

بکارگیری کریدورهای تبادل انرژی الکتریکی به منظور تبدیل ایران به قطب انرژی منطقه منطبق بر فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا

علی آرانی‌زاده، محمد جعفریان، همایون برهمندپور، مونا رنجبر، عباسعلی امیرفخریان

مرکز توسعه فناوری سامانه‌های انتقال توان با ظرفیت بالا

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

ali_arani@elec.iust.ac.ir, mjafarian@nri.ac.ir, hberahmandpour@nri.ac.ir, mranjbar@nri.ac.ir,
a.amirfakhrian@aut.ac.ir

۱. مقدمه

تجارت خارجی برق^۱ امروزه یکی از مفاهیم به‌روز در تعاملات کشورهای مختلف است. مشابه تبادلات و تجارت تمامی کالاهای دیگر، انرژی الکتریکی نیز به عنوان یک کالای راهبردی نقش ویژه‌ای در سهم تجارت خارجی کشورهای مختلف یافته است [۴-۱]. از قریب سه دهه پیش که تجدیدساختار صنعت برق آغاز گردید و تفکر داد و ستد و تجارت برق به عنوان کالای تجاری در آن رشد پیدا کرد، بتدریج تفکر تجارت خارجی برق نیز مشابه هر کالای دیگر اقتصادی در دنیا شکل گرفت. لکن مشابه بسترهای لازم برای انتقال و ترانزیت هر کالای اقتصادی دیگر بین کشورها نظیر کریدورهای هوایی، زمینی و دریایی، انتقال و ترانزیت برق در مقیاس بالا نیز نیازمند زیرساخت‌ها و بسترهای مناسبی است که توسط آن بتوان تجارت خارجی برق در ابعاد وسیع و نیز مسافت‌های طولانی را ممکن ساخت. البته نقشه‌راه و طرح‌های اولیه برای ایجاد زیرساخت‌های انتقال و ترانزیت کالاهای تجاری بر اساس نیازسنجی میزان و حجم مورد انتظار از تجارت هر کالا صورت می‌گیرد و در نهایت طرح‌های کلی و کلان به طرح‌های عملیاتی و اجرایی برای ایجاد مسیرهای مناسب حمل و نقل کالا بدل می‌گردند.

کشور ایران به دلیل وسعت بالا و همچنین وضعیت مناسب شبکه الکتریکی آن نسبت به اکثر کشورهای همسایه و هم‌منطقه خود، دارای پتانسیل بالایی برای تولید و انتقال انرژی الکتریکی می‌باشد. وضعیت جغرافیایی این کشور به گونه‌ای است که می‌تواند نقش بی‌بدیلی را در انتقال

چکیده — تجارت خارجی برق امروزه یکی از مفاهیم به‌روز در تعاملات اقتصادی کشورهای مختلف است. مشابه تبادلات و تجارت تمامی کالاهای دیگر، انرژی الکتریکی نیز به عنوان یک کالای راهبردی نقش ویژه‌ای در سهم تجارت خارجی کشورهای مختلف یافته است. لکن برای تسهیل و توسعه این تجارت، نیاز به زیرساخت‌های مناسبی برای انتقال این کالا در منطقه است. در این مقاله با هدف توسعه تجارت خارجی برق ایران و با توجه به اطلاعات بالقوه تولید و مصرف برق در کشورهای همسایه و هم‌منطقه ایران، رویه‌ای برای تشخیص قطب‌های مستعد تولید و مصرف پیشنهاد شده تا بر اساس آن بتوان مسیرهای انتقال توان الکتریکی با محوریت ایران را ترسیم نموده و در ادامه توسط شاخص‌های تصمیم‌ساز که در این مقاله معرفی و بکار برده می‌شوند، مناسب‌ترین مسیرها را برگزید. الگوریتم ارائه شده در این مقاله، برای افق ۲۰۲۰ میلادی تحلیل شده و نتایج آن برای کریدورهای پیشنهادی حاصل شده است. انتظار می‌رود با برقراری این مسیرها، ایران به قطب تبادلات برق منطقه تبدیل شده و از این رهگذر منافع سرشاری نصیب کشور گردد.

واژه‌های کلیدی — قطب انرژی الکتریکی؛ قطب مازاد تولید؛ قطب مازاد مصرف؛ کریدورهای تبادلاتی برق؛ برنامه‌ریزی توسعه شبکه

^۱Cross-Border Electricity Trade (CBET)

انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس بالا و نیز ارتباط الکتریکی کشورها با یکدیگر به منظور استفاده از مزایای نسبی تولید برق در کشورهای هم‌جوار و هم‌منطقه و تشکیل بازارهای منطقه‌ای برق، فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا^۲ در بسیاری از مناطق جهان گسترش چشمگیری یافته است. استفاده از فناوری کریدورهای انتقال با ولتاژهای فوق فشار قوی برای انتقال توان در حجم انبوه و مسافت‌های طولانی، از راهکارهای شناخته شده و در مواردی، اجتناب‌ناپذیر برای این منظور است.

آنچه از مفهوم انتقال توان با ظرفیت بالا در کشورهای مختلف دنیا به طور مشترک برداشت می‌شود، کریدورهای انتقال توان در ظرفیت‌های گigaواتی برای انتقال توان در حجم‌های بالا و در کنار آن مسافت‌های طولانی است. هم اکنون انتقال توان در کریدورهای با ظرفیت‌های گigaواتی در سطح دنیا، امری متداول و معمول می‌باشد و همواره با توسعه‌ی این کریدورها در سطح شبکه‌های برق کشورهای دنیا، نقش و اهمیت آن‌ها در شکل‌دهی زیرساخت‌های انتقال توان چه در داخل کشور و چه برای ارتباطات برون‌مرزی و منطقه‌ای، پررنگ‌تر می‌شود. از مهمترین فناوری‌های مورد کاربرد در کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا، استفاده از فناوری‌های UHVAC^۳ و EHVDC^۴ است.

کشورهای ایالات متحده آمریکا، کانادا، روسیه، ایتالیا، برزیل و ژاپن کم و بیش از دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی، استفاده از فناوری UHVAC را در شبکه برق خود آغاز نموده‌اند. کشور چین نیز در دهه ۱۹۸۰ میلادی به این کشورها پیوست و در سال ۱۹۸۶ اولین پروژه در زمینه فناوری UHVAC را آغاز کرد. در پله بعدی، کشورهای کره جنوبی، هند و آفریقای جنوبی قرار دارند که آنها نیز مطالعات اولیه را در خصوص به کارگیری این فناوری آغاز نموده‌اند [۶].

کشور ایالات متحده آمریکا، مطالعات برای به کارگیری سطح ولتاژ UHV در شبکه را از سال ۱۹۶۷ آغاز کرد. این کشور، پیشرو در به کارگیری این فناوری در سطح دنیا بوده و اولین پروژه‌ها را به طور آزمایشی و با طول‌های نسبتاً کم و توان‌های نه چندان زیاد آغاز کرده است. به عنوان نمونه انتقال توان ۶۶۰ مگاوات در طول ۶۵ مایل و انتقال توان ۴۰۰ مگاوات در طول ۵۳ مایل، از اولین پروژه‌های آزمایشی این کشور بود. لکن هم‌اینک برنامه‌ریزی توسعه شبکه با سطح ولتاژ ۷۶۵ کیلوولت به عنوان ولتاژ پذیرفته شده در سطح UHV، در این کشور به انجام رسیده است [۶]. در اوایل دهه

انرژی الکتریکی بین کشورهای دیگر داشته باشد. این امر می‌تواند سبب ابتکار عمل و نقش‌آفرینی ایران بر نقشه تبادل و تجارت انرژی الکتریکی منطقه گردد و از این مسیر، منافع فراوانی را عاید کشور گرداند. متنها لازم است با برنامه‌ریزی مناسب، این مسیر را هموار نمود.

در این مقاله با مروری بر وضعیت پتانسیل‌های بالقوه انرژی الکتریکی در کشورهای منطقه ایران و با هدف تبدیل شدن ایران به قطب تبادل و تجارت برق منطقه، الگوریتمی ارائه شده که طی آن کریدورهای تبادل و ترانزیت برق از طریق ایران شناسایی و پیشنهاد می‌شود. بدین‌شکل که ایران از یکسو مازاد توان کشورهای دارای توان اضافه را دریافت کرده و با استفاده از کریدورهای تبدلانی، آن را به کشورهایی که در تمام و یا فصولی از سال کمبود توان دارند، گسیل کند. نمونه چنین مطالعاتی را می‌توان در [۵] و برای کشور هندوستان یافت.

در ادامه و در بخش دوم این مقاله، با معرفی فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا، مروری کلی بر کشورهایی که در چند دهه گذشته از این فناوری استفاده نموده‌اند انجام می‌شود. این بخش به عنوان مقدمه‌ای برای چشم‌انداز بکارگیری این فناوری در ایران آورده شده است. در ادامه در شروع موضوع اصلی مقاله، اطلاعات مختصری از پتانسیل‌های تولید و مصرف کشورهای همسایه ایران تا افق ۲۰۲۰ میلادی جهت مطالعات پایه‌ای در بخش سوم ارائه شده است. این اطلاعات مبتنی بر مطالعات پیشین انجام شده در طرح‌های مرتبط بوده که در اینجا برای رعایت اختصار تنها به مراجع اطلاعات اشاره شده است. بخش چهارم که یکی از پایه‌های اصلی مقاله است، به تعیین قطب‌های با پتانسیل مازاد تولید و مصرف در منطقه شامل ایران اختصاص یافته است. برای شناسایی این قطبها، الگوریتمی ارائه شده که با اجرای آن برای کشورهای منطقه ایران و بر اساس اطلاعات مذکور، مناطق با پتانسیل‌های مازاد تولید و نیاز مصرف حاصل می‌گردند. در بخش پنجم، شاخص‌های تصمیم‌ساز جهت انتخاب کریدورهای مناسب بین قطب‌های تولید و مصرف که از دیگر ارکان مقاله است، معرفی شده و در بخش ششم با استفاده از این شاخص‌ها، کریدورهای پیشنهادی جهت تبادل انرژی الکتریکی با کشورهای هم‌جوار ارزیابی و پیشنهاد می‌گردد. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش هفتم ارائه شده است.

۲. فناوری انتقال توان با ظرفیت بالا

با افزایش سطح توان‌های انتقالی بین مراکز تولید و مصرف، دور شدن مراکز تولید از مصرف به دلیل ملاحظات زیست‌محیطی، بهره‌گیری از

² Bulk Power Transmission Technology

³ Ultra High Voltage AC

⁴ Extra High Voltage DC

بالا صورت گرفته است. این مطالعات در [۹] با ناحیه‌بندی الکتریکی جهت اتصالات بین کشورهای آفریقایی نمود دیگری داشته است.

حال با مقدمات ارائه شده تاکنون، در ادامه مقاله به نحوه بکارگیری رویکرد کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا برای توسعه تبادلات برق ایران و تبدیل ایران به قطب ترانزیت و تجارت برق منطقه پرداخته می‌شود. رویکردی که در صورت تحقق آن، می‌تواند منافع سرشاری را عاید کشور کرده و نقشه تبادلات انرژی الکتریکی منطقه را با مرکزیت ایران رقم زند.

۳. بررسی توازن توان کشورهای همسایه ایران

ایران در گستره وسیعی با کشورهای منطقه مرز خشکی و آبی دارد. در این مقاله و با توجه به مطالعات پیشین انجام شده در زمینه پتانسیل‌های تولید و مصرف برق در منطقه، شانزده کشور شامل آذربایجان، گرجستان، ارمنستان، روسیه، ترکیه، عراق، کویت، امارات متحده عربی، عمان، پاکستان، هند، افغانستان، ترکمنستان، تاجیکستان، قرقیزستان و ازبکستان برای تحلیل انتخاب شده‌اند. بر اساس مطالعات پیش‌گفته، پتانسیل‌های تولید (علامت مثبت) و نیاز مصرف (علامت منفی) در هر یک از این کشورها در افق سال ۲۰۲۰ میلادی در جدول (۱) آورده شده است. این اطلاعات در برخی موارد به کمک مقدار توان تولیدی و توان مصرفی آن‌ها و در برخی دیگر از طریق مقدار واردات و صادرات مشخص آن‌ها بدست آمده است [۲۱-۱۰].

جدول ۱: اطلاعات توازن توان کشورهای همسایه ایران

کشور	توازن توان (MW)	کشور	توازن توان (MW)
آذربایجان	+۲۱۸۸	عمان	-۴۰۰
گرجستان	+۳۵۳۴	پاکستان	-۸۷۵
ارمنستان	-۴۲۱	هند	-۷۹۴۰
روسیه	+۳۸۰۵	افغانستان	-۹۵۸
ترکیه	-۸۴۵۰	ترکمنستان	+۱۱۵۹
عراق	-۳۳۳۹	تاجیکستان	+۶۰۰
کویت	-۱۲۰۰	قرقیزستان	+۲۰۸
امارات متحده عربی	-۵۰۰	ازبکستان	+۲۶۸۷

۴. شناسایی قطب‌های مازاد تولید و مصرف

قدم اول در مسیریابی کریدورهای تبادلاتی برای ایران، تعیین قطب‌ها و یا پتانسیل‌های مازاد تولید و نیاز مصرف در منطقه است. جایی که با ارتباط مناسب این قطب‌ها به یکدیگر، از مزیت نسبی تولید در کشورهای با پتانسیل مناسب در این زمینه در رقع نیاز کشورهای دارای کمبود در تولید انرژی

۱۹۹۰ میلادی، کشور روسیه، اولین خط با سطح ولتاژ ۱۱۵۰ کیلوولت را با طول ۲۳۶۲ کیلومتر احداث کرد. لکن بعدها ولتاژ عملیاتی آن به ۵۰۰ کیلوولت تنزل یافت. علاوه بر آن خط DC با سطح ولتاژ ± ۷۵۰ کیلوولت و با طول ۱۰۹۰ کیلومتر در ابتدای دهه ۱۹۸۰ میلادی در این کشور احداث شد [۶]. در کشور ژاپن، مطالعات به کارگیری فناوری UHVAC از سال ۱۹۷۳ آغاز شد. طرح مورد نظر این کشور، دارای سطح ولتاژ ۱۱۰۰ کیلوولت بود که با هدف اتصال مراکز عمده تولید به مناطق پرجمعیت و پرمصرف کشور طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۹ اجرا گردید [۶]. در کشور کانادا نیز مطالعات فناوری UHVAC برای سطح ولتاژ بالای ۱۵۰۰ کیلوولت و نیز UHVDC برای سطح ولتاژ ± ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوولت DC توسط موسسه تحقیقاتی هیدروکبک انجام پذیرفت. هدف این مطالعه، انتقال احجام بالای توان برق‌آبی در این کشور به مراکز مصرف بود. همچنین در کشور ایتالیا مطالعات اولیه برای به کارگیری ولتاژ در سطح ۷۰۰ کیلوولت از سال ۱۹۷۰ آغاز شد و هم‌اینک در این کشور سطح ولتاژ ۱۱۵۰ کیلوولت وجود دارد.

کشور برزیل از سال ۱۹۸۴ با ایجاد خط انتقال EHVDC با سطح ولتاژ ± ۶۰۰ کیلوولت برای انتقال توان برق‌آبی نیروگاه سد ایتایپو آغاز کرد. این سد طولانی‌ترین و دومین سد از نظر تولید انرژی الکتریکی در جهان است. کشور چین نیز که هم‌اینک پیشرو در توسعه فناوری سامانه‌های UHV در دنیا است، در دهه ۱۹۸۰ میلادی مطالعات در این زمینه را آغاز کرد. هم‌اینک بیشترین تعداد اتصالات UHVDC در این کشور وجود دارد. در این کشور شبکه‌های انتقال با ظرفیت بالا در سطوح ولتاژ ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ کیلوولت برای UHVDC و سطح ولتاژ ۱۰۰۰ کیلوولت برای UHVAC ایجاد شده است.

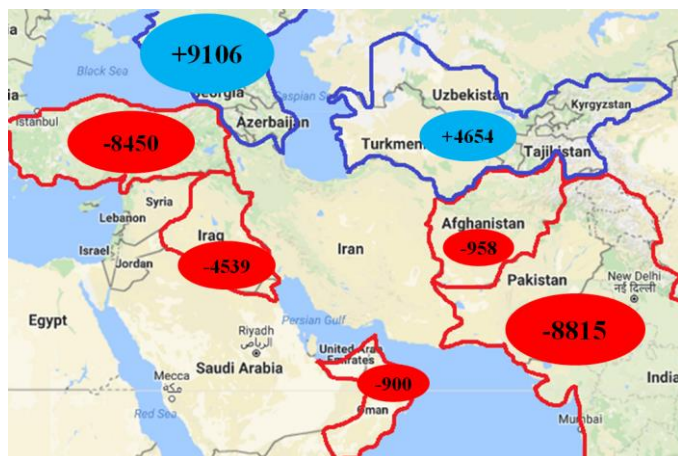
دیدگاه کریدورهای با ظرفیت بالا در هر دو بخش توسعه داخلی شبکه برق کشورها و نیز ارتباط با کشورهای همسایه و هم منطقه بکار گرفته شده است. دیدگاه کریدورهای داخلی برای اتصال مراکز عمده تولید به مراکز عمده مصرف و انتقال حجم بالای توان بکار می‌رود. مشابه آنچه که در کشور برزیل و برای انتقال توان برق‌آبی سد ایتایپو استفاده شده است. با همین دیدگاه کریدورهای برون‌مرزی^۵، مسیرهای تبادل برق بین کشورها و با ظرفیت بالا می‌باشند که انتقال توان بین مراکز با مزیت نسبی بالای تولید را به مراکز عمده مصرف متصل می‌کنند. نمونه‌های بکارگیری چنین دیدگاهی در دنیا زیاد است. مرجع [۷] کریدورهای برون‌مرزی اتحادیه اروپا و کشورهای همسایه آن را بررسی کرده است. در [۸] دیدگاهی جهت اتصال شبکه کشور چین با کشورهای عضو GCC^۶ با استفاده از کریدور انتقال توان با ظرفیت

^۵ Cross Border Corridor

^۶ Gulf Cooperation Council

۴.۲. اجرای الگوریتم شناسایی قطب‌های تولید و مصرف

حال الگوریتم ساده تشریح شده در بند قبل، برای شانزده کشور مورد مطالعه و با اطلاعات ارائه شده در جدول (۱) اجرا می‌شود. جدول (۲) نتایج نهایی شناسایی قطب‌های مازاد تولید و مصرف را نشان می‌دهد. این نتایج در شکل (۱) تصویر شده است.



شکل ۱: قطب‌های با پتانسیل مازاد تولید و نیاز مصرف در افق ۲۰۲۰

همانگونه که مشاهده می‌شود، دو قطب تولید مهم در شمال غرب (منطقه قفقاز) و شمال شرق (آسیای میانه) وجود دارد. سایر مناطق در اطراف ایران پتانسیل چندانی برای تولید ندارند و به عنوان قطب مصرف قلمداد می‌گردند.

جدول ۲: توازن توان به تفکیک هر کشور و هر قطب در افق ۲۰۲۰

نوع قطب	نام قطب	کشور	توازن توان هر کشور (MW)	توازن توان هر قطب (MW)
مازاد تولید	شمال غربی	روسیه	+۳۸۰۵	+۹۱۰۶
		گرجستان	+۳۵۳۴	
		آذربایجان	+۲۱۸۸	
		ارمنستان	-۴۲۱	
	شمال شرقی	ترکمنستان	+۱۱۵۹	+۴۶۵۴
		ازبکستان	+۲۶۸۷	
		قرقیزستان	+۲۰۸	
		تاجیکستان	+۶۰۰	
مازاد مصرف	شمال غربی	ترکیه	-۸۴۵۰	-۸۴۵۰
	غرب	عراق	-۳۳۳۹	-۴۵۳۹
		کویت	-۱۲۰۰	
	جنوب	امارات متحده عربی	-۵۰۰	-۹۰۰
		عمان	-۴۰۰	
	جنوب شرقی	پاکستان	-۸۷۵	-۸۸۱۵
		هند	-۷۹۴۰	
	شرق	افغانستان	-۹۵۸	-۹۵۸

الکتریکی و نیاز مصرف استفاده می‌شود. برای این منظور در این بخش ابتدا الگوریتمی جهت شناسایی این قطب‌ها معرفی شده که با اجرای این الگوریتم بر روی شانزده کشور مورد مطالعه، این قطب‌ها شناسایی خواهد شد.

۴.۱. الگوریتم شناسایی قطب‌های مازاد تولید و مصرف

در این بخش، روندی جهت شناسایی قطب‌های مازاد تولید و مصرف معرفی می‌گردد. مبنای این الگوریتم، ترکیب کشورهای مورد نظر و تشکیل قطب مازاد تولید یا نیاز مصرف از آنها است. برای شروع تشریح این الگوریتم، ابتدا شاخصی برای ارزیابی امکان ترکیب دو یا چند کشور با یکدیگر و تشکیل محدوده وسیع‌تر مطابق رابطه (۱) معرفی می‌شود.

$$\text{Index} = \sum_{k=1}^{N-1} (\Delta P_k)^3 \quad (1)$$

در رابطه فوق، ΔP_k مقدار مازاد تولید یا نیاز مصرف توان هر کشور مطابق اطلاعات جدول (۱) و k شماره آن کشور می‌باشد. مقدار N تعداد تمامی ترکیب‌های دو به دو می‌باشد. در حقیقت این شاخص دو کشوری را که شرایط ترکیب شدن با یکدیگر را دارند در نظر گرفته و در میان تمام آن‌ها بهترین ترکیب را انتخاب می‌کند. توجه شود در صورت ترکیب دو کشور، ΔP_k معادل برابر مجموع پارامترهای متناظر در دو کشور ترکیب شده می‌باشد. دلیل اینکه از نمای سه برای مازاد تولید یا نیاز مصرف استفاده شده، این است که بدین شکل تمرکز توان در هر منطقه، بیشتر نمایان شود. از طرفی لازم است این نما فرد باشد تا مازاد توان مثبت (تولید) از مازاد توان منفی (مصرف) متمایز شود.

برای محدودسازی تعداد ترکیب‌های دو به دو، قیودی که برای قابل ترکیب بودن دو کشور و تشکیل ناحیه بزرگتر باید رعایت شوند، عبارتند از:

- دو کشور با یکدیگر همسایه باشند.
- ترکیب دو کشور منطقه وسیعی را شامل نشود تا مفهوم قطب و تمرکز بر آن صادق باشد.

بدین‌شکل و با ترکیب دو به دو هر یک از کشورهای قابل ترکیب با یکدیگر توسط رابطه (۱)، می‌توان مقدار پتانسیل تولید را بصورت رابطه (۲) و مقدار پتانسیل نیاز مصرف را به صورت رابطه (۳) اولویت‌بندی نمود.

$$\max \sum_{k=1}^{N-1} (\Delta P_k)^3 \quad (2)$$

$$\min \sum_{k=1}^{N-1} (\Delta P_k)^3 \quad (3)$$

۵. معرفی شاخص‌های تصمیم‌ساز

حال در قدم بعد لازم است ابتدا مسیرهایی برای ارتباط و اتصال قطب‌های مازاد تولید و نیاز مصرف به یکدیگر پیشنهاد و سپس با شاخص‌های تصمیم‌ساز مناسبی، بهترین آنها انتخاب شوند. در این بخش به معرفی شاخص‌های تصمیم‌ساز به منظور انتخاب بهترین مسیرهای انتقال توان پرداخته می‌شود تا در ادامه به کمک آنها کریدورهای تبادلاتی تعیین شوند.

در این مسیر سه شاخص جغرافیایی و فنی تعریف می‌گردد که با ترکیب آنها شاخص نهایی برای تصمیم‌سازی کلی حاصل می‌شود.

۵.۱. شاخص کریدورپذیری قطب (W_1^k)

مفهوم کلی این شاخص این است که آیا قطب مورد نظر از نظر الکتریکی انسجام و توانمندی لازم را دارد که بتواند حجم بالایی از توان الکتریکی را جذب یا ارسال کند. این شاخص متشکل از چهار زیرشاخص مختلف است و هر زیرشاخص، مفهوم مشخصی از مبانی فنی تاثیرگذار در دستیابی به مفهوم فوق را ارائه خواهد کرد. هر یک از این زیرشاخص‌ها مربوط به هر یک از کشورهای درون قطب مورد نظر است و برای هر کشور، تمامی این زیرشاخص‌ها محاسبه شده و در انتها با میانگین‌گیری حسابی از آنها، شاخص کریدورپذیری قطب مورد نظر محاسبه می‌گردد. معیار سنجش هر یک از زیرشاخص‌ها بر اساس سنجش نظری است که به صورت جدول (۳) تعریف می‌گردد:

جدول ۳: معیار سنجش هر یک از زیرشاخص‌ها

ضعیف	متوسط	خوب
۰	۰/۵	۱

این مقاداردهی بدین صورت است که اگر مفاهیم مربوط به زیرشاخصی در شرایط مناسب و خوبی قرار داشته باشد، مقدار آن زیرشاخص برابر ۱ خواهد شد، اگر در شرایط معمولی و متوسط قرار داشته باشد، مقدار آن برابر ۰/۵ و اگر در شرایط ضعیفی قرار داشته باشد، مقدار آن صفر خواهد شد. در ادامه، هر یک از زیرشاخص‌های مربوط به شاخص کریدورپذیری معرفی می‌گردد.

۵.۱.۱. پیوستگی و انسجام شبکه برق کشور $(Ci1)$

منظور از پیوستگی و انسجام شبکه برق، آن است که شبکه برق به گونه‌ای باشد که تمامی نقاط تولید و مصرف، تحت یک شبکه به هم پیوسته به یکدیگر متصل بوده و دسترس‌پذیری به این شبکه در تمامی نقاط تولید و

مصرف آن امکان‌پذیر باشد. ممکن است کشوری بر حسب ظاهر از یک شبکه به هم پیوسته و منسجم برخوردار باشد ولی میزان دسترس‌پذیری به این شبکه برای نقاط تولید و مصرف به صورت مناسبی وجود نداشته باشد. با افزایش میزان انسجام و پیوستگی شبکه برق کشور، قابلیت بهره‌گیری از تمامی ظرفیت‌های تولید و مصرف جهت ارتباط با کشورهای دیگر فراهم خواهد شد.

۵.۱.۲. بالاترین سطح ولتاژ شبکه برق کشور $(Ci2)$

یکی از الزامات انتقال توان در حجم بالا، داشتن سطوح ولتاژ فوق‌فشارقوی^۷ به بالا است. وجود خطوط انتقال برق با این سطوح ولتاژ سبب خواهد شد که زمینه اتصال کریدورها به شبکه‌های برق داخلی و احیاناً ترانزیت برق به سایر کشورها مهیا گردد. بنابراین اگر در شبکه برق کشوری خطوط انتقال با ولتاژ بالا وجود داشته باشد، می‌تواند مزیت مناسبی برای کریدورپذیری آن شبکه باشد.

۵.۱.۳. وضعیت خطوط ارتباطی هر کشور با سایر کشورهای

هم‌قطب $(Ci3)$

از آنجا که هر قطب می‌تواند از ترکیب چند کشور تشکیل شود، تبادلات برق بین این کشورها از طریق خطوط تبادلاتی فی‌مابین میسر می‌شود. در صورتیکه کشورهای حاضر در یک قطب ارتباط تبادلاتی مناسبی با یکدیگر داشته باشند، به گونه‌ای که خطوط تبادلی از ظرفیت و ولتاژ مناسبی برخوردار باشد، زمینه برای تبادلات توان از طرق کریدورهای بین کشورهای هر قطب با قطب دیگر فراهم خواهد شد. در واقع در صورت اتصال شبکه‌های کشورهای حاضر در یک قطب با یکدیگر از طریق خطوط تبادلی با ظرفیت و ولتاژ بالا، می‌توان این مجموعه را به عنوان یک شبکه به هم پیوسته در نظر گرفت که امکان ارتباط از بخش‌های مختلف خود با سایر مناطق را دارند.

۵.۱.۴. قابلیت ارتباط شبکه برق کشور با شبکه‌های برق خارج

قطب $(Ci4)$

در کنار مزیت گفته شده در بند قبل، کشورهای داخل هر قطب می‌توانند علاوه بر داشتن خطوط تبادلی درون‌قطبی، خطوط تبادلی با سایر کشورهای خارج از قطب نیز داشته باشند. این مزیت نیز در کنار مزیت پیشین، بستری مناسب برای توسعه قطب‌ها و کریدورها ایجاد کرده و حضور کشورهای دیگر در طرح‌های تبادلاتی بین قطب‌های دیگر را تسهیل می‌کند و به عنوان عاملی جذاب برای کریدورپذیری مطرح است.

⁷ Extra High Voltage (EHV)

حاشیه سود پایین‌تر نسبت به ریسک بیشتر با حاشیه سود بالاتر در ارجحیت قرار می‌گیرد.

ریسک‌گزینی همجواری^۹ مفهوم جامع دیگری است که سایر مفاهیم دیگر نظیر اقتصادی و فنی را نیز به گونه‌ای پراکنده در خود دارد و پایه اصلی مفهوم آن بر اساس مسائل جغرافیایی است. این ریسک بیان می‌دارد که در همجواری برخی از کشورها، ریسک‌های فراوانی از قبیل اقتصادی، امنیتی و زیست‌محیطی وجود دارد که وابستگی شدیدی به جغرافیای آن کشورها و وضعیت قرارگیری آنها نسبت به یکدیگر دارد. در بحث کریدورهای تبادلاتی برق نیز مفهوم همجواری کشورها برای عبور این کریدورها بسیار حائز اهمیت است و ریسک‌های مختلفی را برای آن بوجود خواهد آورد. ریسک‌گزینی همجواری در بحث کریدورها بدین مفهوم است که اگر کشوری در مجاورت کشور دیگر باشد، ریسک احداث کریدور بین این دو کشور کمتر از حالتی است که بین این دو کشور، کشور یا کشورهای ثالثی وجود داشته باشد.

لکن در صورتیکه یک منطقه به عنوان قطب انرژی در بین چندین قطب دیگر قرار گیرد تا محلی برای عبور کریدورها بین قطب‌های تولید و مصرف اطراف خود شود، مفهوم ریسک‌گزینی همجواری برای آن قطب بدین صورت است که هر چه دو قطبی که قرار است بین آنها از طریق قطب مرکزی تبادل برق شود، در فاصله دورتری از یکدیگر قرار گرفته باشند، ریسک عبور کریدور مورد نظر برای عبور از منطقه قطب مرکزی بیش از زمانی است که این دو قطب در مجاورت یکدیگر باشند، چرا که در صورت اخیر به جای عبور از منطقه قطب مرکزی، از طریق مرزهای یکدیگر می‌توانند به تبادل توان بپردازند. با این توضیحات، شاخص ریسک‌گزینی همجواری بین دو قطب تولید و مصرف k و k' از طریق رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$W_3^{kk'} = 1 - 0.5^{(1+kc)} \quad (7)$$

$$0.5 \leq W_3^{kk'} \leq 1$$

k_c حداقل تعداد قطب‌ها و کشورهایی است که بین قطب تولید k و مصرف k' قرار گرفته‌اند. زمانی مقدار $W_3^{kk'}$ نسبت به منطقه مرکزی برابر ۰/۵ خواهد شد که قطب تولید و مصرف مورد نظر در مجاورت یکدیگر قرار داشته باشند. همچنین زمانی $W_3^{kk'}$ نسبت به منطقه مرکزی برابر با ۱ خواهد شد که قطب مورد نظر نیز به عنوان قطب تولید و یا مصرف در نظر گرفته شود.

حال با توجه به زیرشاخص‌های مختلفی که معرفی شد، شاخص کریدورپذیری هر قطب k از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$W_1^k = \frac{1}{MN_k} \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M C_{ij} \quad (4)$$

که در آن k شماره قطب، N_k تعداد کشورهای هر قطب k و M تعداد زیر شاخصهای بکار رفته در قطب k (در اینجا سه) است. در این رابطه میانگین حسابی از تمامی زیرشاخص‌های تعریف شده بدست می‌آید که این مقدار بین صفر تا یک است. این شاخص تمامی مفاهیم بیان شده در زیرشاخص‌ها را با وزن و ارزش قیاسی یکسان لحاظ می‌کند.

۵.۲. شاخص سطح توان هر قطب k (W_2^k)

همانطور که پیش‌تر بیان گردید، بعضی از قطب‌ها دارای مازاد توان تولیدی (قطب تولید) و بعضی دیگر دارای کمبود توان تولیدی (قطب مصرف) هستند. بزرگی سطح توان هر قطب چه مثبت و یا منفی این موضوع را نشان می‌دهد که تا چه میزان آمادگی و جذابیت انتقال توان از طریق کریدور تبادلاتی فراهم است. بنابراین شاخص سطح توان هر قطب نشان‌دهنده جذابیت آن قطب برای ایجاد کریدور جهت تامین کمبود توان و یا انتقال مازاد توان در بین قطب‌های دیگر خواهد بود. این شاخص برای هر قطب k از طریق رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$W_2^k = \frac{|Q^k|}{\max |Q^k|} \quad (5)$$

که مقدار Q_k در این رابطه برابر است با:

$$Q^k = \sum_{i=1}^{N_k} (P_i - D_i) \quad (6)$$

در رابطه بالا، P_i پتانسیل تولید توسط هر کشور در هر قطب k و D_i تقاضای بالقوه برق در هر کشور و در هر قطب k است.

۵.۳. شاخص ریسک‌گزینی همجواری بین دو قطب

تولید و مصرف k و k' ($W_3^{kk'}$)

ریسک‌گزینی^۸ اصطلاحی در علم اقتصاد و البته قابل تعمیم به سایر مفاهیم نظیر مسائل فنی، اجتماعی، امنیتی و غیره است. مفهوم ریسک‌گزینی در مقابل ریسک‌پذیری و بدین شکل است که گاهی پذیرش ریسک کمتر با

⁹ Risk Aversion of Vicinity

⁸ Risk Aversion

کشورهای متعلق به هر کدام از قطب‌های جدول (۵)، در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۴: محاسبه پارامترهای C_{i1} تا C_{i4} و شاخص‌های W_1 و W_2

نام قطب	نام کشور	C_{i1}	C_{i2}	C_{i3}	C_{i4}	W_1	W_2
شمال غربی	روسیه	۱	۱	۱	۱	۰/۷۵	۰/۹۸
	گرجستان	۱	۱	۱	۱		
	آذربایجان	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵		
	ارمنستان	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵		
شمال شرقی	ترکمنستان	۱	۱	۱	۰/۵	۰/۹۴	۰/۵۳
	ازبکستان	۱	۱	۱	۰/۵		
	قرقیزستان	۱	۱	۱	۱		
	تاجیکستان	۱	۱	۱	۱		
شرق	افغانستان	۰	۰/۵	–	۰/۵	۰/۳۳	۰/۱۱
جنوب شرقی	پاکستان	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۶۹	۱/۰۰
	هند	۱	۰/۵	۱	۱		
جنوب	امارات متحده عربی	۱	۱	۱	۱	۱/۰۰	۰/۱۰
	عمان	۱	۱	۱	۱		
غرب	عراق	۱	۱	۰/۵	۱	۰/۶۹	۰/۵۲
	کویت	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵		
شمال غربی	ترکیه	۱	۱	–	۱	۱/۰۰	۰/۹۶

جدول ۵: محاسبه شاخص W_3 و $L^{kk'}$ و رتبه‌بندی نهایی کريدورها

قطب ابتدایی	قطب انتهایی	W_3	$L^{kk'}$	رتبه کريدور
شمال غربی	شرق	۰/۸۸	۰/۴۸	۸
	جنوب شرقی	۰/۹۴	۰/۸۰	۱
	جنوب	۰/۹۴	۰/۶۷	۳
	غرب	۰/۷۵	۰/۵۵	۷
	شمال غربی	۰/۵	۰/۴۶	۹
شمال شرقی	شرق	۰/۵	۰/۲۴	۱۰
	جنوب شرقی	۰/۷۵	۰/۵۹	۶
	جنوب	۰/۹۴	۰/۶۰	۵
	غرب	۰/۹۴	۰/۶۳	۴
	شمال غربی	۰/۸۸	۰/۷۵	۲

بر اساس نتایج بدست آمده، شکل (۲)، سه کريدور انتقال توان پیشنهادی را که از بیشترین اولویت برخوردار می‌باشند، به تصویر می‌کشد.

۵.۴. شاخص نهایی تعیین مسیر کريدور ($L^{kk'}$)

شاخص $L^{kk'}$ با برقراری یک رابطه ریاضی منطقی بین شاخص‌های W_1^k ، W_2^k و $W_3^{kk'}$ به اولویت‌بندی تمامی مسیرهای ممکن بین قطب‌های تولید و مصرف پرداخته و از این طریق مسیرهای پیشنهادی خود را برای ایجاد کريدور رتبه‌بندی می‌کند. مسیرهایی که بیشترین مقدار $L^{kk'}$ را بدست آورند، از اولویت بالاتری برای ایجاد کريدور برخوردارند. شاخص $L^{kk'}$ ، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$L^{kk'} = \frac{1}{4} W_3^{kk'} (W_1^k + W_2^k + W_1^{k'} + W_2^{k'}) \quad (۸)$$

در این رابطه، ابتدا میانگین شاخص‌های کريدورپذیری و سطح توان قطب‌های تولید k و مصرف k' محاسبه شده و سپس در شاخص ریسک‌گزینی همجوارى بین این دو قطب ضرب می‌گردد. بنابراین مشخص است که شاخص ریسک‌گزینی همجوارى به عنوان ضریب وزنی هر یک از شاخص‌های کريدورپذیری و سطح توان قطب تولید و مصرف لحاظ شده و حساسیت هر یک از این شاخص‌ها با یکدیگر برابر است. بر اساس شاخص ریسک‌گزینی همجوارى تعیین می‌گردد. در واقع در این رابطه، با فرض تاثیرگذاری یکسان شاخص‌های کريدورپذیری و سطح توان برای دو قطب تولید k و مصرف k' ، اثرگذاری میانگین این شاخص‌ها مد نظر بوده و هر یک از این شاخص‌ها به تنهایی تاثیرگذاری بالایی نخواهد داشت. این در حالی است که در این رابطه، شاخص ریسک‌گزینی همجوارى نسبت به سایر شاخص‌ها از اثرگذاری بالاتری برای تعیین مسیر کريدورها برخوردار بوده و نقش بیشتری در رتبه‌بندی کريدورها دارد.

۶. پیاده‌سازی شاخص‌های تصمیم‌ساز

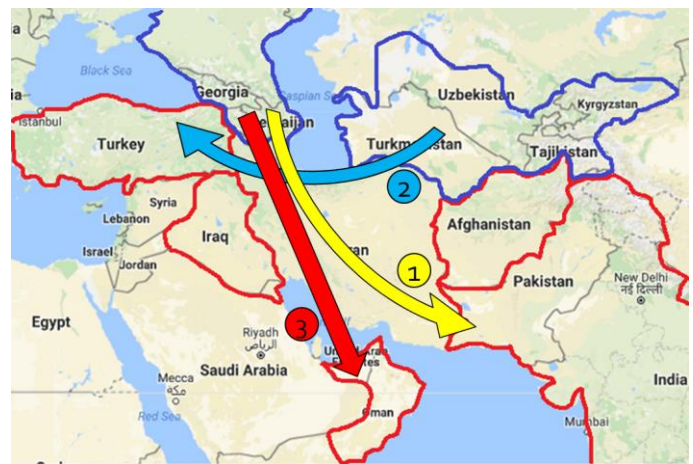
در این بخش، بر اساس اطلاعات مربوط به قطب‌های تولید و مصرف در منطقه ایران در افق ۲۰۲۰، که در بخش سوم این مقاله به آن اشاره شد، شاخص‌های معرفی شده در بخش چهارم مقاله محاسبه شده و توسط آن، رتبه‌بندی کريدورهای انتقال توان میان قطب‌های تولید و مصرف انرژی الكتريکی با محوریت ایران ارائه خواهد شد. جدول (۴)، مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای C_{i1} تا C_{i4} و همچنین شاخص‌های محاسبه شده W_1 و W_2 را برای کشورها و قطب‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد:

همچنین جدول (۵)، شاخص‌های W_3 و $L^{kk'}$ یا به عبارت دیگر رتبه‌بندی نهایی کريدورهای انتقال انرژی الكتريکی میان قطب‌های تولید و مصرف و با محوریت ایران را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نام

شمال غرب منتقل می‌کند و نهایتاً اولویت سوم برای کریدوری است که مازاد توان قطب شمال غربی کشور را به قطب جنوب منتقل می‌نماید.

۸. منابع

- [1] W. Antweiler, "Cross-Border Trade in Electricity", Journal of International Economics, Vol. 101, pp. 42-51, 2016.
- [2] O. Gore, S. Viljainen, "Challenges of Cross-Border Trade between Two Markets with Different Designs", European Energy Market (EEM), 2014.
- [3] H. Khalfallah, "Connecting Mediterranean Countries through Electricity Corridors: New Institutional Economic and Regulatory Analysis", Utilities Policy 32, pp. 45-54, 2015.
- [4] J. Lin, "Cross-Border Transmission Planning in Two Adjacent Electricity Market Systems", EEM15 – 12th International Conference on the European Energy Market, 2015.
- [5] J. Parikh, V. K. Kharbanda, R. R. Panda, "Cross-Border Electricity Trade in South Asia-Key Policy, Regulatory Issues, Challenges and the Way Forward", Workshop on the Sustainable Development of Power Sector and Enhancement of Electricity Trade in the South Asian Region, New Delhi, 2016.
- [6] MetinCandas, OzlemSahinMeric, "The Application of Ultra High Voltage in the World", Journal of Power and Energy Engineering, 3, 453-457, 2015.
- [7] R. Vailati, T. Hartmann, "Optimizing Electricity Corridors between European Union and Neighboring Countries", https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bs/ENCOURAGED/WP/ENCOURAGED_Powertech-2007_paper_461-vailati-hartmann.pdf.
- [8] W. Dan, L. Yujun, Y. Hongyuan, X. Qingshan, X. Xiaohui, D. Maosheng, "A Vision of China-Arab Interconnection Transmission Network Planning with UHVDC Technology", 2nd Asia Conference on Power and Electrical Engineering, 2017.
- [9] P. Panumpabi, I. Idehen, M. Baches, "Design and Visualization of the Central, Eastern, and Southern African Power Grid with Large-Scale Generation in Tanzania", Power and Energy Conference (TPEC), IEEE Texas, 2017.
- [10] "Preparatory Survey on Yashma Gas Combined cycle Power Plant Project" Japan International Cooperation Agency (JICA); August 2014.
- [11] "Ten-Year Network Development Plan of Georgia for 2015 - 2025" Transmission System Operator JSC (Georgia State Electrosystem); 2015.
- [12] "Nuclear Power in Countries with limited Electrical Grid Capacities: The Case of Armenia"; a report of the International Project on Innovatives Nuclear Reactors and fuel cycles; IAEA; 2015
- [13] Global and Russian energy outlook up to 2040, the energy research institute of the Russian academy of sciences, analytical center of the government of the Russian federation, Moscow 2014.
- [14] "Presentation of Strategy Development Presidency"; Ministry of Energy and Natural Resources; 2014.
- [15] گزارش "تدوین قیود تبادلات برق و گاز برای سناریوهای مطالعاتی"; پروژه "برنامه‌ریزی بلند مدت نحوه تبادلات حاملهای انرژی بین ایران و کشورهای همسایه"; مرکز توسعه فناوری سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی؛ بهمن ماه ۱۳۹۵.
- [16] <http://www.gccia.com.sa>
- [17] Cross-Border Electricity Trade in South Asia: key Policy, Regulatory Issues/ challenges and the way forward; USAID, January 2016.
- [18] "Afghanistan: Addendum to the Afghanistan Power Sector Master Plan"; Technical Assistance Consultant's Report; ADB; 2014.
- [19] The Energy Development Strategy of Turkmenistan Analysis of The Volume Of Investments in the Development of Energy Infrastructure in Turkmenistan; Ministry of Energy of Turkmenistan;
- [20] Central Asia-South Asia Electricity Transmission and trade (CASA-1000) Project Feasibility Study Update; Appendices I; 2011.
- [21] "Uzbekistan Energy / Power Sector Issues Note"; The world Bank; 2013.



شکل ۲: نتایج نهایی کریدورهای انتقال توان پیشنهادی در افق ۲۰۲۰

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ایران کشوری است که از نظر مجموع ذخایر هیدروکربنی، رتبه اول را در جهان دارا است و از نظر منابع گاز طبیعی نیز رتبه ممتازی دارد. از سوی دیگر، صادرات و یا به عبارت کلی‌تر، تبادلات برق ایران با کشورهای منطقه، مزیت مهمی برای این کشور محسوب می‌شود. این موضوع از آن جهت مهم است که ایران با پهنه گسترده خود و ارتباط زمینی و دریایی با چهارده کشور، نقش ممتازی را در منطقه دارد و می‌تواند از طریق این مزیت نسبی، تاثیرگذاری شگرفی در نقشه تبادلات الکتریکی منطقه داشته باشد. تبدیل شدن ایران به قطب تبادلات و تجارت انرژی الکتریکی منطقه، یکی اصول کلی سیاست‌های اقتصاد مقاومتی و از اهداف کلان و راهبردی وزارت نیرو در طی دهه اخیر بوده است که با وجود تجربه نزدیک به سده‌های تبادلات برق در ایران، زمینه برای تحقق این هدف بسیار مناسب است.

در این مقاله، با تمرکز بر نقش‌آفرینی ایران در تبادل و ترانزیت انرژی الکتریکی در منطقه و دیدگاه کریدورهای تبادلاتی برای انتقال انرژی الکتریکی با محوریت ایران، الگوریتمی ارائه شد که در آن با دو پیش‌نیاز تعیین قطب‌های مازاد تولید و نیاز مصرف در منطقه و همچنین شاخص‌های تصمیم‌ساز برای کریدورهای اتصال‌دهنده این دو مجموعه قطب به یکدیگر، اولویت‌بندی مناسبی برای کریدورهای تبادلاتی برق در منطقه با محوریت ایران بدست آمد. بر این اساس در افق سال ۲۰۲۰ میلادی، اولویت اول کریدوری است که مازاد توان قطب شمال غربی کشور (منطقه قفقاز) را به قطب جنوب شرقی منتقل می‌نماید. اولویت دوم شامل کریدوری است که مازاد توان قطب شمال شرقی کشور (آسیای میانه) را به قطب غرب و