., & Kreng, V. B. (2010). "The application of Fuzzy Delphi Method and Fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection". *Expert Systems with Applications*, 37(1), 419–425.
- Idrissov, C. (2025). "Green steel: How hydrogen and electric ironmaking drive innovation". *Green Review*. Retrieved from: <https://greenreview.com.au/trending/green-steel-how-hydrogen-and-electric-ironmaking-drive-innovation>.
- International Energy Agency. (2022). "Achieving net zero heavy industry sectors in G7 members". Retrieved from: <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-sectors-in-g7-members>.
- Ishikawa, A., Amagasa, T., Shiga, T., Tomizawa, G., Tatsuta, R., & Mieno, H. (1993). "The max–min Delphi method and fuzzy Delphi method via fuzzy integration". *Fuzzy Sets and Systems*, 55(2), 241–253. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(93\)90251-C](https://doi.org/10.1016/0165-0114(93)90251-C).
- Kannan, D., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Jabbour, C. J. C. (2014). "Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company". *European Journal of Operational Research*, 233(2), 432–447.
- Kvale, S., & Brinkmann, S. (2015). "Interviews: Learning the craft of qualitative research interviewing (3rd ed.)". Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Mahmoudzadeh Bakhtabad, S. S., & Taji, M. (2019). "Presenting employee performance evaluation model using grounded concept and fuzzy Delphi method: A case study of an industrial unit active in the field of polymer disposable dishes for food and pharmaceutical serving and packaging". *International Journal of Engineering and Technology*, 11*(4), 934–949. <https://doi.org/10.21817/ijet/2019/v11i4/191104075>.
- Material Economics. (2019). *Industrial transformation 2050: Pathways to net-zero emissions from EU heavy industry*. Stockholm, Sweden: Material Economics AB.
- Merriam, S. B., & Tisdell, E. J. (2016). "Qualitative research: A guide to design and implementation (4th ed.)". San Francisco, CA: Jossey-Bass.
- Niknami, R. (2025). "The Impact of U.S. Extraterritorial Sanctions on Iran-EU Relations (2018–2024)". *Journal of World Sociopolitical Studies*, 9(3), 559–594. doi: 10.22059/wsps.2025.389168.1495.
- OECD. (2023). "Addressing steel decarbonisation challenges for industry and policy". OECD iLibrary. https://www.oecd.org/en/publications/addressing-steel-decarbonisation-challenges-for-industry-and-policy_e6cb2f3c-en.html.
- Rahimirad, Z., & Sadabadi, A. A. (2023). "Green hydrogen technology development and usage policymaking in Iran using SWOT analysis and MCDM methods". *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(40), 15179–15194. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.035>.
- RMI. (2023). "Steel GHG emissions reporting guidance". Rocky Mountain Institute. Retrieved from: https://rmi.org/wp-content/uploads/2022/09/steel_emissions_reporting_guidance.pdf
- Saaty, T. L. (2008). "Decision making with the analytic hierarchy process". *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. Retrieved from: <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.
- Schultz-Zehden, V. (2023). "Barriers and drivers to the implementation of green hydrogen in the European steel industry: A PESTLE analysis". (Master's thesis, Master of Science, Sustainable Entrepreneurship, University of Groningen, Campus Fryslân). University of Groningen.
- Sharafi, S., & Lorvand, M. (2025). "Comprehensive assessment of air pollutant emissions, climate scenario projections, and mitigation strategies in Iran". *Atmospheric Environment: X*, 26, 100330. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100330>.
- SteelRadar. (2025). "Iran's steel sector outlook, decarbonization and market transformation". SteelRadar. Retrieved from: <https://www.steelradar.com/en/irans-steel-production-dropped-by-48-in-spring-2025>.
- Sterman, J. D. (2000). "Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world". McGraw-Hill Education.
- Sukhov, A., & Sihvonen, A. (2023). "Combining Grounded Theory Coding and Fuzzy-Set Qualitative Comparative Analysis to Understand Decision-Making Complexity". *SAGE Research Methods Cases*. Retrieved from: <https://doi.org/10.4135/9781529668315>.
- Taghizadeh, F., Mokhtarani, B., & Rahmanian, N. (2023). "Air pollution in Iran: The current status and potential solutions". *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 11296. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11296-5>.
- Türkmen, M., & Seçkiner, S. (2025). "A multi-criteria decision-making approach for green hydrogen production via renewable energy sources". *Bulletin of Biotechnology*, 6, 25–32. Retrieved from:

<https://doi.org/10.51539/biotech.1708980>.

- World Steel Association. (2022). “Sustainable steel: Meeting the needs of low-carbon markets”. Retrieved from: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/sustainable-steel.html>.
- Yüksel, I. (2012). “Developing a multi-criteria decision making model for PESTEL analysis”. International Journal of Business and Management, 7 (24), 52–66. Retrieved from: <https://doi.org/10.5539/ijbm.v7n24p52>.

Reference [In Persian]

- Hosseini Dehshiri, S. J., Aghāyi, M., & Taghavi-Fard, M. T. (2018). “Identifying and prioritizing critical success factors for e-business using the best–worst method”. Retrieved from <https://civilica.com/doc/889977>
- Mohammad-Rezāei, M., Sarlak, M. A., & Faghīhi, A. H. (2021). “A model for assessing knowledge-worker productivity using fuzzy Delphi and fuzzy best-worst method: A case study of knowledge-based companies”. Retrieved from <https://civilica.com/doc/1550940>.
- Parliament Research Center of the Islamic Consultative Assembly. (2021). On the reform of energy carrier prices (1): The resilience of Iran’s steel industry (Report No. *17737). Tehran, Iran: Office of Energy, Industry, and Mining Studies.
- Saberi, A., & Nikkhah Nasab, M. (2023). Review of the Seventh Development Plan Bill (17): Energy sector. Monthly Journal of Expert Reports of the Parliament Research Center (Majlis), 31(4), e19069.
- Shirazi, H. and Alba, K. (2025). “identification and prioritization of barriers to the transfer of green steel technology using the FBwM method”. Quarterly journal of Industrial Technology Development, 23(60), 53-74. doi: 10.22034/jtd.2025.2036185.1947.