توسعه مدل منشور پایداری انرژی: چارچوبی برای مدیریت یکپارچه زیست‌بوم انرژی

مصطفی ابراهیمی مقدم[1]، محمدمهدی نجفی[2*]، افشین امامی‌خواه[3]

۱. رئیس امور پژوهش و فناوری، شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، تهران، ایران

۲. کارشناس مهندسی انرژی و کربن، شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، تهران، ایران

۳. کارشناس امور پژوهش و فناوری، شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: m.m.najafi2024@gmail.com

مقاله‌ی مروری

صفحه ۵۷ - ۶۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

چکیده

منابع انرژی مهم‌ترین عوامل و عناصر توسعه پایدار هستند. کشور ایران علاوه بر برخورداری از مجموع ذخایر غنی سوخت‌های فسیلی، ظرفیت فراوانی برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دارد، اما در حوزه انرژی (برق، گاز و فراورده) دچار ناترازی شده به‌طوری که در فصل تابستان با کمبود برق و در پاییز و زمستان با کمبود گاز مواجه شده و اخیراً نیز وضعیت بنزین از ناترازی به کسری تبدیل شده است. در این مقاله سعی شده است تا با نگاهی جامع‌نگر در زیست‌بوم انرژی کشور، مدلی برای توسعه ساختار مناسب به‌منظور رفع ناترازی در ایران ارائه شود. مدل توسعه داده شده در این پژوهش برای رفع ناترازی، دارای چهار بخش اساسی حکمرانی انرژی، عرضه، تقاضا و تنوع‌گرایی بوده که به‌صورت وجه‌های یک منشور باهم مرتبط هستند. لازم به ذکر است قاعده این منشور که تجمیع‌کننده و منسجم‌کننده آن به شمار می‌رود، در اصل بخش حکمرانی انرژی است که مهم‌ترین بخش خواهد بود. رویکرد یکپارچه‌نگری در این مدل، انسجام‌دهنده ساختار سیاست‌گذار، تنظیم‌گری و تنظیم روابط میان بخش‌های مختلف است تا به ابعاد درگیر در ناترازی انرژی کشور بپردازد.

کلیدواژه‌ها: زیست‌بوم انرژی، منشور پایداری انرژی، ناترازی، حکمرانی انرژی

۱. مقدمه

ناترازی انرژی یکی از چالش‌های اساسی در بخش‌های انرژی ایران محسوب می‌شود که می‌تواند تأثیرات منفی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به همراه داشته باشد. برخورداری از منابع انرژی کافی پس از نیروی انسانی مهم‌ترین عامل در توسعه اقتصادی جوامع صنعتی است، زیرا انرژی، لازمه اساسی تداوم توسعه اقتصادی، رفاه اجتماعی، ارتقای کیفیت زندگی و امنیت اجتماعی است. در سال‌های اخیر بیشترین انرژی مصرفی در ایران از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین شده است. با توجه به افزایش مصرف انرژی، توسعه تک‌بعدی بر مبنای گاز و همچنین وابستگی شدید برق تولیدی به گاز و فرآورده، کشور ایران را با کاهش منابع فسیلی مواجه نموده است به‌طوری که به‌واسطه وابستگی ۹۵ درصدی برق تولیدی به گاز و فرآورده، با چالش ناترازی انرژی مواجه شده است. بر اساس ترازنامه ۱۴۰۰، ایران

کمتـر از ۰/۵ درصـد انرژی عرضه شـده در کشـور را از منابع تجدیدپذیـر تأمین می‌کند که این عدد در سـطح جهانی ۱۵ درصد در سال مشابه اسـت[۱]. عدم توسعه متوازن حامل‌ها، در کنار نبود سـاختار یکپارچه‌نگر در حـوزه عرضه و تقاضای انرژی در ایران، از مهم‌ترین دلایل ایجاد ناترازی انرژی است.

در حوزه انرژی الزامات، قوانین و برنامه‌های اجرایی زیادی در کشـور ارائه شـده اسـت که می‌توان به سیاسـت‌های کلی نظام در حوزه انرژی، سیاسـت‌های کلی اصلاح الگوی مصرف، قانون اصلاح الگوی مصرف، قانون رفع موانع تولید رقابت‌پذیر، برنامه‌های توسـعه، سـند ملی راهبرد انرژی و غیره اشاره کرد کـه حـاوی بخش‌های منحصربه‌فردی در توسـعه زیسـت بوم انرژی هسـتند، اما متأسفانه آیین‌نامه‌هایی باقابلیت اجرا برای آن‌ها تدوین نشـده اسـت. یکی از مهم‌تریـن موانع موجود در جهت اجـرای این قوانین نبود سـاختار منسـجم یکپارچه‌نگر اسـت. تاکنون راهکارها و برنامه‌های توسـعه زیادی برای رفع ناترازی انرژی در کشـور ارائه شـده که بیشـتر آن‌ها مشـتمل بر توسـعه بخش‌هـای تولید در کنـار مدیریت و بهینه‌سـازی بخش‌هـای مصرف انرژی بوده‌اند. گروهی از اندیشـمندان نیز توسـعه انرژی‌هـای تجدیدپذیـر را بهتریـن راهکار بـرای رفع ناتـرازی می‌داننـد، در صورتی‌که ایـن روند تاکنـون در ایران توفیق چندانی نداشته است.

در مطالعـه Gozgor و Paramati در سـال ۲۰۲۲ بـه بررسی اثر تنوع انرژی بر توسـعه اقتصادی کشـورهای مختلف پرداخته شده اسـت[۲]. یافته‌ها نشان می‌دهد که اقتصادهای بـزرگ با افزایش تنوع انرژی بلندمدت، رشـد اقتصادی مثبتی را درک می‌کننـد. بـا این حال، برخی کشـورها بـه دلیل تنوع انرژی در کوتاه‌مدت، رشـد اقتصـادی منفی را تجربه می‌کنند. همچنیـن در تحقیقـات Drago و Gatto ایجـاد سیاسـت‌ها، قوانین و ساختارهای نهادی برای حفظ انرژی‌های تجدیدپذیر پراهمیـت تلـقی شـده اسـت، زیـرا کشـورهایی که بـه دنبال تحریک سـرمایه‌گذاری‌ها و تقویت بخش انرژی خود هسـتند، از همیـن مقررات برای نیـل به اهداف خود بهـره می‌برند[۳]. عظیم‌زاده آرانی و همکاران تدریجی بودن روند تغییر سـاختار حکمـرانی انـرژی و اجتناب از اقدامـات کوتاه مـدت را عاملی مهم در اصلاح سـاختار انرژی کشـور می‌دانند[۴]. تنوع تأمین انرژی با تفکری اسـتراتژیک، منجر به افزایش انعطاف‌پذیری و سـازگاری برای کشورهایی می‌شـود که با چالش انرژی مواجه هستند[۵]؛ بنابراین، افزایش مصرف انرژی در جهان، تنوع در منابـع انرژی و اهداف ضروری زیسـت‌محیطی، تعادل عرضه و تقاضای انرژی را به یک چالش بزرگ تبدیل کرده است[۶].

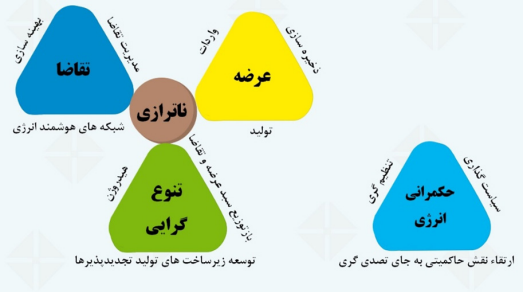
در سال‌های اخیر اصطلاحاتی همانند «انرژی هوشمند» و «سیستم‌های انرژی هوشمند» مطرح شده است تا راهگشای تحولات مقرون به صرفه، پایدار و دست‌یافتنی در آینده باشد، ولی ابتدا نیاز به زیرسـاخت‌های مناسب در حوزه انرژی است تـا پـس از آن بهره‌منـدی منسـجم و بهینـه‌ای از راه‌حل‌هـا، مدل‌ها و سـاختارها در مسیر دسـتیابی به نوآوری‌ها به وجود آید. در این مقاله با مطالعه اسـناد بالادستی، نظریات نخبگان در حوزه‌هـای مختلـف و مـرور پژوهش‌هـای مرتبـط با حوزه انرژی تلاش بر آن شـده تـا مدلی جامع برای یکپارچه‌سـازی سـاختارهای زیسـت‌بوم انـرژی ایـران به‌منظور رفـع ناترازی توسـعه داده شـود. در ایـن مـدل، سـاختار سیاسـت‌گذار، تنظیم‌گـری و تنظیم روابط میان بخش‌های مختلف به‌منظور مدیریـت یکپارچه، به‌عنـوان قاعـده و نظم‌دهنده زیسـت‌بوم انـرژی در کشـور در نظر گرفته شـده تا با یک دیـد کل‌نگر و یکپارچه‌نگـر، به مدیریت بخش‌های مرتبـط باعرضه، تقاضا و تنوع‌گـرایی بپردازد. در اصل نوآوری ایـن مدل به نگاه فراگیر در همه ابعاد درگیر با ناترازی انرژی برمی‌گردد.

۲. روش کار

مطابـق آمارهـای موجود، مقـدار کمبـود برق در تابسـتان و سـاعات پیک مصـرف تقریباً ۱۸ درصد ظرفیـت برق تولیدی است؛ این در حالی است که مقدار ناترازی گاز در زمستان تقریباً ۳۶ درصد از گاز تولیدی کشـور اسـت[۷]؛ بنابراین، ناترازی گاز نسـبت به ظرفیت تولیدی در وضعیت وخیم‌تری قـرار دارد. در حوزه فرآورده نیز کمبود در تأمین بنزین مورد نیاز وجود دارد.

بـرای رفـع ناترازی‌هـا لازم اسـت نـگاهی بـه زیسـت‌بوم انرژی کشـور داشـت تا با تفکیـک بخش‌های مختلـف درگیر در بخش‌هـای عرضه و تقاضـا، ملزومات، راهبردهـا و اقدامات اجرایی آن‌ها را به‌صورت جداگانـه ارزیابی نمود. بدین منظور، در دید کلان، عرضه انرژی شـامل سـه حوزه تولیـد، واردات و ذخیره‌سـازی خواهـد بـود. بخـش تقاضـا نیز شـامل مدیریت مصرف، بهینه‌سـازی مصرف و شـبکه‌های هوشـمند اسـت. با توجه به ارزیابی‌های انجام شـده و وابسـتگی شـدید انرژی در کشـور به گاز و فرآورده و حتی فراتر از آن، تأمین بیش از ۹۵ درصد برق کشـور با کمک گاز طبیعی و فـرآورده، تنوع‌گرایی سـومین تنـه اصـلی در کنترل و رفـع ناترازی خواهـد بود. در کنار ایـن مـوارد، به‌منظور یکپارچه‌سـازی اقدامـات مرتبط با رفـع ناتـرازی و یکپارچه‌نگری در حوزه انرژی، لازم اسـت یک ساختار منسـجم بتواند سیاسـت‌گذاری، تنظیم‌گری و تنظیم روابط را انجام داده و با شـکل‌گیری حکمرانی انرژی در کشور،

زیست‌بوم انرژی کشور به شکل یکپارچه مدیریت شود. در (شکل ۱) این ساختار نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار مدیریت ناترازی در زیست‌بوم انرژی

با توجه به موارد بیان شده، مدل منشور پایداری انرژی در (شکل ۲) ارائه شده است.

شکل ۲: مدل منشور پایداری انرژی

۲-۱. حکمرانی انرژی

در بخش انرژی ایران مسائل متفاوت و درهم‌تنیده‌ای همانند بروز ناترازی انرژی در سال‌های اخیر، وابستگی اقتصاد ایران به درآمدهای حاصل از حامل‌های انرژی (نفت و گاز)، یارانه انرژی، شیوه قیمت‌گذاری‌ها، پایین بودن بهره‌وری در بخش تولید، انتقال و توزیع برق، شیوه اختصاص و تأمین و مصرف حامل‌های انرژی، استفاده از موقعیت ژئوپلیتیک در پیشبرد دیپلماسی انرژی و غیره وجود دارد. هریک از این مشکلات دلایل مختص به خود را دارند، اما وقتی به‌صورت یکپارچه دیده می‌شوند، مشکل ساختاری موجود در بخش انرژی ایران را یادآوری می‌کنند. حکمرانی انرژی به معنای مداخله حاکمیت در اهداف، سیاست‌ها، بازیگران، نهادها و روابط بین آنان در بخش انرژی جهت کسب منفعت عمومی است [۸]. برای بررسی وضعیت حکمرانی انرژی کشورها می‌بایست چهار عنصر اصلی حکمرانی شامل پارادایم سیاستی، اهداف سیاستی، نهادهای سیاستی و ابزارهای سیاستی در آن کشور مورد بررسی قرار گیرد.

نهادهای سیاستی بخش انرژی دارای یکی از چهار نقش سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری، تسهیل‌گری و تصدی‌گری هستند. ریشه مشکلات حکمرانی انرژی ایران در تداخل حکمرانی و تصدی‌گری، وابستگی بودجه دولت‌ها به درآمدهای حاصل از انرژی، عدم شفافیت و نبود نظام جامع اطلاعات انرژی، نبود سیاست‌های جامع بخش انرژی و نبود سیاست‌گذار و تنظیم‌گر کارآمد انرژی خلاصه می‌شود [۹]. از این رو باید حکمرانی انرژی را در سه عنصر سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری و ارتقاء نقش حاکمیتی بررسی نمود.

۲-۱-۱. سیاست‌گذاری

با توجه به شرایط کنونی زیست‌بوم انرژی کشور که در آن بیش از ۹۸ درصد عرضه اولیه و بیش از ۸۸ درصد مصرف نهایی انرژی کشور توسط وزارت نفت عرضه می‌شود، همچنین با در نظر گرفتن این نکته که وزارت نیرو و مجموعه‌های تولید برق در کشور، خود بزرگترین مصرف‌کننده انرژی در کشور هستند و اتلاف روزانه انرژی در آن‌ها بیشتر از ۱ میلیون بشکه معادل نفت خام است (سالانه بیش از ۳۸۰ میلیون بشکه معادل نفت خام)، بدیهی است این دو نهاد، در صورت سیاست‌گذاری، تمرکز بخشی محور خواهند داشت. وجود سازمان‌های متعدد در فرایند تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری بخش انرژی، سه نتیجه در پی داشته است:

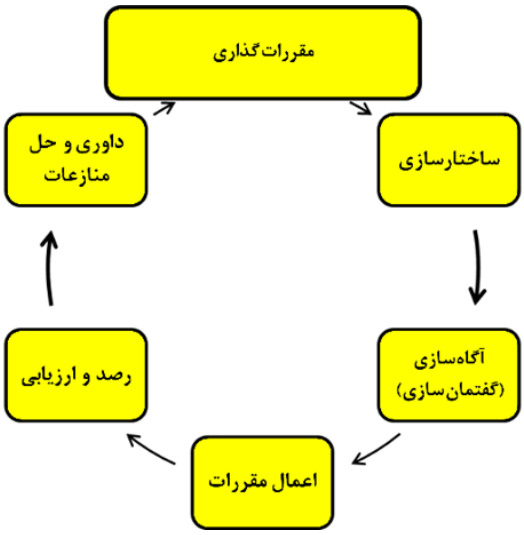
- ناهماهنگی و ناسازگاری در سیاست‌گذاری (از دید کلان‌نگر)
- کندی تصمیم‌گیری
- عدم اصلاح و به‌روز شدن قوانین کشور در سطح کلان

در هر صورت با تعیین اهداف و سیاست‌گذاری‌ها در بخش‌های مختلف از قبیل امنیت عرضه انرژی، ذخیره‌سازی حامل‌ها، پیشرفت نیروی کار حوزه انرژی، ایجاد جذابیت سرمایه‌گذاری بخش‌های مختلف در حوزه انرژی، توسعه فناوری‌های نوین در صنایع انرژی، بازتوزیع سبد سوخت کشور و افزایش سهم تجدیدپذیرها و متنوع‌سازی سبد انرژی کشور، امکان تقویت سیاست‌گذاری در زیست‌بوم انرژی کشور و ارتقای آن‌ها با نگاهی یکپارچه‌نگر در حوزه انرژی به وجود می‌آید.

۲-۱-۲. تنظیم‌گری

هدف تنظیم‌گری برقراری تعادل و توازن است. در

شرایطی که مقادیر عرضه و مصرف حامل‌ها در فصول مختلف سال هم‌خوانی نداشته و به اصطلاح شرایط ناترازی انرژی پیش آمده است، به‌منظور ایجاد تعادل و توازن لازم است تنظیم‌گری یکپارچه انرژی برقرار شود. در (شکل ۳) موارد مرتبط با تنظیم‌گری نشان داده شده است.



شکل ۳: بخش‌های مختلف تنظیم‌گری

بر اساس تجربیات گذشته، موارد مهمی که در تنظیم‌گری انرژی نقش مهمی ایفا می‌کنند، عبارتند از:

- ایجاد رویکرد واحد و یکپارچه
- اتخاذ تدابیر لازم هنجاری و نهادی جهت تسهیل تنظیم‌گری
- مدیریت تنظیم‌گری و راهبری به سمت هدف
- تفکیک میان نهادهای متولی سیاست‌گذاری و تنظیم‌گری

با توجه به ساختار زیست‌بوم انرژی، بازیگران فعال در تنظیم‌گری، نهادهای حاکمیتی مانند وزارتخانه‌های نفت و نیرو و سازمان برنامه و بودجه، سازمان‌ها و شرکت‌های خصوصی مانند نیروگاه‌های خصوصی و همچنین مصرف‌کنندگان و عموم مردم هستند.

۲-۱-۳. ارتقاء نقش حاکمیتی به‌جای تصدی‌گری

در تمام سیستم‌ها و نظام‌های حقوقی و سیاسی دنیا، دولت‌ها دو وظیفه اصلی حاکمیتی و تصدی‌گری را بر عهده دارند که توسط نهادها و دستگاه‌های مسئول به اجرا گذاشته می‌شود. وظایف حاکمیتی از قبیل سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی، نظارت و ارزیابی به دلیل سطح و جایگاه دارای اهمیت مضاعف بوده و تصدی‌گری آن دسته از وظایفی را در برمی‌گیرد که قابل‌واگذاری به مردم و بخش خصوصی باشد. با توجه به گستردگی حوزه انرژی، لازم است دولت نسبت به افزایش حاکمیت و کاهش تصدی‌گری دولتی در حوزه انرژی اقدام نماید و نقش بخش خصوصی و عموم ملت در این حوزه پررنگ‌تر شود.

۲-۲. عرضه

بخش عرضه خود به سه زیربخش تولید، واردات و ذخیره‌سازی تقسیم می‌شود.

۲-۲-۱. تولید

با توجه به بروز کمبودها و ناترازی‌های کشور در حوزه سوخت‌های فسیلی و همچنین برق به‌عنوان حامل ثانویه، لازم است در سیاست‌گذاری برای تولید انرژی در کشور، تغییر رویکرد داشته و با نگاهی یکپارچه‌نگر در حوزه حامل‌های مورد نیاز برای مصارف بخش نهایی نسبت به سیاست‌گذاری بخش تولید و عرضه انرژی اقدام کرد. مهم‌ترین اقدامات در حوزه تولید انرژی عبارتند از:

- توسعه سامانه‌های سرچاهی به‌منظور افزایش تولید
- ایجاد جذابیت سرمایه‌گذاری به‌منظور مشارکت بخش خصوصی در بخش تولید نفت و گاز
- افزایش ظرفیت تولید نفت و گاز
- افزایش ظرفیت استخراج زغال‌سنگ حرارتی
- مدیریت منابع زیست‌توده
- ایجاد ظرفیت‌های پالایشی جدید
- افزایش ظرفیت استفاده از انرژی هسته‌ای
- همچنین افزایش سهم تجدیدپذیرها در سبد تولید برق و سبد سوخت که به سه بخش تقسیم می‌شوند:

۱. منابع پایدار: منابعی که تولید از آن‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز به‌صورت پایدار است، مانند زمین‌گرمایی، بازیافت حرارتی، زیست‌توده، توربو اکسپندر

۲. منابع ناپایدار: منابعی که تولید از آن‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز پایدار نیست و صرفاً در ساعات خاصی امکان تولید برق وجود دارد، مانند بادی، خورشیدی

۳. انرژی هیدروژن

۲-۲-۲. واردات

مهم‌ترین اقدامات در این زیربخش عبارتند از:

- سیاست‌گذاری در حوزه واردات زغال‌سنگ و توسعه نیروگاه‌های زغال‌سنگ با راندمان بالا
- استفاده از ظرفیت‌های سواپ برای مبادله حامل‌های وارداتی با صدور خدمات فنی و مهندسی
- توسعه مدل‌های کسب و کار جدید و بهره‌مندی از ظرفیت‌های بخش خصوصی در زمینه واردات و سواپ حامل‌ها

۲-۲-۳. ذخیره‌سازی

ذخیره‌سازی انرژی یکی از مهم‌ترین موارد در رفع ناترازی انرژی است. عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی به این صورت است که در زمان‌هایی که میزان عرضه برق بیشتر از تقاضا است، مازاد تولید را ذخیره کرده و در زمانی که میزان تقاضا از عرضه بیشتر می‌شود، انرژی ذخیره شده خود را برای ایجاد تعادل در شبکه عرضه می‌کنند. ذخیره‌سازی گاز به‌صورت گاز طبیعی مایع (LNG)، گاز طبیعی جذب‌شده (ANG)، مخازن زیرزمینی (مخازن هیدروکربوری، گنبدهای نمکی و آبخوان) از جمله روش‌های ذخیره‌سازی گاز هستند.

استفاده از باتری‌ها و پمپ کردن آب به پشت سد در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای یکی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی برق است. با ظهور فناوری‌های جدید ذخیره‌سازی انرژی و حرکت جهان به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر که نیاز به ذخیره‌سازی را افزایش می‌دهد، نقش کسب‌وکارهای نوآور این حوزه نیز پررنگ‌تر خواهد شد. یکی دیگر از روش‌ها، ذخیره‌سازی گرمایی است. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی برای تولید برق از خورشید، حتی در زمانی که خورشید نمی‌تابد، روش دیگری است. در این روش تابش خورشید در یک نقطه متمرکز می‌شود و از حرارت حاصل برای ذخیره کردن انرژی به‌صورت گرما در آب، نمک‌های مذاب یا مایعات استفاده می‌شود. هیدروژن به‌عنوان یک روش تولید انرژی کاربردهای رو به گسترشی دارد؛ به‌طور مثال، از برق مازاد برای تولید هیدروژن استفاده نموده و سپس آن را ذخیره کرد تا پس از آن در سلول‌های سوختی، موتورها و توربین‌های گازی برای تولید برق مورد استفاده قرار گیرد.

مهم‌ترین اقدامات در این زیربخش عبارتند از:

- سیاست‌گذاری در زمینه افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی در کشور
- توسعه مدل‌های کسب و کار جدید برای مشارکت بخش خصوصی در ذخیره‌سازی گاز و برق
- کاهش نقش تصدی‌گری بخش دولتی در ذخیره‌سازی
- توسعه فناوری‌های جدید در حوزه ذخیره‌سازی برق و گاز
- توسعه زیرساخت‌های هیدروژن

۲-۳. تقاضا

با توجه به مدل ارائه شده، این حوزه شامل سه زیربخش بهینه‌سازی، مدیریت تقاضا و توسعه شبکه‌های هوشمند انرژی است.

۲-۳-۱. بهینه‌سازی

۹۸/۵ درصد از انرژی عرضه شده در کشور را گاز و فرآورده تشکیل می‌دهد. بخش‌های نیروگاه، خانگی، صنعت و انتقال انرژی، جمعاً ۸۷ از گاز تولیدی کشور و بخش‌های حمل و نقل و نیروگاه جمعاً ۷۴ درصد از فرآورده تولیدی کشور را مصرف می‌کنند. در حالت کلی بخش‌های نیروگاه، خانگی، صنعت و حمل و نقل، ۸۲ درصد از کل گاز و فرآورده عرضه شده در کشور را مصرف می‌کنند. با توجه به بالا بودن مقدار مصرف انرژی به‌ویژه گاز در نیروگاه‌ها (تقریباً ۲۸ درصد کل انرژی عرضه شده در کشور و ۳۰ از کل گاز عرضه شده در کشور)، همچنین، قابلیت پایش میزان هدر رفت انرژی، اجرای بهتر به دلیل تعداد کم نسبت به سایر بخش‌ها و وجود الزامات قانونی متعدد، برنامه‌ریزی برای بهینه‌سازی نیروگاه‌ها را در اولویت قرار می‌دهد.

بنابراین، بر اساس اصل پارتو، با توجه به این‌که در بخش تقاضا نیازمندی پنج بخش نیروگاه، خانگی، صنعت، حمل و نقل و انتقال به انرژی است که ۸۲ درصد از گاز و فرآورده و ۷۲ درصد برق عرضه شده کشور را مصرف می‌کنند، برنامه‌ریزی هدفمند تأثیر زیادی بر رفع ناترازی انرژی دارد. در (جدول ۱) سهم بخش‌های مختلف از مصرف نشان داده شده است. همچنین، حامل‌هایی که بیشترین اهمیت در هر بخش را دارند در (جدول ۲) مشخص شده‌اند.

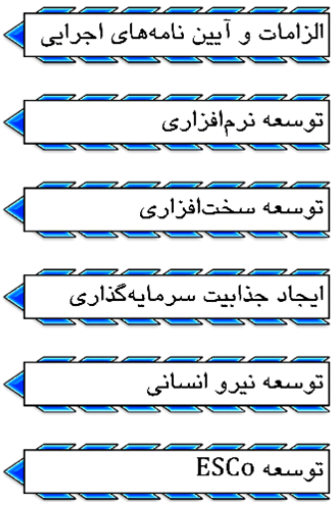
جدول ۱: سهم متقاضیان از مصرف

محل مصرف	سهم از مصرف		
	گاز	فرآورده	برق
نیروگاه	۳۰	۱۹/۴	-
صنعت	۲۲/۶	۵/۹	۳۰
حمل و نقل	۳/۶	۵۵/۳	۰/۱
انتقال انرژی	۹	۴/۸	۱۴/۱
خانگی	۲۵/۱	۴/۲	۲۷/۶
کشاورزی	۱/۹	۳/۷	۱۱/۹
تجاری و عمومی	۳/۶	۱	۱۳/۷

جدول ۲: محل استفاده حامل‌های انرژی

حامل‌های انرژی	محل استفاده				
گاز	نیروگاه	خانگی	صنعت	انتقال انرژی	
فرآورده	حمل و نقل	نیروگاه			
برق	صنعت	خانگی	انتقال انرژی	تجاری و عمومی	کشاورزی

در (شکل ۴) ابزارها و راه‌حل‌هایی قابل استفاده برای بهینه‌سازی در بخش‌های مختلف ارائه شده‌اند. شرکت‌های خدمات انرژی یا ESCo زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی فعالیت کرده و خدماتی مانند مدیریت انرژی، کاهش مصرف، بهره‌وری انرژی و بهینه‌سازی تجهیزات ارائه می‌دهند.



شکل ۴: ابزارهای پیشنهادی در راستای بهینه‌سازی

۲-۳-۲. مدیریت تقاضا

ناترازی انرژی ماحصل عدم هم‌خوانی عرضه و تقاضای انرژی در فصول مختلف سال است، چنان‌که برق در تابستان با کمبود و در زمستان به‌صورت مازاد وجود دارد. گاز نیز در تابستان به‌صورت وفور یافت شده و زمستان دچار کسری می‌شود. ناترازی گاز با وجود افزایش حدود ۷۰ درصدی تولید از سال ۱۳۹۲ الی ۱۴۰۰، کماکان رو به افزایش است. طی سال‌های ذکر شده، روزانه ۳۰۰ میلیون مترمکعب به ظرفیت تولید اضافه شده و اکنون ناترازی گاز در فصول سرد به روزانه ۳۰۰ میلیون مترمکعب رسیده است، یعنی برنامه‌ریزی برای ایجاد بازار مصرف گاز به اندازه دو برابر مقدار تولید بوده است. طی سال‌های مذکور، توسعه نیروگاه‌های حرارتی تقریباً ۲۰ درصد افزایش یافته است، در حالی‌که مصرف گاز در نیروگاه‌ها (به دلیل جایگزینی با فرآورده که تصمیم درستی است) دو برابر شده است.

در شرایط فعلی، توسعه پایگاه داده‌ای قوی برای پایش و مدیریت یکپارچه تولید و مصرف حامل‌ها در فصول مختلف به همراه راهکارهای زیر پیشنهادهایی برای مدیریت تقاضای انرژی هستند:

- ایجاد نهاد تنظیم‌گر مرتبط و مدیریت تولید و مصرف فعلی حامل‌های اولیه و ثانویه بر اساس ظرفیت‌های تولیدی و ترندهای موجود با اولویت ایجاد حداکثر ارزش افزوده
- اختصاص انرژی به مصرف‌کنندگان جدید توسط یک نهاد تنظیم‌گر یکپارچه‌نگر و ایجاد مبادی مصرف جدید، تخصیص سوخت بر اساس ظرفیت‌های خالی موجود و برنامه‌ریزی‌های تولید صورت‌گرفته
- کاهش سهم گاز از سبد سوخت نیروگاه‌ها از طریق جایگزینی با انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده حداکثری از ظرفیت‌های گاز برای توسعه پایدار
- تحدید (حد گذاری) تقاضا به‌منظور کنترل تقاضای انرژی در کشور
- کنترل تقاضا بر اساس ترازنامه‌های انرژی ماهانه و فصلی: با توجه به اینکه ناترازی گاز و برق معمولاً در فصول سرد و گرم روی می‌دهد، لازم است تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف به‌صورت فصلی یا ماهانه پایش و کنترل شده و از ظرفیت‌های موجود در سایر فصول برای کنترل وضعیت مصرفی و شبکه سایر حامل‌ها استفاده شود
- تخصیص انرژی به مشترکین جدید با کمک اطلس انرژی و شبکه‌های هوشمند

۲-۳-۳. شبکه‌های هوشمند انرژی

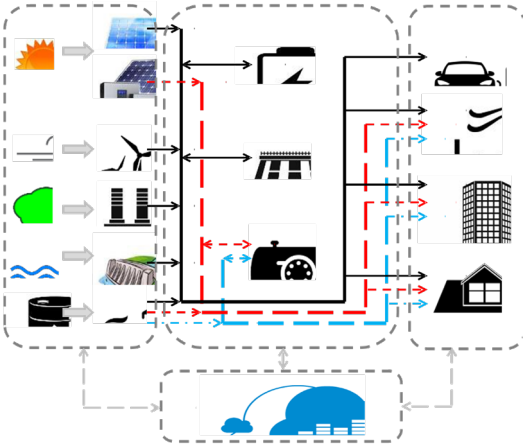
سیستم انرژی هوشمند به‌عنوان رویکردی تعریف می‌شود که در آن شبکه‌های هوشمند برق، حرارت و گاز با فناوری‌های ذخیره‌سازی ترکیب شده و برای تشخیص هم‌افزایی میان بخش‌ها به‌منظور دستیابی به راه‌حل بهینه و همچنین تمام سیستم انرژی، باهم هماهنگ می‌شوند. با در نظر گرفتن یک رویکرد منسجم برای سیستم کامل انرژی هوشمند در مقایسه با نگاه کردن به تنها یک بخش، هم‌افزایی افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، سه نگرش کلی در حوزه سیستم انرژی هوشمند وجود دارد:

۱. تأکید بر هوشمندی- در نگرش اول، به کلمه «هوشمند» تأکید شده است که بر عملکرد کنترل و مدیریت، با سطح هوشمندی بر یک سیستم انرژی تمرکز دارد. تمرکز اصلی این نگرش مبتنی بر درک سیستم انرژی هوشمند به‌عنوان «کنترل هوشمند» است.

۲. تأکید بر انرژی- در این نوع نگرش، «انرژی» هسته یک سیستم انرژی هوشمند است که بر مسیر تکامل سیستم‌های انرژی تمرکز دارد.

۳. تأکید بر سیستم- در نگرش سوم، کلمه «سیستم» به شخصیت اصلی تبدیل شده است که به ادغام سیستم‌های انرژی مختلف از دیدگاه سیستماتیک می‌پردازد.

ترکیب و پیکربندی یک سیستم انرژی هوشمند در (شکل ۵) نشان داده شده است. یک سیستم انرژی هوشمند یکپارچه معمولی به چهار بخش سیستم‌های تولید انرژی، کاربران نهایی انرژی، سیستم‌های توزیع و ذخیره انرژی و سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند تقسیم می‌شود.



شکل ۵: پیکربندی سیستم انرژی هوشمند

مهم‌ترین اقدامات این بخش عبارتند از:

- توسعه زیر ساخت‌ها و پایگاه داده‌ای قوی و کنترل هوشمند مصارف در بخش‌های مختلف (مانند پروژه هوشمندسازی در صنعت گاز و ارتباط دادن آن به مصارف برق)
- تحلیل، ارزیابی و توسعه سامانه‌های گرمایش مرکزی با کمک منابع حرارتی موجود بر اساس اطلس انرژی
- توسعه برنامه مدیریت تقاضا (DSM) در گام اول برای حامل‌های مختلف و ادغام آن‌ها برای مدیریت بهتر مصارف حامل‌ها و استفاده از حامل‌های جایگزین برای پیک‌سایی
- الزام مجتمع و یا برج‌های مسکونی جدید به توسعه یک سیستم کنترل مرکزی مدیریت انرژی و طراحی ساختمان‌های مصرف‌کننده/ساختمان‌های با انرژی کارآمد، سازگار با شبکه و انعطاف‌پذیر انرژی
- توسعه نیروگاه‌های تولید پراکنده CHP به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری شبکه انرژی در نقاط مختلف
- توسعه استفاده از ماشین‌های برقی و زیرساخت‌های لازم و همچنین خودروهای دوگانه‌سوز
- توسعه زیرساخت‌های هیدروژن

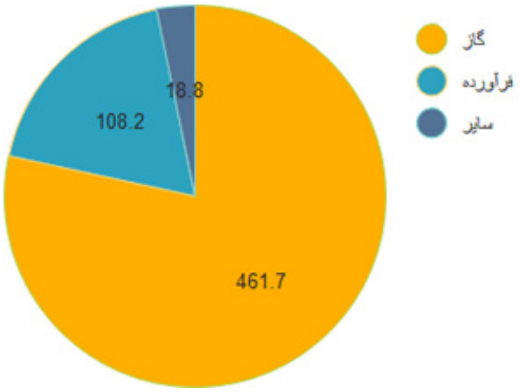
۲-۴. تنوع‌گرایی سبد سوختی

با دید یکپارچه به زیست‌بوم انرژی، کمبود عرضه برق در فصل تابستان و به‌تبع آن ناترازی برق، به دلیل کاهش سطوح تولید برق در مقایسه با میزان تقاضا در دوران اوج مصرف و پیک بوده که به ظرفیت پایین نیروگاهی برمی‌گردد. بخش اعظمی از ناترازی گاز نیز ناشی از عدم ذخیره‌سازی گاز در تابستان و تخصیص آن به تولید برق بیشتر است. پس در صورت جایگزینی بخشی از گاز مورد نیاز برای تولید برق در تابستان و زمستان، با حامل انرژی دیگری به‌جز گاز و فرآورده، ضمن تأمین برق مورد نیاز، سطح ناترازی گاز کاهش می‌یابد.

ناترازی در تأمین و عرضه برق مورد نیاز در کشور، چالش‌های زیادی برای بخش‌های مختلف ایجاد کرده است، ولی وجود نیروگاه‌های گازی سیکل باز و کم بازده به همراه وابستگی ۷۰ درصدی برق تولیدی به گاز طبیعی و تکرار ناترازی برق و گاز در فصول مختلف، به دلیل توسعه بیش از پیش نیروگاه‌های حرارتی گازسوز است. هرچند به نظر می‌رسد این موضوع در اصل فرصتی مناسب برای گذار به سمت

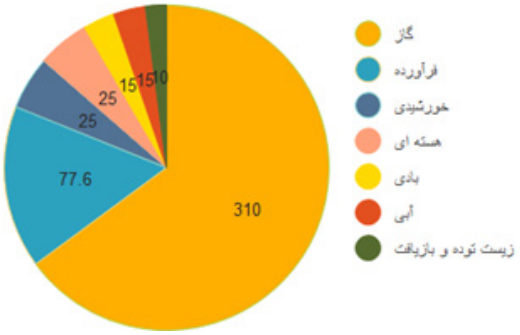
افزایش سهم تولید برق با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. توسعه نیروگاه‌های حرارتی باهدف افزایش برق تولیدی از طریق سوخت‌های فسیلی، ذخیره‌سازی گاز و گازوئیل را در فصول سرد به‌عنوان سوخت زمستان محدود کرده (مشابه شرایط سال ۱۴۰۳ برای ذخیره گازوئیل) و به‌تبع آن تأمین سوخت مورد نیاز نیروگاه‌ها در فصول گرم نیز چالش‌هایی نظیر قطع گاز صنایع و کاهش گازوئیل بخش حمل و نقل را در پی خواهد داشت.

در ادامه به این موضوع پرداخته می‌شود که ناترازی برق، تهدید یا فرصت است. زمانی که میزان برق مورد نیاز ۲۰ هزار مگاوات بیش از عرضه آن در ساعات پیک مصرف باشد، تقریباً ۲۰ درصد باید به ظرفیت نیروگاهی برق در کشور باید افزوده شود. شاید وجود این ناترازی بهترین فرصت برای تنوع‌گرایی متوازن سبد انرژی نیروگاهی در کشور باشد. در شرایط فعلی ۹۸ درصد برق تولیدی کشور از گاز و فرآورده نفتی است. در صورتی که منابع تجدیدپذیر مانند خورشیدی، بادی، آبی، زیست‌توده، هسته‌ای، پروژه‌های بازیافت حرارت و انرژی اتلافی و یا حتی زغال‌سنگ می‌توانند ضمن تأمین برق مورد نیاز از سایر منابع و با هزینه‌هایی به‌مراتب کمتر، مشکل ناترازی گاز را نیز تا حدود زیادی کاهش دهند. با توجه به (شکل ۶) با مصرف ۴۶۱/۷ میلیون بشکه معادل نفت خام از ظرفیت گاز تولیدی و ۱۰۸/۲ میلیون بشکه معادل نفت خام از ظرفیت فرآورده تولیدی در کشور و ۱۸/۸ از سایر منابع، ۲۰۹ میلیون بشکه معادل نفت خام برق در کشور تولید می‌شود.



شکل ۶: وضعیت فعلی سبد سوخت نیروگاه

با فرض بازده‌های کنونی، برای تولید همین مقدار برق، امکان توزیع سبد سوختی نیروگاه‌ها را بر اساس (شکل ۷) بررسی نمود. در این شرایط همان برق قبلی تولید شده است، با این تفاوت که بیش از ۴۰ درصد در مصرف گاز و فرآورده صرفه‌جویی شده است.



شکل ۷: وضعیت پیشنهادی سبد سوخت نیروگاه

۲-۴-۱. بازتوزیع سبد سوخت

بیشتر اقداماتی که باید در این حوزه اجرا شود، از جنس حکمرانی انرژی و تنظیم‌گری است که برخی از آن‌ها عبارتند از:

- مدیریت تقاضاهای پیش‌رو در حوزه برق با تأکید بر تولید از منابعی به غیر از فرآورده و گاز
- تأکید بر توسعه استفاده از منابع تجدیدپذیر پایدار
- توسعه زیرساخت‌های تولید و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
- واردات حامل‌های ارزان به‌منظور کاهش سهم فرآورده و گاز در سبد سوخت نیروگاه‌ها
- تنظیم برنامه جامع مدیریت عرضه نهایی انرژی

۲-۴-۲. توسعه زیرساخت‌های توسعه تجدیدپذیرها

امروزه با افزایش هزینه سوخت‌های فسیلی و کاهش هزینه‌های نصب و راه‌اندازی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، به‌کارگیری انرژی‌های نو و تجدیدپذیر نقش بسزایی در سبد انرژی جهان ایفا می‌کند. در دسترس بودن محدود سوخت‌های فسیلی و مشکلات انتشار گازهای گلخانه‌ای، الزامی برای بهره‌مندی از انرژی‌های تجدیدپذیر است. وفق به قانون اساس‌نامه سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق مصوب سال ۱۳۹۴، وظیفه ارتقاء و توسعه کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر بر عهده سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) نهاده شده است [۱۰]. از این‌رو بخش انرژی‌های تجدیدپذیر، برخلاف سایر ۱۱ زیربخش از ۱۲ زیربخش تعریف شده برای رفع ناترازی، دارای متولی خاص است. البته شایان ذکر است در برنامه ششم توسعه، وزارت نفت و شرکت‌های تابعه نیز باید در توسعه فناوری‌های تجدیدپذیر نقش ایفا نموده و قانون‌گذار تکالیفی بر عهده آن‌ها سپرده است.

در قانون فوق‌الذکر، منابع تجدیدپذیر انرژی شامل بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی، آبی کوچک (تا ده مگاوات)، دریایی و زیست‌توده یا بیومس (اجزاء قابل‌تجزیه زیستی از محصولات، پسماندها و زائدات کشاورزی همانند مواد گیاهی و دامی، جنگل‌ها و صنایع وابسته و همچنین زائدات صنعتی و شهری قابل‌تجزیه که قابلیت تولید برق، حرارت، سوخت‌های مایع، سوخت‌های گازی و انواع کاربردهای مفید شیمیایی را دارا باشد.) هیدروژنی، پیل سوختی و سایر منابع حاصل از انرژی‌های تجدید شونده و پاک در نظر گرفته است. (با توجه به میزان فراگیری در توسعه، کاربردها و حوزه مصارف و همچنین تأخیر استفاده از انرژی هیدروژنی بر سایر حامل‌های تجدیدپذیر، حامل هیدروژنی در بخش بعدی آورده شده است.)

افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، ملاحظات زیست‌محیطی، امنیت انرژی، کاربردهای پتروشیمی، پیشرفت‌های فناورانه و توجیه اقتصادی برخی از عوامل تعیین‌کننده آینده انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران هستند. در سال‌های اخیر در ایران، ضرورت قرار دادن انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی کشور مورد توجه قرارگرفته است. این در حالی است که در ایران تنها ۱ درصد از ظرفیت تولید برق از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین می‌شود. وجود منابع بزرگ نفت و گاز و پایین نگه‌داشتن قیمت انرژی باعث شده است که ایران برخلاف کشورهای پیشرفته صنعتی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر عقب بماند.

ظرفیت نیروگاه‌های بر پایه سوخت فسیلی در کشور (گاز و فرآورده) ۷۲۷۳۷/۹ مگاوات است. ظرفیت نیروگاه هسته‌ای ۱۰۲۰ مگاوات و ظرفیت نیروگاه‌های آبی کشور نیز ۱۲۱۹۱/۵ مگاوات است. ظرفیت اسمی سایر نیروگاه‌های تجدیدپذیر به ۹۶۰/۹ مگاوات می‌رسد. مطابق برنامه ششم توسعه، دولت مکلف بود تا پایان برنامه (سال ۱۳۹۴)، سهم نیروگاه تجدیدپذیر از ظرفیت اسمی نیروگاه‌های نصب شده را به ۵ درصد و بیشتر برساند (به عبارتی ۴۳۴۵ مگاوات از کل ۸۶۹۱۰ مگاوات ظرفیت موجود مطابق ترازنامه انرژی سال ۱۴۰۰ باشد)؛ اما پس از ۶ سال از اتمام برنامه ششم توسعه، ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور به ۱/۱ درصد از ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها رسیده است. از مهم‌ترین عوامل عدم توسعه تجدیدپذیرها عبارتند از:

- قیمت ارزان گاز و فرآورده در کشور
- نبود دید یکپارچه در حوزه انرژی
- ضعف تنظیم‌گری
- مدل‌های کسب و کاری ضعیف و نبود جذابیت سرمایه‌گذاری
- اشغال فضای زیاد
- نبود زیرساخت‌های مناسب جهت توسعه تجدیدپذیرها
- فقدان سیستم ذخیره‌سازی و نبود زیرساخت‌های تولید باتری‌ها
- ناپایداری تولید برق در ساعات مختلف شبانه‌روز در نیروگاه‌های خورشیدی و بادی
- انحصار انرژی‌های تجدیدناپذیر

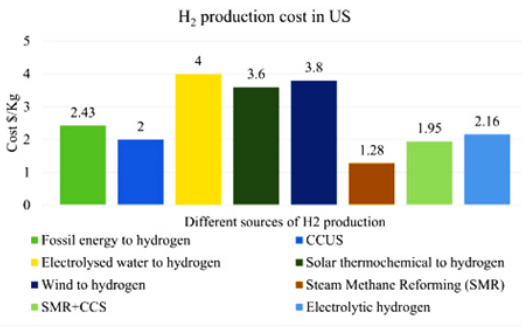
در وضعیت فعلی به نظر می‌رسد تأثیر عوامل بازدارنده بیشتر بوده و مرور روند ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیز مؤید این مطلب است؛ اما این‌که در سال‌های آتی نیز همچنان وزن عوامل بازدارنده بر محرک‌ها پیشی بگیرد، مشخص نیست؛ به‌ویژه آن‌که تأثیرات اقتصادی، سیاسی و اجتماعی کمبود برق از یک طرف و شدت گرفتن ناترازی گاز و افت تولید این حامل از طرف دیگر به میزانی است که به نظر نمی‌رسد در طولانی مدت هم بتوان برنده این مواجهه را عوامل بازدارنده دانست.

۲-۴-۳. هیدروژن

امروزه توسعه هیدروژن به‌عنوان یکی از حامل‌های انرژی در کشورهای مختلف یکی از اولویت‌ها در تنوع‌گرایی سبد سوخت است. عمده دلایل جانشانی هیدروژن در سبد سوختی کشورها، ارزش حرارتی بالای آن (ارزش حرارتی هیدروژن سه برابر بنزین در هر واحد وزن [۱۱]، پتانسیل تولید کربن کمتر، تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی (در پیل‌های سوختی) و تفاوت آن نسبت به انرژی فسیلی است که حین احتراق هیدروژن، محصول خروجی فقط بخار آب خواهد بود. از این‌رو هیدروژن در طیف گسترده‌ای از نیازهای انرژی از تولید برق و گرما گرفته تا حمل و نقل کاربرد دارد. ولی مهم‌ترین مشکل هیدروژن این است که به‌طور طبیعی به شکل خاص خود در روی زمین وجود ندارد.

تفاوت هیدروژن با گاز طبیعی در منابع تأمین و

هزینه‌های تولید آن است. ارزش حرارتی هر کیلوگرم هیدروژن ۱۴۲-۱۲۰ مگاژول بوده و هزینه تولید هیدروژن بر مبنای منبع تولید آن متفاوت است [۱۲]. پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۳۰ هزینه تولید هیدروژن ارزان‌تر هم شود. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد هزینه تولید هیدروژن به روش اصلاح بخار متان (SMR) در سال ۲۰۳۰ برابر با ۲۸ ۱/$/Kg، روش CCS ۱/۹۵ $/Kg و الکترولیز هیدروژن ۲/۱۶ $/Kg باشد (شکل ۸).



شکل ۸: هزینه تولید هیدروژن با روش‌های مختلف [۱۲]

شایان ذکر است ارزش حرارتی هر مترمکعب گاز طبیعی نیز در محدوده ۳۹-۳۶ مگا ژول بوده و قیمت آن به ازای هر MMBTU (تقریباً معادل ۱۰۵۵ مگاژول)، ۲/۸ دلار است. به‌صورت تقریبی قیمت یک کیلووات ساعت هیدروژن ۱۰ سنت بوده که با توجه به سطح فناوری و شرایط موجود در کشور توسعه هیدروژن در زیست‌بوم انرژی و ایفای نقش در سبد سوخت عرضه شده در کشور نسبت به سایر زیر بخش‌ها دارای تأخر زمانی است.

۳. نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین دلایل ناترازی برق، پایین بودن ظرفیت تولید برق در ساعات پیک مصرف و از دلایل اصلی ناترازی گاز، سهم ۷۰ درصدی آن در تولید برق و به‌تبع آن هدر رفت زیاد انرژی است. برای رفع ناترازی برق باید ظرفیت نیروگاهی توسعه داده شود که اگر سیاست‌گذاری با دید توسعه متوازن سبد سوختی نیروگاه‌ها صورت پذیرد، ناترازی برق به‌عنوان فرصتی برای بهبود سبد سوختی کشور و کاهش ناترازی گاز تلقی خواهد شد. ناترازی انرژی در ایران یک امر تک یا دو بعدی نیست که صرفاً با افزایش تولید، بهینه‌سازی و کاهش مصرف حامل‌های مختلف قابل حل باشد. ناترازی انرژی در کشور ابعاد مختلفی دارد که برای حل این معضل بایستی به‌صورت چند بعدی به آن نگاه کرد. در این پژوهش مدل توسعه داده شده برای رفع ناترازی، دارای چهار بخش اساسی حکمرانی انرژی، عرضه، تقاضا و تنوع‌گرایی بوده که به‌صورت وجه‌های یک منشور باهم مرتبط هستند. لازم به ذکر است قاعده این منشور که تجمیع‌کننده و منسجم‌کننده آن نیز به شمار می‌رود، در بخش اصلی آن یعنی حکمرانی انرژی است. ویژگی اصلی این مدل، یکپارچه‌نگری در همه حوزه‌ها و بخش‌های درگیر در زیست‌بوم انرژی کشور با تبیین وظایف افراد، نهادها و ذی‌نفعان مختلف در اجرایی کردن آن و جایگاه فناوری در بخش‌های مختلف است.

مراجع:

[1]. Energy Balance Sheet for the Year 1400 (2021-2022). Office of Macro Planning for Electricity and Energy. 1402 (2023).

[2]. Gozgor G, Paramati SR. Does energy diversification cause an economic slowdown? Evidence from a newly constructed energy diversification index. Energy Economics. 2022; 109:1-10.

[3]. Worldwide interval-based composite indicator. Energy Policy. 2022; 167:1-13.

[4]. Azimzadeh Arani M, Norouzi M, Parvizi J, Jahantab H. Explaining the current state of energy governance in Iran and proposing policy solutions. The Fifth Annual Conference on Resilient Economics. 2018.

[5]. Lo LH. Diversity, security, and adaptability in energy systems: a comparative analysis of four countries in Asia. World Renewable Energy Conference. Sweden; 2011. p. 2401-2408.

[6]. Fiorini L, Aiello M. Energy management for user's thermal and power needs: A survey. Energy Reports. 2019; 5:1048-1077.

[7]. Report on the Implementation of the Budget Law for the Year 1402 (2023-

2024). Islamic Consultative Assembly (Parliament of Iran), Court of Audit. 1404 (2025).

[8]. Khosropanah Dezfuli A, Baharlou M. A comparative explanation of modern governance and wise governance in three dimensions: Foundations, principles, and objectives. Journal of Governance. 2023;1(1): 21-36.

[9]. Akbari I, Abdolhosseinzadeh M, et al. Soft governance tools and their role in enhancing the legislative system. Research Center of the Islamic Consultative Assembly (Parliament of Iran). 2024.

[10]. Charter of the Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (SATBA). Research Center of the Islamic Consultative Assembly (Parliament of Iran). 2016.

[11]. Cormos AM, Szima S, Fogarasi S, Cormos CC. Economic assessments of hydrogen production processes based on natural gas reforming with carbon capture. Chemical Engineering Transactions. 2018; 70: 1231-1236.

[12]. Pal A, Kakran S, Kumar A, Youssef AB, Singh UP, Sidhu A. Powering squarely into the future: A strategic analysis of hydrogen energy in QUAD nations. International Journal of Hydrogen Energy. 2024; 49:16-41.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 12 / Issue 3 / NO. 23 / Autumn 2025 / Pages 57-68

Journal Homepage: www.ijge.irangi.org

Development of the Energy Sustainability Prism Model: A Framework for Integrated Management of the Energy Ecosystem

Mostafa Ebrahimi Moghaddam[1], Mohammad Mahdi Najafi[2*], Afshin Emamikhah[3]

1. Head of Research and Technology Affairs, Iranian Gas Engineering and Development Company (IGEDC), Tehran, Iran
2. Energy and Carbon Engineering Expert, Iranian Gas Engineering and Development Company (IGEDC), Tehran, Iran
3. Research and Technology Affairs Expert, Iranian Gas Engineering and Development Company (IGEDC), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:
Received: 02 September 2025
Revised: 14 October 2025
Accepted: 03 November 2025

Keywords:
Energy Ecosystem
Energy Sustainability Prism
Imbalance
Energy Governance

ABSTRACT

Energy resources are among the most important factors and elements of sustainable development. Iran, in addition to possessing a wealth of fossil fuel reserves, has significant potential for utilizing renewable energy. However, in the energy sector (electricity, gas, and petroleum products), the country faces imbalances, such as electricity shortages in the summer and gas shortages in the fall and winter. Recently, the situation with gasoline has also shifted from imbalance to deficit. This article aims to provide a comprehensive model for developing an appropriate structure to address these imbalances in Iran's energy ecosystem. The model developed in this study to resolve imbalances consists of four fundamental components: energy governance, supply, demand, and diversification, which are interconnected like the facets of a prism. It is worth noting that the base of this prism, which consolidates and integrates the components, is essentially the energy governance section, which is the most critical part. The integrated approach in this model harmonizes the policymaking structure, regulation, and the coordination of relationships among various sectors to address the dimensions involved in Iran's energy imbalances.

DOR: 20.1001.1.2508.1103.1404.03.17

How to cite this article

M. Ebrahimi Moghaddam, M. M. Najafi, A. Emamikhah, Development of the Energy Sustainability Prism Model: A Framework for Integrated Management of the Energy Ecosystem. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(3): 57-68. (https://ijge.irangi.org/article_735141.html)

* Corresponding Author.
E-mail address: m.m.najafi2024@gmail.com, (M. M. Najafi).

Available online 21 December 2025
25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.
This is an open access article under the CC BY license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)