

## Identification and prioritization of barriers to the transfer of green steel technology using the FBWM method

■ Hossein Shirazi\*<sup>+</sup> 

Assistant prof, Department of technology management, management, Islamic Azad University Qom branch, Qom, Iran

■ Kaveh Alba 

Faculty of Art, Islamic Azad University Central Tehran Branch



Receive date: 22 July 2024, Revise date: 26 August 2024, & Accept date: 28 August 2024

 [10.22034/jtd.2025.2036185.1947](https://doi.org/10.22034/jtd.2025.2036185.1947)

### ABSTRACT

The steel industry, the cornerstone of modern infrastructure and economic development, has long been a vital driver of growth and industrialization. In recent years, the concept of green steel has emerged as a promising path to reduce the environmental impact of the steel industry. This article is done with the aim of identifying and prioritizing the challenges of green steel technology transfer, which is mixed from the point of view of practical purpose and method. In this research, library studies in the form of articles were used in the theoretical part in order to collect relevant information and related definitions and concepts. In the field section, a questionnaire was used to collect information. In the Fuzzy Delphi section, in order to identify indicators and components, a semi-open Fuzzy Delphi questionnaire and a combined interview were used. FBWM method was used in the ranking section. The sampling method is purposeful. In this article, an attempt has been made to introduce the most important economic, technological and policy-making obstacles and challenges. First, the researches that were conducted in line with the transfer of green steel technology were examined. Investigations showed that this industry is faced with challenges (1) lack of support policies (2) high costs (3) policy instability (4) lack of financial support (5) lack of coordination between institutions (6) technology level (7) technical problems (8) ) The low level of research and development (9) is facing a limited market. Finally, solutions were presented to solve these obstacles.

### Keywords:

Technology transfer, green steel, Sustainable development, Renewable energies, Fuzzy BWM method.

\* Corresponding Author

<sup>+</sup> Email: Hossein.Shirazi63@hmail.com

۵۳	شماره شصت، تابستان ۱۴۰۴	فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی
----	-------------------------	------------------------------

<https://jtd.iranjournals.ir/>

**How to cite:** Shirazi, H., 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-

## شناسایی و اولویت بندی موانع انتقال فناوری فولاد سبز با استفاده از روش FBWM



■ حسین شیرازی\*<sup>ID</sup>

استادیار دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قم

■ کاوه آلبا<sup>ID</sup>

دانشجوی دکتری مدیریت فناوری گرایش انتقال فناوری،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۵ و تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۷

صفحات: ۷۴-۵۳

[10.22034/jtd.2025.2036185.1947](https://doi.org/10.22034/jtd.2025.2036185.1947)<sup>doi</sup>

### چکیده

صنعت فولاد، سنگ بنای زیرساخت‌های مدرن و توسعه اقتصادی، مدت‌هاست که محرک حیاتی رشد و صنعتی شدن است. در سال‌های اخیر، مفهوم فولاد سبز به‌عنوان یک مسیر امیدوارکننده برای کاهش اثرات زیست محیطی صنعت فولاد پدیدار شده است. مقاله حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی 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 به‌منظور گردآوری اطلاعات مرتبط و تعاریف و مفاهیم مرتبط از مطالعات کتابخانه‌ای در قالب مقالات استفاده شد. در بخش میدانی نیز به‌منظور گردآوری اطلاعات از پرسشنامه استفاده شده است. در بخش دلفی فازی به‌منظور شناسایی شاخص‌ها و مولفه‌ها از پرسشنامه نیمه باز دلفی فازی و مصاحبه به‌صورت ترکیبی استفاده شده است. در بخش رتبه‌بندی از روش FBWM استفاده گردید. روش نمونه‌گیری هدفمند است. در این مقاله سعی شده است تا مهم‌ترین موانع و چالش‌های اقتصادی، فناوری و سیاست‌گذاری معرفی شود. ابتدا پژوهش‌هایی که در راستای انتقال فناوری فولاد سبز، مورد بررسی قرار گرفتند. 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 ارائه گردید.

**واژگان کلیدی:** انتقال فناوری، فولاد سبز، توسعه پایدار، انرژی‌های تجدیدپذیر، روش Fuzzy BWM.

\* عهده دار مکاتبات

+ آدرس پست الکترونیکی: Hossein.Shirazi63@gmail.com

۱ آدرس پست الکترونیکی: Kaveh.alba@yahoo.com

<https://jtd.iranjournals.ir/>

فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی | شماره شصت، تابستان ۱۴۰۴ | ۵۳

نحوه استناددهی به این مقاله: شیرازی، حسین، آلبا، کاوه. (۱۴۰۴). شناسایی و اولویت بندی موانع انتقال فناوری فولاد سبز با استفاده از روش FBWM. فصلنامه



توسعه تکنولوژی صنعتی، (۶۰)، ۲۳-۷۴، ۵۳-۷۴.

ناشر: پژوهشکده توسعه تکنولوژی

## ۱- مقدمه

صنعت فولاد، سنگ بنای زیرساخت‌های مدرن و توسعه اقتصادی، مدت‌هاست که محرک حیاتی رشد و صنعتی شدن است. با این حال، شهرت این صنعت با هزینه زیست محیطی قابل توجهی همراه است که در درجه اول به انتشار قابل توجه CO<sub>2</sub> نسبت داده می‌شود. در سال‌های اخیر، مفهوم فولاد سبز به‌عنوان یک مسیر امیدوارکننده برای کاهش اثرات زیست محیطی صنعت فولاد پدیدار شده است. فولاد سبز شامل تولید فولاد بدون استفاده از سوخت‌های فسیلی است. این کار را می‌توان با استفاده از منابع انرژی کم کربن مانند هیدروژن، گازی شدن زغال سنگ یا الکتروسیته به جای مسیر سنتی تولید کربن فشرده نیروگاه‌های زغال سنگ انجام داد. فولاد سبز که با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و هیدروژن تولید می‌شود، یک راه امیدوارکننده برای کربن‌زدایی تولید فولاد و گسترش صنعت هیدروژن است (بای سلامی، ۱۴۰۲).

ایران که دارای منابع تجدیدپذیر فراوان و ذخایر سنگ آهن است، در موقعیت ایده‌آلی برای حمایت از این فناوری دوست‌دار محیط زیست قرار دارد. تولید فولاد سبز از نظر زیست محیطی و اقتصادی دارای چالش‌های مهمی نیز است. فولاد سبز تولید خود را در اولین کارخانه فولاد سبز اروپا در شمال سوئد آغاز کرده است. از روش‌های تولید فولاد سبز استفاده از هیدروژن برای واکنش با سنگ آهن و تولید بخار آب یا بازیافت مواد خام است. نتایج تحقیقات نشان داد که استفاده از فولاد سبز علی‌رغم چالش‌هایی که دارد، به کاهش انتشار گاز CO<sub>2</sub> کمک می‌کند و از نظر اقتصادی نسبت به فولاد معمولی به‌صرفه‌تر است (بای سلامی، ۱۴۰۲).

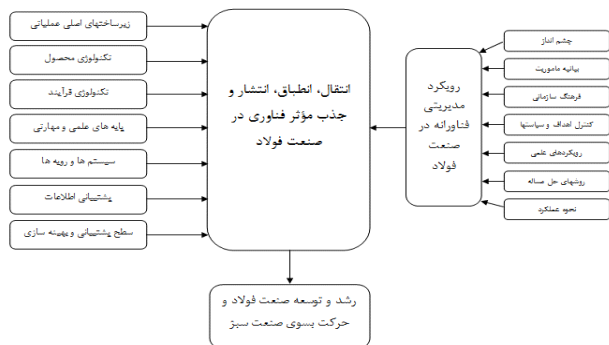
هدف فولاد سبز این است که تولید فولاد سازگارتر با محیط زیست باشد و تاثیر آن بر اقلیم کاهش یابد. فرآیند تولید فولاد سبز متمرکز بر استفاده از برق و سوخت‌های غیرفسیلی است که منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر نسبت به فولاد معمولی می‌شود. فرآیند فولاد سبز انتشار گاز دی اکسید کربن را تقریباً صفر می‌کند. از این رو، کربن‌زدایی یک اولویت جهانی در صنعت فولاد است. تولید فولاد سبز اثرات زیست محیطی تولید فولاد را کاهش می‌دهد و به پایدارتر شدن آن کمک می‌کند. این شامل کاهش انتشار کربن، کاهش استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر و به حداقل رساندن ضایعات است (بای سلامی، ۱۴۰۲).

در سطح جهان، صنعت آهن و فولاد ۷٫۲ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد (UNFCCC, 2022). با انتشار مستقیم استفاده از زغال سنگ فسیلی و کک در کوره‌های

بلند بزرگترین منبع انتشار را تشکیل می‌دهد (Wang et al., 2021). انتشار گازهای گلخانه‌ای از صنعت آهن و فولاد نیز در حال حاضر سریع‌تر از هر بخش صنعتی دیگر رشد می‌کند (Bashmakov et al., 2022). برای کاهش تأثیرات آب و هوایی این بخش، بهبودهای افزایشی بهره‌وری انرژی و مواد و تغییر حامل انرژی از جمله راهبردهای اولیه بوده است (Wang et al., 2021). استقرار سوخت‌ها و احیاکننده‌های مبتنی بر زیست توده به‌عنوان جایگزینی جزئی برای سوخت‌های فسیلی و احیاکننده‌ها، همچنین به‌عنوان یک راهبرد موثر کاهش CO<sub>2</sub> برای این بخش در کوتاه‌مدت تا میان‌مدت شناسایی شده است (Mousa et al., 2016). در حالی که جایگزینی کامل زغال سنگ به جای زیست توده در فرآیندهای صنعت آهن و فولاد از نظر فنی امکان‌پذیر نیست (Suopajarvi et al., 2018)، همچنین با عرضه زیست توده پایدار محدود شده است (Hanssen et al., 2018).

نیاز به کربن‌زدایی صنعت فولاد برای مهار تغییرات آب و هوایی حیاتی است. کاهش مستقیم مبتنی بر هیدروژن یکی از فناوری‌های امیدوارکننده کم کربن است که در حال بررسی است. درحالی‌که چالش‌های مرتبط با اجرای آن وجود دارد، مزایای بالقوه فولادسازی مبتنی بر هیدروژن قابل توجه است. با ادامه تحقیقات و سرمایه‌گذاری، صنعت فولاد می‌تواند به آینده‌ای پایدارتر و کم کربن تبدیل شود. برای مهار تغییرات آب و هوایی، فرآیند کاهش سنگ آهن به محصولی معادل آهن خام ضروری است. پس از دهه‌ها تحقیق، چندین فناوری شروع به نزدیک شدن به آمادگی تجاری کرده‌اند. علاوه بر جذب و ذخیره کربن، دو فناوری امیدوارکننده کم کربن، الکترولیز اکسید مذاب و احیای مستقیم هیدروژن هستند (بای سلامی، ۱۴۰۲). صنعت فولاد سبز به‌عنوان بخشی از صنعت فلزات با چالش‌ها و فرصت‌های خاص خود مواجه است. فناوری‌های سبز یکی از راهکارهای مطرح برای مقابله با چالش‌ها و بهره‌برداری از فرصت‌های جدید است (Black & White, 2023). یکی از رویکردهایی که برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری در این صنعت مطرح شده، استفاده از فناوری‌های سبز و ایجاد صنعت فولاد سبز است. اما این تحولات همراه با چالش‌ها و فرصت‌هایی همراه است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. لذا این مطالعه قرار است به سوالات زیر پاسخ دهد:

- موانع پیش‌روی انتقال فناوری در صنعت فولاد سبز چیست؟
- هر یک از این موانع شناسایی شده چه رتبه‌ای دارند؟



شکل ۱: مدل UNIDO

زیرساخت‌های اصلی عملیاتی: شامل زیرساخت‌ها، تجهیزات و ماشین‌آلات کارخانه غیر از زمین‌ها و ساختمان‌هاست که در صنعت فولاد ورود ماشین‌آلات و تجهیزات تا حد زیادی با فناوری‌های نوین سازگاری ندارد و باید این شکاف عملکردی بررسی شود. در این صنعت مطابق شرایط بومی‌سازی باید فناوری وارد شده سازگاری یابد تا علاوه بر سنجش خطرات زیست محیطی که اغلب تجهیزات کنونی وارد شده دارند، به بهبود عملکرد آنها دست یافت. در صنعت فولاد نمی‌توان گفت که در این مرحله حتماً فناوری باید نوآوری درون‌زا باشد و تکیه بر تولید داخلی کرد. زیرا ترکیب منابع مختلف است که موجب سینرژی می‌گردد. به همین دلیل در این مرحله باید انتقال مؤثر فناوری انجام گیرد تا از ورود فناوری‌های زایل شده کشورهای توسعه یافته به ایران جلوگیری کرد و فناوری سازگار و مؤثر را جذب کرد (محمدنژاد و دل انگیزان، ۱۳۸۴).

**فناوری محصول:** در مراحل اولیه صنعت فولادسازی، فناوری محصول بسیار محدود است. یعنی مراحل ذوب و نورد از فناوری تقریباً یکسانی بهره می‌گیرد. اما در مراحل نهایی که محصول به مشتریان نهایی عرضه می‌گردد، طراحی محصول باید طبق تقاضای بازار و نیاز مشتری با فناوری نوین انجام پذیرد. لذا در مرحله نهایی صنعت فولادسازی، طراحی محصول با فناوری موردنیاز مخصوصاً در صنایع وابسته به صنعت فولاد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ضمن اینکه خطرات زیست محیطی فناوری جدید باید به دقت بررسی گردد.

**فناوری فرآیند:** فناوری فرآیند در هر صنعتی از ملزومات آن صنعت است. در صنعت فولاد در هر واحدی باید فناوری فرآیند منطبق با آن به‌طور مؤثر اعمال گردد. تصمیم‌گیری‌های آنی در دنیای امروزی در هر صنعتی با توجه به پارادایم پیچیدگی، کنترل لحظه‌ای فرآیند را ضروری دانسته و به بهبود عملکرد سیستم کمک می‌کند. هر چقدر به سمت فناوری تکراری پیش برویم، پیچیدگی کمتر شده و به رسمیت افزوده می‌شود که

## ۲- مبانی نظری

### ۱-۲- تعریف فولاد سبز

فولاد سبز به فولادی گفته می‌شود که در فرایند تولید آن از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده شده و انتشار کربن به حداقل رسیده باشد. این امر معمولاً با استفاده از هیدروژن به جای زغال سنگ در فرایند احیای سنگ آهن، بازیافت گرما و استفاده از انرژی‌های خورشیدی و بادی محقق می‌شود (SAAB, 2023).

### ۲-۲- مدل انتقال فناوری در صنعت فولاد

بررسی این صنعت عظیم با اتکاء بر این مطلب که متأسفانه هنوز استفاده از فناوری‌های روز دنیا در بعضی مراحل حیاتی آن انجام نمی‌پذیرد، تحلیل فناوری‌های نوین در مراحل مختلف انتقال مؤثر فناوری، انطباق و انتشار آن می‌تواند به کاهش شکاف‌های عملکرد صنعت فولاد منجر شود (زهتابچیان و ناصری گیگلو، ۱۳۸۹). از سوی دیگر، در کشورهای توسعه یافته بررسی تحلیل محیط صنعت فولاد با استفاده از ابزارها و مدل‌های متفاوتی برای رسیدن به صنایع سبز انجام می‌پذیرد. از سوی دیگر، سازمان توسعه صنعتی ملل متحد (UNIDO) یک سازمان تخصصی سازمان ملل متحد است که هدف اصلی آن ارتقا و تسریع توسعه صنعتی در کشورهای در حال توسعه و یا اقتصادهای در حال گذار و توسعه روابط صنعتی بین‌المللی است (IEA & UNIDO, 2011). سازمان یونیدو بر طبق مدل ارائه داده در سال ۲۰۱۱، پارامترهای فناوری را به هفت جزء فناورانه و یک جزء مدیریتی مشتمل بر ۲ زیرمجموعه، تقسیم بندی نموده است:

- زیرساخت‌های اصلی عملیاتی
- فناوری محصول
- فناوری فرآیند
- پایه‌های علمی و مهارتی
- سیستم‌ها و رویه‌ها
- پشتیبانی اطلاعات
- سطح پشتیبانی و بهینه‌سازی

هفت فاکتور بالا اجزاء فناورانه مدل یونیدو است و جز هشتم جزء مدیریتی است که شامل هفت جزء چشم‌انداز مدیریتی، بیانیه ماموریت، فرهنگ سازمانی، کنترل اهداف و سیاست‌ها، رویکردهای علمی، روش‌های حل مساله و نحوه عملکرد است. این پژوهش صنعت فولاد را با مدل یونیدو تطبیق می‌دهد و براساس مدل یونیدو جهت کاهش شکاف‌های فناوری جهت رسیدن به صنعتی سبز، راهکار ارائه می‌دهد.

بیانیه (mission): فلسفه وجودی سازمان در صنعت فولاد نیز باید تعریف گردد که شامل یک بیانیه ساده و مکتوب است که به وسیله همه افراد موجود در سیستم باید درک گردد (پارساییان و اعرابی، ۱۳۸۶).

رویکرد علمی: در صنعت فولاد با توجه به اهمیت فناوری باید نظام‌های علمی و ایزوهای مختلف پیاده‌سازی گردد تا شکاف واقعی عملکرد مشخص شود.

فرهنگ سازمانی: فناوری باید در روابط بین کارکنان و فرهنگ سازمانی صنایع مختلف نیز وجود داشته باشد تا انتقال موثر فناوری روی دهد. هنگامی که فناوری وارد شود اما صنعت قابلیت جذب موثر آن را نداشته باشد نه تنها این فناوری نمی‌تواند کمک کند بلکه باعث بروز مشکلات نیز می‌شود.

کنترل خط مشی و هدف: صنعت فولاد می‌تواند با ارزیابی دوره‌ای به صورت کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت، به کنترل سیستم بپردازد و در همین کنترل اهداف، نیاز به ورود یا استفاده از فناوری روز دنیا نمایان می‌گردد.

حل مساله: مدیریت در صنعت فولاد می‌تواند پس از شناسایی مشکلات با تشکیل گروه‌های حل مساله و موارد دیگر مانند نظام پیشنهادات و... به حل مساله بپردازد.

نحوه عملکرد: مدیریت صنعت مورد نظر می‌تواند با راهکارهایی که برای مقابله و یا جلوگیری از بروز موانع ارائه می‌دهد به بهبود عملکرد سیستم دست یابد و باعث رشد و توسعه صنعت شود (الهی و قاسمی و اجارگاه، ۱۳۹۵).

در سال‌های اخیر، تولید فولاد جهان به طور پیوسته افزایش یافته است. جریان اصلی فناوری ساخت فولاد، فرآیند کوره بلند است که بر محیط زیست تأثیر منفی می‌گذارد. با توجه به گرم شدن کره زمین به عنوان یکی از ملاحظات اصلی، نگرانی‌ها برای کاهش انتشار کربن دی اکسید بر همین اساس افزایش یافته است. هیدروژن سبز هیدروژنی است که از طریق فرآیندهای الکترولیز آب با استفاده از انرژی تجدیدپذیر تولید می‌شود. این فرآیند هیچ گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌کند. از این رو، به عنوان یک منبع انرژی پاک شناخته می‌شود. استفاده از هیدروژن سبز امروزه به عنوان یک انقلاب جدید در صنعت شناخته می‌شود و کشورها سعی دارند در این زمینه از یکدیگر پیشی بگیرند (مرادی، ۱۴۰۲). فولادسازی مبتنی بر هیدروژن یکی از راهکارهای تحقق فولادسازی بدون انتشار دی اکسید کربن است. بر این اساس، احیا مستقیم بر پایه گاز طبیعی (N.G) می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای اولین مرحله از این دوران گذار بکار گرفته شود. انعطاف‌پذیری زیاد این روش امکان افزایش تدریجی هیدروژن را

ساختار مکانیکی ایجاد می‌شود و در عوض با حرکت به طرف فناوری غیر تکراری، بر پیچیدگی افزوده شده و سازمان از انعطاف پذیری بالایی برخوردار می‌شود (لطف‌الهی حقی، ۱۳۸۹).

**پایه‌های علمی و مهارتی:** این فاکتور فناورانه در مدل UNIDO در صنعت فولاد می‌تواند وابستگی ایران را در برخی زمینه‌ها به نیروهای خارجی کم کند. به عنوان مثال، برای ورود تجهیزات با فناوری نوین معمولاً نیروی راه اندازی از شرکت مورد نظر فرستاده می‌شود که این پارامتر می‌تواند با استفاده از استعداد ایرانی و تحکیم زیرساخت‌ها تقویت گردد و در صنعت فولاد با تقویت پایه‌های علمی و مهارتی با فناوری روز دنیا سازگاری یابیم. حتی در این آیت می‌توان از ایده‌ها و نوآوری‌های درون‌زا استفاده کرد و در گام بعدی با طراحی مفهوم خود را از وابستگی رهانید. متأسفانه هم اکنون از مرحله ساخت و تولید در مدل NPD در صنعت فولاد سازی استفاده می‌گردد که اگر از مرحله طراحی مفهوم انجام پذیرد، نه تنها مساله وابستگی کاهش می‌یابد و گامی در جهت اقتصاد مقاومتی برداشته می‌شود؛ بلکه این رشد و توسعه می‌تواند صنعت فولاد کشور را به سوی صنعتی سبز سوق دهد (میگون پوری و محمدی، ۱۳۹۱).

**سیستم‌ها و رویه‌ها:** در صنعت فولاد، مستندسازی و بایگانی و کنترل و نظارت می‌تواند پله‌ای برای ارتقای رتبه در سطح جهانی گردد. کنترل و اصلاح همه ورودی‌ها، پردازش و خروجی‌ها از مسائل مهمی است که اگر فناوری و ورود فناوری در آن به صورت موثر، جذب و انطباق نیابد نه تنها به صنعت کمک نخواهد کرد بلکه موجب رکود آن و مشکل‌سازی می‌گردد.

**پشتیبانی اطلاعات:** صنعت فولاد با جمع‌آوری داده‌های مرتبط و ایجاد بانک اطلاعاتی می‌تواند در موارد مشابه به تجربه‌های پیشین رجوع کند و شرایط را مطابق با داده‌های جمع‌آوری شده منطبق با فناوری روز دنیا سازگار کند تا از بروز مشکلات و دوباره کاری بپرهیزد.

**سطح پشتیبانی و بهینه سازی:** شامل لجستیک و بهینه‌سازی فناوری در سطح صنعت است.

**رویکرد مدیریتی** است که در هر قسمت از هفت مرحله باید فناوری و تاثیر آن بررسی گردد:

چشم انداز (vision): در صنعت فولاد چراغ راه آینده مدیران صنعت است و براساس آن باید آینده ایده‌آل را تصویرسازی کرد تا با برنامه‌ریزی صحیح از حالت موجود به حالت مطلوب و ایده‌آل رسید (پارساییان و اعرابی، ۱۳۸۶).

برق و همچنین افزایش در دسترس بودن ضایعات) بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۵۰ حداکثر ۱۵ درصد پیش‌بینی می‌شود. به دلیل رد پای کمتر کربن در روش کوره قوس مبتنی بر استفاده از قراضه، این فرایند به وضوح از نظر انتشار دی اکسید کربن (۴۵۵ کیلوگرم دی اکسید کربن به ازای هر تن فولاد خام) نسبت به فرآیند دیگر برتری دارد (عزیز طائمه و خادمی، ۱۴۰۰).

#### ۲-۴- فناوری‌های کلیدی در تولید فولاد سبز

**استفاده از هیدروژن به جای کربن:** یکی از پیشرفته‌ترین روش‌ها برای تولید فولاد سبز، استفاده از هیدروژن به جای کربن در فرایند احیای سنگ آهن است. این روش به شدت انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش می‌دهد (ArcelorMittal, 2023).

**بازیافت گرما:** بازیافت گرما از فرایندهای تولید فولاد، می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری انرژی کمک کند (World Steel Association, 2022).

**استفاده از انرژی تجدیدپذیر:** به‌کارگیری انرژی خورشیدی و بادی در فرایند تولید فولاد، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را به دنبال دارد (International Energy Agency, 2022).

با توجه به اینکه پلنت احیا بر پایه هیدروژن برای تولید فولاد سبز نایستی با سوخت‌های فسیلی کار کند، پس باید از جایگزین‌های دیگر استفاده گردد. همانگونه که قبلاً ذکر شد در حال حاضر آینده‌دارترین فناوری برای هیدروژن سبز الکترولیز آب است. توجه به این نکته نیز مهم است که هیدروژن دانسیته انرژی زیادی به ازای وزن دارد؛ درحالی‌که دانسیته انرژی کمی به ازای حجم دارد (عزیز طائمه و خادمی، ۱۴۰۰).

جهت عملیات احیاء از فناوری زیر استفاده می‌شود. فناوری شرکت MIDREX که از گاز طبیعی برای تولید هیدروژن استفاده می‌شود که به آن هیدروژن آبی گفته می‌شود.

شکل شماره ۲ فلوشیت فرآیند MIDREX را نشان می‌دهد. توده‌های سنگ آهن و یا گندله‌هایی که برای آهن‌سازی با احیای مستقیم آماده شده‌اند، به‌عنوان مواد اولیه از بالای کوره شفتی (ShaftFurnace) ریخته می‌شوند. سنگ آهن داخل کوره احیا شده (اکسیژن از اکسید آهن گرفته می‌شود) و آهن احیا شده از پایین کوره تخلیه می‌شود. گاز احیاکننده از تقریباً میانه کوره شفتی دمیده می‌شود و مواد اولیه بالای نازل را احیا کرده و از بالای کوره خارج می‌شود. گاز خنک کن که در بخش پایینی کوره می‌گردد، DRI را خنک می‌کند. هم درگاه تغذیه و هم پورت تخلیه توسط گاز حائل (Sealing Gas) به‌صورت دینامیک آب بندی

فراهم می‌کند تا در بلند مدت، درنهایت این فرآیند فقط با هیدروژن خالص کار کند (بای سلامی، ۱۴۰۲).

#### ۲-۳- نقش صنعت آهن و فولاد در تولید گازهای گلخانه‌ای

ساخت انواع مقاطع فولادی به‌طور سنتی با استفاده از زغال سنگ کک انجام می‌شود. این فرآیند باعث تولید مقادیر زیادی گازهای گلخانه‌ای، از جمله دی‌اکسید کربن می‌شود. استفاده از هیدروژن سبز در ساخت مقاطع فولاد می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای این صنعت کمک کند. در این روش، آهن اسفنجی با استفاده از هیدروژن سبز به جای زغال سنگ کک تولید می‌شود. سپس آهن اسفنجی به کوره قوس الکتریکی وارد می‌شود و در آنجا ذوب می‌شود تا فولاد تولید شود (مرادی، ۱۴۰۲).

همانطور که قبلاً هم گفته شد، صنعت آهن و فولاد به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان دی اکسید کربن، تقریباً عامل انتشار ۷ تا ۹ درصد دی اکسید کربن صنعتی جهان و حدود ۳۰ درصد از انتشار دی اکسید کربن صنایع است. تنها در اروپا صنعت آهن و فولاد ۳ درصد از تولید کل دی اکسید کربن و در قسمت‌های صنعتی ۲۲ درصد این آلاینده را به خود اختصاص داده است. حدود ۷۵٪ از آهن جهان توسط روش BF-BOF تولید می‌شود. این روش کک را به‌عنوان منبع انرژی و همچنین عامل احیا کننده بکار می‌برد. در حال حاضر، تولید فولاد خام در اتحادیه اروپا تقریباً بین فرآیندهای کوره بلند/کوره اکسیژن بازی یا قلیایی (BF/BOF) و کوره قوس الکتریکی قراضه (EAF) تقسیم شده است. در سال ۲۰۱۸، ۵۸٫۳٪ فولاد از طریق BF/BOF تولید شد؛ در حالی که ۴۱٫۷ درصد فولاد خام از طریق کوره قوس تولید گردید. برای دستیابی به هدف کاهش ۸۰ درصدی دی اکسید کربن، پیاده‌سازی اصطلاحاً «فناوری‌های پیشرفته» در سیستم‌های فولادسازی آینده ضروری است. از آنجا که فرآیندهای تولید فولاد در حال حاضر نزدیک به محدوده ترمودینامیکی خود عمل می‌کنند، پتانسیل کاهش دی اکسید کربن در این روش‌ها محدود است. در مورد رایج‌ترین روش یعنی BF/BOF به‌طور متوسط به ازای هر تن فولاد خام حدود ۱٫۶ تا ۲ تن دی اکسید کربن (بسته به فناوری استفاده شده) منتشر می‌شود. اما با روش DRI-EAF از مرحله سنگ تا تولید فولاد میزان انتشار دی اکسید کربن ۱٫۱ تا ۱٫۲ است که البته با اضافه شدن سیستم حذف دی اکسید کربن در مرحله احیا مستقیم می‌توان یک سوم این مقدار انتشار دی اکسید کربن را نیز حذف کرد. پتانسیل کاهش دی اکسید کربن قابل دستیابی با روش‌های تولید واقعی (با توجه به کاهش شدت دی اکسید کربن در بخش

بلند نیستند، مورد نیاز خواهند بود (IEA & UNIDO, 2011). بنابراین، حتی با وجود مسیر مبتنی بر هیدروژن به عنوان راهبرد اصلی کربن زدایی، تقاضای قابل توجهی برای زیست توده از صنعت آهن و فولاد همچنان ظاهر خواهد شد. با این حال، مطالعات قبلی که امکان‌سنجی اقتصادی استفاده از زیست توده در صنعت آهن و فولاد را تحلیل کرده‌اند، اثرات افزایش رقابت برای زیست توده را حذف کرده‌اند (Feliciano-Bruzual et al., 2014). معرفی گسترده زیست توده در تولید آهن و فولاد به‌طور اجتناب‌ناپذیری بر بازارهای منابع زیست توده تأثیر می‌گذارد. افزایش قیمت‌های زیست توده ممکن است بر امکان‌سنجی اقتصادی بخش آهن و فولاد برای استفاده از زیست توده تأثیر بگذارد. علاوه بر این، سایر بخش‌های مصرف‌کننده زیست توده (موجود و در حال ظهور) می‌توانند از بین بروند و توانایی آن‌ها برای رسیدن به اهداف انتشارشان کاهش یابد. با وجود تعداد زیادی از مطالعات که ویژگی‌های فنی-اقتصادی جایگزینی زیست توده در صنعت آهن و فولاد را مورد مطالعه قرار داده‌اند (به‌عنوان مثال، رفر. گزینه‌های زنجیره تامین کم هزینه برای سیستم مورد بررسی (Nwachukwu et al., 2021).

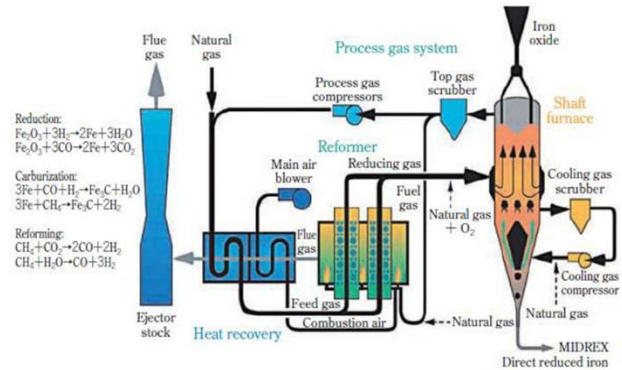
لذا می‌توان گفت که فرصت‌های این صنعت عبارت است از:

**کاهش هزینه‌های بلندمدت:** با کاهش مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری، هزینه‌های تولید در بلندمدت کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به افزایش سودآوری و رقابت‌پذیری کمک کند (SAAB, 2023).

**بهبود وضعیت زیست‌محیطی:** کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌تواند به بهبود کیفیت هوا و حفظ منابع طبیعی کمک کند (International Energy Agency, 2022). با انتقال به فناوری‌های سبز، انتشار گازهای گلخانه‌ای از صنعت فولاد به شدت کاهش می‌یابد که می‌تواند به حفظ محیط زیست کمک کند (ThyssenKrupp, 2018). استفاده از فناوری‌های سبز منجر به کاهش آلاینده‌ها و حفظ محیط زیست می‌شود که این امر می‌تواند به بهبود شرایط زندگی جامعه کمک کند (Red et al., 2020). استفاده از هیدروژن سبز به‌عنوان منبع انرژی می‌تواند منجر به کاهش انتشارات گازهای گلخانه‌ای در صنعت فولاد شود (Green et al., 2022).

**دسترسی به بازارهای جدید:** با توجه به افزایش تقاضا برای محصولات سبز و پایدار، شرکت‌هایی که به سمت تولید فولاد سبز حرکت می‌کنند، می‌توانند به بازارهای جدید دسترسی پیدا کنند و مزایای رقابتی کسب کنند (ArcelorMittal, 2023). شرکت‌هایی که با موفقیت به فناوری‌های سبز انتقال یابند، می‌توانند در

می‌شوند و امکان تغذیه مداوم مواد اولیه و تخلیه پیوسته DRI را می‌دهند (Atsushi et al., 2010).



شکل ۲: فلوشیت فرآیند احیای مستقیم MIDREX

## ۲-۵- فرصت‌های انتقال فناوری در صنعت فولاد سبز

برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از ساخت آهن و فولاد، ترکیبی از اقدامات مختلفی لازم است، از جمله توسعه و به کارگیری فناوری‌های به اصطلاح پیشرفت (با انتشار کربن بسیار کم یا صفر) (Fan et al., 2021). این اساساً مستلزم حذف تدریجی کوره بلند یا تقویت مجدد آن با جذب و ذخیره کربن (CCS) در ترکیب با جایگزینی جزئی سوخت‌های فسیلی و احیاکننده‌ها برای هم‌تایان مبتنی بر زیست است (Vogl et al., 2021). راهبرد اولیه اعلام شده این است که مسیر تولید فولادسازی اولیه غالب فعلی (کوره بلند و سپس کوره اکسیژن پایه) را کنار بگذاریم تا به جای آن به احیای سنگ آهن مبتنی بر هیدروژن که در آن DRI (آهن احیا شده مستقیم) یا HBI (آهن بریکت شده داغ) تولید می‌شود، منتقل شود. برای فولادسازی پایین دستی از طریق مسیر کوره قوس الکتریکی (EAF) (Vogl et al., 2021). حتی با احیای مبتنی بر هیدروژن، مقداری کربن باید به DRI یا HBI وارد شود تا به خواص مطلوب برای فرآیند فولادسازی EAF برسد (Kumar et al., 2022). محتوای کربن معمولی در DRI تجاری فعلی (عمدتاً با استفاده از گاز فسیلی/متان به عنوان عامل کاهنده تولید می‌شود) بین ۰٫۸ تا ۲٫۵ درصد است (Morris, 2001)، اما این مقدار برای کاربردهای خاص می‌تواند به ۰٫۵ و ۴٫۵ درصد برسد (Arandas et al., 2017). برای داشتن فولاد کاملاً بدون فسیل، کربن باید منشأ بیوژنیک داشته باشد. بیوسنگاز تولید شده از گازسازی زیست توده به‌عنوان یک محیط کربنی مناسب برای جایگزینی گازهای حاوی کربن فسیلی پیشنهاد شده است (El-Tawil et al., 2021). به‌طور مشابه، سوخت‌های مبتنی بر زیستی احتمالاً در فرآیندهایی که برق‌رسانی آنها دشوار است، مانند کوره‌ها و کوره‌های خاص و همچنین در فرآیندهای احیا که براساس کوره

- سال ۱۳۹۹، ایران اعلام کرد که قصد دارد تا سال ۲۰۴۰، تولید هیدروژن سبز را به ۱ میلیون تن در سال برساند.
- سال ۱۴۰۱، ایران اولین نیروگاه الکترولیز آب برای تولید هیدروژن سبز را در استان فارس افتتاح کرد.
- سال ۱۴۰۱، ایران اعلام کرد که قصد دارد تا سال ۲۰۲۵، صادرات هیدروژن سبز را به ۵۰۰ هزار تن در سال برساند. با این حال، ایران هنوز در مراحل اولیه توسعه استفاده از هیدروژن سبز قرار دارد. این کشور برای دستیابی به اهداف خود در این زمینه، به سرمایه‌گذاری و همکاری بین‌المللی نیاز دارد که متأسفانه تحریم‌ها تاکنون مانع از انجام این کار شده است (عزیز طائمه و خادمی، ۱۴۰۰).

## ۲-۸- چالش‌های انتقال فناوری صنعت فولاد سبز

علاوه بر این سؤالات فنی در زمینه فناوری استفاده از هیدروژن بایستی بررسی گردد. سؤالات فنی مربوط به فناوری الکترولیز، گذار از سیستم‌های تولید انرژی موجود به انرژی‌های تجدیدپذیر نیز باید تحقق یابد. در کنار همه این‌ها عرضه مداوم و پایای منابع تجدیدپذیر برق در طول سال نیز باید برای پلنت تأمین شود (عزیز طائمه و خادمی، ۱۴۰۰).

ادغام هیدروژن در صنعت فولاد احتمالاً جذاب‌ترین راه حل برای کربن زدایی بخش و دستیابی به هدف انتشار خالص صفر تا سال ۲۰۵۰ است. مسیر BF-BOF شاید حداقل برای چند دهه به‌عنوان یک فولادسازی مقرون به صرفه بر صنایع فولاد تسلط داشته باشد. مسیر تلاش‌هایی در سرتاسر جهان برای جایگزینی کک زغال سنگ از مسیر BF-BOF با هیدروژن و زیست توده تجدید پذیر وجود دارد. آزمایشات اولیه وعده جایگزینی حدود ۳۰ درصد از سوخت‌های فسیلی با هیدروژن خالص را می‌دهد.

با این حال، تحقیق و توسعه قابل توجهی در کیفیت فرآیند و محصول مورد نیاز است. به شرطی که همه چیز خوب پیش برود، انتظار می‌رود برخی از نیروگاه‌های BF-BOF یکپارچه هیدروژن تا سال ۲۰۳۰ به‌صورت تجاری در دسترس باشند. چند فرآیند وجود دارند که پتانسیل توسعه برای دستیابی به هدف انتشار خالص صفر در صنعت فولاد را دارند. با این حال، تا به امروز، احیای مستقیم آهن با یک کوره قوس الکتریکی یکپارچه (H<sub>2</sub>DRI-EAF) به‌طور بالقوه بالغ‌ترین فناوری برای ادغام هیدروژن است. آزمایش‌های آزمایشگاهی و آزمایشی موفقیت‌آمیزی در سراسر جهان برای آزمایش هیدروژن به‌عنوان یک منبع گرما و احیاکننده وجود دارد. در حال حاضر، هیچ فرآیند H<sub>2</sub>DRI-EAF در مقیاس تجاری برای ساخت فولاد وجود ندارد. با این حال، با همکاری سایر شرکت‌ها، ThyssenKrupp

بازارهای جهانی به رقابت‌پذیری بالاتری دست یابند (ThyssenKrupp, 2018). با انتقال به فناوری‌های سبز، صنایع فولاد می‌توانند رقابت‌پذیری خود را افزایش داده و بازارهای جدیدی را متصاحب شوند (Green et al., 2021). تولید فولاد سبز می‌تواند فرصت‌های جدیدی در بازارهای جهانی فراهم کند و باعث افزایش سهم بازار شود (Taylor et al., 2021). شرکت‌های فولادی که به فناوری هیدروژن سبز می‌پردازند، می‌توانند رقابت‌پذیری خود را افزایش دهند و در بازار جهانی بهترین جایگاه را داشته باشند (Smith et al., 2021).

**افزایش بهره‌وری:** با وجود چالش‌ها، انتقال به فناوری‌های سبز در صنعت فولاد فرصت‌های بسیاری نیز به دنبال دارد. یکی از این فرصت‌ها، کاهش هزینه‌های بهره‌وری انرژی است. با به‌کارگیری فناوری‌های سبز، صنایع فولاد قادر به کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های مربوط به آن خواهند بود (Jones et al., 2020). استفاده از فناوری‌های جدید می‌تواند به بهبود فرآیندها، کاهش هدررفت و افزایش بهره‌وری منجر شود (ThyssenKrupp, 2018). استفاده از فناوری‌های سبز می‌تواند به افزایش بهره‌وری در تولید فولاد منجر شود و همچنین هزینه‌های تولید را کاهش دهد (Smith et al., 2022).

## ۲-۶- نمونه‌های موفق

- شرکت ThyssenKrupp در آلمان: این شرکت با استفاده از فناوری‌های جدید، توانسته است به تولید فولاد سبز با کیفیت بالا بپردازد و در بازار جهانی رقابت‌پذیر باشد (ThyssenKrupp, 2018).
- شرکت Nucor در ایالات متحده: با استفاده از فناوری‌های سبز، این شرکت توانسته است به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش بهره‌وری در تولید فولاد بپردازد (Nucor Corporation, nd).

## ۲-۷- ایران و استفاده از هیدروژن سبز

ایران نیز به مانند سایر کشورها در این حوزه وارد شده و در زمینه استفاده از هیدروژن سبز اقداماتی انجام داده است. ایران برنامه‌های توسعه‌ای مختلفی را برای استفاده از هیدروژن سبز تدوین کرده است. این برنامه‌ها شامل برنامه‌های توسعه تولید هیدروژن سبز، برنامه‌های توسعه استفاده از هیدروژن سبز در بخش‌های مختلف اقتصاد و برنامه‌های توسعه صادرات هیدروژن سبز است. ایران در حال احداث نیروگاه‌های الکترولیز آب برای تولید هیدروژن سبز است. این نیروگاه‌ها از انرژی تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن سبز استفاده می‌کنند. برخی از اقدامات خاص کشور در زمینه استفاده از هیدروژن سبز عبارتند از:

علاوه بر چالش‌های مختلف فناوری، محرک اصلی مهاجرت موفقیت‌آمیز از سوخت‌های فسیلی به تولید فولاد مبتنی بر هیدروژن، تولید هیدروژن پایدار و رقابتی است. در حال حاضر، هیدروژن تجدیدپذیر برای کاربردهای در مقیاس تجاری مقرون به صرفه نیست که منجر به حداقل چهار برابر هزینه‌های بیشتر برای فولادسازی مبتنی بر هیدروژن نسبت به مسیر BF-BOF می‌شود. با این حال، تلاش قابل توجهی در سراسر جهان با هدف تولید هیدروژن کمتر از ۲٫۰ دلار در کیلوگرم، راه را برای ادغام آن در صنایع فولاد در آینده قابل پیش‌بینی هموار خواهد کرد (Shahabuddin et al., 2023). برخی از فولادسازان اکنون به دنبال امکان نصب راکتورهای هسته ای کوچک مدولار برای کمک به کاهش بحران منابع انرژی پاک هستند. هزینه‌های بالا و حمل و نقل دشوار استفاده از هیدروژن در فولادسازی را به آینده موکول کرده و شاید تا سال ۲۰۴۰ با تحول این صنعت فولادسازی هیدروژنی در دسترس خواهد بود تا آن زمان فناوری تکامل خواهد یافت و بازار برای این کار فشار بیشتری به بخش تولید خواهد آورد. در این بین سوئد از نظر تعداد پروژه‌های فولاد سبز نسبت به سایر کشورها پیشرفت بیشتری دارد، زیرا منابع انرژی تجدیدپذیر بیشتر در دسترس دارد. هزینه تامین انرژی در سوئد ممکن است حدود ۳۰ تا ۳۵ یورو در مگاوات ساعت باشد در حالی که در اتحادیه اروپا به‌طور متوسط حدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ یورو در مگاوات ساعت است با این حال، تولید فولاد کم کربن در حال حاضر با استفاده از قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی امکان‌پذیر است، اما این هنوز تنها حدود ۳۰ درصد از تولید حدود ۲ میلیارد تنی فولاد در سال در سراسر جهان را تشکیل می‌دهد. انتشار کربن در حال حاضر حدود ۳۰۰ کیلوگرم در تن برای فولاد ساخته شده از مسیر کوره‌های قوس الکتریکی است و ۳۵۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم در تن برای فولاد ساخته شده از مسیر آهن اسفنجی و ۲۰۰۰ کیلوگرم بر تن برای فولاد ساخته شده توسط مسیر کوره بلند است (بای سلامی، ۱۴۰۲). لذا می‌توان گفت که چالش‌های پیش روی این صنعت عبارت است از:

#### ۱) اقتصادی

- هزینه‌های بالا: یکی از بزرگترین چالش‌ها در انتقال به فناوری‌های سبز، هزینه‌های اولیه بالای آن‌ها است. نصب و راه‌اندازی تجهیزات جدید و تغییر زیرساخت‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان است (World Steel Association, 2022). انتقال به فناوری‌های سبز در صنعت فولاد معمولاً هزینه‌های بالایی را به همراه دارد که ممکن است برای برخی شرکت‌ها غیرقابل قبول باشد (ThyssenKrupp, 2018).

MIDREX و ArcelorMittal کارخانه‌های تولید فولاد مبتنی بر هیدروژن را در مقیاس تجاری به‌ویژه در اروپا راه‌اندازی کرده‌اند. نمایش آزمایشی در مقیاس آزمایشی از تولیدکنندگان مختلف و مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی وعده جایگزینی ۷۰ تا ۱۰۰ درصد سوخت فسیلی (یعنی گاز طبیعی) با هیدروژن تجدیدپذیر را نشان داد. در حال حاضر، فرآیند H<sub>2</sub>DRI-EAF می‌تواند انتشار CO<sub>2</sub> را در مقایسه با مسیرهای DRI-EAF و BF-BOF مبتنی بر گاز طبیعی ۸۰ تا ۹۰ درصد کاهش دهد. همچنین، هزینه عملیاتی نشان‌دهنده با استفاده از فرآیند H<sub>2</sub>DRI-EAF در محدوده ۶۰۰-۸۰۰ دلار در تن لیتر است. با این وجود، در دسترس بودن هیدروژن سبز مقرون به صرفه و سنگ معدن با عیار بالا شاید چالش برانگیزترین جنبه این فناوری باشد (Shahabuddin et al., 2023).

چالش‌هایی برای حفظ تعادل انرژی با استفاده از هیدروژن در فولادسازی وجود دارد. علاوه بر این، فرآیند فولادسازی به مقداری کربن در فولاد نیاز دارد، که یک چالش بالقوه برای استفاده از DRI کربن صفر بر پایه هیدروژن در EAF است. بنابراین، بیوجار کربن خنثی می‌تواند به‌عنوان منبع کربن بالقوه در EAF استفاده شود. از آنجایی که فرآیندهای DRI باند را از مواد خوراک حذف نمی‌کند، آنها در DRI باقی می‌مانند و تولید فولاد با کیفیت بالا را دشوار می‌کند. تولید DRI در حال حاضر به کنسانتره‌های غنی از آهن متکی است، اما در صورت توسعه این فناوری ممکن است در آینده در دسترس نباشند. چندین شرکت در حال بررسی یک مرحله ذوب بین هیدروژن DRI و فرآیندهای فولادسازی برای حذف gangue از DRI هستند. این مراحل فرآیند جدید هزینه را به کل فرآیند اضافه می‌کند. در حال حاضر تقریباً هیچ داده‌ای در مورد این واحدهای ذوب وجود ندارد (احتمالاً مبتنی بر فناوری قوس غوطه ور است). با این حال، نویسندگان انتظار دارند که همانطور که بسیاری از مردم پیش‌بینی می‌کنند، اگر تولید DRI هیدروژن رشد کند، این یک منطقه اصلی توسعه در دهه آینده خواهد بود (Cavaliere et al., 2022). فناوری‌های کوره شافت تجاری مانند MIDREX، HYL و HYBRIT در یکپارچه‌سازی هیدروژن پیشگام هستند، در حالی که تلاش‌های محدودی روی فناوری‌های ذوب مستقیم تجاری (COREX، FINEX، HISMELT، HISARNA) دیده می‌شود. براساس سطح آمادگی فناوری، توسعه صنعتی در مقیاس کامل برای BF-BOF مبتنی بر هیدروژن و EAF مبتنی بر DRI تا اواسط سال ۲۰۳۰ انتظار می‌رود. در عین حال، ممکن است چند دهه طول بکشد تا HPSR، AIE و MOE امیدوارکننده باشد. فناوری‌ها از نظر تجاری قابل دوام می‌شوند.

در زمینه فناوری فولاد سبب را محدود می‌کند ( Yildiz et al., 2023).

- مشکلات فنی: پیچیدگی و عدم تطابق فناوری‌های جدید با زیرساخت‌های موجود یکی از چالش‌های بزرگ در انتقال فناوری است (موسوی و کرمی، ۲۰۲۱). برخی از فناوری‌های سبب برای عملکرد بهینه خود، به منابع طبیعی خاصی نیاز دارند که ممکن است در برخی مناطق دسترسی به آن‌ها محدود باشد (Wang et al., 2021). پیچیدگی‌های فنی فناوری‌های جدید و نیاز به تخصص بالا می‌تواند باعث مشکلات در نگهداری و تعمیرات شود (Farooque et al., 2021).

### ۳) سیاست‌گذاری

- نبود سیاست‌های حمایتی: ناکافی بودن حمایت‌های دولتی و نبود تسهیلات و مشوق‌های کافی از موانع اساسی در انتقال فناوری‌های سبب است. فقدان قوانین و مقررات حمایتی و نبود برنامه‌های تشویقی، انگیزه‌ها برای انتقال فناوری فولاد سبب را کاهش می‌دهد (Bakht et al., 2022).
- عدم هماهنگی بین نهادها: سیاست‌های ناهماهنگ و ناکافی می‌تواند به‌عنوان یکی از موانع اصلی در انتقال فناوری‌های سبب عمل کند. نبود هماهنگی بین نهادهای دولتی و خصوصی و تضاد منافع می‌تواند به عدم تحقق برنامه‌های انتقال فناوری منجر (Farooque et al., 2021).
- بی‌ثباتی سیاست‌ها: ضعف در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی بلندمدت و تغییرات مکرر در قوانین و مقررات از موانع اصلی در انتقال فناوری سبب به شمار می‌رود. تغییرات مکرر در سیاست‌های دولتی و عدم استقرار سیاست‌های بلندمدت، برنامه‌های اجرایی در زمینه فناوری فولاد سبب را مختل می‌کند (Yildiz et al., 2023).

جدول ۱: جدول موانع شناسایی شده انتقال فناوری فولاد سبب

کد	زیر مولفه	مولفه
A1	هزینه‌های بالا	اقتصادی
A2	بازار محدود	
A3	عدم حمایت مالی	
B1	پایین بودن سطح فناوری	فناوری
B2	پایین بودن سطح تحقیق و توسعه	
B3	مشکلات فنی	
C1	نبود سیاست‌های حمایتی	سیاست‌گذاری
C2	عدم هماهنگی بین نهادها	
C3	بی‌ثباتی سیاست‌ها	

جدول ۲: جدول موانع شناسایی شده در انتقال فناوری

- انتقال به فناوری‌های سبب در صنعت فولاد معمولاً هزینه‌های بالایی را به همراه دارد که ممکن است برای برخی شرکت‌ها غیرقابل قبول باشد (European Union, 2021). یکی از اصلی‌ترین چالش‌های انتقال به فناوری‌های سبب در صنعت فولاد، هزینه‌های بالای نوسازی و به‌روزرسانی تجهیزات است. به دلیل پیچیدگی و حجم بالای فرآیندهای تولید، نیاز به سرمایه‌گذاری‌های زیادی برای به‌روزرسانی تجهیزات و فناوری‌ها وجود دارد (Smith et al., 2021). انتقال به فناوری‌های سبب معمولاً نیازمند سرمایه‌گذاری‌های بزرگی است که برخی از کارخانه‌ها قادر به تامین آن نیستند (Brown et al., 2023). تولید هیدروژن سبب هزینه بالایی دارد که بسیاری از کارخانه‌های فولاد قادر به تحمل آن نیستند (Johnson et al., 2024). هزینه‌های بالای تحقیق و توسعه و نصب فناوری‌های جدید می‌تواند موانعی جدی در مسیر انتقال فناوری فولاد سبب ایجاد کند (Bakht et al., 2022). تأسیس و راه‌اندازی فناوری‌های سبب نیازمند سرمایه‌گذاری‌های بزرگی است که بسیاری از شرکت‌های ایرانی توان مالی لازم برای آن را ندارند (Rahmani et al., 2022).
- بازار محدود: بازار محدود داخلی و نوسانات قیمت مواد اولیه می‌تواند مانع از تقاضای کافی برای محصولات سبب شود (Yildiz et al., 2023).
- عدم حمایت مالی: عدم دسترسی به منابع مالی کافی و نرخ بهره بالا، انتقال فناوری سبب را برای شرکت‌های فولاد دشوار می‌سازد (Eslami et al., 2021). نبود تسهیلات بانکی مناسب و عدم حمایت مالی از سوی دولت، مشکلات جدی برای تامین مالی پروژه‌های انتقال فناوری فولاد سبب بوجود می‌آورد (Farooque et al., 2021).

### ۴) فناوری

- پایین بودن سطح فناوری: فناوری‌های نوین نیازمند زیرساخت‌های پیشرفته و مناسب هستند که در بسیاری از کشورها هنوز فراهم نشده است (International Energy Agency, 2022). نیاز به فناوری‌های جدید و تجهیزات پیشرفته برای تولید هیدروژن سبب از چالش‌های اصلی است (Smith et al., 2021). نبود زیرساخت‌های مناسب و قدیمی بودن فناوری‌های موجود، مشکلات زیادی در پیاده‌سازی فناوری‌های جدید به وجود می‌آورد (Bakht et al., 2022).
- پایین بودن سطح تحقیق و توسعه: نبود مراکز تحقیقاتی پیشرفته و کمبود نیروی انسانی متخصص، تحقیق و توسعه

موضوع تحقیق	سال	پژوهشگر	توضیحات	زیر مولفه	مولفه
موانع اقتصادی	۲۰۰۲	ساد، سیکمیل و گرین وود	هزینه بالای تحقیق و توسعه	هزینه‌های بالا	هزینه‌های بالا
			هزینه بالای نصب و راه‌اندازی فناوری‌های جدید		
			هزینه‌های عملیاتی بالا		
	۲۰۰۲	بیچ، کوندت و شنک	بازار داخلی کوچک	بازار محدود	عدم حمایت مالی
			نوسانات قیمت مواد اولیه		
			نبود تقاضای کافی برای محصولات سبز		
	۲۰۰۳	گرینر و فرانزا	نیود تسهیلات بانکی مناسب	عدم حمایت مالی	پایین بودن سطح فناوری
			عدم حمایت مالی از سوی دولت		
			کمبود سرمایه‌گذاری خارجی		
	۲۰۰۴	هریس و هریس	نبود زیرساخت‌های مناسب	پایین بودن سطح فناوری	پایین بودن سطح تحقیق و توسعه
قدیمی بودن فناوری‌های موجود					
عدم دسترسی به فناوری‌های پیشرفته					
۲۰۰۹	لای و سای	نبود مراکز تحقیقاتی پیشرفته	ضعف در همکاری با دانشگاه‌ها و مراکز علمی	مشکلات فنی	
		کمبود نیروی انسانی متخصص			
		نیاز به تخصص و مهارت بالا			
۲۰۱۰	زاگز	مشکلات نگهداری و تعمیرات	فقدان قوانین و مقررات حمایتی	نیود سیاست‌های حمایتی	
		فقدان قوانین و مقررات حمایتی			
		نیود برنامه‌های تشویقی			
۲۰۱۰	لی، ونگ و لین	عدم وجود سیاست‌های مالیاتی مناسب	تضاد منافع بین نهادهای دولتی و خصوصی	عدم هماهنگی بین نهادها	
		نیود هماهنگی بین نهادهای دولتی و خصوصی			
		تضاد منافع بین نهادهای مختلف			
۲۰۱۱	عمر و همکاران	نیود یک مرجع واحد تصمیم‌گیر	تغییرات مکرر در سیاست‌های دولتی	بی‌ثباتی سیاست‌ها	
		تغییرات مکرر در سیاست‌های دولتی			
		عدم استقرار سیاست‌های بلندمدت			
۱۳۸۴	فکور ثقیه	عدم تعهد به برنامه‌های اجرایی	عدم تعهد به برنامه‌های اجرایی		
۱۳۸۷	امین ناصری و نامدار زنگنه	نیود یک مرجع واحد تصمیم‌گیر	تغییرات مکرر در سیاست‌های دولتی	بی‌ثباتی سیاست‌ها	
		تغییرات مکرر در سیاست‌های دولتی			
		عدم استقرار سیاست‌های بلندمدت			
۱۳۸۸	فارس‌سیجانی و تیموریان	عدم تعهد به برنامه‌های اجرایی	عدم تعهد به برنامه‌های اجرایی		

### ۳- پیشینه تحقیق

در جدول شماره ۳ خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه تأثیرات انتقال فناوری مشخص شده است.

#### جدول ۳: پیشینه تحقیق در زمینه انتقال فناوری

موضوع تحقیق	سال	پژوهشگر
ساختار، آموزش، قابلیت‌های شرکت، سیستم سیاسی، مدیریت، اهداف، تعیین فناوری مناسب، تحقیق و توسعه	۱۹۸۹	مادو
ارتباطات تعاملی، فاصله جغرافیایی و فرهنگی، دوپهلویی فناوری و انگیزش فردی	۱۹۹۱	گیسون و اسمایر
مشخصات انتقال دهنده، مشخصات واسطه انتقال، مشخصات موضوع انتقال، محیط تقاضا و مشخصات دریافت کننده انتقال	۲۰۰۰	بزمن

خبرگان و نحوه امتیازدهی آورده شده است:

#### ۴-۱- انتخاب خبرگان

تعداد خبره‌ها در روش BWM فازی با توجه به اینکه این روش خبره محور است، اصولاً بین ۵ تا ۱۰ نفر کفایت می‌کند. در این پژوهش تعداد خبرگان ۶ نفر در نظر گرفته شده است.

- تخصص و تجربه: خبرگانی که برای این پژوهش انتخاب شدند، دارای تخصص و تجربه کافی در حوزه‌های مرتبط با انتقال فناوری هستند. مشخصات خبرگان این پژوهش عبارتند از: اساتید دانشگاه رشته مدیریت صنعتی (دکتری مدیریت تکنولوژی)، مشاوران حوزه مدیریت تکنولوژی (Technical Manager شرکت مشاور)، مشاوران اقتصادی (دکتری اقتصاد)، مشاوران زیست محیطی (دکتری اقتصاد منابع طبیعی و محیط زیست)، مشاوران صنعت فولاد (دکتری مدیریت فناوری گرایش نوآوری)، استراتژیست (دکتری مدیریت استراتژیک).

- تنوع دیدگاه‌ها: برای افزایش دقت و جامعیت نتایج، باید از خبرگان با دیدگاه‌ها و تخصص‌های متنوع استفاده شود. خبرگان شامل افرادی از بخش‌های دولتی، خصوصی و دانشگاهی است.

- سابقه کار: خبرگان دارای سابقه کار مرتبط و پروژه‌های موفق در حوزه انتقال فناوری هستند و می‌توانند به درستی به چالش‌ها امتیاز دهند. لازم به ذکر است که سابقه کاری خبرگان بالای ۱۲ سال است.

جدول ۴: ویژگی‌های جمعیت شناختی

تحصیلات		جنسیت		سن	
تعداد	مقطع			تعداد	بازه
۰	دیپلم	۶	مذکر	۰	کمتر از ۳۰ سال
۰	لیسانس			۲	بین ۳۱ تا ۴۰ سال
۰	فوق لیسانس	۰	مونث	۴	بین ۴۱ تا ۵۰ سال
۶	دکتری			۰	بیشتر از ۵۰ سال

#### ۴-۲- روش دلفی فازی Fuzzy Delphi

این تکنیک روشی پیمایشی مبتنی بر نظرهای متخصصان است و سه خصوصیت اصلی دارد که عبارتند از: پاسخ بی‌نام تکرار و بازخورد کنترل شده 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 به‌منظور مدل کردن سیستم‌های دنیای واقعی به علت ابهام و عدم قطعیت موجود در قضاوت تصمیم‌گیرندگان ناکافی است (Kanan et al., 2014). در این راستا به‌منظور غلبه بر این مشکل نظریه مجموعه‌های فازی

پژوهشگر	سال	موضوع تحقیق
باقرزاده و مفتاحی	۱۳۹۰	تربیت نیروهای مدیریتی آگاه و توانمند، ایجاد مراکز و سازمان‌های مرتبط با جذب فناوری، ایجاد شبکه‌های اطلاع رسانی قوی و مناسب، ارتباط بین بخش‌های تولید و تحقیقاتی، وجود افراد و موسسات تحقیقاتی نوآور، ارتباط با کارخانه‌های سازنده و گرفتن اطلاعات لازم از آنها به عنوان عوامل موثر بر جذب فناوری
مهدیزاده و حسینی	۱۳۹۳	مدیریت موثر و کارا، همکاری‌های نزدیک بین مراکز تحقیقاتی و صنایع، در دسترس بودن بازار کافی، توجه به فعالیت‌های تحقیق و توسعه R&D، قابلیت و ظرفیت جذب کشورهای گیرنده فناوری، تمایل انتقال دهنده و گیرنده فناوری، سیاست توسعه صادرات، حمایت موثر دولت
الهی و قاسمی و اجارگاه	۱۳۹۵	اجزاء فناوری: زیرساخت‌های اصلی عملیاتی، فناوری محصول، فناوری فرآیند، پایه‌های علمی و مهارتی، سیستم‌ها و روبه‌ها، پشتیبانی اطلاعات، سطوح پشتیبانی و بهینه‌سازی رویکرد مدیریتی: چشم انداز، بیانیه، رویکرد علمی، فرهنگ سازمانی، کنترل خط مشی و هدف، حل مساله، نحوه عملکرد

#### ۴-۳ روش تحقیق

روش این تحقیق با توجه به اینکه به توصیف شاخص‌ها و مولفه‌های تحقیق در سطح جامعه مورد بررسی می‌پردازیم، در قالب روش توصیفی است. همچنین با توجه به استفاده از ابزار پرسشنامه در قالب مصاحبه با خبرگان می‌توان روش این تحقیق را پیمایشی دانست. همچنین نتایج این تحقیق در جامعه مورد بررسی قابلیت کاربرد دارد. بنابراین روش تحقیق به‌صورت کاربردی است. در نهایت، از نظر نوع شناسی می‌توان این تحقیق را از انواع تحقیقات آمیخته دانست. در این تحقیق در بخش نظری به‌منظور گردآوری اطلاعات مرتبط و تعاریف و مفاهیم مرتبط از مطالعات کتابخانه‌ای در قالب مقالات استفاده شده است. در بخش میدانی نیز به‌منظور گردآوری اطلاعات از ابزار پرسشنامه استفاده شده است. در بخش دلفی به‌منظور شناسایی شاخص‌ها و مولفه‌ها از پرسشنامه نیمه باز دلفی و مصاحبه به‌صورت ترکیبی استفاده شده است. در بخش رتبه‌بندی نیز از روش BWM فازی استفاده گردید. روش نمونه‌گیری در این تحقیق هدفمند است. امتیازدهی و وزن‌دهی چالش‌های انتقال فناوری براساس خبرگی معمولاً توسط گروهی از متخصصان و خبرگان در حوزه‌های مختلف مرتبط با فناوری، اقتصاد، حقوق، و مدیریت انجام می‌شود. این افراد با استفاده از دانش و تجربیات خود و براساس معیارهای شناسایی شده، به موانع امتیاز می‌دهند و وزن آن‌ها را تعیین می‌کنند. در زیر توضیحاتی در مورد فرآیند انتخاب

استفاده از روابط (۱ تا ۵) صورت می‌گیرد (حسینی دهشیری و همکاران، ۱۳۹۷).

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

$$\bar{r}_j = (a_j, b_j, c_j) \quad (2)$$

$$a_j = \min(a_{ij}) \quad (3)$$

$$b_j = \left( \prod_{i=1}^n b_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

$$c_j = \max(c_{ij}) \quad (5)$$

در روابط بالا اندیس به فرد خبره و اندیس  $i$  شاخص  $j$  تصمیم‌گیری اشاره دارد  $a_{ij}$  مقدار ارزش فازی اکتسابی هر شاخص توسط هر تصمیم‌گیرنده و  $J_j$  میانگین فازی ارزش هر شاخص است؛ همچنین میانگین مقادیر فازی محاسبه شده از طریق رابطه ۶ به روش مرکز ثقل فازی زدایی می‌شود (حسینی دهشیری و همکاران، ۱۳۹۷).

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

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

#### ۴-۳- روش بهترین - بدترین فازی

بر اساس روش بهترین بدترین که در سال ۲۰۱۵ توسط جعفر رضایی ارائه شده است، بهترین و بدترین شاخص توسط تصمیم‌گیرنده مشخص شده و مقایسه زوجی بین هر یک از این دو شاخص (بهترین و بدترین) و دیگر شاخص‌ها صورت می‌گیرد (حسینی دهشیری و همکاران، ۱۳۹۷). روش بهترین بدترین فازی یکی از روش‌های وزن دهی به معیارهاست. این روش نیز مانند سایر روش‌های فازی نسبت به روش‌های قطعی عدم اطمینان را بهتر نشان می‌دهد. روش بهترین بدترین فازی را در سال ۲۰۱۷ جو و ژو مطرح کردند. اعدادی که این پژوهشگران برای ارزیابی معیارها از نظر خبرگان در شرایط فازی مورد استفاده قرار دادند اعداد فازی مثلثی است (Guo & Zhao, 2017). جدول شماره ۶ متغیرهای زبانی مورد استفاده در روش بهترین بدترین فازی را نشان می‌دهد (محمدرضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

#### ۱) تعیین مجموع معیارهای تصمیم‌گیری

شناسایی مجموعه‌ای از شاخص‌ها و معیارهای تصمیم‌گیری جهت اولویت بندی موانع انتقال فناوری در صنعت فولاد سبز. مجموع معیارهای تصمیم‌گیری معیارهایی هستند که به ما در

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 مرتبط با شهر و شهرداری هوشمند سمنان استفاده می‌شود. این روش ترکیبی از روش دلفی و نظریه مجموعه‌های فازی است که توسط Ishikawa et al., 1993 ارائه شد. گام‌های روش دلفی فازی عبارتند از (Bouzon et al., 2016):

۱) **گام اول:** گام اول شناسایی عوامل و موانع انتقال فناوری در صنعت فولاد سبز با مرور جامع مبانی نظری پژوهش

۲) **گام دوم:** گام دوم جمع‌آوری نظرهای متخصصان تصمیم‌گیرنده در این گام، بعد از شناسایی عوامل و موانع انتقال فناوری در صنعت فولاد سبز، گروه تصمیم‌گیری متشکل از خبرگان مرتبط با موضوع پژوهش تشکیل شده و پرسشنامه‌ای به منظور تعیین مرتبط بودن شاخص‌های شناسایی شده با موضوع اصلی پژوهش برای آن‌ها ارسال می‌شود که در آن متغیرهای زبانی جدول شماره ۵ برای بیان اهمیت هر شاخص بکار می‌روند. 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  $L, U$  و  $M$  به ترتیب نمایانگر کوچک‌ترین، محتمل‌ترین و بزرگ‌ترین ارزش ممکن هستند.

جدول ۵: عبارت‌های کلامی برای تأیید شاخص‌های تصمیم‌گیری

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  $S$  صورت می‌پذیرد. مقدار آستانه از چند طریق محاسبه می‌شود؛ ولی استفاده از مقدار میانگین ارزش شاخص‌ها به عنوان مقدار آستانه یکی از قابل‌اتکاترین 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 شاخص‌ها با

$$A_W = \{a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}\}^T \quad (8)$$

نمایش داده می‌شود. در بردار ذکر شده  $a_{jW}$  ارجحیت شاخص (j) نسبت به بدترین شاخص (W) است واضح است که  $(1, 1, 1)$  است.  $a_{WW}$  است.

#### ۵) دستیابی به وزن بهینه

ایجاد مدل BWM فازی: در این گام می‌توان با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی زیر وزن عوامل را محاسبه نمود. البته در مقاله ژو و همکاران (۲۰۱۷) قید شده است که برای تعداد معیار بالای ۳ بهتر است این مدل به برنامه‌ریزی خطی تبدیل شود تا نتایج بهتر حاصل شود (محمدرضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

$$\min \xi \quad (9)$$

$$s. t. \begin{cases} \left| \frac{(l_B^w, m_B^w, u_B^w)}{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)} - (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj}) \right| \leq (k, k, k) \\ \left| \frac{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)}{(l_W^w, m_W^w, u_W^w)} - (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW}) \right| \leq (k, k, k) \\ \sum_{j=1}^n R(\tilde{w}_j) = 1 \\ l_j^w \leq m_j^w \leq u_j^w \\ l_j^w \geq 0 \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

#### ۶) تعیین نرخ سازگاری

مقایسه زمانی به صورت کامل سازگار است که رابطه ذیل برای تمامی‌ها برقرار باشد  $a_{BW} = a_{Bj} \times a_{jW}$ . که در آن  $a_{Bj}$ ،  $a_{jW}$  و  $a_{BW}$  به ترتیب اولویت‌های بهترین معیار نسبت به معیار  $j$ ، اولویت معیار  $j$  نسبت به بدترین معیار و اولویت بهترین معیار نسبت به بدترین معیار خواهند بود. از آنجاییکه  $a_{BW} = a_{Bj} \times a_{jW}$  می‌توان حداکثر مقدار  $\xi$  را بدست آورد. با استفاده از شاخص سازگاری جدول شماره ۷ و رابطه آن مقدار نرخ سازگاری را محاسبه کرد. این نرخ سازگاری در بازه  $[0, 1]$  قرار می‌گیرد و هر چه به صفر نزدیکتر باشد، مقایسات از سازگاری و ثبات بیشتری برخوردارند و هر چه به یک نزدیکتر باشد، مقایسات از سازگاری و ثبات کمتری برخوردارند (محمدرضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

جدول ۷: شاخص‌های سازگاری روش بهترین- بدترین فازی

شاخص سازگاری	متغیر زبانی	$a_{BW}$
۳	(۱, ۱, ۱)	اهمیت برابر (EI)
۳,۸	(۰,۶۷, ۱, ۱,۵)	اهمیت کم (WI)
۵,۲۹	(۱,۵, ۲, ۲,۵)	نسبتاً مهم (FI)
۶,۶۹	(۲,۵, ۳, ۳,۵)	خیلی مهم (VI)
۸,۰۴	(۳,۵, ۴, ۴,۵)	کاملاً مهم (AI)

ارزیابی گزینه‌ها کمک می‌کنند. این معیارها باید با کمک نظر خبرگان استخراج شود. فرض کنید معیارهای تصمیم‌گیری  $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  هستند.

#### ۲) تعیین بهترین معیار و بدترین معیار

تعیین بهترین (Best) و بدترین معیار (Worst) (بااهمیت‌ترین و کم اهمیت‌ترین معیار): بهترین می‌تواند مطلوب‌ترین یا مهم‌ترین معیار باشد. بهترین (مهم‌تر مطلوب تر) معیار را با  $C_B$  و بدترین (دارای کمترین اهمیت و کمترین مطلوبیت) شاخص را با  $C_W$  مشخص کرده و در این مرحله تصمیم‌گیرنده بهترین و بدترین شاخص را به طور کلی تعریف می‌کند، هیچ مقایسه‌ای در این مرحله صورت نمی‌گیرد. این گام را می‌توان با استفاده از نظرات خبرگان و یا روش دلفی فازی تعیین نمود.

#### ۳) مقایسه زوجی بهترین معیارها با سایر معیارها

در این گام باید با استفاده از متغیرهای زبانی موجود در جدول فوق بهترین معیارها با سایر معیارها مقایسه شوند. ارجحیت همه شاخص‌ها را نسبت به بهترین شاخص با جدول متغیرهای زبانی مشخص می‌گردند. بردار ارجحیت بهترین شاخص نسبت به دیگر شاخص‌ها به صورت

$$A_B = \{a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}\} \quad (10)$$

نمایش داده می‌شود. در بردار ذکر شده  $a_{Bj}$  نشان دهنده ارجحیت بهترین شاخص (B) نسبت به شاخص (j) است واضح است که  $a_{BB} = (1, 1, 1)$  است.

در این گام می‌توان از هر طیف فازی مقایسات زوجی را انجام داد؛ اما متداول‌ترین طیف برای روش بهترین بدترین فازی (FBWM) طیف فازی ۵ تایی زیر است. این طیف براساس عبارات کلامی اهمیت برابر (EI)، اهمیت ضعیف (WI)، نسبتاً مهم (FI)، خیلی مهم (VI) و کاملاً مهم (AI) است.

جدول ۶: متغیرهای زبانی بهترین - بدترین فازی

Linguistic Terms	Membership Function
Equally Importance (EI)	(1, 1, 1)
Weakly Important (WI)	(2/3, 1, 3/2)
Fairly Important (FI)	(3/2, 2, 5/2)
Very Important (VI)	(5/2, 1, 7/2)
Absolutely Important (AI)	(7/2, 1, 9/2)

#### ۴) مقایسه زوجی بدترین معیار با سایر معیارها

در این گام باید با استفاده از متغیرهای زبانی موجود در جدول فوق بدترین معیارها با سایر معیارها مقایسه شوند. ارجحیت همه شاخص‌ها نسبت به بدترین شاخص با جدول متغیرهای زبانی مشخص می‌گردند. بردار ارجحیت سایر شاخص‌ها نسبت به بدترین شاخص را به صورت

جدول ۹: میانگین نظر خبرگان در مرحله دوم

مقدار قطعی شده	میانگین فازی	معیارها
۰,۸۷	(۰,۷۷۵, ۰,۸۷۵, ۰,۹۵)	هزینه‌های بالا
۰,۶۴	(۰,۵۲۵, ۰,۶۴۵, ۰,۷)	بازار محدود
۰,۷۴	(۰,۶۲۵, ۰,۷۵, ۰,۷۷۵)	عدم حمایت مالی
۰,۷۹	(۰,۷, ۰,۸, ۰,۸۵)	سطح فناوری
۰,۶۷	(۰,۵۷۵, ۰,۶۷۵, ۰,۷۲۵)	تحقیق و توسعه
۰,۷۶	(۰,۶۲۵, ۰,۷۷۵, ۰,۸۵)	مشکلات فنی
۰,۹۳	(۰,۸۷۵, ۰,۹۲۵, ۰,۹۷۵)	سیاست‌های حمایتی
۰,۷۰	(۰,۶۵, ۰,۷, ۰,۷۵)	عدم هماهنگی نهادها
۰,۷۵	(۰,۶۷۵, ۰,۷۵, ۰,۸)	بی‌ثباتی سیاست‌ها

جدول ۱۰: فاصله میانگین نظر خبرگان

فاصله	مقدار قطعی شده		معیارها
	مرحله اول	مرحله دوم	
۰,۰۲۱	۰,۸۵	۰,۸۷	هزینه‌های بالا
۰,۰۰۴	۰,۶۳	۰,۶۴	بازار محدود
۰,۰۳۸	۰,۷۰	۰,۷۴	عدم حمایت مالی
۰,۰۴۲	۰,۷۵	۰,۷۹	سطح فناوری
۰,۰۲۵	۰,۶۴	۰,۶۷	تحقیق و توسعه
۰,۰۲۹	۰,۷۳	۰,۷۶	مشکلات فنی
۰,۰۲۵	۰,۹۰	۰,۹۳	سیاست‌های حمایتی
۰,۰۵۰	۰,۶۵	۰,۷۰	عدم هماهنگی نهادها
۰,۰۰۰	۰,۷۵	۰,۷۵	بی‌ثباتی سیاست‌ها

باتوجه به نظرات خبرگان و حد آستانه (۰/۲)، تمامی معیارها مورد تأییدند. پس از دستیابی به معیارها، باید وزن هر یک از معیارها ارزیابی شود تا مشخص شود، از بین معیارهای موجود کدامیک اهمیت بیشتری دارد. برای ارزیابی وزن معیارها از روش بهترین بدترین فازی کمک گرفته شد. بدین منظور، با توجه به نظر خبرگان بهترین و بدترین معیار در هر بعد عبارت است از:

جدول ۱۱: انتخاب مهمترین و کم اهمیت ترین موانع اقتصادی

مهمترین (Best)	کم اهمیت ترین (Worst)
A1 هزینه بالا	A2 بازار محدود

جدول ۱۲: انتخاب مهم ترین و کم اهمیت ترین موانع فناوری

مهمترین (Best)	کم اهمیت ترین (Worst)
B1 سطح فناوری	B2 تحقیق و توسعه

جدول ۱۳: انتخاب مهم ترین و کم اهمیت ترین موانع سیاست گذاری

مهمترین (Best)	کم اهمیت ترین (Worst)
C1 سیاست‌های حمایتی	C2 عدم هماهنگی بین نهادها

$$(۱۰) \quad \varepsilon^* = \frac{\text{نرخ سازگاری}}{\text{شاخص سازگاری}}$$

برای اولویت بندی کردن موانع انتقال فناوری فولاد سبز در ایران با استفاده از تکنیک FBWM و با استفاده از نرم افزار لینگو LINGO تعدادی گزینه با توجه به شاخص‌های مورد ارزیابی قرار گرفتند تا بهترین گزینه انتخاب گردد. بر همین اساس نتیجه زیر حاصل گردید.

### ۵- یافته‌ها

همانگونه که در بخش مقدمه و مواد و روش‌ها بیان شد، در این پژوهش برای انتخاب معیارهای بهره‌وری کارکنان دانشی از روش دلفی فازی کمک گرفته شد. بدین منظور پرسشنامه دلفی فازی، که شامل همه معیارهای مورد نظر بود، بین ۶ خبره توزیع شد. نظر خبرگان در جدول شماره ۸ بدست آمده است. پس از دستیابی به نظر خبرگان درباره هر یک از معیارها، متغیرهای زبانی باید با توجه به جدول شماره ۵ به اعداد فازی تبدیل و میانگین فازی نظر خبرگان محاسبه شود. همچنین نظر خبرگان باید با استفاده از رابطه ۶ فازی زدایی شود. پس از ارزیابی اول از نظرات خبرگان، بار دیگر پرسشنامه دلفی به خبرگان بازگردانده می‌شود تا نظر خود را درباره معیارها بیان کنند. در این گام نیز پرسشنامه دلفی فازی بین ۶ خبره توزیع شد. در این گام نیز، نظر خبرگان در مورد هر یک از معیارها جمع‌آوری شد و متغیرهای زبانی با توجه به جدول شماره ۲ به اعداد فازی تبدیل گردید و میانگین فازی نظر خبرگان محاسبه شد. جدول شماره ۹ نتایج بدست آمده از محاسبه میانگین نظر خبرگان در مرحله دوم را نشان می‌دهد.

جدول ۸: میانگین نظر خبرگان در مرحله اول

مقدار قطعی شده	میانگین فازی	معیارها
۰,۸۵	(۰,۷۵, ۰,۸۵, ۰,۹۵)	هزینه‌های بالا
۰,۶۳	(۰,۵, ۰,۶۵, ۰,۷)	بازار محدود
۰,۷۰	(۰,۶۵, ۰,۷, ۰,۷۵)	عدم حمایت مالی
۰,۷۵	(۰,۷, ۰,۷۵, ۰,۸)	سطح فناوری
۰,۶۴	(۰,۵۵, ۰,۶۵, ۰,۷)	تحقیق و توسعه
۰,۷۳	(۰,۶, ۰,۷۵, ۰,۸)	مشکلات فنی
۰,۹۰	(۰,۸۵, ۰,۹, ۰,۹۵)	سیاست‌های حمایتی
۰,۶۵	(۰,۶, ۰,۶۵, ۰,۷)	عدم هماهنگی نهادها
۰,۷۵	(۰,۶۷۵, ۰,۷۵, ۰,۸)	بی‌ثباتی سیاست‌ها

جدول ۲۱: مقایسه بدترین مانع بعد سیاست‌گذاری (C2)

Factor	Best Factor			Linguistic
C1	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI
C2	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	EI
C3	۱٫۵	۲٫۰	۲٫۵	FI

جدول ۱۴: مقایسه مهم‌ترین مانع (سیاست‌گذاری) با سایر موانع

Factor	Best Factor			Linguistic
C	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	EI
B	۱٫۵	۲٫۰	۲٫۵	FI
A	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI

جدول ۲۲: نتایج رتبه بندی موانع اصلی

Rank	Crisp	The Lingo Result			Factor
۲	۰٫۳۲۶	۰٫۳۴۲	۰٫۳۴۲	۰٫۲۴۷	A
۳	۰٫۲۵۰	۰٫۲۶۲	۰٫۲۶۲	۰٫۱۹۰	B
۱	۰٫۴۲۴	۰٫۴۴۵	۰٫۴۴۵	۰٫۳۱۴	C

جدول ۱۵: مقایسه بدترین مانع (فناوری) با سایر موانع

Factor	Best Factor			Linguistic
C	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI
B	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	EI
A	۱٫۵	۲٫۰	۲٫۵	FI

جدول ۲۳: نتایج رتبه بندی موانع

Rank	Crisp	The Lingo Result			Factor
1	۰٫۴۲۴	۰٫۴۴۵	۰٫۴۴۵	۰٫۳۱۴	A1
3	۰٫۲۵۰	۰٫۲۶۲	۰٫۲۶۲	۰٫۱۹۰	A2
2	۰٫۳۲۶	۰٫۳۴۲	۰٫۳۴۲	۰٫۲۴۷	A3
1	۰٫۳۳۶	۰٫۴۵۶	۰٫۳۱۲	۰٫۳۱۲	B1
3	۰٫۳۳۱	۰٫۴۴۲	۰٫۳۱۰	۰٫۳۰۲	B2
2	۰٫۳۳۳	۰٫۴۵۱	۰٫۳۱۰	۰٫۳۰۶	B3
1	۰٫۴۲۴	۰٫۴۴۵	۰٫۴۴۵	۰٫۳۱۴	C1
3	۰٫۲۵۰	۰٫۲۶۲	۰٫۲۶۲	۰٫۱۹۰	C2
2	۰٫۳۲۶	۰٫۳۴۲	۰٫۳۴۲	۰٫۲۴۷	C3

جدول ۱۶: مقایسه مهم‌ترین مانع بعد اقتصادی (A1)

Factor	Best Factor			Linguistic
A1	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	EI
A2	۱٫۵	۲٫۰	۲٫۵	FI
A3	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI

جدول ۱۷: مقایسه بدترین مانع بعد اقتصادی (A2)

Factor	Best Factor			Linguistic
A1	۱٫۵	۲٫۰	۲٫۵	FI
A2	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	EI
A3	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI

جدول ۲۴: نتایج رتبه بندی مولفه‌ها و زیر مولفه‌ها

Rank	Weight	Crisp	Factor	Crisp	Factor
2	۰٫۱۳۸	۰٫۴۲۴	A1		
9	۰٫۰۸۲	۰٫۲۵۰	A2	۰٫۳۲۶	A
4	۰٫۱۰۶	۰٫۳۲۶	A3		
6	۰٫۰۸۴	۰٫۳۳۶	B1		
8	۰٫۰۸۳	۰٫۳۳۱	B2	۰٫۲۵	B
7	۰٫۰۸۳	۰٫۳۳۳	B3		
1	۰٫۱۸۰	۰٫۴۲۴	C1		
5	۰٫۱۰۶	۰٫۲۵۰	C2	۰٫۴۲۴	C
3	۰٫۱۳۸	۰٫۳۲۶	C3		

جدول ۱۸: مقایسه مهم‌ترین مانع بعد فناوری (B1)

Factor	Best Factor			Linguistic
B1	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	EI
B2	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI
B3	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI

جدول ۱۹: مقایسه بدترین مانع بعد فناوری (B2)

Factor	Best Factor			Linguistic
B1	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI
B2	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	EI
B3	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI

جدول ۲۵: جدول محاسبات مربوط به سازگاری

Rate Cl	e	Cl	Equivalent number			Factor
۰٫۰۵۷	۰٫۳۰۲	۵٫۲۹	۲٫۵	۲٫۰	۱٫۵	اقتصادی
۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۷	۳٫۸۰	۱٫۵	۱٫۰	۰٫۷	فناوری
۰٫۰۷۹	۰٫۳۰۳	۳٫۸۰	۱٫۵	۱٫۰	۰٫۷	سیاست‌گذاری

جدول ۲۰: مقایسه مهم‌ترین مانع بعد سیاست‌گذاری (C1)

Factor	Best Factor			Linguistic
C1	۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰	EI
C2	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۵	WI
C3	۱٫۵	۲٫۰	۲٫۵	FI

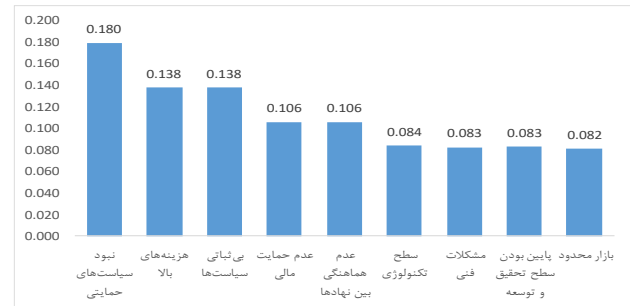
که در آن تصمیم‌های سرمایه‌گذاری اولیه گرفته می‌شود، تغییر دهد. انتخاب فناوری تولید، استفاده از زیست توده در فرآیند استحکام گلوله‌های سنگ آهن و در کربن‌سازی DRI تولید شده با احیای مبتنی بر هیدروژن است. صنعت آهن و فولاد با یک مبادله بین افزایش موردانتظار در قیمت زیست توده و بازده مورد انتظار سرمایه‌گذاری‌ها مواجه است. علاوه بر این، فناوری‌های تولید تحلیل‌شده نزدیک به تجاری‌سازی هستند، اما هنوز هم امکانات تنظیمی برای تأثیرگذاری بر استفاده از زیست توده دارند. این نشان می‌دهد که ممکن است اقدامات کاهش‌دهنده‌ای برای صنعت آهن و فولاد انجام شود.

هیدروژن سبز به‌عنوان یک راهکار پایدار و پاک برای تولید فولاد سبز مطرح شده است. با این حال، این فناوری همچنان با چالش‌ها و فرصت‌های خود همراه است که برای موفقیت در انتقال فناوری، لازم است که شرکت‌های فولادی راهبردهای مناسبی را در نظر بگیرند و به توانایی‌های خود ایمان بیشتری داشته باشند. انتقال فناوری‌های سبز در صنعت فولاد معمولاً هزینه‌های بالایی را به همراه دارد که ممکن است برای برخی شرکت‌ها غیرقابل قبول باشد. با توجه به چالش‌ها و فرصت‌های مطرح شده، انتقال فناوری‌های سبز در صنعت فولاد می‌تواند یک چالش مهم و همچنین فرصتی برای بهبود عملکرد و کارایی این صنعت باشد.

#### ۶-۱- راهکارها و پیشنهادها

- ۱) حمایت از تحقیق و توسعه (R&D): افزایش بودجه‌های تحقیق و توسعه در دانشگاه‌ها و شرکت‌ها و ایجاد مراکز تحقیق و توسعه مشترک بین صنعت و دانشگاه
- ۲) تقویت همکاری‌های بین‌المللی: برقراری همکاری‌های بین‌المللی با دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی پیشرفته و تسهیل فرآیند انتقال فناوری از طریق همکاری با شرکت‌های خارجی و جلب سرمایه‌گذاران بین‌المللی
- ۳) حمایت‌های دولتی و سیاست‌های مناسب: تدوین و اجرای سیاست‌های حمایتی از شرکت‌های نوپا و دانش‌بنیان و ارائه تسهیلات مالی و اعتباری به شرکت‌های فعال در زمینه انتقال فناوری.
- ۴) توسعه منابع انسانی و آموزش: ارتقاء برنامه‌های آموزشی در دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشی برای تربیت نیروی کار متخصص و ایجاد دوره‌های آموزشی تخصصی برای مدیران و کارکنان شرکت‌ها در زمینه فناوری‌های نوین.

همانطور که در جدول شماره ۲۵ مشخص است، نرخ سازگاری در سه مولفه اصلی اقتصادی، فناوری و سیاست‌گذاری نزدیک به صفر است.



نمودار ۱: رتبه بندی موانع انتقال فناوری فولاد سبز

#### ۶-۲- نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان می‌دهد، سیاست‌گذاری نامناسب با بیشترین وزن (۰,۱۸۰)، رتبه اول را در موانع شناسایی شده به خود اختصاص داده است. همچنین بازار محدود نیز با کمترین وزن (۰,۰۸۲)، رتبه آخر را به خود اختصاص داده است. شایان ذکر است که عوامل هزینه‌های بالا (۰,۱۸۰) بی ثباتی سیاست‌ها (۰,۱۳۸) و عدم حمایت‌های مالی (۰,۱۰۶) رتبه‌های دوم تا چهارم را به خود اختصاص داده اند.

به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین فعالیت‌های صنعتی که به انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، صنعت فولاد جهانی باید تغییر کند و تکامل یابد تا به اهداف توافق‌نامه پاریس و محدودیت‌های آخرین گزارش‌های IPCC برای جامعه ای با انتشار گازهای گلخانه‌ای صفر برسد.

فولادسازی با استفاده از هیدروژن سبز به احتمال زیاد تا حدود سال ۲۰۴۰ در مقیاس قابل توجهی رخ نخواهد داد. در کوتاه مدت انرژی تجدیدپذیر کافی برای تولید هیدروژن در دسترس نیست و هزینه‌های تولید هیدروژن بسیار بالا باقی خواهد ماند. به همین دلیل، برخی از فولادسازان اکنون به دنبال امکان نصب راکتورهای هسته‌ای کوچک مدولار برای کمک به کاهش بحران منابع انرژی پاک هستند. هزینه‌های بالا و حمل و نقل دشوار استفاده از هیدروژن در فولادسازی را به آینده موکول کرده و شاید تا سال ۲۰۴۰ با تحول این صنعت فولادسازی هیدروژنی در دسترس خواهد بود.

انتقال به سمت صنعت آهن و فولاد سبز، یا بدون فسیل، به مقادیر قابل توجهی از زیست توده یا هیدروژن، بسته به انتخاب‌های فناوری تولید نیاز دارد. متعاقباً انتظار می‌رود افزایش تقاضا بر قیمت‌های زیست توده تأثیر بگذارد و شرایط بازاری را

- ۵) تقویت زیرساخت‌های فناوری: افزایش سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناورانه از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر جهت تولید هیدروژن سبز.
- ۶) توسعه همکاری‌های صنعتی - دانشگاهی: ایجاد برنامه‌های مشترک بین دانشگاه‌ها و صنایع برای تحقیق و توسعه و افزایش تعاملات و همکاری‌های پژوهشی بین دانشگاه‌ها و شرکت‌های صنعتی.
- ۷) حمایت‌های مالی: جذب سرمایه‌گذار خارجی و حمایت‌های مالی و تسهیلات بانکی می‌تواند کارگشای انتقال فناوری‌های نوین و تسهیل رشد و توسعه فناورانه باشد.
- ۸) توسعه شبکه‌های ارتباطی و اطلاع‌رسانی: ایجاد و تقویت شبکه‌های ارتباطی بین شرکت‌های داخلی و خارجی و توسعه پلتفرم‌های آنلاین برای تبادل اطلاعات و تجربیات در زمینه فناوری‌های نوین.
- ۹) ارتقاء فرهنگ سازمانی و مدیریتی: ایجاد فرهنگ سازمانی مبتنی بر نوآوری و پذیرش تغییرات فناوری و آموزش مدیران و کارکنان درباره اهمیت و مزایای انتقال فناوری.
- ۱۰) تسهیل قوانین و مقررات: بازنگری و ساده‌سازی قوانین و مقررات مربوط به واردات و صادرات فناوری و حذف بوروکراسی‌های پیچیده و تسهیل روندهای اداری برای شرکت‌های فعال در حوزه فناوری.

### فهرست منابع

- احسانی فرد، علی اصغر و زیاری، کرامت اله. (۱۴۰۱). "تحلیل شاخص‌های هوشمندسازی شهر و شهرداری سمنان با تلفیق تکنیک بهترین-بدترین BWM و دلفی فازی (Fuzzy Delphi)". چشم‌انداز شهرهای آینده، ۳(۴)، ۱۰۹-۱۳۱. بازیابی شده از <https://civilica.com/doc/1645930>
- اسدی، رویا و حجازی، سیدرضا. (۱۳۹۴). "بررسی تأثیر فناوری در صنعت فولاد با استفاده از مدل UNIDO". در دومین کنفرانس بین‌المللی و آنلاین اقتصاد سبز، بابلسر. بازیابی شده از <https://civilica.com/doc/385319>
- الهی، سیدمجید و قاسمی واجارگاه، زینب. (۱۳۹۵). "بررسی تأثیر انتقال فناوری سبز و تحقیق و توسعه در ارتقای صنعت فولاد"، دومین کنفرانس بین‌المللی پارادایم‌های نوین مدیریت، نوآوری و کارآفرینی، تهران، <https://civilica.com/doc/556147>
- باقرزاده، م. و مفتاحی، ج. (۱۳۹۰). "بررسی عوامل مؤثر بر موفقیت انتقال تکنولوژی صنایع کمپرسور اسکرو در شرکت‌های ایرانی". فراسوی مدیریت، (۱۶).
- بای سلامی، مجتبی ابراهیم، (۱۴۰۲). "بررسی چالش‌های صنعت فولاد در حرکت به سمت فولاد سبز"، گزارش پترومتالز از شرکت فولاد سنگان.
- بکستر، م. (۱۳۹۱). "طراحی محصول". (م. میگون پوری و م. محمدی، مترجمان). انتشارات جهاد دانشگاهی.
- تابان شمال، مونا. (۱۴۰۲). "تولید فولاد مبتنی بر هیدروژن در مقیاس بزرگ زمان می‌خواهد"، مرکز خدمات فولاد ایران، پایگاه خبری فولاد ایران، <https://www.irsteel.com/fa/news/67717>
- حسینی دهشیری، س. ج.، آقایی، م. و تقوی فرد، م. ت. (۱۳۹۷). "شناسایی و اولویت‌بندی عوامل حیاتی کسب‌وکار الکترونیک براساس روش بهترین-بدترین". بازیابی شده از <https://civilica.com/doc/889977>
- دیوید، ف. ا. (۱۳۸۶). "مدیریت استراتژیک". (ع. پارسائیان و م. اعرابی، مترجمان). انتشارات دفتر پژوهش‌های فرهنگی.
- زهنجابچیان، م. و ناصری گیگلو، ع. (۱۳۸۹). "انتقال تکنولوژی". فصلنامه عصر مدیریت، (۱۴)، ۵-۲۲.
- عزیز طائمه، حسین، خادمی، سودابه، (۱۴۰۰). "هیدروژن و چالش صنعت فولاد"، می‌متالز: پایگاه خبری، تحلیلی و اطلاع‌رسانی معادن و فلزات خاورمیانه. <https://felezatkhavarmianeh.ir/fa/news/236610>
- فکور ثقیه، ا. م. (۱۳۸۴). "تأثیر فن‌آوری اطلاعات بر صنعت بانکداری". نشریه بررسی‌های بازرگانی، (۱۴)، ۸۶-۹۱.
- لطف‌الهی حقی، م. (۱۳۸۹). "تکنولوژی در سازمان". عصر مدیریت، (۱۴)۴، ۸۳-۸۹.
- محمدرضایی، مهدی و سرلک، محمد علی و فقیهی، ابوالحسن. (۱۴۰۰). "ارائه مدلی جهت ارزیابی بهره‌وری کارکنان دانشی با به‌کارگیری روش دلفی فازی و روش بهترین - بدترین فازی (مورد مطالعه: شرکت‌های دانش بنیان)"، <https://civilica.com/doc/۱۵۵۰۹۴۰>

- محمدنژاد، ن. و دل‌انگیزان، س. (۱۳۸۴). "ساختار، زیرساخت و ملزومات توسعه فناوری در ایران". نهمین کنگره سراسری همکاری‌های سه‌جانبه دولت، صنعت و دانشگاه برای توسعه ملی، ۴۴۲-۴۵۷.
- مرادی، امید. (۱۴۰۲). "هیدروژن سبز فرصتی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت پروفیل آهن"، گروه صنعتی صبا، صبا پروفیل، <https://sabaprofile.com>
- مه‌دیزاده، محمود و حسینی، لادن. (۱۳۹۳). "رتبه بندی عوامل موثر بر موفقیت انتقال فناوری با تاکید بر صنعت فولاد کشور"، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت در قرن ۲۱، تهران، <https://civilica.com/doc/311643>
- Anderson, J., & Davis, R. (2023). Overcoming resistance to technological change in the steel industry. *Journal of Organizational Change Management\**, 18(2), 87-102.
- Arandas, M., Chevrier, V. F., & Ravenscroft, C. (2017). Increasing carbon flexibility in MIDREX® DRI products – Adjustable to 4.5%, excellent temperature retention with MIDREX ACT™. Direct from Midrex Technology Article (2017). Midrex Technologies, Inc. <https://www.midrex.com/tech-article/increasing-carbon-flexibility-in-midrex-dri-products-adjustable-to-4-5-excellent-temperature-retention-with-midrex-acttm>.
- ArcelorMittal. (2023). Hydrogen-based steelmaking: Paving the way to green steel. ArcelorMittal. <https://corporate.arcelormittal.com/sustainability/innovation/hydrogen-based-steelmaking>
- Atsushi, M., Uemura, H., & Sakaguchi, T. (2010). MIDREX processes. *KOBELCO Technology Review*, (29), Natural Resources & Engineering Business, Iron Unit Division, Plant Engineering Department. Retrieved from [https://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr\\_29/029-06.pdf](https://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr_29/029-06.pdf)
- Bach, L., Cohendet, P., & Schenk, E. (2002). Technological Transfers from the European Space Programs: A Dynamic View and Comparison with Other R&D Projects. *Technology Transfer*, 27, 321-338.
- Bakht, M., Shahbaz, M., & Khan, S. (2022). Green technology adoption: Barriers and strategies in the context of developing countries. *Journal of Cleaner Production\**, 331, 129857.
- Bashmakov, I., de la Rue du Can, S., Garg, A., Khandekar, G., Mitra, P., Tanaka, K., & Üрге-Vorsatz, D. (2022). Industry. In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouridajie, R. van Diemen, D. McCollum, et al. (Eds.), *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 987–1110). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.013>.
- Black, J. K., & White, R. B. (2023). Challenges and opportunities of green hydrogen production for the steel industry. *Journal of Green Technology\**, 9(1), 45-57.
- 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*.
- Bozeman, Barry., (2000). Technology transfer and public policy: a review of research and theory. *Research Policy*, 29,627-655.
- Brown, A. C., et al. (2023). Technological challenges in transitioning to green steel production. *International Journal of Green Technology\**, 6(2), 87-102.
- Cavaliere, P., Perrone, A., Silvello, A., Stagnoli, P., Duarte, P. (2022). Integration of open slag bath furnace with direct reduction reactors for new-generation steelmaking. *Metals* 12 (2), 203.
- El-Tawil, A. A., Björkman, B., Lundgren, M., Robles, A., Sundqvist, L., & Ökvist, L. (2021). Influence of bio-coal properties on carbonization and bio-coke reactivity. *Metals*, 11(11), 1752. <https://doi.org/10.3390/met11111752>
- Eslami, M., Karami, F., & Mahdavi, K. (2021). Financial Barriers in the Adoption of Green Technologies in Iran. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 18(2), 305-320
- European Union. (2022). The EU in 2021: General report on the activities of the European Union. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/429a9704-8f1c-11ec-8c40-01aa75ed71a1>
- Fan, Z., & Friedmann, S. J. (2021). Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, 5(4), 829–862. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>
- Farooque, M., Zhang, A., & Liu, Y. (2021). Technological innovations for green manufacturing: Barriers and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110866.
- Feliciano-Bruzual, C. (2014). Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO<sub>2</sub> reduction potential and economic prospects. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(3), 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.003>.
- Gibson, David V. & Smilor, Raymond W., (1991). Key variables in technology transfer: A field-study based empirical analysis. *Engineering and Technology Management*, 8, 287-312.
- Green, B., et al. (2021). Enhancing competitiveness through green technology adoption in the steel industry. *Journal of Industrial Economics*, 15(3), 301-315.
- Green, S., & Brown, M. (2022). Green hydrogen as a sustainable energy source for the steel industry. *International Journal*

- of Sustainable Energy, 7(2), 87-102.
- Greiner, Michael A. & Franza, Richard M., (2003). Barriers and Bridges for Successful Environmental Technology Transfer, *Technology Transfer*, 28, 167–177.
- Guo, S., & Zhao, H. (2017). Fuzzy best–worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Knowledge-Based Systems*, 121, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.01.010>
- Haghighi, Mahamad, Divandari, Ali & Keimasi, Masoud., (2010). The impact of 3D e-readiness on ebanking development in Iran: A fuzzy AHP analysis. *Expert Systems with Applications*, 37, 4084–4093.
- Hanssen, S.V. Daioglou, V. Steinmann, Z.J.N. et al., The climate change mitigation potential of bioenergy with carbon capture and storage, *Nat. Clim. Change* 10 (2020) 1023–1029, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0885y>.
- Harris, Don. & Harris, Fiona J., (2004). Evaluating the transfer of technology between application domains: a critical evaluation of the human component in the system. *Technology in Society*, 26, 551–565.
- 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.
- International Energy Agency (IEA) & United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2011). *Technology roadmap*.
- International Energy Agency. (2022). *Achieving net zero heavy industry sectors in G7 members*. <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).
- Jafari, A., Rezai, B., & Farhadi, M. (2022). The Role of Workforce Training in Promoting Green Technology. *Renewable Energy*, 181, 523-533
- Johnson, M. K., et al. (2024). Challenges in transitioning to green technology in the steel industry. *International Journal of Green Technology*, 8(1), 45-57.
- Jones, A. B., & Wang, C. (2020). Green technology adoption in the steel industry: Challenges and opportunities. *Journal of Clean Production\**, 258, 120610.
- 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.
- Karami, F., Hosseini, R., & Rezai, B. (2020). Environmental Policy and Green Technology in Iran. *Environmental Science & Technology*, 54(15), 9256-9264.
- Kumar, T. K. S., Ahmed, H., Alatalo, J., & others. (2022). Carburization behavior of hydrogen-reduced DRI using synthetic bio-syngas mixtures as fossil-free carbon sources. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 8(4), 1546–1560. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00590-0>
- Lai, Wen-Hsiang & Tsai, Chien-Tzu., (2009). Fuzzy rule-based analysis of firm’s technology transfers in Taiwan’s machinery industry, *Expert Systems with applications*, 36, 12012-12022.
- Lee, Amy H.I., Wang, Wei-Ming & Lin, Tsai-Ying., (2010). An evaluation framework for technology transfer of new equipment in high technology industry. *Technological Forecasting & Social Change*, 77,135-150.
- Lopez, G., Farfan, J., & Breyer, C. (2022). Trends in the global steel industry: Evolutionary projections and defossilisation pathways through power-to-steel. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134182>.
- Lundmark, R., Wetterlund, E., & Olofsson, E. (2024). On the green transformation of the iron and steel industry: Market and competition aspects of hydrogen and biomass options. *Biomass and Bioenergy*, 182, 107100. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107100>
- Madu, C. N., (1989). Transferring technology to developing countries – critical factors for success. *Long Range Planning*, 22(4), 115 -124.
- Mahdavi, K., Najafi, S., & Hosseini, R. (2023). Infrastructure Challenges in the Implementation of Green Steel Production in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131-143
- Morris, A. E. (2001). Iron resources and direct iron production. In K. H. J. Buschow et al. (Eds.), *Encyclopedia of materials: Science and technology* (2nd ed., pp. 4302–4310). Elsevier.
- Mousa, E., Wang, C., Riesbeck, J., & Larsson, M. (2016). Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1247–1266. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.061>.
- Nucor Corporation. (n.d.). Sustainability report. Retrieved from <https://www.nucor.com/sustainability/sustainability-report/>
- Nwachukwu, C. M., Wang, C., & Wetterlund, E. (2021). Exploring the role of forest biomass in abating fossil CO<sub>2</sub> emissions in the iron and steel industry – The case of Sweden. *Applied Energy*, 288, 116558. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116558>.
- Rahmani, H., Eslami, M., & Jafari, A. (2022). Challenges and opportunities of green technology in Iran. *Journal of*

- Environmental Management, 289, 112–124.
- Red, S., et al. (2020). Environmental sustainability in the steel industry: Opportunities and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(4), 521-534.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *OMEGA*, 53\*, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>.
- Rezaei, J., Wang, J., & Tavasszy, L. (2015). Linking supplier development to supplier segmentation using Best Worst Method. *Expert Systems with Applications*, 42(23), 9152-9164. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.07.073>.
- SAAB, Swedish Steel AB, (2023). Sustainability annual report 2023. <https://www.ssab.com>.
- Saad, Mohammed., Cicmil, Svetlana. & Greenwood, Margaret., (2002). Technology transfer projects in developing countries—furthering the Project Management perspectives, *Project Management*, 20, 617 625.
- Shahabuddin, M., Brooks, G., & Rhamdhani, M. A. (2023). Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136391. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136391>.
- Smith, L., & Taylor, A. (2021). Advantages and disadvantages of green hydrogen technology in the steel industry. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(3), 301-315.
- Smith, P., & Wilson, L. (2022). Green technology adoption and productivity enhancement in the steel industry. *Journal of Industrial Economics*, 12(3), 301-315.
- Suopajärvi, H., Umeki, K., Mousa, E., et al. (2018). Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO2 steel production technologies. *Applied Energy*, 213, 384–407
- Szogs, A. (2010). Technology transfer and technological capability building in informal firms in Tanzania (Doctoral thesis). Centre for Innovation, Research and Competence in the Learning Economy (CIRCLE), Lund University, Sweden.
- Taylor, R., et al. (2021). Expanding market opportunities through green steel production. *Journal of Sustainable Business*, 5(2), 120-135.
- ThyssenKrupp AG. (2018). ThyssenKrupp steering green steel forward through innovative technology. Retrieved from <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/thyssenkrupp-steering-green-steel-forward-through-innovative-technology-17044.html>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2022). Greenhouse gas emissions statistics report 2022. <https://unfccc.int>
- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2011). Green industry: Policies for supporting green industry. UNIDO.
- Vogl, V., Åhman, M., & Nilsson, L. J. (2021). The making of green steel in the EU: A policy evaluation for the early commercialization phase. *Climate Policy*, 21(1), 78–92. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1803040>.
- Vogl, V., Olsson, O., & Nykvist, B. (2021). Phasing out the blast furnace to meet global climate targets. *Joule*, 5(10), 2646–2662. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.09.007>.
- Wang, P., Ryberg, M., Yang, Y., et al. (2021). Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. *Nature Communications*, 12, 2066. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6>
- White, E., & Black, F. (2022). Organizational culture change in the steel industry: Lessons from green technology adoption. *Journal of Organizational Change Management*, 10(1), 45–57.
- World Steel Association. (2022). Sustainable steel: Indicators 2022 and industry initiatives. <https://worldsteel.org/publications/bookshop/product/sustainable-steel-indicators-2022/>
- Yildiz, B., & Sidal, S. (2023). Policy frameworks for green technology transitions: Lessons from successful implementations. *Energy Policy*, 169, 113200.

#### Reference (In Persian)

- Asadi, R., & Hejazi, S. R. (2015). Examining the impact of technology on the steel industry using the UNIDO model. Paper presented at the 2nd International & Online Conference on Green Economy, Babolsar. Retrieved from <https://civilica.com/doc/385319>
- Aziz-Tā'emeh, H., & Khādami, S. (2021). Hydrogen and the challenges of the steel industry. *MiMetals: Middle East Mining & Metals News*. Retrieved from <https://felezatkhavarmianeh.ir/fa/news/236610>
- Bagherzadeh, M., & Meftāhi, J. (2011). Factors influencing the success of technology transfer in screw compressor industries in Iranian companies. *Farāsvā-ye Modiriyat [Beyond Management]*, (16).
- Baxter, M. (2012). *Product design* (M. Migun-Pouri & M. Mohammadi, Trans.). Tehran: Jihad University Press.
- Bāysalāmi, M. E. (2023). Challenges of the steel industry's transition to green steel: A PetroMetals report from Sangan Steel Company.
- David, F. R. (2007). *Strategic management* (A. Parsāyān & M. E'rābi, Trans.). Tehran: Cultural Research Office Press.
- Ehsanifard, A. A., & Ziari, K. A. (2022). Analyzing indicators for smart city and municipality of Semnan using a hybrid best–worst BWM and fuzzy Delphi technique. *Cheshmandāz-e Shahrhā-ye Āyandeh [Future Cities Outlook]*, 3(4), 109–131. Retrieved from <https://civilica.com/doc/1645930>

- Elahi, S. M., & Ghasemi-Vajargāh, Z. (2016). Investigating the impact of green technology transfer and R&D on improving the steel industry. In Proceedings of the 2nd International Conference on Modern Management, Innovation and Entrepreneurship, Tehran. Retrieved from <https://civilica.com/doc/556147>
- Fakhūr Soqīyeh, A. M. (2005). The impact of information technology on the banking industry. *Barrasi-hā-ye Bāzargāni [Commercial Review]*, (14), 86–91.
- 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>
- Lotfollāhi-Haqī, M. (2010). Technology in organizations. *Asr-e Modiriyat [Era of Management]*, 4(14), 83–89.
- Mahdīzādeh, M., & Ḥasnī, L. (2014). Ranking factors affecting successful technology transfer with emphasis on Iran's steel industry. Paper presented at the First International Conference on Management in the 21st Century, Tehran. Retrieved from <https://civilica.com/doc/311643>
- Mohammadnadjad, N., & Delangizān, S. (2005). Structure, infrastructure, and prerequisites for technology development in Iran. In Proceedings of the 9th National Congress on Tri-Sector Cooperation (Government–Industry–University) for National Development (pp. 442–457).
- Mohammad-Rezāci, 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>
- Morādi, O. (2023). Green hydrogen: An opportunity to reduce greenhouse-gas emissions in Iran's iron profil industry. Saba Profil Industrial Group. Retrieved from <https://sabaprofile.com>
- Tabān-Shomal, M. (2023). Hydrogen-based steel production at scale takes time. Steel Iran News Service, Iran Steel Service Center. Retrieved from <https://www.irsteel.com/fa/news/67717>
- Zehtāb-Chiyān, M. H., & Nāsīrī-Giglū, A. (2010). Technology transfer. *Asr-e Modiriyat [Era of Management Quarterly]*, (14), 5–22.

