تعیین روش بهینه تأمین برق صنایع بزرگ
با توجه به ایجاد محیط رقابتی جدید در بخش عرضه انرژی الکتریکی

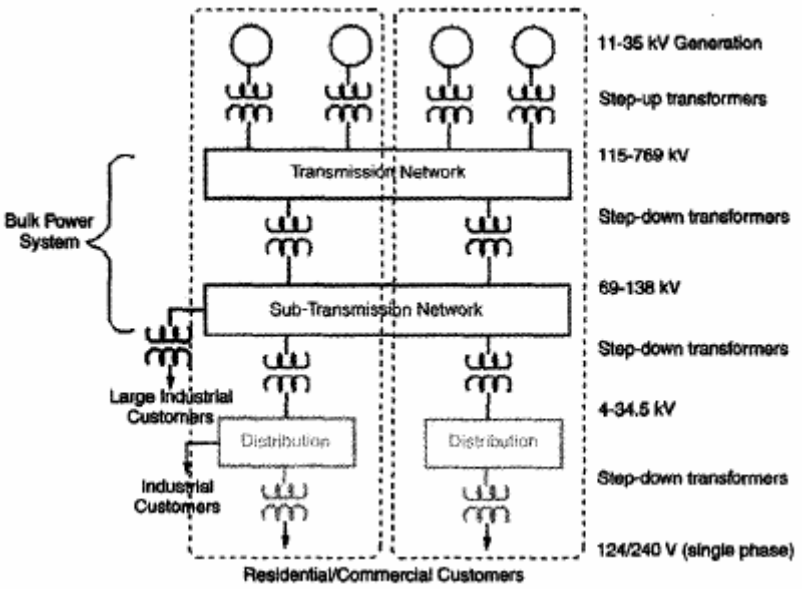
آرش احسانی
دانشگاه صنعتی شریف
aehsani@nri.ac.ir
علی‌محمد رنجبر
دانشگاه صنعتی شریف و پژوهشگاه نیرو
ranjbar@sharif.edu
محمود فتوحی فیروزآباد
دانشگاه صنعتی شریف
fotuhi@sharif.edu

واژه‌های کلیدی
اقتصاد مهندسی، انرژی الکتریکی، بهینه‌سازی، پایایی، صنایع بزرگ.

چکیده
طی سال‌های اخیر، تحولات مهمی در بخش عرضه انرژی الکتریکی ایجاد شده است که از آنها تحت عنوان کلی «تجدیدساختار صنعت برق» یاد می‌شود. این تحولات دارای ابعاد و آثار گوناگونی بوده‌اند که یکی از مهم‌ترین آنها ایجاد محیط رقابتی در عرصه تولید و تأمین برق می‌باشد. در این محیط جدید، صنعت برق دیگر در انحصار مراجع متمرکز دولتی نیست و شرکت‌های خصوصی می‌توانند در بخش‌های مختلف آن فعالیت نمایند. علاوه بر این، مصرف‌کنندگان عمده برق ـ از جمله صنایع بزرگ ـ اجازه می‌یابند که برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز خود، نیروگاههای کوچک محلی احداث کرده و حتی اقدام به فروش برق کنند. به این ترتیب، می‌توان دریافت که در چنین محیطی، مصرف‌کنندگان ذکرشده برای تأمین برق مورد نیاز خود با گزینه‌های متعددی روبرو هستند که انتخاب را دشوار می‌سازد. در این مقاله، ضمن مرور اجمالی مباحث زمینه‌ای پیش‌نیاز، چگونگی مدل‌سازی مسأله و تعیین راه‌حل بهینه با تلفیق مطالعات پایایی و اقتصاد مهندسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

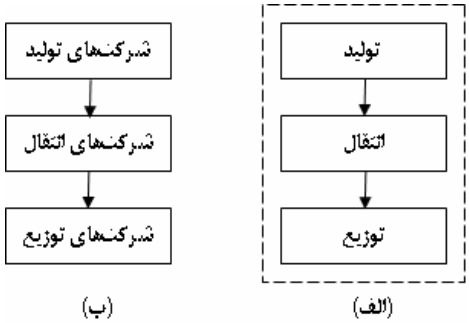
۱. مقدمه

امروزه، بخش مهمی از انرژی مورد نیاز صنایع مختلف از طریق شبکه‌های برق‌رسانی تأمین می‌شود. به‌مدت چندین دهه، دولت‌ها به‌عنوان متولیان ارائه خدمات عمومی به جوامع، تولید و تأمین برق را در انحصار خود داشته‌اند. بر این اساس، مصرف‌کنندگان معمولاً فقط یک راه برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز خود پیش رو داشتند: درخواست انشعاب برق از شبکه سراسری و خرید انرژی الکتریکی از مراجع دولتی با تعرفه‌های از پیش تعیین‌شده. در این ساختار، سطح کیفیت و پایایی تأمین برق معمولاً با توجه به استانداردهای فنی یا قضاوت مهندسی تعیین می‌شد و در بسیاری از موارد، مصرف‌کنندگان ناچار به پذیرش آن بودند. (شکل ۱)



شکل ۱- ساختار معمول صنعت برق که در آن سطح ولتاژ بخش‌های مختلف سیستم انرژی الکتریکی یعنی تولید، انتقال، فوق‌توزیع و توزیع نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، انشعاب برق بعضی از مصرف‌کنندگان صنعتی بزرگ از شبکه فوق‌توزیع و انشعاب برق سایر صنایع از شبکه توزیع دریافت می‌شود.

تجدیدساختار صنعت برق ـ که از سال ۱۹۹۰ در انگلستان شروع شد و دامنه آن به‌سرعت به سایر کشورها نیز گسترش یافت ـ موج تازه‌ای از تغییرات ساختاری را به‌همراه آورد که از جمله می‌توان به خصوصی‌سازی و کاهش تصدی‌گری دولتی، مقررات‌زدایی یا تجدیدمقررات حاکم بر صنعت برق، تجزیه تشکیلات متمرکز قبلی و تفکیک حوزه‌های عملیاتی از یکدیگر و بالاخره انحصارشکنی و فراهم کردن بستر رقابت در این صنعت اشاره کرد. هرچند حرکت یادشده از همان ابتدا با ابهامات و تردیدهای متعددی روبرو بوده و نگرانی‌هایی را در میان دست‌اندرکاران صنعت برق و همین‌طور مصرف‌کنندگان پدید آورده است، اما سیر تحولات نشان داده که برپایی بازار رقابتی آزاد برای خرید و فروش انرژی الکتریکی و خدمات مرتبط با آن کاملاً امکان‌پذیر است و راه‌حل‌های عملی متعددی برای انبوه مسائل فنی و اقتصادی آن وجود دارند.



شکل۲- (الف) ساختار متمرکز سنتی که در آن یک مرجع خاص متولی همه حوزه‌های عملیاتی است و (ب) ساختار تفکیک-شده جدید که در آن شرکت‌های متعددی در حوزه‌های عملیاتی مختلف با هم رقابت می‌کنند.

از دید مصرف‌کننده برق، یکی از مهم‌ترین نتایج تحولات ذکرشده، افزایش قدرت انتخاب وی در تعیین نحوه تأمین انرژی الکتریکی و خدمات مورد نیاز او است. در یک ساختار کاملاً باز رقابتی، همه کاربران (تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان برق) می‌توانند آزادانه به شبکه سراسری دسترسی داشته و با پرداخت هزینه‌های لازم، از خدمات آن بهره‌مند شوند.[1] بر این اساس، مصرف‌کنندگان عمده برق دیگر ناچار نیستند که انرژی و خدمات مورد نیاز خود را از یک مرجع مشخص و ثابت دریافت کنند و در این زمینه گزینه‌های متنوعی برای انتخاب خواهند داشت. علاوه بر این، در یک محیط رقابتی، فروشندگان و تأمین‌کنندگان برق باید برای جلب نظر مصرف‌کنندگان و حفظ مزیت رقابتی خود به خواسته‌های مصرف‌کنندگان توجه کنند.[2]

تا کنون، کتاب‌ها و مقالات ارزشمند بسیاری درباره ابعاد و آثار مختلف تجدیدساختار صنعت برق نوشته شده که حاصل مرور برخی از آنها [۱]-[5] در بخش بعد به‌اختصار ارائه می‌گردد. در اینجا ذکر این نکته حائز اهمیت است که بسیاری از منابع موجود، تحولات صنعت برق را از دید بخش عرضه انرژی الکتریکی مورد توجه قرار داده و کمتر به دیدگاههای موردعلاقه بخش تقاضا پرداخته‌اند. بر این اساس، ویژگی مهم مطالعه حاضر این است که نتایج تجدیدساختار صنعت برق را از دید مصرف‌کنندگان مورد تأمل قرار می‌دهد. مسأله اصلی مطرح در این مقاله یعنی تعیین روش بهینه تأمین برق صنایع بزرگ در محیط رقابتی جدید صنعت برق و همین‌طور رویکرد مورد استفاده در حل این مسأله، برای نخستین بار ارائه می‌گردد.

ساختار مقاله حاضر به این ترتیب است: در ادامه، ابتدا در بخش بعد مرور کوتاهی بر ابعاد و آثار تجدیدساختار صنعت برق انجام می‌گیرد. در بخش سوم مطالب مختصری در ارتباط با مفاهیم ارزیابی پایایی سیستم‌های قدرت الکتریکی ـ از جمله مباحث مربوط به هزینه و ارزش پایایی ـ ارائه می‌گردد. نحوه مدل‌سازی مسأله تحقیق و رویکرد مورد استفاده برای حل آن در بخش چهارم مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتیجه‌گیری در بخش پنجم ارائه می‌گردد و در انتها، فهرست منابع و مراجع آورده می‌شود.

۲. تجدیدساختار در بخش عرضه انرژی الکتریکی

صنعت برق یکی از ارکان مهم بخش انرژی است و زمینه‌ساز توسعه صنعتی کشورها محسوب می‌شود. در بیشتر کشورها ـ از جمله ایران ـ مالکیت و اداره این صنعت از دیرباز در انحصار دولت بوده و طی چندین دهه، بخش بزرگی از سرمایه‌های عمومی در این بخش جذب شده است. بر این اساس، می‌توان دریافت که مؤلفه‌های مختلف نظام اقتصادی و صنعتی کشورها در تعامل فشرده با تحولات صنعت برق قرار دارند و از این رو، مطالعه روند تغییرات و گرایش‌های موجود در این صنعت حائز اهمیت فراوان است.

طی سال‌های اخیر، صنعت برق در سراسر جهان در معرض تحولات گسترده‌ای قرار گرفته که از مجموعه آنها تحت عنوان کلی «تجدیدساختار در صنعت برق» یاد می‌شود. انگیزه‌های مختلفی در این تحولات نقش داشته‌اند که از جمله می‌توان به ناکارآمدی مقررات سنتی حاکم، ضعف‌های مدیریتی، مشکل بهره‌وری و کمبود منابع عمومی برای سرمایه‌گذاری در صنعت برق اشاره کرد. این تحولات، بعضی از ویژگی‌های متداول صنعت برق از جمله تمرکز تولید برق در نیروگاههای بزرگ، تمرکز سازمانی صنعت برق، فروش انحصاری انرژی الکتریکی و همین‌طور مالکیت دولتی را با چالش‌های جدی مواجه ساخته‌اند. لازم به ذکر است که تجدیدساختار صنعت برق در کشورهای مختلف، اهداف گوناگونی را دنبال کرده است که مهم‌ترین آنها عبارتند از ارتقای بهره‌وری، کاهش قیمت برق و خدمات مربوط به آن، بهبود کیفیت و قابلیت‌اطمینان تأمین برق و بالاخره، شفاف‌سازی در صنعت برق.

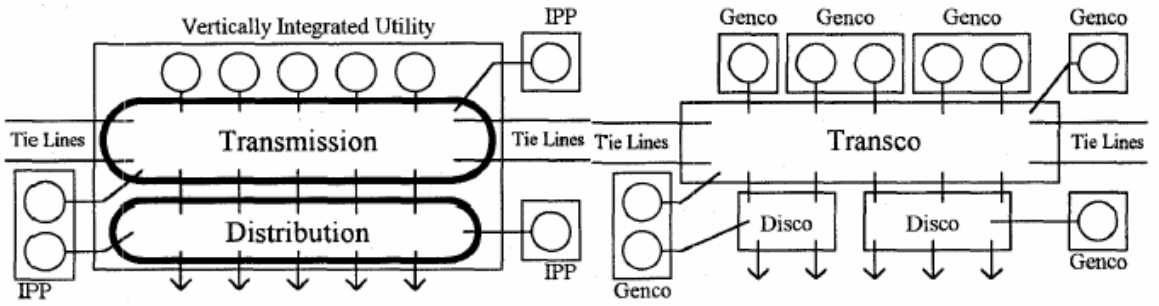
فرآیندهای مختلفی در چارچوب عنوان کلی «تجدیدساختار صنعت برق» مورد توجه قرار گرفته‌اند که از جمه می‌توان به خصوصی‌سازی و کاهش تصدی‌گری دولتی، مقررات‌زدایی یا تجدیدمقررات حاکم بر صنعت برق، تجزیه تشکیلات متمرکز قبلی و تفکیک حوزه‌های

---

[1] چنین شبکه‌ای را می‌توان تا حدی شبیه به شبکه حمل و نقل جاده‌ای تصور کرد که تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان کالاهای مختلف می‌توانند آزادانه و با پرداخت هزینه‌های ذیربط (عوارض و مالیات) از آن استفاده کنند. البته در اینجا باید به تفاوت‌های این دو شبکه نیز توجه داشت. برخلاف شبکه حمل و نقل جاده‌ای، در شبکه انتقال و توزیع برق نمی‌توان یک واحد مشخص انرژی را از محل تولید تا محل مصرف آن ردیابی کرد. انرژی تولیدی ورودی به شبکه برق و انرژی مصرفی خروجی از آن باید دائماً در توازن با یکدیگر قرار داشته باشند. علاوه بر این موارد، نحوه عبور انرژی الکتریکی از مسیرهای مختلف شبکه سراسری برق بر اساس قوانین فیزیکی تعیین شده و به‌طور خودکار و آنی به تغییرات شرایط سیستم واکنش نشان می‌دهد.

[2] در یک نظرسنجی از ۳۵۵۰ مصرف‌کننده عمده برق در ایالات متحده، مهم‌ترین عوامل مورد علاقه مصرف‌کنندگان این‌طور تعیین شده‌اند: قیمت برق، پایایی تأمین برق، کیفیت برق و بالاخره خدمات مشترکین (رسیدگی به مشکلات و شکایات مصرف‌کنندگان) [۱].

عملیاتی از یکدیگر (شکل ۳) و بالاخره انحصارشکنی و فراهم کردن بستر رقابت در این صنعت اشاره کرد. در بسیاری از کشورها، ساختار سنتی متمرکز ـ که سه حوزه عملیاتی اصلی تولید، انتقال و توزیع را در بر می‌گرفت ـ جای خود را به ساختار تفکیک‌شده جدیدی داده که در آن، شرکت‌های مختلفی در حوزه‌های ذکر شده ـ به‌صورت رقابتی ـ فعالیت می‌کنند و هر کدام وظایف خاصی را در چارچوب کل سیستم عرضه انرژی الکتریکی عهده‌دار هستند. در این محیط جدید، مسئولیت تأمین برق مصرف‌کنندگان دیگر به‌عهده یک مرجع خاص نبوده و بررسی نقش شرکت‌های متعدد موجود و چگونگی تعامل آنها با یکدیگر کار ساده‌ای نیست.



شکل۳- (چپ) ساختار متمرکز سنتی. همان‌طور که در شکل هم نشان داده شده، نیروگاهها و شبکه‌های انتقال و توزیع در تملک یک مرجع متمرکز عمودی قرار داشته و توسط خود او هم مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. البته در بعضی کشورها (از جمله ایالات متحده) تولیدکنندگان مستقل برق[3] هم اجازه فعالیت داشتند. (راست) ساختار تفکیک‌شده جدید که در آن شرکت‌های مختلف تولید، انتقال و توزیع در یک محیط رقابتی فعالیت می‌کنند.

مطالعه منابع موجود [4]-[5] نشان می‌دهد که تا کنون مدل‌های متنوعی برای تشکیل بازار رقابتی خرید و فروش انرژی الکتریکی و خدمات مرتبط با آن پیشنهاد و اجرا شده است که آنها را می‌توان در چهار قالب اصلی دسته‌بندی کرد:

- بازارهای اشتراکی (آژانس خرید و فروش برق[4]) ـ در این‌گونه بازارها، یک آژانس خرید و فروش برق ـ که خود در معاملات بازار برق ذینفع نیست ـ متولی برپایی بازار می‌شود. تولیدکنندگان (فروشندگان) برق میزان انرژی قابل فروش و نیز قیمت‌های پیشنهادی خود را به آژانس ارائه می‌کنند. به همین ترتیب، خریداران عمده هم میزان انرژی مورد نیاز و قیمت‌های پیشنهادی خود را اعلام می‌نمایند. خریداران مذکور عبارتند از: ۱) بنگاههای خرده‌فروش برق و ۲) بعضی از مصرف‌کنندگان عمده (مثلاً صنایع بزرگی که ترجیح می‌دهند به‌جای خرید برق از بنگاههای خرده‌فروش، به‌طور مستقیم در بازار شرکت کنند). حضور و مشارکت تولیدکنندگان برق در بازار ممکن است به‌صورت اختیاری یا اجباری باشد. آژانس، پس از بررسی قیمت‌های پیشنهادی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی شبکه برق، فهرست فروشندگان و خریداران برنده و بازنده، وضعیت تولید و دریافت انرژی آنها و همین‌طور قیمت پایه معاملات بازار[5] را اعلام می‌کند. ساز و کار بازار باید منصفانه و برای همه طرف‌های ذینفع شفاف باشد. این الگو، ابتدا به‌صورت موفقیت‌آمیزی در بریتانیا اجرا گردید و سپس بعضی کشورها از جمله آرژانتین و استرالیا از آن تبعیت کردند.
- بورس برق[6] ـ تفاوت مهم این الگو با بازار اشتراکی این است که در اینجا، به‌جای یک آژانس خرید و فروش برق ـ که ملاحظات اقتصادی و فنی را توأم با هم در نظر می‌گیرد ـ دو نهاد مختلف به‌نام‌های «بورس برق» و «بهره‌بردار مستقل سیستم»[7] فعالیت می‌کنند. این دو نهاد نباید در معاملات بازار ذینفع باشند. دریافت پیشنهادات خریداران و فروشندگان و اعلام نتایج برپایی بازار[8] ـ البته فقط با نگرش اقتصادی به وضعیت عرضه و تقاضا در بازار ـ به‌عهده بورس برق است. (شکل ۴) سپس نتایج بازار بورس به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه می‌شود تا با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی شبکه برق، نتایج نهایی را اعلام نماید. به‌این‌ترتیب، در این الگو

---

[3] **Independent power producers (IPPs)**

[4] **Power-pool**

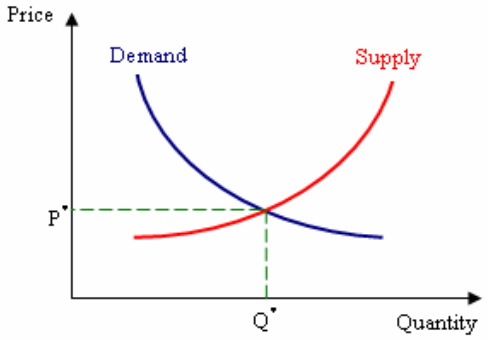
[5] **Market clearing price (MCP)**

[6] **Power exchange (PX)**

[7] **Independent system operator (ISO)**

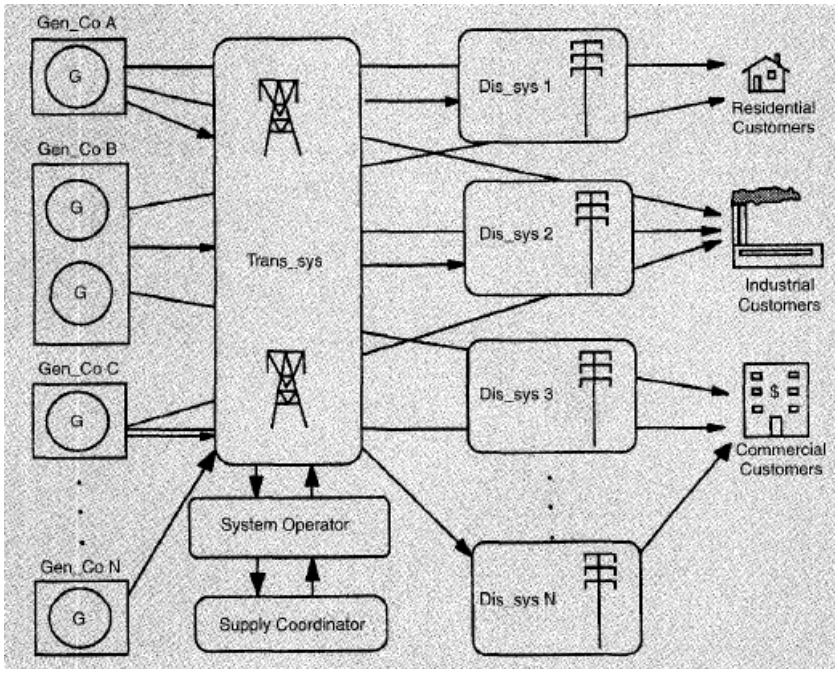
[8] **نتایج برپایی بازار شامل فهرست فروشندگان و خریداران برنده و بازنده، میزان انرژی تولیدی و دریافتی آنها و همین‌طور قیمت(های) معاملات بازار است.**

وظایف اقتصادی و فنی بازار بین این دو نهاد تقسیم شده و نتایج نهایی برپایی بازار با تعامل آنها مشخص می‌شوند. حضور و مشارکت تولیدکنندگان در بازار بورس برق معمولاً اختیاری است. این الگو عمدتاً در ایالات متحده مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۴- ساز و کار بازار بورس برق: نقطه‌کار بازار (یعنی مقدار و قیمت انرژی تبادلی) از تلاقی منحنی‌های عرضه و تقاضا به‌دست می‌آید. منحنی عرضه به‌صورت صعودی است زیرا هزینه تولید نیروگاههای حرارتی با افزایش توان الکتریکی تولیدی آنها به‌صورت سهمی‌شکل بالا می‌رود.[9] منحنی تقاضا به‌صورت نزولی است زیرا با افزایش قیمت انرژی، میزان انرژی مورد تقاضا کاهش می‌یابد.

- قراردادهای دو یا چندجانبه[10] ـ در این الگو، یک یا چند خریدار عمده با یک یا چند فروشنده، قرارداد خرید و فروش برق منعقد می‌کنند. شرایط و محتوای چنین قراردادهایی به توافق طرف‌های ذینفع و مجموعه ضوابط و مقررات حاکم بستگی داشته و از تنوع بسیاری برخوردار است. این‌گونه قراردادها در بازار برق نوردیک (کشورهای اسکاندیناوی) و چند کشور دیگر مورد توجه قرار گرفته‌اند.
- بازارهای تلفیقی[11] ـ در این بازارها، الگوهای فوق‌الذکر توأم با یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. (شکل ۵)



شکل ۵- سیستم انرژی الکتریکی با ساختار تلفیقی بازار برق. در این محیط، مصرف‌کنندگان با گزینه‌های مختلفی برای تأمین انرژی مورد نیاز خود روبرو هستند.

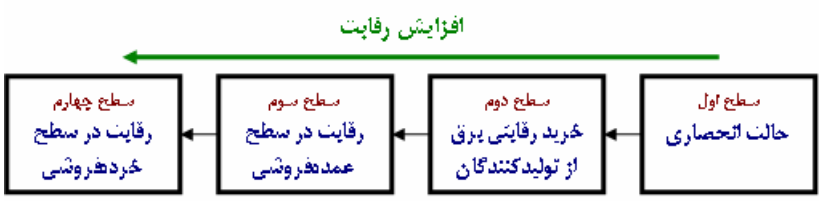
---

[9] تابع هزینه تولید نیروگاههای حرارتی معمولاً به‌صورت $Cost(Q) = \alpha Q^2 + \beta Q + \gamma$ است که $Cost$ هزینه تولید انرژی، Q توان تولیدی نیروگاه و بقیه ضرایب ثابت هستند. [6]

[10] Bilateral/multilateral contracts

[11] Hybrid

در اینجا ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که پیاده‌سازی الگوهای فوق‌الذکر زمینه‌ساز ایجاد سطوح رقابتی مختلفی در صنعت برق می‌شود که در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶- سطوح رقابتی در صنعت برق

یکی دیگر از ویژگی‌های مهم محیط جدید صنعت برق، رشد سریع تولیدات پراکنده[۱۲] و محلی است. تولیدات پراکنده به طیف وسیعی از واحدهای تولید برق کوچک (با ظرفیت ۱۵ کیلووات تا ۱۰ مگاوات [7]) گفته می‌شود که برای تأمین نیاز مصرف‌کنندگان در سراسر شبکه برق پخش شده‌اند. بعضی از این تولیدات متعلق به تأمین‌کنندگان و بعضی دیگر در تملک مصرف‌کنندگان برق هستند. علاوه بر این، بعضی از این واحدها به شبکه سراسری برق اتصال دارند و می‌توان از انرژی تولیدی آنها در اقصی‌نقاط سیستم استفاده کرد، اما بعضی دیگر از شبکه جدا بوده و صرفاً برای تأمین نیاز یک مصرف‌کننده خاص نصب شده‌اند. در اینجا ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که گرچه بعضی از تولیدات پراکنده از الگوهای متداول تولید برق (از جمله موتورهای دیزل و توربین‌های احتراقی) استفاده می‌کنند، اما در بسیاری از آنها از فن‌آوری‌های جدید غیرآلاینده (انرژی‌های سبز) استفاده می‌شود که از جمله می‌توان به پیل‌های سوختی[۱۳]، توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک اشاره کرد.

گسترش تولیدات پراکنده حاصل عوامل متعددی است که برخی از مهم‌ترین آنها عبارتند از: ۱) توجه روزافزون کشورها به حفظ محیط‌زیست و وضع قوانین متعدد در زمینه حمایت از فن‌آوری‌های جدید کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر؛ ۲) کمبود منابع مالی عمومی برای سرمایه‌گذاری در طرح‌های پرهزینه نیروگاهی؛ ۳) آزادسازی‌های انجام گرفته در صنعت برق که به صاحبان واحدهای کوچک محلی اجازه داده تا در بازار برق مشارکت نمایند؛ ۴) راندمان بالا و جذبه اقتصادی واحدهای تولید هم‌زمان حرارت و انرژی الکتریکی[۱۴]؛ و بالاخره ۵) آثار مثبت تولیدات پراکنده بر پایایی سیستم قدرت الکتریکی. [7 و 8]

با توجه به مجموعه مطالبی که در ارتباط با تحولات جدید بخش عرضه انرژی الکتریکی گفته شد، می‌توان دریافت که در چنین محیطی، صنایع بزرگ ـ به‌عنوان مصرف‌کنندگان عمده برق ـ با گزینه‌های متعددی برای تأمین انرژی مورد نیاز خود مواجه می‌شوند. در بخش چهارم نشان داده می‌شود که تعیین روش بهینه تأمین برق این دسته از مصرف‌کنندگان به‌سادگی امکان‌پذیر نبوده و مستلزم شناسایی فضای تصمیم‌گیری و انتخاب صحیح تابع هدف بهینه‌سازی است. در این مطالعه، از رویکرد ارزش/هزینه پایایی ـ که ملاحظات اقتصادی و فنی سیستم را توأم با هم مورد توجه قرار می‌دهد ـ برای حل این مسأله استفاده می‌شود، اما ابتدا لازم است مقدمه‌ای در ارتباط با مطالعات پایایی در سیستم‌های انرژی الکتریکی ارائه شود.

۳. پایایی تأمین برق

پایایی یکی از ملاحظات مهم سیستم‌های مهندسی ـ از جمله سیستم عرضه انرژی الکتریکی ـ است. علت اهمیت این مقوله در صنعت برق واضح است: پایایی در رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان برق نقش اساسی را ایفا می‌کند. نتایج یک نظرسنجی گسترده در ایالات متحده نشان داده که پس از قیمت برق، این مقوله بیش از هر عامل دیگری مورد توجه مصرف‌کنندگان است و حساسیت آنها را برمی‌انگیزد.

از نظر مفهومی، پایایی یکی از ویژگی‌های ذاتی سیستم‌های مهندسی و معیار مشخصی برای توصیف توانایی آنها در انجام کارکردها و وظایف محوله به آنها است. پایایی یک سیستم ـ که به‌صورت $R(t)$ یعنی تابعی از زمان مطرح می‌شود ـ عبارت است از احتمال این‌که در یک دوره زمانی مشخص و با شرایط کاری معین، سیستم به‌نحو رضایت‌بخشی کار کند. [۹] آنچه که در این تعریف اهمیت اساسی دارد، معیارها و شاخص‌های کار رضایت‌بخش سیستم است. مثلاً در مورد سیستم عرضه انرژی الکتریکی این سؤال مطرح است که آیا عدم قطع

---

[12] **Dispersed generation**

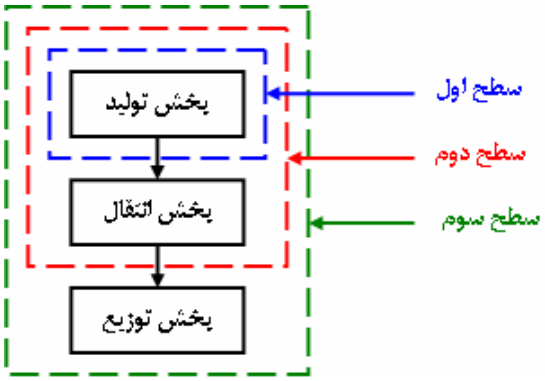
[13] **Fuel cells**

[14] **Combined heat and power (CHP)**

برق مصرف‌کنندگان برای رضایت آنها از سیستم کافی است یا این‌که خواسته‌های دیگری (مثل عدم‌تغییر سطح ولتاژ) هم مطرح است؟ بدیهی است که هرچه الزامات بیشتری برای رضایت از کار سیستم مطرح شود، ارزیابی پایایی نیز دشوارتر خواهد شد. بر این اساس، بیشتر روش‌های موجود برای ارزیابی پایایی سیستم عرضه انرژی الکتریکی فقط به تداوم تأمین برق به‌عنوان شاخص رضایت‌مندی از عملکرد سیستم توجه می‌کنند.

برای ارزیابی پایایی سیستم انرژی الکتریکی در یک تقسیم‌بندی سلسله‌مراتبی[15]، آن را به سه بخش جداگانه تولید، انتقال و توزیع تفکیک می‌کنند که هر یک وظایف خاصی را عهده‌دار می‌باشند. بخش تولید در اولین سطح (HLI)، سیستم یکپارچه تولید و انتقال در دومین سطح (HLII) و کل سیستم انرژی الکتریکی شامل تولید، انتقال و توزیع در سومین سطح (HLIII) قرار می‌گیرند. (شکل ۷) در این ساختار این‌طور فرض می‌شود که کل تولید برق در نیروگاههای بزرگی متمرکز است که در فواصل دور از مصرف‌کنندگان قرار دارند.

در مطالعات سطح اول باید به میزان انرژی مورد نیاز در سیستم توجه داشت، طوری‌که هم نیاز مصرف پیش‌بینی‌شده تأمین شود و هم ذخیره تولید کافی برای جایگزینی واحدهای نیروگاهی که برای تعمیرات اصلاحی یا پیش‌گیرانه از مدار خارج می‌شوند، وجود داشته باشد. در این سطح از مطالعات، توانایی شبکه برق برای رساندن انرژی الکتریکی به مصرف‌کنندگان در نظر گرفته نمی‌شود. بعضی از شاخص‌های احتمالاتی مورد استفاده در این مطالعات در جدول ۱ معرفی شده‌اند.



شکل ۷- سطوح سلسله‌مراتبی در ارزیابی پایایی سیستم انرژی الکتریکی

شاخص	تعریف
احتمال قطع بار[a] $(LOLP)$	احتمال بیشتر شدن بار از تولید موجود.
انتظار قطع بار[b] $(LOLE)$	زمان متوسطی که انتظار می‌رود حداکثر بار روزانه از تولید موجود بیشتر شود.
انتظار قطع انرژی[c] $(LOEE)$ یا انرژی تأمین نشده مورد انتظار[d] $(EENS)$	میزان انرژی که انتظار می‌رود به‌دلیل بیشتر شدن بار از تولید موجود، تأمین نشود.
شاخص انرژی عدم‌پایایی[e] (EIU)	$LOEE$ تقسیم بر کل انرژی مورد تقاضا (نرمالیزه شده).
شاخص انرژی پایایی[f] (EIR)	$1-EIU$
دقیقه سیستم[g] (SM)	$LOEE$ تقسیم بر حداکثر تقاضای بار (نرمالیزه شده).

[a] *Loss of load probability*
[b] *Loss of load expectations*
[c] *Loss of energy expectations*
[d] *Expected energy not supplied*
[e] *Energy index of unreliability*
[f] *Energy index of reliability*
[g] *System minute*

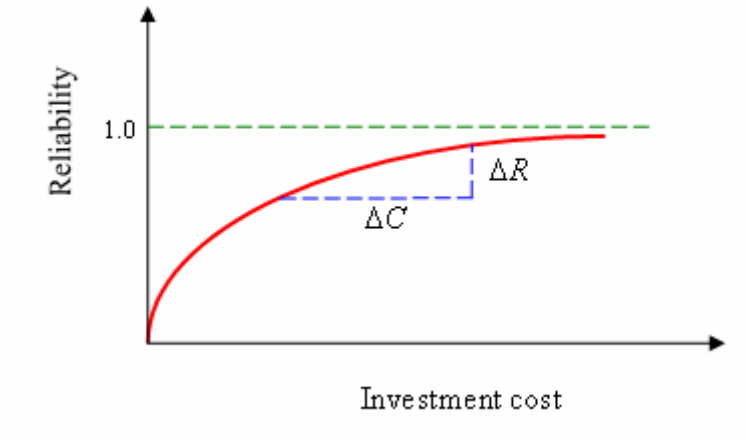
جدول ۱- شاخص‌های احتمالاتی در مطالعات پایایی سیستم انرژی الکتریکی

[15] **Hierarchical**

سطح دوم مطالعات به مجموعه تولید و انتقال (که به آن سیستم مرکب[16] گفته می‌شود) اختصاص دارد. در این سطح از مطالعات، هدف از ارزیابی پایایی، تخمین توانایی سیستم برای رساندن انرژی تولیدی نیروگاهها به نقاط اتصال (فصل مشترک) شبکه‌های انتقال و توزیع است. شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی در این مطالعات در نظر گرفته نمی‌شوند. ارزیابی پایایی سیستم مرکب بسیار پیچیده است زیرا در این سطح، تأثیر تمام ادوات و تجهیزات تولید و انتقال برق بر پایایی سیستم به‌طور یک‌جا در نظر گرفته می‌شود.

در مطالعات سطح سوم، با توجه به وسعت و پیچیدگی مسأله و نیز با عنایت به نقش محوری بخش توزیع در پایایی کل سیستم انرژی الکتریکی، به‌جای بررسی هم‌زمان کل سیستم تولید، انتقال و توزیع فقط شبکه توزیع مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

یکی از موارد مهمی که در مطالعات پایایی باید مورد توجه قرار گیرد، ارتباط این مقوله با مباحث اقتصادی است. افزایش پایایی هر سیستم مهندسی مستلزم صرف هزینه است. (شکل ۸) به همین دلیل، مطالعات اقتصادی بخش جدایی‌ناپذیر و مکمل ارزیابی پایایی سیستم‌های مهندسی است. شکل ۸ نشان‌دهنده هزینه افزایشی ΔC مورد نیاز برای بهبود پایایی سیستم به‌میزان ΔR است. [۱۰] بر این اساس مشخص است که قبل از تصمیم‌گیری برای افزایش پایایی سیستم باید مطالعات ارزش و هزینه پایایی انجام شود یعنی ابتدا باید به این سؤال پاسخ داده شود که «ارزش» کاری که برای آن «هزینه» می‌شود، چقدر است؟



شکل ۸- هزینه افزایشی پایایی

با توجه به مطالب فوق‌الذکر، در سیستم‌های تأمین انرژی الکتریکی نیز پایایی باید در اقتصادی‌ترین سطح ممکن ـ و نه در بالاترین سطح ممکن ـ تنظیم گردد. در واقع، تحقق بالاترین سطح پایایی نه امکان‌پذیر است و نه اقتصادی. بنابراین، در شبکه‌های برق هم برای تعیین اقتصادی‌ترین سطح پایایی باید مطالعات هزینه/ارزش پایایی انجام شود.

۴. طرح مسأله تحقیق و رویکرد مورد استفاده در حل آن

همان‌طور که در بخش دوم ذکر شد، در محیط جدید صنعت برق، صنایع بزرگ ـ به‌عنوان مصرف‌کنندگان عمده انرژی الکتریکی ـ با گزینه‌های متعددی برای تأمین انرژی مورد نیاز خود مواجهند و باید از میان آنها روش بهینه را برگزینند. در بخش قبل هم تحلیل هزینه/ارزش پایایی به‌عنوان رویکرد مورد توجه این مطالعه برای حل این مسأله معرفی شد. در این بخش، مسأله تحقیق و رویکرد پیشنهادی برای حل آن مورد بررسی دقیق‌تر قرار می‌گیرند.

امروزه، بخش مهمی از انرژی مورد نیاز صنایع مختلف از طریق شبکه‌های برق‌رسانی تأمین می‌شود. این وابستگی موجب می‌گردد که قطع برق به‌عنوان مانع و بازدارنده رشد و توسعه عمل نموده و کاهش مطلوبیت مصرف‌کنندگان را به‌دنبال داشته باشد. میزان بازدارندگی مصرف‌کنندگان رابطه مستقیمی با وابستگی فعالیت‌های آنها به انرژی الکتریکی دارد و از آنجا که این وابستگی یکسان نیست، خسارت وارد شده به مصرف‌کنندگان مختلف بر اثر قطع برق نیز یکسان نخواهد بود. این خسارت را می‌توان با استفاده از شاخصی تحت عنوان «هزینه قطع بار[17]» تعیین کرد. مقدار این شاخص به عوامل متعددی بستگی دارد، اما در مرجع [2] برای سادگی فرض شده که هزینه قطع بار تابعی

---

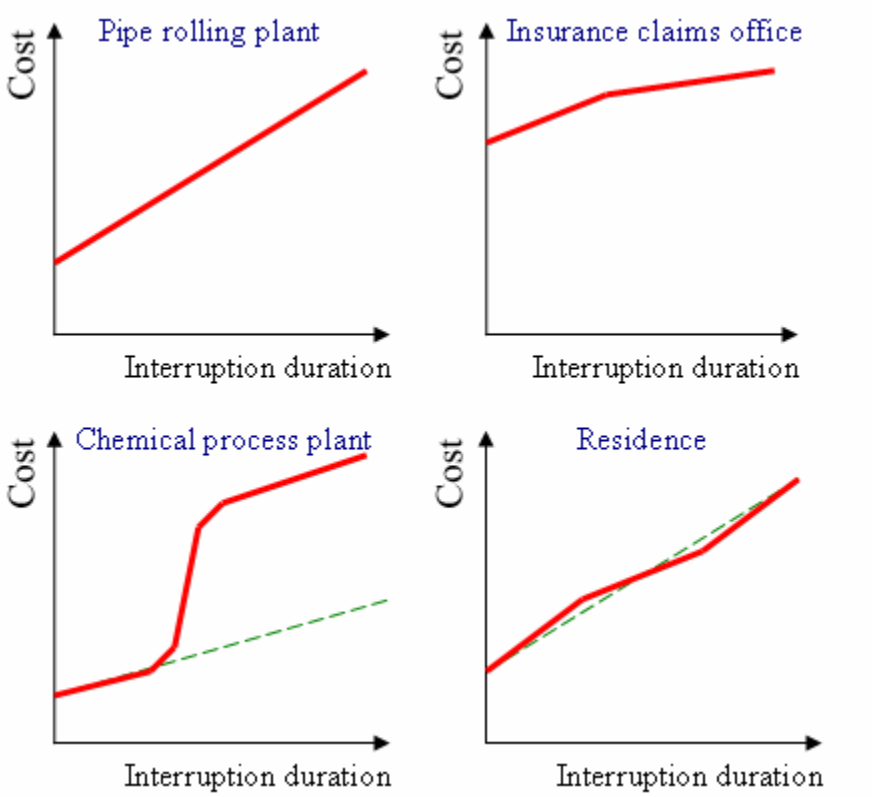
[16] **Composite system**

[17] **Loss of load cost (LOLC)**

خطی از میزان انرژی تأمین نشده است:

$$LOLC = CDF \times EENS$$

که در این رابطه، CDF هزینه (خسارت) توقف کار مصرف‌کننده بر حسب ریال بر کیلووات‌ساعت است که به آن تابع خسارت مصرف‌کننده[18] گفته می‌شود و $EENS$ نیز انرژی تأمین نشده مورد انتظار بر حسب کیلووات‌ساعت است. البته همان‌طور که گفته شد، در رابطه مزبور از فرض‌های ساده‌کننده استفاده شده است. در واقع، تابع خسارت بیشتر مصرف‌کنندگان به‌صورت غیرخطی است. بعضی از مصرف‌کنندگان به تعداد خاموشی‌ها و بعضی دیگر به طول مدت خاموشی‌ها حساسیت دارند. از این گذشته، معمولاً تابع خسارت مصرف‌کنندگان در ساعات مختلف شبانه‌روز و همین‌طور در روزهای مختلف هفته یکسان نیست. شکل ۹ نمودار هزینه خاموشی چند مصرف‌کننده مختلف را بر حسب مدت‌زمان قطع برق نشان می‌دهد. [7]



شکل ۹- نمودار هزینه خاموشی چند مصرف‌کننده مختلف بر حسب مدت‌زمان قطع برق. (بالا-چپ) کارخانه لوله‌سازی؛ (بالا-راست) مؤسسه بیمه؛ (پائین-چپ) کارخانه تولید ورقه‌های پلاستیکی؛ و بالاخره (پائین-راست) مجتمع مسکونی.

روش‌های مختلفی برای محاسبه هزینه خاموشی ناشی از قطع برق مصرف‌کنندگان صنعتی وجود دارند که یکی از مهم‌ترین آنها روش‌های برآورد هزینه می‌باشند. یکی از معمول‌ترین فنون مورد استفاده در این روش‌ها، «بررسی جامع مصرف‌کننده» است که بر اساس آن، از مصرف‌کنندگان خواسته می‌شود فعالیت‌هایی را که برای سازگاری با خاموشی انجام می‌دهند، مشخص نمایند. محاسبه هزینه مرتبط با این فعالیت‌ها ـ که در واقع نشان‌گر هزینه‌های لازم برای کاهش آثار نامناسب خاموشی هستند ـ منجر به تعیین هزینه خاموشی مصرف‌کننده می‌گردد. با این روش می‌توان کلیه هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم تحمیل‌شده به مصرف‌کننده بر اثر وقوع خاموشی را محاسبه کرد. [11]

مصرف‌کنندگان صنعتی معمولاً یکی از این روش‌ها را برای کاهش آثار نامناسب قطع برق مورد استفاده قرار می‌دهند: ۱) پس از وصل مجدد برق و با استفاده از ظرفیت مازاد تولید، در ساعات کار عادی واحد صنعتی، تولید از دست رفته را جبران می‌کنند؛ ۲) پس از وصل

[18] **Customer damage function (CDF)**

مجدد برق و در ساعات اضافه‌کار در روز وقوع خاموشی، تولید از دست رفته را جبران می‌کنند؛ ۳) پس از وصل مجدد برق و با افزایش نوبت‌های کاری، تولید از دست رفته را جبران می‌کنند؛ و بالاخره ۴) با استفاده از مولد برق اضطراری, در دوره خاموشی تولید را ادامه می‌دهند. به این ترتیب، رابطه مورد استفاده برای محاسبه هزینه ناشی از قطع برق در صورت به‌کارگیری روش‌های ۱ تا ۳ عبارت است از:

$$LOLC_i = \left[(1-a_i)\times\frac{V}{h}\times(i+0.25)\right] + W_i + R_i + \left[\sum_k (O_{ik} - S_{ik} - E_{ik})\right] - L_i - K\times d\times(i+0.25)$$

در صورت به‌کارگیری روش ۴، هزینه خاموشی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$LOLC_i = \left[\left(1-a_i^{'}\right)\times\frac{V}{h}\times i\right] + 0.25\times\frac{V}{h} + E_i P_E + \frac{M}{1400}\times i + R_G + \frac{GV}{J}\times i$$
$$+\left[\sum_k (O_{ik} - S_{ik} - E_{ik})\right] - L_i - K\times d\times(i+0.25)$$

که در این روابط، $LOLC_i$ هزینه (خسارت) بروز خاموشی به‌مدت i ساعت (ریال)، i دوره زمانی خاموشی (ساعت)، V ارزش افزوده واحد صنعتی (ریال)، h تعداد ساعات کار انجام شده در واحد صنعتی در طول سال، a_i درصدی از تولید از دست رفته در مدت خاموشی که پس از وصل برق با استفاده از مولد برق اضطراری جبران می‌شود، W_i جبران خدمات کارکنانی که پس از وصل مجدد برق، تولید از دست رفته را جبران می‌کنند (ریال)، R_i هزینه راه‌اندازی تجهیزات تکمیلی برای جبران تولید (ریال)، O_{ik} سایر هزینه‌های ناشی از وقوع خاموشی (ریال)، S_{ik} ارزش فروش ضایعات ناشی از وقوع خاموشی (ریال)، L_i دستمزد پرداخت نشده به کارکنان طی دوره خاموشی (ریال)، E_{ik} بهای k امین واحد انرژی الکتریکی مصرف نشده طی دوره خاموشی (ریال)، K متوسط انرژی الکتریکی مصرفی واحد صنعتی در هر ساعت (کیلووات‌ساعت)، d متوسط قیمت هر کیلووات‌ساعت برق مصرفی واحد صنعتی (ریال)، E_i مقدار سوخت مصرفی مولد برق اضطراری در صورت قطع برق به‌مدت i ساعت، P_E قیمت هر واحد سوخت مصرفی مولد برق اضطراری (ریال)، R_G هزینه راه‌اندازی مولد برق اضطراری (ریال)، GV ارزش باقیمانده مولد برق اضطراری (ریال)، J عمر مفید باقیمانده مولد برق اضطراری (ساعت)، M هزینه نگهداری و تعمیر سالانه مولد برق اضطراری و بالاخره $a_i^{'}$ ضریب اصلاح شده a_i است. علت اصلاح ضریب مزبور این است که معمولاً مولد برق اضطراری بلافاصله پس از قطع برق شبکه شروع به کار نمی‌کند. از این‌رو، مدت‌زمان مفید استفاده از این مولد کمتر از مدت‌زمان خاموشی شبکه است. بنابراین، ضریب a_i باید طبق رابطه ذیل اصلاح شود:

$$a_i^{'} = \frac{i - t_{start}}{i}\times a_i$$

که در رابطه فوق، t_{start} زمان لازم برای راه‌اندازی مولد برق اضطراری است. همچنین در روابط فوق فرض شده که پس از وصل برق، ۱۵ دقیقه زمان لازم است تا بهره‌برداری مجدد از واحد صنعتی آغاز شود. در این‌صورت طی این ۱۵ دقیقه، واحد فعال نیست و باید این زمان به دوره خاموشی افزوده شود. [۱۱]

تابع خسارت مصرف‌کننده نشان می‌دهد که وی بابت هر واحد کاهش در انرژی تأمین نشده خود، چقدر حاضر است بپردازد. مصرف‌کنندگان مختلف دارای توابع خسارت متفاوت بوده و از این‌رو، سطح پایایی مورد نیاز آنها ـ یا به‌عبارت دیگر، مقرون‌به‌صرفه‌ترین سطح پایایی از دید آنها ـ متفاوت است. بنابراین، تأمین پایایی یکسان برای همه مصرف‌کنندگان عملاً کاری غیراقتصادی است. بر این اساس، در محیط جدید صنعت برق، «تفکیک سطح پایایی مصرف‌کنندگان» به‌عنوان یک ایده جذاب مورد توجه قرار گرفته است. مطابق این ایده، پایایی یکی از خدمات صنعت برق است که مصرف‌کنندگان می‌توانند با پرداخت هزینه‌های مربوطه، از سطوح مختلف آن بهره‌مند شوند. بدیهی است که بعضی از مصرف‌کنندگان حاضرند مبالغ اضافی بابت افزایش پایایی انشعاب برق خود بپردازند و برعکس، بعضی دیگر حاضرند در ازای کاهش هزینه برق خود، پایایی پائین‌تر را بپذیرند. [۱۲] به‌این‌ترتیب می‌توان گفت که پایایی سیستم انرژی الکتریکی در اثر تجدیدساختار «واقعی‌تر»[19] می‌شود، یعنی مصرف‌کنندگانی که پایایی از نظر آنها اهمیت بیشتری دارد، با پرداخت بهای لازم از آن بهره‌مند می‌شوند و مصرف‌کنندگانی که پایایی از نظر آنها اهمیت کمتری دارد، از برق ارزان‌تری استفاده می‌کنند که پایایی کمتری دارد.

---

[19] **این مقدار واقعی‌تر می‌تواند بیشتر یا کمتر از سطح پایایی در ساختار قبلی باشد.**

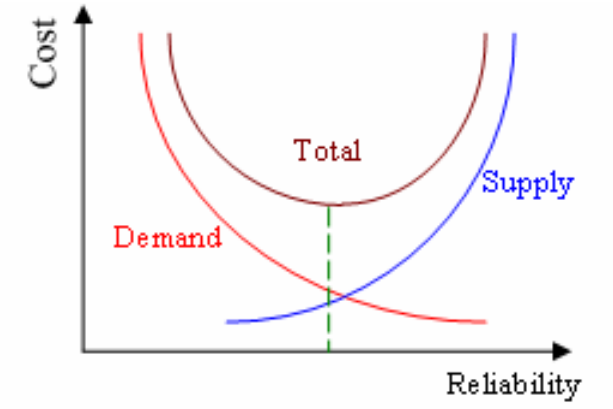
از سوی دیگر، با توجه به مطالبی که در بخش دوم در ارتباط با تجدیدساختار صنعت برق گفته شد، می‌توان دریافت که در چنین محیطی، صنایع بزرگ ـ به‌عنوان مصرف‌کنندگان عمده برق ـ با گزینه‌های متعددی برای تأمین انرژی مورد نیاز خود مواجه می‌شوند. آنها می‌توانند:

۱) از بنگاههای خرده‌فروش یا واسطه‌ها برق بخرند؛
۲) به‌صورت مستقیم در بازار مشارکتی یا بورس برق شرکت کنند؛
۳) با تولیدکنندگان برق قراردادهای دو یا چندجانبه تأمین انرژی منعقد کنند؛
۴) برای خود واحد تولید محلی احداث نمایند؛ و بالاخره
۵) تلفیقی از این راهکارها را مورد توجه قرار دهند.

به‌این‌ترتیب، با توجه به مجموعه مطالب ذکر شده در این بخش و بخش‌های قبلی، می‌توان دو مسأله اساسی را از دید مصرف‌کنندگان عمده صنعتی مطرح نمود:

۱) اقتصادی‌ترین (مقرون به‌صرفه‌ترین) سطح پایایی کجا است؟
۲) برای دست‌یابی به این سطح پایایی، اقتصادی‌ترین راه تأمین برق کدام است؟

همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد، حل هم‌زمان این دو مسأله با استفاده از رویکرد ارزش/هزینه قابلیت‌اطمینان ـ که ملاحظات اقتصادی و فنی سیستم را توأم با هم مورد توجه قرار می‌دهد ـ امکان‌پذیر است. پایایی برای همه مصرف‌کنندگان برق ـ و به‌خصوص مصرف‌کنندگان صنعتی ـ شاخص ارزشمندی به‌شمار می‌رود زیرا کاهش آن ـ یعنی افزایش تعداد و دوره خاموشی یا قطع برق ـ موجب خسارت آنها می‌شود. به‌طور کلی، مصرف‌کنندگان برق علاقمند به کاهش هزینه‌های برق از یک‌سو و ارتقای سطح کیفیت و پایایی تأمین برق از سوی دیگر هستند. این در حالی است که افزایش سطح پایایی تأمین برق مستلزم صرف هزینه است. بنابراین، برای تعیین اقتصادی‌ترین سطح پایایی باید ۱) خسارات ناشی از عدم‌تأمین برق و ۲) هزینه‌های تأمین برق را توأم با یکدیگر مورد توجه قرار داد. شکل ۱۰ نشان‌دهنده این ایده است. [۱۰] همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش سطح پایایی سیستم، هزینه‌های تأمین برق افزایش و خسارات ناشی از قطع برق کاهش می‌یابند. اقتصادی‌ترین سطح پایایی جایی است که در آن، مجموع هزینه‌های ذکر شده حداقل می‌شود. با تعیین مقرون‌به‌صرفه‌ترین سطح پایایی، می‌توان روش بهینه تأمین برق و هزینه متناظر با آن را با استفاده از منحنی هزینه تأمین برق به‌دست آورد.



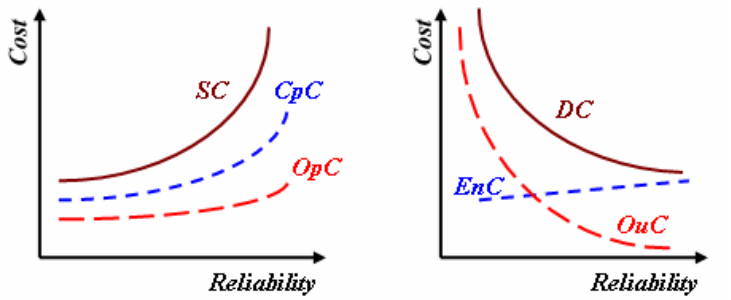
شکل ۱۰- تعیین اقتصادی‌ترین سطح پایایی بر اساس تحلیل هزینه/ارزش پایایی

روابط بیان‌گر هزینه‌های فوق عبارتند از:

$$TC = SC + DC$$
$$SC = CpC + OpC$$
$$DC = EnC + OuC$$

که در این روابط، TC مجموع هزینه‌های مختلف، SC هزینه تأمین برق، DC خسارت مصرف‌کننده برق، CpC هزینه سرمایه-

گذاری، OpC هزینه بهره‌برداری (عملیاتی)، EnC هزینه کاربری انرژی و بالاخره OuC هزینه قطع برق است. (شکل ۱۱)



شکل ۱۱- (راست) مؤلفه‌های خسارت عدم‌تأمین برق مصرف‌کننده و (چپ) هزینه‌های تأمین برق

هزینه قطع برق شامل دو مؤلفه است که به آثار و تبعات قطع توان و انرژی مربوط می‌شوند. مؤلفه قطع توان تابعی است از P_λ یعنی میزان توان قطع‌شده و f که فرکانس (تعدد) وقوع خاموشی است. مؤلفه قطع انرژی هم تابعی است از D یعنی مدت‌زمان خاموشی. به این ترتیب، هزینه قطع برق (OuC) را می‌توان با روابط زیر بیان کرد:

$$OuC = PoC + EoC$$
$$PoC = PNS \times IPC$$
$$EoC = ENS \times IEC$$
$$PNS = \sum_x (P\lambda_x \times f_x)$$
$$ENS = \sum_x (P\lambda_x \times f_x \times D_x)$$

که در این روابط، PoC خسارت قطع توان (ریال بر سال)، EoC خسارت قطع انرژی (ریال بر سال)، PNS توان تأمین‌نشده (کیلووات بر سال)، ENS انرژی تأمین‌نشده (کیلووات‌ساعت بر سال)، IPC خسارت قطع توان (ریال بر کیلووات)، IEC خسارت قطع انرژی (ریال بر کیلووات‌ساعت)، x شاخص نشان‌گر خاموشی‌های رخ داده در یک سال، $P\lambda_x$ میزان توان الکتریکی قطع‌شده (از دست رفته) در خاموشی xام (کیلووات)، f_x فرکانس (تعداد) وقوع خاموشی xام و D_x مدت‌زمان خاموشی xام (ساعت) می‌باشند.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- طی سال‌های اخیر، تحولات مهمی در سیستم‌های عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی ایجاد شده است که از آنها تحت عنوان کلی «تجدیدساختار صنعت برق» یاد می‌شود.
- یکی از مهم‌ترین آثار تجدیدساختار صنعت برق، ایجاد محیط رقابتی جدیدی است که در آن، صنعت برق دیگر در انحصار مراجع متمرکز دولتی نیست و شرکت‌های خصوصی می‌توانند در بخش‌های مختلف آن فعالیت نمایند.
- یکی دیگر از آثار تجدیدساختار در صنعت برق، رشد سریع تولیدات پراکنده[۲۰] و محلی است. در این محیط جدید، مصرف‌کنندگان عمده برق ـ از جمله صنایع بزرگ ـ اجازه می‌یابند که برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز خود، نیروگاههای کوچک محلی احداث کرده و حتی اقدام به فروش برق کنند.
- در محیط جدید صنعت برق، مصرف‌کنندگان عمده برق دیگر ناچار نیستند که انرژی و خدمات مورد نیاز خود را از یک مرجع مشخص و ثابت دریافت کنند و در این زمینه گزینه‌های متنوعی برای انتخاب خواهند داشت.
- پایایی در رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان برق نقش اساسی را ایفا می‌کند و پس از قیمت برق، بیش از هر عامل دیگری مورد توجه مصرف‌کنندگان است.

---

[20] **Dispersed generation**

- پایایی سیستم‌های تأمین انرژی الکتریکی همچون سایر سیستم‌های مهندسی باید در اقتصادی‌ترین سطح ممکن ـ و نه در بالاترین سطح ممکن ـ تنظیم گردد.
- امروزه، بسیاری از صنایع بخش مهمی از انرژی مورد نیاز خود را از طریق شبکه‌های برق‌رسانی تأمین می‌کنند اما وابستگی فعالیت‌های آنها به انرژی الکتریکی یکسان نیست و در نتیجه، خسارت وارد شده به آنها در اثر قطع برق نیز متفاوت است. این خسارت را می‌توان با استفاده از شاخص «هزینه قطع بار» تعیین کرد.
- برای تعیین اقتصادی‌ترین سطح پایایی باید خسارات ناشی از عدم‌تأمین برق و هزینه‌های تأمین برق را توأم با یکدیگر مورد توجه قرار داد. اقتصادی‌ترین سطح پایایی جایی است که در آن، مجموع هزینه‌های ذکر شده حداقل می‌شود. با تعیین مقرون‌به‌صرفه‌ترین سطح پایایی، می‌توان روش بهینه تأمین برق و هزینه متناظر با آن را با استفاده از منحنی هزینه تأمین برق به‌دست آورد.

منابع و مراجع

[1] R. Billinton, “Reliability considerations in the new electric power utility industry,” in *Proc. 1997 Canadian Electricity Conf. and Exp.*, pp. 1-10, 1997.
[2] X. Vieira Filho, A. C. G. Melo, A. M. Leite da Silva, L. A. F. Manso, B. G. Gorenstin, and J. C. O. Mello, “Unbundling supply reliability in competitive power systems,” *CIGRE Session 2002*.
[3] M. D. Ilic, J. R. Arce, Y. T. Yoon, and E. M. Fumagalli, “Assessing reliability as the electric power industry restructures,” *The Electricity Journal*, pp. 55-67, Mar. 2001.
[4] (Book) M. Shahidehpour and M. Alomoush, “Restructured electric power systems, operation, trading, and volatility”, Marcel Dekker, New York, 2001.
[5] (Book) M. Ilic, et al., “Power systems restructuring: engineering and economics”, Kluwer Academic Publishing, 1998.
[6] (Book) A. J. Wood and B. F. Wollenberg, “Power generation, operation, and control”, John Wiley and Sons, New York, 1996.
[7] (Book) H. L. Willis and W. G. Scott, “Distributed power generation: planning and evaluation”, Marcel Dekker, New York, 2000.
[8] (Book) N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and G. Strbac, “Embedded Generation”, London: The Institution of Electrical Engineers, 2000.
[9] (Book) R. Billinton and R. N. Allan, “Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques”, 2nd Edition, Plenum Publishers, New York, 1992.
[10] (Book) R. Billinton and R. N. Allan, “Reliability evaluation of power systems”, 2nd Edition, Plenum Press, New York, 1996.
[۱۱] ن. خسروی و ف. امینی، «محاسبه خسارت ناشی از عدم تأمین برق برای مشترکان صنعتی با دیماند بیش از ۲ مگاوات شرکت برق منطقه‌ای تهران»، نشریه علمی برق، شماره ۳۷، ۱۳۸۲، صفحه ۹۲ تا ۱۰۲.
[۱۲] آ. احسانی، ع. م. رنجبر، م. احسان و م. فتوحی فیروزآباد، «قابلیت‌اطمینان در سیستم‌های قدرت با دسترسی باز»، نشریه علمی برق، شماره ۳۷، ۱۳۸۲، صفحه ۸۲ تا ۹۱.