

تدوین رویه‌ی ارتقای سطح ولتاژ شبکه‌ی برق

و پیاده‌سازی آن برای ایران

سعید اسمعیلی، محمد جعفریان، همایون برهمندپور

مرکز توسعه فناوری سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

hberahmandpour@nri.ac.ir، mjafarian@nri.ac.ir، s_esmaeili@elec.iust.ac.ir

فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا در بسیاری از مناطق جهان گسترش چشمگیری یافته است. استفاده از فناوری کریدورهای انتقال توان با سطوح ولتاژی مختلف به صورت فشار قوی^۱، فوق فشار قوی^۲ و مافوق فشار قوی^۳ پیشرفت نموده است. به طور معمول، به ولتاژ بین ۳۵ تا ۳۰۰ کیلوولت فشار قوی، ولتاژ بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوولت فوق فشار قوی و مقادیر بالاتر از ۱۰۰۰ کیلوولت مافوق فشار قوی گفته می‌شود [۱].

امروزه رشد جمعیت و به تبع آن میزان مصرف انرژی برق نیز در حال افزایش است. انتقال انرژی برق به وسیله خطوط انتقال با تلفات همراه است و در صورتی که مسافت انتقال افزایش یابد مقدار تلفات نیز بالا می‌رود [۲]. یک راهکار مناسب برای کاهش مقدار تلفات و انتقال توان با مقدار زیاد بالا بردن سطح ولتاژ است. مقدار تلفات انتقال توان با مربع اندازه جریان رابطه دارد که با افزایش ولتاژ این جریان کاهش می‌یابد. بالا بردن سطح ولتاژ علاوه بر کاهش تلفات باعث می‌شود که هزینه انتقال توان نیز برای توان‌های بزرگ کاهش یابد. علاوه بر این با کاهش جریان عبوری از خط مقدار افت ولتاژ بر روی امپدانس خط نیز کاهش می‌یابد و این مسئله می‌تواند به افزایش ظرفیت خطوط انتقال کمک نماید. استفاده از خطوط با ولتاژهای بالا باعث می‌شود که دسترسی به منابع انرژی پاک بیشتر شود و همچنین با کاهش حریم انتقال توان، محیط زیست آسیب کمتری ببیند. به عبارت دیگر استفاده از ولتاژهای فوق فشار قوی در انتقال برق در حجم انبوه و مسافت‌های طولانی، از

چکیده — در سالیان اخیر به دلیل دور بودن مراکز تولید، استفاده گسترده از منابع انرژی تجدیدپذیر، بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت و فراهم شدن بستر مناسب به منظور تبادل توان بین کشورهای همسایه و تشکیل بازارهای برق داخلی و بین‌المللی استفاده از فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا در بسیاری از مناطق جهان گسترش چشمگیری یافته است. در واقع ولتاژهای فوق فشار قوی در حجم انبوه و مسافت‌های طولانی، از راهکارهای شناخته شده و در مواردی، اجتناب‌ناپذیر برای این منظور است. بدین منظور در این مقاله ابتدا با معرفی شاخص‌های مناسب، نحوه انتخاب سطح ولتاژ بعدی بیان شده است. سپس هدف مقاله، یافتن رابطه‌ای است که بتواند نشان دهد توان الکتریکی مصرفی یک کشور به چه سطحی برسد تا نیاز به ارتقا سطح ولتاژ ایجاد شود. بدین منظور با تعریف ۴ رابطه و صحت‌سنجی آنها، روابط با خطای کمتر تعیین شده و بر روی کشور ایران پیاده‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی — برنامه‌ریزی توسعه انتقال؛ فشار قوی؛ سطح ولتاژ؛

EHVAC :UHVAC

۱. مقدمه

در سالیان اخیر به دلیل دور بودن مراکز تولید و مصرف، فراهم شدن بستر مناسب به منظور تبادل توان بین کشورهای همسایه و تشکیل بازارهای برق داخلی و بین‌المللی و بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت، استفاده از

¹ High Voltage (HV)

² Extra-High Voltage (EHV)

³ Ultra-High Voltage (UHV)

یک خط ۱۰۰۰ کیلوولت جریان متناوب حدوداً ۵ گیگاوات می‌باشد که چهار تا پنج برابر توان طبیعی قابل انتقال یک خط ۵۰۰ کیلوولت می‌باشد [۵].

محدودیت تلفات کرونا:

با افزایش سطح ولتاژ تلفات کرونا افزایش می‌یابد. در سطوح ولتاژ ۷۰۰ تا ۸۰۰ کیلوولت، در صورت استفاده از ولتاژ ۷۳۵ کیلوولت به جای ۷۶۵ کیلوولت به عنوان ولتاژ نامی، تلفات کرونا سیستم ۸۹ مگاوات کاهش می‌یابد [۶].

۲.۲. شاخص‌های اقتصادی

تاثیر سطح ولتاژ نامی بر روی ظرفیت جبران‌سازی توان راکتیو:

در حالت کلی، با افزایش سطح ولتاژ سیستم، به علت بروز مشکلات پایداری ولتاژ، نیاز به جبران‌سازی توان راکتیو افزایش می‌یابد. به همین دلیل در یک محدوده مشخص سطح ولتاژ (مثلاً EHVAC یا UHVAC)، انتخاب سطح ولتاژ کمتر، نیاز به جبران‌سازی با رنج توانی کمتر و در نتیجه کاهش هزینه نهایی خواهد شد. به عنوان مثال در سطوح ولتاژ ۷۰۰ تا ۸۰۰ کیلوولت، در صورت استفاده از ولتاژ ۷۳۵ کیلوولت به جای ۷۶۵ کیلوولت به عنوان ولتاژ نامی، هزینه جبران‌سازی به علت کاهش سرمایه‌گذاری در جبران‌سازهای توان راکتیو ۸ درصد کاهش می‌یابد.

تاثیر ولتاژ نامی بر روی تجهیزات عمده شبکه:

در حالت کلی بدون در نظرگیری سایر پارامترها، با افزایش سطح ولتاژ سیستم، میزان هزینه برای ساخت تجهیزات عمده سیستم انتقال، مانند دکل‌ها، ترانسفورماتورها و کلیدهای قدرت افزایش می‌یابد.

۲.۳. شاخص‌های تسهیل انتقال و توسعه

فناوری

در این بخش، با توجه به پیشینه سایر کشورها، روابط اقتصادی و سیاسی با سایر کشورها و وجود بستر مناسب شاخص‌های اثرگذار در انتخاب سطح ولتاژ سیستم‌های فوق فشار قوی AC معرفی می‌شوند.

بررسی پتانسیل آزمایشگاهی و صنعتی داخل کشور:

در هر کشور برای احداث یک فناوری جدید نیاز به زیرساخت‌های مختلف می‌باشد. در همین رابطه برای افزایش سطح ولتاژ شبکه قدرت، نیاز به زیرساخت‌های آزمایشگاهی و صنعتی در ابعاد گوناگون می‌باشد تا بتوان فناوری مورد نظر را بومی سازی نمود. بدین منظور با توجه به دو فاکتور زیر

راهکارهای شناخته شده و در مواردی اجتناب‌ناپذیر برای این منظور است. در هر کشور برای احداث خطوط انتقال با سطح ولتاژ بالاتر مطالعات وسیعی صورت می‌گیرد و پارامترهای کلان بسیاری نیز در این تصمیم‌گیری ممکن است دخیل باشند. نتیجه این مطالعات خطوط با سطوح ولتاژ گوناگون است که امروزه در سرتاسر جهان احداث شده است [۳ و ۴].

در این مقاله رویه ارتقای سطح ولتاژ شبکه قدرت تدوین شده است. بدین صورت که ابتدا با معرفی شاخص‌های مناسب، نحوه انتخاب سطح ولتاژ بعدی بیان شده است. در ادامه، هدف مقاله یافتن رابطه‌ای است که بتواند نشان دهد توان الکتریکی مصرفی یک کشور به چه سطحی برسد تا نیاز به ارتقا سطح ولتاژ ایجاد شود. بدین منظور ابتدا چهار رابطه وابسته به سطح ولتاژ و مساحت موثر کشورها معرفی شده و سپس به کمک روش رگرسیون غیرخطی، پارامترهای مجهول شناسایی و در پایان دو رابطه با کمترین خطا توسط شاخص‌های صحت‌سنجی به عنوان شاخص‌های قابل استناد معرفی می‌شوند. در پایان این شاخص‌ها بر روی کشور ایران پیاده‌سازی شده‌اند.

در بخش دوم این مقاله شاخص‌های انتخاب ولتاژ برای سیستم‌های فوق فشار قوی AC شامل شاخص‌های فنی، شاخص‌های اقتصادی و شاخص‌های تسهیل انتقال و توسعه فناوری ارائه شده است. در بخش سوم، تعیین شاخص تعیین سطح ولتاژ و در بخش چهارم، تعیین استراتژی ارتقای سطح ولتاژ ایران بیان شده است. در پایان نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. شاخص‌های انتخاب ولتاژ برای سیستم‌های

فوق فشار قوی AC

به منظور انتخاب سطح ولتاژ نامی سیستم فشار قوی AC، شاخص‌های اثرگذار به سه بخش شاخص‌های فنی، شاخص‌های اقتصادی و شاخص‌های تساهل انتقال و توسعه فناوری تقسیم شده‌اند.

۲.۱. شاخص‌های فنی

میزان فاصله و توان انتقالی:

در شرایط یکسان میزان توان قابل انتقال خط بدون در نظرگیری راه‌حل‌های جانبی همچون باندل نمودن یا استفاده از جبران‌سازها در طول خط، با افزایش سطح ولتاژ، زیاد می‌شود که یکی از مزایای اصلی استفاده از سطح ولتاژ بالاتر در خطوط انتقال توان می‌باشد. به عنوان مثال توان طبیعی

در انتخاب سطح ولتاژ فوق‌فشارقوی هر کشور، لازم است کارخانه‌های تولیدی تجهیزات متناسب با آن سطح ولتاژ مدنظر قرار گیرد.

سطوح ولتاژ متداول سایر کشورها:

اولین خط ۳۳۵ کیلوولت در سال ۱۹۶۵ میلادی در کشور کانادا بهره‌برداری شد. در سال‌های ۱۹۶۷ و ۱۹۶۹ میلادی، به ترتیب روسیه اولین خط ۷۵۰ کیلوولت و آمریکا اولین خط ۷۶۵ کیلوولت را بهره‌برداری نمودند [۸ و ۹]. در سال‌های بعد، با توجه به آزمایش‌های موجود و تجربیات سایر کشورها، خطوط ۷۶۵ کیلوولت در کشورهای آفریقای جنوبی، برزیل، کره جنوبی و ونزوئلا احداث شدند. لازم به ذکر است که سطح ولتاژ فوق‌فشارقوی کشور اوکراین متأثر از تکنولوژی شوروی سابق، ۷۵۰ کیلوولت در نظر گرفته شده است. در حال حاضر کشور مصر نیز در حال مطالعه به منظور افزایش سطح ولتاژ شبکه فشار قوی خود تا سطح ولتاژ ۷۶۵ کیلوولت می‌باشد.

با توجه به موارد بالا ملاحظه می‌شود که در رنج ولتاژ ۷۰۰ تا ۸۰۰ کیلوولت، ابتدا سطح ولتاژ ۳۳۵ کیلوولت و بعد از آن ۷۵۰ کیلوولت معرفی شده است. سپس سطح ولتاژ ۷۶۵ کیلوولت توسط کشور آمریکا معرفی و احداث شده و سایر کشورها (به جز اوکراین با توجه به شرایط خاص آن کشور) بعد از آن همگی سطح ولتاژ ۷۶۵ کیلوولت را پیاده‌سازی کرده‌اند که نشان‌دهنده آن است که به مرور زمان با توجه به استانداردهای موجود و تجهیزات تولیدی، کشورها به سمت همگرایی استفاده از سطح ولتاژ ۷۶۵ کیلوولت سوق داده شده‌اند.

بنابراین با توجه به شاخص‌های معرفی شده در این بخش، در ادامه ارتقای سطح ولتاژ ایران به ۷۶۵ کیلوولت به عنوان سطح ولتاژ بعدی پیشنهاد می‌گردد.

۳. تعیین شاخص تعیین سطح ولتاژ

با بررسی فناوری EHVAC و UHVAC و استفاده از تجربیات سایر کشورها در زمینه پیاده‌سازی آن، می‌توان به این نتیجه رسید که دو پارامتر مساحت موثر کشور مورد نظر و میزان بار مصرفی تاثیر قابل توجهی در تعیین سطح ولتاژ و زمان احداث سطح ولتاژ بعدی (به علت پاسخگو نبودن سطح ولتاژ موجود) داشته است.

هدف از این بخش و تعریف شاخص تعیین سطح ولتاژ، یافتن رابطه‌ای است که بتواند نشان دهد توان الکتریکی مصرفی یک کشور به چه سطحی برسد تا نیاز به ارتقا سطح ولتاژ ایجاد شود. برای اینکار ابتدا فرض می‌گردد که این توان صرفاً تابع سطح ولتاژ باشد. رابطه (۱)، این فرض را نشان

بایستی پتانسیل علمی و صنعتی کشور در سطوح ولتاژ مختلف و امکان تساهل آن در فرآیند احداث مورد بررسی قرار گیرد.

- بررسی پتانسیل فعلی داخل هر کشور در بخش تحقیقاتی و صنعتی
- بررسی قراردادهای بلندمدت و کوتاه مدت صنایع پیشرو کشور در زمینه ولتاژهای فوق فشار قوی

استفاده از تجربه‌ی سایر کشورها در انتقال و توسعه فناوری:

خطوط پیاده‌سازی شده توسط سایر کشورها: تاکنون ۹ کشور خطوط انتقال در رنج ۷۰۰ تا ۸۰۰ کیلوولت را طراحی و اجرا کرده‌اند که شامل کانادا، آمریکا، برزیل، ونزوئلا، روسیه، آفریقای جنوبی، کره جنوبی و هند می‌باشند. در ضمن چهار کشور ژاپن، چین، روسیه و هند خطوط انتقال در رنج ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوولت طراحی و اجرا کرده‌اند. از بین این چهار کشور، هند، چین و روسیه ابتدا سطح ولتاژ در رنج ۷۰۰ تا ۸۰۰ کیلوولت (EHVAC) را پیاده‌سازی کرده و به صورت پله‌ای به سمت استفاده از فناوری UHVAC رفته‌اند. کشور ژاپن به صورت جهشی از سطح ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت به سمت استفاده از ۱۰۰۰ کیلوولت رفته است که با توجه به مشکلات پیش آمده، در حال حاضر در همان سطح ولتاژ پایین‌تر (۵۰۰ کیلوولت) بهره‌برداری می‌کند. پس با بررسی سوابق سایر کشورها، می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش سطوح ولتاژ در کشورهای مختلف به صورت پله‌ای، یعنی ابتدا احداث سطح ولتاژ EHVAC و سپس UHVAC، و نه به صورت جهشی بوده است.

بررسی سیستم تست سایر کشورها:

تاکنون سیستم‌های تست در سطوح ولتاژ مختلف توسط شرکت‌های مطرح مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته‌اند. معمولاً برای احداث و بهره‌برداری از خطوط فشارقوی در کشورها، ابتدا سیستم طراحی شده را در یک بستر آزمون مورد بررسی قرار داده تا پس از گذراندن گواهی‌های مربوطه وارد مدار شده و از آن بهره‌برداری شود. به همین منظور یکی از شاخص‌های انتخاب سطح ولتاژ بعدی برای هر کشور، وجود سیستم‌های تست از قبل طراحی شده توسط شرکت‌های معتبر و استفاده از استانداردهای آن می‌باشد تا فرآیند طراحی و انتقال تکنولوژی تسهیل شود. به عنوان نمونه برای سطوح ولتاژ ۷۰۰ تا ۸۰۰ کیلوولت، کشورهای مختلف بسترهای آزمون متفاوتی را طراحی و آزمایش کرده‌اند. به طور نمونه General Electric، AEP، Westinghouse، Enel ایتالیا و Hitachi ژاپن ولتاژ ۷۶۵ کیلوولت و Hydro-Québec کانادا ولتاژ ۷۳۵ کیلوولت را در نظر گرفته‌اند [۷].

بررسی تجهیزات تولیدی سایر کشورها:

۳.۲. صحت‌سنجی

به منظور بررسی صحت تبیین رفتار مورد نظر توسط روابط ارائه شده و انتخاب مناسب‌ترین رابطه، سه شاخص خطای جذر میانگین مربعات، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده در نظر گرفته می‌شوند.

- خطای جذر میانگین مربعات:

خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، یک معیار خطای بسیار پرکاربرد برای اندازه‌گیری دقت است که در زمان پیوسته به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_s(t) - u_a(t))^2 dt} \quad (2)$$

که در آن، u_s مقادیر شبیه‌سازی شده و u_a مقادیر واقعی می‌باشند. در ضمن t پارامتر زمان و T طول بازه زمانی می‌باشد. با تقریب بین نقاط، محاسبه RMSE به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{3T} \sum_{(n)} \Delta t_n \cdot (\Delta u_n^2 + \Delta u_{n+1}^2 + \Delta u_n \cdot \Delta u_{n+1})} \quad (3)$$

در رابطه فوق، u_n مقادیر تقریب‌زده شده می‌باشند. این شاخص، ابتدا اختلاف تک‌تک مقادیر مشاهده شده را با مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل، محاسبه نموده و به توان دو می‌رساند. از این اختلافات میانگین گرفته و در نهایت جذر عدد میانگین را ارائه می‌دهد که همان RMSE است. این شاخص معیاری برای دقت نتایج است و معمولاً هرچه مدل بهتر بر داده‌ها منطبق باشد، مقدار آن کمتر می‌شود.

- ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده:

ضریب تعیین به مجذور ضریب همبستگی چندگانه اطلاق می‌شود و آن را R-square یا R^2 می‌خوانند. این ضریب میزان تبیین واریانس یا تغییرات متغیر وابسته توسط مجموعه متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین صفر و یک است. هرچه مقدار این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد نشان از این دارد که متغیرهای مستقل به میزان زیادی توانسته‌اند رفتار متغیر وابسته را پیش‌بینی کنند و هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد وابستگی متغیر وابسته به متغیرهای مستقل کمتر بوده و انتخاب مناسبی در متغیرهای مستقل انجام نشده است. ضریب تعیین فرض می‌کند که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل، تغییرات موجود در متغیر وابسته را تبیین می‌کند. بنابراین درصد نشان داده شده توسط ضریب تعیین با فرض تاثیر همه متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته می‌باشد. در صورتی که مقدار

می‌دهد. در این رابطه p توان مصرفی کشور برحسب گیگاوات است که در آن ارتقای سطح ولتاژ از v بر حسب کیلوولت به سطوح ولتاژ بالاتر رخ داده است.

$$p = b_1 \cdot (v)^{b_2} \quad (1)$$

b_1 و b_2 پارامترهایی هستند که ارتباط توان در زمان ارتقای سطح ولتاژ و نیز سطح ولتاژ موجود را برقرار می‌نماید. این دو شاخص در ادامه با توجه به سابقه ارائه شده کشورهای با شبکه قدرت در رنج EHVC در جدول (۱) توسط تکنیک برازش داده تعیین می‌شوند.

جدول (۱): داده‌های اولیه کشورهای مختلف

نام کشور	سطح ولتاژ قبلی (kV) (سال احداث)	سطح ولتاژ جدید (kV) (سال احداث)	P (گیگاوات) (کیلو مترمربع)	A (میلیون)
هند	۴۰۰ (۱۹۷۱)	۷۶۵ (۲۰۰۰)	۱۰۵	۱/۹۹
آمریکا	۳۴۵ (۱۹۶۰)	۷۶۵ (۱۹۶۹)	۱۹۹	۵/۸۴
کره جنوبی	۳۴۵ (۱۹۶۷)	۷۶۵ (۲۰۰۳)	۴۸	۰/۰۹۹
آفریقای جنوبی	۴۰۰ (۱۹۶۹)	۷۶۵ (۱۹۹۲)	۴۶	۰/۷۵
چین	۵۰۰ (۱۹۸۱)	۷۵۰ (۲۰۰۵)	۴۱۰	۵/۸۶
اوکراین	۴۰۰ (۱۹۶۴)	۷۵۰ (۱۹۹۴)	۳۹	۰/۶۰۷

به منظور تعیین مقادیر مجهول پارامترهای رابطه (۱) از روش برازش استفاده شده است که در ادامه روش حل آن تشریح می‌شود.

۳.۱. روش حل

جهت انطباق توابع تصادفی مختلف بر روی داده‌های گردآوری شده عموماً از روش‌های مبتنی بر رگرسیون استفاده می‌شود. در سال ۱۸۸۶ کارل پیرسون توانست فرمولی برای محاسبه ضریب همبستگی ارائه دهد که علاوه بر نوآورانه بودن، مسیر جدیدی را در علم آمار فراهم کرد.

در پژوهش‌های رگرسیون هدف پیش‌بینی یک یا چند متغیر وابسته (ملاک) براساس یک یا چند متغیر مستقل (پیش‌بین) است. در رگرسیون چندگانه هدف پیدا کردن متغیرهای پیش‌بینی است که تغییرات متغیر وابسته را چه به تنهایی و چه مشترکاً پیش‌بینی کند. ورود متغیرهای مستقل در رگرسیون به روش‌های متعددی صورت می‌گیرد.

مقادیر مجهول b_1 و b_3 حاصل از برازش رابطه دوم به ترتیب ۴۲/۱۴۶ و ۰/۸۶۸۰۳ است. در ضمن مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی این رابطه در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۲): مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی رابطه (۵)

رابطه	RMSE	R-Square	Adjusted R-Square
$p = b_1 \cdot (A)^{b_3}$	۷۸/۷	۰/۷۶۴	۰/۰۷۰۶

با توجه به مقادیر صحت‌سنجی دو رابطه (۱) و (۵) و خطای زیاد آنها با مقادیر واقعی و در نتیجه غیرقابل پذیرش بودن آنها، رابطه (۶) را تحت عنوان رابطه سوم تعریف نموده و هر دو پارامتر مساحت موثر کشور و سطح ولتاژ به صورت همزمان برای تعیین حداکثر توان در آن نظر گرفته می‌شود.

$$p = b_1 \cdot (v)^{b_2} \cdot (A)^{b_3} \quad (6)$$

مقادیر مجهول b_1 ، b_2 و b_3 حاصل از برازش رابطه سوم به ترتیب ۰/۰۰۰۰۳۱، ۱/۹۶۴۲ و ۰/۸۲۷۱ است. در ضمن مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی این رابطه در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی رابطه (۶)

رابطه	RMSE	R-Square	Adjusted R-Square
$p = b_1 \cdot (v)^{b_2} \cdot (A)^{b_3}$	۲۵/۳	۰/۹۸۲	۰/۹۷۰

با توجه به مقادیر سه شاخص R -Square، $RMSE$ و $Adjusted R$ -Square دقت رابطه سوم بسیار بالا بوده و می‌توان از این رابطه به عنوان شاخص تعیین سطح ولتاژ کشور با توجه به دو پارامتر ولتاژ و مساحت موثر استفاده نمود.

در شکل (۱)، مقایسه بین مقادیر واقعی توان با مقادیر محاسبه شده بر مبنای رابطه (۶)، برای شش کشور هند، آمریکا، کره جنوبی، آفریقای جنوبی، چین و اوکراین نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که میزان خطا اندک بوده و رابطه سوم تعریف شده در این مقاله با دقت قابل قبولی قابل استفاده می‌باشد.

رابطه سوم معرفی شده تنها به مقادیر فعلی پارامترها وابسته است، در صورتیکه می‌توان رابطه چهارمی تعریف نمود تا نسبت بین سطوح ولتاژ موجود و جدید را نیز در نظر بگیرد. در واقع رابطه چهارم به صورت نسبت بین پارامترها، نمودی از گذر زمان را تداعی می‌کند. بدین منظور رابطه (۷) به صورت زیر تعریف شده است.

$$p_2 / p_1 = b_1 \cdot (v_2 / v_1)^{b_2} \cdot (A)^{b_3} \quad (7)$$

نشان داده شده توسط ضریب تعیین تعدیل شده، فقط حاصل تاثیر واقعی متغیرهای مستقل مدل بر متغیر وابسته است و به همه متغیرهای مستقل وابسته نیست. تفاوت دیگر این دو شاخص این است که مناسب بودن متغیرها برای مدل توسط ضریب تعیین، حتی با وجود مقدار بالا قابل مشخص نیست. در صورتی که می‌توان به مقدار برآورد شده ضریب تعیین تعدیل شده اعتماد کرد. رابطه (۴)، نحوه محاسبه ضریب تعیین تعدیل شده را نشان می‌دهد.

$$R^2_{adjusted} = 1 - \frac{(1 - R^2)(N - 1)}{N - p - 1} \quad (4)$$

که در آن N ، P و R^2 به ترتیب تعداد کل مشاهدات، تعداد متغیرهای پیش‌بین و ضریب تعیین می‌باشند.

با توجه به توضیحات فوق، در این مقاله به منظور تعیین مقادیر مجهول ضرایب رابطه (۱)، از رگرسیون غیرخطی بر پایه فرآیند تکرار^۱ توسط نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

حال به رابطه (۱) برمی‌گردیم. مقادیر مجهول b_1 و b_2 حاصل از برازش این رابطه به ترتیب ۰/۰۰۰۰۲۹ و ۲/۵۴۴۲ است. در ضمن مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی این رابطه در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۲): مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی رابطه (۱)

رابطه	RMSE	R-Square	Adjusted R-Square
$p = b_1 \cdot (v)^{b_2}$	۱۵۰	۰/۱۴۷	۰/۰۶۵۹

به طور مشابه، رابطه دوم برای تعیین توان در زمان ارتقای سطح ولتاژ تعریف می‌شود که صرفاً تابع مساحت موثر A باشد. رابطه (۵)، این فرض را نشان می‌دهد که در آن p توان مصرفی کشور است که در آن ارتقای سطح ولتاژ از v به سطح بالاتر رخ داده است و b_1 و b_3 پارامترهایی هستند که ارتباط توان در ارتقای سطح ولتاژ و مساحت موثر را برقرار می‌نماید. این دو پارامتر در ادامه توسط تکنیک برازش داده تشریح شده در قبل و با توجه به سابقه کشورها که در جدول (۱) ارائه شده‌اند، تعیین می‌شوند.

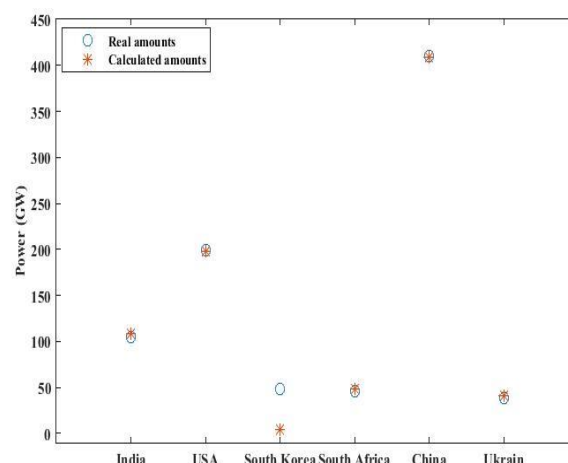
$$p = b_1 \cdot (A)^{b_3} \quad (5)$$

در رابطه فوق A مساحت موثر کشور برحسب میلیون کیلومتر مربع و p توان بر حسب گیگاوات می‌باشد. لازم به ذکر است که در این رابطه مساحت قابل سکونت هر کشور به عنوان پارامتر مساحت موثر در نظر گرفته شده است تا محاسبات با دقت بیشتری صورت گیرد.

¹ Non-linear regression model based on an iterative procedure

بخش قبل، توان مصرفی کشور که با رسیدن به آن نیاز به ارتقای سطح ولتاژ می‌باشد، محاسبه می‌گردد. با توجه به رابطه‌ی سوم، توانی که نیاز است تا ولتاژ شبکه ایران ارتقا یابد برابر با ۶۱ گیگاوات و با استفاده از رابطه‌ی چهارم این توان برابر با ۶۷ گیگاوات محاسبه شد.

با توجه به پیش‌بینی‌های موجود و رشد بار ۴ تا ۵ درصد برای هر سال، در سال ۱۴۱۰ هجری شمسی میزان بار الکتریکی ایران به طور تقریبی به ۹۵۰۰۰ مگاوات خواهد رسید. برای محاسبه‌ی زمان تقریبی ارتقای سطح ولتاژ، با استفاده از پیش‌بینی‌های صورت گرفته توان مصرفی ایران در سال ۱۳۹۹ به ۶۱ گیگاوات و در سال ۱۴۰۱ به ۶۷ گیگاوات خواهد رسید. یعنی با استفاده از رابطه‌ی سوم زمان تقریبی نیاز به ارتقای ولتاژ به سطح ۷۶۵ کیلوولت، سال ۱۳۹۹ و با استفاده از رابطه‌ی چهارم سال ۱۴۰۱ خواهد بود. این نتایج به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



شکل (۱): بررسی مقادیر محاسبه شده با مقادیر واقعی بر مبنای رابطه سوم

در این رابطه p_1 و p_2 به ترتیب حداکثر بار الکتریکی سیستم قدرت کشور مورد نظر در زمان بهره‌برداری از سطح ولتاژ فعلی و جدید برحسب گیگاوات می‌باشد. در ضمن v_1 و v_2 به ترتیب سطح ولتاژ فعلی و جدید برحسب کیلوولت و A مساحت موثر کشور مورد نظر برحسب میلیون کیلومتر مربع می‌باشند. مقادیر مجهول b_1 ، b_2 و b_3 حاصل از برازش رابطه چهارم به ترتیب $۸/۳۲۰۱$ ، $۲/۰۲۹۳$ و $۰/۹۲۳۷۸$ است. همچنین مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی این رابطه در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی رابطه (۷)

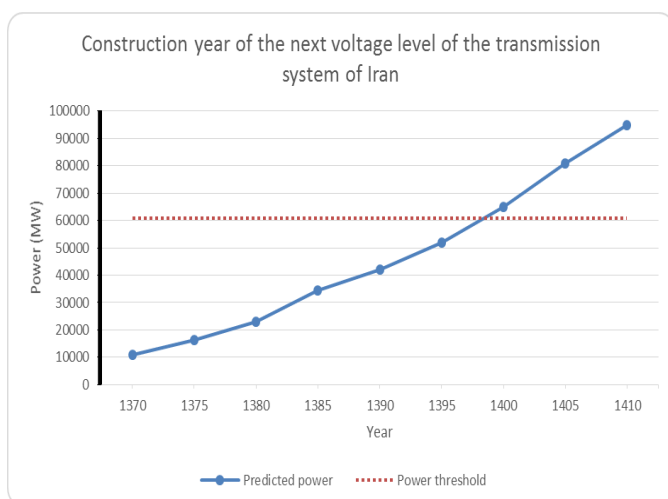
رابطه	Adjusted R-Square	R-Square	RMSE
(۷)	۰/۹۶۱	۰/۹۷۶	۲۹

با توجه به مقادیر سه شاخص صحت‌سنجی، دقت رابطه چهارم همانند رابطه سوم قابل قبول بوده و می‌توان از این دو رابطه به عنوان شاخص‌های تعیین سطح ولتاژ کشور با توجه به دو پارامتر ولتاژ و مساحت موثر استفاده نمود.

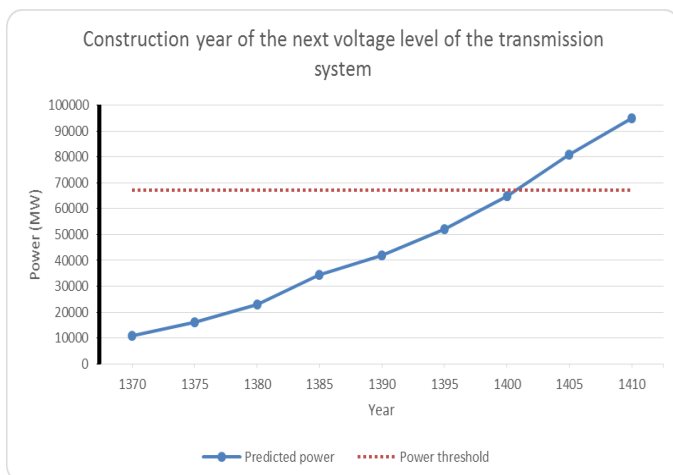
۴. تعیین استراتژی ارتقای سطح ولتاژ برای ایران

در بخش قبل چهار رابطه برای تعیین سطح ولتاژ معرفی شدند و در پایان با توجه به سه شاخص صحت‌سنجی معرفی شده، دو رابطه سوم و چهارم به عنوان شاخص‌های قابل استناد برای ارتقای سطح ولتاژ انتخاب شدند.

سطح ولتاژ فعلی ایران ۴۰۰ کیلوولت و مقدار توان در زمان ورود این سطح ولتاژ، ۳/۵ گیگاوات است. همچنین مساحت موثر ۱/۲۲ میلیون کیلومترمربع برآورد می‌شود. با توجه به این مقادیر و سطح ولتاژ ۷۶۵ کیلوولت برای ارتقاء، با استفاده از رابطه‌ی سوم و چهارم تعریف شده در



شکل (۲): زمان پیشنهادی برای ارتقا سطح ولتاژ ایران بر مبنای رابطه سوم



شکل (۳): زمان پیشنهادی برای ارتقا سطح ولتاژ ایران بر مبنای رابطه چهارم

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور تدوین رویه ارتقای سطح ولتاژ، شاخص‌های مناسب در سه دسته شاخص‌های فنی، اقتصادی و تسهیل انتقال و توسعه فناوری معرفی شدند. ملاحظه شد که کشورها سطوح ولتاژ خود را به صورت پله‌ای، و نه جهشی، ارتقا داده‌اند. در ضمن در سالیان اخیر با هدف استفاده از استانداردهای یکسان، کشورها به سمت همگرایی استفاده از سطح ولتاژ ۷۶۵ کیلوولت سوق داده شده‌اند. در ادامه، هدف مقاله یافتن رابطه‌ای بود که بتواند نشان دهد توان الکتریکی مصرفی یک کشور به چه سطحی برسد تا نیاز به ارتقا سطح ولتاژ ایجاد شود. بدین منظور ابتدا چهار رابطه وابسته به سطح ولتاژ و مساحت موثر کشورها معرفی شد. سپس به کمک روش رگرسیون غیرخطی پارامترهای مجهول شناسایی و در پایان دو رابطه با کمترین خطا توسط شاخص‌های صحت‌سنجی به عنوان شاخص‌های قابل استناد معرفی شدند. با پیاده‌سازی این شاخص‌ها بر روی کشور ایران، با توجه به رابطه سوم، توانی لازم برای ارتقاء سطح ولتاژ برابر با ۶۱ گیگاوات (سال ۱۳۹۹) و با استفاده از رابطه‌ی چهارم این توان برابر با ۶۷ گیگاوات (سال ۱۴۰۱) محاسبه شد.

منابع

- [1] Huang, Daochun, et al, "Ultra high voltage transmission in China: developments, current status and future prospects", Proceedings of the IEEE, Vol 97, pp. 555-583, 2009.
- [2] R D Begamudre, "Extra High Voltage A.C. Transmission Engineering", new age international publishers, third edition, 2006.
- [3] Shu, Yin-biao, and Yi Hu, "Research and application of the key technologies of UHV AC transmission line", PROCEEDINGS-CHINESE SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 27, 2007.
- [4] Raju, M., and N. P. Subramanian, "Power transfer enhancement of existing EHVAC transmission line with HVDC conversion-Indian scenario", ARPN J. Eng. Appl. Sci, Vol. 10, pp 854-858, 2015.
- [5] Xu, Zheng, Huanfeng Dong, and Hongyang Huang. "Debates on ultra-high-voltage synchronous power grid: the future super grid in China?." *IET Generation, Transmission & Distribution* 9.8 (2015): 740-747.
- [6] Meah, Kala, and Sadrul Ula. "Comparative evaluation of HVDC and HVAC transmission systems." *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE. IEEE*, 2007.
- [7] Kuffel, John, and Peter Kuffel. *High voltage engineering fundamentals*. Newnes, 2000.
- [8] R. Lings, "Overview of transmission lines above 700 kV," 2005 *IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, Durban*, 2005, pp. 33-43.
- [9] Shu, Yin-biao, and Yi Hu, "Research and application of the key technologies of UHV AC transmission line", PROCEEDINGS-CHINESE SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 27, 2007.