

# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

## پیشنهاد مسیرهای انتقال توان الکتریکی از ایران با توجه به مزیت‌های نسبی تولید و مصرف فصلی و روزانه در منطقه

علی آرانی‌زاده - همایون برهمندپور - مونا رنجبر - محمد سعید میثاقیان

پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

ali\_arani@elec.iust.ac.ir, hberahmandpour@nri.ac.ir, mranjbar@nri.ac.ir, misaghian@ieee.org

### چکیده

با توجه به گستردگی تجارت خارجی برق در عرصه بین‌المللی و تبدیل شدن آن به یک کالای مهم تجاری در تعاملات اقتصادی بین کشورها، انرژی الکتریکی به یک ابزار قدرتمند اقتصادی تبدیل شده است که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تجارت خارجی کشورهای مختلف دارد. کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی مطلوب، قابلیت تبدیل شدن به هاب انرژی الکتریکی در منطقه را دارد. اما لازم است نقشه کلی از برآوردهای تولید و مصرف برق در کشورهای منطقه در آینده ترسیم گردد تا بتوان با استناد بر این نقشه، مسیرهای انتقال توان الکتریکی خصوصاً با ظرفیت‌های بالا و با محوریت ایران را استخراج نمود. برای شناسایی مسیر کریدورهای انتقال توان الکتریکی با ظرفیت بالا، دو عامل مهم برای تعیین شارش توان بین کشورها وجود دارد. عامل اول تغییر فصول سال از فصل گرم به فصل سرد است که در این شرایط علاوه بر تغییر تولید سبد نیروگاهی کشورها و همچنین تغییر در برنامه‌ریزی تولید آن‌ها، وضعیت مصرف در هر کشور نیز تغییر می‌کند. عامل دوم ناشی از منحنی بار روزانه و ساعات اوج مصرف در کشورها می‌باشد که با توجه به گستردگی کشورها در پهنه طول جغرافیایی، این وضعیت نیاز به تحلیل جامعی خواهد داشت. در این مقاله، با در نظر گرفتن کشورهای هم‌منطقه با ایران و بررسی مازاد تولید و نیاز مصرف آن‌ها در سال‌های آتی، به قطب‌بندی کشورهای منطقه به ازای فصول گرم و سرد پرداخته شده است. همچنین با تکیه بر شاخص‌های تصمیم‌ساز، مناسب‌ترین مسیرها برای انتقال توان در هر فصل و با محوریت ایران معرفی شده‌اند. در ادامه با توجه به طول جغرافیایی کشورهای موردنظر و تأثیر پهنه این طول جغرافیایی در شارش توان میان کشورها، به تعیین مسیر نهایی جهت انتقال توان با ظرفیت بالا میان کشورهای منطقه و با محوریت ایران پرداخته شده است.

### کلید واژه

تجارت خارجی برق - هاب انرژی منطقه - قطب تولید و مصرف - شبکه برق منطقه‌ای - انتقال توان الکتریکی با ظرفیت بالا

# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

مقدمه

شکل‌دهی زیرساخت‌های انتقال توان چه در داخل کشور و چه برای ارتباطات برون‌مرزی و منطقه‌ای، پر رنگ‌تر می‌شود. دیدگاه کریدورهای داخلی برای اتصال مراکز عمده تولید به مراکز عمده مصرف و انتقال حجم بالای توان در یک کشور بکار می‌رود [۳]. با همین دیدگاه کریدورهای برون‌مرزی<sup>۴</sup>، 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 موجب می‌گردند. نمونه‌های بکارگیری چنین دیدگاهی در دنیا زیاد است. مرجع [۴] کریدورهای برون‌مرزی اتحادیه اروپا و کشورهای همسایه آن را بررسی کرده است. مرجع [۵] دیدگاهی جهت اتصال شبکه کشور چین با کشورهای عضو<sup>۵</sup> GCC با استفاده از کریدور انتقال توان با ظرفیت بالا ارائه کرده است. این مطالعات در [۶] با ناحیه‌بندی الکتریکی جهت اتصالات بین کشورهای آفریقایی نمود دیگری داشته است.

کشور ایران با توجه به وضعیت منطقه‌ای و همچنین پتانسیل بالای شبکه انتقال خود، ظرفیت بالقوه مناسبی جهت انتقال توان الکتریکی با ظرفیت بالا با کشورهای همسایه خود و به نوعی تبدیل شدن به هاب انرژی در منطقه را دارد. کشورهای شمالی ایران دارای آب و هوای نسبتاً سرد می‌باشند و بنابراین در فصول گرم سال، دارای توان مازاد می‌باشند. همچنین کشورهای جنوبی ایران وضعیت کاملاً متفاوت داشته و در فصول گرم سال نیاز شدیدی به توان الکتریکی دارند. از سوی دیگر انواع فناوری‌های مختلف تولید برق و تنوع سبد نیروگاهی در کشورهای اطراف ایران، سبب تفاوت در هزینه تمام شده تولید برق و نتیجتاً ایجاد بستر اقتصادی لازم برای توسعه بازارهای منطقه‌ای برق می‌شود. مجموع دو واقعیت بالا به همراه شبکه داخلی قدرتمند برق ایران، پتانسیل بسیار مناسبی را برای انتقال توان میان کشورهای همسایه و هم‌منطقه با ایران و بسترسازی جهت ترانزیت توان الکتریکی از طریق ایران فراهم می‌آورد. با این توضیحات، تحقق سیاست اصولی تبدیل شدن ایران به هاب انرژی الکتریکی منطقه نه لزوماً از طریق افزایش تولید داخل و صادرات آن به کشورهای دیگر بلکه از مسیر افزایش شاخص

ایجاد و توسعه تجارت خارجی برق، همانند تجارت هر کالای اقتصادی دیگری، مستلزم شناسایی مناطق دارای اضافه تولید و کمبود تولید یا اصطلاحاً قطب‌های مازاد تولید و نیاز مصرف است [۱]. بر این اساس کشورهایی که دارای مازاد قابل توجه توان تولیدی چه دائم یا فصلی و متقابلاً کشورهایی که دارای نیاز مصرف قابل توجه نسبت به تولید، آن هم چه دائمی و یا فصلی می‌باشند، به عنوان قطب تولید و مصرف شناخته می‌شوند. در صورتی که دو کشور با مازاد توان تولید و نیاز مصرف در همسایگی یکدیگر قرار داشته باشند، می‌توانند با ایجاد یک کریدور تبادل‌توانی بین خود مسیر ارتباطی توان الکتریکی در حجم بالا را ایجاد کنند. حال ممکن است نیاز مصرف کشوری از کشور غیرهمجوار و احیاناً دوردست تامین گردد که در این صورت توجه به کشور(های) واسط و مسیر این ترانزیت اهمیت دوچندان دارد. بر این اساس لازم است برای شناسایی مسیرهای ترانزیت توان الکتریکی بین کشورهای موردنظر، مطالعه و برنامه‌ریزی انجام شود. کشور واسط انتقال توان بین دو نقطه مازاد تولید و مازاد مصرف، نقش مهمی در ایجاد ارتباط بین این دو قطب ایفا خواهد کرد. کشور ترانزیت‌کننده برای انتقال توان هم می‌تواند در صورت داشتن ظرفیت انتقال کافی، از شبکه برق داخلی خود بهره ببرد که در این صورت مسیر این انتقال را کریدور ترانزیت شبکه انتقال<sup>۱</sup> می‌گویند، و هم می‌تواند بدون استفاده از شبکه انتقال، توان الکتریکی با ظرفیت بالا را از مسیری مجزا انتقال دهد که این وضعیت را کریدور ترانزیت خط انتقال<sup>۲</sup> می‌نامند [۲].

آنچه از مفهوم کریدور انتقال توان با ظرفیت بالا<sup>۳</sup> در کشورهای مختلف دنیا به طور مشترک برداشت می‌شود، کریدورهای انتقال توان در ظرفیت‌های گیگاواتی برای انتقال توان در حجم‌های بالا و در کنار آن مسافت‌های طولانی است. هم‌اکنون انتقال توان در کریدورهای با ظرفیت‌های گیگاواتی 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

<sup>۴</sup> Cross Border Corridor

<sup>۵</sup> Gulf Cooperation Council

<sup>۱</sup> Network Transit Corridor

<sup>۲</sup> Line Transit Corridor

<sup>۳</sup> Bulk Power Transmission Corridor (BPTC)

# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

۱- تبادلات و ترانزیت انرژی الکتریکی از کشور نیز امکان‌پذیر است.

برای شناسایی نقش ایران در منطقه و تبدیل ایران به هاب انرژی در منطقه، لازم است نقشه تولید و مصرف برق در کشورهای اطراف ایران ترسیم شود. قدم اول در این مسیر، بدست آوردن تراز توان الکتریکی کشورها برای تبادلات منطقه‌ای برق می‌باشد. برای این منظور کشورهای شمالی، شرقی، غربی و جنوبی ایران که می‌توانند نقش مؤثری در تبادلات منطقه‌ای داشته باشند در نظر گرفته شده‌اند [۱]. این مجموعه شامل شانزده کشور با مشخصات و اقلیم‌های متفاوت جغرافیایی بوده که عبارت از آذربایجان، گرجستان، ارمنستان، روسیه، ترکیه، عراق، کویت، امارات متحده عربی، عمان، پاکستان، هند، افغانستان، ترکمنستان، تاجیکستان، قرقیزستان و ازبکستان می‌باشند. با توجه به گستردگی این کشورها در نواحی جغرافیایی متفاوت و در نتیجه سید نیروگاهی متنوع آن‌ها و همچنین اختلاف ساعت با توجه به افق جغرافیایی گسترده و تاثیر آن روی اوج بار روزانه، مجموعه این کشورها پتانسیل بسیار خوبی را برای برقراری ارتباطات الکتریکی و ترانزیت برق از ایران ایجاد می‌کنند.

اطلاعات لازم برای استخراج تراز توان الکتریکی در دو فصل گرم و سرد در افق ۲۰۲۰ و برای شانزده کشور مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. توجه شود اطلاعات ظرفیت تولید توان در فصل گرم از مراجع [۷-۱۸] اقتباس شده است. این درحالی است که اطلاعات فصل سرد در دسترس نمی‌باشد. برای این منظور از الگوریتمی منطقی جهت دستیابی به اطلاعات فصل سرد بهره برده شده که در ادامه توضیح مختصری برای آن ذکر می‌گردد.

کشورهای افغانستان، هند و پاکستان به دلیل چالش‌های موجود در تولید انرژی الکتریکی و عقب بودن تولید از مصرف، همواره تلاش دارند تا از بیشینه ظرفیت موجود در کشور خود بهره ببرند. به همین خاطر در الگوریتم معرفی شده، وضعیت توازن توان این کشورها برای فصل گرم و سرد ثابت در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای کشورهای افغانستان و هند، ظرفیت تولید گرم و سرد ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ لکن به این خاطر که این کشورها همچنان قابلیت تولید دارند اما به دلیل کاهش نیاز مصرف در فصل

اصول کلی و الگوریتم جانمایی کریدورهای انتقال توان برون‌مرزی برای تبدیل ایران به هاب انرژی الکتریکی منطقه در [۱] آمده است. در این مقاله و در ادامه مطالعات پیشین، با انجام مطالعات تفصیلی‌تر نقش تغییرات فصلی تولید و بار کشورهای هدف تبادل نیز بررسی شده و با جمع‌بندی پتانسیل‌های تبادل انرژی الکتریکی در فصول گرم (تابستان) و سرد (زمستان) و همچنین اختلاف افق کشورها، پیشنهادها و راهکارهای کلی‌تری ارائه گردیده است.

در ادامه این مقاله و در بخش اول تراز توان الکتریکی در کشورهای منطقه ایران در فصول گرم و سرد سال و برای افق ۲۰۲۰ با استناد به برنامه‌ریزی‌های کلی کشورها بررسی شده است. با توجه به اطلاعات بدست آمده از این بخش نتیجه می‌شود که قابلیت توان تولیدی و نیاز مصرف کشورها با تغییر فصول سال، تفاوت زیادی خواهد کرد که پتانسیل خوبی برای تبادلات برق ایجاد می‌کند. در بخش دوم مقاله به شناسایی قطب‌های مازاد تولید و مازاد مصرف پرداخته می‌شود و به علت اهمیت موضوع، این بررسی به صورت فصلی و برای دو فصل گرم (تابستان) و سرد (زمستان) صورت گرفته است. پس از آن در بخش سوم به بررسی شاخص‌های تصمیم‌ساز جهت تعیین مسیر کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا در ایران در دو فصل گرم و سرد سال برای تبادل توان بین کشورهای منطقه پرداخته شده است. بخش چهارم به تعیین مسیر اولیه کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا با استفاده از شاخص‌های تصمیم‌ساز گفته شده و با توجه به اطلاعات بدست آمده از پتانسیل تولید و نیاز مصرف کشورها در فصول گرم و سرد سال می‌پردازد. در ادامه و در بخش پنجم به تعیین مسیر نهایی کریدورها با توجه به پهنه طول جغرافیایی و تاثیر آن بر روی اوج بار روزانه کشورها پرداخته شده و با بهره‌گیری از این موضوع، سناریوهای مسیر کریدورها کاهش یافته و اولویت‌های اصلی جهت انتقال توان الکتریکی بین کشورها بدست می‌آید. در نهایت نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

داده‌های تولید و مصرف در فصل سرد برای برخی از کشورها مانند کشور گرجستان در دسترس بوده و نیاز به استفاده از الگوریتم معرفی شده در این بخش برای دستیابی به اطلاعات تولید و مصرف آن‌ها در فصل سرد سال نیست.

۲-

برای تعیین مسیرهای احتمالی شارش توان بین کشورهای منطقه با محوریت ایران، ابتدا لازم است نقاط مبدا و مقصد برای شارش توان و همچنین جهت توان بین دو نقطه بدست آید. برای این منظور با در دست داشتن توازن توان در کشورهای همسایه ایران، قطب‌های تولید و مصرف که ممکن است شامل چندین کشور نیز باشد، بدست آمده و بعد از آن مسیر کربدورهای تبادلاتی به صورت خط واصل بین قطب‌های تولید و مصرف بدست خواهد آمد [۱].

مبنای الگوریتم تعیین قطب‌های مازاد تولید و مصرف در فصول گرم و سرد سال، ترکیب کشورهای مورد مطالعه 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 معادله (۱) معرفی می‌شود.

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

در رابطه فوق،  $\Delta P_k$  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 حائز شرایط ترکیب شدن با یکدیگر هستند در نظر گرفته و در میان تمام آن‌ها بهترین ترکیب را انتخاب می‌کند. توجه شود در صورت ترکیب دو کشور،  $\Delta P_k$  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

سرد، تولید خود را کاهش می‌دهند. لذا میزان تولید این کشورها در فصل سرد و گرم برابر است. از طرفی دیگر، کشورهایی که از نظر جغرافیایی هم عرض با کشور گرجستان هستند (به دلیل در دسترس بودن اطلاعات کشور گرجستان در فصل زمستان [۱۹])، از این کشور به عنوان الگو استفاده شده است، به دلیل شرایط سرد و یخبندانی که در فصل سرد دارند، نمی‌توانند به طور کامل از واحدهای تولید خود بهره ببرند. زیرا بخش قابل توجهی از تولیدات این کشورها از طریق واحدهای برق‌آبی تأمین می‌گردد که این واحدها در فصل سرما و به دلیل اقلیم این کشورها قابل بهره‌برداری نمی‌باشد. بنابراین، برای کشورهای هم عرض با کشور گرجستان، با استناد به مرجع [۱۹]، سهم حضور واحدهای برق‌آبی در تأمین برق این کشورها بدست آمده است. لذا فرض شده است که ظرفیت تولید در فصل سرد همانند تابستان است اما تنها بیست درصد از کل واحدهای برق‌آبی آن قابل استفاده می‌باشد. پس به بیان دیگر، ظرفیت تولید کشورهای هم‌عرض با کشور گرجستان در فصل زمستان برابر است با ظرفیت تولید این کشورها در فصل تابستان بدون در نظر گرفتن هشتاد درصد ظرفیت تولید واحدهای آبی این کشورها.

جدول ۱: تراز توان در کشورهای همسایه ایران در فصول گرم و سرد

کشور	تراز توان (MW)		کشور	تراز توان (MW)	
	سرد	گرم		سرد	گرم
گرجستان	۱۸۷۰	۶۶۰	ترکیه	-۸۴۵۰	۱۴۵۵۰
روسیه	۳۸۰۰	۱۳۵۰	عراق	-۲۳۴۰	۴۱۴۰
آذربایجان	۲۱۹۰	۲۸۷۰	کویت	-۱۲۰۰	۱۴۹۰
ارمنستان	-۴۲۰	-۲۱۰	امارات	-۵۰۰	۶۲۰
ترکمنستان	۱۱۶۰	۲۳۰۰	عمان	-۴۰۰	۵۰۰
ازبکستان	۲۶۹۰	۴۵۵۰	پاکستان	-۸۸۰	-۸۸۰
تاجیکستان	۶۰۰	۲۱۰	هند	-۷۹۴۰	-۷۹۴۰
قرقیزستان	۲۱۰	۷۰	افغانستان	-۹۶۰	-۹۶۰

برای کشورهای هم‌عرض با کشور ایران، به دلیل تشابه اقلیمی و شرایط جغرافیایی، می‌توان از ضریب تغییرات مصرف در کشور ایران در فصل سرد نسبت به فصل گرم استفاده کرد و به داده‌های مصرف بار کشورهای هم‌عرض کشور ایران در فصل سرد رسید. لازم به ذکر است که

# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

۳-

مطابق مرجع [۱]، تعدادی شاخص برای تعیین مسیر کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا معرفی شده است. این شاخص‌ها شامل ۱- شاخص کریدورپذیری هر قطب ۲- شاخص سطح توان هر قطب و ۳- شاخص ریسک‌گریزی همجواری<sup>۶</sup> بین دو قطب تولید و مصرف می‌باشند. در ادامه مرور اندکی پیرامون شاخص‌ها انجام شده است. جهت بررسی دقیق‌تر این شاخص‌ها به مرجع [۱] مراجعه گردد.

## ۳-۱- شاخص کریدورپذیری هر قطب $k$ ( $W_1^k$ )

شاخص کریدورپذیری به عنوان شاخصی فنی در تعیین مسیر کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا در نظر گرفته شده است. این شاخص متشکل از چهار زیرشاخص مختلف است و هر زیرشاخص، مفهوم مشخصی از مبانی فنی تاثیرگذار در بحث انتقال توان با ظرفیت بالا را ارائه خواهد کرد. هر یک از این زیرشاخص‌ها مربوط به هر یک از کشورهای درون قطب است و برای هر کشور، تمامی این زیرشاخص‌ها محاسبه شده و در انتها با میانگین گرفتن از مجموعه آن‌ها، شاخص کریدورپذیری قطب موردنظر محاسبه می‌گردد. زیرشاخص‌های شاخص کریدورپذیری عبارت‌اند از: ۱- پیوستگی و انسجام شبکه برق هر کشور از قطب  $k$  ۲- سطح ولتاژ خطوط شبکه برق هر کشور از قطب  $k$  ۳- وضعیت خطوط درون‌ارتباطی هر کشور با سایر کشورهای قطب  $k$  ۴- قابلیت ارتباط شبکه برق هر کشور قطب  $k$  با شبکه‌های برق خارج از قطب

## ۳-۲- شاخص سطح توان هر قطب $k$ ( $W_2^k$ )

سطح توان هر قطب این موضوع را بیان می‌کند که هر قطب چقدر مازاد توان و یا کمبود توان دارد تا این پتانسیل وجود داشته باشد که از طریق احداث کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا، این مازاد را انتقال داد و یا کمبود توان را از طریق قطبی دیگر جبران کرد.

## ۳-۳- شاخص ریسک‌گریزی همجواری بین دو

### قطب تولید و مصرف $k$ و $k'$ ( $W_3^{kk'}$ )

در بحث کریدورهای انتقال توان با ظرفیت بالا مفهوم همجواری کشورها برای عبور این کریدورها بسیار حائز

برای قابل ترکیب بودن دو کشور و تشکیل ناحیه بزرگ‌تر باید رعایت شوند، عبارت‌اند از: ۱- دو کشور با یکدیگر همسایه باشند. ۲- ترکیب دو کشور منطقه وسیعی را شامل نشود تا مفهوم قطب و تمرکز بر آن صادق باشد. بدین‌شکل و با ترکیب دو به دوی هر یک از کشورهای قابل ترکیب با یکدیگر توسط رابطه (۱)، می‌توان مقدار پتانسیل مازاد تولید در قطب تولید را بصورت رابطه (۲) و مقدار پتانسیل مازاد مصرف در قطب مصرف را به صورت رابطه (۳) اولویت‌بندی نمود.

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

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

حال با بهره‌گیری از اطلاعات توازن توان الکتریکی کشورهای منطقه در فصول گرم و سرد [۷-۱۸] و همچنین الگوریتم گفته شده، قطب‌های مازاد تولید و مازاد مصرف به ازای هر دو فصل مشخص می‌گردد. جداول ۱ و ۲ به ترتیب، قطب‌های مازاد تولید و مازاد مصرف را برای فصول گرم و سرد در سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهند.

جدول ۲: قطب‌های مازاد تولید و مازاد مصرف در فصل گرم

قطب مازاد تولید	کشورهای تشکیل دهنده
۱	روسیه-آذربایجان-گرجستان-ارمنستان
۲	ازبکستان-ترکمنستان-تاجیکستان-قرقیزستان
قطب مازاد مصرف	کشورهای تشکیل دهنده
۱	ترکیه
۲	پاکستان-هند
۳	عراق-کویت
۴	افغانستان
۵	امارات-عمان

جدول ۳: قطب‌های مازاد تولید و مازاد مصرف در فصل سرد

قطب مازاد تولید	کشورهای تشکیل دهنده
۱	ترکیه
۲	ازبکستان، ترکمنستان، تاجیکستان و قرقیزستان
۳	عراق و کویت
۴	آذربایجان، روسیه، گرجستان و ارمنستان
۵	امارات و عمان
قطب مازاد مصرف	کشورهای تشکیل دهنده
۱	پاکستان-هند
۲	افغانستان

<sup>6</sup> Risk Aversion of Vicinity

# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

شاخص‌های پایه، تغییر محسوسی را در شاخص نهایی ایجاد خواهد کرد.

۴-

برای تعیین مسیر برقراری کربدورهای برون‌مرزی در فصول گرم و سرد، لازم است ابتدا قطب‌های تولید و مصرف شناسایی شوند. با پیاده‌سازی الگوریتم ذکر شده برای شاخص‌های شناسایی قطب‌های تولید و مصرف در بخش ۲، در مجموع هفت قطب شامل قطب‌های مازاد تولید و قطب‌های مازاد مصرف در دو فصل گرم و سرد سال در اطراف ایران شناسایی می‌گردند. در شکل ۱ این قطب‌ها با ترتیب شماره‌گذاری راستگرد نشان داده شده‌اند.



شکل ۱: شناسایی قطب‌های مازاد تولید و مصرف در اطراف ایران

جدول ۴ مقادیر محاسبه شده شاخص‌های نهایی بر اساس سه دیدگاه پیش‌گفته در بند ۳-۴ را جهت اولویت‌بندی مسیر برقراری کربدورهای برون‌مرزی در فصل گرم نشان می‌دهد. مطابق اطلاعات بخش ۲ و در فصل گرم، قطب‌های ۱ و ۲ دارای پتانسیل مازاد تولید بوده و بقیه قطب‌ها، دارای پتانسیل مازاد مصرف می‌باشند. بنابراین در حالت تمام‌شماری، بین تمام قطب‌های تولید و مصرف، امکان برقراری مسیر در نظر گرفته شده و شاخص‌های مورد نظر محاسبه می‌گردند. سپس بر اساس بزرگی شاخص محاسبه شده، اولویت‌بندی انجام می‌گیرد. به عنوان مثال در حالت شاخص  $L(\#1)$  مسیر کربدور ۱ به ۴ دارای بالاترین اولویت (رنگ زرد)، کربدور ۲ به ۷ دارای اولویت دوم (رنگ آبی) و کربدور ۱ به ۵ دارای اولویت سوم (رنگ قرمز) می‌باشد؛ برای دو شاخص دیگر هم همین تحلیل وجود دارد.

جدول ۵ نیز مقادیر شاخص‌های نهایی تصمیم‌ساز را برای

اهمیت است و ریسک‌های مختلفی را برای آن به وجود خواهد آورد. ریسک‌گریزی همجواری در بحث کربدورها بدین مفهوم است که اگر کشوری در مجاورت کشور دیگری باشد، ریسک احداث کربدور بین این دو کشور کمتر از حالتی است که بین این دو کشور، کشورهای دیگری نیز وجود داشته باشد. (برای توضیح بیشتر به [۱] مراجعه شود.)

## ۳-۴- شاخص تعیین کربدور نهایی به ازای هر فصل

حال با توضیحات داده شده و بیان شاخص‌های تصمیم‌ساز عمومی برای تعیین قطب‌های با پتانسیل مازاد تولید و مصرف، در این قسمت سه دیدگاه متفاوت برای تعیین شاخص نهایی تصمیم‌ساز برای پیشنهاد مسیر برقراری کربدورهای انتقال توان فصلی معرفی می‌گردد. این سه دیدگاه بر پایه سه شکل متفاوت ترکیب شاخص‌های معرفی شده در روابط (۱) تا (۳) می‌باشند.

۱. دیدگاه اول برای تعیین شاخص نهایی

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

در رابطه (۴)، ابتدا میانگین شاخص‌های کربدورپذیری و سطح توان قطب‌های تولید و مصرف  $k$  و  $k'$  محاسبه شده و سپس در شاخص ریسک‌گریزی همجواری بین این دو قطب ضرب می‌شود.

۲. دیدگاه دوم برای تعیین شاخص نهایی

$$L(\#2)^{kk'} = \frac{1}{4} W_3^{kk'} (W_1^k + W_2^k) (W_1^{k'} + W_2^{k'}) \quad (5)$$

با توجه به رابطه (۵)، ابتدا میانگین شاخص‌های کربدورپذیری و سطح توان برای هر کدام یک از قطب‌های تولید و مصرف  $k$  و  $k'$  به صورت جداگانه بدست آمده و سپس در مقدار شاخص ریسک‌گریزی همجواری ضرب می‌شوند.

۳. دیدگاه سوم برای تعیین شاخص نهایی

$$L(\#3)^{kk'} = W_3^{kk'} (W_1^k W_2^k W_1^{k'} W_2^{k'}) \quad (6)$$

بر اساس رابطه (۶)، تمامی شاخص‌های کربدورپذیری، سطح توان و ریسک‌گریزی همجواری قطب تولید و مصرف  $k$  و  $k'$  در یکدیگر ضرب می‌شوند. در این رابطه، میزان حساسیت شاخص نهایی به هر یک از شاخص‌ها در مقایسه با روابط (۴) و (۵) بیشتر شده و تغییر هر یک از



# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

استفاده از کریدورهای برون‌مرزی برای انتقال توان مازاد می‌باشد.

زمین در مدت ۲۴ ساعت یک بار دور خود می‌چرخد و کل زمین نیز دارای ۳۶۰ درجه طول جغرافیایی است. در نتیجه هر ۱۵ درجه تغییر در طول جغرافیایی، یک ساعت محسوب می‌شود. طول جغرافیایی تهران  $51^{\circ} 25' E$  می‌باشد. [۲۰] نماد E منظور شرق کره زمین می‌باشد که بصورت یک قرارداد برای بیان درجه از ۰ تا ۱۸۰ درجه نشان داده می‌شود. جدول ۶ طول جغرافیایی پایتخت شانزده کشور مورد بررسی در این مقاله را نشان می‌دهد [۲۰]. در ستون مجزا میانگین طول جغرافیایی کشورهای درون هر قطب محاسبه شده است. همچنین با تقریب مناسبی، تنها مقدار صحیح درجه طول جغرافیایی برای هر کشور بیان شده و از اجزا کوچکتر آن صرف‌نظر شده است.

جدول ۶: طول جغرافیایی کشورهای ۱۶ گانه و قطب‌های ۷ گانه

کشور	طول جغرافیایی	قطب	میانگین طول جغرافیایی (E)
گرجستان	۴۴	۱	۴۳/۵
روسیه	۳۷		
آذربایجان	۴۹		
ارمنستان	۴۴		
ترکمنستان	۵۸	۲	۶۷/۲۵
ازبکستان	۶۹		
تاجیکستان	۶۸		
قرقیزستان	۷۴		
افغانستان	۶۹	۳	۶۹
پاکستان	۷۳	۴	۷۵
هند	۷۷		
امارات	۵۵	۵	۵۶/۵
عمان	۵۸		
عراق	۴۴	۶	۴۵/۵
کویت	۴۷		
ترکیه	۳۲	۷	۳۲

مطابق این جدول، مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار طول جغرافیایی مربوط به قطب ۴ شامل کشورهای پاکستان و هند با مقدار ۷۵ درجه بوده و کمترین مقدار طول جغرافیایی مربوط به قطب ۷ یا همان کشور ترکیه با مقدار ۳۲ درجه می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار اختلاف طول جغرافیایی، مابین این دو و برابر با ۴۳ درجه می‌باشد.

اولویت‌بندی مسیر کریدورهای برون‌مرزی برای فصل سرد نشان می‌دهد. در فصل سرد، تنها قطب‌های ۳ و ۴ دارای پتانسیل مازاد مصرف می‌باشند و بقیه قطب‌ها دارای پتانسیل مازاد تولید هستند.

جدول ۴: شاخص‌های تصمیم‌ساز برای کریدورهای فصل گرم

بین دو قطب تولید و مصرف	$L(\#1)^{kk'}$	$L(\#2)^{kk'}$	$L(\#3)^{kk'}$
۳-۱	۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۰۲
۴-۱	۰/۷۷	۰/۶۴	۰/۴۱
۵-۱	۰/۶۳	۰/۴۱	۰/۰۶
۶-۱	۰/۵۳	۰/۳۶	۰/۱۷
۷-۱	۰/۴۵	۰/۳۹	۰/۳۱
۳-۲	۰/۲۴	۰/۰۸	۰/۰۱
۴-۲	۰/۵۹	۰/۴۷	۰/۲۶
۵-۲	۰/۰۶	۰/۳۸	۰/۰۵
۶-۲	۰/۶۳	۰/۴۲	۰/۱۷
۷-۲	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۴۲

جدول ۵: شاخص‌های تصمیم‌ساز برای کریدورهای فصل سرد

بین دو قطب تولید و مصرف	$L(\#1)^{kk'}$	$L(\#2)^{kk'}$	$L(\#3)^{kk'}$
۳-۱	۰/۳۳	۰/۱	۰/۰۱
۴-۱	۰/۵۵	۰/۳۲	۰/۰۹
۳-۲	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۰۱
۴-۲	۰/۵۱	۰/۳۵	۰/۱۵
۳-۵	۰/۳۳	۰/۱	۰
۴-۵	۰/۴۵	۰/۲۷	۰/۰۳
۳-۶	۰/۳۶	۰/۱۱	۰/۰۱
۴-۶	۰/۵۲	۰/۳۱	۰/۱
۳-۷	۰/۵۷	۰/۲	۰/۰۳
۴-۷	۰/۱۸	۰/۶۲	۰/۴

-۵

بر اساس الگوی مصرف روانه بار، اوج بار روزانه در ساعات مشخصی از روز رخ می‌دهد. به عنوان مثال در فصل گرم و در کشورهای گرمسیر، اوج بار در ساعات با بیشینه دما (بعدازظهر) رخ خواهد داد. همچنین با توجه به پهنه گسترده کشورهای منطقه در طول‌های جغرافیایی مختلف، ساعات اوج بار برای کشورهای دارای عرض جغرافیایی یکسان، نیز متفاوت است. این موضوع خود یکی از توجهات قوی بکارگیری مزیت‌های نسبی ظرفیت تولید کشورها و

# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

جدول ۷: نتایج نهایی اولویت‌بندی مسیر کریدورهای انتقال توان الکتریکی در افق ۲۰۲۰

اولویت	$FI_{kk'}$	بین دو قطب تولید و مصرف
اول	۱/۹۶	۴-۱
----	۰/۱۹	۵-۱
----	۰/۰۸	۷-۱
----	۰/۱۷	۴-۲
سوم	۱/۴۸	۷-۲
----	۰/۰۶۹	۴-۶
چهارم	۰/۴۹	۳-۷
دوم	۱/۸۲	۴-۷

مطابق جدول ۷، اولویت اول مسیر برقراری کریدور، بین دو قطب ۱ و ۴ می‌باشد. این کریدور بین کشورهای منطقه قفقاز و کشورهای پاکستان و هند می‌باشد. همانطور که مشهود است منطقه قفقاز دارای مازاد توان بالا و کشورهای هند و پاکستان دارای کمبود توان بالا می‌باشد. همچنین طول جغرافیایی میان این دو منطقه اختلاف بسیار زیادی دارد که خود بر نتیجه حاصله در انتخاب این مسیر، صحنه‌گذار خواهد بود.

اولویت دوم در مسیر برقراری کریدور به دو قطب ۴ و ۷ برمی‌گردد. این دو قطب شامل کشور ترکیه با مازاد توان و کشورهای هند و پاکستان با کمبود توان می‌باشد. در این مسیر کریدور نیز تفاوت طول جغرافیایی بسیار زیاد است و این مسیر کریدور توجه بالایی برای احداث خواهد داشت. توجه شود با توجه به اینکه مسیر کریدور اول و دوم یک نقطه همپوشانی در کشورهای هند و پاکستان دارند و همچنین منطقه قفقاز و کشور ترکیه نیز به یکدیگر نزدیک هستند، می‌توان عملاً هر دو را یکسان پنداشت و با ایجاد ناحیه شمال غربی با پیوستن ترکیه به منطقه قفقاز، مسیر کریدوری از سمت شمال غربی ایران به سمت جنوب شرقی ایجاد کرد و به این ترتیب یک کریدور بزرگ با محوریت ایران را تشکیل داد.

مسیر کریدور سوم بین دو قطب ۲ و ۷ بوده که در قطب ۲ کشورهای شمال شرقی ایران با پتانسیل مازاد تولید قرار دارند و قطب ۷ نیز کشور ترکیه در وضعیت مازاد مصرف در فصل گرم سال قرار دارد. این دو قطب نیز دارای تفاوت طول جغرافیایی وسیعی می‌باشند.

حال می‌توان شاخص طول جغرافیایی برای هر جفت قطب تولید و مصرف را بصورت رابطه (۷) بیان کرد که در آن اختلاف طول جغرافیایی میان دو قطب تقسیم بر بیشترین مقدار اختلاف طول جغرافیایی شده تا اعداد یکه گردند.

$$LI_{kk'} = \frac{L_k - L_{k'}}{43} \quad (7)$$

براساس رابطه فوق،  $LI_{kk'}$  شاخص طول جغرافیایی<sup>۷</sup> میان دو قطب  $k$  و  $k'$  بوده و مقادیر  $L_k$  و  $L_{k'}$  مقادیر طول جغرافیایی در هر یک از قطب‌های تولید و مصرف می‌باشند.

براساس رابطه (۷)، هرچه مقدار شاخص طول جغرافیایی بیشتر باشد یعنی دو قطب تولید و مصرف فاصله بیشتری از هم دارند و پهنه گسترده‌تری را شامل می‌شوند؛ بر این اساس این دو قطب پتانسیل بیشتری برای جبران پیک بار روزانه و نتیجتاً شرایط بهتری برای تبادل برق خواهند داشت.

حال شاخص نهایی با ترکیب شاخص‌های فصلی و شاخص روزانه برای اولویت‌بندی مسیر کریدورهای برون‌مرزی بصورت رابطه (۸) بیان می‌گردد. مشخصاً هر چه این شاخص مقدار بالاتری داشته باشد، مسیر کریدور اولویت بالاتری خواهد داشت.

$$FI_{kk'} = LI_{kk'} \left( L(\#1)^{kk'} + L(\#2)^{kk'} + L(\#3)^{kk'} \right) \quad (8)$$

در رابطه فوق  $FI_{kk'}$  مقدار شاخص نهایی<sup>۸</sup> و مقادیر  $L$  بر اساس جداول ۴ و ۵ می‌باشد.

مطابق نتایج بدست آمده از جداول ۴ و ۵، پنج مسیر کریدور در فصل گرم و پنج مسیر کریدور در فصل سرد مشخص می‌گردند. با توجه به اینکه دو کریدور از این دو فصل با یکدیگر همپوشانی دارند، در نهایت هشت کریدور با اولویت‌های بر اساس شاخص‌های سه‌گانه حاصل می‌شود. حال با اعمال رابطه (۸) بر روی این هشت کریدور، مسیرهای نهایی کریدورهای برون‌مرزی با تلفیق اولویت‌بندی فصلی و روزانه مشخص خواهند شد. جدول ۷ نتایج این تحلیل را نشان می‌دهد.

<sup>7</sup> Longitude Index

<sup>8</sup> Final Index



# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

می‌توان تحقق مسیرهای کریدورهای پیشنهادی به کشورهای اطراف را از طریق شبکه داخلی ایران انجام داد و با این کار از ظرفیت شبکه ایران برای انتقال توان به سمت کشورهای هدف استفاده کرد. در این مسیر می‌توان مشابه برنامه‌ریزی‌های شبکه انتقال سایر کشورها، برنامه‌ریزی ایجاد ظرفیت‌های انتقال داخلی و برون‌مرزی را به صورت توأم در نظر گرفت و ایجاد مسیرهای انتقال توان برون‌مرزی را در برنامه‌ریزی‌های آتی توسعه شبکه برق کشور لحاظ کرد. این موضوع خود گام مهمی در به منصف ظهور رساندن تفکر هاب انرژی الکتریکی ایران و آن هم از مسیر افزایش سهم ایران در تبادلات منطقه‌ای برق و تاثیرگذاری در نقشه تبادلات الکتریکی منطقه است.

۶-

در این مقاله به امکان‌سنجی تبدیل ایران به عنوان مرکز انرژی الکتریکی (هاب انرژی) منطقه در افق ۲۰۲۰ و با تکیه بر مسیرهای با ظرفیت بالای انتقال توان پرداخته شد. در این مسیر مزیت‌های نسبی و انگیزه‌های لازم برای برقراری تبادلات برق بین کشورهای منطقه در قالب قطب‌های مازاد تولید و نیاز مصرف، به عنوان پایه مطالعات بیان شد. دو ویژگی مهم تغییرات فصلی تولید و مصرف و تغییرات روزانه مصرف در قالب اختلاف قابل توجه در عرض و طول جغرافیایی کشورهای منطقه از مزیت‌های مهم در برقراری ارتباط به منظور استفاده از ظرفیت‌های کشورهای منطقه است که در این بین کشور ایران به واسطه قرار گرفتن در مرکز این ارتباطات، به خوبی می‌تواند در زمینه برقراری ارتباطات و به تعبیر دیگر هاب انرژی منطقه، نقش‌آفرینی کرده و موجب ایجاد شاهراه‌های ارتباطی شرق-غرب و شمال-جنوب گردد.

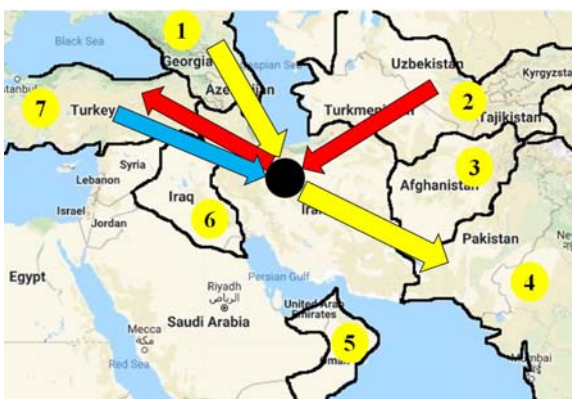
[۱] علی آرانی‌زاده، محمد جعفریان، همایون برهمندپور، مونا رنجبر، عباسعلی امیرفرخ‌ریان، "شناسایی کریدورهای تبادل انرژی الکتریکی به منظور تبدیل ایران به قطب انرژی منطقه براساس مطالعات تطبیقی"، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران، آبان ۱۳۹۶.

[2] Haikel Khalfallah, "Connecting Mediterranean countries through electricity corridors: New Institutional Economic and regulatory

علاوه بر سه مسیر گفته شده در بالا، می‌توان مسیر چهارمی را نیز معرفی کرد. این مسیر دارای شاخص ۰/۴۹ و در رتبه چهارم اولویت‌بندی می‌باشد که نسبت به بقیه کریدورهای حذف شده دارای مقدار قابل‌توجهی است. قطب‌های این مسیر دو کشور ترکیه و افغانستان می‌باشند.

با جمع‌بندی کریدورهای برون‌مرزی مشخص شده با محوریت ایران در افق ۲۰۲۰، شکل ۲ بدست خواهد آمد. در این شکل رنگ زرد بیان‌کننده اولویت اول، رنگ آبی اولویت دوم و رنگ قرمز اولویت سوم می‌باشد. تمامی این کریدورها از قطب مبدا وارد کشور ایران شده و سپس به قطب مقصد می‌رسد.

توجه شود قطب کشور ترکیه هم ورودی و هم خروجی است و این موضوع ناشی از تفاوت توان این کشور در فصول گرم و سرد سال می‌باشد. این موضوع خود بیان‌کننده خاصیت دوجهته بودن کریدورهای پیشنهادی می‌باشد. هرچند در شکل ۲ از نماد جهت برای مسیر کریدور استفاده شده است، ولی این جهت ناشی از جهت فلوی غالب بوده است و در حالت کلی هرکدام از این کریدورها ممکن است دوجهته باشد و توان به قطب موردنظر وارد و یا خارج شود.



شکل ۲: نتایج نهایی کریدورهای انتقال توان الکتریکی پیشنهادی در افق ۲۰۲۰ با محوریت ایران

نکته مهم دیگری که می‌بایست در نظر گرفت اینست که لزومی ندارد این مسیرهای کریدور حتماً به صورت مجزا از شبکه ایران کشیده شوند؛ زیرا همانطور که گفته شد دو شکل تحقق برقراری کریدور شامل کریدور خط انتقال و کریدور شبکه انتقال وجود دارد. لذا با توجه به شبکه برق قدرتمند ایران و پتانسیل بالایی که این شبکه در ایجاد مسیرهای توان با ظرفیت بالا میان کشورهای همسایه دارد،

# دوازدهمین همایش بین‌المللی انرژی

- Assistance Consultant's Report; ADB; 2014.
- [15] 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;
- [16] Central Asia-South Asia Electricity Transmission and trade (CASA-1000) Project Feasibility Study Update; Appendices I; 2011.
- [17] "Uzbekistan Energy / Power Sector Issues Note"; The world Bank; 2013.
- [18] "Presentation of Strategy Development Presidency"; Ministry of Energy and Natural Resources; 2014.
- [19] <https://www.indexmundi.Com>
- [۲۰] ویکی‌پدیا، دانشنامه آزاد.
- analysis", Utilities Policy, pp 45-54, Vol. 32, 2015.
- [۳] علی آرائی‌زاده، محمد جعفریان، همایون برهمندپور، "تبیین چشم‌انداز فناوری‌های HVDC و EHVAC برای ایران با توجه به کریدورهای اصلی انتقال توان الکتریکی در افق ۱۴۱۰، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران، آبان ۱۳۹۶.
- [4] 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](https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bs/ENCOURAGED/WP/ENCOURAGED_Powertech-2007_paper_461-vailati-hartmann.pdf).
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] "Preparatory Survey on Yashma Gas Combined cycle Power Plant Project" Japan International Cooperation Agency (JICA); August 2014.
- [8] "Ten-Year Network Development Plan of Georgia for 2015 - 2025" Transmission System Operator JSC (Georgia State Electrosystem); 2015.
- [9] 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
- [10] 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.
- [۱۱] گزارش "تدوین قیود تبادلات برق و گاز برای سناریوهای مطالعاتی"; گزارش مرحله‌ای پروژه "برنامه‌ریزی بلند مدت نحوه تبادلات حامل‌های انرژی بین ایران و کشورهای همسایه"; مرکز توسعه فناوری سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی؛ بهمن ماه ۱۳۹۵.
- [12] <http://www.gccia.com.sa>
- [13] Cross-Border Electricity Trade in South Asia: key Policy, Regulatory Issues/ challenges and the way forward; USAID, January 2016.
- [14] "Afghanistan: Addendum to the Afghanistan Power Sector Master Plan"; Technical