



مجید آریانزاد

پژوهشگر حوزه انرژی و اقتصاد

و محدودیت‌های تجاری نیز می‌تواند دسترسی به برخی تجهیزات تخصصی، نرم‌افزارها، خدمات مهندسی یا همکاری‌های فناورانه را دشوار کنند. در چنین شرایطی، راهبردی مناسب نه اتکال کامل به واردات و نه اصرار بر ساخت فوری تمام اجزا در داخل کشور است. مسیر واقع‌بینانه می‌تواند بر ترکیبی از ظرفیت داخلی، همکاری‌های فناورانه در دسترس، خرید هدفمند تجهیزات خاص و انتقال تدریجی دانش فنی استوار باشد. برای تحقق این هدف، می‌توان یک برنامه مرحله‌ای تعریف کرد: نخست، ارزیابی دقیق توان سازندگان و آزمایشگاه‌های داخلی؛ سپس تعیین تجهیزات قابل ساخت در داخل و موارد نیازمند تأمین خارجی؛ پس از آن، اجرای مطالعات تفصیلی و آزمون‌های لازم؛ و در نهایت، اجرای یک پروژه محدود و قابل ارزیابی، مشروط به اثبات توجیه فنی و اقتصادی. تصمیم برای توسعه گسترده باید به نتایج این مراحل وابسته باشد، نه صرفاً به هدف‌گذاری اولیه.

شبکه انتقال و فرصت تبادل منطقه‌ای

توسعه شبکه انتقال می‌تواند در بلندمدت به افزایش امکان تبادل برق با کشورهای همسایه نیز کمک کند؛ اما این هدف به‌صورت خودکار از احداث خطوط فشارقوی در داخل کشور حاصل نمی‌شود. تبادل منطقه‌ای به ظرفیت واقعی شبکه‌های دو سوی مرز، سازگاری فرکانسی و الزامات پایداری، هماهنگی حفاظت و کنترل، ظرفیت مسیرهای داخلی، قراردادهای تجاری و توافقات بهره‌برداری وابسته است. از این منظر، ارتباط احتمالی شبکه ایران با کشورهای منطقه، از جمله همسایگان شمالی و حوزه خلیج فارس، بهتر است در قالب یک برنامه بلندمدت توسعه شبکه و تبادل انرژی بررسی شود. برای چنین برنامه‌ای، علاوه بر ظرفیت انتقال داخلی، باید مسیرهای مرزی، پست‌های اتصال، پایداری شبکه، سازوکارهای تسویه تجاری و ریسک‌های سیاسی و اقتصادی نیز ارزیابی شوند.

جمع‌بندی؛ ولتاژ بالاتر، فقط وقتی که مسئله را

حل کند

تجربه حدود شش دهه توسعه خطوط فشارقوی در جهان یک پیام مشترک دارد: افزایش ولتاژ می‌تواند ظرفیت انتقال را بالا ببرد و در شرایط مناسب، نیاز به احداث خطوط متعدد را کاهش دهد؛ اما این فناوری تنها زمانی به نتیجه مطلوب می‌رسد که با نیاز واقعی شبکه، توجیه اقتصادی، برنامه‌ریزی بلندمدت و توانایی بهره‌برداری هماهنگ باشد. برای ایران، موضوع اصلی انتخاب میان ۴۰۰ و ۷۶۵ کیلوولت به‌صورت انتزاعی نیست. باید مشخص شود کدام محدودیت‌ها با تقویت شبکه موجود برطرف می‌شوند، کدام مسیرها به ظرفیت انتقال بیشتری نیاز دارند و در چه شرایطی خطوط فشارقوی‌تر یا فناوری جریان مستقیم فشارقوی (HVDC) می‌توانند مزیت ایجاد کنند. هم‌زمان، توسعه توان صنعتی باید بر اساس ارزیابی واقعی ظرفیت سازندگان، آزمون تجهیزات، استانداردهای فنی و امکان تأمین پایدار قطعات پیش برود.

اگر مطالعات نشان دهند که در یک یا چند کریدور مشخص، انتقال حجم بالای برق در فاصله طولانی با خطوط ۷۶۵ کیلوولت از نظر فنی و اقتصادی بر گزینه‌های دیگر برتری دارد، این فناوری می‌تواند به یکی از محورهای توسعه آینده شبکه ایران تبدیل شود. در غیر این صورت، تقویت شبکه ۴۰۰ کیلوولت، اصلاح آرایش شبکه، توسعه تجهیزات کنترلی یا استفاده از HVDC ممکن است پاسخ مناسب‌تری باشد.

در نهایت، آینده شبکه برق ایران نه با انتخاب یک عدد روی نقشه، بلکه با شناخت دقیق محدودیت‌ها، مقایسه گزینه‌ها و پیوند دادن سرمایه‌گذاری زیرساختی با توان مهندسی و صنعتی تعیین می‌شود. ۷۶۵ کیلوولت می‌تواند بخشی از این آینده باشد؛ اما تنها زمانی که مطالعات، نیاز واقعی شبکه و منافع اقتصادی آن را تأیید کنند.

درس آموخته‌هایی از کشورهای صنعتی برای درمان ناترازی برق ایران

ناترازی برق ایران تنها ناشی از کمبود تولید نیست؛ گستردگی جغرافیایی کشور، پراکندگی مراکز تولید و مصرف و محدودیت ظرفیت انتقال نیز در آن نقش دارند. با تغییر فصل، کانون‌های عرضه و تقاضای برق جابه‌جا می‌شوند و شبکه برق کشور همیشه توانایی انتقال برق از مناطق دارای مازاد تولید به مناطق نیازمند مصرف را ندارد. برآوردهای وزارت نیرو نشان می‌دهد ظرفیت انتقال در برخی کریدورهای اصلی شبکه ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت با محدودیتی در حدود ۴۳۰۰ مگاوات روبه‌روست؛ درحالی‌که برنامه‌های توسعه، افزایش این ظرفیت به حدود ۱۰ هزار مگاوات در مرحله نخست و ۲۰ هزار مگاوات در مرحله بعد را هدف گرفته‌اند.

از همین رو، افزایش ظرفیت انتقال و بررسی گزینه‌هایی مانند خطوط ۷۶۵ کیلوولت، سال‌هاست در دستور کار صنعت برق ایران قرار دارد. کشورهای صنعتی نیز از دهه‌ها پیش با چالش مشابهی مواجه بوده‌اند و تجربه‌هایی از آمریکای شمالی و روسیه تا ژاپن، آلمان و چین اندوخته‌اند. این تجربه‌ها نشان می‌دهند چگونه می‌توان محدودیت انتقال را کاهش داد و از ظرفیت شبکه برق کارآمدتر استفاده کرد.

اما این تجربه ۶۰ ساله چه درس‌هایی برای ایران دارد و کدام راهکارها با شرایط فنی، اقتصادی و اجرایی کشور سازگارند؟

جهان چرا به سراغ ولتاژهای بالاتر رفت؟

نخستین پاسخ را باید در کانادا پیدا کرد. در دهه ۱۹۶۰، ایالت کبک با رشد سریع مصرف برق و توسعه نیروگاه‌های آبی در مناطق دور از مراکز مصرف روبه‌رو شد. شبکه ۳۱۵ کیلوولت دیگر برای انتقال حجم‌های جدید کافی نبود. نتیجه، نخستین خط تجاری ۳۷۵ کیلوولت جهان در سال ۱۹۶۵ بود؛ خطی که برای انتقال برق نیروگاه‌های دوردست به مناطق مصرف ساخته شد. شرکت هیدرو کبک بعدها توضیح داد که یک خط ۳۷۵ کیلوولت می‌تواند از نظر ظرفیت انتقال تقریباً جایگزین چهار خط ۳۱۵ کیلوولت شود.

درس کانادا برای ایران روشن است: وقتی منابع تولید از مراکز مصرف فاصله زیادی دارند و حجم انتقال دائماً بزرگ‌تر می‌شود، افزایش ظرفیت با اضافه‌کردن بی‌پایان خطوط موجود همیشه بهترین پاسخ نیست. گاهی باید «سطح ولتاژ انتقال» را تغییر داد. آمریکا نیز مسیر مشابهی را، اما با شرایط متفاوت، طی کرد. شرکت (AEP American Electric Power) از سال ۱۹۶۱ آزمایش‌های مربوط به ۷۶۵ کیلوولت را در مرکز آزمایشی خود آغاز کرد و پس از سال‌ها تحقیق، نخستین خط عملیاتی ۷۶۵ کیلوولت جهان را در سال ۱۹۶۹ به بهره‌برداری رساند. امروز شبکه ۷۶۵ کیلوولت این شرکت بیش از ۲۲۰۰ مایل را در برمی‌گیرد. نکته مهم‌تر آن است که AEP برای این فناوری فقط خط ناساخت؛ آزمایشگاه، استانداردهای طراحی، تجهیزات آزموده‌شده و دانش مهندسی اختصاصی ایجاد کرد.

این تجربه برای ایران یک پیام اساسی دارد: توسعه شبکه انتقال در ولتاژهای بالاتر، صرفاً یک پروژه عمرانی و ساختمانی نیست؛ بلکه به یک جهش فناورانه و مجموعه‌ای به هم پیوسته از دانش فنی، تجهیزات تخصصی، استانداردها، آزمایشگاه‌های فشارقوی و توانمندی‌های مهندسی نیاز دارد.

روسیه یک درس متفاوت دارد: سطح ولتاژ بالاتر همیشه بهتر نیست.

اتحاد جماهیر شوروی از دهه ۱۹۵۰ روی انتقال در سطوح ۶۰۰ تا ۷۵۰ کیلوولت کار می‌کرد. یکی از نقاط مهم این مسیر در سال ۱۹۶۷ رقم خورد؛ زمانی که خط ۷۵۰ کیلوولت کوناکوف-مسکو، با طول حدود ۹۰ کیلومتر، وارد مدار شد. هدف این نبود که یک خط ۹۰ کیلومتری به تنهایی مسئله انتقال برق شوروی را حل کند. اهمیت اصلی آن در این بود که فناوری ۷۵۰ کیلوولت در مقیاس واقعی شبکه آزموده شود؛ رفتار خط، تجهیزات پست، عایق‌بندی، کرونا، تلفات و مسائل بهره‌برداری اندازه‌گیری شود و نتایج این تجربه به طراحی‌های بعدی بازگردد. سپس در سال ۱۹۷۵، خط ۷۵۰ کیلوولت لنینگراد-کوناکوف با طول حدود ۵۲۵ کیلومتر به بهره‌برداری رسید. اتحاد جماهیر شوروی حتی بلندپروازانه‌تر عمل کرد و در دهه ۱۹۸۰ به سراغ ۱۱۵۰ کیلوولت رفت. خط

اکیباستوز-کوکتاو-کوستانی در سال ۱۹۸۵ وارد بهره‌برداری شد. اما پس از فروپاشی شوروی و تغییر شرایط اقتصادی، بهره‌برداری در سطح ۱۱۵۰ کیلوولت ادامه نیافت و خط به ۵۰۰ کیلوولت کاهش سطح بهره‌برداری داد.

این تجربه شاید برای ایران از خود فناوری ۱۱۵۰ کیلوولت مهم‌تر باشد: زیرساخت بزرگ باید متناسب با اقتصاد، الگوی تولید و مصرف و آینده قابل پیش‌بینی کشور ساخته شود. ساخت یک شبکه عظیم بدون اطمینان از اینکه طی چند دهه واقعاً به آن نیاز خواهد بود، می‌تواند سرمایه‌گذاری سنگینی را به یک دارایی کم‌استفاده تبدیل کند.

ژاپن؛ آدامه‌سازی برای آینده، بدون بهره‌برداری فوری

ژاپن در دهه ۱۹۷۰ مطالعه جدی برای شبکه انتقال فوق‌العاده پرنظریات را آغاز کرد و در دهه ۱۹۸۰ خطوطی با طراحی ۱۰۰۰ کیلوولت ساخت. خطوط غرب گونما، جنوب نیگاتا، شرق گونما و جنوب ایواکی از اواخر دهه ۱۹۸۰ تا دهه ۱۹۹۰ ساخته شدند؛ اما نکته بسیار جالب این است که این خطوط، با وجود طراحی برای ۱۰۰۰ کیلوولت، در بخش‌هایی با ۵۰۰ کیلوولت بهره‌برداری شدند. ژاپن در واقع یک درس بسیار هوشمندانه به ما می‌دهد: لازم نیست امروز تمام ظرفیت فردا را مصرف کنیم؛ می‌توان زیرساخت را برای آینده آماده کرد.

در ایران نیز اگر روزی احداث کریدورهای بسیار پرنظریات مطرح شود، طراحی مرحله‌ای می‌تواند از یک سرمایه‌گذاری پریسک جلوگیری کند؛ به گونه‌ای که بخشی از زیرساخت از ابتدا برای توسعه آینده آماده باشد، اما بهره‌برداری متناسب با نیاز واقعی انجام شود.

آلمان نشان داد که همیشه پاسخ در ولتاژ بالاتر نیست

آلمان مسیر متفاوتی را انتخاب کرده است. در شبکه این کشور، ۳۸۰ کیلوولت همچنان نقش مهمی دارد و برای انتقال مقادیر بزرگ برق در محورهای شمال-جنوب، به‌ویژه با رشد تولید نیروگاه‌های بادی در شمال، توسعه خطوط جریان مستقیم با ظرفیت بالا در دستور کار قرار گرفته است. در سال ۲۰۲۵ مجوزهای مهمی برای چهار «بزرگراه برق» شمال-جنوب از جمله SuedLink و SuedOstLink صادر شد.

درس آلمان برای ایران شاید از همه مهم‌تر باشد: مسئله را نباید از پیش به یک فناوری خاص گره زد. گاهی تقویت ۴۰۰ کیلوولت بهترین پاسخ است؛ گاهی خط جدید، گاهی جریان مستقیم، گاهی جبران‌سازی و کنترل بهتر شبکه و گاهی یک کریدور ۷۶۵ کیلوولت.

چین اما به یک نکته دیگر پاسخ داد: مقیاس چین از نظر جغرافیایی انرژی شاید یکی از نزدیک‌ترین نمونه‌ها به

تجربه کشورهای منتخب در توسعه شبکه‌های انتقال برق و دلالت‌های سیاستی آن برای ایران			
کشور / تجربه شاخص	مسئله یا رویکرد اصلی	درس قابل استفاده برای ایران	نماد یا نکته شاخص
کانادا ۷۳۵ کیلوولت، ۱۹۶۵	انتقال برق‌آبی از مناطق دوردست و کاهش نیاز به خطوط متعدد	بررسی افزایش ولتاژ در کریدورهای پرتراکم و طولانی	خط ۷۳۵ کیلوولت (کانادا)
آمریکا ۷۶۵ کیلوولت، ۱۹۶۹	توسعه شبکه همراه با استانداردهای مهندسی و آزمون تجهیزات	سرمایه‌گذاری هم‌زمان در خطوط، پست‌ها، آزمایشگاه‌ها و دانش فنی	شبکه ۷۶۵ کیلوولت (AEP)
شوروی سابق ۱۱۵۰ کیلوولت، ۱۹۷۵	توسعه زیرساختی بسیار بزرگ که پس از تغییر شرایط، بخش‌هایی از آن با ۵۰۰ کیلوولت بهره‌برداری شدند	تناسب ظرفیت طراحی با تقاضای آینده و توجیه اقتصادی	خط ۱۱۵۰ کیلوولت (اکیباستوز-کوکتاو)
ژاپن طراحی برای ۱۰۰۰ کیلوولت اواخر دهه ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰	آماده‌سازی زیرساخت برای توسعه آتی، بدون بهره‌برداری فوری در سطح طراحی	امکان طراحی مرحله‌ای و توسعه متناسب با رشد تقاضا	خطوط ۱۰۰۰ کیلوولت (طراحی‌شده)
آلمان بزرگراه‌های برق HVDC ۲۰۲۵	استفاده از جریان مستقیم فشارقوی برای انتقال توان در مسیرهای طولانی؛ نمونه: SuedLink	مقایسه جریان متناوب و مستقیم به‌جای فرض برتری قطعی ۷۶۵ کیلوولت	خطوط HVDC (SuedLink)
چین توسعه شبکه‌های فوق‌العاده فشارقوی	توسعه زیرساخت انتقال همراه با توانمندی‌های صنعتی و زنجیره تأمین	پیوند توسعه شبکه با ساخت داخل، آزمون، آموزش و تأمین پایدار تجهیزات	شبکه‌های فوق‌العاده فشارقوی
جمع‌بندی، پیام مشترک همه کشورها برای ایران: هیچ فناوری واحدی برای همه شرایط مناسب نیست؛ انتخاب راهکار باید متناسب با شرایط شبکه، اقتصاد پروژه و توانمندی‌های داخلی کشور باشد.			