مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی
دفتر مطالعات انرژی صنعت و معدن
مسلسل ۲۰۹۴۳ شهریور ۱۴۰۴

واکاوی مفهوم ناترازی برق در کشور

شماره مسلسل: ۲۰۹۴۳ کد موضوعی: ۳۱۰	مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی	شناسنامه گزارش

عنوان گزارش: واکاوی مفهوم ناترازی برق در کشور

نوع گزارش: طرح/ لایحه□، راهبردی■، نظارتی□، پیش‌نویس قانونی□

نام دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه برق و هسته‌ای)

تهیه و تدوین‌کنندگان: رضا شریفی، سیده‌مریم موسوی، سجاد افشار زرندی

مدیر مطالعه: ایمان رمضانی

ناظران علمی: میلاد بیگی، حبیب‌اله ظفریان ریگکی

ناظر بیرونی: علیرضا اسدی (مدیر گروه آینده‌نگاری و سیاست‌پژوهی پژوهشگاه نیرو)

صفحه‌آرا: نفیسه حاجی‌صفری

ویراستار تخصصی: زهره عطاردی

واژه‌های کلیدی:

۱. ناترازی برق

۲. منحنی تداوم تقاضا

۳. اوج بار

تاریخ شروع مطالعه: ۱۴۰۴/۲/۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۶/۱۲

به نام خدا

فهرست مطالب

چکیده ۱
خلاصه مدیریتی ۱
۱. مقدمه ۳
۲. ناترازی برق و ابعاد آن در ایران ۴
۳. الگوی توزیع زمانی ناترازی برق در کشور ۱۲
۴. جمع‌بندی و پیشنهادها ۱۶
منابع و مآخذ ۱۹

فهرست شکل‌ها

شکل ۱. منحنی تداوم تقاضا در سال ۱۴۰۳ ..... ۷
شکل ۲. نمودار تأثیر میزان توسعه نیروگاه‌ها بر کاهش ساعات ناترازی شبکه برق در سال ۱۴۰۳ ..... ۱۲
شکل ۳. نمودار تأثیر میزان مدیریت مصرف بر کاهش ساعات ناترازی ناحیه اوج بحرانی شبکه برق در سال ۱۴۰۳ ..... ۱۳
شکل ۴. الگوی زمانی بروز ناترازی بین تولید و تقاضای برق در سال ۱۴۰۳ ..... ۱۵
شکل ۵. الگوی زمانی بروز ناترازی بین تولید و تقاضای برق در بار میانی سال ۱۴۰۳ ..... ۱۶
شکل ۶. الگوی زمانی بروز ناترازی بین تولید و تقاضای برق در اوج بار غیربحرانی سال ۱۴۰۳ ..... ۱۷
شکل ۷. الگوی زمانی بروز ناترازی بین تولید و تقاضای برق در اوج بار بحرانی سال ۱۴۰۳ ..... ۱۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۱. سطوح کلیدی تقاضای برق و ویژگی‌های هر سطح در منحنی تداوم تقاضا سال ۱۴۰۳ ..... ۱۱
جدول ۲. پیشنهاد توصیه سیاستی ویژه گزارشات راهبردی/ نظارتی ۱۹

واکاوی مفهوم ناترازی برق در کشور

10.22034/report.mrc.2025.1404.33.6.20943

چکیده

یکی از چالش‌های اصلی در تحلیل میزان کمبود برق، تمایز میان ناترازی توان و ناترازی انرژی است؛ موضوعی که در سطح رسانه‌ای و حتی سیاست‌گذاری، کمتر به‌درستی تفکیک شده است. ناترازی توان به اختلاف لحظه‌ای میان تولید و تقاضای برق و ناترازی انرژی به کسری تجمعی در بازه‌ای مشخص اشاره دارد. از دیدگاه علمی و فنی، ناترازی انرژی معیار دقیق‌تری برای ارزیابی کمبود برق به‌شمار می‌رود و مبنای واقع‌گرایانه‌تری برای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری محسوب می‌شود. این گزارش با تمرکز بر این موضوع، تلاش دارد تا تمایز میان این دو مفهوم را روشن و پیامدهای آن را در سیاست‌گذاری انرژی کشور تحلیل کند. در این گزارش، با بهره‌گیری از منحنی تداوم تقاضا و تحلیل الگوی زمانی بروز ناترازی، نواحی مختلف بار و بازه‌های زمانی وقوع ناترازی در شبکه برق ایران طی سال ۱۴۰۳ شناسایی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در مجموع، طی ۱،۰۸۶ ساعت، تقاضای برق فراتر از حداکثر تولید در سال مورد بررسی بوده است. برای جبران کامل این ناترازی، افزایش ظرفیت تولید به میزان ۱۶،۸۸۸ مگاوات ضروری است. با این حال، بخش قابل توجهی از این تقاضا، معادل ۷،۶۶۳ مگاوات، تنها در ۱۷۵ ساعت از این ۱،۰۸۶ ساعت رخ داده است. بنابراین، این بخش از بار را می‌توان با راهکارهای مدیریت مصرف کنترل کرد. از این رو، با افزایش ظرفیت تولید به میزان ۹،۲۲۵ مگاوات می‌توان نیاز مصرف را در ۹۱۱ ساعت باقی‌مانده به‌طور کامل پاسخ داد. این امر نشان می‌دهد که ترکیبی از توسعه ظرفیت تولید و مدیریت مصرف، راهکاری اقتصادی‌تر از اتکای صرف به افزایش ظرفیت تولید است.

خلاصه مدیریتی

بیان / شرح مسئله

در سال‌های اخیر، موضوع «ناترازی برق» به یکی از چالش‌های راهبردی کشور تبدیل شده است. با این حال، در بسیاری از تحلیل‌ها و گزارش‌های رسمی، ناترازی صرفاً به‌صورت اختلاف لحظه‌ای میان تولید و تقاضای برق (ناترازی توان) بیان می‌شود؛ درحالی‌که این شاخص، تصویر دقیقی از وضعیت تأمین برق ارائه نمی‌دهد. در مقابل، **«ناترازی انرژی» که نمایانگر کسری تجمیعی برق در بازه‌های زمانی مشخص (ساعتی، روزانه یا فصلی) است، از دقت بیشتری برخوردار بوده و مبنای واقع‌گرایانه‌تری برای تحلیل وضعیت موجود به شمار می‌رود.** این گزارش با تمرکز بر این تمایز، تلاش دارد تصویری جامع‌تر و دقیق‌تر از وضعیت ناترازی برق کشور ارائه دهد. تحلیل و بررسی این مسئله، امکان هدف‌گذاری دقیق‌تر در توسعه ظرفیت تولید، مدیریت مصرف و سیاستگذاری‌های مؤثر برای افزایش تاب‌آوری شبکه برق را فراهم می‌سازند.

نقطه‌نظرات/ یافته‌های کلیدی

- تقاضای برق کشور به‌طورکلی **به سه ناحیه بار پایه، ناحیه بار میانی و ناحیه اوج بار قابل تفکیک** است که هریک ویژگی‌های مشخص و عملکرد متفاوتی در شبکه دارند.
- **بار پایه** به سطحی از تقاضای برق اطلاق می‌شود که در **تمامی ساعات سال به‌طور مداوم وجود دارد** و تأمین آن برای شبکه حیاتی است.
- در بالاترین سطح، **ناحیه اوج بار** قرار دارد که تنها حدود ۱۰ درصد از کل ساعات سال را شامل می‌شود و عمدتاً به دوره‌های خاصی مانند روزهای گرم تابستان مربوط است؛ زمانی که شبکه با بیشترین میزان تقاضا مواجه می‌شود. **ناحیه اوج بار به دو بخش مجزا تقسیم می‌شود**: ناحیه غیربحرانی که با ظرفیت عملیاتی قابل تأمین است، و ناحیه بحرانی که شدیدترین شرایط عدم توازن میان تولید و مصرف را دربردارد و تنها در حدود ۲ درصد از ساعات سال بروز می‌یابد.
- **ناحیه بار میانی** که بین اوج بار و بار پایه قرار داد و با نوسانات محدود روزانه، بخش عمده‌ای از مصرف پایدار و پیش‌بینی‌پذیر را تشکیل می‌دهد.
- براساس داده‌های ثبت شده، بررسی داده‌های مربوط به ناترازی تولید و تقاضای برق در سال ۱۴۰۳ نشان می‌دهد که **درمجموع طی ۱،۰۸۶ ساعت، میزان تقاضای برق از حداکثر تولید سال مورد مطالعه فراتر رفته است. از این مقدار، حدود ۱۷۵ ساعت به ناحیه بحرانی اوج بار اختصاص دارد و در حدود ۷۰۳ ساعت از ناترازی‌ها مربوط به ناحیه غیربحرانی اوج بار است. درنهایت، ۲۰۸ ساعت از ناترازی‌ها در دوره‌های بار میانی ثبت شده است.**
- گسترش ناترازی برق به ناحیه بار میانی که پیش‌تر از تعادل پایدار بین تولید و مصرف برخوردار بود. بیانگر وضعیتی نگران‌کننده در الگوی بهره‌برداری از شبکه و زنگ خطری جدی برای پایداری شبکه برق کشور است.
- اگرچه حذف کامل ناترازی سالیانه که درمجموع معادل ۱،۰۸۶ ساعت است، نیازمند افزایش ظرفیت تولید به میزان ۱۶،۸۸۸ مگاوات و صرف سرمایه‌گذاری کلان است، اما بررسی‌ها نشان می‌دهد که **با احداث تنها ۹،۲۲۵ مگاوات ظرفیت جدید (معادل ۵۵ درصد از ظرفیت مورد نیاز) می‌توان ۹۱۱ ساعت از زمان‌هایی که شبکه برق با ناترازی مواجه است را حذف و بازه زمانی ناترازی را به ۱۷۵ ساعت کاهش داد.** ۱۷۵ ساعت باقی‌مانده مربوط به اوج بار بحرانی است که با برنامه‌های مدیریت مصرف می‌توان آن را مدیریت کرد.
- **اولویت نخست در کاهش ناترازی، رفع ناترازی در بخش بار میانی است که نیازمند احداث حدود ۱،۸۴۶ مگاوات ظرفیت جدید بوده و منجر به حذف ۲۰۸ ساعت از مجموع ساعات ناترازی سالیانه خواهد شد.** با توجه به توزیع زمانی این ناترازی (ساعات ۱۸ تا ۲۴)، نیروگاه‌های خورشیدی کارایی ندارند. از این رو، تبدیل نیروگاه‌های گازی موجود به سیکل ترکیبی، راهکاری بهینه برای افزایش راندمان بدون نیاز به سوخت جدید، جهت رفع این ناترازی محسوب می‌شود.
- با توجه به اینکه بخش قابل‌توجهی از ناترازی مربوط به اوج بار غیربحرانی در بازه زمانی ۱۰ صبح تا حدود ۱۸ عصر است، بخشی از ظرفیت جدید مورد نیاز را می‌توان از طریق منابع خورشیدی تأمین کرد.

• تحلیل داده‌های واقعی شبکه برق کشور نشان می‌دهد که در ساعات اوج بار تابستانی، **هریک درجه افزایش دمای هوا منجر به افزایش ۱،۵۵۰ مگاواتی در تقاضا می‌شود. این بدان معناست که با فرض ساخت ۹،۲۲۵ مگاوات ظرفیت جدید (به‌منظور برآوردن حداکثر نیاز تقاضا در ۹۱۱ ساعت از ایام ناترازی)، تنها با مدیریت مصرف معادل کاهش تقاضای ناشی از ۲ درجه افزایش دما، می‌توان تا ۱۵۰ ساعت از ۱۷۵ ساعت ناترازی در ناحیه اوج بحرانی را برطرف کرد.**

پیشنهاد راهکارهای تقنینی، نظارتی یا سیاستی

• **توسعه هدفمند ظرفیت تولید نیروگاهی:** با توجه به پراکندگی الگوی زمانی ناترازی در طول شبانه‌روز و وابستگی بیش از ۹۰ درصد ظرفیت تولید برق کشور به گاز و سوخت‌های مایع، لازم است احداث نیروگاه‌های جدید براساس رویکردی جامع و هماهنگ انجام شود. این رویکرد باید شامل بررسی دقیق الگوی زمانی ناترازی، ارزیابی ظرفیت‌ها و محدودیت‌های منابع مختلف و هدف‌گذاری برای تنوع‌بخشی به سبد تولید برق باشد.

• **توسعه ابزارهای مدیریت تقاضا:** به‌کارگیری سیاست‌های پاسخ‌گویی بار، جابه‌جایی بار به ساعات کم‌مصرف، و قراردادهای تعدیل بار، ازجمله راهکارهای مؤثر برای کنترل اوج بار بحرانی و کاهش نیاز به ظرفیت‌سازی گسترده هستند.

• **ارتقای بهره‌وری انرژی در بخش خانگی:** با توجه به سهم بالای تجهیزات سرمایشی در پیک مصرف، سخت‌گیری در استاندارد ساخت تجهیزات انرژی‌بر نظیر بارهای سرمایشی، جایگزینی کولرهای پرمصرف با نمونه‌های پربازده و اصلاح رفتار مصرفی (اجتناب از مصارف غیرضروری در زمان پیک روزانه)، در کاهش بار سرمایشی مؤثر خواهد بود.

• **بازنگری در توسعه صنایع پرمصرف انرژی:** توسعه بی‌ضابطه این صنایع در شرایط محدودیت زیرساخت‌های تولید مانند گاز، برق و آب، از عوامل تشدید ناترازی بوده و نیازمند سیاستگذاری دقیق، مکان‌یابی بهینه و الزام به سرمایه‌گذاری در حوزه نیروگاه‌های خودتأمین است.

• **پیش‌بینی اقلیم و راهبردهای تطبیقی:** با توجه به نوسانات بارندگی و گرمایش اقلیم، طراحی برنامه‌های تولید باید برپایه سناریوهای اقلیمی واقع‌گرایانه انجام شود تا ریسک وابستگی به منابع آسیب‌پذیر نظیر نیروگاه‌های آبی کاهش یابد.

۱. مقدمه

صنعت برق به‌منظور تأمین پایدار انرژی، نیازمند حفظ توازن دائمی و دقیق میان تولید و مصرف برق در تمامی لحظات است؛ توازنی که در ادبیات فنی به‌عنوان «تعادل لحظه‌ای شبکه» شناخته می‌شود و یکی از اصلی‌ترین شروط پایداری فنی و عملکرد ایمن شبکه برق است. بااین‌حال، در سال‌های اخیر و به‌ویژه در سال ۱۴۰۳، این تعادل حیاتی با اختلالات نگران‌کننده‌ای مواجه شده و پدیده ناترازی میان تولید و تقاضا به یکی از چالش‌های راهبردی صنعت برق کشور تبدیل شده است.

بروز ناترازی لحظه‌ای با شدتی بی‌سابقه و ثبت اختلاف ۱۷،۵۵۷ مگاوات میان حداکثر نیاز تقاضا و توان تولیدی در روز ۱۷ مرداد ۱۴۰۳، گواهی واضح بر فشار فزاینده‌ای است که بر ظرفیت‌های تولید برق موجود وارد شده است. این وضعیت نه‌تنها از ناکافی بودن توان عملیاتی شبکه در پاسخ‌گویی به رشد بی‌رویه تقاضا پرده برمی‌دارد، بلکه ناکارآمدی رویه‌ها و سیاست‌های پیشین در مدیریت عرضه و تقاضا را نیز آشکار می‌سازد. در چنین شرایطی، بازنگری جامع در سیاست‌های مدیریت مصرف و نظام سرمایه‌گذاری در صنعت برق، ضرورتی انکارناپذیر و گامی کلیدی در مسیر عبور از بحران فعلی محسوب می‌شود.

در سال‌های اخیر، کمبود برق به یکی از مسائل اساسی و راهبردی کشور تبدیل شده است که معمولاً تحت عنوان «ناترازی برق» مطرح می‌شود. با این حال، در بسیاری از گزارش‌ها و تحلیل‌های رسمی، ناترازی برق عمدتاً به صورت اختلاف لحظه‌ای بین تولید و تقاضای برق یا همان ناترازی توان بیان شده است؛ رویکردی که نمی‌تواند به‌طور کامل وضعیت واقعی شبکه را بازتاب دهد. در مقابل، شاخص ناترازی انرژی، که کسری تجمعی برق را در بازه‌های زمانی مختلف مانند ساعت، روز یا فصل اندازه‌گیری می‌کند، دیدی دقیق‌تر و جامع‌تر نسبت به کمبود برق ارائه می‌دهد. این شاخص، پایه‌ای مناسب‌تر برای تحلیل‌های دقیق‌تر، برنامه‌ریزی تولید، مدیریت مصرف و تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری است.

درک عمیق‌تر از ابعاد بحران ناترازی برق، مستلزم شناخت دقیق مفاهیم بنیادینی همچون ماهیت ناترازی، انواع آن و نحوه بروز و تداوم آن در بستر واقعی شبکه برق کشور است. تحلیل این پدیده نه‌تنها در قالب شاخص‌های فنی نظیر ناترازی توان و ناترازی انرژی صورت می‌پذیرد، بلکه با بهره‌گیری از ابزارهایی نظیر منحنی تداوم تقاضا و مقایسه آن با ظرفیت واقعی تولید، می‌توان به تصویری واضح از شدت، گستره و الگوی زمانی ناترازی در سال ۱۴۰۳ دست یافت. در ادامه این گزارش، ابتدا به معرفی مفهومی و فنی ناترازی و ابعاد کمّی آن پرداخته می‌شود و سپس، با تحلیل ساختاری و عملکردی شبکه برق کشور، عوامل مؤثر در شکل‌گیری این ناترازی‌ها مورد واکاوی قرار خواهد گرفت. در بخش پایانی، جمع‌بندی یافته‌ها به‌همراه مجموعه‌ای از پیشنهادهای سیاستی و اجرایی، مسیرهای ممکن برای ارتقای تاب‌آوری شبکه و کاهش ناترازی در کوتاه‌مدت و بلندمدت را ترسیم خواهد کرد.

۲. ناترازی برق و ابعاد آن در ایران

درک صحیح از پدیده ناترازی برق، نخستین گام در تحلیل ریشه‌ای بحران‌های روزافزون شبکه برق کشور است. ناترازی،[1] زمانی رخ می‌دهد که توازن میان تولید و تقاضای برق از بین می‌رود و سیستم قادر به تأمین تمامی نیاز تقاضای بار نیست. این اختلال می‌تواند به‌صورت آنی یا تجمیعی نمایان شود و آثار فنی و اقتصادی قابل‌توجهی بر پایداری شبکه به‌جا گذارد.

ناترازی برق در دو بُعد اصلی قابل تحلیل است: ناترازی توان[2] و ناترازی انرژی.[3] ناترازی توان به اختلاف لحظه‌ای بین توان تولیدی و تقاضا در یک زمان مشخص اشاره دارد و به‌طور مستقیم بر فرکانس شبکه اثر می‌گذارد. این نوع

1. Imbalance
2. Power Imbalance
3. Energy Imbalance

ناترازی ممکن است در کسری از ثانیه رخ دهد. به‌عنوان مثال، روشن شدن ناگهانی یک کارخانه بزرگ یا خروج یک نیروگاه از مدار می‌تواند تعادل شبکه را برهم زده و منجر به افت فرکانس شود. در چنین شرایطی، اقدامات اضطراری مانند قطع بار یا فعال‌سازی سریع نیروگاه‌های رزرو چرخان برای بازگرداندن تعادل ضروری است.

ناترازی انرژی به میانگین اختلاف تجمعی میان انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان و انرژی واقعی تولید شده در یک بازه زمانی مشخص (اعم از ساعتی، روزانه، ماهیانه، فصلی یا سالیانه) اطلاق می‌شود. ناترازی انرژی بیش از هر چیز به مسائل مربوط به برنامه‌ریزی تولید و تأمین منابع بازمی‌گردد. این نوع ناترازی معمولاً از کمبود تولید یا محدودیت در دسترسی به منابع اولیه برای تولید برق ناشی می‌شود. برای مثال، اگر سرعت رشد مصرف برق از سرعت توسعه ظرفیت تولید در یک برهه زمانی چند ساله فراتر رود، توازن عرضه و تقاضا به‌هم می‌خورد. این عدم توازن، افزون بر ایجاد ناترازی در توان، می‌تواند به بروز ناترازی در انرژی نیز منجر شود. همچنین، محدودیت در منابع اولیه نیز تأثیر چشمگیری بر ناترازی انرژی دارد؛ برای نمونه، کاهش بارندگی و افت سطح ذخایر آب پشت سدها می‌تواند توان تولید نیروگاه‌های برق‌آبی را کاهش دهد. این کاهش تولید، در بلندمدت به ناترازی انرژی منجر می‌شود. در فصل زمستان نیز افزایش مصرف گاز طبیعی برای گرمایش خانگی ممکن است موجب کاهش سهمیه سوخت نیروگاه‌های حرارتی شود. در نتیجه، این نیروگاه‌ها قادر نخواهند بود با ظرفیت کامل فعالیت کنند و میزان تولید آن‌ها کاهش می‌یابد.

برای درک بهتر تفاوت میان ناترازی توان و ناترازی انرژی، می‌توان به نمونه‌ای واقعی از تاریخ ۱۷ مرداد ۱۴۰۳ باتوجه به داده‌های ثبت‌شده توسط شرکت مدیریت شبکه برق ایران اشاره کرد. میزان تقاضای برق ثبت‌شده برابر با ۷۵،۹۵۷ مگاوات در بازه زمانی ساعت ۱۴:۰۰ تا ۱۵:۰۰ بوده است. از آنجا که حداکثر توان تولیدی قابل دسترس در این بازه زمانی تنها ۶۲،۳۱۵ مگاوات بوده، اختلاف میان این دو مقدار منجر به ناترازی انرژی‌ای معادل ۱۳،۶۴۲ مگاوات در بازه ساعتی مذکور شده است. از سوی دیگر، در همان روز و در ساعت ۱۴:۲۷، تقاضای لحظه‌ای برق به ۷۹،۸۷۲ مگاوات رسید که منجر به اختلاف ۱۷،۵۵۷ مگاواتی در آن لحظه شده است. لذا تفاوت کلیدی میان ناترازی توان و ناترازی انرژی در ماهیت زمانی و اثرگذاری آن‌ها بر شبکه برق نهفته است. ناترازی توان به اختلاف لحظه‌ای میان تولید و تقاضای برق اشاره دارد و تأثیری مستقیم بر پایداری آنی شبکه و فرکانس دارد؛ در حالی‌که ناترازی انرژی به کسری انباشته انرژی تولیدی نسبت به نیاز مصرف‌کنندگان در یک بازه زمانی مشخص اطلاق می‌شود و بیشتر ناشی از کاستی در برنامه‌ریزی تولید و تأمین منابع است. در تحلیل‌های علمی و فنی، ناترازی انرژی باید به‌عنوان شاخص اصلی کمبود برق مدنظر قرار گیرد؛ زیرا این شاخص بیانگر کسری تجمعی واقعی بوده و مبنای دقیقی برای تصمیم‌گیری، سرمایه‌گذاری و مدیریت تقاضا فراهم می‌آورد.

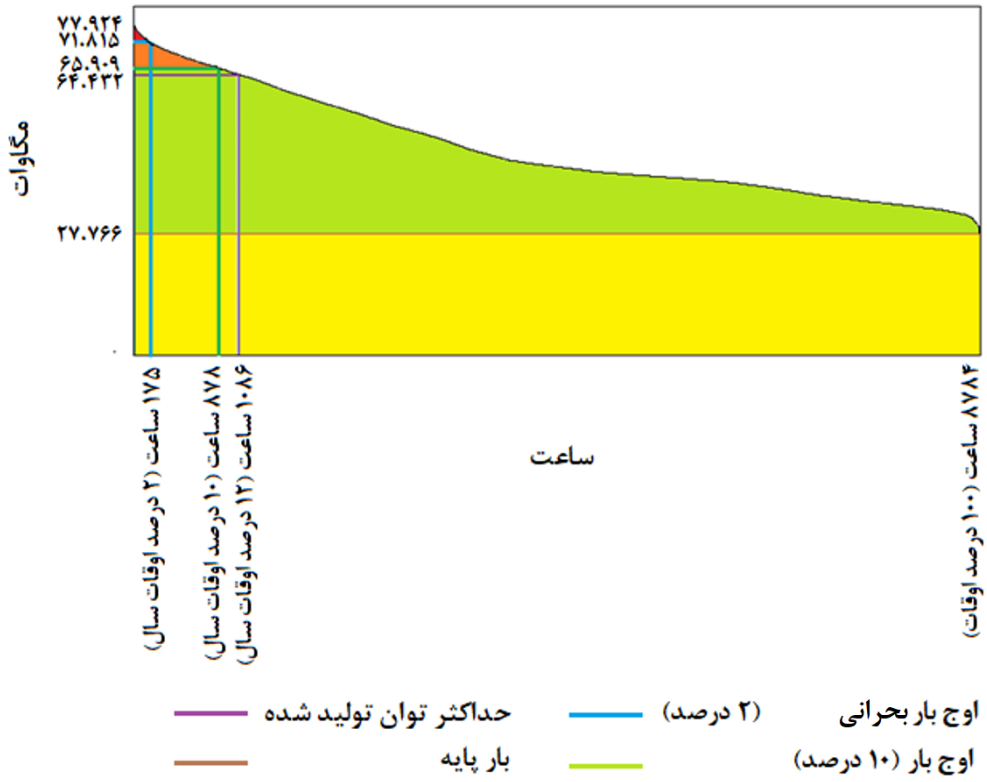
در ادامه با استفاده از منحنی تداوم تقاضا[1] و ظرفیت عملیاتی نیروگاه‌ها، ابعاد ناترازی انرژی و تأثیر آن بر بهره‌برداری از شبکه برق کشور بررسی شده و با نگاهی به ریشه‌های ساختاری، اقتصادی و مدیریتی، علل پدید آمدن این وضعیت تحلیل خواهد شد.

در شکل ۱ منحنی تداوم تقاضا در سال ۱۴۰۳ نشان داده شده که نمایان‌گر میزان تقاضای برق در هر ساعت،[2]

1. Load Duration Curve

۲. در منحنی تداوم تقاضا، مقدار تقاضای برق برای هر ساعت از سال به‌صورت عددی ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ این درحالی است که در واقعیت، تقاضای برق در هر دقیقه از آن ساعت دچار نوسان بوده و به‌طور پیوسته تغییر می‌کند. درواقع، مقدار تقاضا در هر ساعت نمایان‌گر میانگین تقاضاهای ثبت شده در هر دقیقه از آن ساعت است.

بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های تولید، انتقال و توزیع است. منحنی تداوم تقاضا یک نمایش آماری و غیرزمان‌مند از رفتار مصرف برق ارائه می‌دهد. در این شکل، مقادیر تقاضای برق در طول یک بازه زمانی معین (معمولاً یک‌ساله)، به‌صورت نزولی مرتب شده و ترسیم می‌شوند. این بازچینش، امکان تحلیل میزان پایداری، تکرارپذیری و فراوانی سطوح مختلف بار مصرفی را فراهم می‌سازد.[1] این منحنی یکی از ابزارهای کلیدی در تحلیل ناترازی در سیستم‌های قدرت به‌شمار می‌رود. **با استفاده از آن می‌توان نقاط بحرانی ناشی از عدم توازن میان تولید و مصرف انرژی را شناسایی کرد و روندهای احتمالی افزایش ناترازی را پایش کرد. درنتیجه، این منحنی نقش مهمی در تدوین استراتژی‌های مدیریت مصرف و پاسخ به تقاضا ایفا می‌کند تا از بروز بحران‌های سیستم جلوگیری شود و پایداری و امنیت شبکه حفظ شود.**



شکل ۱. منحنی تداوم تقاضا در سال ۱۴۰۳

مأخذ: محاسبات نگارنده براساس داده‌های شرکت مدیریت شبکه برق ایران در سال ۱۴۰۳.

در میان سایر کاربردهای مهم منحنی تداوم تقاضا، افزون‌بر تحلیل ناترازی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. توسعه هدفمند رویکرد عرضه‌محور و تقاضامحور مبتنی‌بر تحلیل منحنی تداوم تقاضا: تحلیل منحنی تداوم تقاضا، امکان طراحی هم‌زمان و هدفمند سیاست‌های عرضه‌محور (مدیریت تولید) و تقاضامحور (مدیریت مصرف)

۱. لازم به ذکر است که آنچه در این منحنی به تصویر کشیده می‌شود، برق مورد تقاضای مصرف‌کنندگان است و در آن تأثیری از محدودیت‌های فنی تولید، ظرفیت خطوط انتقال، یا سیاست‌های مدیریت مصرف دیده نمی‌شود.

را فراهم می‌سازد و مبنایی برای **انتخاب فناوری تولید و برنامه‌های مدیریت مصرف** است [۱].

۲. تحلیل اقتصادی بهره‌برداری از واحدهای تولید: منحنی تداوم تقاضا، امکان برنامه‌ریزی دقیق برای راه‌اندازی و خاموش‌سازی اقتصادی نیروگاه‌ها را فراهم می‌کند [۳-۲].

۳. محاسبه شاخص‌های عملکرد سیستم قدرت: از منحنی تداوم تقاضا برای محاسبه ضریب بار، ضریب بهره‌برداری ظرفیت، ضریب استفاده از نیروگاه و ضریب ذخیره که برای ارزیابی اقتصادی بودن، قابلیت اطمینان و میزان استفاده واقعی از ظرفیت نصب شده است، بهره می‌برند [۴].

۴. مدل‌سازی و تحلیل در مطالعات احتمالاتی: از منحنی تداوم تقاضا در شبیه‌سازی‌های پیشرفته مانند شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌عنوان مبنای داده‌ای جهت تحلیل عدم قطعیت در سناریوهای آینده استفاده می‌شود. همچنین در مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و تعادل عمومی، برای تحلیل ترکیب بهینه تولید و مصرف به‌کار می‌رود [۵].

۵. تحلیل بازار برق و بهینه‌سازی بهره‌برداری نیروگاهی: منحنی تداوم تقاضا در کنار منحنی تداوم قیمت، ابزار تحلیلی مؤثری برای درک رفتار بازار برق و بررسی پویایی عرضه و تقاضا در بازه‌های زمانی مختلف به‌شمار می‌روند. ترکیب این دو منحنی، امکان تحلیل هم‌زمان الگوی مصرف و توزیع زمانی قیمت‌ها را فراهم کرده و به شناسایی بازه‌های بحرانی با قیمت بالا یا پایین کمک می‌کند. براساس این تحلیل، می‌توان احتمال استفاده از واحدهای نیروگاهی پیکی را در شرایط اوج بار برآورد کرد و اثر آنها را بر افزایش قیمت نهایی بازار برق مورد بررسی قرار داد. به‌عبارت‌دیگر، منحنی تداوم قیمت، توزیع تجمعی معکوسی از قیمت‌های بازار را ارائه می‌دهد که مشخص می‌کند در چه درصدی از زمان، قیمت از آستانه مشخصی فراتر می‌رود. این اطلاعات برای طراحی تعرفه‌های پویا، استراتژی‌های پاسخ‌گویی بار و بهینه‌سازی اقتصادی بهره‌برداری از شبکه برق اهمیت بالایی دارد [۶].

در منحنی تداوم تقاضا (شکل ۱) **در تحلیل ناترازی**، چند سطح کلیدی از تقاضا و حداکثر ظرفیت تولید مشخص شده‌اند [۸-۷]:[۱]

- **بار پایه:**[۲] به سطحی از تقاضای برق اطلاق می‌شود که در تمامی ساعات شبانه‌روز و در طول کل سال (۱۰۰ درصد اوقات) **با پایداری نسبی** وجود دارد و کمترین میزان بار شبکه را در هر لحظه تشکیل می‌دهد. این نوع بار نمایان‌گر نیازهای مداوم و اجتناب‌ناپذیر مصرف‌کنندگان، مانند مصرف خانگی پایه (نظیر یخچال)، بیمارستان‌ها، مراکز داده، سیستم‌های حیاتی شهری و زیرساخت‌های حیاتی است که به‌طور شبانه‌روزی فعال هستند و حتی در ساعات کم‌مصرف نیز از شبکه برق تغذیه می‌شوند. بار پایه از منظر بهره‌برداری و برنامه‌ریزی، به‌عنوان قابل پیش‌بینی‌ترین و پایدارترین بخش تقاضای برق شناخته می‌شود و بنابراین، تأمین آن به **نیروگاه‌هایی با ظرفیت تولید بالا و قابلیت بهره‌برداری پیوسته** نظیر نیروگاه‌های حرارتی بزرگ و نیروگاه‌های هسته‌ای واگذار می‌شود. این نیروگاه‌ها معمولاً زمان راه‌اندازی نسبتاً طولانی دارند، با ضریب آمادگی بالا در مدار باقی می‌مانند و بازده اقتصادی بالایی در تولید مستمر

---

۱. در مطالعات مهندسی از «قاعده سرانگشتی» (Rule of Thumb) برای تخمین سهم ساعات سالیانه تخصیص‌یافته به بارهای پایه، میانی و اوج استفاده می‌شود. این قاعده به روشی ساده و کلی اطلاق می‌شود که بیشتر برپایه تجربه و مشاهده عملی بنیان نهاده شده است تا محاسبات دقیق ریاضی یا شبیه‌سازی‌های پیچیده. این اعداد عمدتاً براساس مطالعه منحنی‌های تداوم بار در شبکه‌های مختلف و تجمیع تجربیات عملی مهندسان استخراج می‌شوند، اما باید توجه داشت که ممکن است با توجه به شرایط اقلیمی و الگوی مصرف منطقه، تغییرات قابل‌توجهی داشته باشند.

2. Base Load

دارند. در این سطح از بار، **اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف**، ازجمله بهینه‌سازی عملکرد تجهیزات با بسامد عملکرد بالا در طول سال، نظیر یخچال‌ها و تجهیزات سرمایشی در بخش خانگی و نیز پمپ‌ها و الکتروموتورها در بخش صنعتی، همراه با ارتقای بهره‌وری انرژی، نقشی مؤثر در کاهش تقاضای پایدار ایفا می‌کند. تأمین پایدار بار پایه، برای حفظ تعادل و پایداری شبکه برق از اهمیت راهبردی برخوردار است و هرگونه اختلال در تأمین آن می‌تواند موجب بروز ناپایداری‌های جدی در عملکرد سیستم قدرت شود. در شکل ۱، ناحیه زرد رنگ واقع در زیر خط افقی قرمز رنگ با مقدار حدود ۲۷،۷۶۶ مگاوات، نشان‌دهنده سطح بار پایه شبکه در سال مورد بررسی است. این عدد نمایان‌گر حداقلی‌ترین سطح تقاضا در شبکه سراسری برق است که تقریباً در تمامی ساعات سال تکرار شده و مبنای برنامه‌ریزی مطمئن برای تأمین تقاضا محسوب می‌شود.

- **اوج بار:** [1] به بالاترین سطح از تقاضای برق اطلاق می‌شود که شبکه در بازه‌های زمانی محدودی از سال با آن مواجه می‌شود. این نوع بار معمولاً درنتیجه مصرف هم‌زمان و فشرده مصرف‌کنندگان در ساعات یا روزهایی با شرایط اقلیمی خاص، مانند روزهای بسیار گرم تابستان، به وقوع می‌پیوندد. بار اوج از ویژگی‌هایی همچون **شدت بالا، تکرار پایین و نوسان‌پذیری بالا** برخوردار است و مدیریت آن یکی از چالش‌های اصلی بهره‌برداری از شبکه برق به‌شمار می‌رود. در شکل ۱، ناحیه‌های قرمز و نارنجی رنگ که بالای خط افقی سبز رنگ در سطح ۶۵،۹۰۹ مگاوات قرار دارند، نشان‌دهنده بار اوج هستند که تنها در حدود ۱۰ درصد از ساعات سال (تقریباً معادل ۸۷۸ ساعت در سال) رخ می‌دهد. این سطح از بار، فراتر از بار میانی و پایه قرار گرفته و عمدتاً به‌وسیله نیروگاه‌هایی با قابلیت راه‌اندازی سریع، مانند نیروگاه‌های گازی پیک‌بار یا دیزلی تأمین می‌شود. این نیروگاه‌ها به‌دلیل قابلیت پاسخ‌گویی فوری به تغییرات ناگهانی تقاضا و زمان روشن شدن کوتاه، برای مقابله با بارهای ناپایدار و مقطعی مناسب هستند. در میان نیروگاه‌های تجدیدپذیر، اگرچه انرژی‌های خورشیدی به‌طور کنترلی قابلیت تطابق با پیک بار را ندارند، اما در کشور به‌دلیل هم‌راستایی پیک تولید خورشیدی با پیک مصرف میانی روز گزینه مناسبی است. در این سطح از بار، **اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف**، نظیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، تعرفه‌های تشویقی و کاهش بار مشترکین عمده برای مهار رشد تقاضا بسیار برجسته است. اوج بار معمولاً به دو بخش قابل تفکیک است: اوج بار غیربحرانی (ناحیه نارنجی) و اوج بار بحرانی (ناحیه قرمز). همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ناحیه قرمز رنگ واقع در بالای خط افقی آبی (تقاضای ۷۱,۸۱۵ مگاوات) معرف ناحیه بار بحرانی است که تنها حدود ۲ درصد از کل ساعات سال (۱۷۵ ساعت) را شامل می‌شود و از بحرانی‌ترین حالت‌های بهره‌برداری شبکه است. در این ناحیه، تقاضا در بیشترین میزان بوده، که با نوسانات شدید و غیرقابل پیش‌بینی همراه است و در ساعات کمی از سال و با شیب‌های تند تقاضا بروز می‌یابد. در چنین شرایطی، نیروگاه‌های احداث شده برای پاسخ‌گویی به این مقدار محدود از تقاضا، با فرض ثابت ماندن تقاضا معادل تقاضای سال ۱۴۰۳، بخش عمده‌ای از سال بدون استفاده باقی خواهند ماند. این درحالی است که هزینه سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری این نیروگاه‌ها همچنان پابرجاست و بار مالی قابل‌توجهی را به صنعت برق تحمیل می‌کند. ازاین‌رو، تأمین اوج بار بحرانی از طریق ابزارهای مدیریت تقاضا نظیر جابه‌جایی بار، کاهش داوطلبانه مصرف، انعقاد قراردادهای

1. Peak Load

پاسخ‌گویی بار راهکارهایی به‌مراتب چابک‌تر، کم‌هزینه‌تر و انعطاف‌پذیرتر به‌شمار می‌روند که ضمن حفظ پایداری شبکه، به بهینه کردن سرمایه‌گذاری‌ها در بخش تولید برق نیز کمک قابل‌توجهی می‌کند.

• **بار میانی:**[1] بار میانی به بخشی از تقاضای برق اطلاق می‌شود که در درصد قابل‌توجهی از ساعات سال، به‌صورت **منظم، نسبتاً پایدار و قابل پیش‌بینی** ظاهر می‌شود؛ **نه به‌طور مداوم مانند بار پایه و نه با فراوانی اندک مانند بار اوج.**[2] این ناحیه از بار، از منظر برنامه‌ریزی بهره‌برداری و طراحی سیستم، جایگاه ویژه‌ای دارد؛ چراکه سهم عمده‌ای از مصرف سالیانه برق کشور را شامل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱، ناحیه‌ای که با رنگ سبز مشخص است، بازه‌ای می‌باشد که به‌طور تقریبی بین ۲۷،۷۶۶ تا ۶۵،۹۰۹ مگاوات قرار دارد، به‌عنوان ناحیه بار میانی شبکه برق در سال ۱۴۰۳ قابل شناسایی است. نیروگاه‌های با **راندمان نسبتاً بالا که توانایی پاسخ‌گویی با انعطاف‌پذیری مناسبی به نوسانات بار** را دارند، گزینه‌های مناسب هستند. نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به‌دلیل راندمان بالا و قابلیت تطبیق با بار متغیر، از رایج‌ترین گزینه‌ها به‌شمار می‌آیند. همچنین در میان منابع تجدیدپذیر، نیروگاه‌های زیست‌توده به‌دلیل پایداری نسبی در تولید و امکان بهره‌برداری قابل کنترل، گزینه‌ای مناسب برای بار میانی محسوب می‌شوند. ازسوی‌دیگر، نیروگاه‌های خورشیدی و بادی نیز می‌توانند در بخش‌هایی خاص از بار میانی مورد استفاده قرار گیرند. به‌عنوان مثال، تولید نیروگاه‌های خورشیدی عمدتاً در ساعات میانی روز متمرکز بوده و می‌تواند بار میانی میان‌روزی را تأمین کند. در این سطح از بار، **اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف،** نظیر برنامه‌هایی مانند جابه‌جایی بار به ساعات کم‌مصرف، کنترل هوشمند تجهیزات (استفاده از ترموستات در تجهیزات سرمایشی) می‌توانند با منابع تولید ترکیب شده و بهره‌برداری بهینه را تسهیل کنند.

جدول ۱، تصویری جامع از ساختار مصرف برق کشور در سال ۱۴۰۳ برمبنای منحنی تداوم تقاضا ارائه می‌دهد. در این جدول، بخش‌های مختلف تقاضا به تفکیک نوع و ویژگی بار (پایه، میانی و اوج) طبقه‌بندی شده‌اند و هر بخش براساس سهم آن در کل ساعات سال، ویژگی‌های عملیاتی و راهکارهای پیشنهادی برای تأمین یا مدیریت آن تشریح شده است.

اطلاعات مندرج در جدول، از اهمیت اساسی در تحلیل بهره‌برداری از شبکه، طراحی ظرفیت نیروگاهی و تدوین راهبردهای مدیریت تقاضا برخوردار است. در سال ۱۴۰۳، حداکثر ظرفیت تولید نیروگاهی برابر با ۶۴،۴۳۲ مگاوات بوده است (مطابق ردیف اول جدول ۱ و خط بنفش در شکل ۱). **با فرض امکان تأمین این ظرفیت در هر لحظه دلخواه** و با توجه به مقدار حداکثر تقاضای ساعتی[3] برق معادل ۷۷،۹۲۴ مگاوات، میزان ناترازی بین حداکثر ظرفیت تولید و تقاضا حدود ۱۳،۵۰۲ مگاوات برآورد می‌شود که این ناترازی منجر به بروز کمبود عرضه در حدود ۱،۰۸۶ ساعت در طول سال شده است. با توجه به ضریب عملکرد ۸۰ درصدی (متوسط نسبت ظرفیت عملی به ظرفیت نامی نیروگاه) ظرفیت نیروگاهی جدید مورد نیاز برای تأمین این حجم از تقاضا معادل ۱۶،۸۷۷ مگاوات برآورد می‌شود.

---

1. Intermediate Load

۲. در برخی مدل‌های منحنی تداوم تقاضا، تقاضا به چند بازه زمانی شامل پایه، بار میانی پایین، بار میانی بالا و بخش اوج بار تقسیم می‌شود. این تقسیم‌بندی‌ها معمولاً بسته به شرایط خاص هر کشور متفاوت است.

۳. در منحنی تداوم تقاضا، مقدار تقاضای برق برای هر ساعت از سال به‌صورت عددی ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ این درحالی است که در واقعیت، تقاضای برق در هر دقیقه از آن ساعت دچار نوسان بوده و به‌طور پیوسته تغییر می‌کند. درواقع، مقدار تقاضا در هر ساعت نمایان‌گر میانگین تقاضاهای ثبت شده در هر دقیقه از آن ساعت است. ازاین‌رو، هرچند در سال ۱۴۰۳ میزان تقاضای لحظه‌ای برق در یک لحظه به ۷۹،۸۷۲ مگاوات رسید، اما بیشینه تقاضای ساعتی ثبت شده معادل ۷۷،۹۲۴ مگاوات بوده است.

ناترازی ظرفیت تولید و تقاضا عمدتاً در سه ناحیه مشخص قابل مشاهده است:

- نخست، ناحیه اوج بار بحرانی در بازه ۷۱،۸۱۵ تا ۷۷،۹۳۴ مگاوات است که به‌دلیل وقوع محدود (حدود ۱۷۵ ساعت در سال) و ماهیت نوسانی بالای آن، باید از طریق اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مدیریت شود.
- دوم، ناحیه اوج بار غیربحرانی در بازه ۶۵،۹۰۹ تا ۷۱،۸۱۵ مگاوات است که حدود ۷۰۳ ساعت از سال را شامل می‌شود که باید با ایجاد ظرفیت تولید جدید به آن پاسخ داده شود.
- سوم، ناحیه بار میانی در بازه ۶۴،۴۳۲ تا ۶۵،۹۰۹ مگاوات است که حدود ۲۰۸ ساعت از سال را شامل می‌شود که باید با ایجاد ظرفیت تولید جدید به آن پاسخ داده شود. نکته قابل تأمل و نگران‌کننده گسترش ناترازی به بخشی از این ناحیه است، ناحیه‌ای که در شکل ۱ بین خطوط افقی بنفش و سبزرنگ مشخص شده است. پدیده‌ای که نشان‌دهنده شکاف عمیق میان ظرفیت تولید و تقاضاست. به‌عبارت‌دیگر، نه‌تنها کل ناحیه اوج بار با کمبود ظرفیت تولید مواجه شده، بلکه این کمبود به ناحیه‌ای سرایت کرده است که پیشتر به‌عنوان ناحیه‌ای پایدار شناخته می‌شد. این وضعیت به‌روشنی نشان می‌دهد که چالش ناترازی در صنعت برق کشور، دیگر منحصر به زمان اوج مصرف نیست، بلکه به سطوحی از بار که دارای فراوانی و پایداری بالاتری هستند نیز گسترش یافته است. این امر، لزوم بازنگری جدی در الگوهای سرمایه‌گذاری، برنامه‌ریزی تولید، و سیاست‌های مدیریت تقاضا را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

جدول ۱. سطوح کلیدی تقاضای برق و ویژگی‌های هر سطح در منحنی تداوم تقاضا سال ۱۴۰۳

ردیف	عنوان بخش از تقاضا	مقدار یا محدوده (مگاوات)	درصد اوقات سال	تعداد ساعت	راهکار و ملاحظات
۱	حداکثر ظرفیت تولید	۶۴،۴۳۲	-	-	حداکثر توان در دسترس نیروگاه‌های کشور؛ مرز آغاز اعمال خاموشی‌ها در صورت عبور تقاضا
۲	بار پایه	۲۷،۷۶۶	۱۰۰ درصد	۸،۷۸۴[1]	بار پایدار، حیاتی برای حفظ پایداری شبکه، تأمین توسط نیروگاه‌های با ظرفیت دائم
۳	بار میانی	۶۵،۹۰۹-۲۷،۷۷۶	اغلب اوقات	اغلب ساعات	بخش عمده بار شبکه در اغلب ساعات، نیازمند ترکیبی از نیروگاه‌های حرارتی، برقآبی و تجدیدپذیر
۴	اوج بار	۷۷،۹۳۴-۶۵،۹۰۹	۱۰ درصد	۸۷۸	تقاضای مصرفی بالاتر از سطح معمول که در تابستان و زمان‌های خاص رخ می‌دهد. تفکیک شده به دو بخش اوج بار غیربحرانی و اوج بار بحرانی
۵	اوج بار غیربحرانی	۷۱،۸۱۵-۶۵،۹۰۹	۸ درصد	۷۰۳	بخش قابل پیش‌بینی از اوج بار؛ تأمین توسط نیروگاه‌های گازی پیک بار با زمان راه‌اندازی کوتاه
۶	اوج بار بحرانی	۷۷،۹۳۴-۷۱،۸۱۵	۲ درصد	۱۷۵	بدون تخصیص ظرفیت تولید، تأمین از طریق مدیریت مصرف

مأخذ: محاسبات نگارنده براساس داده‌های شرکت مدیریت شبکه برق ایران در سال ۱۴۰۳.

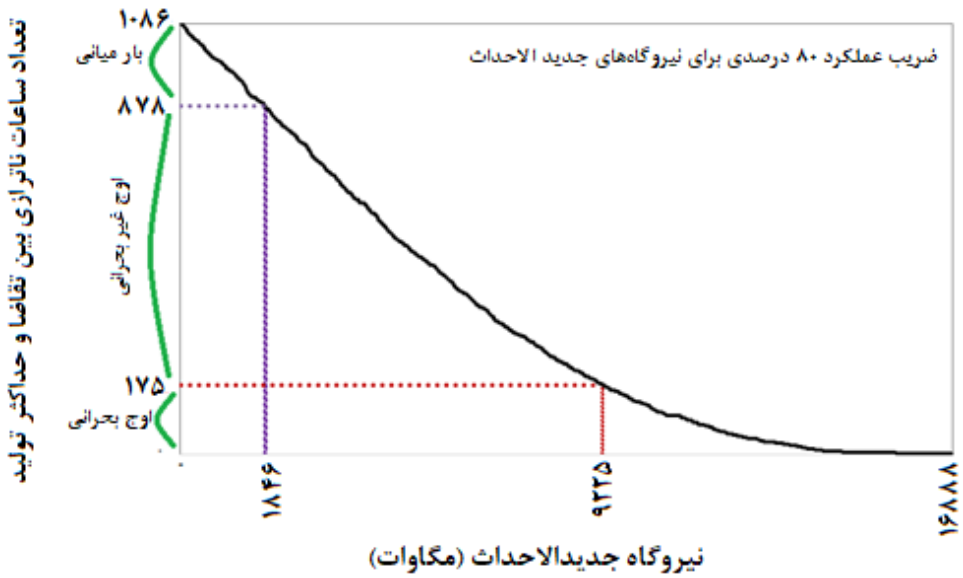
در تکمیل اطلاعات جدول ۱، شکل ۲ که برپایه داده‌های منحنی تداوم تقاضا (شکل ۱) تهیه شده، تأثیر سناریوهای مختلف توسعه ظرفیت نیروگاهی در کاهش ساعات ناترازی شبکه برق را نشان می‌دهد.

مطابق آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است، احداث حدود ۱،۸۴۶ مگاوات ظرفیت جدید، منجر به حذف ناترازی در بخش بار میانی می‌شود که معادل ۲۰۸ ساعت از مجموع ساعات ناترازی سالیانه است. در گام بعد، احداث ۹،۲۲۵ مگاوات نیروگاه جدید باعث کاهش قابل‌توجه ۹۱۱ ساعت از مجموع ۱،۰۸۶ ساعت ناترازی می‌شود و آن را به ۱۷۵ ساعت در سال محدود می‌سازد. به‌عبارتی، با تحقق تنها ۵۵ درصد از ظرفیت نیروگاهی برآورد شده مورد نیاز برای

۱. سال ۱۴۰۳ هجری شمسی سال کبیسه بوده است.

حذف کامل ناترازی، می‌توان مشکل ناترازی در ۸۴ درصد از ساعاتی که در آن با تقاضای تأمین نشده مواجه هستیم را مرتفع کرد. ۱۶ درصد زمان باقی مانده‌ای که با ناترازی مواجه هستیم، صرفاً مربوط به ناحیه اوج بار بحرانی است که تنها در حدود ۲ درصد از ساعات سال رخ می‌دهد.

درنهایت، اگر ظرفیت تولید به میزان ۱۶،۸۸۸ مگاوات افزایش یابد، تمامی ساعات ناترازی (۱،۰۸۶ ساعت) سال ۱۴۰۳ به‌طور کامل حذف خواهد شد. با وجود آنکه این سناریو از منظر حذف کامل خاموشی‌ها ایده‌آل تلقی می‌شود، اما تحقق آن مستلزم سرمایه‌گذاری بسیار کلان برای تأمین تقاضایی است که عمدتاً در بازه‌های کوتاه‌مدت پدید می‌آید. ازاین‌رو، اتخاذ رویکردی مبتنی‌بر ترکیب توسعه ظرفیت تولید با به‌کارگیری ابزارهای مدیریت تقاضا نظیر جابه‌جایی بار، پاسخ‌گویی داوطلبانه و قراردادهای تعدیل بار می‌تواند راهکاری کارآمدتر باشد.



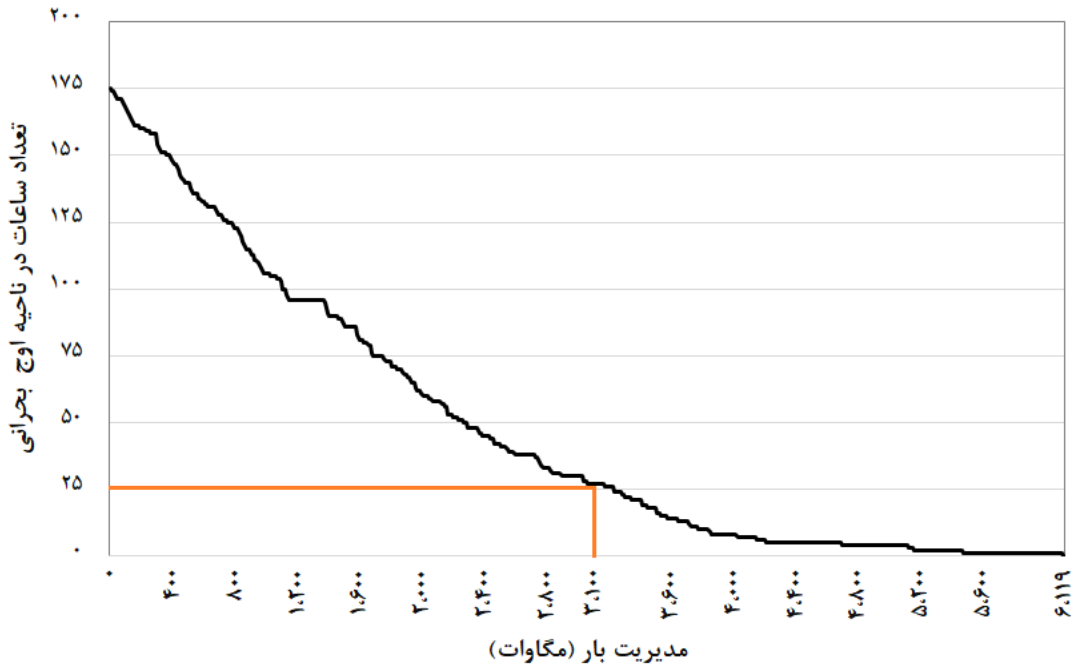
شکل ۲. نمودار تأثیر میزان توسعه نیروگاه‌ها بر کاهش ساعات ناترازی شبکه برق در سال ۱۴۰۳

مأخذ: محاسبات نگارنده براساس داده‌های شرکت مدیریت شبکه برق ایران در سال ۱۴۰۳.

حال با **فرض احداث** ۹،۲۲۵ مگاوات ظرفیت جدید نیروگاهی، (با فرض ثابت ماندن تقاضای برق معادل نمودار تداوم بار سال ۱۴۰۳) تنها ۱۷۵ ساعت از اوقات سال با ناترازی تولید و تقاضا مواجه خواهیم بود. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، برای پوشش کامل این ناترازی محدود به ۱۷۵ ساعت باقی‌مانده، نیاز به مدیریت مصرف حداکثر ۶،۱۱۹ مگاوات وجود دارد. همچنین، در شکل ۳ میزان کاهش ساعات ناترازی اوج بحرانی به‌ازای هر مگاوات مدیریت مصرف نمایش داده شده است.

اهمیت و اثربخشی مدیریت مصرف زمانی بیشتر نمایان می‌شود که آن را در مقیاسی واقعی در نظر بگیریم. براساس محاسبات انجام شده توسط نگارنده و با تحلیل داده‌های واقعی شبکه در سال‌های اخیر، مشخص شده است که در ساعات اوج مصرف تابستانی (که دقیقاً مصادف با ناحیه اوج بحرانی و پیک مصرف تجهیزات سرمایشی است)؛ هر یک درجه افزایش دمای هوا منجر به افزایش تقاضا به میزان تقریبی ۱،۵۵۰ مگاوات در شبکه برق کشور می‌شود. این بدان معناست که تنها با کاهش تقاضا معادل اثر دو درجه خنک‌تر شدن هوا که امری کاملاً قابل دستیابی از طریق راهکارهای

ساده‌ای مانند بهینه‌سازی مصرف تجهیزات سرمایشی در ساعات اوج می‌توان بیش از ۳،۱۰۰ مگاوات از بار شبکه کاست و حدوداً ۱۵۰ ساعت ناترازی را حذف کرد.



شکل۳. نمودار تأثیر میزان مدیریت مصرف بر کاهش ساعات ناترازی ناحیه اوج بحرانی شبکه برق در سال ۱۴۰۳

مأخذ: همان.

۳. الگوی توزیع زمانی ناترازی برق در کشور

در سیستم‌های قدرت، ناترازی میان تولید و مصرف برق، زمانی رخ می‌دهد که ظرفیت تولید موجود قادر به پاسخ‌گویی به تقاضای لحظه‌ای نباشد. درک دقیق از زمان‌بندی وقوع ناترازی‌ها، یکی از الزامات کلیدی برای طراحی راهبردهای بهینه در توسعه ظرفیت تولید، مدیریت تقاضا و افزایش تاب‌آوری شبکه برق به‌شمار می‌رود. برخلاف تصور رایج که ناترازی برق را صرفاً محدود به دوره‌های اوج مصرف می‌داند، بررسی داده‌های سال گذشته نشان می‌دهد که این پدیده به ساعات و نواحی مصرفی متنوع‌تری گسترش یافته است.

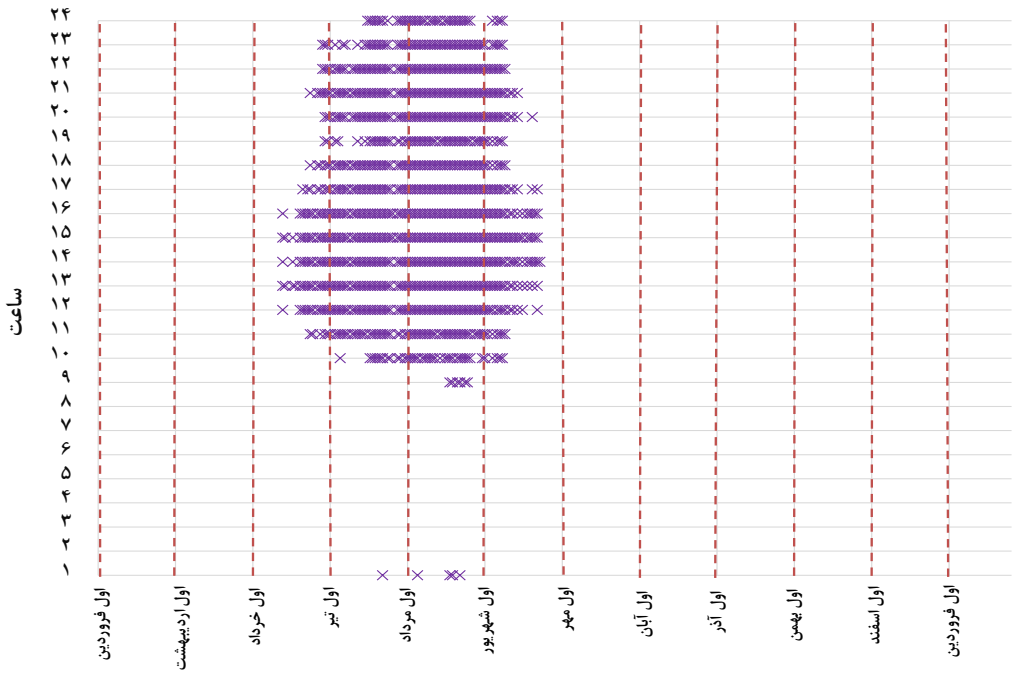
این بخش از گزارش، به تحلیل الگوی زمانی ناترازی برق در کشور می‌پردازد و با استفاده از ابزارهایی مانند منحنی تداوم تقاضا، توزیع ساعات ناترازی در طول شبانه‌روز و نواحی مختلف بار (اعم از بار پایه، میانی و اوج) را مورد بررسی قرار می‌دهد. هدف از این تحلیل، شناسایی بازه‌های زمانی پرتکرار یا بحرانی در بروز ناترازی و فراهم‌سازی بستر لازم برای اولویت‌بندی در سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی و سیاستگذاری‌های مدیریت مصرف است. برای نمونه، درصورتی‌که بخش قابل‌توجهی از ناترازی‌ها در ساعات پایانی شب رخ دهد، توسعه نیروگاه‌های خورشیدی در آن بازه زمانی اثربخش نخواهد بود؛ درحالی‌که همین منابع می‌توانند در جبران ناترازی‌های روزانه نقشی کلیدی ایفا کنند.

ازاین‌رو، شناخت دقیق این الگو کمک می‌کند تا ظرفیت‌های جدید تولید به‌درستی میان فناوری‌های مختلف تولید

برق توزیع شده و از سرمایه‌گذاری‌های ناکارآمد جلوگیری شود. بر این اساس، تحلیل الگوی زمانی ناترازی، بنیانی برای سیاستگذاری مبتنی‌بر شواهد، اولویت‌بندی منابع و افزایش کارایی سرمایه‌گذاری‌ها فراهم می‌آورد.

شکل ۴، به‌صورت گرافیکی توزیع زمانی ناترازی میان حداکثر ظرفیت تولید برق و تقاضا در سال ۱۴۰۳ را نمایش می‌دهد. در این شکل، محور افقی نمایان‌گر توالی روزهای سال و محور عمودی نشان‌دهنده ساعات شبانه‌روز است. هر بلوک رنگی نشان‌دهنده وقوع ناترازی (یعنی تقاضای بیش از توان تولید عملی) در یک ساعت خاص از یک روز مشخص است (درمجموع ۱،۰۸۶ ساعت). براساس تحلیل شکل، می‌توان مشاهده کرد که بخشی از ناترازی در بازه زمانی خرداد تا شهریور و در ساعات میانی روز تا انتهای شب (۲۴-۱۰) رخ داده است. این روند، هم‌راستا با افزایش مصرف برق ناشی از بار سرمایشی در فصل تابستان و هم‌زمانی آن با محدودیت ظرفیت عملی تولید برق است.

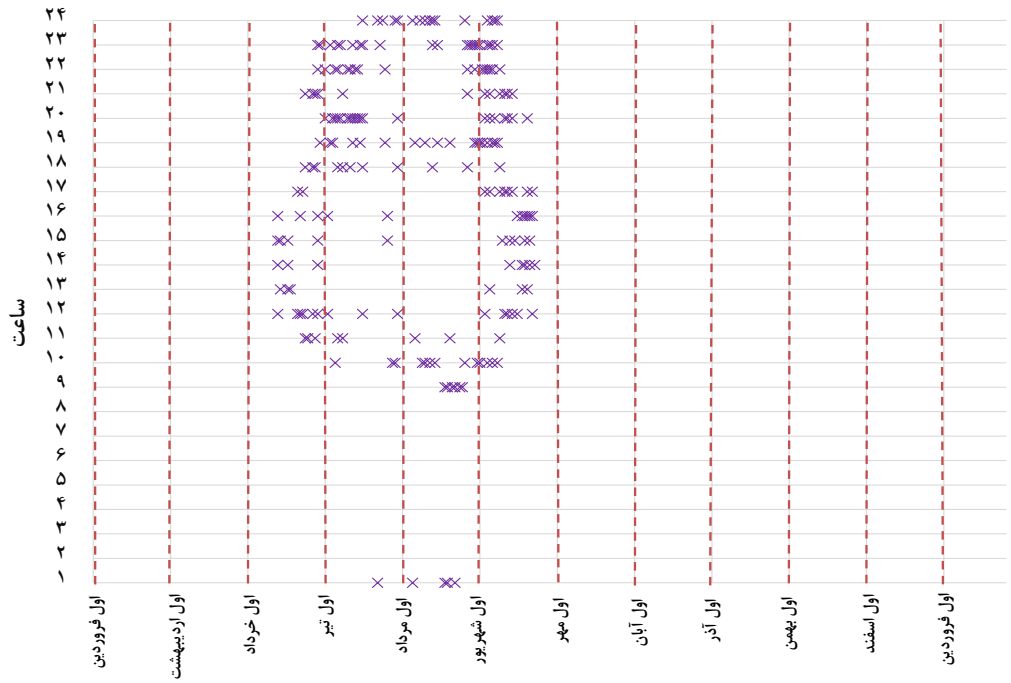
در ادامه، به‌منظور دستیابی به درکی دقیق‌تر از رفتار ناترازی در شبکه برق، الگوی زمانی وقوع ناترازی به تفکیک در ناحیه بار میانی، اوج بار غیربحرانی و اوج بار بحرانی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. این تفکیک، امکان شناسایی ویژگی‌های خاص هر ناحیه، ازجمله فراوانی وقوع، توزیع زمانی و دامنه شدت ناترازی را فراهم می‌سازد. همچنین، بستر مناسبی برای تصمیم‌سازی در حوزه‌های کلیدی همچون انتخاب نوع و زمان بهره‌برداری از منابع تولید، اولویت‌بندی توسعه زیرساخت‌های جدید، و طراحی برنامه‌های مدیریت مصرف متناسب با شرایط هر ناحیه را ایجاد می‌کند. با اتکا به این تحلیل، می‌توان از یک نگاه یکپارچه به ناترازی فراتر رفت و به راهکارهای هدفمند و کارآمد در پاسخ به چالش‌های ساختاری شبکه برق کشور دست یافت.



شکل ۴. الگوی زمانی بروز ناترازی بین تولید و تقاضای برق در سال ۱۴۰۳

مأخذ: همان.

در شکل ۵، پراکندگی زمانی (۲۰۸ ساعت) وقوع ناترازی در بخش بار میانی را در سال ۱۴۰۳ به تفکیک روزهای سال و ساعات شبانه‌روز نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ناترازی‌های بار میانی عمدتاً در فصل تابستان، به‌ویژه در ماه‌های تیر و شهریور و در بازه زمانی ۱۸ الی ۲۴ به وقوع پیوسته‌اند. با استناد به این الگوی زمانی، واضح است که بخش عمده ناترازی در ساعات پایانی روز رخ می‌دهد؛ بازه‌ای که توان تولید نیروگاه‌های خورشیدی عملاً به صفر نزدیک می‌شود. بنابراین، توسعه ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی برای پوشش بار میانی در این ساعات، از اثربخشی محدودی برخوردار خواهد بود[1]. درنتیجه، جبران ناترازی در این بازه زمانی مستلزم بهره‌گیری از سایر منابع قابل اتکا همچون نیروگاه‌های حرارتی خواهد بود. این الگو بیانگر آن است که بدون تحلیل تفکیکی نواحی بار، ممکن است توسعه منابع تولیدی به شکلی غیرهدفمند و ناکارآمد صورت گیرد؛ چراکه سرمایه‌گذاری در نیروگاهی که قابلیت پاسخ‌گویی در ساعات ناترازی واقعی را ندارد، به اتلاف منابع مالی خواهد انجامید.



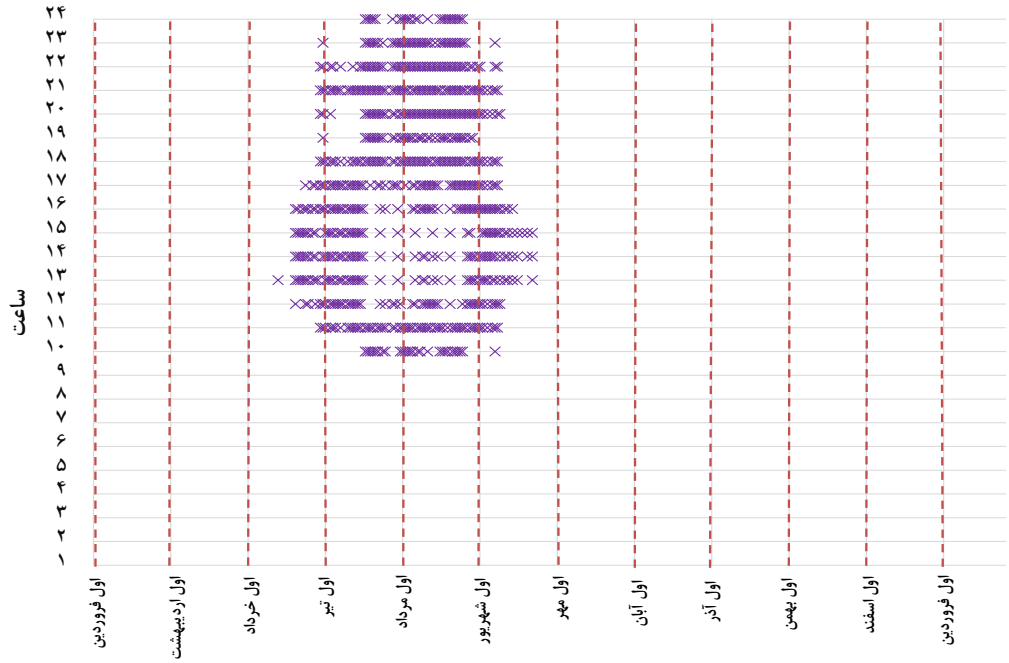
شکل۵. الگوی زمانی بروز ناترازی بین تولید و تقاضای برق در بار میانی سال ۱۴۰۳

مأخذ: همان.

در شکل ۶ پراکندگی زمانی وقوع ناترازی بین تولید و تقاضای برق در اوج بار غیربحرانی سال ۱۴۰۳ نشان داده شده که نمایان‌گر ۷۰۳ ساعت پراکندگی زمانی ناترازی است که گستردگی قابل‌توجهی از ساعت ۱۰ صبح تا ۲۴ شب و عمدتاً طی اواسط خرداد تا اواسط شهریور به وقوع پیوسته است. این پراکندگی نشان می‌دهد که ناترازی‌ها در این بازه زمانی، هم در ساعات روز و هم در ساعات شب رخ می‌دهد. برخلاف ناترازی‌های بخش بار میانی که عمدتاً در

۱. هرچند نیروگاه‌های خورشیدی در ساعات اوج شبانه عملکردی ندارند، اما توسعه آن‌ها می‌تواند در طول روز با جایگزینی بخشی از تولید نیروگاه‌های آبی، امکان ذخیره منابع آبی برای استفاده در ساعات شب را فراهم کند. به این ترتیب، استفاده ترکیبی و هوشمند از منابع تجدیدپذیر و آبی می‌تواند به کاهش ناترازی در ساعات غیرقابل تأمین توسط خورشیدی کمک کند.

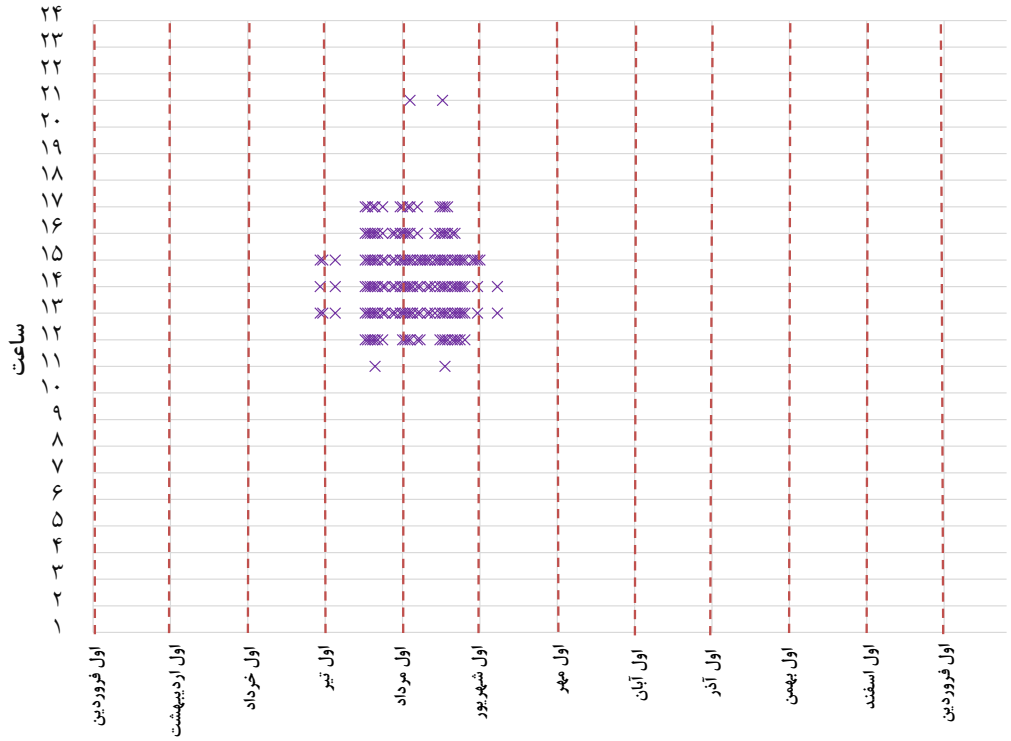
ساعات پایانی روز و با کاهش تولید نیروگاه‌های خورشیدی مصادف است، در این بازه زمانی امکان بهره‌گیری از توان تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی در ساعات روز وجود دارد. بنابراین، استفاده ترکیبی از نیروگاه‌های خورشیدی همراه با سایر منابع تولید می‌تواند نقش مهمی در کاهش ناترازی ایفا کند.



شکل۶. الگوی زمانی بروز ناترازی بین تولید و تقاضای برق در اوج بار غیربحرانی سال ۱۴۰۳

مأخذ: همان.

شکل ۷ نیز الگوی زمانی بروز ناترازی میان تقاضای برق و ظرفیت عملی تولید در دوره اوج بار بحرانی سال ۱۴۰۳ را نمایش می‌دهد. همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد، مجموع ساعات ناترازی در دوره اوج بار بحرانی معادل ۱۷۵ ساعت بوده که تقریباً ۲ درصد از کل ساعات سال را شامل می‌شود. الگوی زمانی توزیع این ناترازی نشان می‌دهد که بیشترین تراکم وقوع آن از اواسط تیرماه تا اواخر مردادماه و در بازه زمانی ۱۲ تا ۱۶ بوده است. اگرچه در مواردی معدود، وقوع ناترازی در خارج از این بازه نیز مشاهده شده، اما این موارد از نظر تعداد و شدت به‌گونه‌ای هستند که می‌توان آنها را استثنا تلقی کرده و از آن صرف‌نظر کرد. بنابراین، از منظر برنامه‌ریزی و مدیریت عرضه و تقاضا، بازه زمانی یاد شده را می‌توان کانون اصلی بروز ناترازی بحرانی در شبکه برق کشور در نظر گرفت که با توجه به تمرکز زمانی ناترازی در بازه‌ای محدود و تکرار پایین وقوع آن، همان‌طور که پیشتر ذکر شد، مدیریت این ناترازی از طریق راهکارهای مدیریت مصرف (مانند پاسخ‌گویی بار، تغییر الگوی مصرف) مقرون‌به‌صرفه‌تر از توسعه زیرساخت‌های جدید تولید خواهد بود. همچنین، راهکارهایی نظیر تشویق مشترکین به افزایش دمای تنظیم تجهیزات سرمایشی، ارائه مشوق‌های مالی برای کاهش مصرف در ساعات اوج، و تعویض کولرهای فرسوده و کم‌بازده با مدل‌های پربازده و استاندارد می‌تواند به شکل مؤثری بار سرمایشی را کاهش داده و از بروز ناترازی جلوگیری کند.



شکل۷. الگوی زمانی بروز ناترازی بین تولید و تقاضای برق در اوج بار بحرانی سال ۱۴۰۳

مأخذ: همان.

۴. جمع‌بندی و پیشنهادها

پدیده ناترازی در سیستم برق کشور، به‌ویژه در سال‌های اخیر، از یک مسئله محدود در ساعات اوج بار بحرانی به چالشی گسترده‌تر و چندوجهی تبدیل شده است که شامل نواحی بار میانی و غیربحرانی اوج بار نیز می‌شود. این موضوع، نشان دهنده کاهش تاب‌آوری شبکه و نیاز مبرم به بازنگری در سیاست‌ها و راهبردهای تأمین برق کشور است. این ناترازی که بیش از ۱،۰۸۶ ساعت از سال را درگیر می‌کند، عمدتاً ناشی از محدودیت در ظرفیت تولید، فرسودگی نیروگاه‌ها، افزایش مصرف ناشی از رشد صنایع انرژی‌بر و تغییرات اقلیمی است. علاوه‌براین، الگوی نامناسب مصرف برق، سیاست‌های یارانه‌ای و قیمت‌گذاری غیربهینه، بار اضافی بر شبکه وارد کرده و شکاف میان عرضه و تقاضا را تشدید کرده است.

- اولویت نخست در مواجهه با این چالش، تمرکز بر رفع ناترازی در بخش بار میانی است؛ بخشی که در سال‌های اخیر و تا پیش از این دارای تعادل نسبی میان تولید و تقاضا بود؛ اما اکنون با ناترازی مواجه شده است. این بخش نیازمند توسعه حدود ۱،۸۴۶ مگاوات ظرفیت نیروگاهی جدید است که می‌تواند حدود ۲۰۸ ساعت از اوقات ناترازی را پوشش دهد. با توجه به توزیع زمانی این ناترازی، استفاده صرف از منابع خورشیدی کافی نیست و باید به تکمیل واحدهای بخار نیروگاه‌های گازی و تبدیل آنها به سیکل ترکیبی نیز توجه ویژه شود. این رویکرد، ضمن کاهش هزینه و زمان ساخت، بهره‌وری زیرساخت‌های موجود را افزایش می‌دهد.
- درمجموع، حذف کامل ۱،۰۸۶ ساعت ناترازی مستلزم سرمایه‌گذاری کلان برای احداث ۱۶،۸۸۸ مگاوات ظرفیت

جدید بوده که از نظر اقتصادی و زمانی بسیار چالش‌برانگیز است. اما با سرمایه‌گذاری معقول‌تر و احداث حدود ۹،۲۲۵ مگاوات ظرفیت جدید (۵۵ درصد از ظرفیت مورد نیاز)، می‌توان ۸۴ درصد از ساعات ناترازی را پوشش داد و ناترازی باقی‌مانده را به ۱۷۵ ساعت محدود کرد که عمدتاً مربوط به اوج بار بحرانی است.

- با توجه به پراکندگی زمانی ناترازی در ساعات مختلف روز و وابستگی بیش از ۹۰ درصد ظرفیت تولید برق کشور به سوخت‌های فسیلی، برنامه‌ریزی جامع و متنوع‌سازی منابع تولید برق ضروری است. این برنامه باید برپایه تحلیل دقیق الگوی زمانی ناترازی و متناسب با ظرفیت‌ها و محدودیت‌های هر منبع انرژی تدوین شود تا ضمن افزایش تاب‌آوری و پایداری شبکه، ریسک وابستگی به یک منبع خاص کاهش یابد و سرمایه‌گذاری‌ها بهینه شود.
- علاوه‌بر توسعه ظرفیت تولید، تقویت ابزارهای مدیریت تقاضا، ازجمله سیاست‌های پاسخ‌گویی بار، جابه‌جایی مصرف به ساعات کم‌مصرف و قراردادهای تعدیل بار، نقش کلیدی در کاهش اوج بار بحرانی و کاهش نیاز به احداث ظرفیت‌های جدید دارد. همچنین ارتقای بهره‌وری انرژی در بخش خانگی، به‌ویژه با اصلاح الگوی مصرف و جایگزینی تجهیزات سرمایشی پرمصرف، گامی مهم در کاهش بارهای اوج محسوب می‌شود. برآوردها نشان می‌دهد که تنها با اجرای مؤثر سیاست‌های مدیریت مصرف معادل کاهش تقاضای ناشی از ۲ درجه افزایش دما، می‌توان تا ۱۵۰ ساعت از ناترازی در ناحیه بحرانی اوج بار را کاهش داد. ازاین‌رو، طراحی و اجرای برنامه‌های هدفمند در سمت تقاضا باید به‌عنوان مکمل توسعه زیرساخت‌های تولید، در اولویت سیاستگذاری قرار گیرد.
- سیاستگذاری دقیق در زمینه توسعه صنایع انرژی‌بر، همراه با الزام به سرمایه‌گذاری در تأمین انرژی اختصاصی و مکان‌یابی بهینه، از دیگر ضرورت‌های مدیریت پایداری شبکه است. با توجه به نوسانات اقلیمی و تغییرات بارندگی، برنامه‌ریزی تولید باید براساس سناریوهای اقلیمی واقع‌گرایانه و راهبردهای تطبیقی انجام شود تا از آسیب‌پذیری منابع تولیدی کاسته شود.
- تقویت نظام نظارتی و تدوین سیاست‌های جامع و قوی‌تر به‌منظور مدیریت هوشمندانه رشد بی‌رویه تقاضای برق، همراه با بازنگری و اصلاح ساختارهای قیمت‌گذاری انرژی، به‌گونه‌ای که انگیزه‌های مصرف بهینه و صرفه‌جویی به‌صورت واقعی ایجاد شود و مصرف‌کنندگان به سمت الگوهای مصرف پایدار و مسئولانه هدایت شوند.

درنهایت، موفقیت در مقابله با پدیده ناترازی نیازمند رویکردی تلفیقی، منسجم و مبتنی‌بر داده‌های دقیق است که ضمن توسعه ظرفیت تولید، بهره‌وری مصرف را ارتقا داده و ابزارهای مدیریت تقاضا را تقویت کند. این رویکرد، راهکاری پایدار و اقتصادی برای حفظ تاب‌آوری و پایداری شبکه برق کشور در شرایط فعلی و آینده خواهد بود.

جدول ۲. پیشنهاد توصیه سیاستی ویژه گزارشات راهبردی/ نظارتی

ردیف	نوع توصیه		توصیه سیاستی	الزامات و قیود اجرایی	دستگاه متولی	دستگاه معین	زمان‌بندی اجرا (کوتاه‌مدت، میان‌مدت، بلندمدت)
	تداوم*	اصلاح**					
۱		✓	توسعه ظرفیت نیروگاهی در بخش بار میانی	تأمین سرمایه، تکمیل واحدهای بخار نیروگاه‌های گازی و تبدیل آنها به سیکل ترکیبی	وزارت نیرو	-	میان‌مدت
۲		✓	تنوع‌بخشی منابع تولید برق و کاهش وابستگی به سوخت فسیلی	تحلیل دقیق الگوی ناترازی، برنامه‌ریزی جامع منابع و تامین زیرساخت‌های مورد نیاز	وزارت نیرو	-	بلندمدت
۳		✓	تقویت ابزارهای مدیریت تقاضا (پاسخگویی بار، جابه‌جایی مصرف، قراردادهای تعدیل بار)	تدوین سیاست‌های تشویقی، فرهنگ‌سازی، ارتقای زیرساخت‌های مدیریت مصرف	وزارت نیرو	سازمان صدا و سیما	کوتاه‌مدت تا میان‌مدت
۴		✓	ارتقای بهره‌وری انرژی در بخش خانگی با اصلاح الگوی مصرف و جایگزینی تجهیزات پرمصرف	تدوین استانداردهای انرژی، نظارت بر بازار، برنامه‌های آموزشی و اطلاع‌رسانی	وزارت صنعت، معدن و تجارت	سازمان استاندارد	کوتاه‌مدت
۵		✓	سیاست‌گذاری دقیق برای توسعه صنایع انرژی‌بر با الزام به تأمین انرژی اختصاصی و مکان‌یابی بهینه	تصویب مقررات الزام‌آور، نظارت مستمر بر اجرای سیاست‌ها و هماهنگی بین دستگاه‌ها	وزارت صنعت، معدن و تجارت	وزارت نیرو	میان‌مدت تا بلندمدت
۶		✓	تدوین و اجرای سیاست‌های قیمت‌گذاری انرژی به منظور ایجاد انگیزه مصرف بهینه و صرفه‌جویی	بازنگری ساختار تعرفه‌ها، اعمال سیاست‌های انگیزشی و نظارت بر بازار انرژی	وزارت نیرو	سازمان برنامه و بودجه	کوتاه‌مدت

* تداوم یا تقویت آیتم‌ها یا اقدامات.

** اصلاح رویه‌ها یا ایجاد سازوکارها.

منابع و مآخذ

[1] Scenario, Announced Pledges. "Global energy and climate model—Analysis. IEA", (2023).
[2] Poulin, Alain, et al. "Load duration curve: A tool for technico-economic analysis of energy solutions." Energy and buildings 40.1 (2008): 29-35.
[3] Wood, Allen J., Bruce F. Wollenberg, and Gerald B. Sheblé. Power generation, operation, and control. John Wiley & sons, (2013).
[4] Choi, Woonkyeong, et al. "Dissimilarities of Physical Meaning between Loss of Load Indices based on Load Curve Types." IFAC-Papers Online 51.28 (2018): 546-551.
[5] Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. .The Load Curve and Load Duration Curves in Generation Planning. Proceedings of the Second Australian International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Melbourne, (2023), pp. 1029–1030.
[6] Ahmed, Mohamed Selim, Fahmy Bendary, and H. M. M. Moustafa. "Comparative study between: time of use and real-time pricing using fuzzy technique." CIRED 24 2017.1 (2017): 2641-2644.
[۷] مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، فرصت‌ها و راهکارهای توسعه تجارت برق ایران، شماره مسلسل ۱۹۸۲۴، ۱۴۰۳.
[8] Jakubcionis, Mindaugas, et al., best practices and informal guidance on how to implement the Comprehensive Assessment at Member State level, (2015).

گزیده سیاستی

بازه زمانی وقوع ناترازی برق در سال گذشته به ۱۰۸۶ ساعت رسیده که در صورت افزایش ظرفیت نیروگاهی به میزان ۹۲۰۰ مگاوات، ۹۱۱ ساعت از ناترازی قابل رفع بوده و ساعات باقیمانده نیز با مدیریت مصرف قابل جبران است.

مرکز پژوهش های مجلس شورای اسلامی

تهران، خیابان پاسداران، روبروی پارک نیاوران (ضلع جنوبی، پلاک ۸۰۲)

تلفن: ۷۵۱۸۳۰۰۰ صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۵۸۵۵ پست الکترونیک: mrc@majles.ir

وب‌سایت: rc.majles.ir