

نشریه علمی (فصلنامه) پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی

سال پنجم / شماره ۱۵ / تابستان ۱۳۹۸ / صفحات ۹۵-۵۹

بررسی روش‌های افزایش بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های مسکونی (رویکرد پویایی شناسی سیستم)

امیرحسین مهدوی

دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و مالی دانشگاه خاتم، تهران، ایران.
amirhossein.ma@gmail.com

مهناز حسین‌زاده

استادیار گروه مدیریت صنعتی دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران
mhosseinzadeh@ut.ac.ir

عالیه کاظمی

دانشیار گروه مدیریت صنعتی دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران، (نویسنده مسئول)
aliyekhazemi@ut.ac.ir

ایران جزء کشورهای پرمصرف انرژی در دنیا به حساب می‌آید و به دلیل وجود منابع فراوان در ایران، انرژی به صورت ارزان در اختیار مردم قرار می‌گیرد. در این پژوهش با تمرکز بر پرمصرف‌ترین بخش یعنی بخش خانگی و همچنین پرمصرف‌ترین انرژی در این بخش، یعنی برق، سعی شده تا با شبیه‌سازی روش‌های تأیید شده در جهان، نتیجه اجرای این راه کارها طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۴۱۵ بررسی شود. در این راستا، از روش پویایی شناسی سیستم‌ها استفاده شده است. این روش تلفیقی از روش‌های کمی و کیفی است و علت انتخاب آن، تطابق خواص ذاتی سیستم‌های انرژی با خواص و ابزارهای این رویکرد است. راه کارهای مورد بررسی در این پژوهش شامل توسعه محصولات روشنایی ال ای دی، توسعه سیستم‌های تهویه مطبوع، توسعه عایق کاری و همچنین مباحث فرهنگ سازی و اصلاح الگوی مصرف می‌باشد. اطلاعات و داده‌های مورد نیاز اغلب از گزارش‌ها و آمارهای رسمی وزارت نیرو و شرکت‌های تابعه و همچنین سازمان آمار ایران استخراج شده است. در مواقعی که داده کمی برای تعریف روابط میان دو متغیر وجود نداشته، از نظر متخصصان استفاده شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند راهنمایی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان انرژی برق کشور باشد.

واژگان کلیدی: ساختمان مسکونی، بهره‌وری انرژی، مصرف برق، پویایی شناسی سیستم‌ها

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۲۸

۱. مقدمه

چالش انرژی و تغییرات آب و هوایی، دولت‌ها و موسسات محلی، منطقه‌ای و جهانی را متقاعد ساخته که به فکر سیستم‌های بهینه انرژی باشند (موسنن‌زاده و همکاران^۱، ۲۰۱۷). بر اساس آمار آژانس بین‌المللی انرژی، شهرها عامل مصرف ۷۵ درصد انرژی اولیه و تولید ۸۰ درصد گاز گلخانه‌ای جهان هستند. ساختمان‌ها بزرگترین مصرف‌کنندگان انرژی شهری هستند و با توسعه بهره‌وری می‌توان این مصرف را به مقدار قابل توجهی کاهش داد (کاپونیو و همکاران^۲، ۲۰۱۵). بخش خانگی به عنوان مصرف‌کننده یک چهارم انرژی جهان و تولیدکننده یک ششم گاز دی‌اکسید کربن جهان از مهمترین بخش‌های مصرف‌کننده است و تاثیر بسزایی بر محیط دارد (پابلو رومرو و همکاران^۳، ۲۰۱۷). در ایران نیز همچون اغلب کشورها، بخش خانگی یکی از عمده‌ترین مصرف‌کننده‌های انرژی در کشور است. به منظور کاهش مصرف انرژی و کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده در این بخش باید اقداماتی در بخش ساختمان و در بخش تجهیزات انرژی خانگی انجام داد. این بخش عمدتاً از منابع نفت، گاز، برق و در سطح محدود از انرژی‌های تجدیدپذیر برای سرمایش، گرمایش، پخت و پز و روشنایی استفاده می‌کند. فعالیت‌های بهینه‌سازی در بخش ساختمان در برگیرنده فعالیت‌های مرتبط با پوسته و معماری ساختمان، تأسیسات گرمایش و سرمایش، سیستم‌های روشنایی و سیستم‌های کنترل هوشمند و تجهیزات انرژی بر خانگی نظیر کولر آبی، کولر گازی، انواع یخچال و فریزر می‌باشند. هوشمندسازی ساختمان شامل هوشمندسازی روشنایی‌ها، سیستم گرمایش، تهویه و

1. Mosannenzadeh et al.
2. Caponio et al.
3. Pablo-Romero et al.

تهویه مطبوع (HVAC)^۱، پرده‌ها و سایبان‌ها، آسانسورها، تجهیزات الکتریکی، تاسیسات ساختمانی و مواردی نظیر این می‌باشد. در ایران بخش خانگی بیشترین میزان مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است. کارایی ماشین‌آلات، تجهیزات و اقلام مصرفی که در نتیجه تکنولوژی پایین یا ارزان بودن مورد استفاده بخش خانگی قرار می‌گیرند معمولاً بسیار پایین است و این مسأله خود عامل اصلی مصرف بالای این بخش می‌باشد. از سوی دیگر، به دلیل فرهنگ‌سازی ناقص و بی‌توجهی به اهمیت مصرف بهینه انرژی و البته ارزان بودن آن به طور معمول مصرف انرژی در بخش خانگی نیز با اسراف زیادی همراه بوده است. در بخش ساختمانی کشور به ازای هر مترمربع ۲/۶ برابر متوسط مصرف کشورهای صنعتی انرژی مصرف می‌شود، طبق آخرین آمار وزارت نیرو بخش خانگی با احتساب ۳۳ درصد، بیشترین مصرف برق را دارد که این مصرف عمدتاً شامل سه بخش روشنایی، لوازم خانگی و خنک کردن محیط است. این بخش شامل ۲۷/۴ میلیون مشترک یعنی معادل ۸۰/۹ درصد از کل مشترکین مصرف برق کشور می‌باشد (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۵).

در پژوهش حاضر با استفاده از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها، به دنبال شناسایی و معرفی بهترین استراتژی برای افزایش بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های مسکونی در کشور ایران هستیم. در این راستا استراتژی‌های مختلف شامل توسعه محصولات ال ای دی، تهویه مطبوع، عایق‌کاری و مباحث فرهنگی مورد توجه قرار می‌گیرد. در ادامه پس مرور پیشینه پژوهش در بخش ۲ و بیان روش تحقیق در بخش ۳، مدل پویاشناسی سیستم‌های پیشنهادی در بخش ۴ ارائه شده است. در این بخش پس از بررسی اعتبار مدل، سیاست‌های مختلف بررسی و بهترین سیاست معرفی شده است. نهایتاً نتیجه‌گیری و پیشنهادها در بخش ۵ آمده است.

1. Heating Ventilating and Air Conditioning

۲. پیشینه تحقیق

تاکنون تحقیقات و مطالعات گسترده‌ای در حوزه مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری در بخش خانگی و در مورد ساختمان‌ها انجام شده است (فاضلی و حیدری، ۱۳۹۲؛ کاظمی و نمازی، ۱۳۹۵). در ادامه چند نمونه پژوهش انجام شده در خصوص افزایش بهره‌وری ساختمان‌ها بررسی شده است.

پرز لومبارد و همکاران^۱ (۲۰۰۸)، در یک بررسی مروری، آمارهای مختلف جهانی در مورد مصرف انرژی در بخش‌های مختلف را جمع‌آوری کرده و به اهمیت سیستم‌های HVAC پرداختند.

کیم و مون^۲ (۲۰۰۹)، تاثیر عایق‌بندی قسمت‌های مختلف ساختمانی بر مصرف انرژی را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش انواع عایق‌بندی در دو نوع شرایط آب و هوایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بدست آوردن حرارت در زمستان به عنوان امتیازی برای کاهش بار سیستم‌های گرمایشی محسوب می‌شود، در حالی که همین امر در تابستان به عنوان یک اضافه بار بر روی سیستم‌های خنک‌کننده عمل می‌کند. ایجاد سایه مناسب برای دیوارها و پنجره‌ها در فصول گرم به عنوان یک استراتژی مناسب برای کاهش بار سیستم‌های خنک‌کننده پیشنهاد شد.

آسره و بلومبرگه^۳ (۲۰۱۵) بهره‌وری انرژی ساختمان‌های دولت و شهرداری در کشور لتونی را با استفاده از مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها بررسی کردند و به بررسی تغییر رفتار سیستم تحت تاثیر ابزار سیاست‌گذاری و تحلیل امکان‌سنجی اقتصادی پرداختند. مدل برای بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۵۰ مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌های استفاده شده در این پروژه در چهار گروه

1. Pérez-Lombard et al.
2. Kim and Moon
3. Asere and Blumberga

عمده تقسیم بندی شد: ۱. زیرمدل‌های بخش مالی و اعتباری ۲. زیرمدل‌های بخش عایق‌بندی ۳. زیرمدل‌های بخش ظرفیت ساخت و ساز ۴. زیرمدل‌های بخش سود کلی. یافته‌های این پژوهش نشان داد که سیاست ایجاد مالیات برای انتشار گاز دی‌اکسید کربن بهترین نتیجه را برای افزایش بهره‌وری ساختمان‌ها حاصل می‌کند.

کاپونیو و همکاران (۲۰۱۵) یک برنامه‌ریزی استراتژیک انرژی در ساختمان‌های یک شهر هوشمند با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها ارائه دادند. هدف آنها شناسایی متغیرهای عمده مصرف انرژی حرارتی و برق در بخش مسکونی و شبیه‌سازی یک مدل پویا و پیاده‌سازی استراتژی‌های مختلف برای کاهش مصرف انرژی این بخش بود. استراتژی‌های مورد بررسی شامل: ۱. استفاده از سلول‌های خورشیدی ۲. به روز کردن سیستم‌های گرمایشی و ۳. عایق کردن در و پنجره‌ها بودند. آنها برای پیاده‌سازی و توسعه این استراتژی‌ها از دو نوع سیاست‌گذاری تشویقی استفاده کردند. سیاست اول شامل افزایش سالیانه ۵ درصدی به اعتبار مالیاتی افراد برای اجرای هر کدام از استراتژی‌ها بود و سیاست دوم شامل افزایش سالیانه ۵ درصدی اعتبار مالیاتی برای استراتژی‌های دوم و سوم و یک افزایش سریع ۳۵ درصدی برای استراتژی شماره یک (سلول‌های خورشیدی) در جهت پوشش تمام هزینه‌ها بود. بررسی‌ها در شهر باری^۱ (یک شهر متوسط در جنوب شرقی ایتالیا) صورت گرفت. پس از شناسایی شاخص‌های کلیدی (مصرف انرژی به ازای هر نفر، متوسط درآمد و دمای هوا) سیاست‌های مختلف در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که بهترین روش، تخفیف سالیانه مالیات ۵ درصدی برای اجرای طرح عایق‌بندی و به روز کردن سیستم گرمایشی و تخفیف ۳۵ درصدی برای استفاده از سلول‌های خورشیدی می‌باشد. همچنین سرمایه‌گذاری برای افزایش سطح آگاهی شهروندان بوسیله کمپین‌های آموزشی و ارتباطی پیشنهاد شد.

1. Bari

کاو و همکاران^۱ (۲۰۱۷) یک مدل عامل محور برای شبیه‌سازی بکارگیری محصولات روشنایی با بهره‌وری بالا در بخش مسکونی و در یک جامعه فرضی را مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد کاهش ۳۰ درصدی مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۳۵ بدون اجرای هیچ سیاستی قابل دستیابی است. اما با ایجاد ممنوعیت در استفاده از محصولات روشنایی رشته‌ای، کاهش ۶۵ درصدی مصرف انرژی و ۷۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای که بهترین نتیجه ممکن است حاصل می‌شود. همچنین افزایش سهم محصولات بهره‌ور در بازار نیز دارای اهمیت فراوانی است.

جین و پاساک^۲ (۲۰۱۸)، آزمایشی را به منظور کاهش تبادل حرارتی داخل و خارج ساختمان‌ها در منطقه‌ای گرم انجام دادند (مدلسازی حرارتی عایق‌ها برای ذخیره انرژی در ساختمان‌های موجود)، از جمله روش‌هایی که آنها استفاده کردند کاشی‌های سرامیکی و استفاده از صفحه‌های پوششی روی سقف برای دفع نور خورشید بود و اثربخشی این روش‌ها برای کاهش تبادل حرارتی نشان داده شد.

با توجه به نقش کلیدی بخش ساختمان در مصرف انرژی و همچنین پتانسیل بالای این بخش در افزایش بهره‌وری انرژی، راهکارهای مختلفی برای بررسی وجود دارد.

۳. روش تحقیق

روش تحقیقی که در این پژوهش به کار گرفته شده است، به صورت تلفیقی از دو روش کیفی و کمی است و روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها نام دارد. مفهوم پویایی‌شناسی سیستم برای اولین بار توسط فارستر مطرح شده و به سرعت طی پنجاه سال اخیر رشد کرده است (اسمیت و آکر^۳، ۲۰۰۲). این علم، رویکردی جهت کشف رفتار دینامیکی غیرخطی و مطالعه چگونگی تأثیر

1. Cao et al.
2. Jain and Pathak
3. Smith and Ackere

ساختارها و پارامترهای سیستم بر الگوهای رفتاری سیستم است. خروجی شبیه‌سازی سیستم‌ها با رویکرد پویاشناسی سیستم، طراحی سیاست‌های مؤثر بر عملکرد برای دستیابی به سطوح بالای کارایی است. فرآیندی که هر مدل‌ساز برای ایجاد یک مدل پویا دنبال می‌کند، مطابق گام‌های زیر است:

۱. مشخص کردن مسئله‌ای که قرار است مدل شود و انتخاب حدود مسئله
۲. رسیدن به فرضیه‌ای پویا در مورد عوامل منجر به بروز مسئله
۳. فرموله کردن یک مدل شبیه‌سازی برای آزمون فرضیه پویا
۴. آزمودن مدل تا هنگامی که از عملکرد صحیح آن اطمینان حاصل شود.
۵. طراحی و ارزیابی سیاست‌هایی برای بهبود (استرمن^۱، ۲۰۰۰).

مهمترین روش‌های اصلی گردآوری اطلاعات در این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشند:

- آمار و اطلاعات از منابع کتابخانه‌ای و پایگاه‌های مرجع و مستندات مرتبط با روش‌های افزایش بهره‌وری در ساختمان
- انجام مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با متخصصان و خبرگان حوزه انرژی با روش انتخاب گلوله برفی

همانگونه که ذکر شد در این تحقیق برای ایجاد مدل از رویکرد پویایی سیستم استفاده شده است.

پویاشناسی سیستم‌ها به بررسی و تحلیل متغیرها و عوامل مختلف مدل در طول زمان می‌پردازد. پس از ایجاد مدل، سناریوهای مختلف تعریف و نتایج آن‌ها در دوره‌های زمانی مورد نظر با هم مقایسه می‌شود. به منظور سهولت و افزایش دقت مدلسازی، نرم افزار Vensim Dss به عنوان مرجع اصلی برای تجزیه و تحلیل اطلاعات و تدوین مدل پویا مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم افزار تمامی نیازهای موجود برای مدیریت مدل‌ها با مقیاس بزرگ را برطرف

1. Sterman

می‌سازد. این نسخه از نرم‌افزار از ویژگی‌های به روزی مانند تحلیل حساسیت مونت کارلو و برنامه نویسی ماکرو پشتیبانی می‌کند. در مواقعی که هیچ‌گونه داده کمی سری زمانی برای تعریف روابط میان دو متغیر وجود نداشته باشد از توابع Look up با بهره‌گیری از نظر متخصصان استفاده شده است.

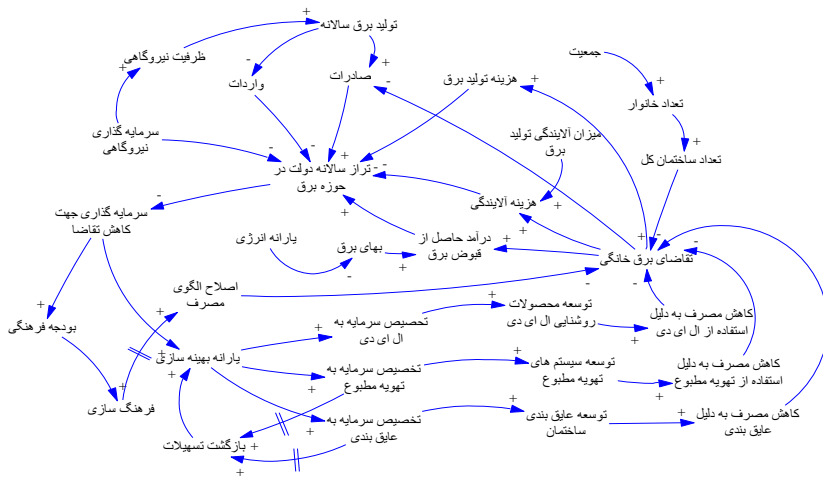
۴. مدل سازی مساله در قالب یک مدل پویا

گام نخست گام تعریف مساله است که در بخش ۱ تشریح شد. در این بخش پس از مشخص کردن نمودار علت و معلولی و نمودار جریان، به شبیه سازی و تعیین اعتبار مدل پرداخته می‌شود، سپس سیاست‌های مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند.

۴-۱. نمودار علت و معلولی

نمودار علت و معلولی مساله مطابق با شکل (۱) است. به منظور رسیدن به مدل نهایی علت و معلولی در ابتدا متغیرهای کلیدی مسئله یعنی "تقاضای برق خانگی"، "تراز سالانه دولت در حوزه برق" و "صادرات" شناسایی شد و در ادامه با مطالعه در حوزه تولید و مصرف برق کشور، تمامی متغیرهای تاثیرگذار بر این عوامل شناسایی و در مدل قرار داده شد. سپس با مطالعه پژوهش‌های مشابه انجام شده برای کشورهای دیگر راهکارهای برتر کاهش مصرف برق نیز شناسایی و در مدل گنجانده شد. منابع اصلی برای رسم نمودارهای علت و معلولی عبارتند از: ۱. پیشینه تحقیق (شامل مقالات و پژوهش‌های سال‌های اخیر انجام شده در سایر کشورها در حوزه کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان که منجر به شناسایی متغیرهای توسعه محصولات ال ای دی، عایق، تهویه مطبوع و مباحث فرهنگی شد). ۲. آمارها و اسناد و مدارک موجود (که اساس شکل‌گیری روابط کمی و ریاضی میان متغیرهای مدل می‌باشند و شامل گزارشات و آمارهای رسمی و انتشار یافته شرکت مادر تخصصی توانیر، شرکت مدیریت شبکه برق ایران، ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۵، مرکز آمار ایران و معاونت برق و انرژی وزارت نیرو می‌باشد و بر اساس این اطلاعات متغیرهای مربوط به ظرفیت نیروگاهی کشور، رشد ظرفیت، مصرف

بخش‌های مختلف، متغیرهای هزینه‌ای مدل، تعداد مشترکین و نرخ رشد مشترکین ایجاد شد).
 ۳. متخصصان درگیر در سیستم مورد بررسی که شامل کارشناسان سازمان بهره‌وری مصرف سوخت کشور و اساتید دانشگاهی فعال در حوزه انرژی و همچنین کارشناسان شرکت‌های فعال در هر یک از حوزه‌های راهکارهای کاهش مصرف در مدل از جمله محصولات تهویه مطبوع است). روابط علی میان این متغیرها با توجه به پیشینه تحقیق و نظر متخصصان تعیین شدند. در نهایت مجدداً مدل طراحی شده در اختیار ذی‌نفعان سیستم قرار گرفته و اصلاح شد و توافق نسبی در مورد ساختار سیستم برقرار شد.

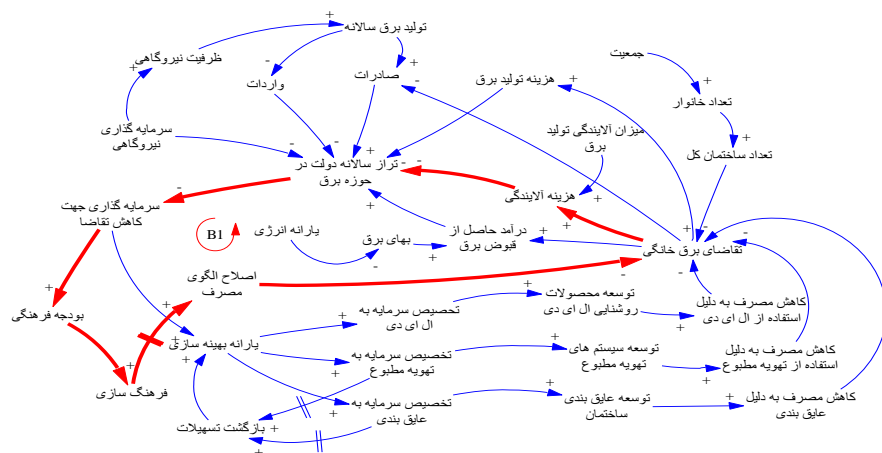


شکل ۱. نمودار علت و معلولی

در ادامه برخی از مهم‌ترین حلقه‌های بازخوردی مدل تشریح شده است.

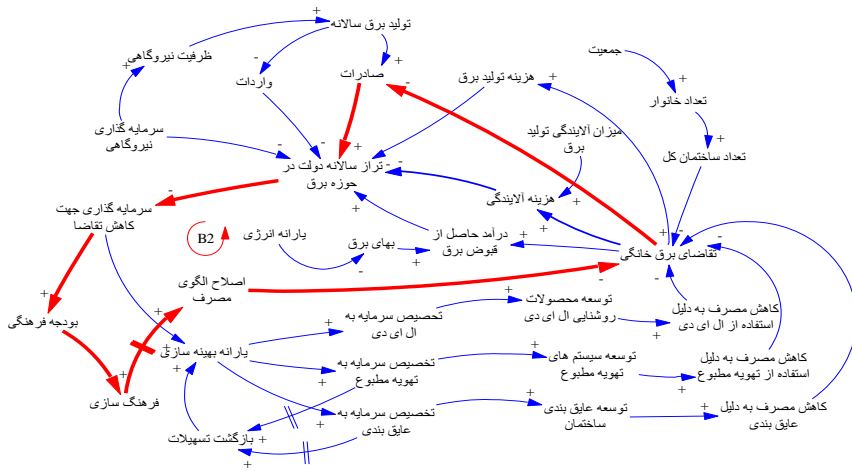
حلقه B1 (شکل ۲): در این حلقه، با افزایش یا تخصیص بودجه برای بحث فرهنگی (از طریق روش‌هایی همچون تبلیغات عمومی در سطح جامعه به ویژه از طریق رادیو و تلویزیون)، فرهنگ سازی می‌شود. افزایش سطح فرهنگ در جامعه به مرور زمان و با تأخیر موجب اصلاح الگوی مصرف مشترکین می‌شود و در نتیجه آن تقاضای برق خانگی کاهش می‌یابد، در اثر کاهش

مصرف برق، میزان آلایندگی ناشی از تولیدات نیروگاهی کاهش می‌یابد و در نتیجه آن هزینه‌های دولت برای جبران خسارات ناشی از آلایندگی (طبق آمار آژانس بین‌المللی انرژی) کاهش می‌یابد که این موضوع سبب بهبود تراز شده و در نتیجه انگیزه سرمایه‌گذاری برای کاهش تقاضا کم شده و بودجه فرهنگی کاهش می‌یابد.



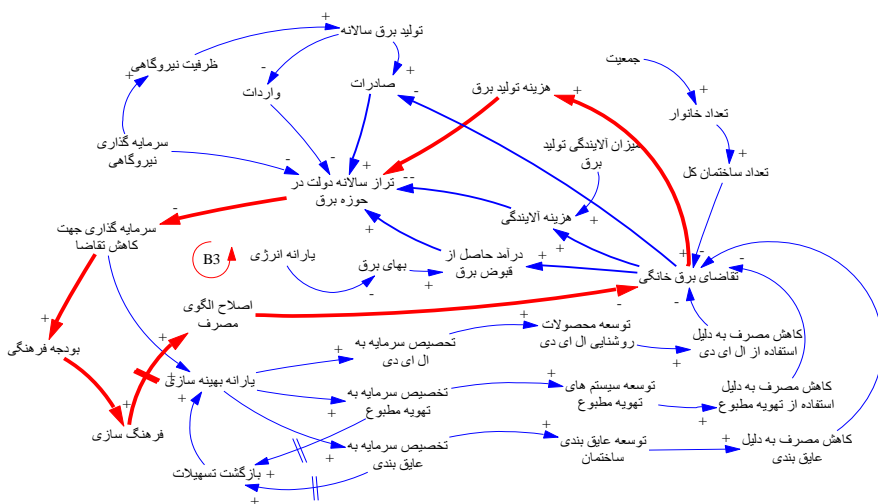
شکل ۲. حلقه B1

حلقه B2 (شکل ۳): در این حلقه، مجدداً افزایش بودجه فرهنگی موجب افزایش فرهنگ سازی و به تبع آن اصلاح الگوی مصرف می‌شود که نتیجه آن کاهش تقاضای برق از سوی مشترکین خانگی است، با این کاهش مصرف در داخل کشور، میزان صادرات برق (به کشورهای همسایه) کشور افزایش می‌یابد و این امر موجب افزایش درآمد ارزی دولت و بهبود تراز خواهد شد که همین موضوع انگیزه سرمایه‌گذاری جهت کاهش تقاضا و سرمایه‌گذاری فرهنگی را کاهش می‌دهد.



شکل ۳. حلقه B2

حلقه B3 (شکل ۴): در این حلقه نیز با طی کردن فرآیند افزایش بودجه فرهنگی، افزایش فرهنگ سازی و اصلاح الگوی مصرف، به کاهش تقاضای برق خانگی می‌رسیم. تولید برق در نیروگاه‌های کشور دارای یک سری از هزینه‌های ثابت و مشخص مثل هزینه سوخت مصرفی برای تولید برق، هزینه انتقال برق از نیروگاه، هزینه توزیع برق بین مشترکین و غیره می‌باشد که با کاهش تقاضای برق از طرف مشترکین این هزینه‌ها نیز به صورت طبیعی کاهش می‌یابد و این کاهش هزینه موجب رشد تراز سالانه دولت و در نتیجه کاهش سرمایه گذاری برای کاهش تقاضا می‌شود و در نهایت متغیر ابتدایی یعنی بودجه فرهنگی کاهش می‌یابد.



شکل ۴. حلقه B3

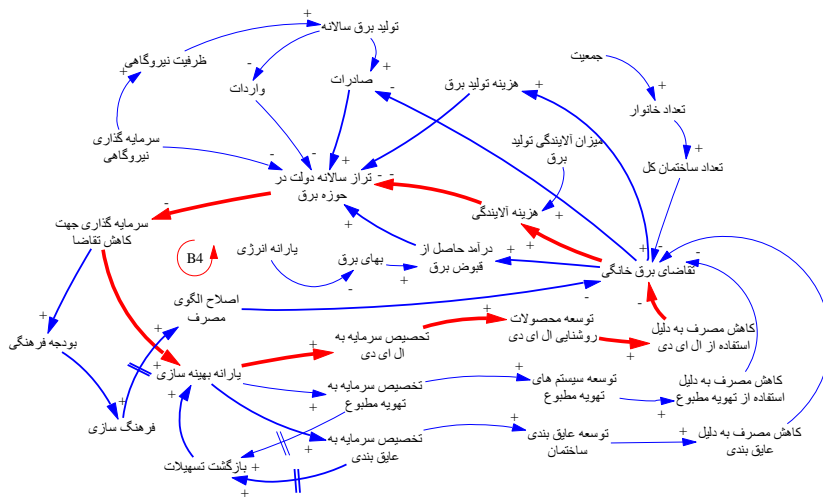
حلقه B4 (شکل ۵): در این حلقه، با افزایش سرمایه‌گذاری جهت کاهش تقاضا، یارانه بهینه‌سازی نیز افزایش می‌یابد و به سبب آن تخصیص سرمایه برای تجهیز واحدهای مسکونی به تکنولوژی روشنایی ال ای دی بیشتر شده و موجب توسعه این محصولات بهره‌ور در مصرف انرژی می‌شود که این امر کاهش مصرف برق در بخش روشنایی منازل را به همراه دارد و نهایتاً تقاضای برق خانگی کمتر می‌شود، همان‌گونه که گفته شد کاهش تقاضای برق موجب کاهش هزینه آلاینده‌گی و به تبع آن افزایش تراز مالی دولت می‌شود. این افزایش باعث کاهش انگیزه سرمایه‌گذاری برای کاهش تقاضا می‌شود.

حلقه B5 (شکل ۶): افزایش سرمایه‌گذاری جهت کاهش تقاضا موجب افزایش یارانه بهینه‌سازی می‌شود، این افزایش یارانه سهم تخصیص یافته به سرمایه‌تهویه مطبوع را نیز افزایش می‌دهد و موجب توسعه بیشتر سیستم‌های تهویه مطبوع می‌شود، این امر کاهش مصرف برق به ازای این تغییرات را در منازل مسکونی بیشتر کرده و به عبارت دیگر تقاضای برق بخش خانگی را کاهش می‌دهد، با کاهش تقاضا، هزینه تولید نیز کمتر می‌شود و تراز سالانه دولت بازخورد مثبت از این فرآیند دریافت می‌کند که این امر سبب کاهش سرمایه‌گذاری جهت کاهش تقاضا می‌شود.

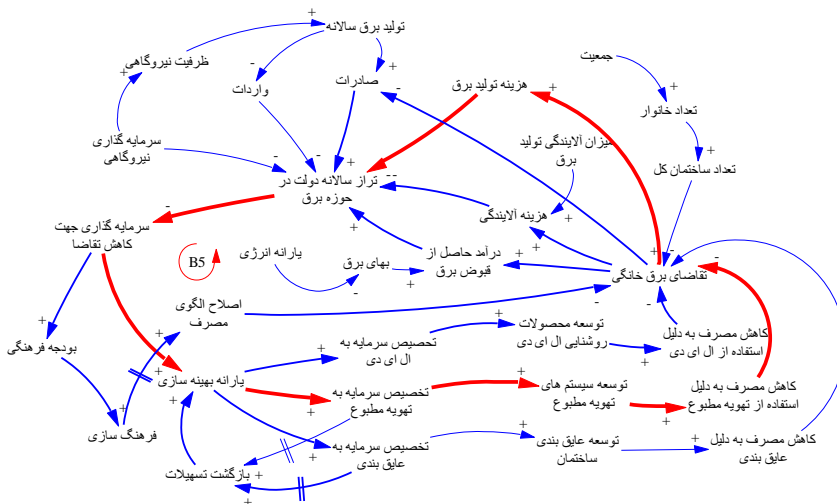
حلقه B6 (شکل ۷): در این حلقه از افزایش سرمایه‌گذاری جهت کاهش تقاضا شروع می‌کنیم و به افزایش یارانه بهینه‌سازی و افزایش تخصیص سرمایه به عایق بندی می‌رسیم، با این افزایش توسعه عایق بندی ساختمان‌ها شتاب بیشتری می‌گیرد و به همین دلیل کاهش مصرف به ازای عایق بندی نیز بیشتر می‌شود که این مسئله موجب کاهش تقاضای برق خانگی است، با کاهش تقاضای داخل کشور سهم صادرات برق بیشتر خواهد شد و موجب درآمد ارزی بالاتر دولت و بهبود تراز مالی سالانه می‌شود که این امر انگیزه تغییر شرایط و افزایش سرمایه‌گذاری جهت کاهش تقاضا را از بین خواهد برد.

حلقه R1 (شکل ۸): ساز و کار این حلقه بازخوردی بر خلاف دو حلقه قبلی می‌باشد. در ابتدا با افزایش بودجه فرهنگی، همان فرآیند افزایش فرهنگ سازی و اصلاح الگوی مصرف طی می‌شود و تقاضای برق خانگی کاهش می‌یابد، این بار با کاهش تقاضای برق خانگی درآمد دولت از قبوض برق کاهش پیدا می‌کند و این امر موجب کاهش تراز سالانه دولت می‌شود و این موضوع باعث ایجاد انگیزه و سرمایه‌گذاری بیشتر برای کاهش تقاضا و بودجه فرهنگی می‌شود.

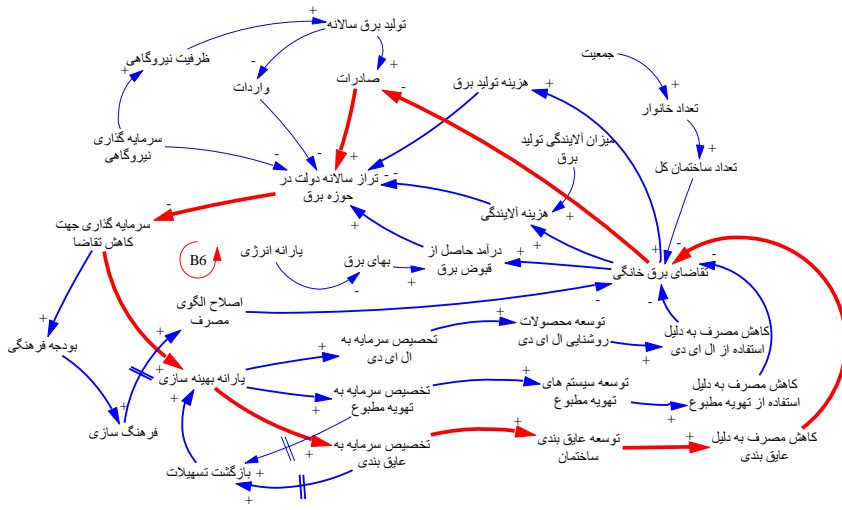
حلقه R2 (شکل ۹): در این حلقه با افزایش یارانه بهینه‌سازی، تخصیص سرمایه به عایق بندی نیز بیشتر خواهد شد و با توجه به اینکه این سرمایه به صورت تسهیلات بدون بهره با بازپرداخت دو ساله خواهد بود، افزایش تخصیص سرمایه به معنی افزایش بازگشت تسهیلات خواهد بود.



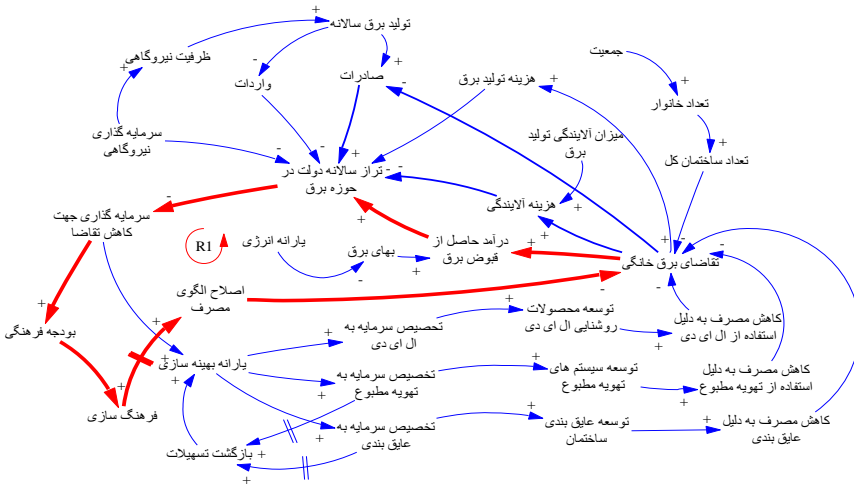
شکل ۵. حلقه B4



شکل ۶. حلقه B5



شکل ۷. حلقه B6

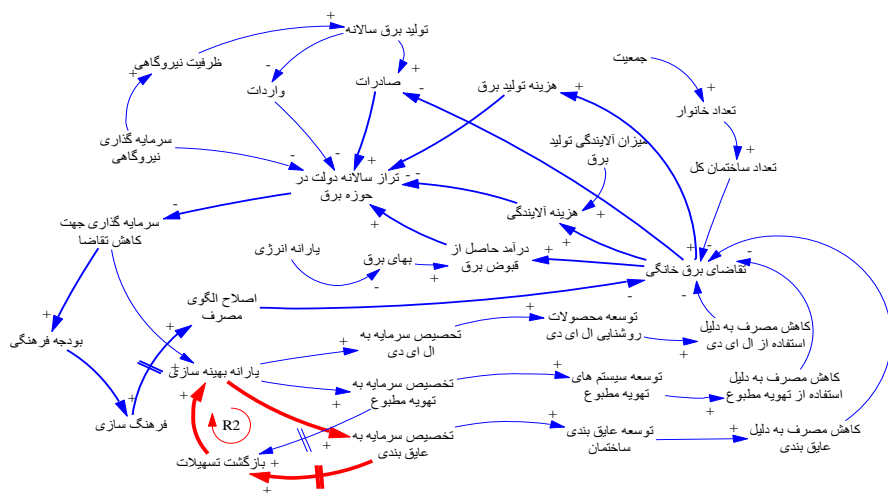


شکل ۸. حلقه R1

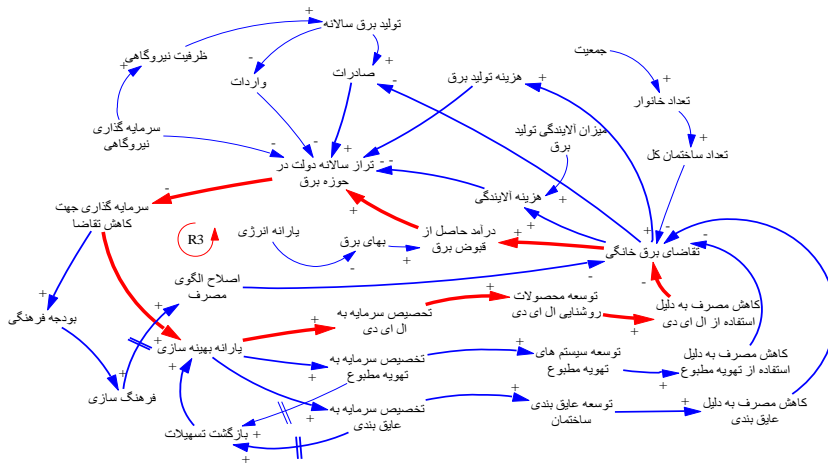
حلقه R3 (شکل ۱۰): در این حلقه، با افزایش سرمایه‌گذاری جهت کاهش تقاضا، یارانه بهینه سازی و سهم تخصیص یافته به ال ای دی بیشتر می‌شود و سبب توسعه این فناوری در واحدهای مسکونی شده و کاهش مصرف بیشتری را در زمینه روشنایی ایجاد می‌کند، این کاهش مصرف موجب کاهش تقاضا شده و در نتیجه رقم قبوض پرداختی مشترکین به دولت کاهش می‌یابد که این امر تاثیر منفی بر تراز سالانه دارد و به همین دلیل انگیزه‌ای برای تخصیص سرمایه بیشتر جهت کاهش تقاضا می‌شود.

۲-۴. نمودار انباشت- جریان

پس از رسم نمودار علت و معلولی و شناسایی متغیرها و حلقه‌های مثبت و منفی مدل، مرحله بعدی شناسایی متغیرهای حالت، جریان، کمکی و ثابت و رسم نمودار جریان است. نمودار جریان پژوهش در شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۹. حلقه R2



شکل ۱۰. حلقه R3

- تعیین متغیرهای حالت، جریان، کمکی و ثابت‌های مدل

در جدول ۱ انواع متغیرها و منبع آنها مشخص شده است.

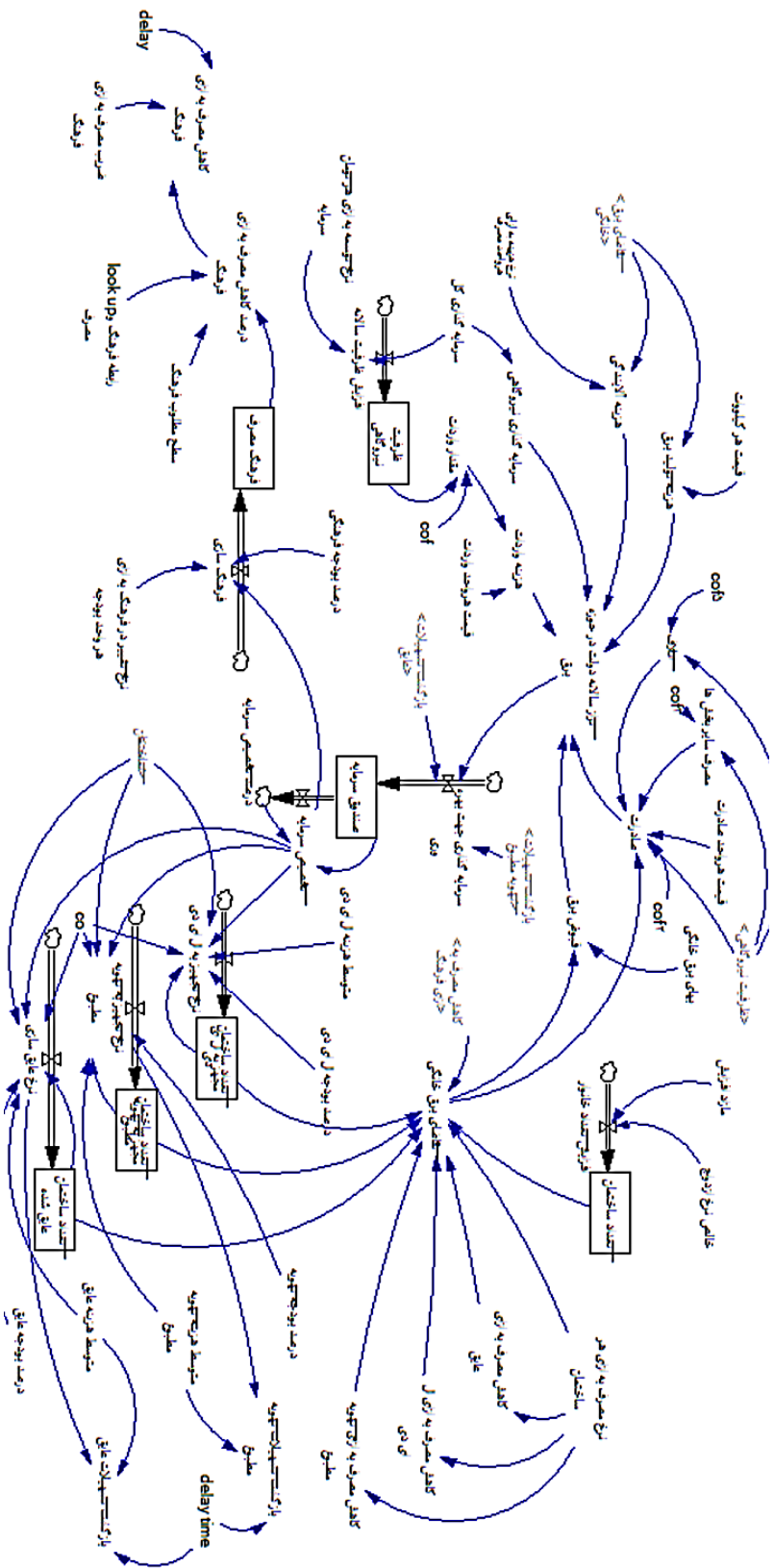
جدول ۱. متغیرهای مدل

نوع متغیر	نام متغیر
حالت	ظرفیت نیروگاهی (این متغیر برای مشخص کردن سهم مصرف بخش خانگی از کل ظرفیت کشور و با توجه به آمار ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۵ استخراج شده است).
	تعداد ساختمان کل (این متغیر نشان دهنده تعداد کل مصرف کنندگان بخش خانگی و میزان رشد سالانه آن می‌باشد و با توجه به آمار ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۵ استخراج شده است).
حالت	فرهنگ مصرف (این متغیر برای مشخص کردن شرایط فعلی فرهنگی در حوزه مصرف انرژی به صورت یک تابع Look up و با نظر متخصصان سازمان بهره‌وری مصرف سوخت کشور تعیین شده است).
	صندوق سرمایه (متغیری در مدل برای انباشت سرمایه اختصاص یافته به بخش افزایش بهره‌وری و بازگشت تسهیلات ارایه شده به مشترکین است).
حالت	تعداد ساختمان مجهز به ال ای دی (متغیری است برای مشخص کردن تعداد ساختمان‌های مجهز به محصولات ال ای دی با توجه به میران تخصیص سرمایه در سیاست‌های مختلف که مقدار اولیه آن از اطلاعات سازمان آمار استخراج شده است).

نام متغیر	نوع متغیر
<p>تعداد ساختمان مجهز به تهویه مطبوع (متغیری است برای مشخص کردن تعداد ساختمان‌های مجهز به تهویه مطبوع با توجه به میزان تخصیص سرمایه در سیاست‌های مختلف که مقدار اولیه آن از اطلاعات سازمان آمار استخراج شده است).</p> <p>تعداد ساختمان عایق شده (متغیری است برای مشخص کردن تعداد ساختمان‌های عایق شده با توجه به میزان تخصیص سرمایه در سیاست‌های مختلف که مقدار اولیه آن از اطلاعات سازمان آمار استخراج شده است).</p>	
<p>افزایش ظرفیت سالانه (بر اساس آمار وزارت نیرو)، افزایش تعداد خانوار (بر اساس آمار سازمان آمار ایران)، سرمایه‌گذاری جهت بهره‌وری (بر اساس آمار آژانس بین‌المللی انرژی)، تخصیص سرمایه (میزانی متغیر با توجه به سیاست‌های مختلف ارائه شده است)، فرهنگ سازی (یک تابع Look up برای نرخ رشد با کمک خبره)، نرخ تجهیز به ال ای دی (با توجه به میزان تخصیص سرمایه به این بخش و هزینه این بخش مشخص شده است)، نرخ تجهیز به تهویه مطبوع (با توجه به میزان سرمایه به این بخش و هزینه این بخش مشخص شده است)، نرخ عایق سازی (با توجه به میزان تخصیص سرمایه به این بخش و هزینه این بخش مشخص شده است)</p>	جریان
<p>هزینه تولید برق (بر اساس گزارشات وزارت نیرو)، هزینه آلایندگی (بر اساس آمار سازمان بهداشت جهانی)، سرمایه‌گذاری کل (بر اساس آمار وزارت نیرو)، سرمایه‌گذاری نیروگاهی (بر اساس آمار وزارت نیرو)، مقدار واردات (بر اساس آمار وزارت نیرو)، هزینه واردات (بر اساس آمار وزارت نیرو)، تراز سالانه دولت در حوزه برق (با محاسبه بخش‌های مختلف هزینه و درآمد این حوزه در مدل)، درآمد حاصل از صادرات (بر اساس آمار وزارت نیرو)، اتلاف (بر اساس آمار وزارت نیرو)، مصرف سایر بخش‌ها (بر اساس آمار وزارت نیرو)، درآمد حاصل از قبوض برق (بر اساس آمار وزارت نیرو)، تقاضای برق خانگی (بر اساس آمار ترازنامه انرژی ۱۳۹۵)، نرخ مصرف به ازای هر ساختمان (با تقسیم میزان کل مصرف بر تعداد ساختمان)، کاهش مصرف به دلیل عایق‌بندی (از طریق انجام مصاحبه با کارشناسان شرکت‌های فعال در این حوزه)، کاهش مصرف به دلیل استفاده از ال ای دی (از طریق انجام مصاحبه با کارشناسان شرکت‌های فعال در این حوزه)، کاهش مصرف به دلیل استفاده از تهویه مطبوع (از طریق انجام مصاحبه با کارشناسان شرکت‌های فعال در این حوزه)، رابطه فرهنگ و مصرف (تابع Look up)، کاهش مصرف به ازای فرهنگ (انجام مصاحبه با خبره)، بازگشت تسهیلات تهویه مطبوع (بر اساس سیاست‌های تعریف شده)، بازگشت تسهیلات عایق (بر اساس سیاست‌های تعریف شده)</p>	کمکی

نام متغیر	نوع متغیر
<p>قیمت هر کیلووات ساعت برق (براساس آمار وزارت نیرو)، نرخ هزینه به ازای هر واحد مصرف (براساس آمار وزارت نیرو)، نرخ توسعه به ازای هر تومان سرمایه (براساس آمار وزارت نیرو)، قیمت هر واحد واردات (براساس آمار وزارت نیرو)، قیمت هر واحد صادرات (براساس آمار وزارت نیرو)، بهای برق خانگی (براساس آمار وزارت نیرو)، خالص نرخ ازدواج (براساس آمار وزارت نیرو)، مازاد افزایش (براساس آمار وزارت نیرو)، نرخ تغییر در فرهنگ به ازای هر واحد بودجه (انجام مصاحبه با خیره)، متوسط هزینه ال ای دی (اجام مصاحبه با کارشناسان شرکت‌های فعال در این حوزه)، متوسط هزینه تهویه مطبوع (انجام مصاحبه با کارشناسان شرکت‌های فعال در این حوزه)، متوسط هزینه عایق (اجام مصاحبه با کارشناسان شرکت‌های فعال در این حوزه)، درصد بودجه فرهنگی (سیاست‌های تعریف شده)، درصد بودجه ال ای دی (سیاست‌های تعریف شده)، درصد بودجه تهویه (بر اساس سیاست‌های تعریف شده)، درصد بودجه عایق (بر اساس سیاست‌های تعریف شده)</p>	<p>ثابت</p>

نمودار جریان پژوهش



- روابط ریاضی متغیرهای موجود در مدل

جدول ۲ روابط ریاضی متغیرهای موجود در مدل را نمایش می‌دهد.

جدول ۲. روابط ریاضی متغیرهای مدل

نام متغیر	رابطه ریاضی اجرا شده در نرم افزار	واحد اندازه‌گیری
تعداد ساختمان	افزایش تعداد خانوار \int مقدار اولیه ^۱ = ۲۵۷۳۹۰۰۰	واحد
افزایش تعداد خانوار	مآزاد افزایش ^۲ +خالص نرخ ازدواج	واحد در سال
هزینه آلاینده‌گی	تقاضای برق خانگی*نرخ هزینه به ازای هر واحد مصرف	تومان در سال
هزینه تولید برق	تقاضای برق خانگی*قیمت هر کیلو وات	تومان در سال
افزایش ظرفیت سالانه	سرمایه گذاری کل*نرخ توسعه به ازای هر تومان سرمایه	کیلووات در سال
ظرفیت نیروگاهی	افزایش ظرفیت سالانه \int مقدار اولیه ^۳ = ۲/۶۶۰۵۶*۱۰ ^{۱۱}	کیلووات
سرمایه گذاری کل	(۲۰ و ۲۰*۱۰ ^{۱۱} + RAMP(۲/۵*۱۰ ^{۱۱} + ۵/۴*۱۰ ^{۱۲})	تومان
فرهنگ مصرف	فرهنگ سازی \int مقدار اولیه ^۴ = ۰	درصد
صندوق سرمایه	تخصیص سرمایه - سرمایه گذاری جهت بهره وری \int مقدار اولیه = ۰	تومان در سال
تعداد ساختمان مجهز به ال ای دی	نرخ تجهیز به ال ای دی \int مقدار اولیه ^۵ = ۲۷۰۰۰۰	واحد

۱. طبق آمار شرکت مادر تخصصی توانیر (۱۳۹۵)

۲. شامل مقادیر مانند افراد مجرد دارای واحد مسکونی مستقل

۳. آمار شرکت مادر تخصصی توانیر (۱۳۹۵)

۴. فرض مبنای اولیه برای تهیه Look up با نظر خبره

۵. مرکز آمار ایران (گزارشات مربوط به سال ۱۳۹۵)

نام متغیر	رابطه ریاضی اجرا شده در نرم افزار	واحد اندازه‌گیری
تعداد ساختمان مجهز به تهویه مطبوع	نرخ تجهیز به تهویه مطبوع \int مقدار اولیه ^{۱۳} = ۲۱۶۰۰۰	واحد
تعداد ساختمان عایق شده	نرخ عایق سازی \int مقدار اولیه ^{۱۳} = ۳۵۳۷۰۰۰	واحد
سرمایه‌گذاری برای بهره‌وری	(۰, ۱/۱۸۸ * ۱۰ ^{۱۲} , تراز سالانه دولت در حوزه برق > ۰) IF THEN ELSE	تومان در سال
فرهنگ سازی	نرخ تغییر در فرهنگ به ازای بودجه / درصد بودجه فرهنگی * تخصیص سرمایه	درصد در سال
نرخ تجهیز به ال ای دی	متوسط هزینه / تخصیص سرمایه * درصد بودجه ال ای دی ((IF THEN ELSE (+تعداد ساختمان مجهز به ال ای دی \geq تعداد ساختمان (۰, تخصیص سرمایه * درصد بودجه ال ای دی / متوسط هزینه	واحد در سال
نرخ تجهیز به تهویه مطبوع	متوسط هزینه / تخصیص سرمایه * درصد بودجه تهویه ((IF THEN ELSE (+تعداد ساختمان مجهز به تهویه \geq تعداد ساختمان (۰, تخصیص سرمایه * درصد بودجه تهویه / متوسط هزینه	واحد در سال
نرخ عایق سازی	متوسط هزینه / تخصیص سرمایه * درصد بودجه عایق ((IF THEN ELSE (+تعداد ساختمان مجهز به عایق \geq تعداد ساختمان (۰, تخصیص سرمایه * درصد بودجه عایق / متوسط هزینه	واحد در سال
سرمایه‌گذاری نیروگاهی	۰/۳۲۵ * سرمایه‌گذاری کل	تومان در سال
مقدار واردات	۰/۰۱۵ * ظرفیت نیروگاهی	کیلووات ساعت در سال
هزینه واردات	مقدار واردات * قیمت هر واحد واردات	تومان در سال
تراز سالانه دولت در حوزه برق	- هزینه آلاینده‌گی - سرمایه‌گذاری نیروگاهی - قبوض برق + صادرات ۱/۱۸۸ * ۱۰ ^{۱۲} - هزینه واردات - هزینه تولید	تومان در سال
صادرات	(تقاضای سایر بخش‌ها - اتلاف - تقاضای برق خانگی - ظرفیت برق نیروگاهی) قیمت هر واحد صادرات *	تومان در سال

نام متغیر	رابطه ریاضی اجرا شده در نرم افزار	واحد اندازه‌گیری
اتلاف	ظرفیت نیروگاهی*۰/۱۴۵	کیلووات ساعت در سال
مصرف سایر بخش‌ها	۰/۵۵*ظرفیت نیروگاهی	کیلووات ساعت در سال
قبوض برق	بهای برق خانگی*تقاضای برق خانگی	تومان در سال
تقاضای برق خانگی	(تعداد ساختمان*نرخ مصرف به ازای هر ساختمان)-(تعداد ساختمان عایق شده*کاهش مصرف به ازای عایق)-(تعداد ساختمان مجهز به ال ای دی*کاهش مصرف به ازای ال ای دی)-(تعداد ساختمان مجهز به تهویه مطبوع*کاهش مصرف به ازای تهویه مطبوع)-(کاهش مصرف به ازای فرهنگ*تعداد ساختمان)	کیلووات در سال
نرخ مصرف به ازای هر ساختمان	(۲۰ و ۹/۵+RAMP)۲۸۶۰	کیلووات ساعت به ازای هر واحد در سال
کاهش مصرف به ازای عایق	نرخ مصرف به ازای هر ساختمان*۰/۰۸	کیلووات ساعت به ازای هر واحد در سال
کاهش مصرف به ازای ال ای دی	نرخ مصرف به ازای هر ساختمان*۰/۰۸	کیلووات ساعت به ازای هر واحد در سال
کاهش مصرف به ازای تهویه مطبوع	نرخ مصرف به ازای هر ساختمان*۰/۰۹	کیلووات ساعت به ازای هر واحد در سال
بازگشت تسهیلات عایق	(نرخ عایق سازی*متوسط هزینه عایق, DELAY1(۲)	تومان در سال
بازگشت تسهیلات تهویه مطبوع	(نرخ تجهیز به تهویه مطبوع*متوسط هزینه تهویه مطبوع, DELAY1(۲)	تومان در سال

نام متغیر	رابطه ریاضی اجرا شده در نرم افزار	واحد اندازه‌گیری
کاهش مصرف به ازای فرهنگ	درصد کاهش مصرف به ازای فرهنگ*ضریب مصرف به ازای فرهنگ	تومان در سال
رابطه فرهنگ و مصرف	$[(0,0) - (100,300)], (0,0), (22/0183,64/4737), (32/4159,119/737), (43/7309,175), (52/9052,231/579), (67/5841,251/316), (84/4037,269/737), (90/5199,282/895), (100,290)$	بدون واحد

مأخذ: نتایج تحقیق

۴-۳. شبیه‌سازی و تعیین اعتبار مدل

به منظور بررسی اعتبار مدل دو دسته آزمون‌های اعتبار ساختاری و اعتبار رفتاری صورت گرفته است. برای تعیین اعتبار ساختاری، آزمون‌های سازگاری مدل و سازگاری ابعاد توسط نرم افزار ونسیم انجام شد و مورد تایید بود. به علاوه آزمون کفایت مرز با توجه به نظر متخصصان صورت گرفت و آزمون خطای انتگرال‌گیری نیز انجام شد. برای تعیین اعتبار رفتاری مدل آزمون‌های شرایط حدی و بازتولید رفتار صورت گرفت که پس از شبیه‌سازی اولیه مدل نتایج آن‌ها در ادامه ارائه می‌شود.

در این بخش نمودار تغییرات هر یک از متغیرهای کلیدی و مهم نمودار جریان که رفتار آنها برای تعیین وضعیت کلی سیستم اهمیت دارد ارائه می‌شود. مدل برای یک افق زمانی ۲۰ ساله شبیه‌سازی شده است. داده‌های مبنا، داده‌های سال ۱۳۹۵ در نظر گرفته شده است. سه متغیر کلیدی که نمودار تغییرات آن‌ها در طول فرآیند شبیه‌سازی بررسی خواهد شد شامل، "تراز سالانه دولت در حوزه برق"، "تقاضای برق خانگی" و "درآمد حاصل از صادرات" هستند.

۵. تراز سالانه دولت در حوزه برق

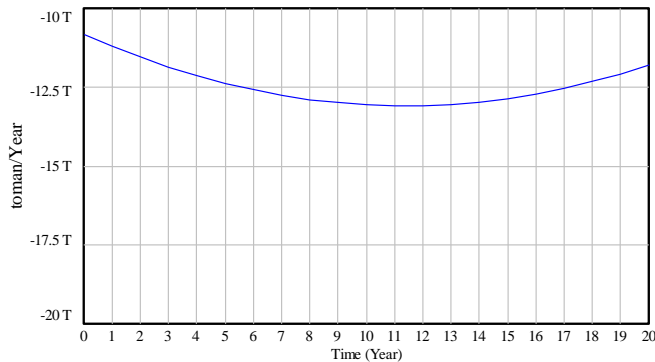
یکی از مهم‌ترین متغیرهای موجود در مدل، متغیر تراز سالانه دولت در حوزه برق می‌باشد. دو متغیر قبوض برق و صادرات تاثیر مثبت و متغیرهای هزینه تولید برق، هزینه آلایندگی، هزینه واردات و سرمایه‌گذاری نیروگاهی تاثیر منفی بر تراز سالانه می‌گذارند. در حال حاضر و با شرایط فعلی به دلیل

پرداخت یارانه‌های مختلف دولتی در این حوزه، تراز سالانه منفی می‌باشد و دولت هر ساله مبالغ کلانی از محل درآمدهای فروش نفت، بدهی به وزارت نیرو می‌پردازد که این مساله یکی از دلایل اهمیت این موضوع و انجام این پژوهش می‌باشد. از سوی دیگر به دلیل سرمایه‌گذاری و توجه ویژه در حوزه توسعه نیروگاهی، همان‌گونه که در شکل ۱۲ (محور افقی شامل سال‌های شبیه‌سازی و محور عمودی میزان تراز سالانه دولت در حوزه برق با واحد هزار میلیارد است). مشخص است، پس از گذشت یک دهه شیب تراز از منفی به مثبت تغییر خواهد کرد که دلیل این امر نیز سرعت بیشتر رشد ظرفیت نیروگاهی به نسبت تعداد مشترکین و میزان سرانه مصرف می‌باشد.

۵-۱. تقاضای برق خانگی

دومین متغیر موجود در مدل از لحاظ درجه اهمیت، متغیر تقاضای برق خانگی می‌باشد. این متغیر در واقع میزان برق مصرفی توسط مشترکین خانگی در طول سال را مشخص می‌کند، که خود تابعی از دو متغیر تعداد ساختمان و سرانه مصرف به ازای هر ساختمان می‌باشد. با توجه به بررسی آمار و داده‌ها و شبیه‌سازی شرایط موجود، بدون پیاده‌سازی راه کارهای افزایش بهره‌وری و با ادامه روند کنونی، همان‌گونه که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است، میزان مصرف برق از حدود ۷۲/۵ میلیارد کیلووات ساعت طی بیست سال به ۱۲۴ میلیارد کیلووات ساعت خواهد رسید.

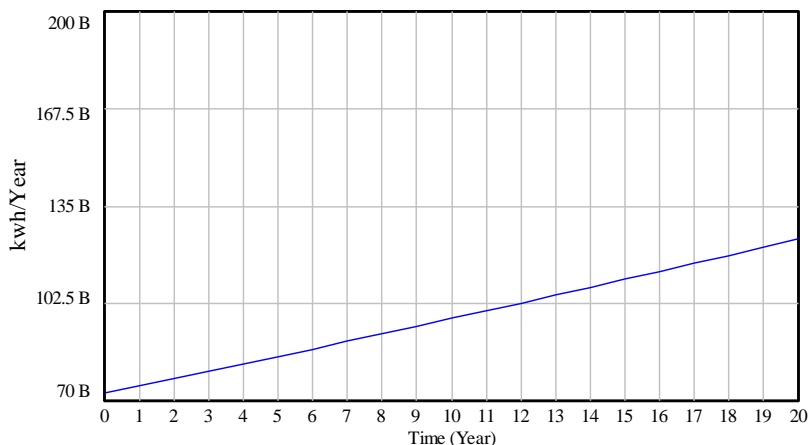
تراز سالانه دولت در حوزه برق



تراز سالانه دولت در حوزه برق : (lanif)tnerruc

شکل ۱۲. نمودار تراز سالانه دولت در حوزه برق ($T=10^{12}$)

تقاضای برق خانگی



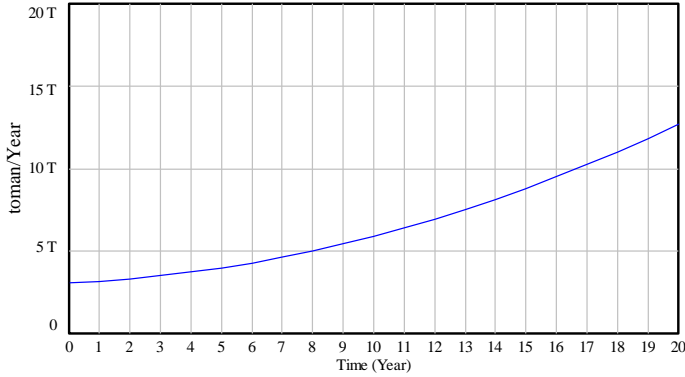
تقاضای برق خانگی : (lanif)tnerruc

شکل ۱۳. نمودار تقاضای برق خانگی ($B=10^9$)

۲-۵. درآمد حاصل از صادرات

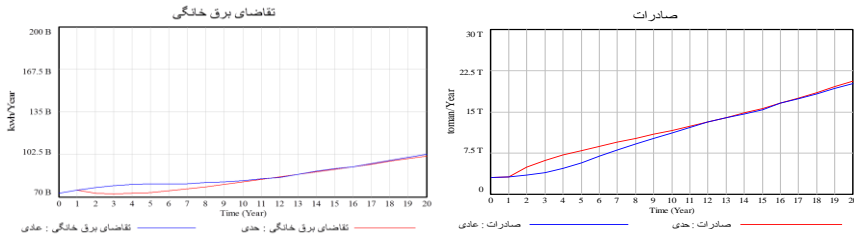
متغیر درآمد حاصل از صادرات درآمد سالانه دولت از صادرات برق به کشورهای همسایه می‌باشد، که مقدار آن با توجه به ظرفیت تولید برق نیروگاهی کشور، منهای میزان تقاضای برق خانگی، مصرف سایر بخش‌ها (صنعت، کشاورزی و...) و میزان اتلاف برق در خطوط انتقال و توزیع می‌باشد، که این مقدار در قیمت هر کیلووات ساعت برق صادراتی ضرب و درآمد این بخش مشخص می‌شود. این درآمد مطابق با شکل ۱۴ و با توجه به سرمایه‌گذاری مناسب کشور در حوزه توسعه نیروگاهی، روندی صعودی دارد.

درآمد حاصل از صادرات



شکل ۱۴. نمودار درآمد حاصل از صادرات

شکل ۱۴. نمودار درآمد حاصل از صادرات



شکل ۱۵. شبیه‌سازی رفتار دو متغیر تقاضای برق خانگی و صادرات تحت شرایط حدی

پس از شبیه‌سازی اولیه مدل، پایداری مدل در شرایط حدی مورد آزمون قرار گرفت. در این آزمون به دنبال دریافت پاسخی منطقی از مدل در هنگام اعمال شرایط حدی هستیم. به عبارت دیگر با وارد کردن یک ورودی خیلی بیشتر یا کمتر از مقدار معمول، مدل نباید نتیجه‌ای به همان میزان غیرمعمول ارائه دهد. بدین منظور میزان سرمایه‌گذاری برای بهره‌وری را به میزان ۱۰ برابر افزایش دادیم. در این شرایط رفتار غیرمعمول این است که تقاضای برق خانگی یک سیر نزولی را در پیش بگیرد و همچنین میزان صادرات برق به صورت چشمگیری افزایش یابد، اما مشاهده می‌شود که مدل در نتیجه این تغییر خروجی منطقی‌ای ارائه می‌دهد. یعنی تقاضای برق خانگی (شکل ۱۵) طی سال‌های اول تا سوم تحت تاثیر شوک وارد شده یک سیر نزولی را

تجربه می‌کند و پس از آن با توجه به حلقه‌های بازخور موجود در مدل به شرایط عادی خود برمی‌گردد و حالت صعودی می‌گیرد. برای صادرات (شکل ۱۶) نیز این اتفاق صادق است، یعنی میزان صادرات طی سال‌های اول تا تقریباً پنجم یک شیب تند صعودی را تجربه می‌کند و پس از آن با تعدیل این شیب، به شرایط عادی باز می‌گردد.

یکی از راه‌های بررسی اعتبار رفتاری مدل مقایسه نتایج حاصل از مدل با داده‌های واقعی (آزمون بازتولید رفتار) است. بدین منظور مقدار اولیه متغیرهای حالت در مدل برابر با مقدار سال ۱۳۹۳ در نظر گرفته شد تا بتوان رفتار متغیرهای مدل در حالت شبیه‌سازی و واقعی را در زمانی که آمار گذشته در دسترس است مورد مقایسه قرار داد.

شاخص جذر میانگین مربع درصد خطا ($RMSPE^1$) برای متغیرهایی مانند تقاضای برق خانگی و مقدار واردات برق که مقادیر دقیق عددی آن‌ها در سال‌های مد نظر در دسترس بوده است محاسبه شده است. نحوه محاسبه این شاخص به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{S_t - A_t}{A_t} \right)^2} \quad (1)$$

مقادیر کمتر از ۰/۱ نشان از اعتبار رفتاری مدل در رابطه با متغیرهای مورد نظر دارد.

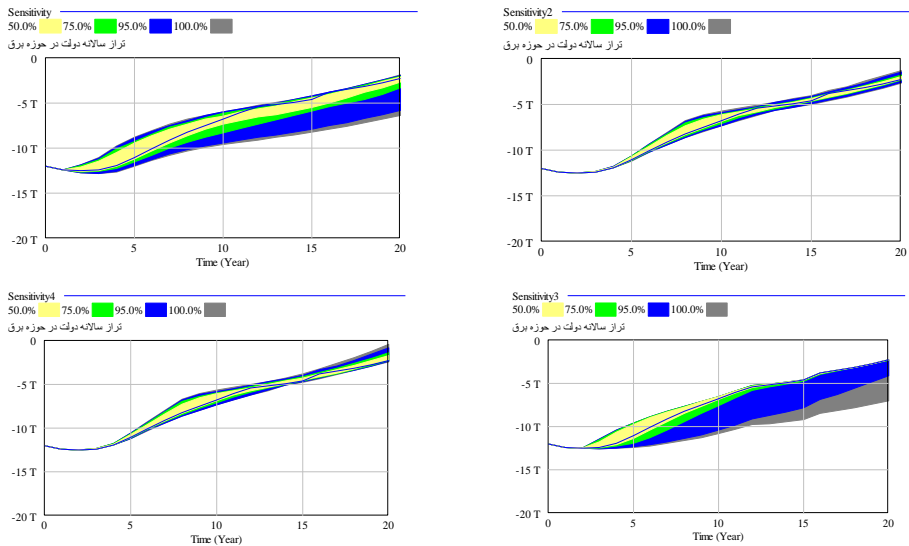
با توجه به محاسبات انجام شده مقدار شاخص $RMSPE$ در این شبیه‌سازی برای متغیر تقاضای برق خانگی، ۰/۱۵۹ و برای واردات برق، ۰/۰۳۴۲ به دست آمد که هر دو مقداری کمتر از ۰/۱ دارند و در نتیجه، اعتبار رفتاری مدل را تایید می‌کنند.

علاوه بر این برای بررسی اعتبار مدل از آزمون‌های برازندگی، سازگاری ابعاد، تایید پارامتری و حساسیت پارامتری بهره گرفته شده است که همگی اعتبار مدل را مورد تایید قرار دادند.

1. Root Mean Square Percentage Error

۳-۵. تحلیل حساسیت مدل

برای تعیین میزان حساسیت مدل در مقابل سه راه کار پیشنهادی و تعیین مقادیر قابل قبولی که تغییر معناداری در رفتار متغیرهای هدف در سیستم ایجاد می‌کند، تحلیل حساسیت مونت کارلو بر روی پارامترهای مرتبط با راه کارهای پیشنهادی صورت گرفته است تا بهترین مقادیر برای هر سیاست تعریف شوند. نتیجه تحلیل حساسیت برای ایجاد تغییرات در هر یک از پارامترهای درصد بودجه ال ای دی (sensitivity 1)، درصد بودجه تهویه مطبوع (sensitivity 2)، درصد بودجه عایق (sensitivity 3) و درصد بودجه فرهنگی (sensitivity 4) برای نمونه بر روی متغیر تراز سالانه دولت در شکل ۱۶ ارائه شده است.



شکل ۱۶. تحلیل حساسیت متغیر تراز سالانه دولت در برابر پارامترهای مربوط به هر راه کار کاهش مصرف

۴-۵. بررسی سیاست‌های مختلف

پس از طراحی و کامل شدن مدل جریان سیستم و پس از کسب نظر خبرگان برای انتخاب سیاست‌های مناسب در جهت افزایش بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های مسکونی، شبیه‌سازی‌های

متعددی با استفاده از تحلیل حساسیت مونت کارلو برای رسیدن به بهترین نتیجه با توجه به متغیرهای مورد نظر انجام شد. از این میان چهار سیاست برتر منحصر بفرد که جواب‌های مناسبی در خروجی متغیرهای کلیدی می‌دهند انتخاب شد و در این بخش ارائه می‌شود تا در نهایت از میان آن‌ها و با مقایسه با یکدیگر راه کار برتر انتخاب شود.

۱. سیاست نخست: از آنجایی که ایران جز کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود، در حال حاضر مدیران و تصمیم‌گیران حوزه انرژی برق تمرکز ویژه‌ای برای توسعه نیروگاهی دارند و هر ساله سرمایه مناسبی به این بخش اختصاص داده می‌شود. از این رو در سناریوی اول، شبیه‌سازی به گونه‌ای طراحی شده است که سرمایه پیش‌بینی شده برای بهره‌وری تماماً به توسعه نیروگاهی اختصاص یابد و به سرمایه آن بخش اضافه شود تا در طول شبیه‌سازی نتیجه تفکر حاکم فعلی در این بخش مشاهده شود. سرمایه افزوده شده برای توسعه نیروگاهی معادل ۱۱۸۸ میلیارد تومان در سال است.

۲. سیاست دوم: در این سیاست، سرمایه اختصاص یافته برای افزایش بهره‌وری بدین صورت تقسیم شده که سالانه، ۲۰ درصد برای توسعه محصولات ال ای دی، ۲۰ درصد برای توسعه سیستم‌های تهویه مطبوع، ۳۰ درصد برای توسعه عایق بندی و ۳۰ درصد برای مباحث فرهنگی و اصلاح الگوی مصرف تخصیص داده شود. نحوه پرداخت هزینه هر یک از راهکارها به این گونه است که دولت در حوزه محصولات ال ای دی به دلیل هزینه پایین نسبت به راهکارهای دیگر، ۵۰ درصد هزینه را به صورت بلاعوض پرداخت می‌کند (برای نزدیک شدن قیمت این محصولات به قیمت محصولات روشنایی پر مصرف و رایج بازار) و در خصوص سیستم تهویه و عایق بندی، تمام هزینه این بخش را به صورت یک وام بدون بهره با بازپرداخت دو ساله به مشترکین می‌پردازد.

۳. سیاست سوم: در این سیاست نیز، سرمایه ۱۱۸۸ میلیارد تومانی سالانه به چهار سهم مساوی تقسیم شده و در هر یک از راهکارها هزینه می‌شود، در واقع هر راهکار سهم ۲۵ درصدی در سال دارد. نحوه پرداخت هزینه هر یک از راهکارها در این سناریو نیز به این

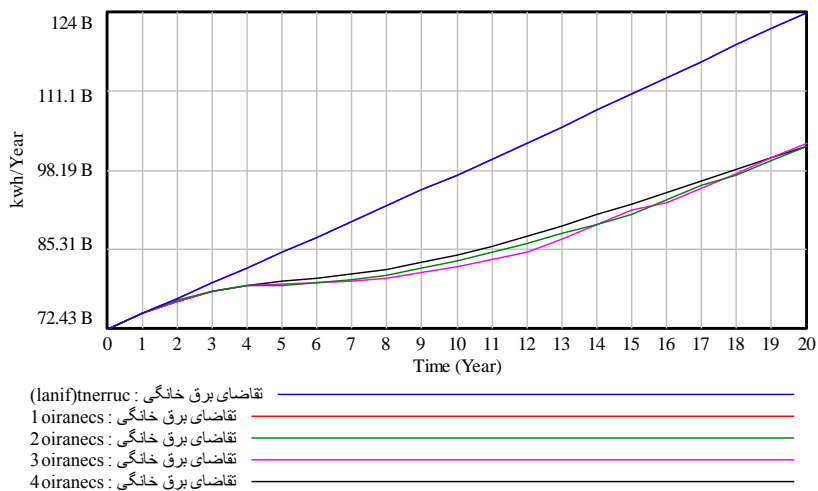
گونه است که دولت در حوزه محصولات ال ای دی به دلیل هزینه پایین نسبت به راه-کارهای دیگر، ۵۰ درصد هزینه را به صورت بلاعوض پرداخت می‌کند (برای نزدیک شدن قیمت این محصولات به قیمت محصولات روشنایی پر مصرف و رایج بازار) و در خصوص سیستم تهویه و عایق بندی، تمام هزینه این بخش را به صورت یک وام بدون بهره با بازپرداخت دو ساله به مشترکین می‌پردازد.

۴. سیاست چهارم: نحوه تخصیص سیاست در این سناریو همانند سیاست سوم است، هر یک از راهکارها سالانه ۲۵ درصد از سرمایه را به خود اختصاص می‌دهند، با این تفاوت که روش پرداختی در این حالت به این گونه است که دولت ۵۰ درصد هزینه هریک از راهکارها را به صورت بلاعوض به مشترکین پرداخت می‌کند.

۵-۵. اجرای هم زمان و مقایسه سیاست‌ها

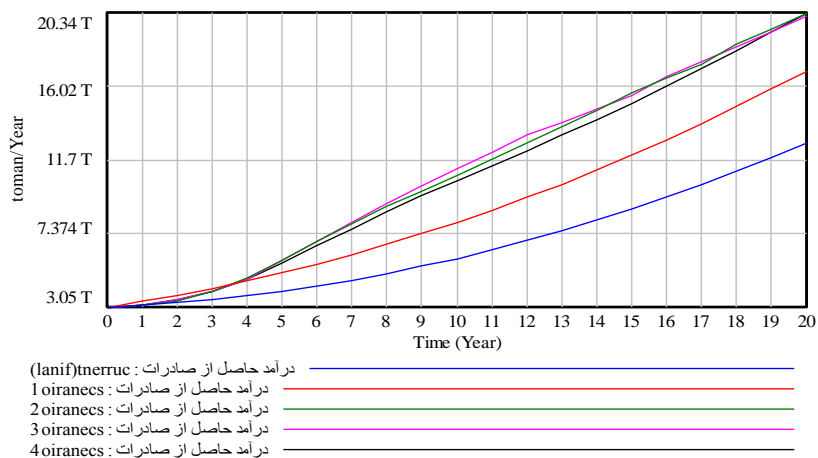
در این بخش برای مقایسه بهتر سیاست‌های تعریف شده در مدل با یکدیگر و بررسی نتایج خروجی آن‌ها روی سه متغیر کلیدی "تقاضای برق خانگی"، "درآمد حاصل از صادرات" و "تراز سالانه دولت در حوزه برق" آن‌ها را به صورت هم‌زمان در نمودار مورد بررسی قرار گرفته است تا نقاط ضعف و قوتشان نسبت به یکدیگر مشخص شود. شکل ۱۷ نمودار تقاضای برق خانگی برای تمام سیاست‌ها را نمایش می‌دهد. شکل ۱۸ نمودار درآمد حاصل از صادرات برق برای تمام سیاست‌ها را نمایش می‌دهد. همچنین شکل ۱۹ نمودار تراز سالانه دولت در حوزه برق برای تمام سیاست‌ها را نمایش می‌دهد.

تقاضای برق خانگی



شکل ۱۷. نمودار تقاضای برق خانگی برای تمام سناریوها

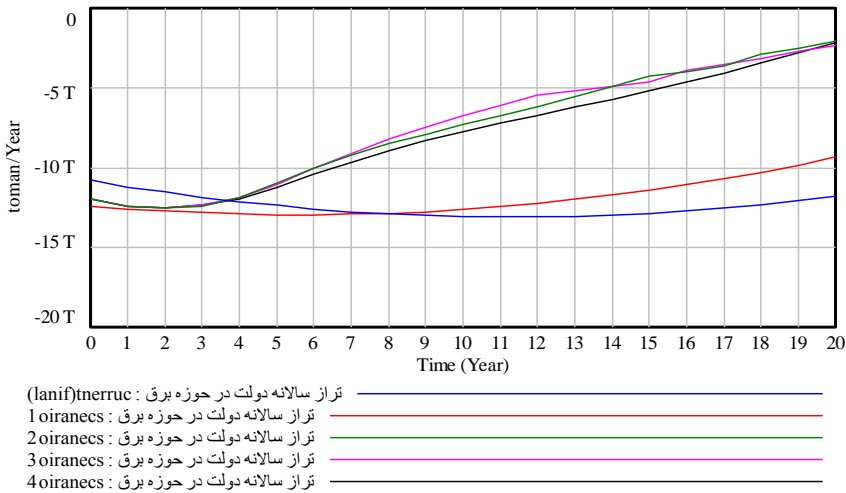
درآمد حاصل از صادرات



شکل ۱۸. نمودار درآمد حاصل از صادرات برق برای تمام سناریوها

همان طور که در شکل مشخص است، تمام سیاست‌های تعریف شده طی بیست سال شبیه سازی فاصله خوبی از روند شبیه سازی حالت کنونی گرفتند و میزان کاهش تقاضا در آنها تقریباً از سال سوم آغاز شده و تقریباً تا سال ۱۲ شیب کاهشی خوبی را دنبال کرده‌اند. صرف‌نظر از سناریوی پایه، تمام سیاست‌ها عملکرد نسبتاً مشابهی دارند. گرچه سیاست سوم نتایج کمی بهتر را نشان می‌دهد.

تراز سالانه دولت در حوزه برق



شکل ۱۹. نمودار تراز سالانه دولت در حوزه برق برای تمام سناریوها

این نمودار میزان درآمد حاصل از صادرات برق طی بیست سال را در حالت‌های مختلف شبیه سازی نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است در حالت مینا و سیاست اول اختلاف زیادی با سایر سیاست‌ها ایجاد شده است. دلیل این اختلاف هم آن است که در این دو حالت ذکر شده هیچ گونه فعالیتی در جهت افزایش بهره‌وری و کاهش تقاضای بخش خانگی صورت نگرفته و صرفاً تمرکز بر توسعه نیروگاهی و افزایش ظرفیت تولید بوده که این بخش نیز با گذر زمان و افزایش تعداد مشترکین و سرانه مصرف آنها خنثی می‌شود.

نمودار ارائه شده متغیر تراز مالی دولت در این حوزه می‌باشد که شاید بتوان گفت مهم‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین متغیر مدل برای انتخاب راه کار برتر می‌باشد. همان طور که در شکل مشخص است در شبیه‌سازی حالت مبنای سه سال اول به دلیل اینکه هزینه‌ای برای سرمایه‌گذاری انجام نمی‌گیرد شرایط تراز بهتر از حالات دیگر است ولی پس از گذشت چند سال و به نتیجه رسیدن سرمایه‌گذاری‌ها اختلاف فاحشی میان حالت مبنای و راه کارهای دیگر ایجاد می‌شود. البته سیاست اول (نمودار قرمز) نیز که صرف سرمایه‌گذاری در توسعه نیروگاهی بود، گرچه از حالت مبنای پیشی می‌گیرد ولی در نهایت به نسبت دیگر حالت‌ها شرایط قابل قبولی ندارد.

اما سه سیاست دیگر شرایط بسیار نزدیکی دارند به گونه‌ای که به عنوان مثال سیاست سوم در برخی از سال‌های میانی و در پایان دهه اول از دو حالت دیگر پیشی می‌گیرد ولی در سه سال پایانی دهه دوم سیاست دوم عملکرد بهتری دارد. در جدول (۴) مقایسه و رتبه‌بندی سیاست‌ها آمده است.

جدول ۴. نمایش رتبه بندی سناریوها

رتبه	تقاضای برق خانگی (گیگاوات ساعت)	صادرات (گیگاوات ساعت)	تراز مالی (هزار میلیارد تومان)	سیاست
۵	۲۰۵۲	۳۹۷	-۲۶۰	مبنا
۴	۲۰۵۲	۵۲۴	-۲۵۱	اول
۲	۱۷۹۶	۶۵۳	-۱۵۸	دوم
۱	۱۷۹۱	۶۵۸	-۱۵۵	سوم
۳	۱۸۱۱	۶۳۸	-۱۶۵	چهارم

مأخذ: نتایج تحقیق

همانگونه که ملاحظه می‌شود، سیاست سوم منجر به نتایج بهتری می‌شود و راه کارهای مختلف شامل توسعه محصولات روشنایی ال ای دی (خراسانی زاده و همکاران، ۲۰۱۵)، توسعه سیستم‌های تهویه مطبوع (کاپونیو و همکاران، ۲۰۱۵)، توسعه عایق کاری (کیم و مون، ۲۰۰۹) و

همچنین فرهنگ سازی و اصلاح الگوی مصرف (کاپونیو و همکاران، ۲۰۱۵) برای بهبود بهره‌وری انرژی در بخش ساختمان‌های مسکونی موثر می‌باشند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این پژوهش راه کارهای مختلف شامل توسعه محصولات روشنایی ال ای دی، توسعه سیستم‌های تهویه مطبوع، توسعه عایق کاری و همچنین فرهنگ سازی و اصلاح الگوی مصرف برای بهبود بهره‌وری انرژی در بخش ساختمان‌های مسکونی مورد بررسی قرار گرفت. در این راه از روش پویایی شناسی سیستم‌ها استفاده شد و اثربخشی راه کارهای مختلف طی ۲۰ سال آینده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد با ادامه شرایط کنونی تولید و مصرف برق در بخش خانگی، به دلیل پایین بودن هزینه برق برای مشترکین (به سبب پرداخت یارانه‌های دولتی در این حوزه چه به صورت مستقیم روی قبوض برق و چه به صورت غیرمستقیم روی قیمت فروش سوخت اولیه به بخش نیروگاهی) و همچنین عدم توجه کافی در حوزه افزایش بهره‌وری انرژی بخش مسکونی طی سالیان اخیر، دولت با تراز مالی منفی طی دوره ۲۰ ساله شیب‌سازی مواجه خواهد شد. از سوی دیگر با توجه به رشد جمعیت کشور و افزایش تعداد مشترکین، میزان مصرف برق طی این سالیان به عدد ۲۰۵۲ گیگاوات ساعت خواهد رسید و صادرات کاهش خواهد یافت. با در نظر گرفتن این شرایط و مقایسه خروجی‌ها، تمام سناریوهای اجرا شده منجر به شرایط بهتری نسبت به ادامه روند کنونی خواهند شد. بهترین سناریو برای اجرا در حوزه افزایش بهره‌وری انرژی در بخش مسکونی، تخصیص ۲۵ درصد از سرمایه سالانه بهره‌وری به هر یک از راه کارهای ارائه شده است که پرداخت این مبلغ به صورت، پوشش ۵۰ درصد هزینه محصولات روشنایی ال ای دی به صورت بلاعوض و پوشش ۱۰۰ درصدی هزینه‌های توسعه تهویه مطبوع و عایق کاری به وسیله وام‌های بدون بهره با باز پرداخت دوساله می‌باشد.

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود مصرف برق لوازم خانگی نیز به مدل اضافه شود. همچنین بخش فرهنگ سازی و اصلاح الگوی مصرف که در قسمتی از مدل این پژوهش آمده است، به تنهایی قابلیت بررسی و پژوهش بسیار وسیع و به شکل مجزا را دارد.

منابع

- شرکت مادر تخصصی توانیر، <https://www.tavanir.org.ir/>.
- شرکت مدیریت شبکه برق ایران، <https://www.igmc.ir/>.
- فاضلی، عبدالرضا و شاهین حیدری (۱۳۹۲)، "بهبودسازی مصرف انرژی در مناطق مسکونی شهر تهران با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی انرژی روتردام (REAP)"، پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، دوره ۱، شماره ۳، صص ۸۳-۹۶.
- کاظمی، محمد و حسین نمازی (۱۳۹۵)، "عوامل بازدارنده اجتماعی بهره‌وری مصرف انرژی در ساختمان در ایران"، پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، دوره ۲، شماره ۳، صص ۱۶۹-۱۹۶.
- مرکز آمار ایران، <https://www.amar.org.ir/>.
- معاونت برق و انرژی (دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی)، وزارت نیرو (۱۳۹۷)، ترازنامه انرژی ۱۳۹۵. وزارت نیرو، <http://moe.gov.ir/>.
- Aseré, L., and Blumberga, A.** (2015), "Government and municipality owned building energy efficiency system dynamics modelling". *Energy Procedia*, Vol. 72, PP. 180-187.
- Cao, J., Choi C.H., and Zhao, F.** (2017), "Agent-based modeling of the adoption of high-efficiency lighting in the residential sector". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 19, PP. 70-78.
- Caponio, G., Massaro, V., Mossa, G., and Mummolo, G.** (2015), "Strategic energy planning of residential buildings in a smart city: a system dynamics approach". *International Journal of Engineering Business Management*, Vol. 7, PP. 7-20.
- Jain, M. and Pathak, K.K.** (2018), "Thermal modelling of insulator for energy saving in existing residential building". *Journal of Building Engineering*, Vol. 19, PP. 62-68.
- Khorasanizadeh, H., Parkkinen, J., Parthiban, R., and Moore, J.D.** (2015). "Energy and economic benefits of LED adoption in Malaysia". *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 49, PP. 629-637.

- Kim, J.J., and Moon, J.W.** (2009), "Impact of insulation on building energy consumption". Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland.
- Mosannenzadeh, F., Bisello, A., Vaccaro, R., D'Alonzo, V., Hunter G.W., and Vettorato, D.** (2017), "Smart energy city development: A story told by urban planners". *Cities*, Vol. 64, PP. 54-65.
- Pablo-Romero, M.P., Pozo-Barajas, R., and Yñiguez, R.** (2017), "Global changes in residential energy consumption". *Energy Policy*, Vol. 101, PP. 342-352.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C.** (2008), "A review on buildings energy consumption information". *Energy and buildings*, Vol. 40, No 3, PP. 394-398.
- Smith, P.C., and Ackere, A.V.** (2002), "A Note on the Integration of System Dynamics and Economic Models". *Journal of Economic Dynamics & Control*, PP. 1-10.
- Sterman, J. D.** (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*, USA, Jeffrey J.