



# جهان انرژی

دانشگاه مهندسی انرژی

تفسیر مفهومی

بررسی پتانسیل انرژی بادی فراساحلی برای تقویت امنیت انرژی

در کشورهای بیابانهای محدود زمین و سوخت: مطالعه موردی ژاپن

نویسندگان این شماره:

آریاکیا، مریم هاشمی نژاد، علی فریادس، و عباس گلکی

۲۴ اسفند ۱۴۰۳

Brent Crude Oil (\$/barrel)		WTI Crude Oil (\$/barrel)	
07/03/2025	14/03/2025	07/03/2025	14/03/2025
70.64	70.41	67.31	67.07
Henry Hub Natural Gas (\$/MMBtu)		Europe & Asia Natural Gas (\$/MMBtu)	
07/03/2025	14/03/2025	07/03/2025	14/03/2025
4.217	4.061	13.13 13.73	13.55 13.69

## پویای های بازار

ظریف مابین عدم اطمینان (Uncertainty) و وضع تعرفه و مالیات از سوی رئیس جمهور ایالات متحده و تبعات آن در آینده نزدیک است. علاوه بر بالا رفتن شاخص قیمت مصرف کننده و پس از آن تورم در داخل آمریکا، پیش‌بینی می‌شود که سرمایه‌گذاری در بخش‌های مختلف صنعتی بخصوص در بخش انرژی و به ویژه نفت و گاز تا مدت‌ها به تعویق افتد. کسی نمی‌داند که جنگ تعرفه‌ها تا کجا پیش خواهد رفت. فعلا که در برخی از موارد تا ۵۰ درصد اعمال تعرفه مابین اروپا و آمریکا داشته ایم. و پنجم توافق دو کشور ارمنستان و جمهوری آذربایجان بر سر متن پیش‌نویس پیمان صلح است که دوطرف اکنون می‌توانند گفتگوها را آغاز نمایند.

قیمت نفت «وست تگازس اینترمدیت» در بازار کاشینگ صبح امروز به قیمت ۶۷.۱۸ دلار هر بشکه به فروش رسید که نسبت به هفته گذشته که ۶۷.۰۴ بود اندکی کاهش یافته اما نسبت به روز گذشته یک درصد افزایش یافته است.

گاز طبیعی در هنری هاب در آمریکای شمالی به قیمت ۴.۱۰ دلار به ازای هر میلیون واحد حرارتی انگلیسی (بی.تی.یو.) فروخته شد که نسبت به هفته گذشته که ۴.۴۰ دلار بود، ۰.۲ درصد کاهش نشان می‌دهد. قیمت یک میلیون بی.تی.یو. از گاز طبیعی مایع شده در بندر روتردام در اروپا از ۱۳.۱۳ دلار بر هر میلیون بی.تی.یو. به ۱۳.۵۵ دلار رسید که نشان دهنده افزایش قیمت ۴۰ سنت بر هر واحد از گاز طبیعی است. گاز طبیعی مایع شده (ال.ان.جی.) در ساحل کره و ژاپن از قیمت ۱۳.۷۴ دلار فروخته شده در هفته گذشته به ۱۳.۶۹ دلار رسید که با مقایسه با هفته قبل حدود ۵ سنت کاهش یافته است.

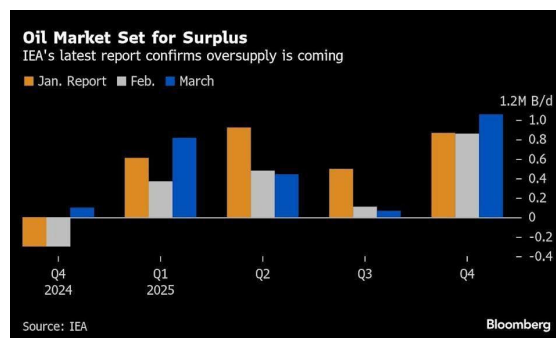
قیمت‌های انواع نفت خام و گاز طبیعی صبح امروز شنبه ۲۵ اسفند در حالی افزایش یافت که در کل هفت هفته گذشته با کاهش روبرو بوده است. بهای معاملات آتی نفت «برنت» از ۷۰.۳۶ دلار به ازای هر بشکه در روز در هفته گذشته به ۷۰.۵۸ دلار رسید که نسبت به روز قبل بیشتر از یک درصد افزایش داشته است. پنج رویداد هفته گذشته بر بازار نفت تاثیر عمده داشته است. ابتدا مذاکرات صلح اوکراین با میانجیگری ایالات متحده است که حالا به نظر می‌رسد با تحمیل شرایط خاص از جمله در اختیار داشتن استان‌های شرقی اوکراین توسط روسیه، امتیاز برداشت از منابع معدنی توسط آمریکا، و درخواست آمریکا از روسیه برای انسانی رفتار کردن با سربازان محاصره شده اوکراین در کورسک بازی به نفع روسیه در حال جلو رفتن است. دوم مذاکرات سه کشور روسیه، چین، و ایران برای مواجهه با کشورهای غربی و البته ژاپن در زمینه مسئله هسته‌ای ایران است که به نظر می‌رسد در کمیته نظارت بر برجام و شورای امنیت دو گروه کاملا متمایز در حال شکل گیری است. سه کشور آسیایی تاکید کردند که طرف‌های ذی‌ربط باید متعهد به توجه به دلایل ریشه‌ای وضعیت کنونی بوده و اعمال تحریم، فشار، و تهدید توسط به زور را ترک نمایند. سوم رفتار اوپک پلاس است. به نظر می‌رسد هم اکنون در بازار جهانی نفت مقدار عرضه بر تقاضا پیشی گرفته است. تصمیم اوپک پلاس مبنی بر دوباره به جریان انداختن عرضه ای که در گذشته آن را متوقف کرده بود، بازار را به سمت اغتشاش بیشتر از لحاظ تعادل و کاهش قیمت سوق خواهد داد. چهارم، موازنه

عربی متحده نخستین عملیات تأمین سوخت زیستی دریایی را با موفقیت انجام داده است. در این عملیات، سوخت B24 که شامل ۲۴٪ متیل استر اسید چرب (FAME) و نفت کوره با سولفور بسیار کم است، از ترمینال ذخیره‌سازی نفت ووپاک هورایزن فجیره به یک کشتی منتقل شد. این سوخت دارای گواهی‌نامه بین‌المللی پایداری و کربن (ISCC) است. فجیره، سومین بندر بزرگ سوخت کشتی در جهان میزبان این ترمینال است که به‌صورت مشترک بین رویال ووپاک، هورایزن ترمینالز، دولت فجیره، و گروه مستقل نفتی کویت اداره می‌شود. این اقدام در راستای تأمین سوخت‌های پاک‌تر و هم‌راستا با تلاش‌های صنعت حمل‌ونقل دریایی برای کاهش کربن صورت گرفته است.

➤ **ادامه تجارت نفت چین با ایران:** با وجود تحریم‌های جدید ایالات متحده، چین همچنان به تجارت نفت با ایران ادامه می‌دهد. تحریم‌هایی که در فوریه ۲۰۲۵ اعمال شدند، بیش از ۳۰ نفر و نفتکش‌های مرتبط با صادرات نفت ایران را هدف قرار دادند. هدف اصلی این تحریم‌ها کاهش صادرات نفت و تضعیف منابع مالی ایران بود. با این حال چین، بزرگ‌ترین خریدار نفت ایران همچنان به خرید نفت از این کشور ادامه می‌دهد. تحلیلگران بر این باورند که این تحریم‌ها اگرچه فرآیندهای تجاری را پیچیده‌تر کرده‌اند، اما نتوانسته‌اند به‌طور کامل تجارت نفت میان چین و ایران را متوقف کنند. چین برای ادامه تأمین نیازهای انرژی خود و جلوگیری از وابستگی به منابع انرژی دیگر، به همکاری با ایران ادامه می‌دهد، حتی اگر این امر به پیچیدگی‌هایی در فرآیندهای تجاری منجر شود.

### ➤ **مازاد عرضه ۶۰۰ هزار بشکه‌ای نفت در**

**سال ۲۰۲۵:** گزارش جدید آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) که در تاریخ ۱۳ مارس ۲۰۲۵ منتشر شد، پیش‌بینی کرده است که بازار نفت جهانی در سال ۲۰۲۵ با مازاد عرضه ۶۰۰ هزار بشکه در روز مواجه خواهد بود. این مازاد عرضه به دلیل افزایش تولید نفت از سوی کشورهای غیر اوپک، به‌ویژه ایالات متحده، و همچنین کاهش رشد تقاضا است. به‌طور خاص، تقاضای نفت در سال جاری به‌طور عمده تحت تأثیر کاهش رشد اقتصادی جهانی، به‌ویژه در چین، قرار دارد. IEA همچنین پیش‌بینی کرده است که تقاضای جهانی نفت در سال ۲۰۲۵ به ۱۰۳.۹ میلیون بشکه در روز خواهد رسید که نسبت به پیش‌بینی‌های قبلی کاهش داشته است. این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده روند کندتر در بازگشت تقاضای جهانی برای نفت است.



شکل ۱. بازار نفت در آستانه مازاد عرضه

### ➤ **نخستین عملیات تأمین سوخت**

**زیستی دریایی در فجیره:** در تاریخ ۱۱ مارس ۲۰۲۵، شرکت ووپاک، یکی از بزرگ‌ترین اپراتورهای مستقل ذخیره‌سازی انرژی در جهان، اعلام کرد که ترمینال مشترک آن در فجیره، امارات

این وضعیت نشان‌دهنده تقابل در سیاست‌های تحریمی آمریکا و نیازهای انرژی چین است.

### ➤ چالش‌های جدید بازار نفت در

**گردهمایی رهبران صنعت انرژی:** رهبران صنعت انرژی در نشست که این هفته توسط شرکت انرژی کمبریج (CERA) در شهر هیوستون برگزار می‌شود گرد هم می‌آیند تا درباره چالش‌های بازار نفت گفتگو کنند. این نشست در شرایطی برگزار می‌شود که قیمت نفت به زیر ۷۰ دلار در هر بشکه سقوط کرده و شرکت‌های بزرگ نفتی در حال کاهش مشاغل هستند. تصمیم سازمان کشورهای صادرکننده نفت (اوپک) و متحدانش برای ادامه افزایش تولید در ماه آوریل فشار بیشتری بر قیمت‌ها وارد کرده و نگرانی‌هایی درباره کاهش سوددهی شرکت‌های نفتی ایجاد کرده است. در همین حال، دونالد ترامپ با حمایت از سوخت‌های فسیلی، مقررات زیست‌محیطی را کاهش داده، ممنوعیت حفاری در آب‌های تحت مالکیت دولت را لغو کرده و مجوز صادرات گاز طبیعی را صادر کرده است. با این وجود، سیاست‌های او از جمله تهدید به قطع صادرات نفت ایران و ونزوئلا می‌تواند جریان‌های جهانی انرژی را مختل کند و هزینه واردات نفت برای پالایشگاه‌های آمریکایی را افزایش دهد. دانیل یرگین تحلیلگر ارشد انرژی، این وضعیت را «انقلابی در سیاست‌گذاری انرژی» می‌داند. این نشست با حضور ۸۰۰۰ نماینده، فرصتی برای بررسی این تحولات و آینده بازار انرژی خواهد بود.

### ➤ تأثیر اوپک و تحول صنعت خودرو بر

**نوسانات بازار نفت:** با نزدیک شدن به سه‌ماهه دوم ۲۰۲۵، اوپک‌پلاس در مورد ادامه کاهش تولید ۲.۲ میلیون بشکه در روز تصمیم‌گیری خواهد کرد. این در حالی است که رشد اقتصادی ضعیف چین،

افزایش تولید آمریکا و پیشرفت‌های فناوری در صنعت خودروسازی باعث کاهش تقاضای جهانی نفت شده‌اند. تجربه‌های گذشته نشان می‌دهد که افزایش تولید اوپک در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۲۰۱۰ باعث کاهش شدید قیمت نفت شد، اما مشخص نیست که این روند تکرار شود. در همین حال، شاخص نوسانات ضمنی نفت خام در بورس کالای شیکاگو در پایین‌ترین سطح تاریخی خود قرار دارد، اما احتمال افزایش نوسانات در آینده وجود دارد. با توجه به تغییرات صنعت خودرو، اوپک باید میان حفظ سهم بازار و ریسک کاهش قیمت تصمیم‌گیری کند که می‌تواند تأثیر مستقیمی بر بازار نفت داشته باشد.

### ➤ ناوگان سایه روسیه؛ راهکاری برای دور

**زدن تحریم‌های نفتی:** پس از اعمال سقف قیمتی نفت روسیه توسط گروه هفت کشور ثروتمند در دسامبر ۲۰۲۲، روسیه برای حفظ درآمدهای نفتی خود ناوگانی موسوم به ناوگان سایه ایجاد کرد. این ناوگان شامل نفتکش‌های قدیمی است که از طریق شرکت‌های صوری و تغییر پرچم، مالکیت واقعی آن‌ها پنهان شده است. روسیه برای دور زدن تحریم‌ها از انتقال کشتی‌به‌کشتی، خاموش کردن سیستم‌های شناسایی و مخلوط کردن نفت استفاده می‌کند. برآوردها نشان می‌دهد که روسیه از سال ۲۰۲۲ بیش از ۱۰ میلیارد دلار برای خرید این نفتکش‌ها هزینه کرده است. حدود ۶۰ درصد از این کشتی‌های تحریم‌شده قبلاً تحت مالکیت شرکت‌های اروپایی، به‌ویژه یونانی‌ها بوده‌اند. با وجود کارایی این روش، گفته می‌شود قدیمی بودن نفتکش‌ها و بیمه‌های نامعتبر آن‌ها خطرات زیست‌محیطی و مالی به همراه دارد. این وضعیت همچنان یکی از چالش‌های بزرگ در بازار جهانی

از ۶۶ دلار در هر بشکه رسید که نشان‌دهنده بهبود از پایین‌ترین قیمت شش‌ماهه اخیر است. این افزایش در پی اعلام آمادگی اوکراین برای پذیرش پیشنهاد آتش‌بس ۳۰ روزه از سوی آمریکا در جنگ با روسیه صورت گرفت که انتظارات برای از سرگیری جریان آزاد نفت روسیه را افزایش داد. با وجود نگرانی‌ها درباره چشم‌انداز اقتصادی و تأثیر آن بر قیمت نفت در هفته‌های اخیر، ساختار بازار همچنان در وضعیت پس‌گرایی (backwardation) باقی مانده است. این وضعیت نشان‌دهنده تعادل بین عرضه و تقاضا در کوتاه‌مدت است. جان بیرن، تحلیلگر شرکت استراتگاس سکیوریتیز، اظهار داشت که این امر نشان می‌دهد نگرانی‌های رشد اقتصادی برای نفت به شدت سایر دارایی‌ها نیست و ممکن است نفت از سایر دارایی‌های پرریسک جدا شود. همچنین، کریس رایت، وزیر انرژی آمریکا، اعلام کرد که دولت ترامپ آماده اجرای تحریم‌های آمریکا علیه تولید نفت ایران است که این موضوع نیز از قیمت نفت حمایت می‌کند. در مجموع، قیمت نفت از اوج خود در اواسط ژانویه حدود ۲۰٪ کاهش یافته است. دلیل این امر می‌تواند افزایش تعرفه‌ها و کاهش هزینه‌های دولتی توسط دولت ترامپ، و چشم‌انداز اقتصادی تیره‌تر باشد. عوامل نزولی دیگر شامل برنامه‌های اوپک‌پلاس برای افزایش عرضه و کاهش تقاضا در چین هستند.

### ➤ تنش‌های آمریکا و اروپا، احتمال تغییر

در تجارت جهانی گاز طبیعی مایع شده (الان‌جی): تنش‌های فزاینده میان ایالات متحده و اروپا ممکن است به تغییراتی در الگوهای تجارت الان‌جی منجر شود. پس از کاهش واردات گاز توسط اروپا از روسیه به دلیل جنگ اوکراین، آمریکا به بزرگ‌ترین تأمین‌کننده الان‌جی اروپا تبدیل شد و

انرژی محسوب می‌شود. هرچند این اقدام از کاهش شدید عرضه نفت روسیه در بازار جلوگیری می‌کند، اما ریسک‌های ژئوپلیتیکی و تحریم‌های احتمالی جدید علیه خریداران این نفت می‌تواند نااطمینانی در بازار را افزایش دهد.

### ➤ فرصت ۱۰ میلیارد دلاری در کشتیرانی سبز:

براساس نظرسنجی شرکت بوستون کانسالتینگ گروپ (BCG) روند حرکت به سمت کشتیرانی سبز در حال کند شدن است. این تحقیق نشان داد که در یک بازار فاقد مقررات جهانی، تمایل صاحبان محموله به پرداخت هزینه اضافی برای خدمات کشتیرانی سبز کاهش یافته است. این تحقیق بر اساس مصاحبه با ۱۲۵ تصمیم‌گیرنده در صنعت حمل‌ونقل انجام شد که در آن صاحبان محموله به سه دسته پیشروها، پیروها، و عقب‌مانده‌ها تقسیم شدند. پیشروها تمایل به پرداخت هزینه اضافی برای سوخت سبز دارند، اما پیروها و عقب‌مانده‌ها همچنان در این مسیر عقب‌مانده‌اند. با وجود کندی در پذیرش کشتیرانی سبز، هنوز پتانسیل زیادی برای گسترش این صنعت وجود دارد. چهار نفر از هر پنج صاحب محموله تمایل به پرداخت هزینه اضافی برای استفاده از سوخت سبز دارند. این روند می‌تواند به فرصتی ۱۰ میلیارد دلاری برای صنعت حمل‌ونقل تا سال ۲۰۳۰ تبدیل شود.

### عوامل فزاینده قیمت

#### ➤ افزایش قیمت نفت به دنبال نشانه‌های

فروش بیش از حد در بازار (oversold): در تاریخ ۱۱ مارس ۲۰۲۵، قیمت نفت پس از کاهش‌های اخیر افزایش یافت، زیرا شاخص‌های بازار نشان‌دهنده شرایط بیش‌فروش بودند. نفت وست تگزاس اینترمدییت با ۰.۳٪ افزایش به بیش

مذاکره با قطر و عمان برای تأمین گاز مورد نیاز خود است تا وابستگی به واردات از ایران را کاهش دهد. بنظر می رسد در کوتاه مدت این امر امکان پذیر نباشد.

### ➤ رشد هزینه‌های حقوق و دستمزد در

**صنعت نفت و گاز ایالات متحده:** در سال ۲۰۲۴، هزینه‌های حقوق و دستمزد در صنعت نفت و گاز ایالات متحده به ۱۶۸ میلیارد دلار رسید که نسبت به سال قبل افزایش نزدیک به ۵ میلیارد دلار را نشان می‌دهد. بالاترین میزان حقوق و دستمزد در این صنعت مربوط به بخش ایستگاه‌های توزیع بنزین زنجیره‌ای با ۲۶.۸ میلیارد دلار بود. پس از آن، فعالیت‌های پشتیبانی از عملیات نفت و گاز با ۲۳.۹ میلیارد دلار و استخراج نفت خام با ۱۹.۱ میلیارد دلار در رتبه‌های بعدی قرار داشت. همچنین، در سال ۲۰۲۴، تعداد کسب‌وکارهای نفت و گاز در ایالات متحده به ۱۶۵,۱۱۰ رسید. تولید ناخالص داخلی مستقیم نفت و گاز طبیعی بیش از ۱ تریلیون دلار بود و این صنعت بیش از ۸۶۵ میلیارد دلار کالا و خدمات از بیش از ۹۰۰ بخش مختلف اقتصادی خریداری کرد. در تگزاس، تولید ناخالص داخلی مستقیم صنعت نفت و گاز طبیعی ۳۶۶ میلیارد دلار بود که با در نظر گرفتن ضریب تکثیر ۲.۵، نشان‌دهنده حمایت این صنعت از ۳۸ درصد از اقتصاد تگزاس است. این آمار نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه صنعت نفت و گاز بر اقتصاد ایالات متحده و به‌ویژه ایالت تگزاس است.

### ➤ برنامه آمریکا برای مختل کردن صادرات نفت

**ایران با توقف کشتی‌ها در دریا:** دولت ترامپ در پی اعمال فشار حداکثری بر ایران، در نظر دارد کشتی‌های نفتکش ایرانی را در دریا متوقف و بازرسی کند تا صادرات نفت این کشور را مختل کند. این

در سال ۲۰۲۴ بیش از ۷۰٪ صادرات ال‌ان‌جی آمریکا به اروپا اختصاص یافت. با این حال، در صورت اعمال تعرفه‌های تجاری جدید از سوی دولت آمریکا، اروپا ممکن است به دنبال تنوع‌بخشی به منابع انرژی خود باشد تا از وابستگی به یک منبع خاص بکاهد. این امر می‌تواند به افزایش قراردادهای بلندمدت با کشورهایی مانند قطر، استرالیا، کشورهای آفریقایی و حتی روسیه، علی‌رغم تحریم‌های جاری، منجر شود. تغییر در منابع تأمین ال‌ان‌جی می‌تواند تأثیرات مهمی بر تقاضای حمل‌ونقل و مسیرهای تجاری داشته باشد و فرصت‌های جدیدی برای صنعت ال‌ان‌جی ایجاد کند. با وجود تلاش‌های اروپا برای تنوع‌بخشی به منابع انرژی، محدودیت‌های تولید در کشورهای آفریقایی و اختلالات در مسیرهای حمل‌ونقل، همچنان آمریکا را به عنوان تأمین‌کننده اصلی ال‌ان‌جی اروپا حفظ کرده است.

### ➤ تلاش عراق برای جایگزینی گاز ایران:

در پی تصمیم اخیر ایالات متحده برای لغو معافیت‌های تحریمی مربوط به واردات برق عراق از ایران، بغداد به دنبال جایگزین‌هایی برای تأمین گاز طبیعی خود است. عراق روزانه تا ۵۰ میلیون متر مکعب گاز از ایران وارد می‌کند که برای تولید حدود یک‌سوم از ۲۷۰۰۰ مگاوات برق روزانه این کشور استفاده می‌شود. برای مقابله با احتمال قطع واردات گاز از ایران، عراق قصد دارد یک پایانه شناور ال‌ان‌جی را از شرکت اماراتی Breeze Investment اجاره کند. این ترمینال که در بندر الزبیر مستقر خواهد شد، قادر به تأمین حداقل ۱۴ میلیون متر مکعب گاز در روز است و انتظار می‌رود تا اواسط سال جاری عملیاتی شود. گاز تأمین‌شده از طریق یک خط لوله ۴۵ کیلومتری به نزدیکی شهر بصره منتقل خواهد شد. همچنین، عراق در حال

اقدام با استفاده از ابتکار امنیت گسترش (Proliferation Security Initiative) که در سال ۲۰۰۳ برای جلوگیری از قاچاق سلاح‌های کشتار جمعی ایجاد شد، صورت می‌گیرد. هدف این است که با ایجاد تأخیر در تحویل نفت به پالایشگاه‌ها و افزایش ریسک برای تسهیل‌کنندگان این تجارت، صادرات نفت ایران را کاهش داده و به منابع مالی این کشور ضربه بزند. این برنامه می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر بازار جهانی نفت داشته باشد، زیرا ایران یکی از تولیدکنندگان بزرگ نفت است و هرگونه اختلال در صادرات آن می‌تواند بر عرضه و قیمت‌ها تأثیرگذار باشد.

➤ **مانور نظامی مشترک چین، ایران و روسیه در خلیج فارس:** در اوایل تا اواسط مارس ۲۰۲۵، نیروی دریایی چین، ایران و روسیه مانور مشترک نظامی با عنوان «کمر بند امنیتی-۲۰۲۵» را در نزدیکی بندر چابهار ایران برگزار کردند. این مانورها شامل اهداف دریایی، عملیات تصرف، کنترل خسارت و جست‌وجو و نجات مشترک بود. هدف از این تمرین‌ها تقویت اعتماد نظامی و همکاری عملیاتی بین کشورهای شرکت‌کننده بود. از آنجا که منطقه خلیج فارس از مسیرهای حیاتی حمل‌ونقل نفتی جهان است. هرگونه تغییر در وضعیت امنیتی این منطقه می‌تواند بر قیمت‌ها و جریان‌های عرضه نفت تأثیرگذار باشد.



## بررسی پتانسیل انرژی بادی فراساحلی برای تقویت امنیت انرژی در کشورهای با منابع محدود زمین و سوخت

گذار از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر مستلزم ایجاد تعادل میان مقرون‌به‌صرفه بودن، امنیت و پایداری است. بسیاری از کشورها به واردات انرژی وابسته‌اند که آن‌ها را در برابر نوسانات ژئوپلیتیکی و بازار آسیب‌پذیر می‌کند. برای کشورهایی که منابع انرژی داخلی محدودی دارند، این وابستگی می‌تواند منجر به کاهش امنیت انرژی، نوسانات قیمت، و بی‌ثباتی سیاستی شود. بنابراین، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر در داخل کشور برای افزایش استقلال انرژی و دستیابی به اهداف انتشار خالص صفر ضروری است. کمبود زمین چالش دیگری در استقرار گسترده انرژی‌های تجدیدپذیر مستقر در خشکی، مانند نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک و مزارع بادی، محسوب می‌شود. بسیاری از کشورهایی که با محدودیت زمین مواجه هستند، برای استفاده از زمین‌های موجود با توسعه شهری، کشاورزی و مناطق طبیعی در رقابت هستند، که این امر توسعه تجدیدپذیرهای مقیاس بزرگ را دشوار می‌کند. تراکم بالای جمعیت در بسیاری از کشورهای صنعتی این چالش را تشدید کرده و انرژی بادی فراساحلی را به یکی از معدود گزینه‌های باقی‌مانده برای تولید انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ تبدیل کرده است.

انرژی بادی فراساحلی فرصتی منحصربه‌فرد ارائه می‌دهد که از فضای دریایی کم‌استفاده‌شده بهره می‌برد، رقابت بر سر زمین را کاهش می‌دهد، و تولید انرژی پایدار را فراهم می‌کند. انرژی بادی فراساحلی به دلیل برخورداری از سرعت باد قوی‌تر و پایداری در دریا نسبت به مناطق خشکی، منبعی قابل‌اطمینان‌تر برای تولید انرژی محسوب می‌شود. علاوه بر این، مزارع بادی فراساحلی می‌توانند در فاصله بیشتری از ساحل مستقر شوند، که این امر به کاهش نگرانی‌های زیبایی‌شناختی و تعارضات کاربری زمین مرتبط با مزارع بادی مستقر در خشکی کمک می‌کند. ژاپن، به‌عنوان پنجمین تولیدکننده بزرگ انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان، به دلیل وابستگی شدید به سوخت‌های وارداتی (۸۹ درصد از تقاضای اولیه انرژی) با خطرات جدی امنیت انرژی مواجه است. محدودیت‌های جغرافیایی این کشور توانایی آن را در توسعه پروژه‌های تجدیدپذیر مقیاس بزرگ در خشکی محدود کرده و نیاز به استراتژی‌های جایگزین برای تنوع‌بخشی به انرژی را ضروری ساخته است. در حالی که به صورت تاریخی انرژی هسته‌ای نقشی در امنیت انرژی ژاپن ایفا کرده است، نگرانی‌های عمومی پس از حادثه نیروگاه هسته‌ای فوکوشیما در ۲۰۱۱، باعث افزایش حساسیت نسبت به گسترش این منبع انرژی شده است. در نتیجه، انرژی بادی فراساحلی به‌عنوان یکی از گزینه‌های اصلی برای مقابله با چالش‌های انرژی ژاپن مطرح شده است. مطالعات متعددی عمدتاً به ارزیابی پتانسیل انرژی بادی فراساحلی در ژاپن پرداخته‌اند، اما بسیاری از آن‌ها صرفاً بر جنبه‌های نظری و فنی تمرکز داشته و امکان‌سنجی اقتصادی و چالش‌های یکپارچه‌سازی را در نظر نگرفته‌اند. این گزارش با بهره‌گیری از مدل‌سازی پیشرفته سیستم‌های انرژی، به دنبال ارائه ارزیابی جامع‌تری است که امکان‌سنجی اقتصادی و تأثیر استقرار انرژی بادی فراساحلی

را بررسی کند. با تحلیل سناریوهای مختلف سیاست‌گذاری، این مطالعه ارزیابی می‌کند که انرژی بادی فراساحلی چگونه می‌تواند در بهبود امنیت انرژی، کاهش هزینه‌ها و کربن‌زدایی شبکه برق نقش ایفا کند.

### مروری بر روش شناسی

این مطالعه از ارزیابی منابع مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدل‌سازی سیستم قدرت، و تحلیل سناریوهای سیاستی برای ارزیابی پتانسیل انرژی بادی فراساحلی بهره می‌برد. روش‌های به کار گرفته شده شامل موارد زیر است:

### ارزیابی منابع انرژی بادی فراساحلی

این مطالعه از داده‌های جغرافیایی و شبیه‌سازی‌های باد برای شناسایی مکان‌های مناسب انرژی بادی فراساحلی استفاده می‌کند. معیارهای حذف مانند محدودیت‌های زیست‌محیطی، مناطق ماهیگیری و نواحی نظامی در نظر گرفته شده‌اند تا مکان‌های قابل قبول برای استقرار انرژی بادی فراساحلی تعیین شوند.

### مدل‌سازی سیستم قدرت

برای یکپارچه‌سازی بهینه انرژی بادی فراساحلی در سیستم برق ژاپن، از مدل SWITCH-Japan استفاده می‌شود. این مدل متن‌باز برای برنامه‌ریزی ظرفیت توسعه به کار گرفته شده و هزینه‌های سیستم در عین در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه، کاهش انتشار دی‌اکسید کربن به حداقل می‌رساند.

### تحلیل سناریوهای سیاستی

چهار سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرند که هر سناریو از نظر هزینه، نرخ خودکفایی انرژی، و تغییرات کاربری زمین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

- سناریوی *روال معمول*: استقرار محدود انرژی بادی فراساحلی با وابستگی زیاد به واردات هیدروژن و زیست‌توده.
- سناریوی *کمترین هزینه*: توسعه حداکثری انرژی‌های تجدیدپذیر برای دستیابی به امنیت انرژی با کمترین هزینه.
- سناریوی *RE100*: حذف تدریجی انرژی هسته‌ای و اتکاء کامل به انرژی‌های تجدیدپذیر.
- سناریوی *منابع محدود در خشکی*: کاهش استفاده از زمین برای انرژی خورشیدی و بادی مستقر در خشکی و اولویت دادن به انرژی بادی فراساحلی.

این مطالعه پتانسیل قابل توجه انرژی بادی فراساحلی را در تقویت امنیت انرژی ژاپن، کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری زیست‌محیطی برجسته می‌کند. با ظرفیت تولید کل ۲۲۲۰ گیگاوات و ضریب ظرفیت ۰/۳۵ یا بیشتر،

منابع انرژی بادی فراساحلی ژاپن از کل نیاز مصرف انرژی کشور فراتر می‌روند. بهترین سایت‌های انرژی بادی فراساحلی در شمال و شرق ژاپن، از جمله هوکایدو، توهوگو و توکیو قرار دارند. با اتخاذ انرژی بادی فراساحلی، نرخ خودکفایی انرژی (SSR) ژاپن در سناریوهای مختلف سیاستی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد:

- سناریوی روال معمول منجر به SSR نزدیک به ۵۶ درصد می‌شود.
- سناریوی کمترین هزینه آن را به ۸۹ درصد افزایش داده و هزینه‌های سیستم را ۴۰ درصد کاهش می‌دهد.
- سناریوی RE100، که شامل حذف تدریجی انرژی هسته‌ای است، بالاترین SSR یعنی ۹۸ درصد را به دست می‌آورد، اما هزینه کل را ۲/۳ درصد افزایش می‌دهد.
- سناریوی منابع محدود در خشکی SSR را ۸۹ درصد افزایش داده و در عین حال مصرف زمین را به حداقل می‌رساند.

### نقش انرژی بادی فراساحلی در تولید هیدروژن

این مطالعه همچنین به نقش بالقوه انرژی بادی فراساحلی در تولید هیدروژن داخلی تأکید دارد. ژاپن تنها با استفاده از ۱۰ درصد ظرفیت انرژی بادی فراساحلی خود می‌تواند هیدروژن کافی برای کاهش وابستگی به واردات تولید کند. مقایسه هزینه‌ها نشان می‌دهد که استقرار انرژی بادی فراساحلی در نزدیکی مراکز بارگذاری اصلی مانند توکیو و منطقه چووبو هزینه‌های گذار را کاهش می‌دهد، درحالی‌که فناوری بادی شناور امکان توسعه در آب‌های عمیق‌تر را فراهم می‌کند.

### چالش‌های زیرساختی و سیاست‌گذاری

با این حال، استقرار در مقیاس بزرگ انرژی بادی فراساحلی مستلزم گسترش چشمگیر زیرساخت‌ها، از جمله:

- توسعه بنادر برای پشتیبانی از تجهیزات بادی فراساحلی
- شبکه‌های انتقال برق برای یکپارچه‌سازی با سیستم قدرت
- راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی فصلی مانند هیدروژن و باتری‌ها
- حل چالش‌های مقرراتی و پذیرش عمومی برای اطمینان از ادغام موفق انرژی بادی فراساحلی در چشم‌انداز انرژی ژاپن.

### نکات کلیدی و پیامدهای سیاستی

- تسریع در توسعه انرژی بادی فراساحلی هزینه‌های برق را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و استقلال انرژی را بهبود می‌بخشد.
- تولید هیدروژن از انرژی بادی فراساحلی جایگزینی عملی برای واردات هیدروژن در مسافت‌های طولانی است.
- گسترش زیرساخت‌ها (شامل بنادر، خطوط انتقال و ذخیره‌سازی انرژی) برای ادغام انرژی بادی فراساحلی ضروری است.
- پذیرش عمومی و تنظیمات مقرراتی چالشی اساسی در توسعه انرژی بادی فراساحلی محسوب می‌شود.
- تحقیقات آینده باید بر بهینه‌سازی انرژی بادی فراساحلی برای کربن‌زدایی کل اقتصاد، از جمله بخش‌های صنعتی و حمل‌ونقل، تمرکز کند.
- انرژی بادی فراساحلی یک فرصت استراتژیک برای کشورهایی است که با چالش‌های امنیت انرژی به دلیل محدودیت زمین و سوخت مواجه هستند. این مطالعه نشان می‌دهد که ادغام انرژی بادی فراساحلی می‌تواند هزینه‌های انرژی را کاهش داده، خودکفایی را افزایش داده و از تولید هیدروژن حمایت کند. با این حال، استقرار در مقیاس بزرگ انرژی بادی فراساحلی نیازمند چارچوب‌های سیاستی قوی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها و پذیرش عمومی است. با حرکت ژاپن و سایر کشورها به سوی آینده‌ای بدون کربن، انرژی بادی فراساحلی به‌عنوان یک فناوری کلیدی در پایداری بلندمدت انرژی نقش‌آفرینی خواهد کرد.