بروندادهای تخصصی
گروه پژوهشی بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت

سال اول، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۵

پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی

بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت

پیشنهاد رویکردی جامع برای تدوین محورهای تحقیق و توسعه سیستم قدرت ایران / مرتضی شعبان‌زاده، حامد فراهت، زهرا مدیحی بیدگلی، امید شاه‌حسینی

طراحی نرم‌افزار تعیین زمان‌بندی بهینه تعمیرات پیشگیرانه‌ی واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی بازار برق و بورس انرژی / مرتضی شعبان‌زاده

پای صحبت استاد / زهرا مدیحی بیدگلی

آشنایی با مرکز تحقیقات مهندسی سیستم‌های قدرت (*PSERC*) / امید شاه‌حسینی

معرفی کتاب *Practical Power System Operation*

معرفی کتاب شصت تجربه بهره‌برداری و دیسپاچینگ سیستم قدرت

به نام خدا

بروندادهای تخصصی

گروه پژوهشی بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت

صاحب‌امتیاز: پژوهشگاه نیرو

مدیرمسئول: زهرا مدیحی بیدگلی

سردبیر و مدیر اجرایی: مرتضی شعبان‌زاده

گرافیست و صفحه‌آرا: مرتضی شعبان‌زاده

ویراستار: مرتضی شعبان‌زاده

عکس روی جلد: مرتضی شعبان‌زاده

همکاران گروه:

زهرا مدیحی، امید شاه‌حسینی، حامد فراهت، مرتضی شعبان‌زاده

➢ **همکاران این شماره:**

دکتر محمد فتاحی حسن‌آباد، سید پیمان موسوی، لادن خرسند

همکاران معاونت پژوهشی:

ثریا رستمی، نوشین فرودی

➢ **ناشر:**

نشانی الکترونیکی: psoperation@nri.ac.ir

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای پونک باختری، پژوهشگاه نیرو، گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت

تلفن: ۸۸۰۷۹۳۸۵-۰۲۱

دورنگار: ۸۸۰۷۹۴۳۹-۰۲۱

اعضای هیات تحریریه:

زهرا مدیحی، امید شاه‌حسینی، حامد فراهت، مرتضی شعبان‌زاده

اعضای هیات داوران:

دکتر امیر صفدریان

مهندس علیرضا قائم‌پناه

اهداف و رویکرد:

«بروندادهای تخصصی گروه پژوهشی بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت» با هدف فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات و انتشار مطالب مرتبط با بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت به‌صورت داخلی منتشر می‌شود.

این مجموعه از هرگونه پیشنهاد یا انتقاد برای هرچه بهترشدن مطالب استقبال می‌کند و استفاده از مطالب آن با ذکر منبع بلامانع است.

مسئولیت مطالب، مقالات و پژوهش‌های درج‌شده بر عهده نویسندگان است.

پژوهشگاه نیرو

فهرست مطالب

۱ • سخن سردبیر

۲ • پیشنهاد رویکردی جامع برای تدوین محورهای تحقیق و توسعه سیستم قدرت ایران

۲۴ • طراحی نرم‌افزار تعیین زمان‌بندی بهینه تعمیرات پیشگیرانه‌ی واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی بازار برق و بورس انرژی

۴۳ • پای صحبت استاد

۶۲ • آشنایی با مرکز تحقیقات مهندسی سیستم‌های قدرت (PSERC)

۶۷ • معرفی کتاب *Practical Power System Operation*

۷۰ • معرفی کتاب *شصت تجربه بهره‌برداری و دیسپاچینگ سیستم قدرت*

سخن سردبیر

به نام آنکه هستی نام از او یافت فلک جنبش زمین آرام از او یافت

در دهه‌های اخیر، نیاز به بهره‌برداری کارآمد سیستم قدرت با هدف کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت خدمات، منتهی به تجدیدساختار سیستم و پیاده‌سازی بازارهای رقابتی برق شده است. منصفانه است که بگوییم این موضوعات تاکنون آخرین اقدامات مهم صورت گرفته در صنعت برق بوده‌اند. از طرف دیگر، در چشم‌انداز سیستم‌های قدرت آینده، به سه هدف کلانِ *تامین اقتصادی انرژی الکتریکی*، *عرضه مطمئن و ایمن آن* و *حفظ محیط زیست* بیش از سایر موضوعات توجه شده است و همین امر سبب شده تا در راستای تحقق این اهداف، در سرتاسر دنیا فعالیت‌های پژوهشی و صنعتی قابل توجهی توسط مهندسین برق، دانشگاهیان، پژوهشگران و تمامی ذینفعان صنعت برق در حال انجام باشد.

از سوی دیگر، نگرانی‌های رو به افزایش تغییرات آب و هوایی زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای سبب شده است که منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع تولید پراکنده با استقبال گسترده‌ای در سرتاسر دنیا روبرو شوند به طوری که در بسیاری از کشورها، موضوع افزایش سهم این نوع منابع در سبد تولید سیستم قدرت با جدیت در حال بررسی و پیاده‌سازی است. به طور یقین، زمانی که سهم این نوع منابع انرژی در بخش تولید قابل ملاحظه باشد لازم است که در برنامه‌ریزی، مدیریت و کنترل سیستم قدرت (در سطوح انتقال و توزیع) بازنگری صورت گیرد. این موضوعات که همگی از نگرانی‌های زیست‌محیطی در دهه حاضر نشات گرفته‌اند، اصولی هستند که به طور یقین به شکل‌دهی سیستم‌های انرژی آینده منتج خواهند شد.

این نشریه قصد دارد با چشم‌اندازی گسترده به معرفی مباحث نوین بهره‌برداری سیستم‌های قدرت با محوریت بازار برق بپردازد و موضوعاتی را که آینده شبکه‌های قدرت را حداقل برای دو دهه‌ی آینده شکل خواهند داد، با تاکید بر مباحث بهره‌برداری مورد توجه قرار دهد.

مرتضی شعبان زاده

مقاله

پیشنهاد رویکردی جامع برای تدوین محورهای تحقیق و توسعه سیستم قدرت ایران*

مرتضی شعبان‌زاده[۱]، حامد فراهت[۲]، زهرا مدیحی بیدگلی[۳]، امید شاه‌حسینی[۴]

چکیده: تعیین برنامه‌ها، اولویت‌های ملی و بر مبنای آن، تدوین سند نقشه‌راه مباحث تحقیق و توسعه (*R&D*) سیستم قدرت در ایران، برای ترسیم مسیر روشن و مطمئن تحقیقاتی، جهت پژوهشگران، مهندسین و جوامع دانشگاهی ضرورتی گریزناپذیر است. در این مقاله، با توجه به ضرورت موجود، ابتدا با مروری بر سناریوهای جهانی و اسناد چشم‌انداز بخش برق کشورهای منتخب، مبانی نظری چگونگی تدوین نقشه‌راه *R&D* سیستم قدرت معرفی می‌شود. در ادامه، وضع موجود صنعت برق ایران، پیش‌ران‌ها، اسناد بالادستی و چالش‌های پیش رو این صنعت بررسی خواهند شد. سپس با ارائه یک مدل ذهنی تعلیلی–توجیهی، چارچوبی مناسب جهت تدوین سند نقشه‌راه مباحث تحقیقاتی سیستم قدرت ایران پیشنهاد می‌گردد. این مقاله، از یک طرف، به معرفی موضوعات فنی اجتناب‌ناپذیر از نگاه متخصصین و سیاستگذاران صنعت برق دنیا خواهد پرداخت (مباحثی که آینده آن را حداقل برای دو دهه‌ی آینده شکل خواهند داد) و از طرف دیگر، چالش‌های کلیدی مرتبط با توسعه سیستم آینده را شناسایی خواهد نمود.

کلیدواژه: نقشه راه تحقیق و توسعه (*R&D*)؛ صنعت برق؛ بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت؛ پیش‌ران‌های مدرن‌سازی شبکه قدرت؛ آینده‌ی شبکه قدرت؛ آینده‌پژوهی؛ سیاست‌پژوهی.

* کار تحقیقاتی ارائه شده در این مقاله، در راستای اجرای پروژه‌ای پژوهشی تحت عنوان "نقشه راه تحقیق و توسعه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت" می‌باشد که در حال حاضر، با حمایت مالی و معنوی پژوهشگاه نیرو در حال انجام است.

[۱] کارشناس پژوهشی گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، رایانامه: mshabanzadeh@nri.ac.ir

[۲] کارشناس پژوهشی گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، رایانامه: hfarahat@nri.ac.ir

[۳] مدیر گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، رایانامه: zmadihi@nri.ac.ir

[۴] کارشناس پژوهشی گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، رایانامه:oshahhoseini@nri.ac.ir

۱. مقدمه

موفقیت اقتصادی یک کشور کاملا به نحوه تامین و مدیریت انرژی الکتریکی مورد نیاز صنایع آن وابسته است. اقتصاد دیجیتال (بانک‌های الکترونیکی)، امنیت ملی و حتی زندگی روزمره جوامع بشری به شدت به تامین برق مطمئن، ایمن، کافی، ارزان و امن نیازمند است. با این هدف، در طی سالیان اخیر، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت تحولات قابل توجهی را تجربه کرده‌اند و نگرش‌های سنتی نسبت به اجرای آن‌ها تغییر بسزایی پیدا کرده است. تحولات عمده صورت گرفته از قبیل تجدیدساختار سیستم قدرت[1] و معرفی رویکردهای رقابت‌محور در صنعت برق و همچنین هوشمندسازی شبکه قدرت، نقش موثری را در این راستا ایفا کرده‌اند. در این میان، انتظار می‌رود مباحث مطالعاتی سیستم‌های قدرت آینده و چالش‌های مرتبط با مدیریت و کنترل آن‌ها نیز همگام با تحولات صورت گرفته به‌روز رسانی شده و از آن نیز پیشی گیرند. در کشورهای توسعه‌یافته دنیا، متحول‌سازی صنعت برق از سال‌های قبل شروع شده و برای حداقل ۱۰ سال آینده، برنامه‌ریزی‌های لازم در جهت تحقق آن نیز صورت گرفته است به گونه‌ای که تحولات آینده‌ی صنعت برق تاثیر قابل ملاحظه‌ای در قابلیت‌اطمینان، بهره‌برداری از سیستم‌های انتقال و توزیع، امنیت، تاب‌آوری[2]، حق انتخاب مصرف‌کنندگان برق و بسیاری از موارد دیگر خواهد گذاشت.

در سیستم‌های قدرت آینده، یقینا مصرف‌کننده‌ها خواهان حق انتخاب و امکان کنترل بیشتر بر مشخصات انرژی مورد نیاز خود خواهند بود لذا انتظار می‌رود نهادهای خصوصی همچون خرده‌فروش‌های برق[3] و

[1] Power System Restructuring
[2] Resiliency
[3] Electric Power Retailers

تجمیع‌کننده‌های بار[1] با انگیزه بیشتری وارد این عرصه شوند تا بنا بر نوع درخواست مدنظر مصرف‌کننده‌ها، خدمات جدیدی را به آنها ارائه نمایند. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که هزینه تولید منابع انرژی پراکنده (*DER*)[2] با کاهش قابل توجهی روبرو شده و قابلیت رقابت با نیروگاه‌های سنتی بزرگتر را پیدا کنند. ضمن اینکه به نسبت رشد این فناوری‌ها، سطح انتظارات مصرف‌کننده‌ها نیز در برخورداری از برقی مطمئن‌تر افزایش پیدا خواهد کرد. در نتیجه‌ی این تعاملات، پویایی شبکه با تغییرات فزاینده‌ای روبرو شده و مسلما پیچیدگی‌های بهره‌برداری از آن نیز دوچندان خواهد شد [۱].

در این راستا، رهنگاری صنعت برق کشور با هدف ایجاد تطابق مسیر سرمایه‌گذاری در بخش تحقیق و توسعه، تسهیلات و منابع انسانی با نیازهای فعلی و آتی کشور و بازار جهانی، امری ضروری است. نقشه‌راه از نگاهی جامع به آینده در یک حوزه منتخب (در این کار تحقیقاتی، صنعت برق) و از دانش و خرد جمعی و پندار گروه‌ها و افرادی که پیش‌ران‌های تغییرات آینده آن حوزه را شناسایی و اولویت‌بندی می‌کنند، به دست می‌آید. بر این اساس، نقشه‌راه *R&D* صنعت برق کشور به عنوان یک مسیر روشن و مطمئن تحقیقاتی برای پژوهشگران، مهندسین و جوامع دانشگاهی بسیار موثر و راهگشا خواهد بود. در مقاله حاضر تلاش شده است ضمن بیان مبانی نظری نقشه‌راه تحقیقات صنعت برق کشور و ضرورت تدوین آن، پیش‌ران‌ها و سناریوهای جهانی سیستم‌های قدرت آینده نیز بررسی شوند و در نهایت بر مبنای مطالعات انجام شده و ترسیم تصویر وضع موجود، پیشنهادی جهت تدوین نقشه‌راه مورد نظر ارائه گردد.

[1] Load Aggregators
[2] Distributed Energy Resources

منصفانه است که بگوییم مباحث ناشی از تجدیدساختار سیستم قدرت و بازار برق تقریبا آخرین اقدامات مهم صورت گرفته در فضای مطالعاتی سیستم‌های قدرت بوده‌اند [۲]. در سال‌های اخیر، نگرانی‌های رو به افزایش تغییرات آب و هوایی زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای سبب شده است که منابع انرژی تجدیدپذیر (*RES*)[1] و منابع تولید پراکنده (*DG*)[2] با استقبال گسترده‌ای در سرتاسر دنیا روبرو شوند. اما به دلیل اتکاناپذیری و غیرقابل دیسپچ بودن این نوع واحدها، به طور یقین چالش‌هایی را برای سیستم قدرت به همراه خواهند داشت. در اروپا، امریکا، کانادا، ژاپن و بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، موضوع افزایش سهم این نوع منابع در سبد تولید سیستم با جدیت در حال بررسی و پیاده‌سازی است. زمانی که سهم منابع *RES* و *DG* در بخش تولید قابل ملاحظه باشد در این صورت لازم است که در برنامه‌ریزی، مدیریت و کنترل سیستم قدرت (در سطوح انتقال و توزیع) بازنگری صورت گیرد.

این مقاله، از یک طرف، به معرفی موضوعات فنی اجتناب‌ناپذیر از نگاه متخصصین و سیاستگذاران صنعت برق دنیا خواهد پرداخت (مباحثی که آینده شبکه‌های قدرت را حداقل برای دو دهه‌ی آینده شکل خواهند داد) و از طرف دیگر، چالش‌های کلیدی مرتبط با توسعه سیستم آینده که مواجهه با آن‌ها گریزناپذیر است را شناسایی خواهد نمود. در ادامه، به بررسی گزارش چشم‌انداز صنعت برق کشورهای اتحادیه اروپا، کانادا، امریکا، استرالیا، ژاپن، آفریقای جنوبی، هند و سیگره (*CIGRE*) خواهیم پرداخت تا بر مبنای تجزیه و تحلیل نوع نگرش و راهکارهای انتخابی آن‌ها نسبت به چالش‌ها و دغدغه‌های آینده‌ی سیستم‌های قدرت، بتوان به یک متدولوژی مناسب برای تدوین نقشه‌راه تحقیقات در حوزه برق و انرژی دست پیدا نمود.

[1] Renewable Energy Sources
[2] Distributed Generation

۲. تحلیل چشم‌انداز تحقیق و توسعه کشورهای منتخب

۱،۲. معرفی روند استخراج نقشه‌راه

با نگاهی کلی و تحلیلی به روند تعیین سند نقشه‌راه تحقیق و توسعه سیستم‌های قدرت در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه، روندی تقریبا مشترک در تدوین این اسناد قابل تشخیص است که انجام هریک از مراحل یاد شده دارای سازوکاری است که در ادامه، مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت:

۱- کشف محرک‌ها و انگیزه‌های اولیه تحقیق و توسعه

۲- تحلیل چالش‌های موجود در رابطه با هر یک از محرک‌های اولیه و کشف محرک‌های ثانویه و در نهایت تعیین راهکارهای کلی و نخستین.

۳- تعیین اهداف کلان و چشم‌اندازها (بر اساس محرک‌های اولیه و ثانویه، چالش‌ها و راهکارهای اولیه)

۴- گردآوری مجموعه راهکارها، چالش‌ها، مباحث و موضوعات در ذیل اهداف کلان و چشم‌اندازها

۵- دسته‌بندی مباحث، موضوعات و تعیین محورهای کلان مطالعاتی

۶- تعیین نهادهای مرتبط و سازوکارهای انجام تحقیقات و توسعه بر اساس محورها و روندهای تعیین شده

- **گام اول: سازوکار کشف محرک‌ها و انگیزه‌های اولیه تحقیق و توسعه**

با وجود اشتراکات فراوان در روند تهیه اسناد نقشه‌راه *R&D* صنعت برق در تمامی کشورهای مورد مطالعه، به خصوص وجود محرک‌ها و انگیزه‌های اولیه‌ی بسیار مشابه، تفاوت عمیق و معناداری در سازوکار انجام مطالعات و تعیین اهداف، چشم‌اندازها، محورها، مباحث و موضوعات تدوین‌شده به چشم می‌آید.

در یک ارزیابی کلی، می‌توان نگاه حاکم بر تلاش‌های صورت گرفته در کشورهای مختلف را به دو نگاه درونی و کل‌نگر (در کشورهای توسعه‌یافته) و بیرونی و جزءنگر (در کشورهای در حال توسعه) تقسیم نمود. نگاه درونی و کل‌نگر در کشورهای توسعه‌یافته حاصل درک عمیق، بلند نظرانه و مواجهه مستقیم با مسائل و چالش‌های کلان در این کشورها است؛ در حالی که عموما در کشورهای در حال توسعه دیدگاه‌ها نسبت به مسائل یاد شده دارای عمق کمتر و وام‌گرفته از دغدغه‌های کشورهای توسعه‌یافته است. مطالعه تحلیلی صورت گرفته در ادامه این بخش، نگاه روشن‌تری نسبت به سازوکار استخراج نقشه‌راه *R&D* در صنعت برق ارائه خواهد نمود.

۱،۱،۲. محرک‌ها (پیش‌ران‌ها)

الف) منشاء بروز محرک‌ها و انگیزش‌ها

در یک دسته‌بندی اولیه از دیدگاه کلی سیستم قدرت، پیش‌ران‌های استخراج شده می‌توانند در دو شاخه تقسیم‌بندی شوند: ۱- محرک‌های برون‌سیستمی؛ ۲- محرک‌های درون‌سیستمی

محرک‌های برون سیستمی، در واقع شامل الزامات و مطالبات القاء شده از خارج از سیستم قدرت بوده و مبتنی بر مطالعات و هدف‌گذاری‌های انسانی، اجتماعی و اقتصادی است. در مقابل، محرک‌های درون سیستمی متاثر از تغییر و تحولات صورت گرفته در داخل سیستم قدرت (مانند تغییر و توسعه ساختار سیستم و یا اثرات ورود فناوری‌های نو به شبکه قدرت) و بروز چالش‌ها و مسائل درون‌سیستمی است. در یک دیدگاه کلان‌تر به موضوع (خارج از مباحث سیستم قدرت)، محرک‌ها و انگیزه‌ها می‌توانند دارای دو تقسیم‌بندی متفاوت دیگر باشند: ۱- محرک‌های مبتنی بر هدف؛ ۲- محرک‌های مبتنی بر چالش.

سنجش و ارزیابی هر مقوله علمی نیازمند شاخص‌ها و معیارهای عینی است. از سوی دیگر، مطالعه هر مقوله علمی منجر به ارائه پاسخ‌هایی خواهد شد که در عمل ممکن است دارای تعارض با دیگر مقولات باشند که این تعارض‌ها خود چالش‌های جدیدی را ایجاد خواهند نمود. به این ترتیب، بخشی از پیش‌ران‌های تحقیق و توسعه مبتنی بر چالش، حاصل پاسخ‌های ارائه شده به محرک‌های مبتنی بر هدف است (محرک‌های ثانویه).

ب) سازوکار کشف و تعیین محرک‌ها

تعیین محرک‌های برون سیستمی، بر اساس نگاشت اهداف ناشی از مطالعات کلان انسانی، اقتصادی و اجتماعی هر کشور بر روی حوزه‌های انرژی خود تعیین می‌گردد. به عنوان مثال، توسعه فناوری مولدها و مصارف تجدیدپذیر ناشی از بازنمایی مطالعات کلان زیست‌محیطی و کاهش گازهای گلخانه‌ای در کشورهای توسعه‌یافته است. این مطالب بیانگر این موضوع است که دستیابی به محرک‌های برون‌سیستمی اصیل، نیازمند انجام مطالعات کلان انسانی، اجتماعی و اقتصادی در کشور هدف می‌باشد.

تعیین محرک‌های برون‌سیستمی سیستم‌های قدرت، عموما توسط برگزاری نشست‌های علمی با حضور پژوهشگران اقتصادی و اجتماعی و همچنین متخصصین حوزه‌های کلان سیستمی و شرکت‌های پیش‌رو در ارائه و طراحی فناوری‌های نوین صورت می‌گیرد. در این میان، نقش مهم علوم پایه و بنیادی (مطالعات اقتصادی، حقوقی و اجتماعی در حوزه انسانی و ریاضیات، شیمی و فیزیک کاربردی در حوزه فنی) را نباید نادیده گرفت.

از سوی دیگر، کشف و تعیین محرک‌های درون‌سیستمی مبتنی بر چالش (اعم از اولیه و ثانویه) عموما به یکی از سه طریق زیر صورت می‌گیرد:

۱) انجام مصاحبه‌های تخصصی با فعالین صنعت برق (استادان دانشگاه، پژوهشگران، بهره‌برداران، تجار انرژی، صنایع بزرگ) جهت کشف چالش‌های موجود و یا ترسیم آینده‌ی سیستم قدرت.

۲) برگزاری نشست‌ها و کنفرانس‌های علمی با موضوع حل یک چالش خاص در حوزه قدرت.

۳) مطالعه و گردآوری اسناد *R&D* صنعت برق کشورهای مختلف.

ج) تحلیلی بر نحوه کشف محرک‌های R&D کشورهای مختلف

تقریبا در تمامی اسناد مطالعه شده کشورهای مختلف، سه محرک اصلی به عنوان اولین قدم در توسعه سیستم‌های قدرت، قابل استنتاج است:

- کاهش آلایندگی محیط زیست و افزایش نفوذ انرژی‌های نو
- افزایش بهره‌وری و ارتقاء بازار انرژی
- بهبود سطح امنیت

با این حال، در کشور ژاپن، به دلیل وقوع حادثه فوکوشیما و انتشار وسیع مواد رادیواکتیو، موضوع حفظ ایمنی نیز در کنار سایر اهداف کلان از اهمیت یکسانی برخوردار است. همچنین در کشور آفریقای جنوبی، موضوع توسعه پایدار و افزایش بهره‌وری انرژی تنها انگیزه اصلی توسعه صنعت برق این کشور معرفی شده است. در این میان، نوسازی دارایی‌ها، افزایش نفوذ فناوری‌های نو، افزایش دسترسی به انرژی الکتریکی در سطح کشور، برخورداری از جمعیت جوان و توانمند از دیگر محرک‌های ارائه شده در برخی از کشورها از جمله هند است. جدول (۱) انگیزه‌های تحقیقاتی در صنعت برق کشورهای مختلف را نشان می‌دهد.

جدول (۱): پیش‌ران‌های اصلی تحقیق و توسعه صنعت برق کشورهای مختلف (توسعه‌یافته و در حال توسعه)

	نمونه‌های مطالعاتی	اتحادیه اروپا	کانادا	امریکا	استرالیا	هند	آفریقای جنوبی	ژاپن	سیگره
پیش‌ران‌های تحقیق و توسعه در صنعت برق	افزایش بهره‌وری انرژی (تولید انرژی با کمترین هزینه (توسعه پایدار) - (اقتصاد کم‌کربن)	•	•	•	•	•	•	•	•
	کاهش آلایندگی زیست‌محیطی	•	•	•	•	•		•	•
	افزایش قابلیت اطمینان (بهبود امنیت سیستم) - (افزایش انعطاف‌پذیری)	•	•	•	•	•		•	•
	ایمنی							•	
	نوسازی دارایی‌ها		•		•	•			•
	فرصت بهره‌مندی بیشتر از فناوری IT در صنعت برق		•						•
	اتصال و یکپارچه‌شدن شبکه قدرت (صادرات برق) - (همکاری با کشورهای همسایه)		•				•		
	مشارکت مشترکین برق (مدیریت مصرف)				•	•			•
	رفع گرفتگی خطوط و ایجاد دسترسی آزاد به شبکه برای همه بازیگران								•
	دسترسی به انرژی (افزایش برق‌رسانی به روستاها)					•	•		
	برخورداری از جمعیت جوان (توسعه دانش بنیان)			•		•			
	کاهش تلفات (غیرفنی)					•			

از میان محرک‌های یاد شده، کاهش آلایندگی زیست محیطی و افزایش نفوذ انرژی‌های نو، افزایش بهره‌وری و ارتقاء بازار انرژی و برخورداری از جمعیت جوان و تحصیل‌کرده از جمله محرک‌های برون‌سیستمی، و ارتقاء سطح امنیت، نوسازی دارایی‌ها از جمله محرک‌های درون‌سیستمی به شمار می‌روند.

الف) پیش‌ران‌های برون سیستمی

توجه به مسائل زیست‌محیطی در کشورهای توسعه‌یافته ناشی از مطالعات و تحلیل‌های عمیق، کلان‌نگر و بلندمدت در رابطه با کیفیت و وضعیت زندگی انسانی و شرایط زیست محیطی زمین است. از سوی دیگر، پیشینه تاریخی کشورهای در حال توسعه در توجه به اینگونه مسائل بسیار کمرنگ است به گونه‌ای که سهم اساسی در توسعه دانش مطالعات زیست محیطی و بسط مدل‌های مطالعاتی این مقوله، متعلق به کشورهای توسعه‌یافته و پیش‌رو بوده و مشارکت کشورهای در حال توسعه در مطالعات اجتماعی (انسانی) و زیست محیطی در سطح جهانی و کلان به شکل قابل تاملی ناچیز است.

علاوه بر این، دسترسی پایین‌تر کشورهای توسعه‌یافته به منابع انرژی فسیلی و مواجهه این کشورها با تبعات امنیتی و اقتصادی تکیه بر منابع کلاسیک انرژی، محرکه دیگری در راستای توسعه تحقیقات مرتبط با افزایش نفوذ انرژی‌های نو ایجاد نموده است. این در حالی است که دسترسی فراوان به منابع انرژی فسیلی، در کنار عدم وجود مطالعات عمیق در حوزه مباحث انسانی و زیست‌محیطی، سبب عدم اصالت این محرک‌ها در مطالعات تحقیق و توسعه کشورهای در حال توسعه در حوزه انرژی شده است. به این ترتیب، اساسا محرک‌های مطرح شده در کشورهای در حال توسعه نسبت به موضوعات زیست‌محیطی و توسعه انرژی‌های نو، بیشتر به بازگویی تقلیدوار از کشورهای توسعه یافته باز می‌گردد.

ب) پیش‌ران‌های درون سیستمی

تبدیل چالش‌های پیش رو در حوزه امنیت انرژی (قابلیت‌اطمینان، ایمنی، پایداری، انعطاف‌پذیری، کیفیت) به محرک‌های *R&D*، از یک سو، نیازمند برخورداری از دانش و طراحی‌های به‌روز دنیا در حوزه سیستم‌های انرژی است و از سویی دیگر، مبتنی بر استقبال مشتریان و جامعه تقاضاکننده است. این در حالی است که از یک طرف، طراحی فناوری‌های نوین سیستم‌های انرژی عمدتا در مراکز *R&D* کشورهای توسعه‌یافته صورت می‌گیرد و کشورهای در حال توسعه عمدتا بهره‌بردار محصولات ارائه شده هستند و از طرف دیگر، به دلیل بالاتر بودن سطح استاندارد و کیفیت زندگی اجتماعی و استقبال شرکت‌های تجاری–صنعتی، مطالبات اصلی این حوزه عمدتا در خود کشورهای توسعه‌یافته صورت می‌گیرد. لذا به نظر می‌رسد که درک چالش‌ها و الزامات این حوزه تحقیقاتی، در کشورهای توسعه‌یافته اساسا از اصالت بسیار بیشتری برخوردار است.

- **گام دوم: کشف محرک‌های ثانویه**

با توجه به آنکه محرک‌های ثانویه (اعم از درون/برون سیستمی) همانند محرک‌های اولیه از جنس پیش‌ران‌های تحقیقات هستند، سازوکار استخراج آن‌ها نیز همانند محرک‌های اولیه می‌باشد (جدول (۲)).

جدول (۲): چالش‌های (محرک‌های ثانویه) مسیر راه کشورهای مختلف در توسعه سیستم‌های قدرت آینده

	نمونه‌های مطالعاتی	اتحادیه اروپا	کانادا	امریکا	استرالیا	هند	آفریقای جنوبی	ژاپن
چالش‌ها	توسعه پرحجم انرژی‌های تجدیدپذیر و تاثیر آن بر امنیت و قابلیت‌اطمینان سیستم	•	•		•			
	توسعه زیرساخت‌های شبکه با وجود عدم‌پذیرش جامعه	•						
	حضور پررنگ مصرف‌کننده‌های هوشمند و تغییر الگوی مصرف	•	•		•			
	افزایش تعداد تولیدکننده‌های کوچک و نیاز به ایجاد بازار خرده‌فروشی	•						•
	افزایش تقاضا	•	•					
	تغییر در الگوی ارائه خدمات‌جانبی با ظهور مولدهای مقیاس کوچک	•						
	حفظ امنیت در شرایط عدم‌قطعیت بیشتر	•						
	نیاز به انعطاف‌پذیری بیشتر	•	•					
	حفظ امنیت با وجود درهم‌تنیدگی بیشتر وظایف TSO و DSO	•						
	توسعه قوانین و مقررات	•			•			
	افزایش پیچیدگی شبکه (حفاظت، کنترل، کیفیت توان، پایداری و غیره)			•	•			
	مدیریت بار		•		•			
	نیروی کار مسن+ ناتوانی در جذب نیروی کار				•		•	
	قیمت‌گذاری نامناسب					•		
	کمبود منابع تولید و تلفات زیاد					•	•	
	تولید: (وابستگی فصلی تولید، محرومیت برق یک-سوم جمعیت)					•	•	
	انتقال: (پیری تجهیزات، گرفتگی، سرعت پایین قرائت اطلاعات)		•			•		
	توزیع: (مشکلات حریم خطوط، تفاوت زیاد بین پیک و کم‌باری، کیفیت پایین برق)					•		
	کمبود بودجه و مشکل تامین مالی						•	
	همکاری با کشورهای همسایه		•				•	

- **گام سوم: تعیین اهداف کلان و چشم‌اندازها بر اساس محرک‌های اولیه و ثانویه**

محرک‌های اولیه (اعم از برون/درون سیستمی و یا هدف/چالش-محور) عموما تعیین‌کننده اهداف کلان و محرک‌های ثانویه عمدتا تعیین‌کننده حدود دستیابی به اهداف (چشم‌اندازها) می‌باشند (جدول (۳)). همانگونه که جدول (۳) به خوبی نشان می‌دهد، با وجود این که چشم‌انداز و اهداف کلان کشورهای توسعه‌یافته، بر روی سه محور اصلی بهبود شرایط زیست محیطی، ارتقاء اقتصاد و بازار انرژی، و امنیت متمرکز است (به عنوان نمونه، چشم‌اندازهای ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ سند نقشه‌راه *R&D* صنعت برق اروپا)، در

کشورهای در حال توسعه، اهداف کلان به شکل قابل توجهی بر موضوعات خارج از پیش‌ران‌های اولیه، بیان شده‌اند و عمدتا بر عناوینی مانند کسب مقام منطقه‌ای و جهانی در صادرات فناوری و یا کسب عناوین علمی و جایزه‌های بین‌المللی تکیه کرده‌اند (به عنوان نمونه، سند نقشه‌راه و چشم‌انداز ۲۰۲۵ کشور هند). این عدم‌سنخیت میان محرک‌های اولیه کشورها، به خوبی گواه عدم وجود اصالت و تامل درونی در کشف انگیزه‌های درست تحقیقات و توسعه در کشورهای در حال توسعه است. این در حالی است که چشم‌اندازهای طراحی شده در اسناد نقشه‌راه کشورهای توسعه‌یافته به خوبی هم‌جنس، هم‌سنخ و هم‌راستا با محرک‌های اولیه خود بوده و نمایانگر عمق و انسجام دریافت مسائل می‌باشند.

جدول (۳): اهداف کلان و چشم‌اندازهای تحقیق و توسعه در صنعت برق کشورهای مختلف

نمونه‌های مطالعاتی		اتحادیه اروپا	کانادا	امریکا	استرالیا	هند	آفریقای جنوبی	ژاپن	سیگره
افق زمانی چشم‌انداز		۲۰۵۰ - ۲۰۳۰ - ۲۰۲۰	۲۰۵۰ - ۲۰۲۰	۲۰۳۰	۲۰۳۰	۲۰۲۵	۲۰۲۵	۲۰۲۰	۲۰۳۰
اهداف کلان و چشم اندازها	افزایش بهره‌وری انرژی (تولید انرژی با کمترین هزینه)	•	•	•	•		•	•	•
	کاهش آلایندگی زیست‌محیطی	•	•	•	•			•	•
	افزایش قابلیت اطمینان (بهبود امنیت سیستم) - (افزایش انعطاف‌پذیری)	•	•	•	•			•	•
	ارتقاء ایمنی							•	
	صادرکننده پیش‌رو فناوری‌های شبکه					•			
	تبدیل به یک کشور پیش‌رو در بکارگیری فناوری‌های پیشرفته صنعت برق					•			
	افزایش تعداد اختراعات					•			
	دریافت جایزه نوبل در حوزه صنعت برق					•			

- **گام چهارم: گرداوری مجموعه راهکارها و موضوعات *R&D* در ذیل اهداف چشم‌اندازها**

تعیین محورها و مباحث مطالعاتی اساسی‌ترین رکن در تهیه نقشه‌راه *R&D* است که پیش‌زمینه‌ی آن، تدوین مجموعه‌ای از راه‌کارهای مرتبط با اهداف کلان می‌باشد. در صورت وجود رابطه معنادار میان پیش‌ران‌های اولیه و ثانویه، مجموعه‌ای از موضوعات مطالعاتی در ذیل اهداف کلان تشکیل خواهد شد که غربالگری آن‌ها منجر به تعیین محورهای کلان مطالعاتی می‌گردد.

مجموعه راه‌حل‌ها، مباحث و موضوعات تحقیقاتی ارائه شده در پاسخ به محرک‌های اولیه و ثانویه، بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی اسناد نقشه‌راه کشورهای مختلف، در جدول (۴) خلاصه شده است.

جدول (۴): راه‌حل‌های ارائه‌شده در پاسخگویی به چالش‌های آینده صنعت برق از منظر برخی از کشورهای دنیا

نمونه‌های مطالعاتی		اتحادیه اروپا	کانادا	امریکا	استرالیا	هند	آفریقای جنوبی	ژاپن	سیگره
راه‌حل‌های ارائه شده جهت پاسخگوئی به چالش‌های مطرح شده در جدول ۲	برقی‌سازی حمل و نقل شهری (شخصی و عمومی)	•	•		•				
	توسعه ظرفیت و سطح تبادلات برق (FACTS، HVDC، خطوط بین مرزی)	•	•				•		•
	آموزش جامعه در راستای مصرف هوشمندانه برق	•							•
	مدیریت استراتژیک دارایی‌ها (بهینه‌سازی نگهداشت و بیشینه‌سازی عمر)	•	•		•				
	همساز نمودن قوانین بازار برق در راستای افزایش فرصت‌های تجاری بازیگران	•			•				
	طراحی سازوکار پاسخ بار و افزایش مشارکت مشترکین برق	•	•		•	•			
	طراحی انواع خدمات جانبی	•						•	
	توسعه ابزارهای مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه	•		•					•
	توسعه ابزارها و الگوریتم‌های کنترل، مدیریت و نظارت شبکه (مدیریت میلیون‌ها DER)	•							•
	توسعه فناوری‌های مخابراتی و اطلاعاتی جهت بهبود کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری شبکه	•							
	توسعه فناوری ذخیره‌سازهای انرژی					•			
	حمایت از یارانه‌های مربوط به تحقیق و توسعه و سرمایه‌گذاری‌های زود بازده		•						
	توسعه فناوری ترانس‌های حالت جامد					•			
	Supergrid								•
	شبکه‌های توزیع فعال و ریزشبکه	•	•	•		•			•
	قیمت‌گذاری صحیح و ایجاد رقابت				•				
	توسعه سیستم‌های الکترونیک قدرت					•			
	بکارگیری نیروی کار جوان و توانمند					•	•		
	حذف تعرفه‌های خرده‌فروشی و ایجاد رقابت کامل خرده فروشی							•	

در یک نگاه کلی به راه‌حل‌های ارائه شده در اسناد کشورهای مختلف، موارد زیر قابل توجه است:

- کشورهای اتحادیه اروپا، کانادا و استرالیا از سازوکار پیاده‌سازی پاسخ بار و مشارکت فعال مشترکین برق در مواجهه با مشکلات بهره‌برداری سیستم در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و از راه‌حل توسعه ظرفیت و سطح تبادلات برق، در مواجهه با چالش‌های جذب انرژی مناطق مستعد استحصال انرژی‌های تجدیدپذیر بهره خواهند گرفت.

- کشورهای امریکا، کانادا و استرالیا در مواجهه با چالش مدیریت تعداد زیادی از انواع منابع تولید پراکنده و بارهای پاسخگو، از راه‌حل توسعه شبکه‌های توزیع فعال[1]، تجمیع‌کننده‌های بار و پیاده‌سازی ریزشبکه‌ها[2](یعنی انتقال مسئولیت مدیریت اجزای سیستم بر دوش نهادهای خرد) بهره خواهند گرفت.
- کشورهای در حال توسعه (هند و آفریقای‌جنوبی) با چالش‌های متفاوتی روبرو هستند. از مشکلات اصلی این دو کشور می‌توان به محرومیت دسترسی به انرژی بخش قابل توجهی از جمعیت آن‌ها، کمبود تولید و تلفات زیاد شبکه برق اشاره نمود. متاسفانه در گزارش‌های چشم‌انداز این دو کشور راه‌حل شفاف و منطقی در مواجهه با این دو چالش ذکر نشده است. با اینحال، گزارش‌ها حاکی از آن است که آن‌ها تمایل زیادی به توسعه منابع تجدیدپذیر و حتی پیاده‌سازی ریزشبکه دارند.
- اتحادیه اروپا به منظور مقابله با چالش چگونگی بازگشت سرمایه مالکین خصوصی مولدهای مقیاس کوچک، از ایجاد پروژه‌های مبتنی بر فناوری مدیریت نیروگاه‌های مجازی[3] بهره خواهند گرفت در حالی که در ژاپن و استرالیا، راهکار پیشنهادی راه‌اندازی بازار کامل خرده‌فروشی برق[4] است.
- راه‌کار پیشنهادی اتحادیه اروپا، کانادا و استرالیا برای مقابله با چالش تعویض زودهنگام تجهیزات (پیری زودرس) و در نتیجه هزینه‌های تحمیلی بابت سرمایه‌گذاری مجدد، مدیریت استراتژیک دارایی می‌باشد.
- تغییر ماهیت بهره‌برداری سیستم در شبکه‌های قدرت آینده به طور حتم نیازمند ابزارهای محاسباتی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مختص به خود خواهد بود. موضوعی که در اتحادیه اروپا و امریکا جایگاه ویژه‌ای برای آن در نظر گرفته‌اند و بر مبنای آن امکان مشارکت نزدیک میان رشته‌های دانشگاهی علوم‌پایه و مهندسی را در حوزه‌های توسعه ابزارها و الگوریتم‌های ریاضی و کامپیوتری فراهم کرده‌اند.

[1] Active Distribution Networks (ADNs)
[2] Microgrids
[3] Virtual Power Plants (VPPs)
[4] Fully-fledged Electricity Retail Market

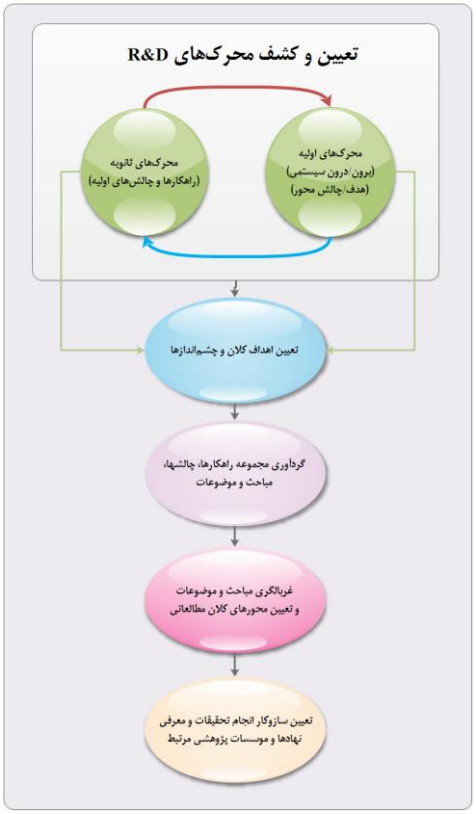
- **گام پنجم: تعیین محورهای کلان مطالعاتی**

قدم آخر در تدوین اسناد نقشه‌راه *R&D* سیستم قدرت، تعیین محورهای کلان مطالعاتی است. تعیین این محورها از طریق دسته‌بندی موضوعات و مباحث استخراج شده در مرحله قبل تحت عناوین کلان‌تر صورت می‌گیرد (جدول (۵)). به طور کلی و از نگاه آماری به راحتی می‌توان متوجه شد که مباحث مرتبط با شبکه‌های توزیع فعال و ریزشبکه‌ها بیشترین وزن تحقیقاتی را در سند چشم‌انداز کشورهای مورد مطالعه به خود اختصاص داده‌اند. بعلاوه، مباحث مرتبط با پاسخ بار و حضور فعال مشترکین برق (در سطح خرده و عمده) و همچنین تعاملات تجاری با کشورهای همسایه، از نظر امتیاز وزنی در مقام دوم قرار دارند. سایر عناوین نیز تقریبا در سطح یکسانی از دغدغه‌های مطالعاتی این کشورها قرار گرفته‌اند.

جدول (۵): عناوین کلیدی تحقیقات صنعت برق کشورهای مختلف (بر اساس غربالگری موضوعات مختلف پژوهشی)

	نمونه‌های مطالعاتی	اتحادیه اروپا	کانادا	امریکا	استرالیا	هند	آفریقای جنوبی	ژاپن	سیگره	امتیاز وزنی
عناوین کلیدی تحقیقات	تجمیع فناوری‌های نوین قدرت	•		•					•	۳
	مدیریت بهینه دارایی‌ها	•	•		•					۳
	سازوکارها و مشوق‌های جدید در بازار برق	•						•		۲
	شبکه‌های توزیع فعال، ریزشبکه‌ها و کنترهای هوشمند	•		•	•	•	•		•	۶
	خدمات نوین و طراحی انواع بازارها	•			•			•		۳
	آموزه‌های نوین بهره‌برداری	•						•	•	۳
	معماری نوین شبکه	•							•	۲
	برنامه‌ریزی و بهره‌برداری نوین شبکه	•		•					•	۳
	توسعه همزمان شبکه و نگهداشت تجهیزات آن	•	•		•					۳
	اتصال بازارهای برق و تعاملات برون مرزی	•	•				•		•	۴
	هماهنگی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه	•							•	۲
	حضور فعال بار و توانبخشی مشترکین برق		•	•				•	•	۴

شکل (۷) خلاصه روند استخراج سند نقشه راه *R&D* سیستم‌های قدرت آینده را بر اساس اسناد چشم‌انداز مطالعه شده نشان می‌دهد.



شکل (۷): روند پیشنهادی استخراج سند نقشه‌راه *R&D* سیستم‌های قدرت

۳. پیشنهاد مدل ذهنی تعلیلی– توجیهی

در این بخش، یک مدل ذهنی جهت دستیابی به یک روش علمی در راستای تعیین محرک‌های اصلی تحقیقات و تدوین محورها، مباحث و موضوعات مورد توجه در اسناد نقشه‌راه ارائه می‌شود.

۱،۳. ساختار کلی مدل

مدل پیشنهادی مشتمل بر دو دستگاه مختصات مطالعاتی است؛ یک دستگاه ثابت که تا حد قابل قبولی امکان پوشش کامل حوزه‌های پژوهشی سیستم‌های قدرت را فراهم می‌کند و یک دستگاه متحرک که با قرارگیری در هر درایه دستگاه ثابت، امکان بسط و توسعه مدل تحقیقات را مهیا می‌کند که در مجموع امکان

توصیف مدل تحقیقات را در ۴ درجه فراهم می‌نماید. سه بُعد از مدل پیشنهادی توسط دستگاه ثابت، و بُعد دیگر توسط دستگاه متحرک تامین می‌شود. در پایه‌گذاری این مدل سعی شده است تا:

- جامعیت کافی جهت پوشش مجموعه مباحث مطالعاتی سیستم قدرت رعایت گردد.
- مدل دارای ساختار سلسله مراتبی جهت تبیین گزاره‌های توصیفی و تبیینی در بررسی محرک‌ها، اهداف، محورها، مباحث و موضوعات بوده و تا حد امکان در برگیرنده هم‌ارزی مسائل باشد.
- امکان تغییر، بازآرایی و بازآفرینی محتوا طی یک فرآیند تعلیل و توجیه در دستگاه ارائه شده، فراهم باشد.

۲،۳. دستگاه ثابت (سه‌بعدی)

از آنجا که دستگاه ثابت باید تامین‌کننده جامع حوزه‌های تحقیقاتی در سیستم قدرت باشد، محورهای آن باید به گونه‌ای تنظیم گردند تا در این دستگاه، کلان‌ترین سطوح مطالعات تا جزئی‌ترین آن پوشش داده شوند.

۱،۲،۳. محور اول: حوزه‌ها و شاخص‌های کلان

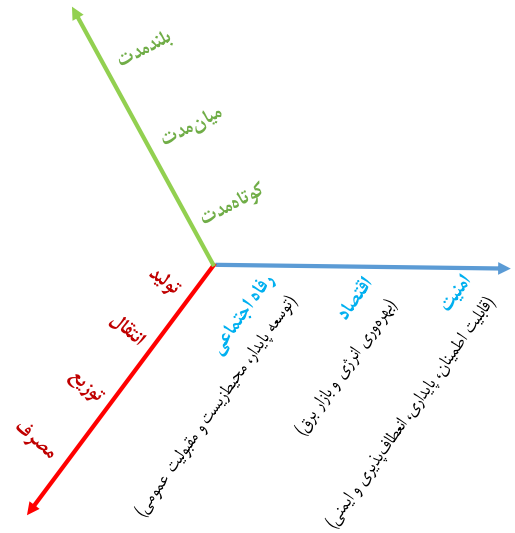
محرک‌های اصلی و کلان مطالعات سیستم‌های قدرت عمدتا شامل دو مولفه بیرون‌سیستمی یعنی رفاه اجتماعی و اقتصاد، و یک مولفه درون‌سیستمی تحت عنوان امنیت می‌باشد.

۲،۲،۳. محور دوم: حوزه‌های کاربردی در سیستم‌های قدرت

مجموعه موضوعات مطالعاتی گردآوری شده از اسناد نقشه‌راه *R&D* در سیستم‌های قدرت (بُعد دوم)، در ذیل یکی از چهار حوزه تولید، انتقال، توزیع و مصرف قابل تقسیم‌بندی است.

۳،۲،۳. بُعد زمان

با توجه به اینکه تمامی مطالعات علمی می‌توانند جنبه‌های بلندمدت، میان‌مدت و یا کوتاه‌مدت داشته باشند لذا محور سوم جهت تفکیک اینگونه مطالعات، بر مبنای زمان استوار شده است (شکل (۸)).



شکل (۸): تعیین موضوعات تحقیقاتی بر اساس مدل تعلیلی– توجیهی

۳،۳. دستگاه متحرک: بسط عمقی

هر درایه از دستگاه سه‌بعدی ثابت، یک مقوله‌ی علمی بوده و دارای شاخص‌های ارزیابی است که می‌تواند مورد تحقیق و توسعه قرار گیرد. به این ترتیب، هر درایه دارای بسطی عمقی و سلسله مراتبی از موضوعات مربوط به خود خواهد بود. لذا در راستای حفظ سلسله مراتب فرآیند تعلیل– توجیه (از کل به جزء و یا برعکس) و همچنین رعایت عمق مباحث و موضوعات، یک دستگاه متحرک در جهت عمق‌بخشی به مباحث در نظر گرفته شده است. بدین منظور، چهار توصیف تحت عناوین ۱) محور ۲) مبحث ۳) موضوع ۴) مساله، جهت بسط عمقی هر درایه در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، هر درایه از طریق بکارگیری برخی قوانین، قابل توسعه و بسط عمقی (در راستای کل به جزء و یا جزء به کل) خواهد بود.

۱،۳،۳. قوانین پیشنهادی بسط و توسعه مدل

محرک‌های *R&D* می‌توانند به یکی از اشکال هدف–محور و یا چالش–محور تعیین شوند. به این ترتیب، در صورتی که دستگاه متحرک بر روی یکی از درایه‌های دستگاه ثابت قرار گیرد، محرک‌های *R&D* به صورت زیر قابل کشف خواهند بود:

- تامل ماهوی در مقوله علمی منتخب (درایه مبدا) و کشف محرکه هدف–محور؛
- تامل در شاخص‌های ارزیابی مقوله علمی (درایه مبدا) و کشف محرکه چالش–محور؛
- تلاقی مباحث حاصل از زیرمجموعه یک مقوله علمی (درایه مبدا) با دیگر مقولات علمی دستگاه ثابت.

به این ترتیب، در پاسخ به هریک از محرک‌های یاد شده، مقولات علمی (درایه‌های) جدید در راستای بُعد چهارم (دستگاه متحرک)، به تولید سلسله موضوعات و مسائل جدید منجر خواهند شد. این روند با بکارگیری روند معرفی شده در بخش قبل می‌تواند منجر به شکل‌گیری یک واحد *R&D* جدید، حول یک یا چند درایه از دستگاه ثابت، گردد. بدیهی است اگر دامنه وسیع‌تری از مطالعات انجام شده در حوزه سیستم‌های قدرت کنار هم گردآوری شوند، به طور یقین عناوین بیشتری در این جدول قابل ثبت خواهند بود.

جدول (۶): ماتریس محورهای تحقیقاتی منتج شده از دستگاه سه‌بُعدی

	رفاه اجتماعی (محیط زیست – توسعه پایدار – مقبولیت عمومی)	اقتصاد (بازار برق – بهره‌وری انرژی)	امنیت (قابلیت اطمینان - پایداری - انعطاف پذیری - ایمنی)
تولید	• تبدیلات انرژی (مولدهای پاک) • تعیین بهینه پرتفلیوی تولید در برنامه‌های راهبردی	• بهره برداری بهینه (فنی و اقتصادی) • افزایش راندمان • بازار ظرفیت	• مطالعات قابلیت اطمینان • مطالعات پایداری (دینامیکی) • مطالعات انعطاف‌پذیری
انتقال	• طراحی و توسعه خطوط و شبکه با رویکرد محیط زیست، توسعه پایدار و مقبولیت عمومی	• کاهش تلفات • بهره‌برداری بهینه (فنی) • بازار خدمات جانبی • افزایش دسترسی آزاد به شبکه • توسعه خطوط با رویکرد تبادلات برق	• مطالعات پایداری (دینامیکی و استاتیکی) • مطالعات انعطاف‌پذیری
توزیع	• طراحی و توسعه شبکه‌های توزیع فعال و هوشمند	• شبکه‌های توزیع فعال و هوشمند • کاهش تلفات • بهره‌برداری بهینه (فنی) • بازار خرده‌فروشی	• مطالعات قابلیت اطمینان • مطالعات کیفیت توان • مطالعات انعطاف‌پذیری
مصرف	• تبدیلات انرژی (مصرف کننده‌های پاک)	• اصلاح الگوی مصرف • طراحی بازار خدمات جانبی • پاسخ بار	• کیفیت توان

نتیجه‌گیری

مطالعات تحلیلی اسناد چشم‌انداز تحقیق، توسعه و نوآوری صنعت برق کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه و نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی مدل پیشنهادی تعلیلی-توجیهی این مقاله برای مباحث جدید بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، حاکی از آن است که این مدل می‌تواند بخوبی به عنوان یک متدلوژی و ابزاری کارآمد در کشف موضوعات تحقیقاتی نوین و تدوین نقشه‌راه تخصص‌های حوزه برق و انرژی، مورد استفاده گروه‌های پژوهشی موسسات تحقیقاتی و دانشگاهی کشور قرار گیرد.

منابع

[1] “Future of the Grid: Evolving to Meet America’s Needs. An industry-driven vision of the 2030 grid and recommendations for a path forward”, GridWise Allianc and U.S. Department of Energy, 2014

[2] Nikos Hatziargyriou, “Network of the Future- Electricity Supply Systems of the Future”, CIGRE White Paper, ELECTRA, Nº 256, pp. 42-49 June 2011

[3] “A Roadmap to 2020: European R&D”, IEEE Power & Energy for electric power professionals, IEEE PES, Vol. 13, No. 1, January/February 2015

[4] “Vision 2050: The Future of Canada’s Electricity System”, Canada Electricity Association, *Available at* http://powerforthefuture.ca/vision-2050/

[5] Zinaman, Owen, et al. “Power systems of the future: a 21st century power partnership thought leadership report”, Technical Report, NREL/TP-6A20-62611. National Renewable Energy Laboratory (NREL), February 2015

[6] “Electricity Network Transformation Roadmap 2015-2025”, Australia’s national science agency and Energy Networks Association (ENA), *Available at* http://www.ena.asn.au/electricity-network-transformation-roadmap

[7] Yukata Nagata, “The Japanese Power System and the future after Fukushima”, Central Research Institute of Electric Power Industry, 2015

[8] “Smart Grid 2030 Vision”, South African National Energy Development Institute (SANEDI), Ver. 6, March 2013

[9] “R&D Plan (2015-2025) for Indian Power Sector”, India Smart Grid Forum (ISGF) and Great Lakes Institute of Management, 2015

[۱۰] «اسناد بالادستی و قوانین توسعه‌ای – برنامه هفتم توسعه در وزارت نیرو (۱۴۰۴)»، برنامه راهبردی وزارت نیرو در بخش برق و انرژی (۱۳۹۳): http://goo.gl/XDlo5u

A Comprehensive Approach for the Development of R&D Subjects of Iranian Power System

Morteza Shabanzadeh, Hamed Farahat, Zahra Madihi, Omid Shahhoseini

Abstract – Devising the strategic plans, national priorities and accordingly the preparation of the research and development (R&D) roadmap for the Iranian electric power industry would be definitely effective, helpful, and essential for the researchers, engineers and academic communities. In this paper, with respect to the aforementioned necessity, the future vision of some developed and developing countries is first reviewed and analyzed. Accordingly, the theoretical basics of how to develop an R&D roadmap for the power industry are introduced. Then, the status quo of the Iranian electric power industry and its main goals, drivers, and national upstream documents as well as the challenges ahead are investigated. Afterwards, a mental causal-explanatory model is proposed to provide an appropriate framework for R&D subjects of the Iranian future power system. This paper, from the experts and policy makers' viewpoint, introduces the inevitable technical issues that will shape the future of power system at least for next two decades and on the other hand, identifies the key challenges associated with the transformation and modernization of the power systems.

Keywords – Research and Development (R&D) roadmap; power industry; power system operation; the drivers of modernization; the future of the grid; future studies; policy studies.

پروفسور Antonio J. Conejo
conejonavarro.1@osu.edu
استاد مهندسی برق دانشگاه Ohio State University

کارشناسی مهندسی صنایع، دانشگاه Comillas Pontifical ، ۱۹۸۳
کارشناسی ارشد فناوری و سیاست‌گذاری، دانشگاه MIT، ۱۹۸۷
دکترای مهندسی انرژی برق، دانشگاه Royal Institute of Technology، ۱۹۹۰

پروفسور کنئو، استاد سابق دانشگاه Universidad de Castilla-La Mancha، از سال ۲۰۱۴ فعالیت علمی خود را با دانشگاه اُهایو و در دانشکده‌های سیستم‌های مهندسی یکپارچه (ISE) و دانشکده مهندسی برق آغاز نموده‌اند. حوزه‌های تحقیقاتی و تجربه‌های صنعتی ایشان عمدتا بر ارائه مدل‌های ریاضی و ابزارهای تصمیم‌گیری در سیستم‌های انرژی الکتریکی متمرکز هستند ضمن اینکه در طراحی بازارهای برق فعلی دنیا و توسعه روش‌ها و سیاست‌گذاری‌های بهره‌برداری کارآمد بازارهای برق، ایده‌های نابی توسط ایشان مطرح شده است. پس از چاپ مقالات نوآورانه بسیار در حوزه بازار برق، تحقیقات حال حاضر دکتر کنئو بر موضوعات مربوط به ارائه روش‌های هوشمندانه در توسعه نفوذ منابع مقیاس بزرگ انرژی‌های تجدیدپذیر متمرکز شده است.

مقاله

طراحی نرم‌افزار تعیین زمان‌بندی بهینه تعمیرات پیشگیرانه‌ی واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی بازار برق و بورس انرژی*

مرتضی شعبان‌زاده[۱]، محمد فتاحی[۲]، پیمان موسوی مبارکه[۳]، لادن خرسند[۴]

چکیده: در فضای رقابتی بازارهای برق، تهیه و توسعه ابزارهای تصمیم‌گیری منعطف و چندکاره برای شرکت‌های مدیریت تولید برق (GENCOs)، از اهمیت بسزایی برخوردار است. با توجه به اینکه تعیین زمان‌بندی مناسب و موثر خروج پیشگیرانه واحدهای نیروگاهی با هدف انجام تعمیرات دوره‌ای می‌تواند فارغ از کاهش ریسک‌های مالی، منافع اقتصادی قابل توجهی را برای مالک نیروگاه به همراه داشته باشد لذا تهیه و توسعه نرم‌افزارهای برنامه‌ریزی تعمیرات به ویژه در بخش تولید امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. این مقاله با معرفی نرم‌افزار بومی برنامه‌ریزی پیشگیرانه خروج واحدهای نیروگاهی، به ارائه راهکار مناسبی در تعیین دوره‌های زمانی بهینه خروج واحدهای تحت مالکیت یک شرکت مدیریت تولید برق خصوصی می‌پردازد. این نرم‌افزار، از نگاه مالک نیروگاه و بر مبنای شمارش ساعات کارکرد واحدها، زمان‌بندی بهینه تعمیرات را در یک افق برنامه‌ریزی میان‌مدت تعیین می‌کند. در انتها، عملکرد نرم‌افزار طراحی شده در یک مطالعه موردی ارزیابی می‌شود.

کلیدواژه: برنامه‌ریزی پیشگیرانه تعمیرات؛ زمان‌بندی خروج واحدها؛ نرم‌افزار تعمیرات دوره‌ای؛ مدیریت ریسک؛ بازار برق؛ بورس انرژی.

---

* کار تحقیقاتی ارائه شده در این مقاله، حاصل اجرای پروژه‌ای پژوهشی تحت عنوان "برنامه‌ریزی مدیریت تولید مبتنی بر ملاحظات فنی و اقتصادی بازار برق و بورس انرژی" می‌باشد که با حمایت مالی و معنوی پژوهشگاه نیرو به انجام رسیده است (کد پروژه: PMAPN06).

[۱] کارشناس پژوهشی گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، رایانامه: mshabanzadeh@nri.ac.ir

[۲] عضو هیات علمی گروه مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود، رایانامه: mfattahi@aut.ac.ir

[۳] کارشناس پژوهشی گروه اقتصاد و انرژی، پژوهشگاه نیرو، رایانامه: pmousavi@nri.ac.ir

[۴] کارشناس کامپیوتر، گروه اقتصاد و انرژی، پژوهشگاه نیرو، رایانامه:lkhorsand@nri.ac.ir

۱. مقدمه

در طی سالیان اخیر، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت تحولات قابل توجهی را تجربه کرده‌اند و نگرش‌های سنتی نسبت به اجرای آن‌ها تغییر بسزایی پیدا کرده است. تحولات عمده صورت گرفته از قبیل تجدید ساختار و حرکت به سمت معرفی رویکردهای رقابت‌محور در صنعت برق و همچنین هوشمندسازی شبکه قدرت، نقش موثری را در این راستا ایفا کرده‌اند. در این میان، زمان‌بندی نگهداشت (نگهداری و تعمیرات) تجهیزات نیز به عنوان یکی از مسایل مهم برنامه‌ریزی میان‌مدت سیستم‌های قدرت، از این تغییر مستثنی نبوده است.

خروج پیشگیرانه واحدهای نیروگاهی و تجهیزات شبکه انتقال به منظور انجام برنامه نگهداشت آن‌ها، همواره به عنوان امری اجتناب‌ناپذیر در سیستم‌های قدرت مطرح بوده است. در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته، اجرای بازارهای مختلف برق (بازار روزفروش انرژی، خدمات‌جانبی، بورس انرژی و قراردادهای دوجانبه) در مقاطع زمانی متفاوت و با هدف تامین اقتصادی انرژی مورد نیاز مصرف‌کننده‌ها، سبب شده تا مبحث خروج واحدهای نیروگاهی و خطوط انتقال در این بازه‌های زمانی مورد توجه بیشتری قرار گیرد تا علاوه بر تولید و انتقال مطمئن انرژی الکتریکی بتوان از بروز تغییرات ناگهانی قیمت برق در هنگام وقوع خروج‌های احتمالی و تبعات مالی آن برای بازیگران بازار نیز اجتناب نمود [۱]. در این مقاله، سعی شده است تا ضمن بیان اهمیت فنی و اقتصادی تعیین زمان‌بندی بهینه خروج واحدهای نیروگاهی (بابت اجرای برنامه‌های تعمیرات دوره‌ای)، با معرفی نرم‌افزار بومی برنامه‌ریزی تعمیرات از نگاه مالک نیروگاه، بر ضرورت تجهیز شدن شرکت‌های مدیریت تولید برق ایران در سال‌های نه چندان دور به ابزارهای تصمیم‌گیری تجاری تاکید شود.

۲. ادبیات موضوع برنامه‌ریزی تعمیرات و اصالت کار

۱،۲. سازوکار سنتی

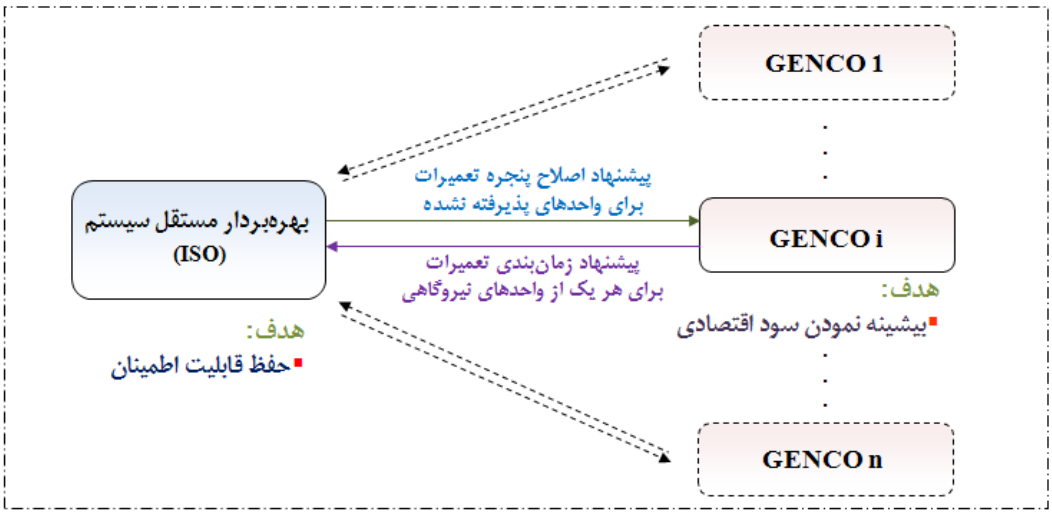
در سال‌های گذشته، برنامه‌ریزی تعمیرات به صورت تجربی و بر مبنای روش‌های ابتکاری و سعی و خطا انجام می‌شد [۲]. کمینه‌سازی متوسط کل هزینه‌های تولید و تعمیرات واحدها [۳] و همچنین ریسک خاموشی [۴] دو هدف عمده‌ای است که در سیستم‌های قدرت با ساختار یکپارچه عمودی (سنتی) مورد توجه قرار می‌گیرند. در این ساختار، هدف اصلی بهره‌بردار سیستم (مرکز کنترل)، حفظ قابلیت اطمینان سیستم در کل هفته‌های سال و همچنین کمینه نمودن هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات تمامی واحدهای نیروگاهی تحت پوشش خود است و بر این اساس، برنامه‌های تعمیراتی به صورت متمرکز و قطعی (غیراحتمالاتی) تعیین شده و به صورت لازم‌الاجرا به نیروگاه‌ها ابلاغ می‌شوند (شکل ۱).

شکل ۱: سازوکار برنامه‌ریزی تعمیرات در سیستم‌های سنتی قدرت [۱]

با این وجود، بدیهی است که روش‌های ابتکاری و متمرکز هرگز نمی‌توانند در سیستم‌های قدرت مدرن دستیابی به یک جواب امکان‌پذیر و عملی و در عین حال، اقتصادی را تضمین کنند.

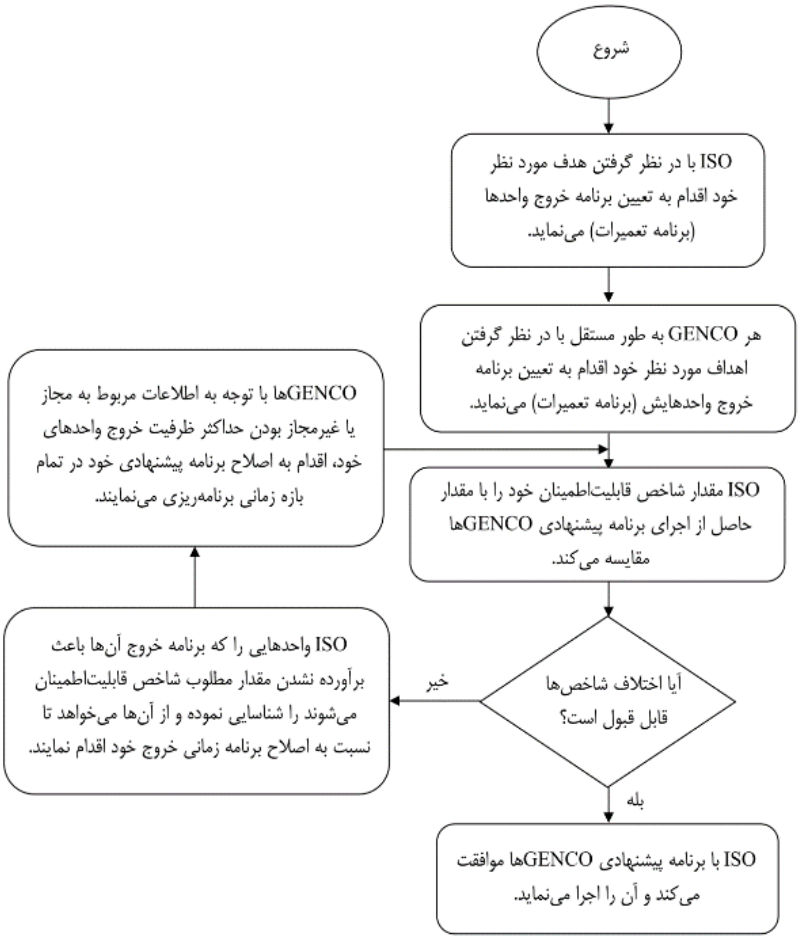
۲،۲. سازوکار مبتنی بر بازار برق

با تجدید ساختار سیستم‌های قدرت، برنامه‌ریزی واحدهای نیروگاهی مشخصه‌های جدید به خود گرفته و کاملا متفاوت با سازوکار متمرکز و سنتی خود شده است [۵]. در ساختار جدید، برنامه‌ریزی تعمیرات واحدها دیگر تنها توسط بهره‌بردار سیستم (*ISO*) تعیین نمی‌شود و عمدتا تصمیمات مالکین نیروگاه (*GENCO*ها) نقش بسزایی در چیدمان آرایش نهایی برنامه تعمیرات واحدها خواهد داشت (شکل ۲).



شکل ۲: سازوکار برنامه‌ریزی تعمیرات در محیط تجدید ساختار یافته [۱]

مطابق شکل ۳، در سازوکار جدید، *GENCO*ها سعی می‌کنند تا مطابق با شرایط بهره‌برداری واحدهای نیروگاهی خود، قیمت بازار برق و همچنین سایر عوامل اقتصادی دخیل در تعاملات تجاری‌شان، برنامه خروج واحدهای تحت پوشش خود را تعیین و اعلام نمایند. هدف آن‌ها از ارائه برنامه تعمیرات این است که عمر واحدهای تولیدی خود را تا حد مطلوب حفظ نموده و سود حاصل از برق تولیدی آن‌ها نیز تا حد امکان بیشینه باشد [۶].



شکل ۳: فرآیند تثبیت برنامه زمان‌بندی تعمیرات در سازوکار مبتنی بر بازار برق

بدیهی است که اگر هر یک از طرفین تنها سعی در منظور نمودن دیدگاه‌های خود در برنامه‌ریزی داشته باشند، این روند به جواب بهینه‌ای سوق پیدا نخواهد کرد. از این رو، در طراحی نرم‌افزارهای تصمیم‌گیری، توجه به قابلیت اطمینان سیستم از سوی *GENCO*ها و همچنین منافع اقتصادی تولیدکنندگان از سوی *ISO* در امر برنامه‌ریزی تعمیرات باید مورد توجه قرار گیرد.

پیچیدگی مربوط به مفاهیم برنامه‌ریزی که حاصل طبیعت مسئله در ترکیب اهداف مختلف دو بازیگر مهم بازار برق (*ISO* و *GENCO*ها) است منتج به این حقیقت می‌شود که برنامه‌ریزی تعمیرات همچنان یک موضوع تحقیقاتی پویا در حوزه بهینه‌سازی سیستم قدرت و یک نیاز عملی در صنعت برق کشور ما محسوب می‌شود. در این مقاله، تنها به معرفی ویژگی‌های نرم‌افزار طراحی شده‌ی تعیین زمان‌بندی بهینه تعمیرات از نگاه مالک نیروگاه پرداخته خواهد شد و ابزار (نرم‌افزار) ارزیابی برنامه‌های ارسالی شرکت‌های مدیریت تولید برق که مورد نیاز *ISO* (شرکت مدیریت شبکه برق ایران) می‌باشد به عنوان کار پژوهشی آتی، پیشنهاد می‌گردد.

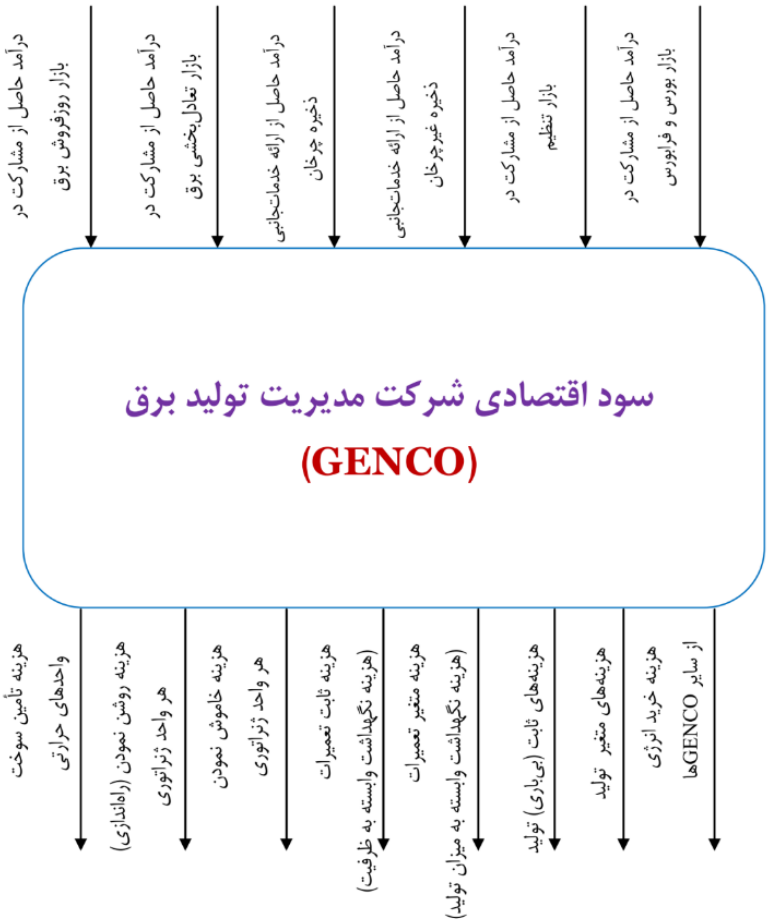
۳. مدل ریاضی برنامه‌ریزی تعمیرات مبتنی بر تعداد ساعات کارکرد واحدهای نیروگاهی

۱،۳. تابع هدف

مهم‌ترین هدف مالکین واحدهای نیروگاهی از مشارکت در بازار روزفروش برق و بورس انرژی، کسب بیشترین سود اقتصادی از تعاملات انرژی می‌باشد. بدین منظور، عمدتا تابع هدف از دو مولفه اصلی درآمد و هزینه تشکیل می‌شود (شکل ۴). در مدل پیشنهادی این مقاله، مولفه درآمدی شامل درآمد/هزینه حاصل از فروش/خرید انرژی در بازار برق و بورس انرژی می‌باشد در حالی که مولفه هزینه از مجموع هزینه‌های تولید (هزینه ثابت و متغیر بهره‌برداری) و هزینه‌های راه‌اندازی واحدها تشکیل شده است. مدل ریاضی تابع هدف مسئله در رابطه (۱) آمده است که دو مولفه آخر آن مربوط به پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی استوار[1] می‌باشد [۷-۹] که به منظور بررسی تاثیر عدم‌قطعیت‌های قیمت‌های پیش‌بینی شده‌ی بازار روزفروش برق بر برنامه خروج واحدها و سود نهایی تولیدکننده برق لحاظ شده است.

[1] Robust Optimization

در مدل برنامه‌ریزی تعمیرات پیشنهادی، تفکیک افق زمانی سال به ۵۲ هفته و هر هفته به سه بازه زمانی مهم یعنی روزهای کاری (از شنبه تا چهارشنبه)، روز پنجشنبه و روز جمعه و در نهایت تقسیم هر روز به بلوک‌های زمانی غیرپیک و پیک، سبب می‌شود که نه تنها دقت پیش‌بینی تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کند بلکه با کاهش چشم‌گیر متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله همراه شده و لذا سرعت محاسباتی نرم‌افزار به میزان بسیار خوبی افزایش پیدا کند.



شکل ۴: سود اقتصادی (تفاضل درآمدها و هزینه‌ها) شرکت مدیریت تولید [۶]

$$\begin{aligned}\text{Profit} = &\sum_{i=1}^{NG}\sum_{j=1}^{NU}\sum_{w=1}^{NW}\sum_{sw=1}^{NS}\sum_{sd=1}^{ND}[\lambda_{w,sw,sd}^{Market}P_{ij,w,sw,sd}^{Market}+\lambda_{w,sw,sd}^{PX}P_{ij,w,sw,sd}^{PX}]\\ &-\sum_{i=1}^{NG}\sum_{j=1}^{NU}\sum_{w=1}^{NW}\sum_{sw=1}^{NS}\sum_{sd=1}^{ND}[(A_{ij}\,v_{ij,w,sw,sd}+MC_{ij}P_{ij,w,sw,sd})+C_{ij,w,sw,sd}^{start-up}] \qquad (۱)\\ &-\beta_0\times\Gamma_0-\sum_{w=1}^{NW}\sum_{sw=1}^{NS}\sum_{sd=1}^{ND}\zeta_{iw,sw,sd}^{0}\end{aligned}$$

در این رابطه داریم:

i: شماره نیروگاه‌های متعلق به GENCO (عددی بین ۱ تا NG).

j: شماره واحد نیروگاهی (عددی بین ۱ تا NU).

w: شماره هفته (بین ۱ تا ۵۲).

sw: بلوک زمانی زیرمجموعه‌ی یک هفته (شامل: روزهای عادی هفته، پنجشنبه و جمعه)

sd : بلوک زمانی زیرمجموعه‌ی روز (شامل: ساعات غیرپیک و پیک)

$\lambda_{w,sw,sd}^{Market}$: پیش‌بینی قیمت بازار برق در هفته w، زیرهفته sw، و بلوک‌ساعتی sd (واحد پول بر MWh)

$P_{ij,w,sw,sd}^{Market}$: توان مبادله شده در بازار برق در هفته w، زیرهفته sw، و بلوک‌ساعتی sd (مگاوات).

$\lambda_{w,sw,sd}^{PX}$: پیش‌بینی قیمت بورس انرژی در هفته w، زیرهفته sw، و بلوک‌ساعتی sd (واحد پول بر MWh).

$P_{ij,w,sw,sd}^{Market}$: توان مبادله شده در بورس انرژی در هفته w، زیرهفته sw، و بلوک‌ساعتی sd (بر حسب MW).

A_{ij}: هزینه ثابت تولید واحد نیروگاهی j تحت مالکیت شرکت i (بر حسب واحد پول بر ساعت).

MC_{ij}: هزینه حاشیه‌ای (AVC) تولید واحد نیروگاهی j تحت مالکیت شرکت i (واحد پول بر MWh).

$v_{ij,w,sw,sd}$: متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت روشن/خاموش بودن واحد نیروگاهی j تحت مالکیت شرکت i در هفته w، زیرهفته sw، و بلوک ساعتی sd .

$P_{ij,w,sw,sd}$: کل توان تولیدی واحد نیروگاهی j تحت مالکیت شرکت i (بر حسب مگاوات).

$C_{ij,w,sw,sd}^{start-up}$: متغیر پیوسته و مثبت نشان‌دهنده هزینه راه‌اندازی واحد.

β_0: متغیر دوگان در مسئله اولیه که عدم‌قطعیت‌ها در آن لحاظ نشده است.

Γ_0: پارامتر کنترلی به منظور برقراری مصالحه بین سود شرکت و ریسک حاصل از عدم‌قطعیت‌های قیمت بازار.

$\zeta_{iw,sw,sd}^{0}$: متغیر دوگان در مسئله اولیه (بدون عدم‌قطعیت) در هفته w، زیرهفته sw، و بلوک ساعتی sd.

۲,۳. قیود فنی و اقتصادی

الف) سهم مشارکت تولید واحد نیروگاهی در بازار برق و بورس انرژی:

$$P_{ij,w,sw,sd} = P_{ij,w,sw,sd}^{Market} + P_{ij,w,sw,sd}^{PX} \qquad \forall i, j, w, sw, sd \qquad (۲)$$

ب) محدودیت فنی تولید واحدهای نیروگاهی:

$$v_{ij,w,sw,sd} P_{ij}^{\min} \le P_{ij,w,sw,sd} \le P_{ij}^{\max} v_{ij,w,sw,sd} \quad \forall i, j, w, sw, sd \qquad (۳)$$

پ) عدم روشن شدن واحد در مواقع خروج بابت تعمیرات:

$$v_{ij,w,sw,sd} + X_{ij,w,n} \le 1 \qquad \forall i, j, w, sw, sd, n \qquad (۴)$$

ت) اجبار به عدم خروج در مواقعی که شمارنده به زمان بحرانی خود نرسیده باشد:

$$X_{ij,w,n} \le \tau_{ij,w,n}^{\text{Potential_Start}} \qquad \forall i, j, w, n \qquad (۵)$$

در این رابطه، $\tau_{ij,w,n}^{\text{Potential_Start}}$ متغیر تصمیم‌گیر مسئله است که با توجه به مقدار شمارنده ساعات بهره‌برداری واحد و اینکه در بازه مجاز برای انجام تعمیرات قرار گرفته است یا خیر، دستور لازم را به اجرا یا

عدم‌اجرای برنامه خروج واحدها می‌دهد. لازم به ذکر است که عملکرد شمارنده ساعات کارکرد واحدها به طور ضمنی در برنامه‌نویسی الگوریتم محاسباتی نرم‌افزار (محیط C#)، پیاده‌سازی شده است.

ث) نشانگر نوع و زمان شروع تعمیرات:

$$SX_{ij,w,n} \geq X_{ij,w,n} - X_{ij,(w-1),n} \qquad \forall i, j, w, n \qquad (۶)$$

ج) اعمال محدودیت خروج یکبار در سال هر نوع تعمیر به طور مجازی:

$$\sum_{w=1}^{NW} SX_{ij,w,n} \leq 1 \qquad \forall i, j, n \qquad (۷)$$

چ) اعمال هزینه راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی:

$$\begin{aligned}
&C_{ij,w,sw,sd}^{start-up} \geq C_{ij}^{SU} \times [v_{ij,w,sw,sd} - v_{ij}^{initial}] \\
&\quad \forall i, j, \forall w \mid w = 1, \forall sw \mid sw = 'Weekdays', \forall sd \mid sd = 'Offpeak' \\
&C_{ij,w,sw,sd}^{start-up} \geq C_{ij}^{SU} \times [v_{ij,w,sw,sd} - v_{ij,(w-1),'Friday','Peak'}] \\
&\quad \forall i, j, \forall w \mid w \neq 1, \forall sw \mid sw = 'Weekdays', \forall sd \mid sd = 'Offpeak' \\
&C_{ij,w,sw,sd}^{start-up} \geq C_{ij}^{SU} \times [v_{ij,w,sw,sd} - v_{ij,w,(sw-1),'Peak'}] \\
&\quad \forall i, j, w, \forall sw \mid sw \neq 'Weekdays', \forall sd \mid sd = 'Offpeak' \\
&C_{ij,w,sw,sd}^{start-up} \geq C_{ij}^{SU} \times [v_{ij,w,sw,sd} - v_{ij,w,sw,'Offpeak'}] \\
&\quad \forall i, j, w, sw, \forall sd \mid sd = 'Peak'
\end{aligned} \qquad (۸)$$

ح) عدم خروج همزمان دو نوع تعمیر برای یک واحد نیروگاهی مشخص:

$$\sum_{n=1}^{NN} X_{ij,w,n} \leq 1 \qquad \forall i, j, w \qquad (۹)$$

خ) حداکثر تعداد خروج همزمان واحدهای یک شرکت تولیدکننده برق:

$$\sum_{j=1}^{NG} X_{ij,w,n} \leq N_{\max} \qquad \forall i, w, n \qquad (۱۰)$$

د) اعمال محدودیت‌های بهینه‌سازی استوار [۷-۹] به منظور مواجهه با عدم‌قطعیت‌ها:

$$\beta_0 + \zeta_{w,sw,sd}^0 \geq \Delta\lambda_{ij,w,sw,sd} \times y_{w,sw,sd} \qquad \forall i, j, w, sw, sd \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{i=1}^{NG}\sum_{j=1}^{NU} P_{w,sw,sd}^{Market} \le y_{w,sw,sd} \quad \forall i, j, w, sw, sd \qquad (۱۲)$$

در این روابط، $\Delta\lambda_{ij,w,sw,sd}$ بیانگر خطا یا انحراف قیمت واقعی نسبت به مقدار پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد که توسط کاربر و بر اساس برآوردهای وی از دقت پیش‌بینی‌ها به نرم‌افزار داده می‌شود. همچنین $y_{w,sw,sd}$ یک متغیر کمکی است که تنها برای خطی‌سازی مدل نهایی مسئله به کار گرفته شده است [۷-۹].

در نهایت، لازم به ذکر است که مدل پیشنهادی ارائه شده قابل استفاده برای انواع واحدهای نیروگاهی مانند گازی، آبی، بخار و سیکل‌ترکیبی می‌باشد. واحدهای بخار و سیکل‌ترکیبی به دلیل اینکه جزو واحدهای بار پایه محسوب می‌شوند لذا با تقریب خوبی می‌توان پی برد که شمارنده ساعت کارکرد آن‌ها در چه ماه و هفته‌ای از سال به سقف مجاز خود خواهد رسید و عملا می‌توان پی برد که برنامه تعمیرات این نوع واحدها در چه تاریخی محقق خواهد شد. این واقعیت سبب می‌شود که الگوریتم محاسباتی نرم‌افزار، پنجره تعمیرات واحدهای بار پایه را بسیار ساده‌تر از واحدهای گازی (واحدهای پیک) محاسبه نموده و پیشنهاد لازم را به کاربر (بهره‌بردار نیروگاه) جهت آماده‌سازی و اعلام خروج بابت تعمیرات ارائه نماید.

اگرچه نرم‌افزار توسعه‌یافته‌ی حاضر با تاکید بر تعیین برنامه تعمیرات واحدهای گازی طراحی شده است اما تمامی موضوعات فوق‌الذکر نیز در توسعه آن دیده شده است و لذا با توجه به اینکه کاربر نوع واحد را چگونه معرفی کرده باشد، الگوریتم محاسباتی بر اساس آن اقدام به تعیین برنامه بهینه خروج واحد در طول سال نموده و در نهایت فهرست پیشنهادی برنامه تعمیرات واحدهای نیروگاهی مورد نظر را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. شرح جزئیات عملکرد نرم‌افزار در مراجع [۱۰-۱۱] به طور کامل و دقیق آمده است.

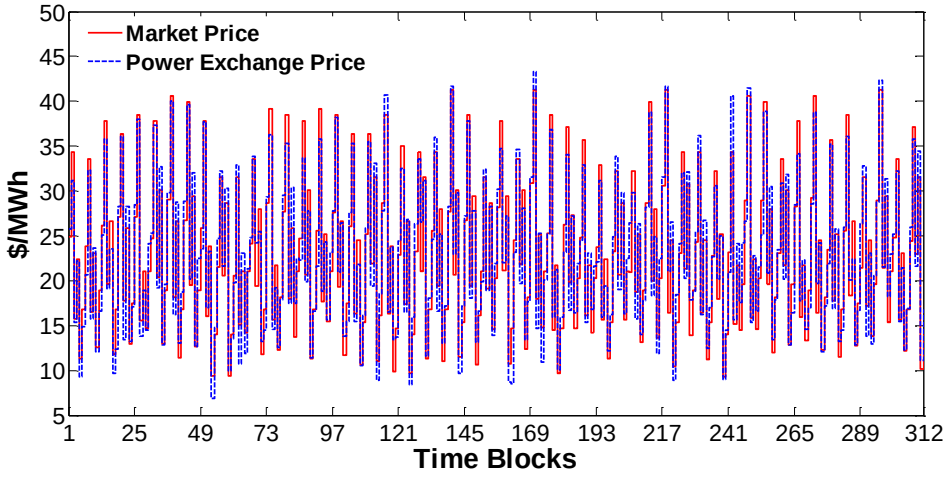
۴. مطالعه عددی

به منظور تحلیل رفتار مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی تعمیرات و الگوریتم حل آن در نرم‌افزار حاضر، فرض می‌شود که شرکت مدیریت تولید برق در این مدل مطالعاتی، مالک یازده واحد نیروگاهی با مشخصات فنی و اقتصادی ارائه شده در جدول ۱ می‌باشد [۱۰].

جدول ۱: اطلاعات فنی و اقتصادی واحدهای نیروگاهی مورد مطالعه

شمارنده اولیه (h)	$C^{startup}$ ($)	MC_{ij} ($/MWh)	a_{ij} ($/h)	P_{max} (MW)	P_{min} (MW)	واحد
760	270	13.32	81.13	76	15.2	G1
3900	400	18	217.89	100	25	G2
1550	1200	10.69	142.73	155	54.3	G3
1970	1800	23	259.13	197	68.9	G4
3500	4500	10.86	177.05	350	140	G5
0	7000	7.50	211.91	400	100	G6
150	8000	12.1	180	500	140	G7
2500	3500	12.4	140	250	75	G8
1800	1500	12.7	40	180	40	G9
1200	700	19.1	219.33	120	45	G10
970	1700	24	269.13	197	70	G11

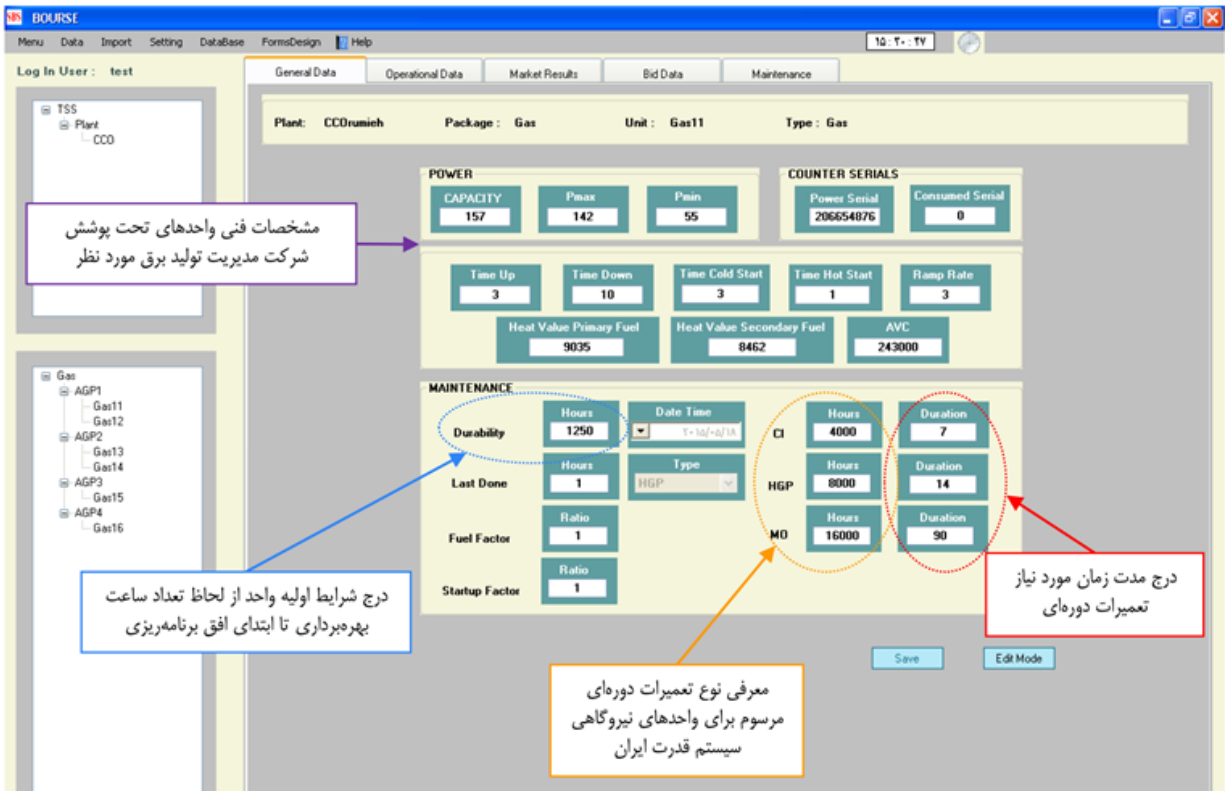
در این مطالعه، دو نوع تعمیرات دوره‌ای تحت عنوان تعمیرات ۴۰۰۰ ساعته (نوع ۱) و ۸۰۰۰ ساعته (نوع ۲) در نظر گرفته شده است و فرض شده که برای اتمام عملیات تعمیرات نوع ۱ و تعمیرات نوع ۲ به ترتیب ۲ هفته و ۴ هفته نیاز است. در شکل ۵ مقادیر پیش‌بینی قیمت بازار برق و بورس انرژی برای دو بلوک زمانی غیرپیک و پیک نشان داده شده‌اند. نحوه درج اطلاعات ورودی این نرم‌افزار در شکل ۶ نشان داده شده است.



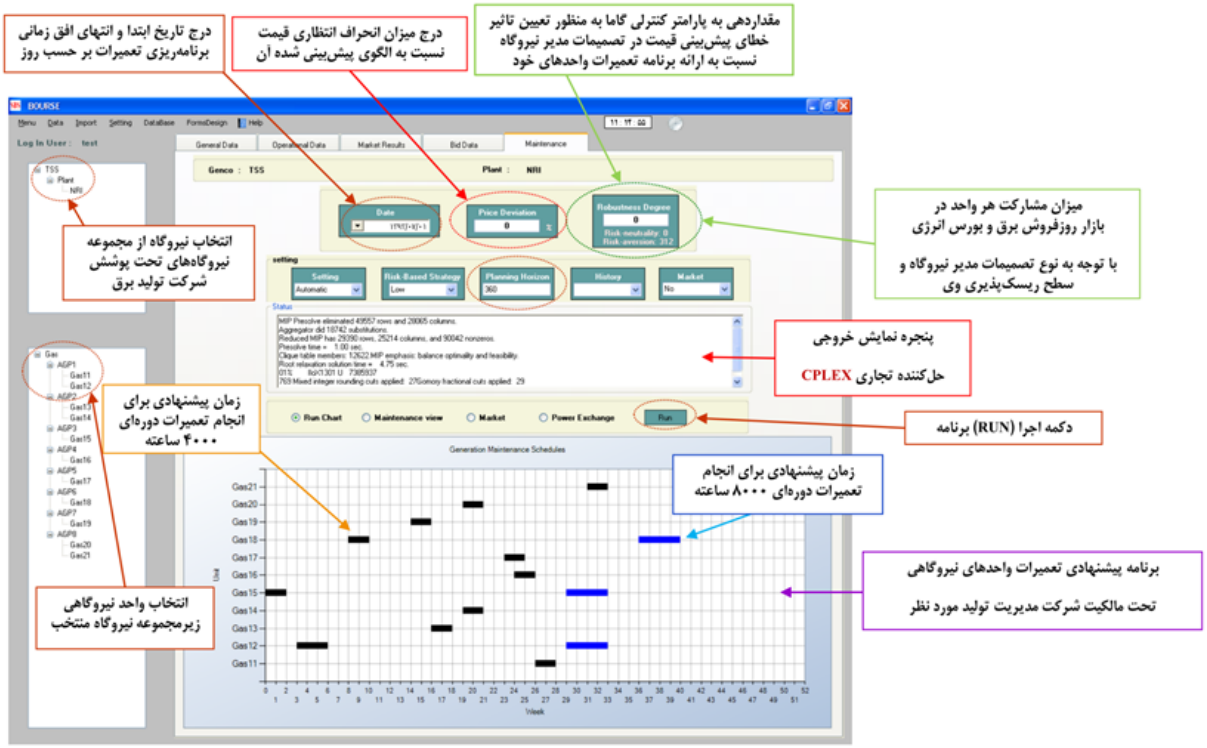
شکل ۵: پیش‌بینی قیمت بازار برق و بورس انرژی برای افق یکسال آینده

با اجرای الگوریتم بهینه‌سازی نرم‌افزار برنامه‌ریزی تعمیرات، برنامه بهینه خروج واحدهای نیروگاهی این شرکت مطابق الگوی شکل ۷ پیشنهاد می‌گردد. همان طور که مشاهده می‌شود در افق برنامه‌ریزی یکساله (۵۲ هفته)، واحدهای مورد نظر با توجه به شرایط بهره‌برداری و ساعت کارکرد اولیه خود برای انجام برنامه تعمیرات دوره‌ای ۴۰۰۰ ساعته و ۸۰۰۰ ساعته به گونه‌ای برنامه‌ریزی شده‌اند که ضمن برآورده نمودن محدودیت‌های فنی مورد نظر (همچون حفظ فاصله زمانی برنامه‌های خروج، عدم همزمانی تعمیرات بیش از دو واحد برای یک نوع تعمیر، حفظ مدت زمان مورد نظر تعمیرات و غیره)، سود مالی شرکت را نیز در جریان تعاملات تجاری خود در بازار برق و بورس انرژی بیشینه نمایند. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، فاصله تعمیرات نوع اول و نوع دوم یک واحد مشخص، هرگز کمتر از ۲۳ هفته (معادل حدود ۴۰۰۰ ساعت) نیست و این بدین معنی است که هر واحد پس از اتمام تعمیرات نوع اول خود حداقل بایستی ۴۰۰۰ ساعت بهره‌برداری شود تا برای خروج بابت تعمیرات نوع دوم (۸۰۰۰ ساعته) آماده گردد.

همچنین به دلیل احتمال کمبود نفرات تکنسین متخصص و تجهیزات انبار نیروگاه، فرض بر این گذاشته شده است که حداکثر دو واحد نیروگاهی مجاز به انجام تعمیرات از یک نوع می‌باشند (قید ۱۰). لذا همان طور که در برنامه خروج پیشنهادی شکل ۷ مشاهده می‌شود، تعمیرات دوره‌ای واحدهای ۶ و ۷ هر دو در یک هفته اشتراک داشته و واحدهای ۴ و ۱۰ نیز هر دو همزمان برای تعمیرات انتخاب شده‌اند. این در حالی است که واحدهای ۲ و ۱۱ اگرچه هر دو در هفته‌های ۳۲ و ۳۳ برای تعمیرات از مدار خارج شده‌اند اما با توجه به اینکه نوع تعمیرات واحد ۲، ۸۰۰۰ ساعته می‌باشد لذا در این حالت همچنان محدودیت خروج همزمان حداکثر دو واحد نیروگاهی برای یک نوع تعمیرات خاص نقض نشده است.



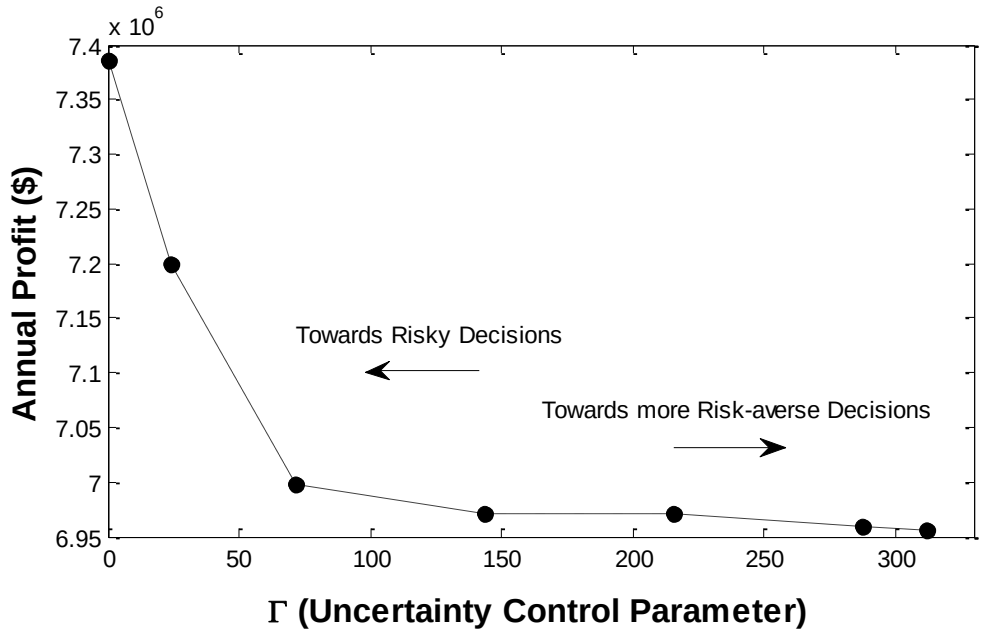
شکل ۶: نحوه درج اطلاعات فنی و اقتصادی هر واحد نیروگاهی در نرم‌افزار مدیریت تولید برق



شکل ۷: تعیین برنامه بهینه خروج واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن انواع مختلف تعمیرات دوره‌ای

سود سالیانه شرکت مدیریت تولید برق مورد مطالعه به ازای سطوح مختلف ریسک‌گریزی در شکل ۸ نشان داده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار سود شرکت به ازای انتخاب پارامتر کنترل نایقینی (گاما) برابر با صفر که متناظر با تصمیمات قطعی و فارغ از عدم‌قطعیت‌های قیمت برق در بازار روزفروش است، در بیشترین سطح خود (یعنی ۷/۳۸۵ میلیون دلار) قرار دارد. تصمیم‌گیری در این سطح اگرچه در صورت وقوع همان نتایج پیش‌بینی شده، بیشترین سود را برای شرکت مدیریت تولید برق مورد نظر به همراه دارد اما باید توجه داشت که این نوع تصمیم‌گیری در معرض بیشترین ریسک نیز وجود دارد و چنانچه پیش‌بینی‌ها درست واقع نشود ممکن است به نتایجی با سود کمتر و یا ضرر نیز منتهی گردد. با افزایش مقدار پارامتر کنترلی گاما حل مسئله به سمت ارائه پاسخ‌های محافظه‌کارانه‌تر سوق پیدا می‌کند. این

بدین معنی است که مدیر شرکت با انتخاب بیشترین سطح ریسک‌گریزی خود (یعنی گاما برابر با مقدار ۳۱۲) گرچه ممکن است با کاهش سودی در حدود ۴۲۹،۴۷۲ دلار مواجه شود اما در مقابل، در برابر وقوع نایقینی‌های قیمت بازار، خود را به راحتی مصون می‌نماید.



شکل ۸: مقایسه سود سالیانه شرکت به ازای سطوح مختلف ریسک

این نرم‌افزار در محیط برنامه‌نویسی *C#* طراحی و توسعه داده شده است و هسته محاسباتی آن مجهز به الگوریتم بهینه‌سازی حل‌کننده‌ی تجاری *CPLEX* می‌باشد. فرآیند حل کامپیوتری این مسئله، به ازای مقادیر قطعی قیمت بازار برق و بورس انرژی به میزان ۱/۸۷۳ دقیقه به طول می‌انجامد که برای چنین مورد مطالعاتی که یک شرکت تولید برق دارای یازده واحد نیروگاهی باشد، زمان بسیار مطلوبی محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ضمن معرفی نرم‌افزار بومی تعیین زمان‌بندی بهینه برنامه خروج بابت تعمیرات دوره‌ای انواع واحدهای نیروگاهی، به بررسی جزئیات مدل تصمیم‌گیری و قابلیت‌های بارز محاسبات کامپیوتری آن پرداخته شد. از مهمترین ویژگی این نرم‌افزار، تعیین خودکار پنجره تعمیرات و انتخاب زمان‌بندی بهینه خروج انواع واحدهای نیروگاهی بر اساس تعداد ساعات کارکرد (بهره‌برداری) آن‌ها می‌باشد که نسبت به نرم‌افزارهای مشابه خود در دنیا، قابلیتی کاملا انحصاری و بی‌نظیر دارد.

منابع

[۱] م. شعبان‌زاده، «بررسی هدفمند ساختار فنی برنامه‌ریزی خروج تعمیرات و نگهداری واحدهای نیروگاهی در برنامه‌ریزی مدیریت تولید»، گروه پژوهشی اقتصاد و مدیریت برق، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه نیرو، اسفند ۱۳۹۲

[2] X. Wang, J. R. McDonald, “Modern power system planning,” McGraw-Hill Companies, 1994.

[3] M. Shahidehpour, M. Marwali, “Maintenance scheduling in restructured power systems,” vol. 562: Kluwer Academic Pub, 2000.

[4] E. Reihani, M. Oloomi Buygi, M. Banejad, “Generation maintenance scheduling using hybrid evolutionary approach,” International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Okinawa, Japan, 2008.

[5] A. J. Conejo, R. García-Bertrand, and M. Díaz-Salazar, “Generation maintenance scheduling in restructured power systems,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, pp. 984-992, 2005.

[۶] م. شعبان‌زاده، م. فرهادخانی، « بررسی ساختارهای به کار گرفته شده در اقتصاد-انرژی‌های مطرح برای برنامه‌ریزی خروج تعمیرات واحدهای تولید و تعامل آن با تصمیم‌گیری‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت مطرح در برنامه‌ریزی تولید نیروگاه‌ها»، گروه پژوهشی اقتصاد و مدیریت برق، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه نیرو، خرداد ۱۳۹۳.

[7] M. Shabanzadeh and M. Dehbashian, “Robust decision making tool for optimal RES-ESS mix of a smart grid-independant research center,” Smart Grid Conference, Tehran, Iran, 2014.

[8] M. Shabanzadeh, M. Fattahi, “Generation maintenance scheduling via robust optimization,” 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE 2015), Sharif University of Technology, Tehran, Iran, May 2015.

[9] M. Shabanzadeh, M.-K. Sheikh-El-Eslami, and M.-R. Haghifam, “The design of a risk-hedging tool for virtual power plants via robust optimization approach,” Applied Energy, vol. 155, pp. 766-777, 2015.

[۱۰] م. شعبان‌زاده، م. فتاحی، « طراحی مدل کلی و یکپارچه‌ی برنامه‌ریزی مدیریت تولید با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات واحدهای تولید و سایر تصمیمات کوتاه‌مدت و بلندمدت مبتنی بر ملزومات فنی و اقتصادی حضور در بازار برق ایران»، گروه پژوهشی اقتصاد و مدیریت برق، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه نیرو، بهمن ۱۳۹۳.

[۱۱] م. شعبان‌زاده، پ. موسوی، ل. خرسند، «انتخاب محیط نرم‌افزاری مناسب، طراحی واسط کاربری و تدوین نرم‌افزار برنامه‌ریزی مدیریت تولید مبتنی بر ملاحظات فنی و اقتصادی بازار برق ایران»، گروه پژوهشی اقتصاد و مدیریت برق، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه نیرو، خرداد ۱۳۹۴.

The Design of a Software Package for Preventive Generation Maintenance Scheduling based on Economic Aspects of the Electricity Market and Power Exchange

Morteza Shabanzadeh, Seyed Peyman Mousavi Mobarakeh, Ladan Khorsand

Abstract - In highly competitive electricity markets, it is essential to develop versatile decision-making tools for the GENCOs. Since the determination of the most appropriate and efficient maintenance schedules apart from reducing the financial risks, can bring considerable economic benefits for the GENCO's manager, the development of generation maintenance scheduling (GMS) software packages will be inevitable. In addition to the introduction of an Iranian GMS software, this paper provides an effective solution in finding the optimal outage plans of generating units owned by a private GENCO. From a GENCO viewpoint and based on the number of operational hours of the generating units, this software is developed to determine the optimal maintenance timing within a medium-term planning horizon. The performance of Iranian GMS software package is tested on a case study, and finally thereby meaningful conclusions are duly drawn.

Keywords – Preventive generation maintenance scheduling (GMS), outage planning, software design, electricity market, power exchange.

پروفسور Ross Baldick
baldick@ece.utexas.edu
استاد مهندسی برق دانشگاه Texas at Austin

کارشناسی فیزیک و ریاضی محض، دانشگاه سیدنی، ۱۹۸۳ (رتبه ممتاز، با معدل ۴ از ۴)
کارشناسی مهندسی برق، دانشگاه برکلی، ۱۹۸۵ (رتبه ممتاز، با معدل ۴ از ۴)
کارشناسی ارشد مهندسی برق و علوم کامپیوتر، دانشگاه برکلی، ۱۹۸۸ (رتبه ممتاز، با معدل ۴ از ۴)
دکترای مهندسی برق و علوم کامپیوتر، دانشگاه برکلی، ۱۹۹۰ (رتبه ممتاز، با معدل ۴ از ۴)

پروفسور بالدیک از سال ۱۹۹۴ به عنوان استاد برق دانشگاه تگزاس فعالیت‌های علمی خود را در حوزه بازار برق به طور جدی و عمیق آغاز نموده‌اند ضمن اینکه ایشان از سال ۲۰۱۱ تاکنون در این دانشگاه به عنوان مدیر مرکز تحقیقاتی خودروهای برقی و رئیس مرکز همکاری‌های صنعت و دانشگاه فعالیت دارند.

دکتر بالدیک مشاور برخی شرکت‌های تحقیقاتی معتبر دنیا در حوزه طراحی بازار برق بوده‌اند که در این خصوص می‌توان به موضوعاتی همچون مباحث رگولاتوری بازار برق، توسعه برنامه اجرای اقتصادی بازار برق، سازوکار تخصیص هزینه‌های تبادلات شبکه و خدمات انتقال، آینده‌نگاری صنعت برق، تبادلات تجاری بین منطقه‌ای، تحلیل بازار برق، تدوین توافق‌نامه‌ها و قراردادهای تولید انرژی نیروگاه‌های بادی، بررسی و تحلیل تسویه بازار برق، طراحی بازار با قیمت‌گذاری محلی، مدیریت گرفتگی خطوط، تاثیر ادوات FACTS در تعاملات اقتصادی بازار برق اشاره نمود.

از ایشان مقاله‌های متعددی در حوزه بازار برق، نیروگاه‌های بادی و خودروهای الکتریکی منتشر شده است. همچنین کتاب "*بهینه‌سازی کاربردی: فرمول‌بندی و الگوریتم‌ها برای سیستم‌های مهندسی*" توسط ایشان در سال ۲۰۰۶ به چاپ رسیده است.

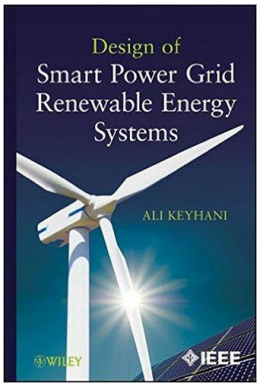
فایل‌های ویدئویی تدریس و برخی مطالب درسی ارائه شده توسط دکتر بالدیک در حوزه بازار برق در آدرس اینترنتی http://cusp.umn.edu/emarkets.php قابل دسترس می‌باشند.

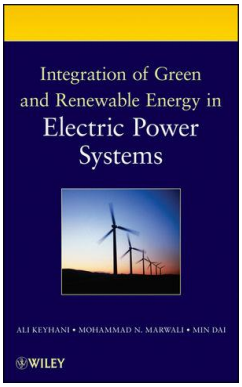
مصاحبه

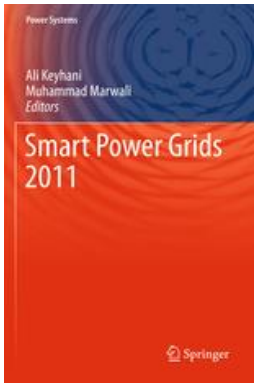
پای صحبت استاد[۱]

پروفسور علی کیهانی از استادان برجسته مهندسی برق- قدرت و فلوی انجمن مهندسین برق و الکترونیک *(IEEE)* هستند که تجربه سال‌ها تحقیق و تدریس در بخش‌های مختلف مرتبط با سیستم‌های قدرت را در ایران و ایالات متحده آمریکا داشته‌اند؛ ایشان اخیرا از دانشگاه ایالتی اوهایو آمریکا بازنشسته شده‌اند، اما تحقیق، مطالعه، آموزش و اثربخشی در حوزه مهندسی برق را رها نکرده‌اند. ایشان، در ماه‌های اخیر با حضور در ایران، به عنوان عضو هیات علمی وابسته پژوهشگاه نیرو و مشاور *گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت* فعالیت پژوهشی خود را در ایران دنبال نموده‌اند. در سال‌های اخیر فعالیت‌های ایشان در زمینه شبکه‌های هوشمند، ریزشبکه‌ها، طراحی و کنترل آنها، منابع انرژی تجدیدپذیر پراکنده و نحوه پیوستن آنها به شبکه بوده است.

از تالیفات ایشان می‌توان به کتب ارزشمند زیر اشاره نمود:







[۱] این مصاحبه در تاریخ ۶ مرداد ۱۳۹۵ انجام شده است.

در ادامه خلاصه‌ای از نظرات، تجربیات و پیشنهادات ارزشمند ایشان در زمینه موضوعات مختلف پیش روی سیستم قدرت، طی گفتگو با اعضای *گروه پژوهشی بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت* ارائه می‌شود.

- **موضوع تحقیقات در سیستم‌های قدرت**

از دیدگاه من، کار تحقیقاتی مانند این است که دری را رو به دنیای جدیدی باز کنیم و روبروی ما درهای دیگری گشوده شود، با شروع کار تحقیقاتی در زمینه یک مبحث، موضوعات و مسائل مختلف مطرح خواهد شد. برای اینکه بتوانیم در یک زمینه به صورت موفق عمل کنیم، به صورت پله پله پیش می‌رویم و برای حل مسئله اقدام می‌کنیم و روش‌های مناسب را انتخاب می‌کنیم. باید توجه داشت که صورت مسئله همان است که در ابتدا بود و طی این روند، عوض نمی‌شود.

به عنوان مثال، فرض کنید شما می‌خواهید مدل‌سازی انجام دهید، بطور دقیق‌تر اگر بخواهم صحبت کنم، شما می‌دانید که در سیستم‌های برق، بهره‌برداری بر اساس برنامه‌ریزی است، برنامه‌ریزی‌های مختلف وجود دارد: برنامه‌ریزی دراز مدت نشان می‌دهد چه نیروگاه‌هایی برای فراهم‌سازی خدمات وجود دارند، برنامه‌ریزی میان‌مدت وجود دارد که نشان می‌دهد چه نیروگاه‌هایی آماده هستند و در نهایت، برنامه کوتاه‌مدت راجع به این صحبت می‌کند که در ساعات آینده چگونه سیستم بهره‌برداری شود. قیمت هر کدام از این نیروگاه‌ها فرق می‌کند، بنابراین شما با مسئله بسیار بزرگی روبرو می‌شوید، باید ببینید وضعیت بار چگونه است؛ به این نتیجه می‌رسید که باید مدل‌سازی بار انجام دهید و مدل دینامیکی بار را مشخص کنید. یعنی باید مشخص کنید که در ۲۴ ساعت، مدل بار چه شکلی است. برای انجام اینکار، اول کار مرور ادبیات انجام می‌دهیم و کارهایی را که شده، بررسی می‌کنیم، اما این دلیل نمی‌شود که بخواهیم همان کارها

را تکرار کنیم. می‌خواهیم ببینیم از آن روش‌هایی که وجود دارند در مورد مسئله حاضر چگونه می‌توان ایده گرفت و چه بخش‌هایی از روش‌ها را می‌توان استفاده نمود. با مشخص‌شدن مدل بار ۲۴ ساعت، بهره‌بردار شبکه می‌فهمد که به چه ترتیب باید واحدهای تولیدی مختلف را وارد شبکه کند و به چه شکل باید برای آنها برنامه‌ریزی داشته باشد.

از نظر من سیستم قدرت سیستم جالبی است، سیستمی که علیرغم حجم بزرگش، قوانین الکتریکی حاکم بر آن ساده هستند. تعداد زیادی ژنراتورهای بزرگ موازی به شبکه وصل هستند و بارهای زیادی نیز متصلند و بصورت پایدار بهره‌برداری می‌شوند. قوانین ساده‌ای حاکم است؛ وقتی تولید و مصرف با هم در تعادلند، فرکانس ثابت است، با افزایش بار، فرکانس افت می‌کند و ژنراتور باید با تولید بیشتر این افت فرکانس را جبران کند. چنانچه توان بار مصرف‌کننده کاهش یابد، فرکانس افزایش پیدا می‌کند و ژنراتور با کاهش تولید فرکانس را ثابت نگه می‌دارد. بحث بعدی، بهره‌برداری اقتصادی (*Economic Dispatch*) است، یعنی کدام ژنراتور توان خود را افزایش دهد که به صرفه باشد، بحث بعدی خطوط تبادل اصلی هستند و همینطور بحث‌های جدید و موضوعات مختلف دیگری در این راستا مطرح می‌شوند.

همانطور که گفتم، تحقیقات، درهای مختلفی به روی ما باز می‌کند و ما را به جهات مختلف می‌کشاند. اینکه چطور شد من در زمینه شبکه‌های هوشمند و تلفیق منابع انرژی تجدیدپذیر با شبکه کار کردم نیز به همین برمی‌گردد. در اینجا لازم است تا در زمینه تاریخچه و دلایل تمایل من و همچنین اقبال عمومی به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر توضیح مختصری بدهم.

- **دلایل گرایش به موضوع انرژی‌های تجدیدپذیر و شبکه‌های هوشمند**

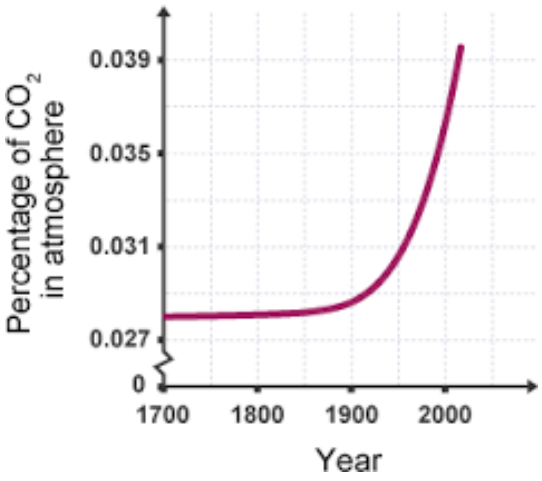
در ابتدا می‌توانم بگویم من به این حقیقت پی بردم که اینورترها نقشی اساسی در بوجود آمدن تکنولوژی جدید بازی می‌کنند. اگر بخواهم تاریخچه‌ای برای شما بیان کنم، قبلا الکترونیک قدرت به این درجه از رشد نرسیده بود مثلا در کارخانه ذوب آهن، ماشین‌های القایی بودند که همه روی خط کار می‌کردند و مثلا ورقه‌های فولاد را رول می‌کردند، کنترل آنها با تغییر مقاومت صورت می‌گرفت؛ وقتی الکترونیک قدرت رشد کرد و تراشه‌های الکترونیک قدرت وارد بازار شدند، درایو سرعت متغیر *(Variable Speed Drive)* بکار گرفته شد، بنابراین نقش اینورترها و کانورترها خیلی وسیع‌تر شد.

از سویی دیگر، نقش میکروالکترونیک هم مهم شد به عنوان مثال، قبلا یک سایت کامپیوتری یا مرکز کامپیوتر وجود داشت که در آن کامپیوترها حجم زیادی را اشغال کرده بودند و مقداری اطلاعات هم در خود ذخیره می‌کردند ولی به مرور تراشه‌های الکترونیکی رفته رفته کوچکتر شدند و حجم اطلاعات ذخیره‌شده در آنها بالاتر رفت تا جایی که الان یک تلفن هوشمند کوچک اطلاعاتی به مراتب بیشتر از کل مرکز کامپیوتری که در قدیم وجود داشت در خود ذخیره می‌کند.

حال ببینید که این موضوع ما را به کدام سمت می‌برد؟ ما را به سمت *Artificial Intelligence* می‌برد. هوش مجازی بنظرم ترجمه دقیقی نیست در واقع بدست‌آوردن نحوه تفکر انسانهاست و اندوختن آنها در حافظه بسیار وسیع که به سرعت می‌توان آنها را برداشت کرد. برگردیم به بحث اصلی، در صنعت برق رشد الکترونیک قدرت و ارزان شدن آن، بوجود آمدن*DSP*ها و ارزان شدن آنها باعث ایجاد خودروهای الکتریکی شدند. خودروهای الکتریکی شامل موتور، کانورتر و بدنه ماشین و تجهیزات جانبی است (قصد

نادیده گرفتن بخش‌های مکانیکی را ندارم، ولی سیستم اصلی همین‌ها است). بدین ترتیب دنیای جدیدی معرفی شد!

از سوی دیگر، اتفاق‌های جدیدی هم افتاد، کم‌کم مشخص شد که بحث گرم‌شدن کره زمین خیلی جدی است و اثرات منفی آن روز به روز نمایان شد و نیاز به کاهش استفاده از تکنولوژی‌هایی که این گرم‌شدن را تشدید می‌کنند، بیش از پیش حس شد. آلودگی کربنی با توجه به شکل (۱) از سال ۱۷۰۰ تا ۲۰۰۰ به صورت نمایی افزایش پیدا کرده است.



شکل (۱): افزایش انتشار آلودگی کربن

همه ما با تابع نمایی آشنایی داریم و می‌دانیم که اگر این روند ادامه یابد، حجم آلودگی خیلی خیلی زیاد می‌شود بنابراین باید این روند متوقف شود و کاهش یابد. ما باید این دوراندیشی را داشته باشیم و این روند را کاهش دهیم. ما باید به نسل بعد از خود هم فکر کنیم و شرایط را برای آنها نیز حفظ نماییم، ما از سویی برای فرزندانمان این همه زحمت می‌کشیم و از سویی با دوراندیشی نکردن درباره آینده آنها، زحماتمان را

هدر می‌دهیم. بنابراین بحث منابع انرژی تجدیدپذیر و انرژی‌های سبز به عنوان یک راه‌حل برای کاهش انتشار آلودگی کربنی ناشی از سوخت‌های فسیلی، مورد توجه قرار گرفت.

امروزه اگر ما به دنیای توسعه‌یافته نگاه کنیم، می‌بینیم که گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر چشمگیر بوده است؛ آلمان ۳۰ درصد انرژی خود را از خورشید می‌گیرد و سعی کرده‌اند سهم نفت و گاز را کم کنند. در همین نزدیکی ایران، دو روز پیش هواپیمای خورشیدی از ابوظبی بلند شد و رفت زمین را دور زد و دوباره به ابوظبی برگشت!

از سوی دیگر، اتفاقاتی مانند حادثه تری-مایل آیلند[۱] و حادثه چرنوبیل[۲] رخ داد، این حوادث فاجعه‌بار، فرضیه استفاده از نیروگاه‌های اتمی را با چالش روبرو کرد و نشان داد نیروگاه‌های اتمی چندان هم گزینه مناسبی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی نیستند. سوخت زغال سنگ و دیگر سوخت‌های فسیلی نیز بخاطر گرم‌شدن زمین مورد مخالفت قرار گرفته بودند، بنابراین منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک مورد توجه قرار گرفتند. در سال ۱۹۸۰ فتوسل‌ها خیلی گران بود ولی الان خیلی ارزان‌تر شده و وضعیتی پیش‌رو است که به آن دموکراسی انرژی می‌گویند، یعنی هر کسی که مصرف‌کننده است خودش می‌تواند تولیدکننده باشد چرا که با نصب چند پنل فتوولتائیک روی سقف، از نظر قیمتی، هزینه معادل می‌شود با حالتی که برای تولید برق از گاز استفاده شود و آلودگی کربنی هم کاهش می‌یابد.

---

[۱] پانوشت: حادثه اتمی تری مایل آیلند (Three Mile Island accident) بدترین حادثه اتمی آمریکا و نخستین فاجعه راکتورهای هسته‌ای دنیا (پیش از حادثه چرنوبیل) است که در ۲۸ مارس ۱۹۷۹ میلادی در تری مایل آیلند آمریکا اتفاق افتاد. در این حادثه بخشی از هسته اصلی واحد ۲ در نیروگاه تری مایل آیلند در ایالت پنسیلوانیا در آمریکا ذوب شد که باعث نشت ۳ میلیون کوری گاز رادیواکتیو به بیرون از نیروگاه گردید. در پی این حادثه حدود ۱۴۰٬۰۰۰ نفر از اهالی منطقه خانه‌های خود را ترک کردند. پس از حادثه تری مایلی آیلند، ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای برای مدتی در آمریکا متوقف شد.

[۲] حادثه اتمی چرنوبیل (Chernobyl disaster) حادثه هسته‌ای فاجعه‌باری بود که در روز ۶ اردیبهشت ۱۳۶۵ (۲۶ آوریل ۱۹۸۶) در نیروگاه چرنوبیل در اوکراین رخ داد. انفجار و آتش‌سوزی در رآکتور شماره ۴ نیروگاه چرنوبیل باعث پخش مواد رادیواکتیو در بخش بزرگی از غرب شوروی و اروپا شد.

مشکلات پیش رو در ایران

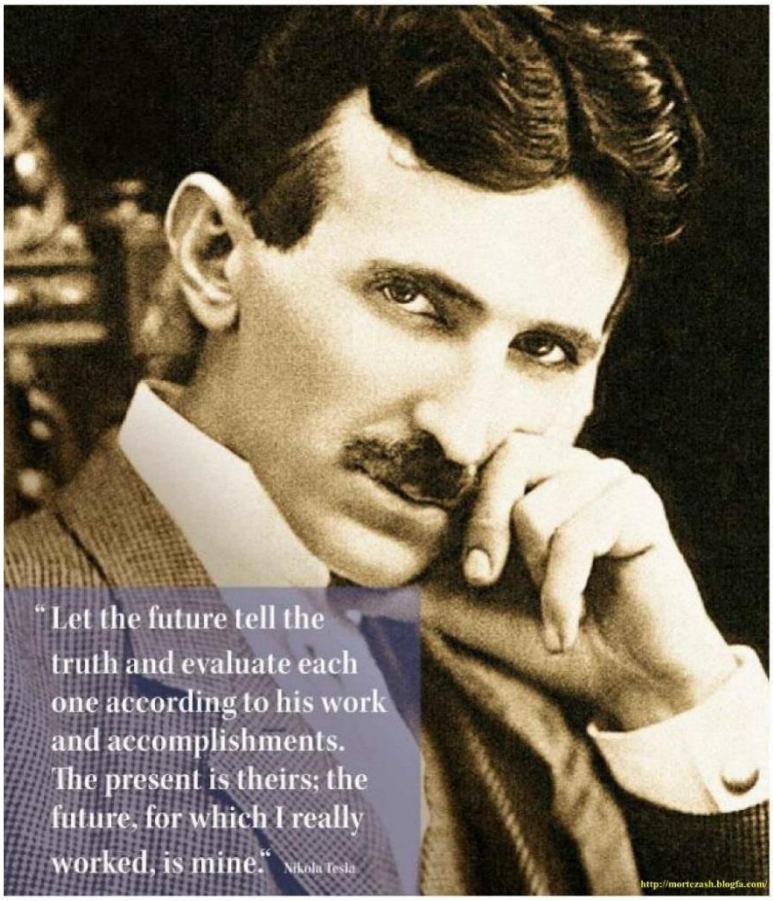
ایران هم به عنوان جزئی از مجموعه کشورهای جهان، از مسئله گرم‌شدن زمین در امان نیست. پیش‌بینی‌ها می‌گویند که در ایران خشکسالی بیشتر می‌شود. این که گفته شود در اثر گرم شدن زمین، این هلند است که به زیر آب می‌رود و این مشکل ایران نیست، دیدگاه درستی نیست. واقعیت این است که دنیا مثل زنجیر به هم وصل است و اگر هلند به زیر آب رود، اثرات سوء آن گریبان ما را هم می‌گیرد، دنیا به هم وصل است و نباید با دید تنگ‌نظرانه به مسائل نگاه کرد! نگاه دیگری لازم است؛ بوجود آوردن این نوع نگاه ساده نیست، لازم است این را بگویم که در دنیای غرب هم این کار، ساده نیست. حرکتی است که شما با نیروهای مختلف روبرو می‌شوید، هر کسی باید برای خودش تصمیم بگیرد که کجای کار بایستد.

بخشی از مسائل، فرهنگی هستند و بخشی دیگر مهندسی. ما اگر نتوانیم قسمت مهندسی را حل کنیم، قسمت فرهنگی را که اصلا نمی‌توانیم! قسمت مهندسی برمی‌گردد به اینکه باید بنشینیم صادقانه تجزیه و تحلیل کنیم و راه حل‌های درست و موثر پیدا کنیم.

چیزی که من در این مدت با آن روبرو شده‌ام، از هر کسی که در مورد قیمت تمام شده برق سوال می‌کنم، در جواب می‌گوید: بر مبنای چه فرضیاتی؟! در صورتی که باید این مطالعه برای صنعت برق ایران انجام می‌شد و تاکنون قیمت پایه (قیمت تمام‌شده واقعی) برق محاسبه شده بود. مثلا اینکه قیمت تمام شده برق در نیروگاه اتمی چقدر است یا گازی یا سیکل ترکیبی و در نهایت با چه قیمتی به دست مصرف‌کننده می‌رسد؟ نیروگاه‌هایی که آخر از همه وارد مدار می‌شوند و برای تامین پیک می‌آیند، چه هزینه‌هایی دارند؟

دیده می‌شود که در مجموعه وزارت نیرو نسبت به اختلاف بین قیمت تمام‌شده و قیمت فروش نارضایتی وجود دارد و این در سخنرانی‌ها و مصاحبه‌ها اعلام می‌شود ولی عملا تغییری در این وضعیت صورت نمی‌گیرد. این مشکلات باعث اغتشاشات اقتصادی می‌شوند. این تفکر که خداوند گاز را به ما عطا کرده و این نعمت مجانی است، تصور درستی نیست. وظیفه پژوهشگاه چیست؟ چرا پژوهش می‌کنیم؟ بنظر می‌رسد می‌خواهیم راندمان (بهره‌وری) را بالا ببریم، پس باید مبنای اقتصادی مشخص باشد.

من در ده سال اخیر، به طور خاص در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر کار کرده‌ام، هدفم هم یکپارچه‌کردن این منابع با شبکه بوده است. در اینجا هم در این زمینه کار کردیم که چگونه می‌توانیم ضریب نفوذ PV را بالا ببریم. بالابردن ضریب نفوذ خود یک سیاست اقتصادی است.



نیکولاس تسلا (۱۹۴۳-۱۸۵۶)
مخترع، مهندس برق، مهندس مکانیک و فیزیکدان صربی‌الاصل آمریکایی بود که به خاطر ایده طراحی سیستم‌های تولید و انتقال جریان متناوب به شهرت جهانی رسید. همچنین، تسلا به دلیل انجام آزمایش‌های فراوان در حوزه فشار قوی، مخابره امواج رادیویی و فرکانس بالا، اشعه ایکس و حتی انتقال بی‌سیم توان که هر یک منتهی به ثبت اختراعات و نظریه‌های علمی متعددی شدند، مشهور است.

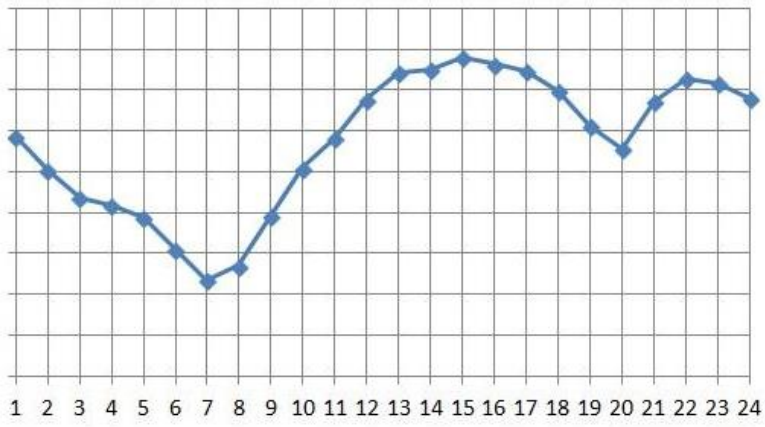
- **رابطه تنگاتنگ بازار برق و بهره‌برداری سیستم: تغییر دیدگاه‌ها در سال‌های اخیر**

در زمینه بازار برق، اولا لازم است یادآوری کنم که هیچ بازاری صد درصد آزاد نیست، چارچوب و قوانین مخصوص به خود را دارد. معمولا دسته‌های مختلفی ذینفع هستند مثلا در آمریکا، وال استریت به دنبال پول بیشتر است، مردم به دنبال سرویس مناسب با کمترین قیمت ممکن هستند و در سوی دیگر، نماینده‌های مردم نیز حضور دارند؛ این سه قطب همواره در تنش هستند. شرکت‌های برق در آمریکا تا پیش از ۲۰۰۰ یا حتی قبل از آن همه خصوصی بودند بجز عده محدودی مثل (*BPA*) *Bonneville Power Administration* که در دست دولت بود، البته به صورت نهادی از دولت بودند ولی حساب و کتاب مالی داشتند یعنی برق را به شرکت‌های خصوصی می‌فروختند.

اولین اقدام در زمینه ایجاد بازار برق، پاسخگویی به جریان‌هایی بود که فشار می‌آوردند که تولید نباید تحت مقررات قرار گیرد و لذا اولین کاری که کردند، مقررات‌زدایی (*Deregulation*) از تولید بود. همه ما می‌دانیم که برق پس از اینکه وارد شبکه می‌شود، بر اساس امپدانس خطوط توزیع می‌شود. مقررات‌زدایی از تولید، یعنی هر کسی می‌تواند در هر جایی نیروگاه بزند و به شرکت برق، انرژی بفروشد. بدین ترتیب بازاری رقابتی با محوریت بخش تولید شکل گرفت.

جریان دیگری که در اینجا باید به آن اشاره کنم، در حدود دهه ۱۹۸۰ در دانشگاه *MIT*، استادی بنام *Schweppe* بحث *Real Time Pricing* را مطرح کرد. همانطور که ما می‌دانیم منحنی بار دارای پیک است

(نمونه‌ای از منحنی بار روزانه شبکه ایران در شکل (۲) آمده است)، ایده *Schweppe* این بود که قیمت برق می‌تواند از این منحنی تبعیت کند و به عبرات دیگر، در زمان‌های مختلف متغیر باشد.



شکل (۲): نمونه‌ای از منحنی مصرف در روز پیک سال ۹۲ (مگاوات)

بدین ترتیب، قیمت‌گذاری واقعی برق مطرح شد تا بحث بهره‌وری اهمیت یابد و قیمت به عنوان سیگنالی عمل کند که مردم تشویق به بهره‌وری بیشتر شوند. این باعث شد که بازار برق شکل بگیرد. بخش انتقال را به *ISO*ها سپردند، که برنامه‌ریز و هماهنگ‌کننده هستند. البته همه فعالیت‌ها بر اساس روابطی که *FERC* تعیین می‌کند، صورت می‌گیرند. یکی از شرکت‌های بزرگ انرژی که در این فضا کار می‌کرد، بنام *ENRON* بخاطر فعالیت‌های اقتصادی غیرقانونی متهم شد و رئیس شرکت زندانی و شرکت ورشکست شد. تبانی‌ها و اقدامات نامناسب اقتصادی بازار برق، حتی یک‌بار شبکه کالیفرنیا را به خاموشی کشاند.

به هر حال بازار برق، چالش‌ها و تغییرات زیادی را تاکنون پشت سر گذاشته است؛ شکل‌گرفتن و تکامل بازار برق هنوز هم ادامه دارد. بازار برق یک بازار واقعی است، مثل هواپیماها که برنامه‌ریزی می‌شوند که در ارتفاعات مختلف و در زمان‌های مختلف پرواز کنند، این برنامه‌ریزی و هماهنگی در بازار برق نیز وجود دارد.

از سویی، همانطور که گفتم الان در سیستم قدرت به نقطه‌ای رسیده‌ایم که هر مشترک می‌تواند انرژی مورد نیاز خودش را تامین کند، در آمریکا این موضوع به شدت شکل گرفته و با قوت دنبال می‌شود. مخصوصا در دو بخش کالیفرنیا و *East Coast* که پیشرفته‌تر هستند و بیشتر به این مسائل توجه دارند. مردم متوجه شده‌اند که گرم‌شدن زمین مسئله مهمی است، عده‌ای از مشترکین هستند که خود را از شبکه برق جدا کرده‌اند و به همان میزان که مصرف می‌کنند، تولید هم می‌کنند. بعضی هم هستند که روزها مقداری برق به شبکه می‌فروشند و شبها برق را خریداری می‌کنند. البته لازم به ذکر است، کسانی که بطور معمول برق نمی‌خرند و شاید روزی بخرند، باید حق انشعاب به شبکه بپردازند تا اتصال آنها به شبکه حفظ شود. در این زمینه مسائل و اختلافاتی پیش می‌آید و باید مرجعی برای داوری و قضاوت نیز باشد.

کشور آلمان سیاست دیگری را دنبال نمود و از سوی دولت گفته شد: "کسانی که سیستم فتوولتائیک نصب کنند، ما برق تولیدی آن‌ها را ۳۰ سنت بر کیلووات‌ساعت می‌خریم"، شرکت‌های برق را هم مجبور به خرید کردند! البته حتما برای اینکار به شرکت‌ها بودجه دادند. این سیاست باعث شد که استفاده از انرژی فتوولتائیک در آلمان رشد کند. این در حالی است که آلمان کشوری آفتابی نیست ولی با این سیاست‌ها توانستند میزان استفاده از انرژی خورشید را به ۳۰ درصد برسانند و پس از حادثه‌ای که در فوکوشیما در ژاپن اتفاق افتاد، آلمان‌ها نیروگاه‌های اتمی خود را تعطیل کردند. بنابراین با توجه به تغییرات سال‌های اخیر، بنظر من می‌توان گفت که مسائل بازار برق و بحث‌های مرتبط که طی بیست سال اخیر مطرح بوده، الان جا افتاده و حوزه کار در زمینه‌های دیگر گشوده شده است، معمولا جهت‌گیری تحقیقات در طول زمان عوض می‌شود و وقتی موضوعی جا افتاد، به سراغ موضوعات دیگر می‌روند.

باید اضافه کنم که علاوه بر پاسخگویی بار، بحث میکروگریدها (ریزشبکه‌ها) و ذخیره‌سازها الان موضوعات تحقیقاتی روز هستند. دلیل آن هم این است که قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت به شکل قبل قابل تامین نیست، در آمریکا قبلا بر مبنای میزان بار و رشد بار، میزان تولید معین می‌شد و نیروگاه‌ها مهیا می‌شدند و با توجه به میزان سود مصوب، قیمت‌گذاری و برنامه‌ریزی صورت می‌گرفت ولی الان با تغییرات پیش‌آمده، این برنامه‌ریزی‌ها تغییر کرده‌اند. عده زیادی، در محل، برق خود را تامین می‌کنند و گاه پیش می‌آید برای یک هفته برق شبکه قطع می‌شود. در هر خانه یک توربین گازی گذاشته شده و بوسیله شرکت‌هایی کنترل آنها انجام می‌شود و زمانی که برق قطع می‌شود، این توربین‌ها را وصل می‌کنند و برق مورد نیاز خود را تامین می‌کنند. این سیستم یک میکروگرید است که می‌تواند مستقل از شبکه نیز کار کند. میکروگریدی که با توربین گازی کار می‌کند. تامین برق در این حالت، با قیمتی گرانتر از خرید برق از شبکه انجام می‌شود و مشترک برای راحتی و آسایش خود این سرمایه‌گذاری را می‌کند. بعضی از خانواده‌ها که این توربین را ندارند، ممکن است زمان زیادی را بدون برق بگذرانند.

همچنین در آمریکا یکی از دلایل گسترش میکروگریدها، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و کمک‌های دولتی برای بکارگیری این انرژی‌ها است. ذخیره‌سازها هم در این مسیر مورد نیاز هستند. لازم می‌دانم در اینجا مجددا ذکر کنم که در آینده، در دنیا برق مهمتر خواهد شد. خودروهای الکتریکی مسلما در آینده بیشتر خواهند شد و در کنار آنها استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک نیز رشد زیادی خواهد داشت.

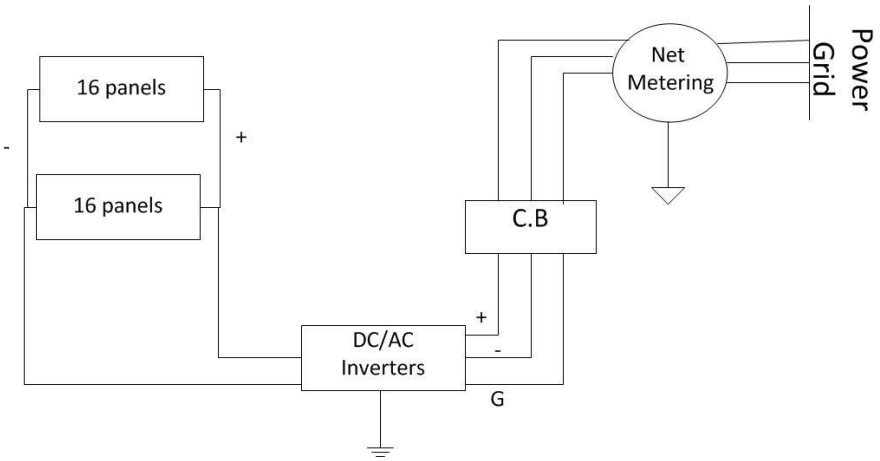
• شبکه‌های هوشمند و میکروگریدها

همانطور که گفتم، دنیا دارد به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر پیش می‌رود. فناوری‌های مربوط به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در حال گسترش است و بکارگیری این انرژی‌ها روز به روز اقتصادی‌تر و قابل رقابت‌تر می‌شود. شبکه‌های هوشمند گسترش پیدا می‌کنند؛ شبکه‌های هوشمند دارای دو شاخص اصلی است: اندازه‌گیری دوطرفه *(Net Metering)* و پاسخگویی بار *(Demand Response)*. با گسترش شبکه هوشمند، هر دوی این بخش‌ها گسترش پیدا خواهند کرد و ارتباط بین مشتری و سیستم قدرت بسیار زیاد خواهد شد و مشتریان با امکان پایش دائم خواهند توانست مصرف خود را کنترل کنند، بگونه‌ای که هزینه آنها کم شود. ما در دانشگاه اُهایو، در این زمینه فعالیتی انجام داده‌ایم و مقاله‌ای تدوین کرده‌ایم که در آن از اصطلاح *Virtual Generator* استفاده شده است، یعنی مشتری آگاهانه مصرف خود را کم می‌کند و گویی در نقطه اتصال به شبکه، تولید مجازی شکل گرفته است. ولی وقتی صحبت از میکروگرید می‌شود یعنی سیستمی که می‌تواند بطور مستقل از شبکه قدرت اصلی، خود به صورت یک شبکه کار کند، برای این‌کار باید کلیه کنترل‌های لازم جهت عملکرد صحیح و تامین مطمئن بارهای میکروگرید فراهم باشد که لازمه این امر وجود منابع غیرمتغیر (*Non-Intermittent*) و یا سیستم ذخیره‌ساز است.

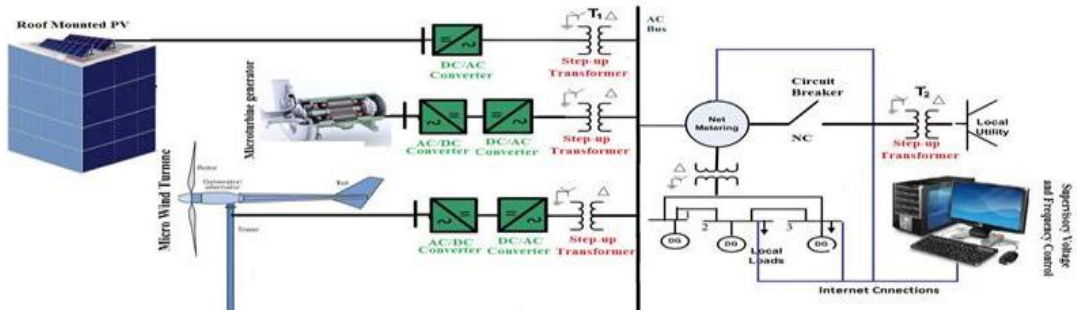
خیلی‌ها حتی بعضی مهندسان برق فکر می‌کنند که اگر روی سقف خانه فتوولتائیک دارند به این معنی است که در زمان قطع برق، برق دارند، در صورتی که اینطور نیست. سیستم فتوولتائیکی که روی پشت‌بام می‌گذاریم، در پشت اندازه‌گیر (کنتور) قرار دارد و با شبکه برق سنکرون شده است و به عنوان یک ژنراتور شبکه کار می‌کند، اگر برقی که تولید می‌کند کافی است برای تغذیه بار منزل، پس برقی از شبکه خریده

نمی‌شود ولی چنانچه بار زیادتر است، باید برق را از شبکه بخرد و چنانچه تولید زیادتر است، برق به شبکه فروخته می‌شود. این کار به کمک یک اندازه‌گیر هوشمند یا دوطرفه امکان‌پذیر می‌شود. در چنین شرایطی اگر برق شبکه قطع شود، دیگر نمی‌توانیم برق داشته باشیم چون فقط در حالت سنکرون با شبکه امکان تولید وجود دارد. نمونه ساده‌ای از چنین مداری در شکل ۳ نشان داده شده است.

اما اگر میکروگرید داشته باشیم بدین معنی است که تمهیدات لازم برای عملکرد مستقل از شبکه فراهم شده است. در این حالت وقتی اتصال به شبکه از دست می‌رود، خود خانه تبدیل به یک گرید می‌شود یا به عبارتی میکروگرید؛ این میکروگرید باید بتواند ولتاژ و فرکانس خود را کنترل نماید. بنابراین نیاز به کلیه تجهیزات سخت‌افزاری و امکانات نرم‌افزاری برای کنترل دارد. در شکل (۴) نمونه‌ای از یک میکروگرید نشان داده شده است، در این شکل دیده می‌شود که با بکارگیری توربین سرعت بالا در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین استفاده از سیستم کنترلی لازم، میکروگرید ایجاد شده است.



شکل (۳): مدار ساده‌شده سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه



شکل (۴): یک ریزشبکه نمونه

نظر من این است که میکروگرید در ایران هم می‌تواند بکار گرفته شود و رشد کند. گسترش استفاده از سیستم‌های فتولتائیک گزینه مناسبی برای ایران است. ایران ۳۰۰ روز آفتابی در سال دارد، اگر قیمت پیک انرژی مشخص شود، برای تامین پیک می‌توان از فتوولتائیک بهره گرفت. نیروگاه‌های فتوولتائیک با ظرفیت بالا شبیه آنچه در خراسان کار می‌شود، خوب است ولی من معتقدم که باید مردم را درگیر کرد و در پشت‌بام ساختمان‌ها فتوولتائیک‌ها را نصب کرد و از مزایای زیاد آن بهره برد. به نظرم ظرفیت این موضوع در ایران وجود دارد و از طریق راه‌ها و ابزارهای مختلف می‌توان این موضوع را در ایران فعال کرد و ضریب نفوذ را بالا برد. مثلا می‌توان وام تخصیص داد یا شرکت‌های کوچکی تاسیس کرد که سقف‌ها را اجاره کنند و فتوولتائیک نصب کنند. راه‌های مختلفی برای این موضوع وجود دارد.

الان در ایران، طبق گزارشات، قیمت فروش برق به مصرف‌کنندگان از قیمت تمام‌شده برق کمتر است و اگر بخواهیم به عنوان مثال سیستم‌های PV را در ساختمان‌های مسکونی و تجاری شهر تهران رواج دهیم، به دلیل پایین‌بودن قیمت برق مصرفی، انگیزه‌ای برای نصب این سیستم‌ها از سوی مصرف‌کننده‌ها وجود نخواهد داشت؛ در حالی که نصب این سیستم‌ها در شهرهای بزرگ، علاوه بر کاهش مصرف سوخت فسیلی و کاهش انتشار آلودگی، مزایای زیادی از جمله بالارفتن امنیت و قابلیت اطمینان شبکه، اصلاح

منحنی تولید نیروگاه‌ها و کاهش آسیب‌پذیری در برابر خاموشی و قطعی برق را نیز در پی دارد. در حال حاضر برج‌های مسکونی بلند زیادی در تهران و دیگر شهرهای بزرگ ساخته شده‌اند که به شدت به انرژی برق وابسته‌اند و قطع برق می‌تواند زندگی را در این برج‌ها مختل کند اگرچه ممکن است برای بعضی از این برج‌ها سیستم برق اضطراری فراهم شده باشد. با توجه به شدت خوب تابش آفتاب در تهران و خیلی از شهرهای ایران، استفاده از سیستم‌های PV برای این ساختمان‌ها می‌تواند منبع مناسب و قابل اطمینانی باشد. جلب نظر مردم به سمت افزایش بهره‌وری و استفاده بهینه‌تر از برق هم در این مسیر می‌تواند اتفاق بیفتد.

- **رو به سوی آینده**

ما با دنیای جدیدی روبرو هستیم. فضا برای انجام تحقیقات بسیار وسیع است، شما مهندس برق هستید و با خواندن مقالات و کتاب‌ها می‌توانید به خوبی شناخت پیدا کنید. نباید اینگونه فکر شود که با فارغ‌التحصیل‌شدن از دانشگاه، تحصیل علم تمام می‌شود، فارغ‌التحصیلی تازه آغاز راه است. البته برای اینکه شما مایوس نباشید و دلگرم باشید باید کسی باشد که اینها را از شما بخواهد مثلا شرکت‌های برق باید از شما بخواهند و آنها در صورتی این فعالیت‌ها را خواهند خواست که ملزم به پاسخگویی باشند و ملزم به اداره خود و بدست‌آوردن درآمد برای خرج خود باشند. بررسی این مسائل در حیطه ما نیست و در حیطه مسائل اجتماعی و اقتصادی قرار می‌گیرد. قبول دارم که بعضی مشکلات واقعا بازدارنده هستند. مشکلاتی که اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی هستند و حل آنها از عهده ما برنمی‌آید. اینکه برای مردم این فرهنگ جا بیفتد که در مقابل نسل آینده مسئول هستند، چالش بزرگی است.

مسئله مهم دیگری که من به آن معتقدم این است که نباید الگوی آمریکا و اروپا فقط مد نظر قرار گیرد. به این علت که این الگوها ما را از مسائل اصولی که در اینجا داریم، دور می‌کند و بخاطر وجود مسائل و مشکلات اینجا، بعضی از این الگوها قابل پیاده‌شدن هم نیستند. به علت اینکه آمریکا دسترسی آزادتری برای اطلاعاتش ایجاد کرده است و زبان مستنداتش هم انگلیسی است، اطلاعات و تجربیات آمریکایی‌ها آسان‌تر در دسترس است؛ بنابراین در زمینه هر موضوعی، دنبال این هستیم که ببینیم آمریکا چه کار کرده در صورتی که الگوهایی که در ایران خیلی مورد احتیاج هستند، اصلا مورد بحث قرار نمی‌گیرند و راجع به آنها صحبت نمی‌شود. البته جای تعجب هم نیست، حتی اروپا هم وقتی در آمریکا کاری انجام می‌شود آن را دنبال کرده و شروع به انجام‌دادن آن می‌کند! اروپایی‌ها چون صنعت پیشرفته‌تری هم دارند معمولا از آمریکا هم جلو می‌زنند. به عنوان نمونه کشور آلمان که در زمینه میزان بکارگیری فتوولتائیک رتبه اول را دارد.

یک واقعیت هم پیش روی ما است و آن اینکه (به نظر من) قیمت نفت از این به بعد افزایش پیدا نمی‌کند، البته کسانی که پیشگویی می‌کنند ممکن است بعدا مجبور شوند پیشگویی خود را پس بگیرند! ولی بنظر می‌رسد وقوع چنین موضوعی محتمل است. دو تا نیرو در این زمینه اثرگذارند یکی گرم‌شدن زمین و دیگری *Fracking* یعنی حفر چاه‌های افقی که برای استخراج نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتیجتا قیمت نفت زیاد بالا نخواهد رفت ممکن است پایین برود ولی افزایش معنی‌داری دیگر نخواهد داشت.

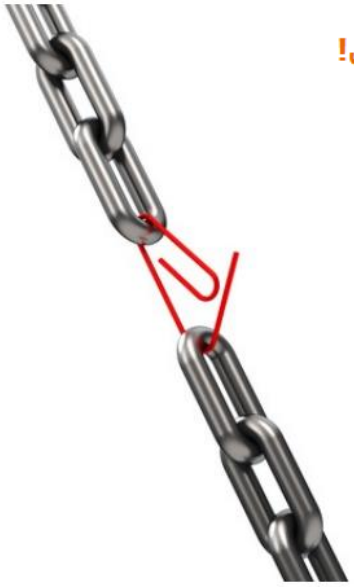
مسئله دیگری که وجود دارد این است که دنیای غرب به سمت پیری می‌رود بنابراین بحران‌های اقتصادی در این سو باعث افزایش مهاجرت می‌شود و این برای آنها مطلوب است.

آخرین صحبتی که دارم بحث اینورترهاست، به نظر من اینورترها به عنوان فصل مشترک بخش‌های مختلف فناوری‌های مطرح امروزه هستند در حمل و نقل برقی، شبکه‌های هوشمند و بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر، کاربرد دارند. فعالیت در زمینه بخش نرم‌افزار مرتبط با اینورترها در ایران، عملی، موثر و مفید است. من موکدا توصیه می‌کنم در این زمینه فعالیت شود.

من تصورم این بود که در ایران عده زیادی را می‌بینم که در این زمینه نرم‌افزار می‌نویسند و توسعه می‌دهند. ولی این را ندیدم! در زمینه مشکلات و مسائل هم، برنامه درازمدت و فعالیت‌های دوراندیشانه ندیدم! برای مصرف بهینه برق، مقابله با خشکسالی، مصرف بهینه آب فعالیت‌های موثر و درازمدت ندیدم!

امیدوارم پژوهشگران با انگیزه و تلاش بیشتری فعالیت کنند و همچنین سیاست‌گذاران نیز در جهت رفع موانع و ایجاد فضای کار و تلاش و تحقیق، اهتمام بیشتری نمایند تا استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک و میکروگریدها در ایران گسترش یابد و توجه عمومی مردم نسبت به ارتقاء بهره‌وری، استفاده بهینه از منابع، حفظ محیط زیست و منافع مشترک ملی افزایش پیدا کند.

اهمیت افراد در کار گروهی!



A chain is only as strong as its weakest link.

گزارش و خبر

آشنایی با مرکز تحقیقات مهندسی سیستم‌های قدرت (PSERC)

امید شاه‌حسینی*

PSERC[1] یک کنسرسیوم تحقیقاتی شامل ۱۳ دانشگاه[2] و ۳۹ شرکت، سازمان و موسسه تحقیقاتی[3] است که مدیریت آن از میان یکی از دانشگاه‌های عضو انتخاب شده و در هر دوره، این موقعیت بین دانشگاه‌ها جابجا می‌گردد. فراهم نمودن بستر مناسب به منظور تعامل هر چه بیشتر صنعت و دانشگاه، ایجاد زمینه‌های لازم به منظور تبادل گسترده اطلاعات و ایده‌ها و در پی آن ارائه راه‌حل برای مسائل گوناگون و پیچیده‌ای که صنعت برق با آن روبروست از جمله اهداف اصلی این کنسرسیوم بشمار می‌رود.

PSERC علاقمند به حل مشکلات فنی منتج از تغییرات سازمانی در محیط تجدید ساختار شده صنعت برق می‌باشد. تحقیقات این موسسه به صورت اختصاصی بر روی شبیه‌سازی بازار برق، کمی‌سازی محدودیت‌های برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، امنیت و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت در حضور انواع منابع تولید پراکنده و چگونگی تبادل اطلاعات در سیستم‌های گسترده متمرکز شده است. در همین ارتباط، ایجاد و تهیه ابزارها و مدل‌های کامپیوتری به منظور طراحی فنی سیستم‌های قدرت با کارایی بالا که در آنها بازدهی، پاسخگویی سیستم به مشترکین و سازگاری با محیط‌زیست به طرز فزاینده‌ای افزایش یافته در دستور کار *PSERC* قرار گرفته است[4].

در حال حاضر نرم‌افزارهای *PowerWeb*، *TC Calculator* و *MatPower* به صورت رایگان توسط این مرکز ارائه شده است[5].

---

* کارشناس پژوهشی گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، رایانامه: oshahhoseini@aut.ac.ir

[1] Power Systems Engineering Research Center

[2] از مهم‌ترین این دانشگاه‌ها می‌توان به UC Berkeley، Cornell، Texas A&M و Georgia Tech اشاره کرد.

[3] از مهم‌ترین این شرکت‌ها و موسسات تحقیقاتی می‌توان به ABB، KEPRIT، NREL، و EPRI اشاره کرد. همچنین بهره‌برداران بازارهای برق PJM، CAISO، ISO New England و NYISO نیز عضو PSERC می‌باشند.

[4] از این سیستم‌ها به عنوان سیستم‌های قدرت آینده یاد می‌شود.

[5] این نرم‌افزارها در سایت PSERC و از طریق آدرس http://pserc.wisc.edu/resources/software_tools.aspx قابل دانلود و استفاده می‌باشند.

- PowerWeb: یک شبیه‌ساز تحت اینترنت است که برای آموزش عملکرد بازار برق و نحوه بازی در بازار برق، فضای آزمایشگاهی بسیار ساده‌ای را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. این شبیه‌ساز بهترین ابزار برای یادگیری و بررسی تعاملات تجاری میان بازیگران بازار برق می‌باشد[۱]. لازم به ذکر است که *PowerWeb* تنها از طریق مرورگر فایرفاکس قابل اجرا است.
- TC Calculator: یک ابزار ساده اما کارآمد برای ارتقای دانش در حوزه محاسبات انتقال توان است. به کمک این نرم‌افزار، در یک فضای تعاملی امکان محاسبه قابلیت انتقال توان (*ATC* و *TTC*)[۲] میسر می‌شود.
- MatPower: یک بسته نرم‌افزاری تحت *MATLAB* (شامل مجموعه‌ای از *m-file*های قابل ویرایش) است که به ویژه برای حل مسائل پخش بار و پخش بار بهینه (*OPF*) به کار می‌رود. برای پژوهشگران و دانشگاهیان، این نرم‌افزار یک ابزار شبیه‌سازی بسیار ساده و در عین حال کارآمد محسوب می‌شود که ضمن داشتن کارایی مناسب، امکان درک عملکرد کدها و ویرایش آنها (برای اهداف خاص محاسباتی) را نیز در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

در حال حاضر، کشورهای بامحدودیت منابع سوخت، با چالش‌های عمده‌ای در تولید برق روبرو هستند. تقاضای رو به افزایش، شاخص‌های مورد نیاز در کیفیت توان، تغییرات بار، قیمت بالای سوخت‌های فسیلی، افزایش ضریب نفوذ تجهیزات صنعتی دیجیتالی و عمر بالای تجهیزات موجود در کنار مسائل زیست

[۱] آموزش این نرم‌افزار، در شماره بعدی نشریه گروه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت ارائه خواهد شد.

[2] Available/Total Transfer Capability

محیطی و ظهور تولیدکنندگان مستقل بخشی از این چالش‌ها هستند. راه‌حل‌های ارائه شده جهت غلبه بر چالش‌های فوق نیاز به تخصص‌های مختلفی از جمله فیزیک حالت‌جامد، کامپیوتر و کنترل دارد و این مساله موجب شده مطالعات سیستم‌های قدرت با مطالعات دیگر علوم پیوند زده شود. *PSERC* به منظور دستیابی به راه‌حل‌های مذکور تیم‌های چندرشته‌ای متشکل از دانشگاهیان و صنعتگران را تشکیل داده و انجام پروژه‌های مختلف را بر عهده گرفته است.

PSERC به وسیله یک مدیر عامل اداره می‌شود و تامین منابع مالی بر عهده دانشگاه‌ها و موسسات عضو است. در واقع هر یک از اعضا، حق عضویت سالانه خود را پرداخت نموده و تامین اعتبار به منظور انجام پروژه‌ها و فعالیت‌های تحقیقاتی از این طریق انجام می‌شود. ساختار سازمانی *PSERC* در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل (۱): ساختار سازمانی *PSERC*

در مرکز تحقیقاتی *PSERC* مدیر عامل مسئول مستقیم برنامه‌های آتی مرکز بوده و با بهره‌گیری از امکانات موجود می‌کوشد تا زمینه را جهت گسترش و اجرای این برنامه‌ها فراهم سازد. معاون مدیرعامل نیز در این امر مهم به او کمک می‌نماید. علاوه بر این مدیرعامل دارای دو بازوی اجرایی است. کمیته نظارتی بخش صنعت که برقراری ارتباط بین اعضای صنعتی و مرکز را بر عهده دارد اولین بازوی اجرایی مدیرعامل و کمیته اجرایی متشکل از خود مدیرعامل و مدیران سایر بخش‌های تحقیقاتی دومین بازو هستند. کلیه پروژه‌های تحقیقاتی مرکز در سه گروه تحقیقات بازار، تحقیقات مرتبط با تکنولوژی‌های انتقال و توزیع و تحقیقات سیستم‌های قدرت تقسیم‌بندی می‌شوند. تمامی پروژه‌ها از طریق این گروه‌ها وارد ساختار اجرایی مرکز می‌شوند. بدیهی است که پروژه‌های تحقیقاتی *PSERC* بر حل مسائل و مشکلات سیستم قدرت آمریکا متمرکز می‌باشند که البته آمریکایی بودن اکثر دانشگاه‌ها و تعداد زیادی از شرکت‌های عضو نیز مزید بر علت است. لازم به ذکر است چالش‌های پیش روی هر یک از اعضا نیز به عنوان مساله اولویت‌دار کنسرسیوم در نظر گرفته شده و در جهت غلبه بر آن تلاش می‌شود.

انتخاب پروژه‌های تحقیقاتی در *PSERC* از طریق یک فرآیند مشارکتی صورت می‌پذیرد. بعد از طرح اولیه موضوع یا چالش مطرح شده، تیم‌های تحقیقاتی (به صورت نمونه، از دو دانشگاه انتخاب می‌شوند) پیشنهادهایی را در خصوص موضوع مربوطه با کمک کمیته نظارتی بخش صنعت آماده می‌نمایند. این پیشنهادها توسط سایر اعضا مورد بررسی قرار گرفته و پس از انجام اصلاحات لازم به عنوان پیشنهادهای تکمیلی به مدیر عامل معرفی می‌شوند. پیشنهادها در نشست مشترک صنعت و دانشگاه که در ماه دسامبر هر

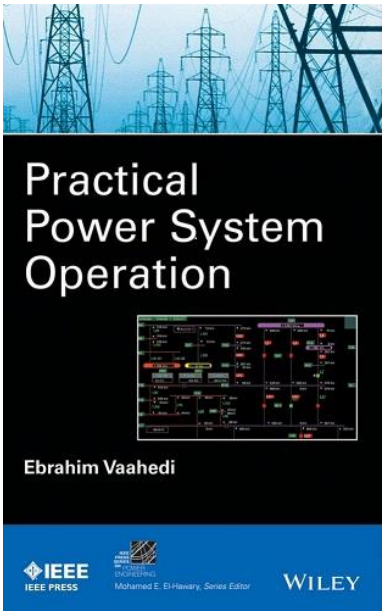
سال برگزار می‌شود[1] توسط پیشنهاددهندگان ارائه و در ادامه با رای‌گیری میان اعضای صنعتی کنسرسیوم و کلیه ملاحظات و محدودیت‌ها، پیشنهاد نهایی انتخاب و اجرای فعالیت‌های مندرج در آن آغاز می‌گردد.

PSERC هر ساله سمینارها و کارگاه‌های آموزشی متنوعی را به منظور تبادل هر چه بیشتر اطلاعات و ایده‌ها بین اعضاء برگزار می‌نماید. مکان این سمینارها و کارگاه‌های آموزشی، دانشگاه‌ها و یا شرکت‌ها و سازمانهای عضو می‌باشد. همچنین برخی از این سمینارها و کارگاه‌های آموزشی از طریق اینترنت برگزار شده و نیازی به حضور فیزیکی اعضا در کنار یکدیگر نیست.

PSERC دارای انتشارات متنوع و گسترده‌ای نیز هست. کلیه انتشارات در سه گروه گزارشات پروژه‌ها، گزارشات عمومی و مقالات اختصاصی طبقه‌بندی می‌شوند. بخش قابل توجهی از انتشارات این مرکز در سایت اینترنتی آن موجود بوده و قابل استفاده برای عموم است. مرکز تحقیقاتی *PSERC* خواهان همکاری با سایر دانشگاه‌ها و موسسات تحقیقاتی در جهان است و با توجه به اعتبار این مرکز ناشی از اعتبار اعضا و گستره فعالیت‌های آن، ایجاد ارتباط مابین پژوهشگاه نیرو و این مرکز در قالب تفاهم‌نامه، برگزاری دوره‌های تخصصی مشترک، تبادل استاد و دانشجو و غیره پیشنهاد می‌گردد.

[1] این نشست تخصصی مهم‌ترین نشست بوده و با عنوان IAB meeting (Interactive Advertising Bureau) شناخته می‌شود.

معرفی کتاب



Title:

Practical Power System Operation

by Dr. Ebrahim Vaahedi

Wiley-IEEE Press

May 2014

در این کتاب اذعان شده است که بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت همواره شامل سه مولفه اصلی ۱) اپراتورها(Operators)، ۲) فرآیندهای بهره‌برداری(Operation Processes) و ۳) فناوری (Technology) می‌باشد که همین امر، مطالب این کتاب را از سایر کتب حوزه مطالعات بهره‌برداری سیستم‌های قدرت که اغلب به موضوع فناوری بیش از سایر مولفه‌ها توجه دارند، متمایز کرده است.

در فصل ۱ این کتاب، اصول بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت به همراه معیارها و استانداردهای متداول آن بیان شده است. در ادامه، هر یک از فصول ۲ تا ۸ به تشریح یکی از موضوعات مربوط به فرآیندهای بهره‌برداری می‌پردازند که در هر فصل، وظایف بهره‌برداران سیستم، به علاوه فرآیندهایی که به آنها کمک می‌کنند تا وظایف محوله خود را به درستی انجام دهند و در کنار آن، راه‌حل‌هایی که فناوری در اختیار آنها قرار می‌دهد تا در تحقق فرآیندهای مذکور تسهیل ایجاد شود، به خوبی معرفی شده‌اند.

فصل ۲، بحث فرآیند پایش که مهمترین عنصر فرآیندهای بهره‌برداری است را مورد توجه قرار داده است. مطالب این فصل، با معرفی روندها و اقدامات اجرایی مراکز کنترل و ارائه پیش‌زمینه‌ای از این موضوع که چرا بهره‌برداران سیستم قدرت نیاز به پایش سیستم دارند، آغاز می‌شود. در نهایت، این فصل با تشریح معماری دو فناوری مهم تحت عنوان اسکادا[1] و تخمین‌حالت[2] که در پایش سیستم نقش بسزایی داشته و اجرای آن را تسهیل می‌کنند، به اتمام می‌رسد. در فصول ۳ تا ۸ نیز همین اصول رعایت شده و مطالب آن به معرفی و تشریح اصلی‌ترین فرآیندهای بهره‌برداری در مراکز کنترل و فناوری‌های مرتبط با هر یک می‌پردازد:

فصل ۳ – فرآیند: آنالیز سناریو ؛ فناوری: SCADA و پخش بار

فصل ۴ – فرآیند: موضع‌گیری برای پایداری استاتیکی ؛ فناوری: آنالیز پیشامد

فصل ۵ – فرآیند: موضع‌گیری برای پایداری زاویه ؛ فناوری: پایداری گذرا و پایداری سیگنال کوچک

فصل ۶ – فرآیند: موضع‌گیری برای پایداری ولتاژ ؛ فناوری: پایداری ولتاژ

فصل ۷ – فرآیند: کنترل فرکانس بار ؛ فناوری: کنترل خودکار تولید (AGC)

فصل ۸ – فرآیند: بهره‌برداری تولید سیستم قدرت و بهره‌برداری بازار برق ؛ فناوری: راه‌حل‌های بهینه‌سازی

فصول ۹ تا ۱۱ بر مهم‌ترین *سیستم‌های پشتیبان تصمیم* (*DSS*)[3] در مراکز کنترل متمرکز شده‌اند که در آنها مباحث سیستم مدیریت انرژی (EMS) و سیستم مدیریت توزیع (DMS) به شکل بارزی تاکید شده‌اند.

[1] SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)
[2] State Estimation
[3] Decision Support Systems

فصل ۹ بر طراحی سیستم کنترل توجه دارد. این فصل با بیان نگرش جدید نسبت به طراحی مراکز کنترل مدرن آغاز می‌شود. در واقع این فصل به مبحث چگونگی مدیریت ریسک وقایع بهره‌برداری اعم از پدیده‌های طبیعی (مانند زلزله و طوفان) و یا ریسک‌های امنیت فیزیکی و سایبری، در مرحله طراحی اشاره دارد.

فصل ۱۰ به معرفی ویژگی، معماری و برنامه‌های کاربردی EMSهای مدرن می‌پردازد؛ سیستم‌هایی که برای مدیریت مطمئن و کارآمد شبکه قدرت، ابزارهای پیشرفته‌ای را در اختیار بهره‌برداران سیستم قرار می‌دهند.

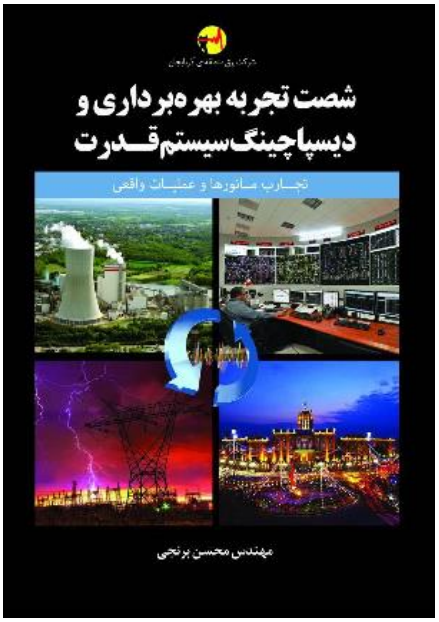
به طور مشابه، فصل ۱۱ به معرفی ویژگی، معماری و برنامه‌های کاربردی DMSهای مدرن می‌پردازد. این فصل همچنین مطالب ارزشمندی را در خصوص سایر سیستم‌های مرتبط با DMS مانند سیستم مدیریت خروج/اضطراری (OMS)[1]، سیستم‌های زمان‌بندی توزیع[2] و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)[3] ارائه می‌کند.

در نهایت، فصل ۱۲ به مروری از فناوری‌های نوین و راه‌حل‌های جدید بهره‌برداری سیستم‌های قدرت که در طی چند سال اخیر توسعه قابل توجهی پیدا کرده‌اند، می‌پردازد. مطالعات پایداری گذرا و پایداری ولتاژ آنلاین، کاربردهای *PMU*، سیستم‌های زمان‌بندی خروج انتقال و توزیع، اتوماسیون توزیع نمونه‌هایی از موضوعات این فصل می‌باشند.

به عقیده ما، این کتاب تصویری جامع از بهره‌برداری سیستم‌های قدرت را برای متخصصین صنعت برق و جوامع دانشگاهی به نمایش می‌گذارد و بر این اساس، مطالعه آن را به جامعه مهندسین برق توصیه می‌کنیم.

[1] Emergency/Outage Management System
[2] Distribution Scheduling Systems
[3] Geographical Information System

معرفی کتاب



عنوان کتاب:

شصت تجربه بهره‌برداری و دیسپاچینگ سیستم قدرت

(تجارب مانورها و عملیات واقعی)

تالیف: مهندس محسن برنجی (شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان)

سال انتشار : تابستان ۱۳۹۵

در این کتاب سعی شده است تا تجارب واقعی مدیریت شبکه قدرت را که عموما بهره‌برداران سیستم در مراکز کنترل شبکه با آن‌ها مواجه هستند، در قالب ۶۰ سناریو که به شناسایی، تحلیل و مدیریت وقایع بهره‌برداری می‌پردازد، معرفی نماید. این کتاب دارای متنی ساده و روان بوده و مطالعه آن به عنوان یک مرجع آموزشی مناسب در حوزه بهره‌برداری سیستم به کلیه علاقمندان صنعت برق اعم از اساتید دانشگاه، متخصصان، دانشجویان، مدیران، پیمانکاران، مشاوران، تمامی بهره‌برداران پست‌ها و نیروگاه‌ها، و دیسپاچرها، توصیه می‌شود.[1]

[1] با توجه به اینکه حوزه مطالعات بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت از دو رکن اصلی بهره‌برداری سیستم و بهره‌برداری بازار برق تشکیل شده است لذا در کنار مطالب ارزنده کتاب فوق، نیاز به نگارش کتابی در باب مجموعه مباحث مرتبط با بهره‌برداری بازار برق ایران (تجربیات و چالش‌ها) کاملا احساس می‌شود (سردبیر).