

چشم‌انداز مصرف برق کشور در دوره ۲۱۰۰-۲۰۱۱ تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی برونداد مدل‌های گردش عمومی جو*

ایمان باباییان^{*}: استادیار گروه تغییر اقلیم، پژوهشکده اقلیم‌شناسی دانشگاه مشهد، مشهد، ایران

عاطفه عرفانی: دانشجوی دکترای اقلیم‌شناسی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

علیرضا انتظاری: استادیار گروه اقلیم‌شناسی دانشکده جغرافیا و علوم محیطی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

محمد باعقیده: استادیار دانشکده جغرافیا و علوم محیطی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

وصول: ۱۳۹۴/۵/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۲، صص ۱۴۴-۱۳۱

چکیده

تولید و مصرف انرژی برق در کشور، یکی از موضوعات مهم در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی‌های کلان توسعه‌ای کشور است. مطالعات نشان می‌دهد بر اثر پدیده گرمایش جهانی میانگین دمای کره زمین در دهه‌های آینده افزایش خواهد داشت که این وضعیت موجب افزایش تقاضای برق و مصرف انرژی می‌شود. بررسی روند برق مصرفی کشور در سال‌های گذشته، گویای وجود ارتباط معنادار بین میزان برق تولیدی و میانگین دمای کشور در مقیاس‌های زمانی ۵ تا ۱۰ سال است. در این پژوهش با استفاده از آمار دما و برق مصرفی سالانه کشور و به‌کارگیری ریزمقیاس‌نمایی آماری برونداد، سه مدل گردش عمومی جو MPEH5 و NCCCSN.HadCM3 میزان انرژی برق مورد نیاز کشور برای دهه‌های آتی شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی میزان برق مورد نیاز آینده، رفتار بین برق مصرفی - میانگین دمای کشور مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان دادند دمای میانگین کشور در سه دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ به ترتیب ۱/۲، ۲/۴ و ۳/۶ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۶۱-۹۰ افزایش خواهد یافت. این افزایش دما موجب خواهد شد تا میزان تقاضای انرژی برق کشور به ترتیب ۵۱، ۸۱/۴ و ۱۱۷/۲ مگاوات نسبت به دوره ۱۳۸۶-۹۰ افزایش یابد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کلان توسعه بخش انرژی کشور، ساخت نیروگاه‌های جدید و سازگاری با تغییر اقلیم استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، انرژی، تغییر اقلیم، دما، ریزمقیاس‌نمایی، مدل گردش عمومی جو*

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر تغییرات آب و هوایی، اغلب مناطق جهان را درگیر بحران‌های جوی و اقلیمی کرده است. انرژی یکی از حوزه‌های حساس به تغییر اقلیم است که میزان مصرف و چشم‌انداز آن در دهه‌های آتی از شاخص‌های مهم در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های کلان کشور به‌شمار می‌رود. انرژی، علاوه بر اینکه یکی از عوامل مهم تولید به‌شمار می‌رود، استفاده بیش از حد آن، موجب افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و گازهای گلخانه‌ای در کره زمین و افزایش دمای آن شده است. بعد از اجرای طرح هدفمندی یارانه‌ها در کشور، سهم نسبتاً درخور توجهی از هزینه‌های تمام‌شده کالا و خدمات به انرژی اختصاص یافته است. نوسان میزان مصرف برق در کشور نشان می‌دهد، عوامل گوناگونی بر مقدار مصرف برق تأثیرگذار هستند؛ از سوی دیگر، گستردگی جغرافیایی ایران با وجود مناطق گوناگون آب و هوایی، سبب شده است استان‌های مختلف، نیازهای گوناگونی برای مصرف برق داشته باشند. با توجه به اینکه مقدار مصرف برق ایران سه‌برابر مصرف جهانی گزارش شده است و از آنجا که مقدار آن در فصول مختلف در نوسان است، توجه به دما، مهم‌ترین عنصر اقلیمی، که در سال‌های اخیر با تأثیر از گرمایش جهانی افزایش یافته است، نگرشی جدید در ارتباط بین گرمایش جهانی و مقدار مصرف برق ایجاد می‌کند. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در گزارش چهارم خود در سال ۲۰۰۷، افزایش دمای کره زمین را ناشی از فعالیت‌های انسان دانسته و پیش‌بینی می‌کند دمای کره زمین بین ۱ تا ۴ درجه تا سال ۲۱۰۰ میلادی افزایش یابد. این مقدار بر اساس سناریوهای انتشار مختلف گازهای

گلخانه‌ای به‌خصوص دی‌اکسید کربن متفاوت خواهد بود. علاوه بر این، بر اساس گزارش کارگروه اول تدوین گزارش پنجم ارزیابی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، میانگین دمای کره زمین در هر سه دهه اخیر به‌طور پیوسته افزایشی بوده است و دوره ۳۰ساله ۲۰۱۲-۱۹۸۳ گرم‌ترین دوره اقلیمی در ۱۴۰۰ سال گذشته بوده است (IPCC, 2013). پژوهش‌های انجام‌شده در کشور نشان می‌دهند، میانگین دما در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۱ حدود ۰,۵ درجه سلسیوس نسبت به میانگین دوره آماری افزایش می‌یابد (بوئر و همکاران، ۲۰۰۱: ص ۵۲۵). رخدادهای دما حداکثر و روزهای داغ با احتمال بیشتری رو به فزونی است. از طرف دیگر، مقادیر حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان رو به کاهش است. از ابتدای تابستان سال ۱۳۹۳، میانگین دمای کشور به‌طور متوسط یک درجه نسبت به میانگین دوره آماری افزایش یافت که علایم آن به‌صورت کمبود انرژی برق مورد نیاز و اختلالات مقطعی نمایان شد. توصیه‌های مکرر وزارت نیرو از طریق صدا و سیما در جهت صرفه‌جویی در مصرف برق، ارتباط بین افزایش دما و مصرف برق کشور را نشان می‌دهد.

غلظت حال حاضر دی‌اکسید کربن، متان و اکسید نیتروس نسبت به ۸۰۰ هزار سال بی سابقه بوده است. غلظت دی‌اکسید کربن به میزان ۴۰ درصد نسبت به دوره قبل از انقلاب صنعتی افزایش یافته است که اساساً ناشی از انتشار سوخت‌های فسیلی و در مرحله بعد ناشی از تغییر در کاربری اراضی بوده است. غلظت تجمعی دی‌اکسید کربن، تعیین‌کننده مقدار افزایش دمای سطح زمین در قرن بیست و یکم و بعد از آن است. حتی در صورت توقف انتشار دی‌اکسید

همکاران (۲۰۰۱) برای استرالیا از این مدل برای پیش‌بینی مصرف برق استفاده کرده‌اند. ارتباط معنادار و قوی از تأثیر تغییر اقلیم بر مصرف انرژی برق را آماتو^۳ و همکاران (۲۰۰۵) برای ماساچوست و راث^۴ و همکاران (۲۰۰۶) برای مریلند نشان دادند. هاودن و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر تقاضای برق در چهار شهر استرالیا شامل سیدنی، ملبورن، بریسبن و آدلاید پرداختند. در تمام این مناطق کاهش مصرف برای گرمایش در زمستان و افزایش مصرف برق برای سرمایش در تابستان مشهود بوده است. برای سیدنی و ملبورن افزایش دما، تأثیر کمی بر روی میانگین تقاضا داشت (۱/۵ درصد افزایش مصرف برق برای هر ۷ درجه افزایش دما)؛ اما برای بریسبن و مخصوصاً آدلاید، افزایش‌های شدید بین ۱۰ تا ۲۸ درصد در مصرف برق برای هر ۷ درجه افزایش دما محاسبه شد. گلمبک^۵ و همکاران (۲۰۰۱)، در بررسی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر بازار برق در اروپای غربی از مدل چندگانه LIBEMOD استفاده کردند تا علاوه بر شرایط اقلیمی، شرایط بازار عرضه را نیز در نظر بگیرند. آنها تأثیر تغییر اقلیم بر بازارهای برق را به سه دسته تقسیم کردند: اول، تأثیر بر تقاضای برق که خود متأثر از تغییر دماست؛ دوم، تأثیر در عرضه برق که با تغییر در جریان هیدرولوژیکی رودخانه‌ها و در نتیجه با عناصر دما و بارندگی در ارتباط است و سوم: کاهش بازدهی نیروگاه‌ها برای تولید برق گرمایی به دلیل بالارفتن دمای آب دستگاه‌های خنک‌کننده. نتایج این بررسی نشان داد، با توجه به تأثیر تغییر اقلیم بر روی این سه بخش، میانگین قیمت برق تولیدی ۲ درصد تغییر

کربن، بسیاری از پیامدها و جنبه‌های تغییر اقلیم برای قرن‌های متمادی ماندگار خواهد بود (IPCC, 2013). افزایش کنونی دی‌اکسید کربن (Co2) در جو زمین، عمدتاً به دلیل احتراق سوخت‌های فسیلی برای تولید و انتقال برق است (IPCC, 2007). برای مثال، بخش تولید برق در ایالت متحده آمریکا، ۳۴ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای تولیدی در این کشور را به خود اختصاص داده است (US EPA, 2013). به علاوه، این بخش از بزرگترین تولیدکنندگان دی‌اکسید گوگرد (So2)، اکسید نیتروژن (NOx) و جیوه به‌شمار می‌رود (IPCC, 2007).

با توجه به اینکه تغییرات اقلیمی پیامدهای جدی بر بخش برق به‌خصوص بر روی وضعیت عرضه و تقاضای آن در آینده خواهد داشت، شناخت این پدیده و تأثیر آن بر روی سیستم‌های متأثر از انرژی برق برای سیاست‌گذاران انرژی در سراسر جهان از اهمیت روزافزونی برخوردار است (شنکر و همکاران، ۲۰۱۰: ص ۲۲۱۲). پژوهشگران در سراسر جهان با استفاده از روش‌های گوناگونی به بررسی و مدل‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر روی مصرف برق پرداخته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به رگرسیون خطی چندگانه، فازی، شبکه‌های عصبی و دیگر روش‌های آماری پیشرفته اشاره کرد. در مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه، از متغیرهای آب و هواشناسی و اقتصادی به‌عنوان متغیر مستقل برای پیش‌بینی تغییرات در آینده استفاده می‌شود. گاه پژوهشگران این مدل را برای پیش‌بینی در سطح ملی به‌کار برده‌اند؛ رزنتال^۱ و همکاران (۱۹۹۵) و منصور^۲ و همکاران (۲۰۰۸) برای ایالت متحده، پارپوم و همکاران (۲۰۰۳) برای تایلند و هاون و

³ -Amato

⁴ - Ruth

⁵ - Golombek

¹ -Rosenthal

² -Mansur

خواهد کرد و تولید سالانه برق ۸۵ درصد افزایش خواهد داشت. در مطالعه‌ای که میلر^۱ و همکاران (۲۰۰۷) با عنوان تغییر اقلیم، گرمای شدید و تقاضای برق در کالیفرنیا انجام دادند، با مطالعه سناریوهای انتشار گوناگون مشخص شد تعداد گرم‌ترین روزهای تابستان که در شرایط فعلی ۱۲ روز در سال است، به ۹۶ روز در سال ۲۱۰۰ افزایش خواهد یافت. افزایش مصرف برق پیش‌بینی شده در سناریوی AIB بین سال‌های ۲۰۹۹-۲۰۷۰، ۲۰ تا ۳۰ درصد بیشتر از سناریوی B1 است. این یافته‌ها در ترکیب با روابط مدل شده بین دمای بالا و تقاضای برق به منظور تهویه هوا، نشان می‌دهد که در آینده کمبودهای بالقوه‌ای در انتقال و عرضه برق در زمان اوج مصرف وجود خواهد داشت. تاچر^۲ (۲۰۰۶) با استفاده از یک مدل رگرسیون خطی برای استرالیا به این نتیجه رسید که با فرض افزایش دمای محیط بیرون از سکونتگاه‌ها به میزان یک درجه سانتی‌گراد، تقاضای الکتریسیته بین ۲/۱- تا ۴/۶ در مناطق مختلف استرالیا تغییر خواهد کرد. کریستین سون^۳ و همکاران (۲۰۰۶)، با توسعه و بسط شاخص درجه روز برای سوئیس از داده‌های ماهانه دما استفاده کردند. آنها برای این پژوهش بر مبنای ۴۱ سناریوی منطقه‌ای و با استفاده از ۸ مدل گرمایش جهانی، میزان تقاضای انرژی در بخش گرمایش و سرمایش را با توجه به تغییرات اقلیم شبیه‌سازی کردند. شکوری و نادمی (۲۰۰۹)، با استفاده از مدل رگرسیون فازی به پیش‌بینی مصرف برق بر اساس دما در شهر تهران پرداختند. آنان برای مدل کردن متغیر تقاضا، از دمای روزانه استفاده کردند و مدل رگرسیون هیبرید فازی در مقایسه با مدل OLS

کارآیی قابل قبول‌تری را برای پیش‌بینی مصرف برق نشان داد. زمان و شکوری (۲۰۱۰) نیز با استفاده از مدل رگرسیون فازی به پیش‌بینی اوج تقاضای برق در ایران پرداختند. پارامترهای اقلیمی مورد استفاده در پژوهش آنان، شامل دما و رطوبت نسبی بوده است. آنان دو مدل رگرسیون فازی را به‌طور مجزا، برای تابستان و زمستان طراحی کردند. همچنین چن و لی^۴ (۲۰۱۰)، با استفاده از شبکه عصبی به پیش‌بینی مصرف برق در نیوزیلند پرداختند. نتایج آنان نشان داد، گرمایش جهانی در نیوزیلند یک درجه سیلسیوس بوده است که به احتمال زیاد به کاهش مصرف برق به میزان ۱/۴ درصد منجر خواهد شد. گزارش علمی کمیسیون اروپا نشان می‌دهد، بر اثر پدیده گرمایش جهانی نیاز به انرژی الکتریکی برای گرمایش در شمال اروپا حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است، اما در جنوب آن نیاز انرژی الکتریکی به میزان ۲۰ درصد برای مقاصد سرمایش افزایش خواهد یافت (European Commission, 2011). از جمله این پژوهش‌ها در داخل کشور، می‌توان به بررسی روشن و همکاران (۲۰۱۲) اشاره کرد. وی در مطالعه خود به منظور تخمین دورنمای انرژی مورد استفاده برای گرمایش و سرمایش سکونتگاه‌های انسانی در شمال غرب کشور پرداخت. وی برای شبیه‌سازی مقادیر درجه روز، از مدل گردش عمومی جو HadCM3 و سناریوی A1 استفاده کرد. همچنین، از مدل LARS-WG برای ریزمقیاس‌نمایی زمانی و مکانی داده‌ها بهره گرفت. نتایج نهایی این مدل‌سازی نشان داد، نیاز به انرژی گرمایشی به مقدار ۲۵/۲ درجه روز کاهش و افزایش نیاز به انرژی خنک‌کنندگی به مقدار ۸۲۵ درجه روز کالری برای میانگین ۹۰ سال آینده در نواحی شمال

¹ - Miller

² - Thatcher

³ - christenson

⁴Chen and Lie

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	مشهد	۳۶,۳	۵۹,۶
۲	اهواز	۳۱,۳	۴۸,۷
۳	بندرعباس	۲۷,۲	۵۶,۳
۴	اصفهان	۳۲,۶	۵۱,۷
۵	سنندج	۳۵,۳	۴۷,۰
۶	شیراز	۲۹,۶	۵۲,۶
۷	تبریز	۳۸,۱	۴۶,۳
۸	تهران	۳۵,۷	۵۱,۴
۹	زاهدان	۲۹,۵	۶۰,۹
۱۰	کرمان	۲۰,۳	۵۷,۱
۱۱	بندر انزلی	۳۴,۵	۴۹,۵
۱۲	کرمانشاه	۳۴,۳	۴۷,۱
۱۳	شاهرود	۳۶,۴	۵۵,۰

سری دوم داده‌های، آمار تولید برق کشور بر اساس آمارنامه منتشر شده از سوی شرکت برق ایران در دوره زمانی پیش گفته است که از آنها برای یافتن ارتباط بین نوسانات میانگین دمای کشور و برق تولیدی استفاده شد. سری سوم داده‌ها، برون‌داد سه مدل گردش عمومی جو^۱ MPEH5، HadCM3، NCCCSM هستند. صبوری (۱۳۹۳)، کارایی ۱۸ مدل گردش عمومی جو^۱ را که در گزارش چهارم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم ارائه شده است، با استفاده از روش وزنی بررسی کرد و در نهایت سه مدل MPEH5، HADCM3 و NCCCSM را برای برآزش دما و بارش ایران مناسب دانست. در پژوهش حاضر، با توجه به یافته‌های پژوهش وی، سه مدل فوق با سه سناریوی AIB، B1 و A2 استفاده شدند.

۱.۲. ارتباط بین دما و مصرف برق کشور

ارتباط بین میانگین‌های پنج‌ساله برق تولیدی و دمای کشور بر اساس آمار سازمان هواشناسی و شرکت برق کشور بررسی شد. در شکل ۱، ارتباط بین مقادیر نرمال شده دو متغیر یادشده بر اساس مدل

غرب است. خلیلی (۱۳۷۸)، در پژوهشی با عنوان تحلیل سه‌بعدی درجه روزهای گرمایش و سرمایش در ایران، به بررسی نیاز به انرژی در سکونتگاه‌ها پرداخت و نشان داد که در فصل گرم به ازای هر کیلومتر ارتفاع ۵۸۰ درجه روز از نیاز انرژی سرمایی کاسته می‌شود. بابائیان و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از آمار دما و برق مصرفی سالانه کشور و برون‌داد ریزمقیاس شده پیش‌بینی دمای مدل گردش عمومی جو^۱ HadCM3 بر روی کشور، دما و میزان تقاضای برق در کشور تا سال ۲۱۰۰ میلادی را شبیه‌سازی کردند. یافته‌های آنان نشان داد، با توجه به افزایش دمای پیش‌بینی شده، میزان تقاضای انرژی برق کشور در آینده در مقایسه با میانگین انرژی برق مصرفی در دوره ۹۰-۱۳۸۶ افزایش قابل توجهی خواهد داشت.

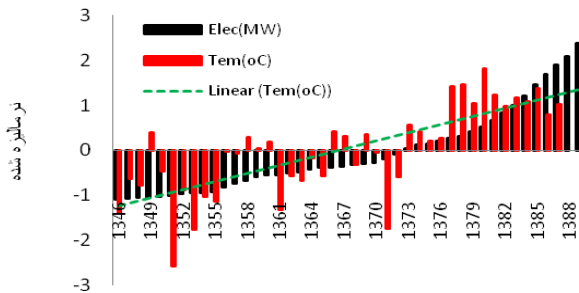
با توجه به اهمیت انرژی برق مصرفی در برنامه‌ریزی‌های کلان وزارت نیرو و نقش آن در اقتصاد کشورمان، در این پژوهش با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری برون‌داد سه مدل گردش عمومی MPEH5، NCCCSN، HadCM3 و میانگین دمای کشور تا سال ۲۱۰۰ شبیه‌سازی گردید و سپس بر اساس افزایش دمای شبیه‌سازی شده، چشم‌انداز میزان برق مصرفی مورد نیاز کشور برآورد می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش از سه سری داده استفاده شده است. سری اول داده‌های دمای دیدبانی ۱۳ ایستگاه هواشناسی در کل کشور که دارای آمار بدون نقص از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹ با توزیع جغرافیایی نسبتاً متوازن هستند. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی کشور برای محاسبه میانگین دمای کشور

¹General Circulation Model(GCM)

مذکور نشان می‌دهد که بین میانگین پنج‌ساله استاندارد شده برق تولیدی و دمای کشور تناظر یک‌به‌یک وجود دارد.



مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره ۱۳۸۹-۱۳۴۶ مقادیر میانگین مشاهداتی برق تولیدی و مدل شده بر اساس میانگین ۵ ساله دما به همراه خطای مربوطه در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر میانگین مشاهداتی برق تولیدی و مدل شده به همراه خطای مربوطه بر اساس میانگین ۵ ساله دما

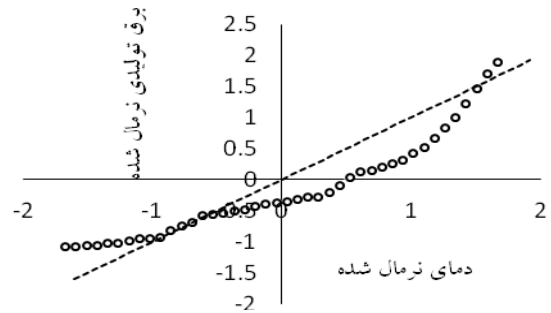
میانگین مشاهداتی (MW)	میانگین مدل‌سازی (MW)	خطا (درصد)
۱۷۴۵۰	۱۶۳۸۰	۶/۱

پس از ریزه‌مقیاس‌نمایی مقادیر دمای میانگین در بازه‌های زمانی ۵ ساله برای دوره‌های آتی، از معادله ۱ برای شبیه‌سازی برق تولیدی مورد نیاز برای آینده استفاده شد. خطای معادله فوق ۶/۱ درصد است.

۲.۲. ریزه‌مقیاس‌گردانی

از آنجا که مقیاس مکانی برون‌داد مدل‌های گردش عمومی جو بسیار درشت (حدود ۲۵۰ در ۲۵۰ کیلومتر مربع) بوده و قابل استفاده در مطالعات اقلیمی و سایر پژوهش‌های کاربردی نیست، از این‌رو، دانشمندان ابزارهای واسطی برای کوچک مقیاس نمودن برون‌داد مدل‌های پیش‌گفته ابداع کرده‌اند که عموماً به دو دسته آماری و دینامیکی تقسیم

رگرسیون خطی یک‌متغیره نشان داده شده است. همبستگی بین میانگین دمای کشور و برق مصرفی ۰,۷۲ و در سطح اعتماد ۰,۰۵ معنادار است. شکل

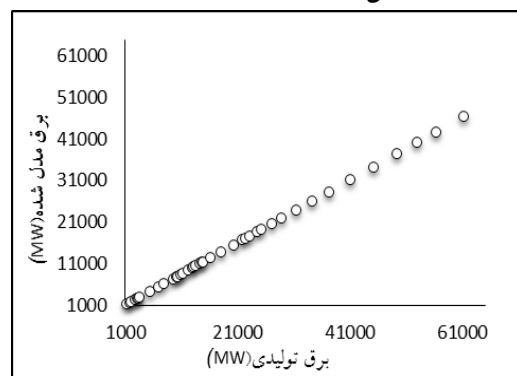


شکل ۱- چپ: سری زمانی میانگین‌های استاندارد شده پنج‌ساله دما و برق کشور در دوره ۱۳۸۹-۱۳۴۶؛ راست: وجود تناظر یک‌به‌یک بین میانگین دمای و انرژی برق مصرفی

معادله خط انرژی برق مصرفی کشور بر اساس متغیر مستقل دما به صورت زیر است:

$$E = 2.4635 * T_{avg} - 2.2537 \quad (1)$$

که در آن E و T_{avg} به ترتیب انرژی برق مصرفی و دمای نرمالیزه شده کشور به صورت میانگین‌های پنج‌ساله است. بر اساس معادله ۱، برق مصرفی کشور در دوره مشاهداتی ۱۳۸۹-۱۳۴۶ شبیه‌سازی شد. ارتباط بین میزان برق تولیدی مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی شده حاصل از معادله (۱) به صورت نمودار یک‌به‌یک در شکل ۲ آورده شد.



شکل ۲- نمودار یک‌به‌یک مربوط به برق تولیدی

در رابطه فوق، T_{obs} سری زمانی دمای مشاهداتی روزانه دوره پایه، T سری زمانی دما در دوره آتی و ΔT سناریوی تغییر دماست.

۳. بحث

با توجه به نتایج جدول (۳)، میانگین دمای کشور تحت سه سناریوی انتشار A1B (متوسط)، A2 (بدبینانه) و B1 (خوش بینانه) تا سال ۲۱۰۰ میلادی شبیه سازی شد. افزایش دمای کشور در سه دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ در جدول ۳ آورده شده است.

بر اساس مدل HadCM3 دما در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، بین ۱/۴ - ۰/۹ درجه و در دوره ۲۰۷۰ - ۲۰۴۱ بین ۳-۲،۲ درجه و در دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۷۱ بین ۴،۹-۲،۹ درجه افزایش خواهد داشت. مدل NCCCSN، افزایش دما برای دوره های مشابه فوق را به ترتیب ۱،۹-۱،۵، ۳-۲،۴، ۴،۴-۲،۴ درجه شبیه سازی کرده است و افزایش دما در مدل MPEH5 نیز به ترتیب در دهه های ذکر شده ۱،۴-۱،۱، ۲-۲،۸ و ۳،۲-۴،۹ درجه است. با توجه به نتایج به دست آمده بیشترین افزایش دما در دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۷۱ به مقدار ۴،۹ درجه سلسیوس مربوط به مدل های HadCM3 و MPEH5 برای است. کمترین افزایش دمای محتمل برای دوره یاد شده بین ۲،۴ تا ۳،۲ درجه سلسیوس خواهد بود که این مقدار بیش از محدودیت ۲ درجه ای توافق شده در کنفرانس های متعامدین (COP³) سال های اخیر است که UNFCCC به نمایندگی از سازمان ملل متحد برگزار می کند.

می شوند. در روش آماری ارتباط بین متغیرهای سطحی و برون داد مدل گردش عمومی از طریق روابط آماری به دست آمده در دوره تاریخی محاسبه می شوند؛ اما در روش دینامیکی این روابط از طریق حل معادله سیال هوا به دست می آید. از آنجاکه روش دینامیکی پرهزینه و وقت گیر است، اغلب ترجیح داده می شود از روش ریزمقیاس نمایی آماری استفاده شود (۱۴). این مدل ها با استفاده از خروجی GCM ها و به کارگیری طرح فرضی^۱ خاص مدل تولیدکننده، برون داد مدل های گردش عمومی جو در مقیاس بزرگ را به مقیاس خردتر تبدیل می کنند (۱۲). در این مطالعه از روش عامل تغییر^۲ برای ریزمقیاس نمایی برون داد مدل های گردش عمومی استفاده شده است. در ریزمقیاس نمایی به روش عامل تغییر یا تناسبی برای محاسبه سناریوی تغییر دما، متوسط درازمدت دمای ماهانه شبیه سازی شده در دوره آتی از دوره پایه کم می شود (۱۲).

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, base, i}) \quad (1)$$

که در آن ΔT_i بیانگر سناریوی تغییر دما برای میانگین درازمدت هرماه ($1 \leq i \leq 12$)، $\bar{T}_{GCM, fut, i}$ میانگین درازمدت دمای شبیه سازی شده به وسیله مدل گردش عمومی جو در دوره آتی و $\bar{T}_{GCM, base, i}$ میانگین درازمدت دمای شبیه سازی شده به وسیله همان مدل گردش عمومی جو در دوره مشابه با دوره مشاهداتی ماه مذکور است. برای به دست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی آینده، سناریوهای تغییر دمای هرماه به مقادیر مشاهداتی روزانه همان ماه افزوده می شود:

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad (2)$$

¹ Scenario

² Change Factor

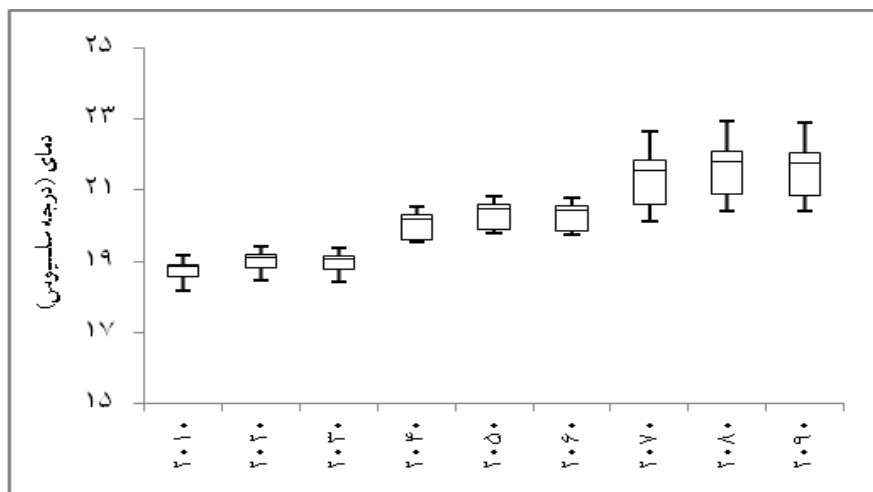
³ Conference Of Parities (COP)

جدول ۳- میزان افزایش دمای کشور تا سال ۲۱۰۰ میلادی تحت سناریوهای انتشار مختلف نسبت به دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱

۲۰۷۱-۲۱۰۰			۲۰۴۱-۲۰۷۰			۲۰۱۱-۲۰۴۰			نام مدل
B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	
۲,۹	۴,۹	۴,۲	۲,۲	۲,۹	۳	۰,۹	۱,۴	۱,۴	HADCM3
۲,۴	۴,۴	۳,۴	۲	۲,۹	۳	۱,۵	۱,۹	۱,۸	NCCCSN
۳,۲	۴,۹	۴,۲	۲	۲,۵	۲,۸	۱,۱	۱,۱	۱,۴	MPEH5

در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ دامنه تغییرات دمای پیش‌بینی شده بین چارک اول و سوم (پنجاه درصد داده‌ها) ۰/۴ درجه است؛ درحالی‌که این مقدار در دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ به ترتیب به ۰/۷ و ۱/۸ درجه سلسیوس افزایش یافته است؛ به عبارت دیگر با افزایش طول دوره پیش‌بینی، میزان عدم قطعیت افزایش می‌یابد.

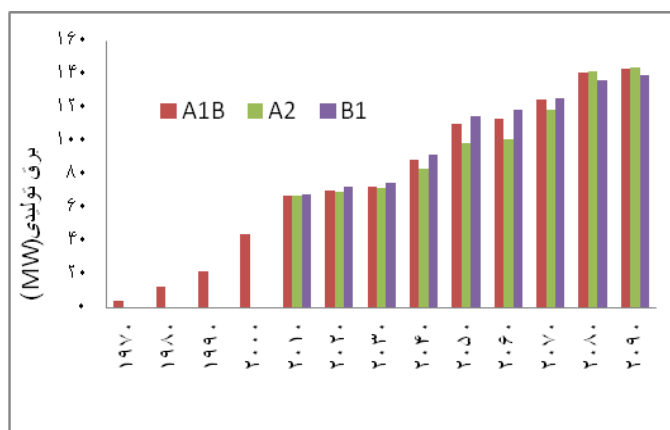
در شکل ۳، نمودار جعبه‌ای تغییرات دمای کشور تحت شرایط گرمایش جهانی در سه دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که میانگین دمای دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ نسبت به دوره دیدبانی به ترتیب ۱/۴، ۲/۶ و ۳/۸ درجه افزایش می‌یابد. نکته مهمی که در شکل دیده می‌شود، افزایش دامنه عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها در دهه‌های آتی است؛ به طوری‌که



شکل ۳- چشم‌انداز افزایش میانگین دمای کشور تا ۲۱۰۰ میلادی

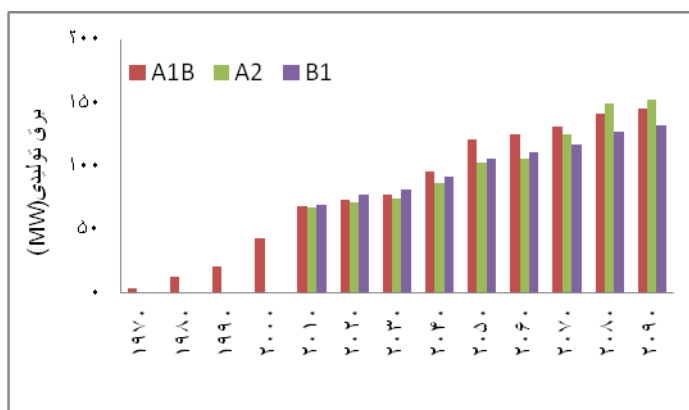
مشخص‌کننده ارتباط بین انرژی برق مصرفی سالانه و میانگین دمای کشور، چشم‌انداز انرژی مصرفی کشور تا سال ۲۱۰۰ در شکل‌های ۴ تا ۶ آورده شده است.

با استفاده از ۹ سری دمای سالانه شبیه‌سازی شده کشور تا سال ۲۱۰۰ میلادی که حاصل ریزمقیاس‌نمایی برون‌داد ۳ مدل گردش عمومی جو تحت ۳ سناریوی انتشار است و با به‌کارگیری معادله



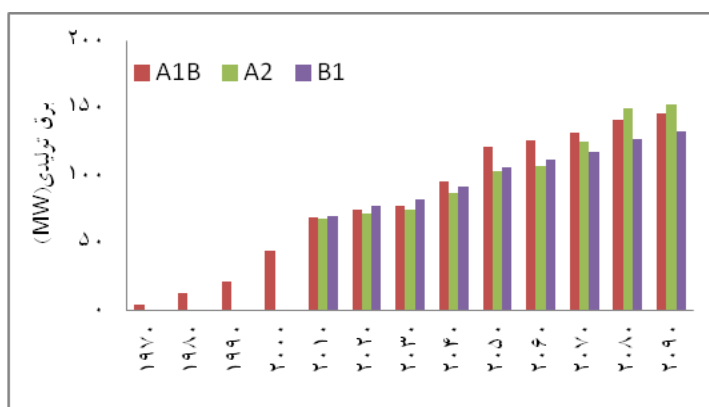
شکل ۴- نمودار میزان انرژی برق تولیدی کشور تا سال ۲۱۰۰ میلادی بر اساس سه سناریوی انتشار مختلف (مدل

(HadCM3)



شکل ۵- نمودار میزان انرژی برق تولیدی کشور تا سال ۲۱۰۰ میلادی بر اساس سه سناریوی انتشار مختلف (مدل

(NCCCSN)



شکل ۶- نمودار میزان انرژی برق تولیدی کشور تا سال ۲۱۰۰ میلادی بر اساس سه سناریوی انتشار مختلف (مدل

(MPEH5)

اساس در دهه ۲۰۴۰-۲۰۱۱ میزان تقاضای برق بین ۲۸,۲ تا ۳۳,۵ درصد، در دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ بین ۸۵,۱ تا ۱۱۶,۹ و در دهه انتهایی قرن حاضر بین ۱۷۵,۷ تا

در جدول ۴، درصد افزایش برق مصرفی موردنیاز کشور در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ برای مدل HadCM3 آورده شده است. بر این

۱۸۱,۳ درصد افزایش خواهد یافت.

جدول ۴- چشم‌انداز افزایش تقاضای برق کشور

سناریوی انتشار			دوره
B1	A2	A1B	
۳۳,۵	۲۸,۲	۳۰,۰	۲۰۱۱-۲۰۴۰
۱۱۶,۹	۸۵,۱	۱۰۷,۴	۲۰۴۱-۲۰۷۰
۱۷۵,۷	۱۷۷,۷	۱۸۱,۳	۲۰۷۱-۲۱۰۰

افزایش خواهد یافت (جدول ۵)

جدول ۵- چشم‌انداز افزایش تقاضای برق مصرفی کشور (درصد) تا سال ۲۱۰۰ میلادی تحت سناریوهای مختلف (مدل NCCCSN)

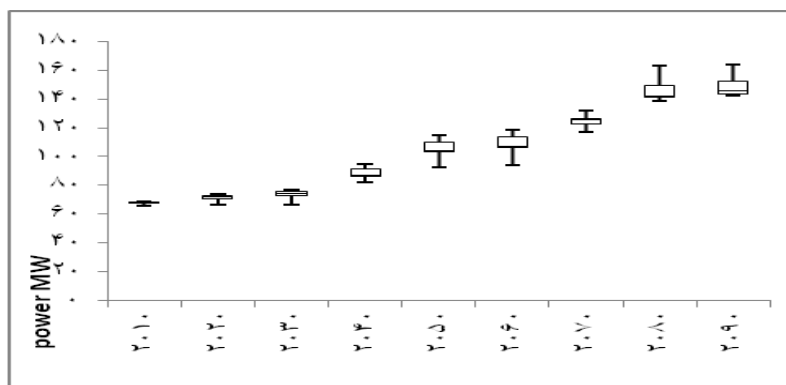
سناریوی انتشار			دوره
B1	A2	A1B	
۴۴/۳	۳۲/۹	۳۷/۷	۲۰۱۱-۲۰۴۰
۱۰۵/۴	۹۵/۶	۱۳۰/۳	۲۰۴۱-۲۰۷۰
۱۵۶/۸	۱۹۴/۹	۱۸۸/۶	۲۰۷۱-۲۱۰۰

بر اساس نتایج مدل NCCCSN میزان تقاضای برق در دهه ۲۰۱۱-۲۰۴۰ بین ۳۲/۹ تا ۴۴/۳ درصد، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ بین ۹۵/۶ تا ۱۳۰/۳ و در دهه انتهایی قرن حاضر بین ۱۵۶/۸ تا ۱۹۴/۹ درصد

جدول ۶- چشم‌انداز افزایش تقاضای برق مصرفی کشور (درصد) تا سال ۲۱۰۰ میلادی تحت سناریوهای مختلف (مدل MPEH5)

سناریوی انتشار			دوره
B1	A2	A1B	
۳۴/۹	۳۰	۲۱/۹	۲۰۱۱-۲۰۴۰
۹۳/۹	۹۵/۷	۱۰۸/۰۸	۲۰۴۱-۲۰۷۰
۱۸۹	۱۹۸/۵	۱۹۸/۷	۲۰۷۱-۲۱۰۰

نتایج مدل MPEH5 نیز میزان افزایش تقاضای برق را برای دهه‌های ذکر شده به ترتیب بین ۲۱/۹ تا ۳۴/۹ درصد، ۹۳/۹ تا ۱۰۸/۰۸ درصد و بین ۱۸۹ تا ۱۹۸/۷ درصد محاسبه کرده است.



شکل ۷- چشم‌انداز نمودار انرژی برق مصرفی کشور در دهه‌های آینده تحت سناریوهای مختلف اقلیمی

دینامیکی، افزایش تعداد مدل-سناریوها، داده‌های بازتحلیل دما و متغیرهای غیراقليمی تأثیرگذار مانند رشد اقتصادی و جمعیت استفاده شود.

نتایج

در این پژوهش تأثیرگذاری پدیده گرمایش جهانی بر روی میزان تقاضای انرژی برق کشور با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری برون‌داد سه مدل گردش عمومی جو شامل NCCCSN, HadCM3 و MPEH5 بررسی شد. در شبیه‌سازی میزان تقاضای برق کشور در دهه‌های آینده، رفتار میانگین پنج‌ساله برق مصرفی-دمای کشور مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان داد، دمای میانگین کشور در سه دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ به ترتیب ۱/۴، ۲/۶ و ۳/۸ درجه سلسیوس در مقایسه با دوره پایه ۹۰-۱۹۶۱ افزایش خواهد یافت. این افزایش دما موجب خواهد شد تا میزان تقاضای انرژی برق کشور به ترتیب ۵۱، ۸۱/۴ و ۱۱۷/۲ مگاوات معادل ۱۶/۸، ۱۹/۴ و ۲۵/۴ درصد در مقایسه با میانگین انرژی برق مصرفی در دوره ۹۰-۱۳۸۶ افزایش یابد. به عبارت دیگر، در انتهای قرن حاضر برق مصرفی کشور حدود سه برابر میانگین پنج‌ساله (۹۰-۱۳۸۶) اخیر خواهد بود. عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها بین ۸/۶ تا ۲۹/۸ مگاوات معادل ۱۶/۸ تا ۲۵/۴ درصد خواهد بود. در پژوهش حاضر تنها تأثیرات متغیر دما بررسی شده است. بدیهی است در یک پژوهش جامع لازم است تأثیرات سایر متغیرهای تأثیرگذار مانند رشد جمعیت و توسعه اقتصادی را هم مدنظر قرار داد تا عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها کاهش یابد. پیشنهاد می‌شود، کارگروهی در وزارت نیرو تشکیل شود و بر روی

در باکس پلات‌های ترسیم‌شده در شکل‌های ۳ و ۷، افزایش ارتفاع باکس پلات نشان‌دهنده عدم قطعیت بیشتر در شبیه‌سازی‌هاست. عدم قطعیت فاصله بین پیش‌بینی‌هایی که بین چارک اول و سوم قرار می‌گیرند، در نظر گرفته شده است. میانگین دمای کشور برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۱۹ درجه سلسیوس، دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ برابر با ۲۰ درجه و دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱، ۲۱/۴ درجه محاسبه شد. میزان افزایش دما در دوره‌های فوق نسبت به دوره مشاهده‌اتی، ۱/۴، ۲/۶ و ۳/۸ درجه خواهد بود. دامنه عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها در هر یک از دوره‌های فوق به ترتیب ۰/۶، ۱ و ۱/۵ درجه سلسیوس است. بر اساس مدل رگرسیونی ارتباط بین میانگین دما و برق مصرفی و نیز میانگین‌های ریزمقیاس‌شده دما به روش عامل تغییر، چشم‌انداز میانگین برق تولیدی مورد نیاز برای دهه‌های آتی محاسبه شد. نتایج نشان داد، میانگین انرژی برق مورد نیاز کشور در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ برابر ۷۱/۷ مگاوات، دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ برابر با ۱۰۲/۱ و دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱، ۱۳۷/۹ مگاوات خواهد بود که به ترتیب معادل ۵۱، ۸۱/۴ و ۱۱۷/۲ مگاوات افزایش در میزان برق مورد نیاز کشور است. عدم قطعیت مقادیر برآوردشده فوق در سه دوره مورد بررسی به ترتیب ۸/۶، ۲۷/۱ و ۲۹/۸ مگاوات معادل ۱۶/۸، ۱۹/۴ و ۲۵/۴ درصد است که منعکس‌کننده دامنه خطای شبیه‌سازی میزان برق مورد نیاز کشور در سه دهه آینده است. هرچه میزان عدم قطعیت یا نوسان‌پذیری برق شبیه‌سازی‌شده بیشتر باشد، برنامه‌ریزی در بخش‌های مختلف کشور نیز دچار نوسان و عدم قطعیت خواهد شد. پیشنهاد می‌شود، برای کاهش دامنه عدم قطعیت از ریزمقیاس‌نمایی

جو، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.

Boer GJ, Stouffer RJ, Dix M, Noda A, Senior CA, Raper S, et al (2001). Projections of future climate change. In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, et al., editors. Climate change: the scientific basis. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. p. 525–542.

Chen, GH. Lie, TT (2010). The impact of climate change on New Zealand's electricity demand. Probability methods applied to power systems (PMAPS) pp. 808–813. Singapore: IEEE.

Christenson, M., Manz, H., Gyalistras, D., (2005). Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. Energy conversion and management, 47 (6):671-686.

Golombek R, Kittelsen SA, Haddeland I. Climate change: impacts on electricity markets in Western Europe. Climatic Change 2012; 113:357–70.

IPCC. (2007). Inter-governmental panel on climate change – Fourth assessment Report (AR4). Cambridge, UK; New York, US: Cambridge University Press.

IPCC, 2013, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

European Commission, (2011), The impact of climate change on Europe's electricity demand, DG of Environmental News Alert Service, New Alert, No. 223.

Miller N, Jin J, Hayhoe K, Auffhammer M. Climate change, extreme heat and electricity demand in California. Berkley: California Energy Commission; 2007

Ruiter, A. (2012). "Delta-Change approach for CMIP5 GCMs." Royal Netherlands Meteorological Institute, Trainee report,

پیامدهای تغییرات اقلیم دهه‌های آینده بر میزان مصرف برق مطالعه و ظرفیت لازم برای احداث نیروگاه‌های برق کشور را بررسی کند. برای کاهش عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، می‌توان از تعداد بیشتری مدل-سناریو، روش‌های دینامیکی و همچنین مدل‌های با قدرت تفکیک مکانی بیشتر استفاده کرد.

منابع

شرکت مادر تخصصی توانیر، (۱۳۹۱). ۴۵ سال صنعت برق در آینه آمار ۱۳۹۰-۱۳۴۶. مهر ۹۱، ص ۶۵.

مرکز آمار ایران، (۱۳۸۹). نتایج آمارگیری از مقدار مصرف انرژی در کارگاه‌های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیشتر ۱۳۸۹-۱۳۸۲، ۲۴ صفحه.

بابائیان، ا.، نجفی نیک ز.، زابل عباسی ف.، حبیبی نوخندان م.، ادب ح.، ملبوسی ش.، (۱۳۸۸). ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G، مجله جغرافیا و توسعه، ۱۶: ۱۶۲-۱۳۵.

بابائیان، ا.، عرفانی، ع.، کریمیان، م.، مدیریان، ر.، (۱۳۹۳). شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر مصرف برق کشور در دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۰ با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی برون‌داد مدل گردش عمومی جو با استفاده از مدل HADCM، دهمین همایش بین‌المللی انرژی، شهریور ۱۳۹۳.

شائمی برزکی، اکبر؛ حبیبی نوخندان، مجید، (۱۳۸۸). گرمایش جهانی پیامدهای زیستی-اکولوژیکی، انتشارات ترجمان خرد. ص ۲۱۰.

صبوری، غ. موسوی بایگی، م؛ هاشمی نیا، م؛ بابائیان، ا. (۱۳۹۳). مطالعه تغییرات پهنه‌های اقلیمی ایران در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۰ تحت پدیده گرمایش جهانی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی

- 336p
- (16).Roshan, Gh.R.,Orosa, J., Nasrabadi, T., 2012, Simulation of Climate Change Impact on Energy Consumption in Buildings, Case Study of Iran, Energy Policy, Vol. 49, PP. 731-739.
- Semenov, M.A., Barrow, E.M., 2002, LARS-WG a Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies, user's Manual, Version3.0, <http://www.rothamsted.ac.uk/mas/models/download/LARS-WG-Manual.pdf>.
- Shankar N. Chandramowli , Frank A(2010). Felder Impact of climate change on electricity systems and markets, Sustainable Energy Technologies and Assessments journal,volume 5, March 2010, issn 2212 - 1388
- Shakouri H, Nadimi R, Ghaderi F. A hybrid TSK-FR model to study short-term variations of the electricity demand versus the temperature changes. Expert SystAppl 2009; 36(2):1765-72
- Thatcher, M., (2006). Modelling changes to electricity demand load duration curves as a Consequence of predicted climate change for Australia. Energy 32, 1647-1659
- US EPA (2013). Sources of Greenhouse Gas Report. Retrieved 15 January 2013, from United States Environment Protection Agency (US EPA)
- Zaman, H, Shakouri, H (2010).A combined 2-dimensional fuzzy regression model to study the effects of climate change on electricity consumption in Iran. In: International conference on energy, power and control (EPC-IQ), Basrah, Iraq: IEEE.

