ارائه رویکردی نوین در فیزیک هسته ای و تولید برق هسته ای

فاطمه اهل طربیان[1]

1-کارشناسی ارشد فیزیک

چکیده

سیاست های کنونی تولید برق مبتنی بر سوخت های فسیلی در دنیا سبب انتشار آلاینده های کربن دار و گرم شدن کره ی زمین می گردد. در تحقیقاتی که صورت گرفته است استفاده از سیاست های تشویقی تولید برق با استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر نظیر فتوولتاییک و باد، افزایش مالیات بر تولید کربن برای صنایع و استفاده از انرژی هستهای به عنوان راهکارهایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در جو ارایه شده است. بدین منظور گسترش استفاده از انرژی هسته ای برای تولید برق در دستور کار دولت ها قرار گرفته است. با توجه به آمار منتشر شده از سوی وزارت نیرو، تولید برق در ایران وابستگی زیادی به نیروگاه های فسیلی دارد به گونه ای که سهم این نیروگاه ها طی سال های 1386 تا 1395 به طور میانگین حدود 84 درصد از تولید کل برق کشور بوده است. از جهت دیگر، کشور نیازمند حرکت به سوی یک استراتژی تولید برق قابل اعتماد متناسب با رشد جمعیت است به شکلی که امنیت تولید آن را تضمین کند.

واژگان کلیدی: برق هسته ای، فیزیک هسته ای

1. مقدمه

گذار جمعیتی یک تحول جمعیتی بنیادین و فراگیر بوده و تجربه‌ای اجتناب‌ناپذیر برای همه‌ی کشورهای دنیا است. اغلب به دلیل ناهماهنگی زمانی گذار جمعیتی با گذار اقتصادی و اجتماعی و عدم اتخاذ سیاست‌های اقتصادی اجتماعی متناسب

با آن، در بسیاری از کشورها، مسائلی بروز خواهد کرد که در صورت عدم چاره‌اندیشی، مسائل اقتصادی و اجتماعی حادی را در پی خواهد داشت(نصرالهی وسطی & آقایاری هیر, 1396).

در میان حامل های انرژی، برق یک عامل بسیار اساسی برای اقتصاد دنیا می‌باشد تا آنجا که برای تبیین و تعیین وضعیت اقتصادی کشورها و سطح رفاه آن‌ها از شاخص هایی مانند تولید و مصرف سرانه ی برق استفاده می‌شود. رشد تقاضای برق متأثر از عواملی گوناگون نظیر قیمت حامل های انرژی، رشد جمعیت، تغییرات ساختاری در اقتصاد، تولید ناخالص داخلی(GDP)*و توسعه‌ی صنایع انرژی بر و بهبود کارایی می‌باشد. پاسخگویی به این رشد در تقاضا می‌تواند به توسعه‌ی بخش عرضه به منظور تأمین این تقاضا بیانجامد. در این راستا، با افزایش تقاضا، ظرفیت نصب شده در بخش عرضه نیز افزایش می‌یابد. رشد تقاضا در این حالت، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری روی نیروگاه ها تلقی می‌شود؛ درحالی که تبعات دیگری نیز در این ارتباط وجود دارد(باتاچاریا† & تیمیلسینا‡, 2010).

تقاضا برای برق نه تنها از مصرف‌کنندگان صنعتی بلکه معطوف به مصرف‌کنندگان خانگی نیز می‌باشد. تأمین نیروی برق مورد نیاز، اغلب، به تأسیس نیروگاه‌های جدید نیاز دارد(فخاری & و غیره, 2019).

تولید برق به منابع انرژی دیگر به‌خصوص سوخت‌های فسیلی وابسته است. از طرفی، مصرف انرژی‌های سنتی و سوختن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های برق، آلاینده‌های زیادی را از قبیل اکسیدهای سولفور، اکسیدهای نیتروژن، دی اکسید کربن، مونو اکسیدکربن و مواد ریز ذره‌ای ایجاد کرده است و تأثیراتی همچون باران اسیدی، فرسایش لایه‌ی ازون و پدیده گرمایش جهانی را به همراه داشته است که این موارد جدای از تولید جیوه، آرسنیک، نیکل و سایر ضایعات ناشی از نیروگاه‌های برق با منابع فسیلی است(باتاچاریا§, 2011).

با توجه به افزایش تقاضای انرژی در سال 2018، میزان تولید گاز CO_2 در جهان با 1/7 درصد افزایش به 33/1 گیگاتن رسید. درحالی که میزان تولید سوخت های فسیلی افزایش یافته است، بخش برق تقریبا 67 درصد رشد تولید گازهای گلخانه ای را تشکیل می‌دهد. استفاده از زغال سنگ به تنهایی منجر به تولید بیش از 10 گیگاتن CO_2 شده است که بیشتر تولید آن در آسیا رخ داده است. سه کشور چین، هند و ایالات متحده 85 درصد افزایش خالص تولید گازهای گلخانه ای را به خود اختصاص داده‌اند، درحالی که گازهای گلخانه ای آلمان، ژاپن، مکزیک، فرانسه و انگلیس کاهش یافته است (آژانس بین‌المللی انرژی,**2018).

در سال 2015 در پاریس، قراردادی برای مقابله با تغییرات اقلیمی و همچنین سرمایه‌گذاری در جهت دستیابی به اقتصادی کم‌کربن، مقاوم، انعطاف‌پذیر و پایدار توسط 195 کشور مورد توافق قرار گرفت که ایران نیز جزو آن‌ها می‌باشد. هدف اصلی این توافق جهانی، جلوگیری از افزایش بیش از 2 درجه سانتی‌گراد در دمای کره زمین تا پایان قرن حاضر و همچنین تلاش برای محدود کردن افزایش دما تا حداکثر 1/5درجه سانتی‌گراد نسبت به سطح آن قبل از صنعتی شدن است. هدف بلندمدت توافق پاریس این است که دمای کره زمین تا پایان قرن 21 به جای 2 درجه، 1/5 درجه سانتی‌گراد افزایش یابد که این امر با کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای محقق خواهد شد(توافقنامه‌ی پاریس,2015).

مطابق با ترازنامه ی انرژی در سال 1395، در ایران بخش‌های نیروگاهی، خانگی، تجاری، عمومی و حمل و نقل به ترتیب 29/3 ، 25/4 ، 23/8 درصد از سهم انتشار دی اکسید کربن را در بین بخش‌های مصرف کننده و تولید کننده انرژی به خود اختصاص داده‌اند(امینی, و غیره, 1397).

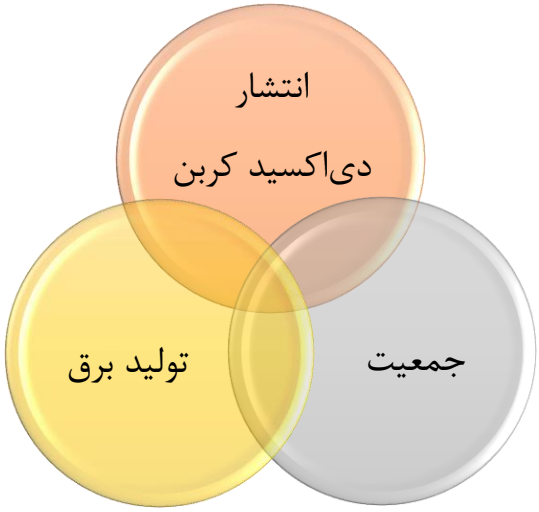
---

* Gross Domestic Product
† Bhattacharyya
‡ Timilsina
§ Bhattacharyya
** International Energy Agency (IEA)

میزان مصرف سوخت‌های فسیلی برای سال‌های 1388 تا 1394 در بخش نیروگاهی باعث تولید 1176535 هزارتن کربن-دی‌اکسید شده است که این حجم از تولید کربن‌دی‌اکسید خارج از استانداردها و حدود بین‌المللی می‌باشد (شفیع زاده, و غیره, 1397).

با مقایسه‌ی تولید کربن‌دی‌اکسید در نیروگاه‌های اتمی با نیروگاه‌های مختلف می‌توان دریافت که سهم این نیروگاه نسبت به سایر نیروگاه‌های تولید برق بسیار ناچیز است (معاونت برنامه ریزی و توسعه بودجه, 1397).

همانگونه که در شکل 1 نشان داده شده است، این پژوهش به سه حوزه علمی جمعیت، تولید برق و انتشار دی‌اکسید کربن پیوند دارد. این پیوند برگرفته از رابطه پویای میان این سه حوزه است. در همین راستا، از روش شبیه سازی پویایی سیستم‌ها برای مدل‌سازی و واکاوی مساله پژوهش بهره گرفته خواهد شد.



شکل 1: سه‌گانه‌ی مفهومی پژوهش

هرگونه برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در زمینه‌ی رشد جمعیت به عنوان یکی از مسایل مهم، نیازمند توجه ویژه به بخش انرژی و محیط زیست است. موضوع گرمایش جهانی که پیامدی اثرگذار از انتشار گازهای گلخانه ای و ردپای کربن در زیست کره است به این رهنمون شده است تا تصمیم گیران و سیاست‌گذاران بیش از پیش به تولید و انتشار دی اکسید کربن حساسیت نشان دهند. انرژی الکتریکی نیز از یک سو به عنوان یکی از مهمترین گونه‌های انرژی، نقشی اساسی در تامین نیازهای افراد و صنعت ایفا می‌کند و از سوی دیگر در تولید گازهای گلخانه ای و به ویژه دی اکسید کربن، نقش دارد. از این روی بررسی ارتباط سه حوزه جمعیت، انتشار دی اکسید کربن و تولید برق از اهمیت بالایی برخوردار است.

مسئله ی این پژوهش بررسی روابط حاکم بر تولید برق متناسب با رشد جمعیت کشور است به گونه ای که در آن ردپای کربن به دلیل تمایل به کاهش انتشار آلاینده های زیست محیطی نیز دیده شود. اهمیت توجه به این مسئله بدین سبب است که با توجه به افزایش جمعیت و در پی آن پیش‌بینی رشد تقاضای برق در کشور، چنانچه این نیاز مطابق با روند سنتی که مبتنی بر تولید برق به کمک نیروگاه‌های فسیلی است ادامه یابد، روند تولید و انتشار گازهای گلخانه ای افزایش می‌یابد که علاوه بر مشکلات زیست محیطی داخلی، در تضاد با توافقات جهانی مبنی بر کاهش انتشار آلاینده ها به خصوص کربن است. شایان توجه است که در این پژوهش، جنبه‌های هزینه‌ای و مالی بررسی نخواهد شد و بیشتر بر روی رابطه‌ی پویا میان سه سیستم یاد شده تمرکز خواهد شد.

2- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در مطالعه‌ای که توسط نصراللهی و همکاران صورت گرفت، تلاش شد تا با ارائه‌ی مدلی، کاربرد تفکر سیستمی و مدل‌سازی سیستم‌های پویا، به تجزیه و تحلیل ابعاد اقتصادی تحولات جمعیتی پرداخته شود. هدف از مطالعه‌ی انجام شده، تحلیل دینامیکی تحولات جمعیتی و پیامدهای اقتصادی آن با استفاده از تفکر سیستمی می‌باشد. در این راستا به منظور شناسایی متغیرهای مهم جمعیت‌شناختی و پیامدهای آن‌ها، از روش تحلیل محتوای 201 مقاله که در بازه‌ی زمانی 2005 تا 2014 در مجله‌ی Population Studies به عنوان یکی از مجلات معتبر جمعیتی، منتشر شده‌اند، استفاده شده است. تحلیل سیستم‌های پویا یکی از تکنیک‌هایی است که امکان مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و غیرخطی را فراهم می‌آورد. لذا، از یک مدل دینامیکی نیز برای نشان‌دادن روابط علی میان عوامل شناسایی شده، بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان زاد و ولد، میزان مرگ‌ومیر، مهاجرت، سالمندی جمعیت، نرخ باروری، شهرنشینی و امید به زندگی نقش مهمی در پیش‌بینی برخی از متغیرهای اقتصادی همچون نیروی کار، اشتغال، تولید ناخالص داخلی، درآمد سرانه، مصرف، مالیات، پس‌انداز و بودجه ایفا می‌کنند(نصرالهی وسطی & آقایاری هیر, 1396).

رشد جمعیت، افزایش سرانه‌ی مصرف برق، توسعه‌ی بخش‌های صنعتی و کشاورزی و غیره منجر به تقاضای افزایشی مداوم در انرژی برق در ایران شده است. نیروگاه‌ها به عنوان منابع تولید برق از مهمترین بخش‌های شبکه‌ی تولید برق هستند و توسعه‌ی چنین شبکه‌هایی نیاز به ایجاد نیروگاه‌های جدید و گسترش نیروگاه‌های موجود دارد. عملیات احداث و گسترش نیروگاه‌ها پروژه‌های اساسی هستند و عواقب اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و زیست‌محیطی فراوانی را شامل می‌شوند(فخاری & و غیره, 2019).

در واقع، عمده‌ی سهم قرن بیست‌ویکم، تدوین استراتژی‌هایی برای تولید انرژی بیشتر برای تأمین نیازهای جهانی و در عین حال کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. چندین منبع انرژی تجدیدپذیر در کاهش GHG*نقش دارند و ممکن است برای کشورهای کمتر توسعه یافته به عنوان سرمایه نسبتاً کم تقاضا (به جز نیروگاه‌های بزرگ آبی) و گزینه‌های غیرمتمرکز مناسب باشد. با این حال، توسعه‌ی آنها در مقیاس بزرگ با محدودیت‌های مهم امکان‌سنجی اقتصادی و فنی حتی اگر ذخایر بالقوه مؤثر به خوبی ثبت شده باشد، روبرو است. انرژی هسته‌ای، یک فناوری جدید و با یک سرمایه متمرکز، به عنوان یک گزینه بلند مدت و با کارایی بالا پیش‌بینی شده است و با توجه به خطر بالا بودن نوسانات قیمت نفت و گاز در بازارهای بین‌المللی، می‌تواند به سیاست‌های اقلیمی و همچنین امنیت انرژی کمک کند(فیوره†, 2006).

امی جی. سی. تراپی و چارلز وی. تراپی در پژوهش خود درباره‌ی بررسی روابط بین مالیات بر تولید کربن، هزینه‌های تولید برق و نصب سلول‌های خورشیدی، مدل‌های شبیه‌سازی سیستم پویا (SD)‡ را برای ارزیابی این روابط و همچنین قیمت تامین منابع فسیلی و سبز در تایوان ارائه می‌دهند. مدل‌های SD با سناریوها برای ارزیابی نتایج نرخ‌های مالیاتی مختلف، کاهش انتشار، هزینه‌های برق و ظرفیت‌های فتوولتائیک ساخته شده‌اند. سهم این پژوهش، ساخت مدل‌های SD به‌عنوان یک ابزار حمایت از تصمیم برای اصلاح سیاست‌های پرداخت مالیاتی کربن است. ارزیابی براساس سناریوهای مختلف (با اشاره به سیاست‌های مالیاتی دیگر کشورها) برای پیش‌بینی تأثیر مالیات بر کربن بر جنبه‌های اقتصادی و زیست محیطی در تایوان است(تراپی & تراپی§, 2019).

کوسای و یونه ساکی در مقاله‌ای به تجزیه‌وتحلیل کمی در امنیت تامین برق بر اثر اختلال در عرضه انرژی هسته‌ای در ژاپن پرداختند. در این مقاله با توجه به ضرورت بهبود امنیت تامین نیروی برق برای حفظ فعالیت‌های انسانی و حادثه‌ی هسته‌ای فوکوشیما که سبب بروز اختلال ناگهانی در عرضه‌ی برق به‌خصوص در استفاده از انرژی هسته‌ای شد، خطرهای جدیدی را

---

* Greenhouse Gas
† Fiore
‡ System Dynamic
§ Trappey & Trappey

برای تامین امنیت برق ناشی از مسائل اجتماعی یا آسیب‌پذیری هسته‌ای بررسی می‌کند. به‌عنوان مثال، یک روش برای اندازه‌گیری آسیب‌پذیری‌های هسته‌ای، که در ابتدا با تغییر سرعت و زمان وقوع ناگهانی توقف بهره‌برداری هسته‌ای رخ می‌داد، ایجاد کردند. از طریق تجزیه‌وتحلیل آسیب‌پذیری هسته‌ای، یک شاخص امنیتی جدید تامین برق را با استفاده از انرژی هسته‌ای، به نام سیستم وقفه آسیب‌پذیری هسته‌ای (SINVI)*توسعه دادند. SINVI می‌تواند برای پیش‌بینی خطر ناتوانی در عرضه برق ناشی از توقف ناگهانی از عملکرد نیروی هسته‌ای که مربوط به ترکیبی از ظرفیت‌های مختلف منابع انرژی است مورد استفاده قرار گیرد(کوسای† & یونه ساکی‡، 2017).

یو لی و یی شین رن بر اساس مدل پویایی سیستم به تجزیه و تحلیل توسعه انرژی باد چین بر اساس سیاست‌های انگیزشی پرداختند. آن‌ها در ابتدا یک مدل SD را برای شبیه‌سازی توسعه نیروی باد در چین طی سال‌های 2032- 2012 با توجه به عوامل اقتصادی و فنی ایجاد کردند. علاوه بر این، تجزیه‌وتحلیل حساسیت و تجزیه‌وتحلیل سناریوها را برای محدوده متنوع نتایج شبیه‌سازی انجام دادند. اگرچه سیاست محیطی یارانه‌ها و سرمایه‌گذاری برای نیروی باد چین جزو سیاست‌های مطلوب به‌شمار می‌رود، اما این موضوع همچنان از محدودیت برق تولیدی توسط باد و سوءاستفاده از یارانه‌های قیمت جلوگیری نمی‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به‌روز نبودن شبکه انتقال و وابستگی بیش از حد به یارانه‌های قیمت‌ها، موانع اصلی توسعه انرژی باد در چین هستند. این نتایج می‌تواند در ارزیابی الگوی توسعه بلندمدت و محدودیت های اصلی توسعه انرژی باد در چین مفید باشد(لی§ & یی شین رن**، 2017).

شائودان گئو و شیائوپنگ گئو در پژوهش خود به چندین سیاست انگیزشی چین برای شکستن هزینه‌های سنگین و تحریک سرمایه‌گذاری در صنعت برق فتوولتائیک اشاره دارند. تحت این محیط سیاست مطلوب، بدون شک برق PV†† فرصت‌های توسعه‌ی بسیار زیاد روبه‌رو است. در این مقاله در مرحله اول، پس از تجزیه‌وتحلیل محیط سیاست فعلی و تعامل بین متغیرهای درگیر، یک مدل شبیه‌سازی توسعه برق PV چین با استفاده از روش پویایی سیستم با توجه به عوامل اقتصادی و فنی ساخته شده است. سپس تحلیل حساسیت برای متغیرهای کلیدی و اثربخشی سیاست‌های مربوطه صورت می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی تولید، سرمایه‌گذاری و ظرفیت در طول سال‌های 2012 تا 2032 نشان‌دهنده‌ی روند در حال توسعه آینده و ارزیابی منطقی و تاثیر سیاست‌های انگیزشی است. این مدل به درک طولانی مدت الگوی توسعه انرژی PV در زیر سیاست‌های جدید انگیزش چین کمک می‌کند و به این ترتیب کمک می‌کند تا مرجعی برای موسسات سیاست‌گذاری ارائه شود(گئو & گئو‡‡، 2015).

این دو پژوهش‌گر همچنین به بررسی شبیه‌سازی نرخ رشد، میزان توسعه و تکامل مسیر انرژی هسته‌ای چین با ایجاد مدل‌های SD در ساخت‌وساز دور جدید پروژه‌های هسته‌ای پرداخته‌اند. پس از یک شکاف سه ساله ناشی از حادثه‌ی هسته‌ای فوکوشیما، چین در نهایت مجددا تصویب پروژه‌های هسته‌ای ساحلی جدید را دنبال کرد و به دنبال آن تکنولوژی راکتور نسل جدید به تدریج بالغ شد و سیاست‌های حمایت‌کننده به طور فزاینده‌ای بیشتر شد. با توجه به این تغییر عمده در محیط سیاست، توسعه‌ی انرژی هسته‌ای چین قطعا در مرحله‌ی جدیدی قرار می‌گیرد. در زمینه‌ی تغییر سیاست قدرت هسته‌ای، این مقاله برای تسلط بر الگوی توسعه‌ی پویای سیستم قدرت هسته‌ای چین مفید است(گئو & گئو, 2015).

---

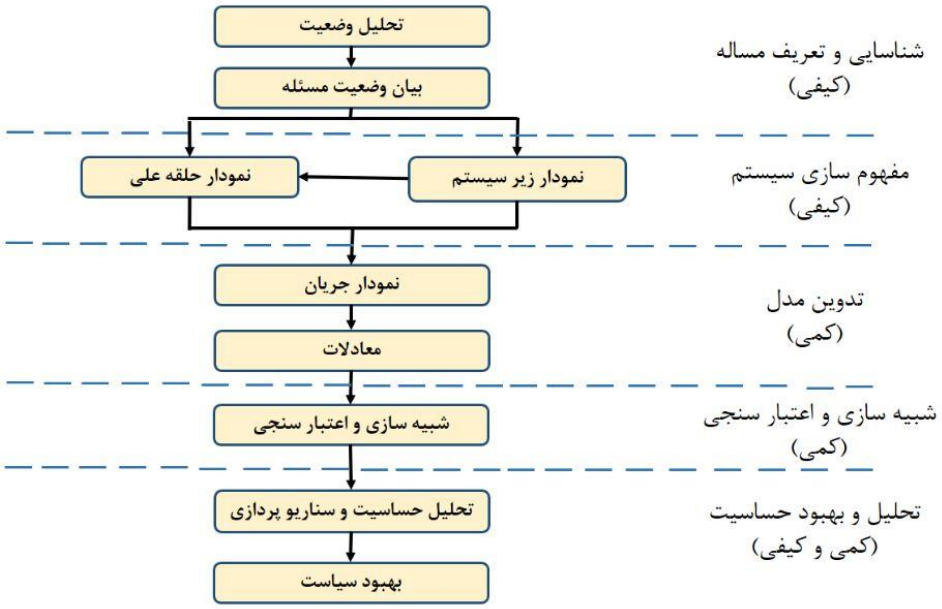
* System Interruption Nuclear Vulnerability Index
† Kosai
‡ Unesaki
§ Li
** Yi-Xin Ren
†† Photovoltaics
‡‡ Guo & Guo

3- روش‌شناسی پژوهش

در ابتدا، مطابق با پیشینه‌ی پژوهشی و گزارش‌های مراجع معتبر در مورد رشد جمعیت و مدل‌های آن و همچنین درباره‌ی نیروگاه‌های گوناگون و میزان انتشار آلاینده‌های هریک، به تعریف و ساختاردهی به مسئله، تعریف فرضیات پویای مرتبط با مسئله، روش پژوهش، انتخاب متغیرها و نوع هر یک از آنها پرداخته می‌شود. عوامل و پارامترهای اثرگذار در مدل این پژوهش شناسایی شده و نوع هریک از این پارامترها مشخص می‌شود. سپس متغیرهای اثرگذار مشخص می‌گردد. در گام بعد، مدل‌سازی با استفاده از روش SD انجام می‌شود، نمودار حلقه علی (CLD)*مساله رسم شده و در نهایت با بررسی سناریوها، سیاست‌گذاری و ارایه‌ی پیشنهاد برای حل مساله بیان می‌شود.

پویایی سیستم‌ها اولین بار توسط فارستر† در موسسه فناوری ماساچوست آمریکا معرفی شد. فارستر با توجه به ذهنیتی که به سبب تحصیل در رشته‌ی مهندسی برق از مدارهای الکتریکی و مکانیزم های سروو‡ و سیستم‌های کنترلی فیدبک دار داشت از دانش خود در مورد تئوری کنترل بازخورد و استفاده از رایانه های مدرن برای تهیه روش هایی برای مدل سازی و تحلیل مشکلات در سیستم های پیچیده استفاده کرد. (لین§ & استرمن،** 2011).

از آنجا که تکنیک‌های مدل‌سازی تحقیق در عمل تنها قادر به داشتن تعداد محدودی از متغیرها در مدل‌سازی از یک سیستم هستند و همچنین روابط بین این متغیرها به صورت خطی درنظر گرفته می‌شود رویکرد سیستم پویا به عنوان اولین پاسخ به نقاط ضعف تحقیق در عملیات و سایر تکنیک‌های علوم مدیریت معرفی گردید. این رویکرد بر رفتار پویای سیستم متمرکز است و براساس نتایج مطالعات قبلی توسط توستین در مورد سیستم‌های کنترل الکتریکی و مکانیکی توسعه یافته است(کیانی & حسینی & عبدی, 2018). شکل 2 مراحل و ابزار حل مسئله را در SD نشان می دهد.

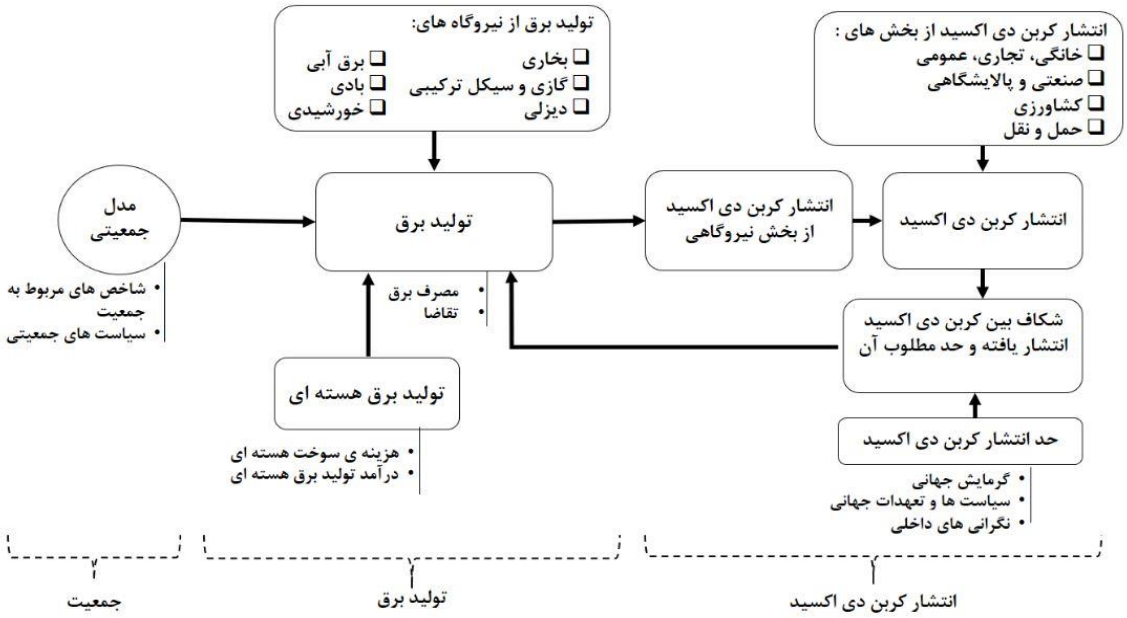


شکل 2. مراحل و ابزار حل مسئله در SD (کیانی & حسینی & عبدی, 2018)

* Causal Loop Diagram
† Jay Wright Forrester
‡ Servomechanism
§ Lane
* Sterman *

4- مدلسازی سیستم پویا

همانطور که بیان شد برای مساله‌ی این پژوهش سه زیرسیستم مربوط به جمعیت، برق و انتشار کربن‌دی‌اکسید تعیین شد. در شکل 3 رابطه‌ی بین این زیرسیستم‌ها نشان داده شده است.



شکل3.زیر سیستم‌های مساله

در این مساله عوامل زیادی در زیرسیستم‌های جمعیت، تولید و مصرف برق و انتشار آلاینده ها موثر هستند که با توجه به بعد زمان، و تغییرات آنها در فواصل زمانی، ماهیتی پویا می‌یابند.

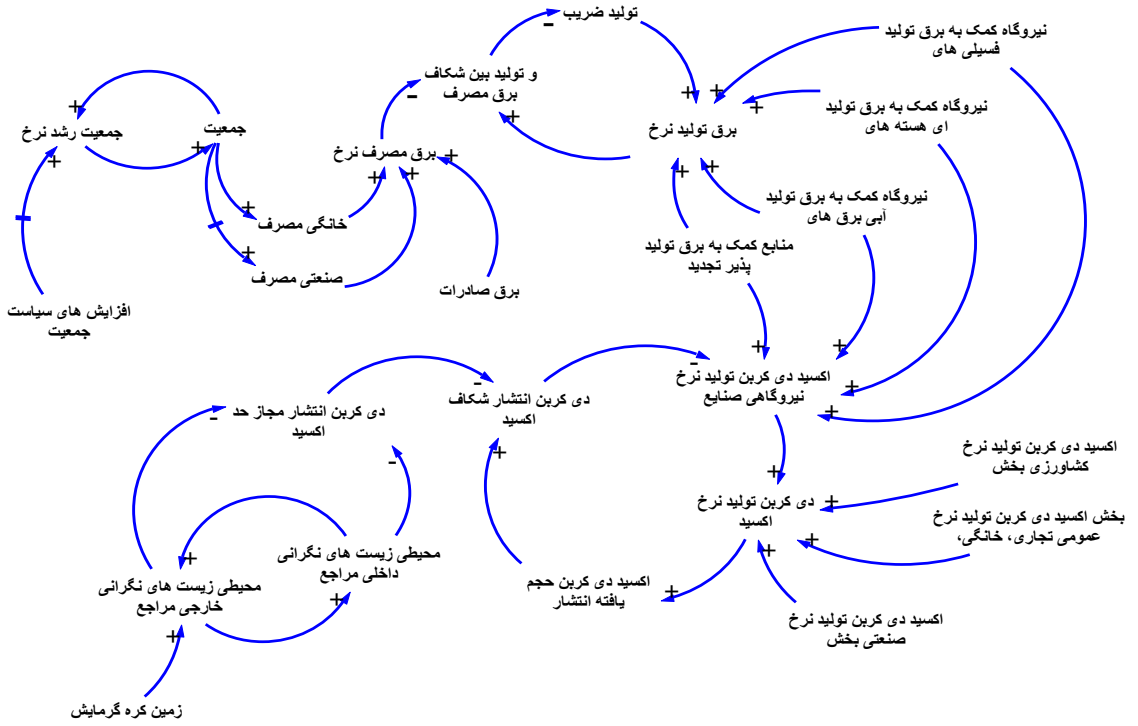
جدول 1 نمودار مرز مدل را نشان می‌دهد. در این جدول متغیرهای اصلی مدل با توجه به تعریف مرزبندی مدل به سه دسته درون‌زا، برون‌زا و مستثنی تقسیم می‌شوند. متغیرهای درون‌زا متغیرهایی هستند که دینامیک آنها در محدوده مدل ایجاد می‌شود و متغیرهای برون‌زا متغیرهایی هستند که به صورت بیرونی وارد مدل می‌شوند. متغیرهای استثنا نیز متغیرهایی هستند که در مطالعات ادبیات و مصاحبه با برخی از کارشناسان صنایع مرتبط مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، اما به دلیل برخی محدودیت‌ها از جمله عدم انتشار رسمی داده‌های آماری، سیاسی بودن تصمیمات و غیره از مدل نهایی حذف شده‌اند(کیانی & حسینی & عبدی, 2018). این متغیرها در جدول 1 معرفی شده‌اند.

جدول1. مرزبندی مدل

متغیرهای درونزا	متغیرهای برونزا	متغیرهای استثنا
• جمعیت	• سیاست‌های افزایش جمعیت	• هزینه‌ی سوخت هسته‌ای
• نرخ رشد جمعیت	• صادرات برق	• درآمد تولید برق هسته‌ای
• مصرف خانگی	• گرمایش زمین	
• مصرف صنعتی	• نگرانی‌های مراجع داخلی و خارجی	

• شکاف بین تولید و مصرف برق • تولید برق فسیلی • تولید برقابی • تولید برق هسته‌ای • تولید برق به کمک منابع تجدیدپذیر • نرخ تولید کربن نیروگاهی	• نرخ تولید کربن در بخش کشاورزی • نرخ تولید کربن در بخش خانگی، تجاری، عمومی • نرخ تولید کربن در بخش حمل و نقل • نرخ تولید کربن در بخش صنعتی • نرخ تولید کربن • حجم کربن انتشار یافته • شکاف انتشار کربن‌دی‌اکسید	

در شکل شماره‌ی 4 مدل حلقه علّی این مساله آورده شده است. این مدل شامل سه بخش اساسی است که توضیح هر یک به تفکیک آورده شده است :

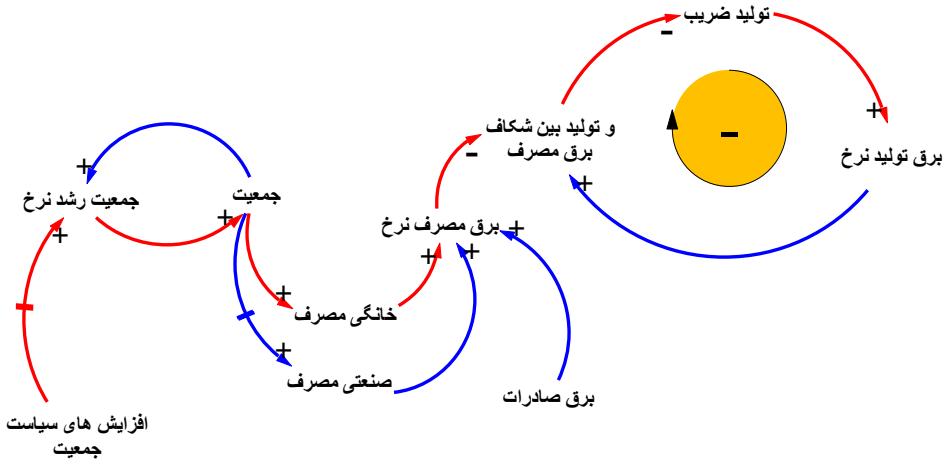


شکل4. مدل حلقه علّی مساله

1-4-جمعیت

سیاست‌های افزایش جمعیت شامل یکسری اقداماتی است که در پی معکوس کردن کاهش باروری یا به دنبال انطباق و سازگاری با روندهای پایین باروری است. دسته‌ی اول که به دنبال افزایش باروری هستند عبارتند از اقدامات مثبت مانند افزایش مشوق‌های اقتصادی و کاهش هزینه های تولد اضافی و اقدامات منفی شامل محدود کردن دسترسی به روش‌های کنترل باروری است. (عرفانی, 1398) از مشوق‌های اقتصادی، خدماتی، رفاهی و بهداشتی-درمانی می‌توان افزایش حقوق عائله‌مندی و تسهیلات متناسب با تعداد فرزند، پاداش‌های ماهیانه، اختصاص سبد تغذیه‌ی رایگان ماهانه، پوشش بیمه‌ی اجباری درمان مادر و کودک بصورت رایگان، افزایش طول مدت مرخصی‌های استحقاقی مربوط به زایمان و افزایش سنوات تحصیلی دانشجویان مادر را نام برد.

با توجه به شکل شماره‌ی 6 ملاحظه می‌شود سیاست افزایش جمعیت بر نرخ افزایش جمعیت و نرخ افزایش جمعیت بر متغیر جمعیت تاثیر می‌گذارد. افزایش جمعیت بر نرخ مصرف برق خانگی تاثیری همسو می‌گذارد. با افزایش مصرف برق مطابق با حلقه‌ی کنترل تولید و مصرف برق، نیاز به تولید افزایش می‌یابد که این امر، مستلزم افزایش توان نیروگاه‌ها در کوتاه‌مدت و تاسیس واحدهای نیروگاهی جدید به منظور افزایش ظرفیت اسمی شبکه برای پاسخ به نیاز آینده، در بلند مدت می‌باشد. از سوی دیگر افزایش جمعیت، کشورها را ملزم به بهبود و گسترش زیرساخت‌ها می‌نماید که این تغییر و تحولات نیاز کشور را به برق بیشتر می‌کند. لازم به ذکر است که تاثیر مصارف صنعتی با تاخیر زمانی احساس می‌شود.



شکل6.روابط علی بین زیر سیستم جمعیت و نرخ تولید و مصرف برق

2-4-برق

سیستم تولید برق شامل نیروگاه‌های تولید برق می‌باشند که مجموع تولید آنها ظرفیت اسمی تولید برق کشور را تشکیل می‌دهد. مطابق با آمار منتشر شده از وزارت نیرو ظرفیت اسمی تولید برق نیروگاه‌های کشور تا انتهای سال 1395 حدود 76 هزار مگاوات بوده است. جدول شماره 2 مجموع ظرفیت اسمی نیروگاه‌های کشور را به تفکیک نوع نیروگاه در بازه‌ی زمانی 10 ساله از سال 1386 تا 1395 نشان می دهد.

جدول2.مجموع ظرفیت اسمی نیروگاه‌های کشور به تفکیک نوع نیروگاه ها(مگاوات)

(شفیع زاده, و غیره, 1397)

سال	فسیلی (بخاری-گازی-سیکل ترکیبی-دیزلی)	آبی	اتمی	تجدیدپذیر	مجموع
1386	41928/1	7422/3	0	74	49424/4
1387	45209/2	7672/5	0	89/9	52971/6
1388	48708/7	7704/7	0	90/4	56503/8
1389	52871/6	8487/8	0	100	61459/4
1390	55350/8	8746/2	1020	105	65222
1391	58014/9	9746/1	1020	113/1	68894/1
1392	58832/4	10266/4	1020	117/1	70235/9
1393	61173/8	10789/3	1020	165/7	73148/7
1394	61631/8	11354/3	1020	179/3	74185/2
1395	63627/8	11579/8	1020	256/4	76484

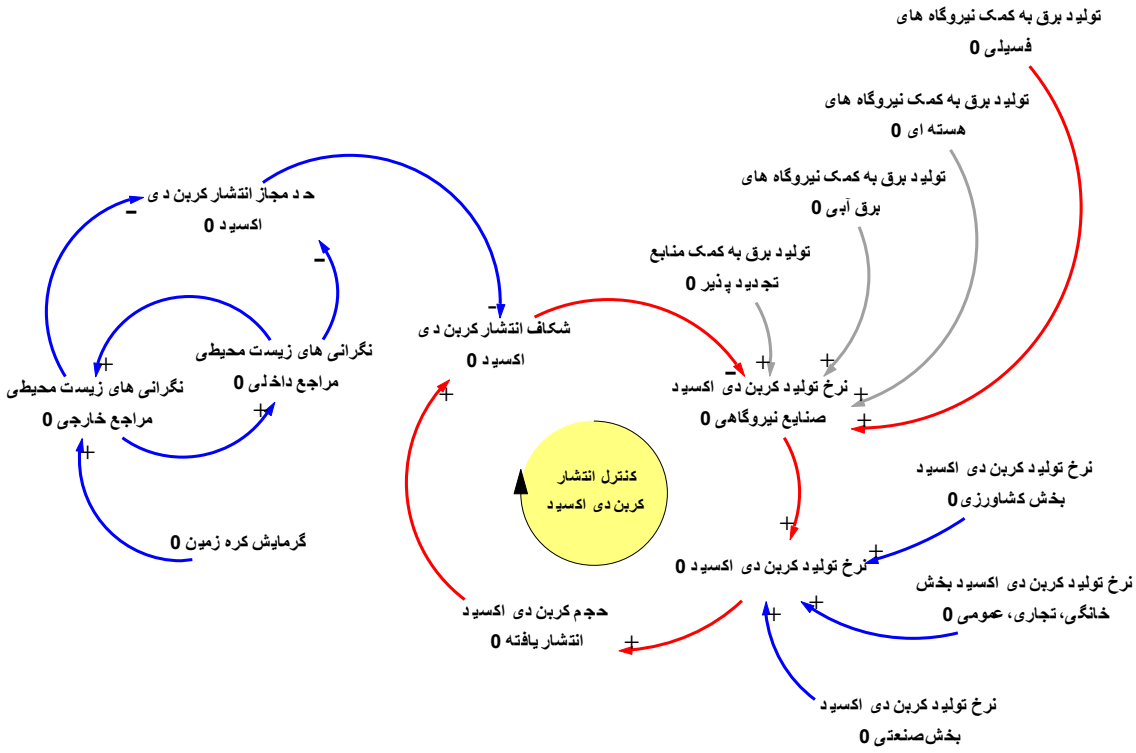
3-4-انتشار آلاینده‌ها

انتشار آلاینده ها به خصوص آلاینده‌های کربن‌دار نظیر کربن‌دی‌اکسید متاثر از بخش‌های گوناگون است. در جدول شماره-ی3 مقادیر انتشار کربن‌دی‌اکسید در بخش‌های گوناگون در بازه‌ی 10 ساله از سال 1386 تا 1395 آورده شده است.

جدول3.انتشار کربن‌دی‌اکسید در بخش‌های گوناگون (هزار تن) (شفیع زاده, و غیره, 1397)

سال	خانگی، تجاری و عمومی	صنعتی و پالایشگاهی	کشاورزی	حمل و نقل	نیروگاهی	مجموع
386	143137	101146	12210	117035	.29232	502760
387	135101	104932	13171	122233	.47032	2469
388	138431	102109	13662	133940	.50328	3470
389	133358	108159	13718	124681	.54777	4693
390	136143	107589	11252	130463	.65185	0632
391	128100	111587	11094	133108	.74664	3553
392	139156	122116	11724	142624	.79825	5445
393	138290	123918	8381	138588	.77745	6922
394	142123	109143	12523	146366	.74011	4166
395	149009	113989	11966	139149	.71687	5800

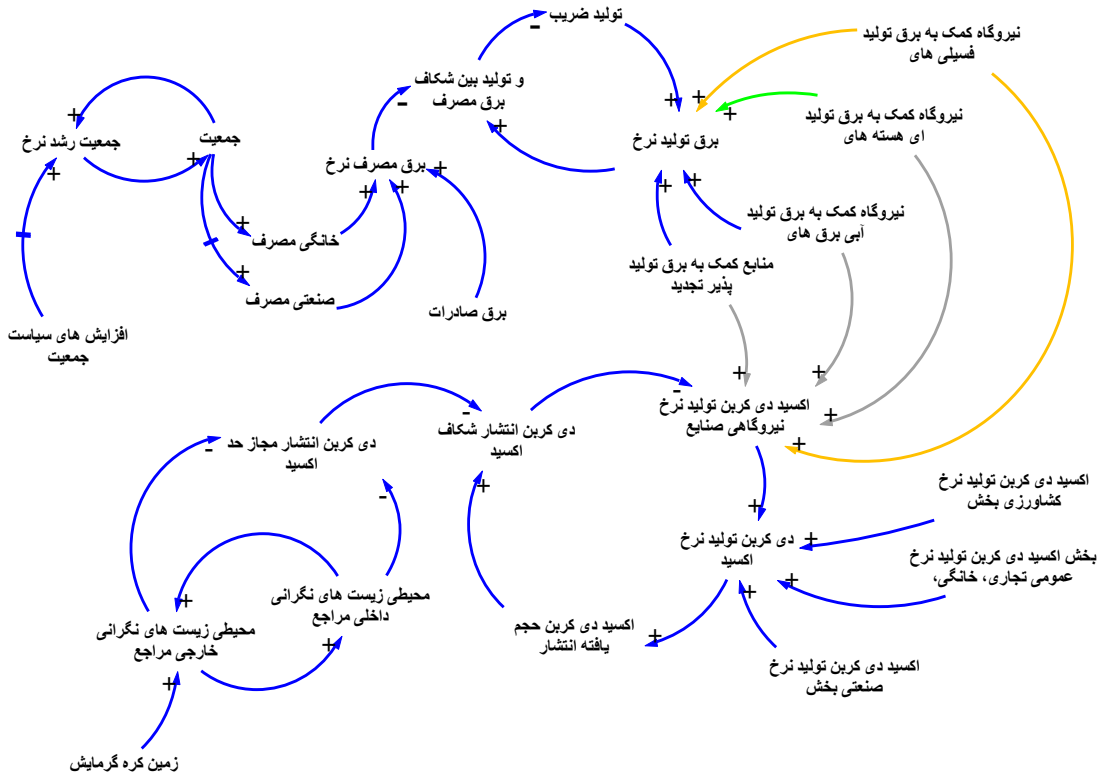
مطابق با جدول شماره‌ی 3 ملاحظه می‌گردد که انتشار کربن در بخش نیروگاهی بیشتر از سایر بخش‌ها می‌باشد. بنابراین همانگونه که در شکل شماره‌ی 7 مشاهده می‌شود با اتخاذ سیاست‌های مناسب در این بخش می‌توان از انتشار حجم قابل توجهی کربن‌دی‌اکسید جلوگیری نمود.



شکل7.تاثیر برق فسیلی بر انتشار کربن‌دی‌اکسید

در کشور نیروگاه‌های با تیپ مختلف در حال تولید برق هستند. مطابق با جدول شماره‌ی 2 نیروگاه‌های فسیلی که شامل نیروگاه‌های بخاری، گازی، سیکل ترکیبی و دیزلی هستند بیشترین سهم را در تولید دارند. انتشار کربن‌دی‌اکسید در نیروگاه‌های برقابی، هسته‌ای و نیروگاه‌های با سوخت تجدیدپذیر در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی ناچیز است، برای تغییر در میزان کربن‌دی‌اکسید انتشار یافته بایستی از تولید برق فسیلی کاست و بر ظرفیت اسمی نیروگاه‌های با تیپ دیگر افزود. نیروگاه‌های تجدید پذیر به دلیل ظرفیت کم، در دسترس نبودن و چگالی انرژی اندک نمی‌توانند به عنوان نیروگاه‌های با بار پایه، جایگزین دایمی نیروگاه‌های فسیلی شوند. از سوی دیگر نیروگاه‌های برقابی درای معایبی نظیر تغییر ساختار محیط-زیست و تغییرات اکوسیستمی و مشکلات کشاورزی برای زمین‌های حاشیه‌ی نیروگاه به خصوص در زمان آبگیری سد می-باشد.

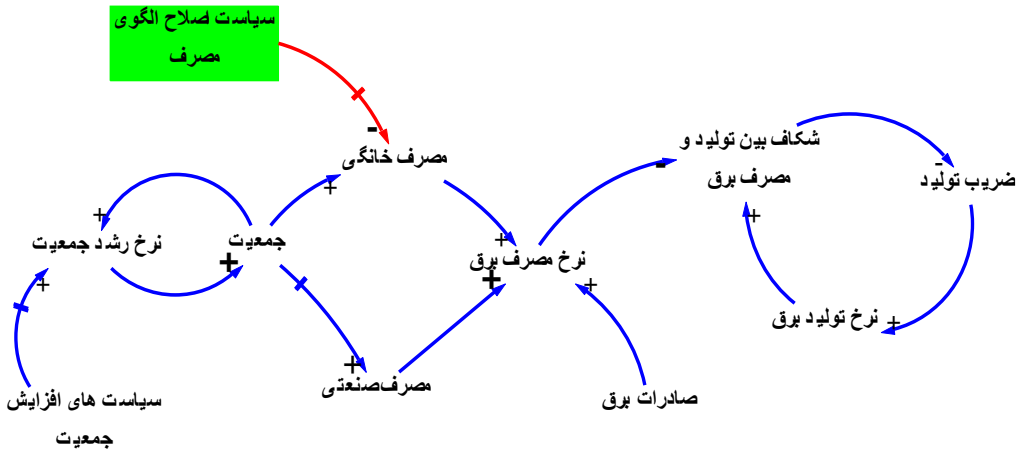
نیروگاه‌های اتمی بواسطه‌ی تکنولوژی جدید و چگالی انرژی بالای سوخت هسته‌ای می‌توانند جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های فسیلی باشد. اگرچه زباله‌ها و پسماندهای هسته‌ای یکی از مشکلات عمده‌ی کشورهای دارای این نوع نیروگاه‌ها است اما این نیروگاه‌ها از نظر انتشار آلاینده‌های جوی نظیر کربن‌دی‌اکسید تقریبا هیچگونه آلودگی ندارند(هایس*، 2005). بنابراین اولین سناریوی کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید، کاهش تولید برق فسیلی و افزایش سهم برق هسته‌ای می-باشد. در شکل شماره‌ی 8 این سناریو با تغییر رنگ لینک مربوط به تولید برق هسته‌ای به رنگ سبز، به معنی افزایش تولید و برق فسیلی به زرد، به معنی کاهش تولید است. واضح است که با کاهش تولید برق فسیلی لینک مربوط به تولید کربن ناشی از نیروگاه‌های فسیلی به رنگ زرد تغییر می‌یابد.



شکل8.کاهش تولید برق فسیلی و افزایش تولید برق هسته‌ای

*Hayes

مطابق با نمودار علی بیان شده در شکل 9 می‌توان یک اقدام اصلاحی دیگر نیز بیان نمود. به عنوان سیاست دوم با اصلاح الگوی مصرف،می‌توان میزان مصرف برق را کم نمود. این سناریو شاید در کوتاه مدت اثری واضح و ملموس نداشته باشد اما در طولانی مدت به عنوان یک سیاست کمکی می تواند نتیجه بخش باشد.



شکل9.تاثیر سیاست اصلاح الگوی مصرف

5-بحث و نتیجه‌گیری

سیاست‌های کنونی تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی در دنیا سبب انتشار آلاینده‌های کربن‌دار و گرم شدن کره‌ی زمین می‌گردد. در تحقیقاتی که صورت گرفته است استفاده از سیاست‌های تشویقی تولید برق با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر فتوولتاییک و باد، افزایش مالیات بر تولید کربن برای صنایع و استفاده از انرژی هسته‌ای به‌عنوان راهکار-هایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو ارایه شده است. بدین منظور گسترش استفاده از انرژی هسته‌ای برای تولید برق در دستور کار دولت‌ها قرار گرفته است. با توجه به آمار منتشر شده از سوی وزارت نیرو، تولید برق در ایران وابستگی زیادی به نیروگاه‌های فسیلی دارد به گونه‌ای که سهم این نیروگاه‌ها طی سال‌های 1386 تا 1395 به طور میانگین حدود 84 درصد از تولید کل برق کشور بوده است. از جهت دیگر، کشور نیازمند حرکت به سوی یک استراتژی تولید برق قابل اعتماد متناسب با رشد جمعیت است به شکلی که امنیت تولید آن را تضمین کند.

این پژوهش با توجه به مبانی نظری درباره‌ی نقش انرژی هسته‌ای در کاهش انتشار کربن و فرصت‌های زیادی که در جهت وابستگی کمتر به برق فسیلی با کمک انرژی هسته‌ای در کشور وجود دارد به تاکید بر گسترش انرژی هسته‌ای و بالا بردن ظرفیت برق هسته‌ای کشور با استفاده از مدل سیستم پویا پرداخته است. علاوه بر آن اصلاح الگوی مصرف را به عنوان یک سناریوی کمکی با نگرش بلندمدت معرفی کرده است. با وجود ارزش روش ما، محدودیت های متعددی وجود دارد. مهم‌تر این پژوهش به سادگی مجموعه‌های دیگر تولید انرژی را بدون در نظر گرفتن تعامل آنها با سیستم برق SDاز همه، مدل هسته‌ای تحلیل می‌نماید. علاوه بر آن، از تاثیر موارد مربوط به هزینه‌های صنعت هسته‌ای، مدیریت پسماندهای هسته‌ای و تحریم‌های خارجی چشم‌پوشی شده است. پژوهش‌های آینده باید به موارد مربوطه پاسخ دهند.

6-مراجع

امینی, ف., صابر فتاحی, ل., سلیمان پور, پ., گل قهرمانی, ن., شفیع زاده, م., توانپور, م., . . . خودی, م. (1397). ترازنامه انرژی سال 1395. وزارت نیرو.

شفیع زاده, م., امینی, ف., گل قهرمانی, ن., خودی, م., توانپور پاوه, م., صابر فتاحی, ل., & سلیمان پور, پ. (1397). مروری بر 29 سال آمار انرژی کشور (1395-1367). وزارت نیرو.

عرفانی, ا. (1398). تحولات فرهنگی، تداوم باروری پایین و سیاست جمعیتی ایران. سلامت اجتماعی, 112-115.

معاونت برنامه ریزی و توسعه بودجه. (1397). گزارش عملکرد تولید برق نیروگاه اتمی بوشهر در سال 1396. شرکت تولید و توسعه ی نیروگاه های اتمی.

نصرالهی وسطی, ل., & آقایاری هیر, ت. (1396). تحلیل دینامیکی جمعیت و پیامدهای اقتصادی آن با استفاده از رویکرد سیستمی. توسعه اجتماعی, 167-194.