

رابطه متغیرهای آب‌وهوایی با مصرف برق و پیش‌بینی تقاضای برق با مدل‌های گردش عمومی جو در غرب ایران

افسانه سلمانی - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه
فیروز مجرد* - دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

چکیده

پیش‌بینی مقدار مصرف برق، با توجه به شرایط آب‌وهوایی، می‌تواند در تنظیم استراتژی‌های تولید و توزیع آن نقش مهمی ایفا کند. هدف از این پژوهش، بررسی رابطه بین متغیرهای آب‌وهوایی با مصرف برق و پیش‌بینی مصرف برق تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم در منطقه غرب کشور است. به این منظور، رابطه بین متغیرهای آب‌وهوایی و مصرف برق در سیزده ایستگاه منطقه در دوره ۲۸ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۴) با استفاده از معادلات رگرسیون چندگانه مدل‌سازی شد. در صورت معنادار بودن مدل‌ها، براساس داده‌های آب‌وهوایی مدل CCSM4، مصرف برق در ایستگاه‌ها طی دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۸۰ تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برآورد شد. نتایج نشان داد درجه-روزهای سرمایشی و گرمایشی و رطوبت نسبی بیشترین تأثیر معنی‌دار را در افزایش مصرف برق دارند. میانگین دماهای حداقل و حداکثر در منطقه در دوره آتی (۲۰۱۲-۲۰۸۰) به طور متوسط تحت سناریوی RCP4.5 به ترتیب ۱/۹۵ و ۲/۰۱ و تحت سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۳/۴۶ و ۳/۸۱ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. از این رو، میزان مصرف برق در دوره گرم سال براساس سناریوی RCP4.5 در حدود ۸۰ درصد و براساس سناریوی RCP8.5 در حدود ۱۵۰ درصد افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش مربوط به ایستگاه‌های گرمسیری غرب منطقه و کمترین آن مربوط به ایستگاه‌های سردسیر کوهستانی است.

واژگان کلیدی: رگرسیون خطی چندگانه، غرب ایران، متغیرهای آب‌وهوایی، مدل‌های گردش عمومی جو، مصرف برق.

مقدمه

امروزه، انرژی الکتریکی یکی از حامل‌های مهم انرژی کشور، نهاده‌ای مؤثر در تولید، و کالایی حیاتی در مصرف به شمار می‌رود. آگاهی از میزان تقاضای انرژی الکتریکی در هر دوره به‌منظور برنامه‌ریزی دقیق و اعمال سیاست‌های مناسب امری مهم و درخور توجه است. پیش‌بینی تقاضای برق در مقاطع بلندمدت جهت یافتن نیازهای آتی برای توسعه نیروگاه‌های کشور ضروری است (لطفعلی‌پور و همکاران، ۱۳۹۲: ۵۸). پروسه تولید، توزیع، و انتقال انرژی برق، با توجه به ارقام بالای هزینه‌ای این جریان، باید برنامه‌ریزی شده و مطابق با میزان تقاضای آن باشد. بنابراین، در صورت ایجاد هرگونه اختلال در برقراری تعادل بین تقاضای بخش‌های مختلف و عرضه آن، خسارات سنگینی بر پیکره اقتصاد کشور وارد می‌شود. اما پیش‌بینی دقیق میزان تقاضای آینده، نه تنها از تحمیل چنین هزینه‌هایی جلوگیری می‌کند، بلکه به عنوان نمونه در حوزه صنعت برق به تنظیم میزان تولید نیروگاه‌ها، بهبود کارایی بازار برق، شفافیت قیمت‌گذاری، کاهش

خاموشی، و افزایش کیفیت برق تحویلی منجر می‌شود. همچنین، یکی از پیش‌شرط‌های حرکت به سمت بازارهای رقابتی، که بیشترین بهره‌مندی را برای نیروهای بازار فراهم می‌کند، داشتن اطلاعات دقیق و کامل از جریان‌ات بازار به ویژه میزان تقاضاست (یاوری و ذوالفقاری، ۱۳۹۱: ۲). شمار جمعیت، حجم فعالیت‌های صنعتی و اقتصادی، و وضعیت آب‌وهوا از عوامل تأثیرگذار بر میزان مصرف برق است (جلایی و همکاران، ۱۳۹۲: ۷۱). از آن میان، آب‌وهوا یکی از کلیدی‌ترین عوامل تأثیرگذار بر میزان مصرف برق است و، با توجه به نقش شرایط آب‌وهوایی در میزان تقاضای انرژی برق، برای تأمین نیازهای سرمایه‌ی به خصوص افزایش بی‌سابقه مصرف برق در تابستان طی سال‌های اخیر و افزایش قطعی برق، شناسایی عوامل اقلیمی تأثیرگذار و تعیین نقش هر یک از این عوامل در زمینه برنامه‌ریزی‌های مربوط به این صنعت بسیار حائز اهمیت است.

گسترده‌ی سرزمین ایران در عرض‌های جغرافیایی مختلف و تنوع ناهمواری‌ها از یک سو و ورود سامانه‌های سینوپتیکی متفاوت در طی سال از سوی دیگر (مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۳: ۸۳) باعث شده است تا مناطق مختلف کشور از لحاظ زمانی و مکانی شرایط اقلیمی متفاوتی را تجربه کنند. پدیده تغییر اقلیم نیز، که در سال‌های اخیر شدیدتر شده، اوضاع را پیچیده‌تر کرده است. بدون شک، تغییرات آب‌وهوایی و به ویژه دما در افزایش یا کاهش به‌کارگیری وسایل گرمایشی و سرمایشی مؤثر است (شکوری گنجوی و نظرزاده، ۱۳۸۳: ۲۸). بنابراین، ارائه مدلی کارا برای پیش‌بینی تقاضای برق، با توجه به شرایط خاص کشور، از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. تاکنون در این زمینه تلاش‌های زیادی به عمل آمده است. آل‌زایر و آل‌ابراهیم (۱۹۹۶: ۹۷) در عربستان با استفاده از مدل‌های رگرسیونی رابطه بین دما و مصرف برق را طی سال‌های ۱۹۸۶-۱۹۹۰ بررسی کردند. آنان بیان کردند که دما نقش مهمی در تقاضا برای انرژی برق دارد و مصرف برق در دوره‌های مختلف سال، با توجه به شرایط آب‌وهوایی، متفاوت است. یان (۱۹۹۸: ۱۷) در هنگ‌کنگ، با استفاده از داده‌های ماهانه و تحلیل رگرسیون چندگانه، تأثیر متغیرهای اقلیمی بر تغییرات مصرف برق خانگی بین سال‌های ۱۹۴۴-۱۹۸۰ را بررسی کرد. براساس یافته‌های وی، میانگین دما به شدت با مصرف برق ارتباط دارد. اما فشار بخار رابطه‌ای با مصرف برق ندارد و فقط برنایکی، آن هم در فصل تابستان، رابطه معنی‌دار با مصرف برق دارد. کامرشن و پورتر (۲۰۰۴: ۸۷)، با استفاده از روش تطبیق جزئی و روش معادله هم‌زمان، تقاضای برق خانگی و صنعتی را در ایالات متحده آمریکا طی سال‌های ۱۹۷۳-۱۹۹۸ برآورد کردند. آن‌ها دریافته‌اند که آب‌وهوا اثر بارزی بر مصرف برق بخش خانگی دارد و از این نظر اثر آب‌وهوای سرد بیش از آب‌وهوای گرم است. هور و همکاران (۲۰۰۵: ۲۰۷۸) به ارزیابی اثر متغیرهای آب‌وهوایی بر مصرف برق در انگلستان و ولز پرداختند. آنان، برای پیش‌بینی تقاضای ماهانه مصرف برق، از مدل‌های رگرسیونی چندگانه بر پایه متغیرهای اقلیمی، تولید ناخالص داخلی، و رشد جمعیت استفاده کردند. گرچه دقت پیش‌بینی بهترین مدل برای فصول زمستان و تابستان کمتر بود، توانست به ترتیب ۹۵ و ۹۱ درصد از تغییرات تقاضای برق را در دو دوره ۱۹۸۳-۱۹۹۵ و ۱۹۹۹-۲۰۰۳ تبیین کند. این امر می‌تواند وابستگی غیرخطی تقاضا را در دماهای حدی سرد و گرم به خوبی منعکس کند. همچنین، ورود اثر رطوبت نسبی به مدل، تقاضای مصرف برق را در ماه‌های تابستان بهتر تبیین کرد.

بسک و فوکو (۲۰۰۸: ۲۷۰۵) با استفاده از مدل‌های رگرسیونی به بررسی ارتباط بین تقاضای برق و دما در پانزده کشور عضو اتحادیه اروپا طی دو دهه اخیر پرداختند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده ارتباطی غیرخطی بین مصرف برق و دما به خصوص در کشورهایی با آب‌وهوای گرم بود. همچنین، مشخص شد که حساسیت مصرف برق به دما در تابستان طی سال‌های اخیر افزایش یافته است. واین (۲۰۰۸: ۱) تغییرات آب‌وهوا را به عنوان چالشی مهم و اثرگذار بر تقاضای برق

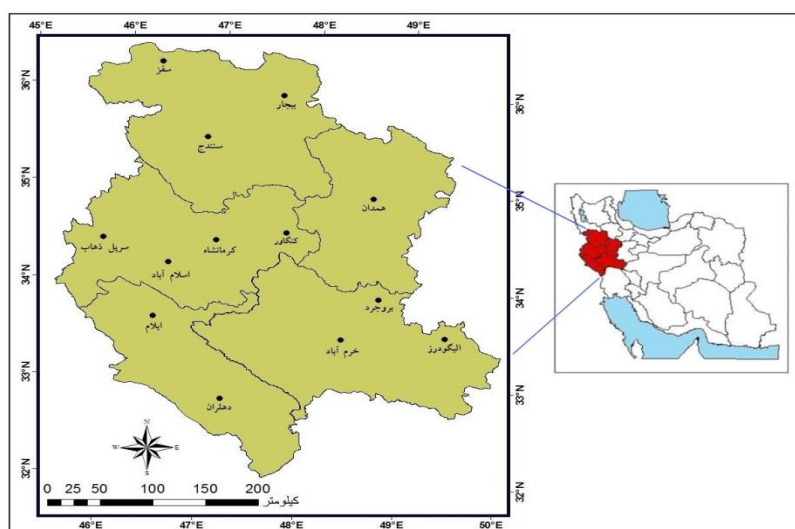
خانگی در ایالت کالیفرنیا مطرح کرد. به عقیده وی، منابع تجدیدپذیر انرژی در مقابل تغییرات آب‌وهوا آسیب‌پذیرند. همچنین، افزایش دما سبب افزایش تقاضا برای وسایل تهویه خواهد شد. بکالی و همکاران (۲۰۰۸: ۲۰۴۰)، با در نظر گرفتن متغیرهای آب‌وهوایی، شامل رطوبت، تابش خورشیدی، فشار هوا، و باد، تقاضای کوتاه‌مدت برق خانگی را در ایتالیا با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به نحو رضایت‌بخشی پیش‌بینی کردند. وو و همکاران (۲۰۱۴: ۱) رابطه بین آب‌وهوا و مصرف برق را در ایالت نیوساوت‌ولز استرالیا با مدل‌های رگرسیونی بررسی کردند و در این مسیر از متغیرهای اقلیمی از قبیل درجه- روز گرمایشی، درجه- روز سرمايشی، رطوبت، تبخیر، سرعت باد، بارش، و تابش خورشیدی استفاده کردند. نتایج نشان داد که درجه- روزهای گرمایشی، رطوبت، تبخیر، و سرعت باد بیشترین تأثیر را بر میزان مصرف برق در منطقه مورد مطالعه دارد. جوانویچ و همکاران (۲۰۱۵: ۶۰۴) در صربستان، با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، اثر شرایط آب‌وهوایی، به خصوص میانگین دمای روزانه را بر مصرف برق در یک دوره هفت ساله (۲۰۰۶-۲۰۱۲) بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده یک رابطه قوی بین دمای هوا و مصرف برق بود. دام و همکاران (۲۰۱۷: ۱۲)، بر پایه شبیه‌سازی‌های آب‌وهوایی مدل 11 EURO-CORDEX، به بررسی اثر افزایش دودرجه‌ای دما تحت تأثیر پدیده گرمایش جهانی بر نیازهای سرمایه‌ی و گرمایشی و میزان تقاضای مصرف برق در ۲۶ کشور اروپایی پرداختند. آنان، برای ارزیابی روابط بین مصرف برق روزانه و دمای وزن‌دار شده براساس جمعیت، از مدل‌های رگرسیونی استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد با حفظ ساختارهای جمعیتی و اقتصادی فعلی، گرمایش جهانی به میزان دو درجه سانتی‌گراد مصرف برق را در بیشتر کشورهای اروپایی کاهش می‌دهد که این نتیجه آنان جالب توجه است و احتمالاً به قرارگیری بیشتر کشورهای اروپایی در عرض‌های جغرافیایی بالا ارتباط دارد. کاهش تقاضای برق برای گرمایش بیش از افزایش تقاضا برای سرمایه‌ی خواهد بود. بیشترین کاهش نسبی برای نروژ تا ۵/۲ درصد و سپس سوئد، استونی، فنلاند، و فرانسه خواهد بود. در مجموع، مقایسه بین کشورهای مختلف نشان می‌دهد که آب‌وهوا اصلی‌ترین محرک برای میزان برق مورد استفاده برای گرمایش و سرمایه‌ی نیست، بلکه علت اصلی سیاست‌گذاری انرژی است.

در ایران نیز ارزیابی اثر متغیرهای آب‌وهوایی بر مصرف برق به منظور ارائه مدلی کارا برای پیش‌بینی تقاضای برق با توجه به شرایط خاص در چندین تحقیق مورد توجه بوده است. از جمله می‌توان به تحقیق اکبری شهربندی و همکاران (۱۳۹۴: ۱۱۳۴) در استان مازندران اشاره کرد که، با استفاده از دما و بر پایه خوشه‌بندی و تحلیل رگرسیون، مقدار مصرف برق را در آینده پیش‌بینی کردند. علیجانی و همکاران (۱۳۹۶: ۱۳) طی مطالعه‌ای در شهر قم به این نتیجه رسیدند که انرژی مصرفی برق، در مصارف بالاتر از حد آستانه (۸۰۰۰ مگاوات در روز) نسبت به مصارف انرژی کمتر از حد آستانه، بیشتر تحت تأثیر دمای بیشینه است. همچنین، شکوری گنجوی و نظرزاده (۱۳۸۳: ۲۷)، بابائیان و همکاران (۱۳۹۳: ۱)، ترابی و همکاران (۱۳۹۴: ۱) و بابائیان و همکاران (۱۳۹۵: ۱۳۱) به بررسی رابطه متغیرهای آب‌وهوایی با مصرف برق پرداختند. نتایج کلی حاکی از آن بود که یک رابطه قوی بین دمای هوا و مصرف برق وجود دارد که، با پیش‌بینی مصرف برق بر پایه شرایط آب‌وهوایی و تغییرات احتمالی آن در آینده، می‌توان از شرایط بهینه محیطی برای تولید برنامه‌ریزی‌شده این حامل مهم انرژی استفاده کرد و از خسارات ناشی از سنگینی بار و تحمیل هزینه‌های اضافی در صنعت برق جلوگیری نمود. در یک جمع‌بندی، در بیشتر مطالعات قبلی، از میان عناصر اقلیمی، نقش دما در میزان مصرف برق چشم‌گیر بوده است. در این تحقیق سعی شده است، علاوه بر بررسی رابطه متغیرهای اقلیمی (و نه فقط دما) با میزان مصرف برق در منطقه غرب کشور، تأثیر پدیده تغییر اقلیم در تقاضای مصرف برق در آینده ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق غرب ایران، شامل استان‌های کرمانشاه، کردستان، همدان، ایلام، و لرستان، است (شکل ۱). این منطقه از شمال به استان آذربایجان غربی، از شمال شرق به استان‌های زنجان و قزوین، از شرق به استان مرکزی، از جنوب شرق به استان‌های اصفهان و چهارمحال بختیاری، از جنوب به استان خوزستان، و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود. وسعت این منطقه در حدود ۱۲۱۰۰۰ کیلومتر مربع است و بین عرض‌های جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴ دقیقه شرقی واقع شده است. ۱۳ شهر از این منطقه برای مطالعه انتخاب شده است. منطقه مورد مطالعه به علت قرارگرفتن در مسیر ورود توده‌هواهای گرم و سرد و سیکلون‌های باران‌زا دارای آب‌وهوای متنوعی است.



شکل ۱. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش عبارت‌اند از: ۱. داده‌های ماهانه هواشناسی سیزده ایستگاه منطقه در یک دوره ۲۸ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۴)، شامل پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، و بارش. این داده‌ها از سایت سازمان هواشناسی کشور به آدرس www.weather.ir و سایت‌های هواشناسی مراکز استان‌ها اخذ شده است؛ ۲. داده‌های مربوط به میزان مصرف برق ماهانه سیزده شهر مجاور ایستگاه‌های فوق در دوره متناظر که از سایت وزارت نیرو به آدرس www.tavanir.org.ir و نیز شرکت توزیع برق منطقه‌ای غرب اخذ شده است؛ ۳. داده‌های مربوط به تغییر اقلیم (شامل پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر، و رطوبت نسبی) که توسط مدل گردش عمومی جو CCSM4 شبیه‌سازی شده است. این داده‌ها از سایت سناریو و داده‌های اقلیمی به آدرس <ftp://gdo-dcp.ucllnl.or> دریافت شده است.

درجه-روز

براساس تعریف، انحراف میانگین دمای روزانه از دمای آسایش انسان (دمای آستانه) درجه-روز نامیده می‌شود. محاسبه

مقادیر میانگین درجه- روزهای نیاز به گرمایش و سرمایش اطلاعات پایه و اساسی در برآورد مقدار انرژی موردنیاز برای گرم کردن ساختمان در فصل سرد یا سردکردن آن در فصل گرم سال و برنامه‌ریزان مصرف انرژی به شمار می‌رود. مقادیر درجه- روزهای گرمایش و سرمایش تابع عوامل مختلفی از جمله عناصر اقلیمی (دما، تابش، ابرناکی، و ...) و عوامل جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، و ...) است. برای محاسبه درجه- روزهای گرمایشی و سرمایشی در هر ایستگاه به ترتیب از رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده شد (مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۴ و ۲۷):

$$HDD = \sum_{i=1}^n (T_{bc} - T_{meani}) \quad (1)$$

$$CDD = \sum_{i=1}^n (T_{meani} - T_{bc}) \quad (2)$$

که در آن‌ها HDD درجه- روز گرمایشی، CDD درجه- روز سرمایشی، T_{meani} میانگین دمای روزانه (که از میانگین دماهای حداقل و حداکثر روزانه به دست می‌آید)، و T_{bc} دماهای پایه است که طبق پیشنهاد سازمان هواشناسی کشور برای درجه- روزهای گرمایشی و سرمایشی به ترتیب ۱۸ و ۲۱ درجه سانتی‌گراد (جلایی و همکاران، ۱۳۹۲: ۸۱) در نظر گرفته شده است.

مدل CCSM4

برای ارزیابی تغییرات اقلیمی در منطقه مورد مطالعه، از مدل گردش عمومی جو CCSM4 تحت سناریوهای RCP4.5^۱ و RCP8.5 استفاده شده است. مدل یادشده از مجموع سناریوهای جدید منتشرشده RCP است که هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5)^۲ از آن با عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای نام برده است. این مدل از پنج مدل جداگانه اتمسفری، اقیانوسی، زمینی، زمین- یخ، و دریا- یخ به اضافه یک مؤلفه ترکیبی مرکزی تشکیل شده است و هر یک از این مدل‌ها چهار بخش عمده دارند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۳۵-۲۳۶):

الف) مؤلفه فعال: بخش پویای مدل است که برای پیش‌آگاهی‌ها و تجزیه و تحلیل استفاده می‌شود. در واقع، در این بخش، اجرای مدل، آزمون مدل، پارامتریک کردن مدل، و همچنین چرخش مدل انجام می‌گیرد.

ب) مؤلفه داده: کار این مؤلفه گرفتن داده است.

ج) مؤلفه غیرفعال: این مؤلفه فقط برای آزمون‌های فنی سیستم به کار می‌رود. در واقع، این مؤلفه بخش غیرفعال مدل است که با بخش مؤلفه فعال مدل هیچ‌وقت ترکیب نمی‌شود.

د) مؤلفه رابط: این مؤلفه نقش رابط را ایفا می‌کند و فقط در مواقعی که نیازی به پی‌کرنبدی مدل نیست از آن استفاده می‌شود. مثلاً، هنگامی که فقط داده‌های مدل اتمسفری نیاز باشد و احتیاجی به مدل‌های دیگر نباشد از این مؤلفه استفاده می‌شود. تفکیک مکانی این مدل ۱×۱ درجه طول و عرض جغرافیایی است.

این مدل از سناریوهای جدید RCP (شامل RCP ۲.۶، ۴.۵، ۶، ۸.۵) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم براساس گزارش پنجم ارزیابی این هیئت (AR5) استفاده می‌کند. این سناریوها در سال ۲۰۱۴ توسط یک کمیته علمی و زیر نظر هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم با هدف مهیا کردن مجموعه‌ای از اطلاعاتی که از نتایج آن بتوان عوامل اصلی تغییرات اقلیمی را

1. Representative Concentration Pathways
2. Assessment Report 5

ردیابی نمود و نتایج آن را بر مدل‌های اقلیمی اعمال کرد به وجود آمده‌اند. سناریوهای فوق براساس مشخصات متفاوت سطح تکنولوژی، وضعیت اجتماعی و اقتصادی، و خطمشی‌ها در آینده است که در هر شرایطی می‌تواند به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی منجر شود. نام گذاری سناریوهای خانواده RCP براساس میزان سطح واداشتهای تابشی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای تا پایان قرن ۲۱ شامل ۲/۶، ۴/۵، ۶، ۸/۵ وات بر متر مربع انجام شده است (جعفرپور و کانونی، ۱۳۹۴: ۵).

ریز‌مقیاس‌نمایی

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM بزرگ‌بودن سلول‌های محاسباتی آن‌ها به لحاظ زمانی و مکانی نسبت به منطقه مورد مطالعه است. روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌های AOGCM وجود دارد که به این روش‌ها ریزمقیاس‌نمایی گفته می‌شود. در این تحقیق از روش ریزمقیاس‌نمایی «عامل تغییر» استفاده شده است. بر این اساس، برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در مدل، مقادیر «اختلاف» برای دما (رابطه ۳) و «نسبت» برای بارندگی (رابطه ۴) برای متوسط درازمدت هر ماه در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۸۰) و دوره شبیه‌سازی شده پایه توسط همان مدل (۱۹۸۷-۲۰۱۴) برای هر سلول از شبکه محاسباتی محاسبه می‌شود (آشفته و مساح بوانی، ۱۳۸۹: ۲۹).

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, base, i}) \quad (۳)$$

$$\Delta P_i = \frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, base, i}} \quad (۴)$$

که در آن $\bar{T}_{GCM, fut, i}$ میانگین شصت ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط مدل CCSM4 در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۸۰)، $\bar{T}_{GCM, base, i}$ میانگین ۲۸ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط مدل در دوره پایه مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۱۴)، $\bar{P}_{GCM, fut, i}$ میانگین شصت ساله بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل CCSM4 در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۸۰)، و $\bar{P}_{GCM, base, i}$ میانگین ۲۸ ساله بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل در دوره پایه مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۱۴) برای هر ماه است. در این روش، برای به‌دست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده، سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر مشاهداتی افزوده می‌شود (رابطه‌های ۵ و ۶).

$$T = (T_{obs} + \Delta T) \quad (۵)$$

$$P = (P_{obs} \times \Delta P) \quad (۶)$$

که در آن‌ها T و P به ترتیب سری‌های زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی دما و بارش برای دوره آینده، T_{obs} و P_{obs} به ترتیب سری‌های زمانی دما و بارش مشاهداتی (در اینجا روزانه)، و ΔT و ΔP به ترتیب اختلاف دما و اختلاف بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل CCSM4 بین دوره‌های پایه و آینده است. برای صحت‌سنجی مقادیر برآوردشده پارامترهای آب‌وهوایی مدل CCSM4، که با روش عامل تغییر ریزمقیاس‌نمایی شده‌اند، از آماره‌های خطای میانگین مطلق (MAE)، ریشه دوم میانگین مربع (RMSE)، و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد.

تحلیل رگرسیون

به منظور بررسی رابطه مصرف برق با متغیرهای اقلیمی و نیز برآورد مصرف برق در آینده، از تحلیل رگرسیون چندگانه استفاده شد. هدف از کاربرد رگرسیون آن است که تغییرات متغیر وابسته را از طریق تغییرات متغیر مستقل یا از طریق ترکیب خطی دو یا چند متغیر مستقل بیان و پیش‌بینی کنیم. مدل کلی رگرسیون خطی ساده به صورت رابطه ۷ است (اکبری شهربندی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۱۳۵):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + e_i \quad (7)$$

که در آن Y متغیر وابسته (مصرف برق)، x_i متغیرهای مستقل (درجه- روز گرمایشی، درجه - روز گرمایشی، ساعات آفتابی، بارش، رطوبت نسبی، و باد)، b_i ضرایب رگرسیون، و e_i مقدار خطاست. در صورت معنادار بودن مدل رگرسیونی و متغیرهای مربوطه، با جاگذاری داده‌های اقلیمی مدل CCSM4 تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در مدل‌های رگرسیونی مقدار مصرف برق در آینده برای هر ایستگاه در دوره ۲۰۱۲-۲۰۸۰ برآورد شد.

یافته‌های پژوهش

رابطه متغیرهای آب‌وهوایی با مصرف برق

بررسی رابطه متغیرهای آب‌وهوایی (درجه- روز گرمایشی، درجه- روز گرمایشی، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، بارش، و سرعت باد) با تغییرات مصرف برق ماهانه در ایستگاه‌های منطقه حاکی از این مطلب است که تغییرات مصرف برق ماهانه در ایستگاه‌ها با برخی متغیرهای آب‌وهوایی دارای ارتباط معنی‌داری است، اما متغیرهای تأثیرگذار و نوع ارتباط آن‌ها با مصرف برق در ایستگاه‌ها متفاوت است. مشخصات مدل‌های رگرسیونی چندگانه مربوط به بررسی رابطه مصرف برق با پارامترهای آب‌وهوایی در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل‌های رگرسیونی چندگانه بررسی رابطه مصرف برق و متغیرهای آب‌وهوایی در ایستگاه‌های منطقه

| نام ایستگاه | مدل رگرسیونی چندگانه | سطح معنی‌داری | R^2 |
|-------------|-----------------------------------|---------------|-------|
| کرمانشاه | $E = 175/84 - 0/848HDD + 4604CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۴۹ |
| اسلام‌آباد | $E = 31271 - 0482HDD + 0936CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۳۱ |
| سرپل‌ذهاب | $E = 19623 - 01079Hum + 0361CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۹۳ |
| کنگاور | $E = 17666 - 0289HDD + 0767CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۲۷ |
| سنندج | $E = 65241 - 0241HDD + 1077CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۶۲ |
| سقز | $E = 25099 - 0238HDD + 0675CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۷۴ |
| بیجار | $E = 1677 - 0235HDD + 0819CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۸۶۶ |
| ایلام | $E = 4102 - 0068Hum + 1042CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۸۸۰ |
| دهلران | $E = 25351 - 0152Hum + 0337CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۳۰ |
| همدان | $E = 13058 - 0296HDD + 21039CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۸۷۳ |
| خرم‌آباد | $E = 74836 - 044HDD + 1071CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۴۱ |
| الیگودرز | $E = 75568 - 0247HDD + 1475CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۲۳ |
| بروجرد | $E = 74938 - 0229HDD + 1594CDD$ | ۰/۰۰۰ | ۰/۸۷۵ |

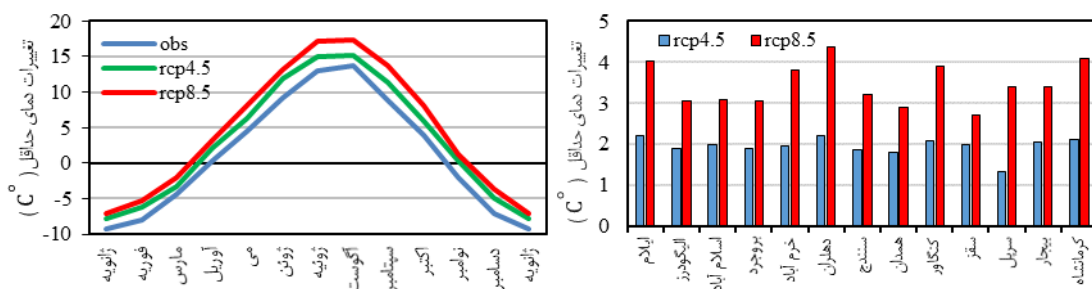
CDD: درجه- روز گرمایشی، HDD: درجه- روز گرمایشی، Hum: رطوبت نسبی، E: مصرف برق

با توجه به ضرایب معادلات رگرسیونی جدول ۱، در همه ایستگاه‌ها، درجه- روزهای سرمایشی (CDD) رابطه مستقیم و معنی‌دار با مصرف برق دارد و این به خاطر استفاده زیاد از تجهیزات سرمایشی، مانند کولرهای آبی و گازی، در فصل تابستان است. اما رابطه درجه- روزهای گرمایشی (HDD) با مصرف برق ضعیف‌تر از درجه- روزهای سرمایشی (CDD) است. علت آن است که در فصل زمستان برای گرم کردن محیط از تجهیزات برقی کمتر استفاده می‌شود. به خصوص در ایستگاه‌های گرمسیر مانند ایلام، دهران، و سرپل‌ذهاب رابطه درجه- روزهای گرمایشی (HDD) با مصرف برق اساساً معنی‌دار نیست و طبیعتاً در معادلات نیز منظور نشده است. در این ایستگاه‌ها در دوره سرد سال به سبب ملایم‌بودن و کوتاه‌بودن دوره سرما، نیاز چندانی به تجهیزات برقی برای مصارف گرمایشی احساس نمی‌شود. در مقابل، در این سه ایستگاه، رطوبت (Hum) رابطه معکوس و معنی‌داری با مصرف برق دارد. زیرا گرمای نسبی هوا در این ایستگاه‌ها ظرفیت رطوبتی را بالا می‌برد و به عنوان یک عامل افزایش‌دهنده مصرف برق به خصوص در دوره گرم سال عمل می‌کند. سایر پارامترهای آب‌وهوایی رابطه معنی‌داری با مصرف برق ندارند.

تغییرات پارامترهای اقلیمی در آینده تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم

تغییرات دمای حداقل

نتایج پیش‌بینی دمای میانگین حداقل سالانه با مدل CCSM4 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس ارقام این جدول، میانگین سالانه دمای حداقل در منطقه غرب کشور طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰، نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی RCP4.5، ۱٫۹۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت، اما تحت سناریوی RCP8.5 مقدار افزایش ۳٫۴۶ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. بیشترین افزایش دما نسبت به دوره مشاهداتی مربوط به فصل تابستان و کمترین آن مربوط به فصل زمستان است (شکل ۲). در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ دمای حداقل روند افزایشی دارد. بیشترین افزایش مربوط به ایستگاه دهران است که دما، به طور میانگین تحت سناریوی RCP4.5، ۲٫۲۲ درجه سانتی‌گراد و تحت سناریوی RCP8.5 ۴٫۳۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. کمترین افزایش نیز تحت سناریوی RCP4.5 مربوط به ایستگاه سرپل‌ذهاب به میزان ۱٫۳۴ درجه سانتی‌گراد و تحت سناریوی RCP8.5 مربوط به ایستگاه سقز به میزان ۲٫۷ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۳).



شکل ۲. میانگین ماهانه دمای حداقل در دوره‌های مشاهداتی و آتی (متوسط ایستگاه‌ها)

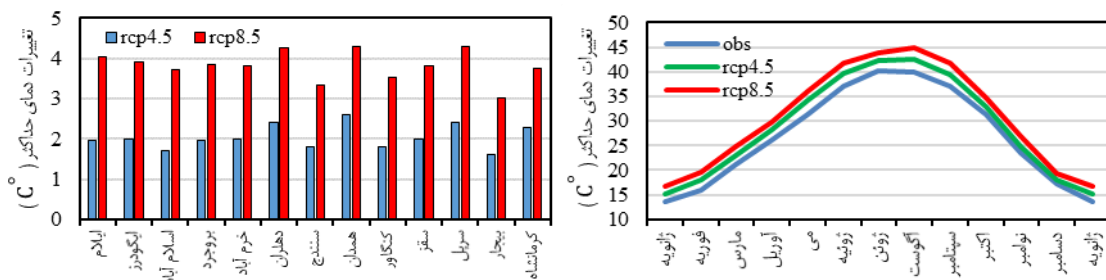
شکل ۳. میانگین سالانه افزایش دمای حداقل ایستگاه‌ها در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی

جدول ۲. میانگین دمای حداقل سالانه همراه مقدار تغییر در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی (متوسط ایستگاه‌ها)

| سناریو | مشاهداتی (°C) | پیش‌بینی (°C) | افزایش یا کاهش (°C) |
|--------|---------------|---------------|---------------------|
| RCP4.5 | ۱٫۸۸ | ۳٫۸۳ | + ۱٫۹۵ |
| RCP8.5 | ۱٫۸۸ | ۵٫۳۴ | + ۳٫۴۶ |

تغییرات دمای حداکثر

همانند دمای حداقل، میانگین دمای حداکثر سالانه نیز در دوره آتی روند افزایشی خواهد داشت. این افزایش در ایستگاه‌های مورد مطالعه، تحت سناریوی RCP4.5، ۲٫۰۱ درجه سانتی‌گراد و تحت سناریوی RCP8.5 ۳٫۸۱ درجه سانتی‌گراد خواهد بود (جدول ۳). روند افزایشی در ماه‌های سپتامبر، ژوئن، و آگوست نسبت به دیگر ماه‌ها بیشتر است. کمترین افزایش دما نیز مربوط به ماه‌های دسامبر و مارس است. به طور کلی، بیشترین افزایش در دوره آتی نسبت به دوره پایه در فصل بهار و کمترین آن در فصل پاییز رخ خواهد داد (شکل ۴). بیشترین میزان افزایش دمای حداکثر در دوره آتی، نسبت به دوره پایه، مربوط به ایستگاه همدان است که تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 طی شصت سال آینده به ترتیب ۲٫۶ و ۴٫۳ درجه و کمترین آن مربوط به ایستگاه بیجار است که به ترتیب ۱٫۶ و ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (شکل ۵).



شکل ۴. میانگین ماهانه دمای حداکثر در دوره‌های مشاهداتی و آتی (متوسط ایستگاه‌ها)

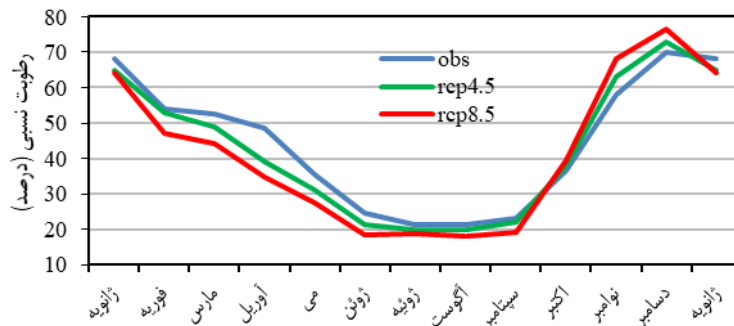
شکل ۵. میانگین سالانه افزایش دمای حداکثر ایستگاه‌ها در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی

جدول ۳. میانگین دمای حداکثر سالانه همراه مقدار تغییر در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی (متوسط ایستگاه‌ها)

| سناریو | مشاهداتی (°C) | پیش‌بینی (°C) | افزایش یا کاهش (°C) |
|--------|---------------|---------------|---------------------|
| RCP4.5 | ۲۷٫۸۵ | ۲۹٫۸۶ | + ۲٫۰۱ |
| RCP8.5 | ۲۷٫۸۵ | ۳۱٫۶۶ | + ۳٫۸۱ |

تغییرات رطوبت نسبی

به‌طور کلی، میانگین رطوبت نسبی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی برخلاف دما کاهش خواهد یافت (جدول ۴). البته، در بعضی از ماه‌ها افزایش رطوبت نیز مشاهده می‌شود. بیشترین میزان افزایش رطوبت نسبی مربوط به ماه‌های پاییز و بیشترین کاهش آن مربوط به ماه‌های فصل بهار است (شکل ۶).



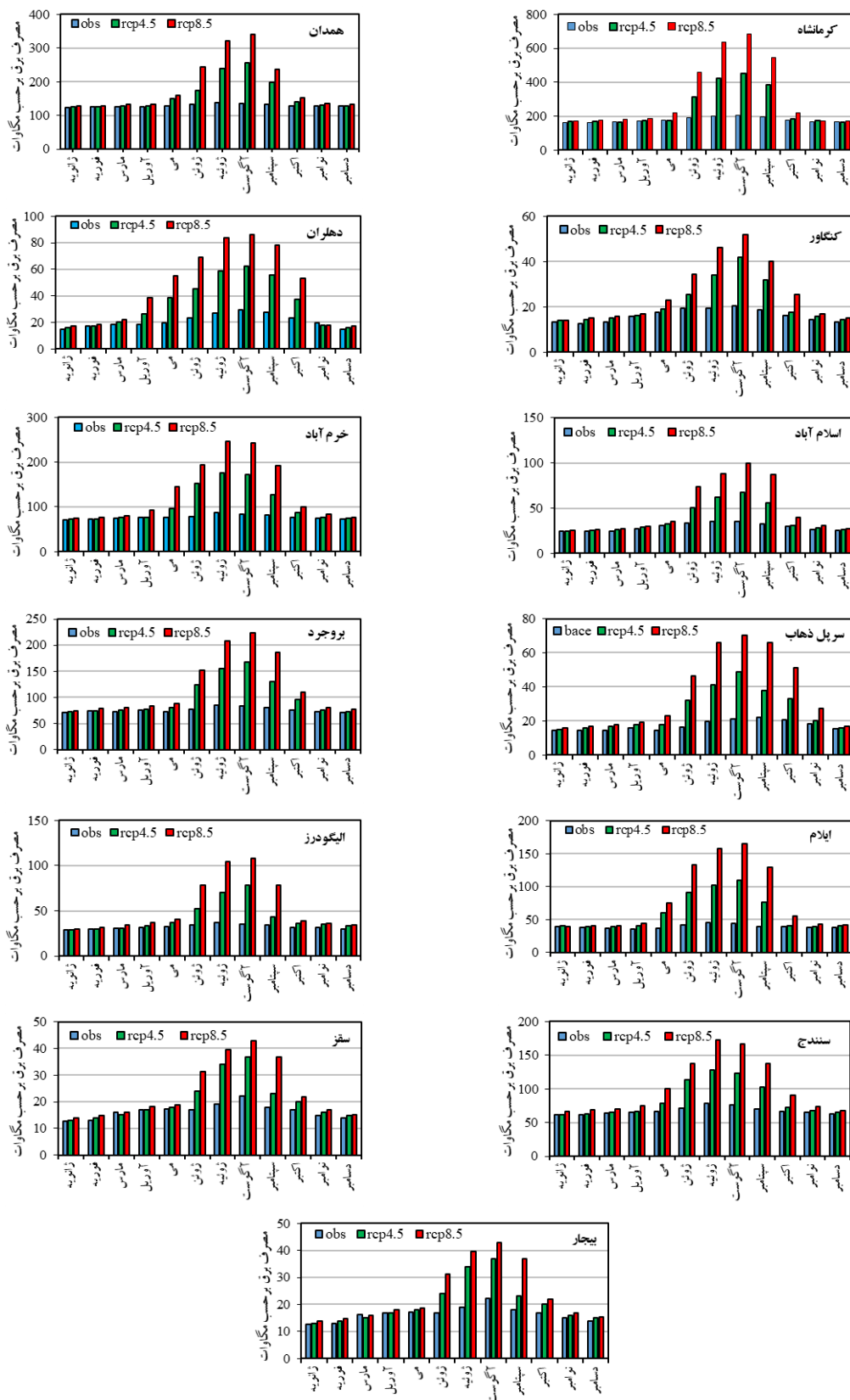
شکل ۶. میانگین ماهانه رطوبت نسبی در دوره‌های مشاهداتی و آتی (متوسط ایستگاه‌ها)

جدول ۴. میانگین سالانه رطوبت نسبی همراه مقدار تغییر در دوره آبی نسبت به دوره مشاهداتی (متوسط ایستگاه‌ها)

| سناریو | مشاهداتی | پیش‌بینی | افزایش یا کاهش |
|--------|----------|----------|----------------|
| RCP4.5 | ۴۳٫۱۶ | ۴۱٫۱۹ | -۱٫۹۷٪ |
| RCP8.5 | ۴۳٫۱۶ | ۳۹٫۷۶ | -۳٫۴٪ |

پیش‌بینی مصرف برق

با وارد کردن خروجی‌های اقلیمی مدل CCSM4 در مدل‌های رگرسیونی جدول ۱، مقادیر مصرف برق در هر ایستگاه تا افق ۲۰۸۰ پیش‌بینی شد. نمودارهای شکل ۷ مقادیر پیش‌بینی شده برای هر ایستگاه تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و نیز مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها، مصرف برق در همه ایستگاه‌ها در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره گذشته افزایش خواهد یافت که این افزایش در دوره گرم سال چشم‌گیر خواهد بود. میانگین افزایش مصرف در دوره گرم در ایستگاه‌ها تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۸۰ و ۱۵۰ درصد خواهد بود. به خصوص ایستگاه‌های گرمسیری غرب منطقه مانند دهلران، سرپل‌ذهاب، و ایلام در ماه‌های دوره گرم (می تا اکتبر، به مدت شش ماه) شاهد بیشترین افزایش مصرف برق تحت دو سناریوی فوق به ترتیب در حدود ۱۱۰ و ۲۱۰ درصد خواهند بود. ایستگاه‌های یادشده، به دلیل داشتن اقلیم گرم و خشک، حساسیت بیشتری به تغییرات آب‌وهوایی دارند و افزایش دما و طولانی‌شدن فصل گرما و در نتیجه افزایش درجه-روزهای سرمایشی نیاز به مصرف برق را نسبت به سایر ایستگاه‌ها بیشتر مطرح می‌کند. کمترین افزایش نیاز به مصرف برق در دوره آبی نیز مربوط به ایستگاه‌های نسبتاً سردسیری همدان، سنندج، سقز، و بیجار است. عمده نیاز این ایستگاه‌ها به علت ماهیت کوهستانی، ارتفاع زیاد، و دوره طولانی‌تر سرما به گرمایش است که بخش قابل توجهی از آن به وسیله گاز طبیعی تأمین می‌شود و طبیعتاً وابستگی چندانی به برق ندارد؛ اما به هرصورت در دوره گرم این ایستگاه‌ها، که البته کوتاه‌تر است و از ژوئن تا سپتامبر به مدت چهار ماه دوام دارد، مقدار افزایش مصرف کمتر از ایستگاه‌های گرمسیری و تحت دو سناریو به ترتیب در حدود ۶۰ و ۱۱۰ درصد خواهد بود. سایر ایستگاه‌ها، مانند خرم‌آباد، کرمانشاه، کنگاور، بروجرد، و اسلام‌آباد، از نظر افزایش مصرف وضعیت حد واسطی خواهند داشت (شکل ۷). لیکن، باید توجه داشت، به رغم افزایش بیشتر مصرف در شهرهای کوچک گرمسیری، تأمین برق برای شهرهای بزرگ‌تر و پرجمعیت‌تر مانند کرمانشاه و همدان، به لحاظ میزان مصرف بالاتر، مهم‌تر از شهرهای گرمسیری خواهد بود. از آنجا که بخش قابل توجهی از مصرف برق به دلیل استفاده از وسایل خنک‌کننده در دوره گرم سال است، هر گونه تغییر در دمای دوره گرم در افزایش یا کاهش به‌کارگیری این وسایل و در نتیجه افزایش مصرف برق مؤثر خواهد بود. این امر ضرورت درپیش گرفتن استراتژی‌های مناسب را برای مقابله با معضل افزایش شدید مصرف برق در آینده به خصوص در دوره گرم سال به خوبی مطرح می‌کند. در هیچ ایستگاهی، اعم از گرمسیر و سردسیر، میزان افزایش مصرف در ماه‌های دوره سرد، برخلاف دوره گرم، زیاد نیست؛ زیرا در مناطق تحت مطالعه در دوره سرد سال از انرژی برق در بخش گرمایشی کمتر استفاده می‌شود و اتکا بیشتر بر روی گاز طبیعی است.



شکل ۷. پیش‌بینی میانگین مصرف برق در دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ تحت دو سناریو و مقایسه آن با دوره مشاهداتی ۱۹۸۷-۲۰۱۴ در ایستگاه‌های مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت انرژی برق در برنامه‌ریزی‌های مختلف و افزایش مصرف آن در بستر گرمایش جهانی، به خصوص در کشورمان، پیش‌بینی مقدار مصرف آن در آینده در سیاست‌گذاری‌های بخش انرژی جایگاه ویژه‌ای خواهد داشت. بنابراین، آگاهی درباره تغییرهای تأثیرگذار بر مصرف برق و میزان تأثیر هر یک از آن‌ها به سیاست‌گذاران این امکان را می‌دهد تا پیش‌بینی دقیق‌تری را از مصرف انرژی به منظور برنامه‌ریزی مناسب در سال‌های آتی به عمل آورند. در این پژوهش، با استفاده مدل‌های رگرسیون چندگانه، رابطه بین متغیرهای اقلیمی با میزان مصرف برق در غرب کشور بررسی شد و بر پایه مدل گردش عمومی جو CCSM4 و مدل‌های رگرسیونی یادشده مقدار مصرف برق در آینده پیش‌بینی شد. نتایج تحقیق نشان داد در ایستگاه‌های مورد مطالعه، درجه- روزهای سرمایشی، سپس درجه- روزهای سرمایشی، و در مواردی رطوبت تأثیر معنی‌داری بر نوسانات مصرف برق ماهانه دارد که با نتایج اغلب مطالعات پیشین (شکوری گنجوی و نظرزاده، ۱۳۸۳: ۳۹؛ ترابی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱؛ هور و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۰۷۸) مطابقت دارد. معادلات رگرسیونی مورد استفاده ۸۷ تا ۹۶ درصد از تغییرات مصرف برق را بر پایه تغییرهای اقلیمی توجیه می‌کند. تقاضای برق در دوره گرم سال عمدتاً به سبب استفاده از وسایل خنک‌کننده افزایش می‌یابد که بدون شک افزایش دما در آینده در افزایش آن تأثیرگذار خواهد بود. با توجه به نتایج مدل CCSM4، دما در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۸۰) در حدود ۲ تا ۳/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش و رطوبت نسبی در حدود ۲ تا ۳/۵ درصد کاهش خواهد یافت. از این رو، مصرف برق در منطقه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ روند افزایشی خواهد داشت. بیشترین میزان افزایش مصرف متعلق به دوره گرم سال به خصوص در بخش‌های گرمسیری غرب منطقه مانند دهلران، سرپل‌ذهاب، و ایلام است که تحت سناریوی RCP4.5 در حدود ۱۱۰ درصد و تحت سناریوی RCP8.5 در حدود ۲۱۰ درصد افزایش خواهد یافت. این مناطق، به دلیل گرمای هوا و بالا بودن نیاز سرمایشی، نسبت به تغییرات اقلیمی حساسیت بیشتری نشان می‌دهند و نیاز به وسایل تهویه و خنک‌کننده در آن‌ها بیشتر است. کمترین میزان افزایش نیز متعلق به ایستگاه‌های کوهستانی و سردسیرتر مانند همدان، سنندج، سقز، و بیجار است (شکل ۷). مصرف برق در این ایستگاه‌ها در دوره گرم سال تحت سناریوی RCP4.5 در حدود ۶۰ درصد و تحت سناریوی RCP8.5 در حدود ۱۱۰ درصد افزایش خواهد یافت. پایین بودن نیاز به مصرف برق در این ایستگاه‌ها در آینده به علت پایین بودن نیاز سرمایشی است. میزان افزایش مصرف در ماه‌های دوره سرد، برخلاف دوره گرم، در هیچ ایستگاهی قابل توجه نیست. نتایج این مطالعه از نظر افزایش مصرف برق در آینده با نتایج مطالعه بابائیان و همکاران (۱۳۹۳: ۱) در ایران مطابقت دارد؛ اما مقدار افزایش مصرف از مطالعه آنان خیلی بیشتر است.

منابع

- اکبری شهربندی، ز.؛ رضانی، ف. و مؤتمنی، ه. (۱۳۹۴). پیش‌بینی مصرف انرژی الکتریکی با استفاده از مدل رگرسیون (مطالعه موردی شرکت توزیع نیروی برق مازندران)، کنفرانس ملی فناوری، انرژی، و داده با رویکرد مهندسی برق و کامپیوتر، کرمانشاه، ص ۱۱۳۴-۱۱۴۰.
- آشفته، پ. س. و مساح بوانی، ع. ر. (۱۳۸۹). تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر: مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۵۳): ۲۵-۳۹.
- بابائیان، ا.؛ عرفانی، ع.؛ کریمیان، م. و مدیریان، ر. (۱۳۹۳). شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر مصرف برق کشور در دوره ۲۰۱۱-۲۱۰۰ با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی برون داد مدل گردش عمومی جو، دهمین همایش بین‌المللی انرژی، تهران.
- بابائیان، ا.؛ عرفانی، ع.؛ انتظاری، ع. و باعقیده، م. (۱۳۹۵). چشم‌انداز مصرف برق کشور در دوره ۲۰۱۱-۲۱۰۰ تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی برون داد مدل‌های گردش عمومی جو، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۷(۴): ۱۳۱-۱۴۴.
- ترابی، م.؛ روزبه، م. و هاشمی، س. (۱۳۹۴). حساسیت مصرف کوتاه‌مدت انرژی الکتریکی نسبت به دما و رطوبت، سومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، ص ۱-۱۱.
- جعفرپور، ش. و کانونی، ا. (۱۳۹۴). سناریوهای تغییر اقلیم در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و مقایسه آن با گزارش قبلی، دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی.
- جلایی، س.ع.؛ جعفری، س. و انصاری لاری، ص. (۱۳۹۲). برآورد تابع تقاضای برق خانگی در ایران با استفاده از داده‌های تابلیوی استانی، فصل‌نامه اقتصاد انرژی ایران، ۲(۸): ۶۹-۹۲.
- شکوری گنجوی، ح. و نظرزاده، ج. (۱۳۸۳). مطالعه اثر تغییرات دمای هوا بر میانگین زمان مصرف روزانه انرژی الکتریکی در کشور، نشریه انرژی ایران، ۹(۲۰): ۲۷-۴۰.
- علیجانی، ب.؛ شمسی پور، ع.ا. و مطمئن آرانی، ع. (۱۳۹۶). تحلیل آماری بحران‌های دمایی شهر قم در رابطه با مصارف انرژی، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۶(۲۱): ۱-۱۷.
- لطفعلی‌پور، م. ر.؛ چشمی، ع. و پاکرو، ب. (۱۳۹۲). مقایسه الگوهای رشد لجستیک، لجستیک هاروی، و هاروی در پیش‌بینی مصرف برق بخش‌های اقتصادی در ایران، نظریه‌های کاربردی اقتصاد، ۱(۳): ۵۷-۸۰.
- محمدی، ا.؛ یزدان‌پناه، ح. و محمدی، ف. (۱۳۹۳). بررسی رخداد تغییر اقلیم و تأثیر آن بر زمان کاشت و طول دوره رشد گندم دوروم (دیم) مطالعه موردی: ایستگاه سرارود کرمانشاه، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۶(۲): ۲۳۱-۲۴۶.
- مسعودیان، س.ا.؛ علیجانی، ب. و ابراهیمی، ر. (۱۳۹۰). واکاو میانگین مجموع درجه-روز مورد نیاز (گرمایش و سرمایش) در قلمرو ایران، جغرافیا و پایداری محیط، ۱(۱): ۲۳-۳۶.
- مسعودیان، س.ا.؛ ابراهیمی، ر. و محمدی، م. (۱۳۹۳). پهنه بندی مکانی-زمانی نیاز گرمایش و سرمایش فصلی و سالانه ایران، اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۳(۹۰): ۸۳-۹۰.
- یاوری، ک. و ذوالفقاری، م. (۱۳۹۱). مدل‌سازی و پیش‌بینی مصرف کوتاه‌مدت برق کشور با استفاده از شبکه‌های عصبی و تبدیل موجک (با تأکید بر اثرات محیطی و اقلیمی)، فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۹(۳۳): ۱-۲۹.

- Akbari Shahbandi, Z.; Ramezani, F. and Motameni, H. (2015). Estimation of Electricity Consumption Using Regression Model (Case Study of Mazandaran Power Distribution Company), National Conference of Technology, Energy and Data on Electrical & Computer Engineering, Kermanshah, pp. 1134-1140.
- Alijani, B.; Shamsipour, A.A. and Motmaen Arani, A. (2017). Statistical Analysis of Thermal Crisis of Qom in Relation to Energy Consumption, Geography and Environmental Hazards, 6(21): 1-13.
- Al-Zayer, J. and Al-Ibrahim, A.A. (1996). Modelling the Impact of Temperature on Electricity Consumption in the Eastern Province of Saudi Arabia, Journal of Forecasting, 15(2): 97-106.
- Ashofteh, P. and Massah Bouani, A.R. (2010). Impact of Climate Change on Maximum Discharges: Case Study of Aidoghmoush Basin, East Azerbaijan, Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources), Vol. 14(53): 25-39.
- Babaeian, I.; Erfani, A.; Karimian, M. and Modirian, R. (2014). Simulation of the Climate Change Effect on Iran's Electricity Consumption in the Period of 2011-2100 using Downscaling of Output of the General Circulation Model, The 10th International Energy Conference, Tehran.
- Babaeian, I.; Erfani, A.; Entezari, A. and Baaghideh, M. (2016). Future Perspective of Electricity Consumption in Iran during the Period 2011-2100 under Climate Change Scenarios using Downscaling of General Circulation Models, Geography and Environmental Planning, 27(4): 131-144.
- Beccali, M.; Cellura, M.; Lo Brano, V. and Marvuglia, A. (2008). Short-Term Prediction of Household Electricity Consumption: Assessing Weather Sensitivity in a Mediterranean Area, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12: 2040-2065.
- Bessec, M. and Fouquau, J. (2008). The Non-Linear Link between Electricity Consumption and Temperature in Europe: A Threshold Panel Approach, Energy Economics, 30: 2705-2721.
- Damm, A.; Koberl, J.; Pretenthaler, F.; Rogler, N. and Christoph, T. (2017). Impacts of +2°C global Warming on Electricity Demand in Europe, Climate Services, 7: 12-30.
- Hor, C.L.; Watson, S.J. and Majithia, S. (2005). Analyzing the Impact of Weather Variables on Monthly Electricity Demand, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20(4): 2078-2085.
- Jafarpour, Sh. and Kanooni, A. (2015). Climate Change Scenarios in the Fifth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and its Comparison with the Previous Report, 2nd National Conference on Natural Resources and Environmental Conservation, Ardebil, University of Mohagheh Ardabili.
- Jalaei, S.A.; Jafari, S. and Ansari Lari, S. (2013). The Estimation of Electricity Consumption in the Residential Sector in Iran: A Provinces Panel, Journal of Iranian Energy Economics, 2(8): 69-92.
- Jovanovic, S.; Savic, S.; Bojic, M.; Djordjevic, Z. and Nikolic, D. (2015). The Impact of the Mean Daily Air Temperature Change on Electricity Consumption, Energy, 88: 604-609.
- Kamerschen, D.R. and Porter, D.V. (2004). The Demand for Residential, Industrial and Total Electricity 1973-1998, Energy Economics, 26: 87-100.
- Lotfalipour, M.R.; Cheshmi, A. and Pakroo, B. (2015). Comparison of Logistic, Harvey-logistic and Harvey Models for forecasting electricity consumption of Consumer Sectors in Iran, Applied Theories of Economics, 1(3): 57-80.
- Masoodian, S.A.; Alijani, B. and Ebrahimi, R. (2012). A Tempo-Spatial Survey of Degree Day (Heating and Cooling) in Iran, Geography and Sustainability of Environment, Vol. 1(1): 23-36.
- Masoodian, S.A.; Ebrahimi, R. and Mohammadi, M. (2014). Spatial- Temporal Zoning of Iran's Seasonal and Annual Heating and Cooling Requirements, Geographical Data (Sepehr), 23(90): 83-90.

- Mohammadi, E.; Yazdanpnah, H. and Mohammadi, F. (2014). Event of Climate Change, its Impact on Durum Wheat Planting and Duration of Growing Season, Case Study: Station of Sararood, Kermanshah, *Physical Geography Research Quarterly*, 46(2): 231-246.
- Shkoori Ganjavi, H. and Nazarzadeh, J. (2004). Study of the Effect of Air Temperature Changes on Average Daily Electricity Consumption in Iran, *Iranian Journal of Energy*, 9(20): 27-40.
- Torabi, M.; Roozbeh, M. and Hashemi, S. (2015). Short-Term Electrical Energy Sensitivity to Temperature and Humidity, 3rd National and first International Conference in Applied Research on Electrical, Mechanical and Mechatronics Engineering, Tehran, pp. 1-11.
- Vine, E. (2008). Adaptation of California's Electricity Sector to Climate Change, Public Policy Institute of California, San Francisco, CA.
- Vu, D.H.; Muttaqi, K.M. and Agalgaonkar, A.P. (2014). Assessing the Influence of Climatic Variables on Electricity Demand, in IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-5.
- Yan, Y.Y. (1998). Climate and Residential Electricity Consumption in Hong Kong, *Energy*, 23(1): 17-20.
- Yavari, K. and Zolfaghari, M. (2012). Modeling and Predicting Short-Term Power Consumption of Iran using Neural Networks and Wavelet Transform (with Emphasis on Environmental and Climatic Effects), *Quarterly Energy Economics Review*, 9(33): 1-29.