ارائه مدل پویای سیستم تامین انرژی الکتریکی ایران مبتنی بر پیوند آب- غذا- انرژی - تغییر اقلیم

سونا رزاقی[1]، علی‌محمد احمدوند[2]، مرضیه صمدی فروشانی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۲/۱۱/۲۹ **نوع مقاله:** پژوهشی

چکیده

صنعت برق که در امنیت انرژی کشورها نقش تعیین کننده‌ای دارد در جهان با چالش‌هایی نظیر افزایش تقاضا، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی مواجه شده است. پیش‌بینی‌ها بیانگر بحران آب، انرژی و غذا در آینده ایران و جهان است. کشور ایران، با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و منابع محدود آب، اکنون بیش از قبل نیازمند حفظ منابع آب، غذا و انرژی است. با توجه به اهمیت این موضوع، در این پژوهش به رویکرد همبست آب- غذا - انرژی به دلیل حساسیت هر یک از بخش‌های پیوند به پدیده تغییر اقلیم، با هدف تأمین امنیت انرژی الکتریکی، توجه ویژه‌ای شده است. در این پژوهش، هدف اصلی، ارائه یک مدل از تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر پیوند میان آب ـ غذا ـ انرژی-تغییر اقلیم و تحلیل عوامل تأثیرگذار بر این رابطه است. روش‌شناسی انجام تحقیق بر مبنای مراحل کلی رویکرد پویایی‌شناسی سیستم انجام شده است. شناخت ارتباطات در تامین انرژی الکتریکی، با توجه به پیوند آب-غذا-انرژی-تغییر اقلیم با کشف ارتباطات علی و معلولی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مدل‌سازی شده است و نهایتا با اجرای مدل توسط نرم افزار به تشریح رویدادها و پیامدها پرداخته و سپس، با پیش بینی روند آتی با توجه به روند گذشته، راهکارهایی برای رویایی با تغییرات اقلیمی در تامین انرژی الکتریکی ارائه شده است. داده‌های پژوهش بر اساس مستندات سازمانی وزارت نیرو، وزارت جهاد کشاورزی، مرکز آمار ایران، سازمان هواشناسی کشور و سازمان مدیریت منابع آب ایران گردآوری شده است. مدل با استفاده از داده‌های زمانی (۱۴۰۰-۱۳۹۰) در نرم افزار ونسیم نسخه Vensim DSS ٦,٤E طراحی و در افق ۳۰ ساله (۱۴۰۰-۱۴۳۰) شبیه‌سازی شده است. بر اساس پیاده‌سازی ترکیب سیاست‌های منتخب در مدل به طور خلاصه راهکارهای زیر به تامین امنیت انرژی الکتریکی با توجه به پیوند آب-غذا-انرژی و تغییرات اقلیمی منجر شده‌اند: توسعه ۱۶ درصدی نیروگاه‌های هسته‌ای،کاهش ۱۸ درصدی نسبت تولید نیروگاه‌های گازی به کل تولید نیروگاه‌های تجدیدناپذیر و افزایش تولید نیروگاه سیکل ترکیبی از طریق تبدیل گازی به سیکل ترکیبی، تجمیع انرژی و توسعه سیستم‌های بازیافت گرما در واحدهای صنعتی به میزان ۳۲ درصد، کاهش ۵ درصدی تلفات انتقال و توزیع انرژی،کاهش سرانه مصرف انرژی و رسیدن به میانگین جهانی، مدیریت تقاضای آب در بخش غذا با استفاده از افزایش راندمان آبیاری تا حدود ۸۵ درصد، ۲۷درصد افزایش سطح اراضی تحت شبکه آبیاری و کاهش تلفات غذایی به مقدار میانگین جهانی ۰/۹ میلیون تن.

واژگان کلیدی: پیوند آب-غذا-انرژی، انرژی الکتریکی، تغییر اقلیم، پویایی سیستم

---

[1] دکتری تخصصی، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران. s.razzaghy@eyc.ac.ir

[2] استاد، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران. a.ahmadvand@eyc.ac.ir

[3] استادیار، دانشگاه ایوان‌کی،ایوان‌کی، ایران. samadi.m@eyc.ac.ir

۱.مقدمه

امروزه تأمین انرژی به یکی از مهمترین مسائل تمامی جوامع تبدیل شده است. تولید برق از اقدامات مهم در جهت تامین امنیت انرژی از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۰ با رشد ۷۲ درصدی همراه بوده است. بر اساس پیش‌بینی‌ها تا سال ۲۰۴۰ هنوز می‌توان ۵۶ درصد افزایش تولید برق را انتظار داشت. این پیش‌بینی‌ها می‌توانند به عنوان یک اخطار بزرگ در رابطه با انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه تغییرات اقلیمی باشند(عنایتی و بزرگ‌حداد، ۱۳۹۸). تولید و استفاده از انرژی به طور مستقیم و غیرمستقیم بر اقلیم تأثیر می‌گذارد(رازیا و همکاران، ۲۰۲۳). در حال حاضر، نوسانات اقلیمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی است. کشور ایران به دلیل قرار گرفتن در گلوگاه اثرپذیری از تغییرات اقلیمی، با چالش‌های انرژی، آب و محیط زیست مواجه شده است. پیش‌بینی‌ها بیانگر تشدید بحران آب در ایران بوده، به طوری که مطابق گزارشات ناسا دمای هوا ۳ تا ۵ درجه تا سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت. همچنین پیش‌بینی‌ها حاکی از کاهش ۳۵ درصدی میزان بارش برف و باران در ایران تا سال ۲۰۵۰ است که منجر به کاهش میزان سرانه‌ی مصرف آب به کمتر از ۱۰۰۰ متر مکعب در سال ۲۰۵۰ و حتی کمتر از ۷۰۰ مترمکعب در سال ۲۱۰۰ می‌گردد (لونی و شریف‌زاده، ۱۴۰۱). شدت تغییراقلیم در ایران بیشتر از منطقه خاورمیانه می‌شود. (علیجانی, ۱۴۰۰). بنابراین ایران یکی از آسیب پذیرترین مناطق جهان از تغییر اقلیم و یکی از ۱۰ کشور نخست منتشرکننده گازهای گلخانه‌ای معرفی شده است (رائینی, ۱۴۰۰). سوخت‌های فسیلی مسئول حدود ۸۸ درصد از انتشار CO_2در جهان هستند. بخش انرژی تقریباً بزرگترین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای است و تخمین زده شده است که در سطح جهانی، انتشارات مرتبط با انرژی تا سال ۲۰۴۰ حدود ۱۶ درصد افزایش می‌یابد (چشم انداز انرژی جهان[۱]،۲۰۱۵). لازم به ذکر است حدود ۹۹ درصد از انرژی کشور ایران از طریق سوخت‌های فسیلی (نفت و گاز طبیعی) تأمین می‌شود (لونی و شریف‌زاده، ۱۴۰۱). تامین امنیت عرضه انرژی و مهار سهم انرژی در تغییرات آب و هوایی دو چالش اساسی بخش انرژی در مسیر آینده‌ای پایدار هستند (عباسی[۲]،ت و عباسی، س، ۲۰۱۰؛ کایگوسوز[۳]، ۲۰۱۲) تولید انرژی، از جمله گزینه‌های انرژی جایگزین، می‌تواند طیف گسترده‌ای از اثرات را بر بهره‌وری زمین و سایر عواملی که بر کربن، منابع آب، غذا و انرژی و به نوبه خود بر آب و هوا تأثیر می‌گذارند، داشته باشد. در همین حال، آب و هوا بر خروجی بالقوه، کارایی نسبی و پایداری منابع انرژی جایگزین تأثیر می‌گذارد. بنابراین، استفاده از زمین، آب، غذا، تغییرات آب و هوا و انتخاب های انرژی با هم مرتبط

[۱] Word Energy Outlook

[۲] Abbasi

[۳] Kaygusuz

هستند و هر تحلیل جامعی که یکی از این عوامل را در نظر می‌گیرد باید از این تعاملات آگاه باشد (اچ دیل، ای افرویمسون و ال کلاین، ۲۰۱۱). سهم زیادی از معضلات کشور، مربوط به بخشی‌نگری بوده است. عدم توجه به پیوند آب، انرژی و غذا در ارزیابی منابع و سیاست گذاری منجر به استراتژی - های متناقض و استفاده ناکارآمد از منابع شده است(رسول و شارما، ۲۰۱۶). پیوند آب ـ انرژی ـ غذا را می‌توان رویکردی جهت ارزیابی، توسعه و اجرای سیاست‌هایی دانست که به طور همزمان بر امنیت آب، انرژی و غذا متمرکز است (صیادی و همکاران، ۱۳۹۸). پیوند آب، انرژی و غذا می‌تواند این شکاف برنامه‌ریزی را تا حدود زیادی حل کرده و با نگاه یکپارچه به سیستم‌های آب- غذا- انرژی و تغییرات اقلیم، راه‌حل‌های فراگیر برای چالش‌ها ارائه نموده و پیامدها را به حداقل ممکن برساند. محقق در این پژوهش با رویکردی جامع نه تنها امنیت سه مقوله آب، انرژی و غذا با توجه به روند تغییرات اقلیمی در نظر گرفته، بلکه اثرات متقابل و پویایی‌های بین آنها را نیز مد نظر قرار داده است. با عنایت به ملاحظات ذکر شده، این تحقیق به دنبال این است که مدل پویای مناسب برای سیستم تامین انرژی الکتریکی ایران مبتنی بر پیوند آب ـ غذا ـ انرژی و تغییر اقلیم چگونه است؟

۲.مبانی نظری

در حال حاضر، نوسانات اقلیمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی است که تهدیدی برای امنیت انسان است. پدیده‌ی تغییر اقلیم که ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، به ویژه گاز دی اکسیدکربن در جو می‌باشد، سبب تغییرات فصلی، تداوم خشک سالی، تغییرات در رژیم بارش، میزان جریان سرعت باد، تابش خورشیدی و دمای هوا می‌شود (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۹). گازهای گلخانه‌ای نقش مهمی در تنظیم دمای زمین دارند. بنابراین تغییر اقلیم با گرم شدن کره زمین که افزایش میانگین دمای سطح زمین است مشخص می‌شود. (اویگو و ادیانگ, ۲۰۱۰). کشورهای در حال توسعه در نتیجه تغییرات اقلیمی با چالش‌های جدیدی از جمله پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مواجه هستند(راضیه[۱]، امین[۲] و عرفان[۳]، ۲۰۲۳؛ لونی و شریف‌زاده، ۱۴۰۱). پیش-بینی‌های جهانی نشان می‌دهد که با توجه به رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، پیشرفت فناوری، افزایش شهرنشینی، تغییرات اقلیم، تخریب منابع و کمبود آب، تقاضا برای آب، انرژی و غذا در دهه‌های آینده افزایش خواهد یافت. پیش بینی شده است که تا سال ۲۰۵۰ به دلیل تقاضای بیشتر مواد مغذی و با کیفیت بهتر، بایستی ۶۰ درصد غذای بیشتر تولید گردد. از سوی دیگر، بر اساس مطالعه انجام شده

[۱] Razzia

[۲] Amin

[۳] Irfan

توسط اداره اطلاعات انرژی (EIA[۱])، با ادامه وضع موجود، مصرف انرژی تا سال ۲۰۵۰ حدود ٪۸۰ افزایش خواهد یافت. بخش زیادی از این رشد مربوط به مخصوصاً کشورهای آسیایی است. تقاضای آب نیز تا سال ۲۰۵۰ به میزان ۵۵ درصد افزایش خواهد داشت (www.eia.gov).اولین بررسی علمی از پیوندآب-غذا-انرژی با مفاهیم اصلی به‌عنوان مقاله در کنفرانس بن ۲۰۱۱ در همان سال منتشر شد. کنفرانس بن به صراحت نشان داد که با استفاده از یک رویکرد پیوندی می‌توان به امنیت آب، انرژی و غذا دست یافت (هوف[۲]، ۲۰۱۱). در طول چند سال گذشته، بحث در مورد ارتباط به‌هم پیوسته امنیت آب، انرژی و غذا تبدیل به یک جنبش جهانی شده است. در حالی‌که بخش‌های آب، انرژی و غذا هر یک در مواجهه با افزایش تقاضای جهانی ناشی از رشد جمعیت، شهرنشینی، تغییر سبک زندگی و رژیم‌های غذایی و تغییرات اقلیمی به تنهایی با چالش تأمین مواجه هستند، به عنوان بخشی از پیوند امنیت آب، انرژی و غذا نیز به یکدیگر وابسته‌اند (مفاخری و همکاران، ۱۴۰۰). آب، غذا و انرژی و امنیت هر سه بخش بدون کاهش منابع طبیعی به عنوان یک چالش بزرگ در منطقه آسیا شناخته می‌شود. بدین‌جهت از سال ۲۰۱۵ به بعد سازمان ملل متحد مجموعه‌های از اهداف را موسوم به اهداف توسعه پایدار[۳](SDGs) با هدف دست یابی به توسعه پایدار درازمدت در جوامع انسانی و تضمین فراهم شدن غذا، آب و انرژی به منظور پایداری برای نسل‌های آینده، در دستور کار خود قرار داد (صیادی و همکاران، ۱۳۹۸). در دهه‌های اخیر، واژه پایداری با معنی " آنچه که می‌تواند در آینده تداوم یابد " کاربرد پیدا کرده است. در یک سیستم پویا مانند جامعه بشری، پایداری اساسا به معنی ثبات تعادل در طول زمان است. از نظر عملی می‌توان این گونه بیان کرد که پایداری در گذر زمان به این معناست که عوامل بیرونی نتوانند تعادل یک سیستم را برهم بزنند (عباس پور, ۱۳۸۶). همچنین تعریف توسعه پایدار از کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه، عبارت است از توانایی انسان در برآوردن نیازهای حاضر بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده در برآوردن نیازهای خود. توسعه پایدار یک حالت ثابت از هماهنگی نیست بلکه روندی از تغییرات است که در آن مصرف منابع، جهت‌گیری سرمایه‌گذاری و توسعه فناوری و تغییرات سازمانی، علاوه بر برآورده کردن نیازهای حاضر با تأمین نیازهای آیندگان سازگار باشد (بختیاری و همکاران, ۱۳۸۸). در همین راستا تعاریف امنیت آب، غذا و انرژی در ادامه آورده شده است. امنیت آب عبارت است از «یک کمیت و کیفیت قابل قبول از آب برای سلامت، معیشت، تولید قابل قبول و اکوسیستم همراه با سطح مورد قبولی از خطرات آب برای مردم، محیط زیست

[۱] Energy Information Administration

[۲] Hoff

[۳] Sustainable Development Goals

و اقتصـاد » (صیادی و همکاران، ۱۳۹۸). امنیت آب رابطی است که شبکه غذا، انرژی، آب و هوا، رشد اقتصادی و چالش‌های امنیت انسانی را که اقتصاد جهان طی دو دهه آینده با آن مواجه است، به هم پیوند می‌دهد. هاف در مقاله‌ای که برای کنفرانس بن در نوامبر ۲۰۱۱ در رابطه با آب، انرژی و امنیت غذایی تهیه شده است اعلام می کند، آب نقش اصلی را در پیوند بازی می کند. امنیت غذایی در دسترس بودن و دسترسی به غذای کافی، ایمن و مغذی برای رفع نیازهای غذایی و ترجیحات غذایی برای یک زندگی فعال و سالم است(بروس بک ویلارول واکر، ۲۰۱۳). امنیت انرژی دسترسی به خدمات انرژی پاک، قابل اعتماد و مقرون به صرفه برای پخت و پز و گرمایش، روشنایی، ارتباطات و مصارف تولیدی، در دسترس بودن فیزیکی بدون وقفه انرژی با قیمتی مقرون به صرفه و در عین حال رعایت نگرانی‌های زیست محیطی است (رازیا و همکاران، ۲۰۲۳).

۳.پیشینه تحقیق

تامین انرژی الکتریکی، تغییرات اقلیمی و پیوند آب-غذا-انرژی حوزه تحقیقاتی رو به رشدی را تشکیل می‌دهند. در چند سال گذشته مطالعات زیادی به خصوص در مورد ارزیابی‌های تغییرات اقلیمی بر سهم بخش انرژی در تغییرات اقلیمی متمرکز شده‌اند، همچنین تعدادی از آنها پیامدهای معکوس تغییر اقلیم را برای بخش انرژی بررسی کرده‌اند. پژوهشگران متعددی در این زمینه به بررسی ارتباط میان تغییر اقلیم و مبحث انرژی پرداخته اند؛ در اینجا برخی از این مطالعات و نتایج آن ها به اختصار بررسی می شود. مطالعات ارائه شده در این پژوهش نمونه کاملی از تمام مطالعات موجود را تشکیل نمی‌دهند، با توجه به حجم گسترده ادبیات موجود، بر مطالعاتی با حداقل دامنه ملی یا مطالعاتی که بینش‌ها یا نوآوری‌های ارزشمندی را ارائه می‌دهند، تمرکز شده است. ضمناً در این موارد، مقالات جدیدتر و مشخص‌تری در اولویت قرار گرفته‌اند. با توجه به ضرورت و اهمیت سیستم تامین امنیت منابع انرژی و رشد تقاضای انرژی و اثر تغییرات اقلیمی بر روند توسعه سیاست‌های بخش انرژی، مطالعات گسترده‌ای در سال‌های اخیر در این حوزه انجام شده است. کانگ و همکارانش (۲۰۲۰)[۱] یک بررسی سیستماتیک با هدف ارائه یک مرور کلی از وسعت تحقیقات در مورد سیستم‌های انرژی برای کاهش تغییرات آب و هوا انجام داده و در نتیجه به درک جامعی از عملکرد موجود و اقدامات پیش‌بینی‌شده اضافه کرده است. می و همکارانش (۲۰۲۰) در پژوهش خود نشان می دهند که (۱) تقاضای برق ملی چین در ۳۰ سال آینده تحت تغییرات آب و هوا حدود ۵۸/۶ درصد رشد خواهد کرد. (۲) برای کاهش تغییرات آب و هوا و توسعه پایدار، سوخت های فسیلی به تدریج با انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین می‌شوند (یعنی سهم سوخت‌های فسیلی از کل عرضه انرژی ۲۲/۵٪ کاهش

[۱] (Kang, et al.,۲۰۲۰)

می‌یابد و سهم برق تولید شده از انرژی‌های تجدید پذیر ۲۷٪ تا سال ۲۰۵۰ افزایش می یابد). (۳) در مقایسه با مقدار اوج در سال ۲۰۳۰، انتشار دی اکسید کربن تا سال ۲۰۵۰ به میزان ۱۵/۱ درصد کاهش می یابد. چن و همکارانش (۲۰۲۰)[۱] راه‌هایی برای کاهش تغییرات آب و هوایی با انرژی ۱۰۰٪ قابل تجدید و پایدار برای یک جزیره کوچک: به عنوان مثال جامائیکا را ارائه می‌دهد. محقق در پژوهش خود، مشکلات معرفی انرژی‌های تجدیدپذیر، به ویژه خورشیدی و باد را در کشورهای جزیره‌ای کوچک بررسی می‌کند. در این تحقیق راه حل برای مشکلات با اجرای سیستم ذخیره انرژی باتری (BESS)[۲]؛ و یک مسیر گام به گام به سوی انرژی‌های ۱۰۰٪ تجدیدپذیر با رعایت دستورالعمل کاهش تغییرات اقلیمی تجویز شده توسط هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی (IPCC) (۲۰۱۸)[۳] به شیوه‌ای که از نظر فنی و اقتصادی امکان‌پذیر و در نتیجه پایدار باشد، بیان شده است. در این راستا، تعداد زیاد دیگری نیز از مدل‌های توسعه تولید برق و سیاست‌گذاری انرژی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم توسعه یافته‌اند. مطالعاتی در زمینه بازارهای برق تجدیدپذیر (مشایخی و همکاران، ۲۰۱۰ و حسینی و همکاران، ۲۰۱۲)، ارزیابی سیاست‌هایی مشخص برای ارتقاء سرمایه‌گذاری در تولید برق تجدیدپذیر (هسو ، ۲۰۱۲)، نظیر تعرفه تغذیه (FIT) (میلاد موسویان و همکاران، ۲۰۲۰ و شاه محمدی و همکاران، ۲۰۱۵) و مالیات کربن (پتیت و همکاران، ۲۰۱۶) از تحقیقات مرتبط با برنامه‌ریزی توسعه تولید با ابزار پویایی سیستم می‌باشند. در تحقیقات با رویکرد پیوند منابع آب-غذا-انرژی، مسئله اصلی تعیین میزان مصرف منابع است و مقدار موجود منابع برای ارزیابی امنیت منابع در نظر گرفته می‌شود (لی و ما، ۲۰۲۰). همچنین کارآمدی و پایداری سیستم در رویکرد پیوند مورد تاکید است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). و باید اثربخشی سیاست‌ها باتوجه به دیدگاه‌های مختلف پیوند مورد ارزیابی قرار گیرد. ارزیابی عملکرد کل سیستم با رویکرد پیوند و تجزیه وتحلیل روابط داخلی و عوامل خارجی، از زمینه‌های نوپای تحقیقات مرتبط با آن است. لافورد و همکاران در سال ۲۰۱۳ طی پژوهشی در چین، رویکرد پیوند آب، انرژی و غذا را رویکردی مؤثر در پیشبرد مسائل مربوط به آب و پایداری محیط تشخیص دادند. همچنین، در مطالعه‌ی خود، پروژه‌ایی که در بحث حکمرانی به ارتباط این سه منبع توجه دارد را دارای اولویت بالا دانستند (لافورد و همکاران، ۲۰۱۳). در این راستا، ویکاکسونو و کانگ در سال ۲۰۱۹ پژوهشی را با موضوع شبیه‌سازی پیوند آب، غذا و انرژی در دو کشور کره جنوبی و اندونزی ثبت کردند. ارزیابی نتایج مطالعه در دو کشور نشان داد که مدل‌های شبیه‌ساز می‌توانند امنیت منابع آب، غذا و انرژی را در شرایط آینده با قابلیت اطمینان بالایی بررسی کنند و مدیران می‌توانند از این ابزارها در تصمیم‌گیری‌های خود بهره‌مند

[۱] (Chen, et al., ۲۰۲۰)
[۲] Battery Energy Storage System
[۳] (Global Warming of ۱,۵°C, ۲۰۱۸)

شوند(ویکاسونو و کانگ، ۲۰۱۹). نوروزی در سال ۲۰۲۲، به بررسی مدل مفهومی ارتباط متقابل غذا، آب و انرژی با استفاده از یک سیستم پویا و تحلیل عوامل مؤثر بر این رابطه، در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص بهره‌وری اقتصادی آب، انرژی و غذا برای ایران در سال ۱۳۸۹ به کمترین میزان خود رسیده و پس از آن با اتخاذ سیاست‌های جدید افزایش یافته است (نوروزی، ۲۰۲۲). نادری و همکاران در سال ۱۳۹۹ ، به بررسی کمی و کیفی و شبیه‌سازی دینامیک سیستم منابع آب در دشت قزوین، ایران با در نظر گرفتن شدت انرژی بخش‌های تامین آب و مصرف آب به هم پیوسته (مانند شهری، صنعتی و کشاورزی) پرداختند. نتایج نشان داد که ادامه روند موجود، موجب کاهش سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود که در نتیجه مصرف انرژی تامین آب حدود ۳۲ درصد برای حفظ کشاورزی آبی افزایش خواهد یافت (نادری و همکاران، ۱۳۹۹). حسن‌زاده و همکاران در سال ۱۴۰۰ ، به بررسی همبست آب، انرژی و غذا و انتشارات CO_2، برای مزرعه‌ای در شمال غرب ایران برای ارائه پشتیبانی داده برای تصمیم گیرندگانی که استراتژی های ملی را در پاسخ به تغییرات آب و هوایی تدوین می‌کنند، تجزیه و تحلیل کردند. نتایج بیانگر این بود که در وضعیت بهینه شاخص WEF ، مصرف آب و انرژی، تولید غذا و انتشار CO_2 به ترتیب ۳۳/۵، ۱۶، ۵۸/۹ و ۱۴/۴ درصد کاهش خواهد یافت (حسن‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰). صمدی و همکاران در سال ۲۰۲۲ ، مدلی پویا برای مدیریت یکپارچه منابع آب بر اساس حاکمیت آب و پیوند آب-غذا-انرژی از طریق پویایی سیستم و رویکردهای تحلیل شبکه اجتماعی ارائه داده‌اند. (صمدی و همکاران، ۲۰۲۲). کیهانپور و همکاران در سال ۲۰۲۱ ، به بررسی شبیه‌سازی مدیریت پایدار منابع آب برای ارزیابی تأثیر توسعه اجتماعی-اقتصادی بر امنیت منابع آب، غذا و انرژی در استان خوزستان در ایران پرداختند. در این مطالعه افزایش ۱۶٪ راندمان آبیاری، ۱۰٪ بهبود الگوی کشت، کاهش ۶٪ تلفات محصولات کشاورزی، ۵٪ کاهش تقاضای غذایی ناشی از تلفات غذایی و افزایش سالانه ۵٪ عملکرد کشاورزی به عنوان مدیریت پایدار منابع آب بیان شده است (کیهان‌پور و همکاران، ۲۰۲۱). کرمیان و همکاران در سال ۲۰۲۲، به کارگیری شاخص پیوند آب-انرژی-غذا را به عنوان یک دیدگاه مدیریتی جدید را بررسی کردند. در این مطالعه بیان شده است که از طریق درک صحیح فرآیندهای آشکار و پنهان آب، انرژی و غذا، می‌توان راه‌حل‌های اجرایی برای بهینه‌سازی تولید، کاهش آلودگی‌های محیطی و در نتیجه تولید مواد غذایی پاک‌تر ارائه شود (کرمیان و همکاران، ۲۰۲۱). میرزایی و همکاران در سال (۲۰۱۹)، به بررسی توزیع استانی شاخص آب-انرژی-غذا در ایران پرداختند.نتایج توزیع استانی شاخص آب-انرژی-غذا در این مقاله نشان دادکه هرچه بهروری (محصول نسبت به مصرف انرژی، آب و زمین) بیشتر باشد شاخص عدد بالاتری را نشان می‌دهد. در این پژوهش با توجه به نتایج شاخص‌های به دست آمده به اهمیت بررسی پیوند آب-غذا-انرژی به منظور تعادل میان منابع تاکید شده است.

در نهایت بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد هم امنیت و هم پیوند آب، غذا، انرژی و تغییرات اقلیمی حوزه‌های نوظهور نگرانی و تحقیق هستند. موضوع انرژی و مسائل زیست محیطی در بحران تغییر اقلیم؛ توسط محققین بسیاری در سرتاسر دنیا مورد توجه قرار گرفته است، اما تازگی این پژوهش در مقایسه با ادبیات منتشر شده مرتبط، در استفاده از رویکرد پویایی شناسی سیستم و در نظر گرفتن پیوند آب-غذا-انرژی و تغییر اقلیم به طور همزمان است از سوی دیگر در مطالعات قبلی بررسی‌های صورت گرفته به صورت منطقه‌ای است و مدل‌سازی تامین انرژی الکتریکی با ساختار کلان بررسی نشده است. بر این مبنا پژوهش حاضر ضمن مدلسازی و شبیه‌سازی پویایی‌های سیستم تامین منابع انرژی الکتریکی کشور، امنیت منابع انرژی الکتریکی را با توجه به روند تغییر اقلیم و تاثیر و ارتباط آن در پیوند آب-غذا-انرژی و حفظ امنیت هرسه منبع در ایران در افق ۳۰ ساله مورد بررسی قرار داده و به تحلیل سیاست‌های تامین منابع انرژی الکتریکی مبتنی بر رویکرد مذکور پرداخته است.

۴. روش شناسی تحقیق

در تحقیق حاضر، بنابر ماهیت موضوع. از دو روش توصیفی و تحلیلی استفاده شده است. در بخش نخست که دیدگاه‌های نظری و ادبیات موضوع مطالعه گردید از روش توصیفی به مطالعه و توصیف واقعیت‌ها، ویژگی‌های وضع موجود، ابهامات و شکاف‌های موجود در رابطه با موضوع، پرداخته شده است. در مرحله بعد تلاش گردیده با فراهم کردن شناخت بیشتر و کسب بینش عمیق‌تر از تغییرات اقلیمی و تاثیرات آن بر تامین انرژی الکتریکی با تحلیل نظام‌مند، ارتباط بین آن‌ها مشخص شود. برای دستیابی به روابط علی و شناخت روابط بین متغیرها از روش تحلیلی با رویکرد پویایی شناسی سیستم‌ها استفاده شده است. حل مسئله توسط متدلوژی پویایی شناسی سیستم شامل پنج مرحله است: ۱.شناسایی و تعریف مسئله، ۲.ساخت نمودارهای علی – معلولی، ۳.ساخت مدل ریاضی (نمودارحالت-جریان)، ۴.شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل، ۵.تعریف سیاست‌های مختلف، ارزیابی و انتخاب راه حل مناسب (استرمن، ۲۰۰۰). پژوهش حاضر به لحاظ جهت‌گیری و هدف از اجرا جز تحقیقات توسعه‌ای-کاربردی است. ارتباط تغییرات اقلیمی و تاثیرات آن بر تامین انرژی الکتریکی، با توجه به رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی بر اساس مراحل متدلوژی پویایی شناسی سیستم با کشف ارتباطات علی و معلولی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مدل‌سازی شده است. در نهایت با اجرای مدل توسط نرم افزار رویدادها و پیامدهای آن‌ها تشریح شده‌اند؛ سپس، با پیش بینی روند آتی با توجه به روند گذشته، راهکارهایی برای رویایی با تغییرات اقلیمی در تامین امنیت انرژی الکتریکی به طوری که همزمان امنیت آب و امنیت غذا نیز مورد تهدید قرار نگیرد، ارائه شده است. داده‌های پژوهش بر اساس مستندات سازمانی وزارت نیرو، وزارت جهاد کشاورزی، مرکز آمار ایران، سازمان

هواشناسی کشور و سازمان مدیریت منابع آب ایران گردآوری شده است. مدل با استفاده از داده‌های زمانی (۱۴۰۰-۱۳۹۰) در نرم افزار ونسیم نسخه Vensim DSS ٦,٤E طراحی و در افق ۳۰ ساله (۱۴۰۰-۱۴۳۰) شبیه‌سازی شده است.

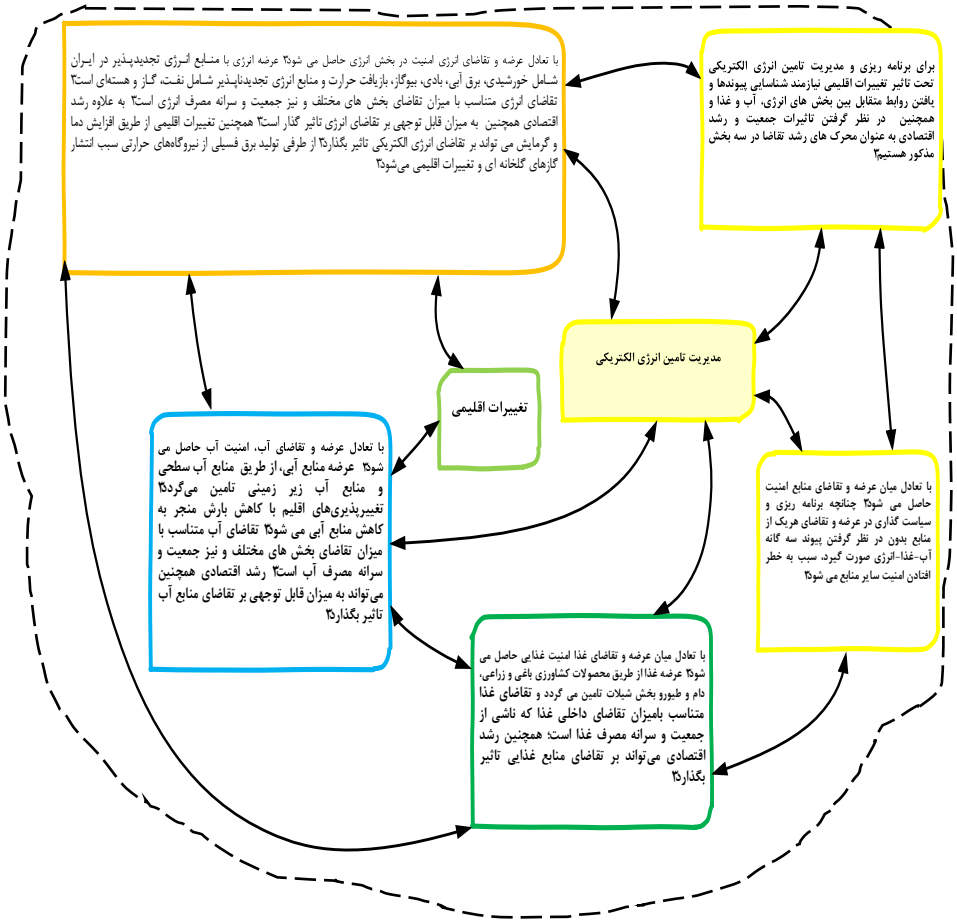
۵.تجزیه و تحلیل یافته‌ها

منطبق با گام‌های روش‌شناسی پویایی سیستم، مدل پویایی سیستم تامین انرژی الکتریکی ایران مبتنی بر پیوند آب-غذا-انرژی و تغییر اقلیم ارائه شده است.

۱.۵. ساختاربندی مسئله:

در این بخش به مفهوم سازی مسئله تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر پیوند آب -غذا- انرژی-تغییر اقلیم پرداخته شده است. بر مبنای مفهوم‌سازی مسئله، منطبق با روش‌شناسی پویایی سیستم، فرضیه‌های دینامیکی طراحی گردید. شکل (۱) فرضیات دینامیکی مسئله پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

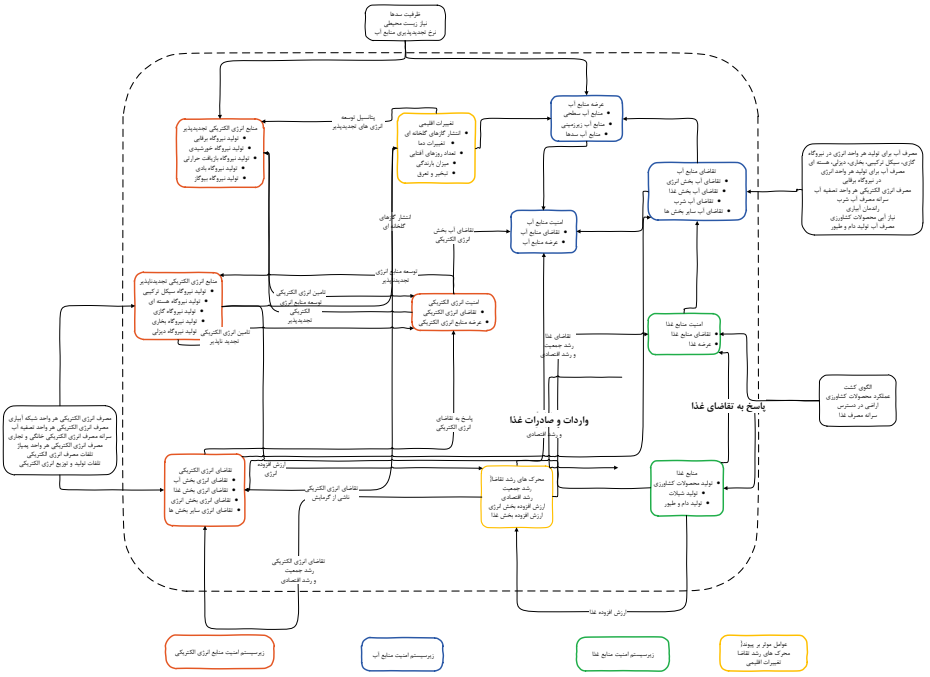
بر اساس مدل مفهومی و فرضیات دینامیکی و بررسی موضوعی مسئله تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی و تغییر اقلیم با مشارکت خبرگان درگیر مسئله (جدول ۱)، سه زیر سیستم اصلی شامل امنیت منابع انرژی الکتریکی؛ امنیت منابع آب؛ امنیت منابع غذا شناسایی و با توجه به اجزای هر یک از زیرسیستم‌ها، روابط و مرز سیستم ساختاردهی گردید. نمودار زیرسیستم‌های مدل، اجزای هر زیرسیستم و چگونگی تعامل زیرسیستم‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۱) فرضیات دینامیکی مسئله تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر پیوند آب- غذا- انرژی- تغییر اقلیم

جدول (۱) مشخصات خبرگان مشارکت‌کننده در پژوهش

ردیف	سطح تحصیلات	دانش تخصصی	سابقه (سال)	حوزه تخصصی
۱	دکتری تخصصی	مهندسی عمران	۲۰<	مهندسی و مدیریت منابع آب
۲	کارشناسی ارشد	مهندسی صنایع	۲۰<	توسعه پایدار (تحلیل سیستم)
۳	دکتری تخصصی	مدیریت سیستم ها	۲۵<	تحلیل سیستم
۴	دکتری تخصصی	مدیریت صنعتی	۱۵<	تحقیق در عملیات
۵	دکتری تخصصی	تحقیق در عملیات	۱۵<	مدلسازی سیستم
۶	دکتری تخصصی	مهندسی آب	۳۰<	مهندسی منابع آب
۷	کارشناسی ارشد	مهندسی کشاورزی	< ۱۵	مهندسی کشاورزی
۸	دکتری تخصصی	محیط زیست	۱۰<	برنامه ریزی توسعه و آمایش سرزمین
۹	دکتری تخصصی	مدیریت صنعتی	۱۵<	مدیریت انرژی



شکل (۲). زیرسیستم‌های مدل پویایی تامین انرژی الکتریکی ایران مبتنی بر پیوند آب-غذا-انرژی-تغییر اقلیم

۲.۵. نمودار علّی و معلولی

برای تعیین روابط علّت و معلولی مسئله از ادبیات و پیشینه پژوهش و همچنین نظر خبرگان موضوع و تصمیم‌سازان درگیر مسئله استفاده شده است. نمودار علت و معلولی به شناسایی پویایی‌های سیستم تامین انرژی الکتریکی ایران مبتنی بر همبست آب- غذا-انرژی-تغییر اقلیم پرداخته است و چگونگی روابط بازخوردی سیستم را نشان می‌دهد (شکل). مطابق با فرضیه‌های پویای تحقیق، با تعادل عرضه و تقاضای انرژی امنیت در بخش انرژی حاصل می‌شود. عرضه انرژی با منـابع انـرژی تجدیدپـذیر در

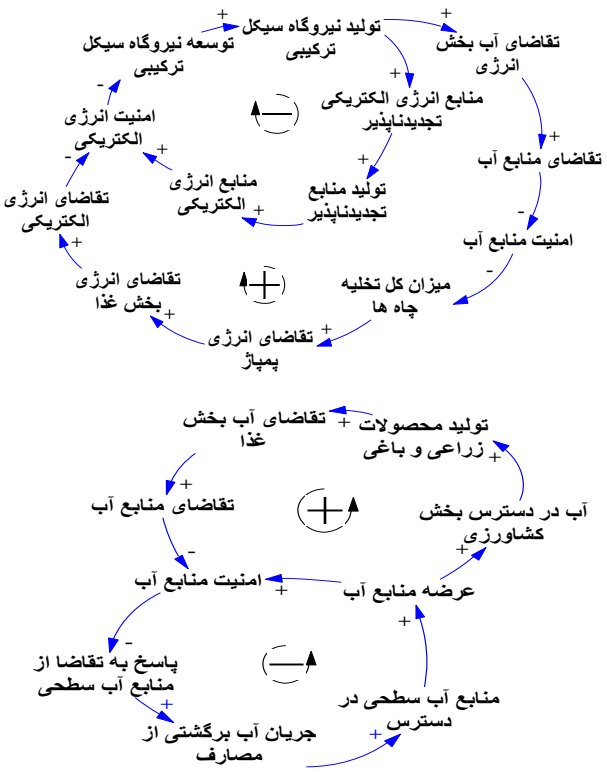
ایـران شـامل خورشیدی، برق آبی، بادی، بیوگاز، بازیافت حرارت و منابع انرژی تجدیدناپـذیر شـامل نفـت، گـاز و هسته‌ای است. تقاضای انرژی متناسب با میزان تقاضای بخش‌های مختلف و نیز جمعیت و سرانه مصرف انرژی است. به علاوه رشد اقتصادی همچنین به میزان قابل توجهی بر تقاضای انرژی تاثیر گذار است. همچنین تغییرات اقلیمی از طریق افزایش دما و گرمایش می‌تواند بر تقاضای انرژی الکتریکی تاثیر بگذارد. از طرفی تولید برق فسیلی از نیروگاه‌های حرارتی سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی می‌شود. با تعادل عرضه و تقاضای آب، امنیت آب حاصل می‌شود. عرضه منابع آبی، از طریق منابع آب سطحی و منابع آب زیر زمینی تامین می‌گردد. تغییرپذیری‌های اقلیم با کاهش بارش منجر به کاهش منابع آبی می شود. تقاضای آب متناسب با میزان تقاضای بخش‌های مختلف و نیز جمعیت و سرانه مصرف آب است. رشد اقتصادی همچنین می‌تواند به میزان قابل توجهی بر تقاضای منابع آب تاثیر بگذارد. با تعادل میان عرضه و تقاضای غذا امنیت غذایی حاصل می‌شود. عرضه غذا از طریق محصولات کشاورزی باغی و زراعی، دام و طیور و بخش شیلات تامین می‌گردد و تقاضای غذا متناسب بامیزان تقاضای داخلی غذا که ناشی از جمعیت و سرانه مصرف غذا است؛ همچنین رشد اقتصادی می‌تواند بر تقاضای منابع غذایی تاثیر بگذارد.

شکل(۳) نمودار علت و معلولی مسئله تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر پیوند آب- غذا- انرژی- تغییر اقلیم

برای برنامه ریزی و مدیریت تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییرات اقلیمی نیاز به شناسایی پیوندها و یافتن روابط متقابل بین بخش‌های انرژی، آب و غذا و همچنین در نظر گرفتن تاثیرات جمعیت و رشد اقتصادی به عنوان محرک‌های رشد تقاضا در سه بخش مذکور می‌باشد. با تعادل میان عرضه و تقاضای منابع امنیت حاصل می شود. چنانچه برنامه‌ریزی و سیاست گذاری در عرضه و تقاضای هریک از منابع بدون در نظر گرفتن پیوند سه گانه آب-غذا-انرژی صورت گیرد، سبب به خطر افتادن امنیت سایر منابع می شود.

۱.۲.۵. معرفی برخی حلقه‌های علّی- معلولی مدل

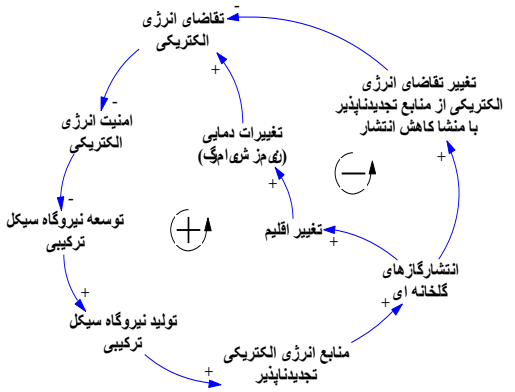
چنانچه امنیت انرژی الکتریکی کاهش یابد با توجه به اینکه امنیت انرژی، ناشی از تعادل عرضه و تقاضا می‌باشد، برای تامین امنیت انرژی الکتریکی توسعه نیروگاه‌های سیکل ترکیبی افزایش پیدا می کند با توسعه، تولید نیروگاه سیکل ترکیبی افزایش می یابد و در نتیجه میزان منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر افزایش یافته و این افزایش سبب افزایش کلی در تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدید ناپذیر و در نتیجه افزایش منابع انرژی الکتریکی کل (عرضه انرژی الکتریکی) می گردد و نهایتا امنیت انرژی الکتریکی به صورت متعادل کننده جبران و تامین می‌شود (حلقه متعادل کننده با علامت منفی). از سوی دیگر با کاهش امنیت انرژی الکتریکی و افزایش توسعه و تولید نیروگاه سیکل ترکیبی، تقاضای آب بخش انرژی افزایش یافته و در نتیجه تقاضای منابع آب افزایش می‌یابد و در نتیجه امنیت منابع آب کاهش پیدا می‌کند، کاهش امنیت آب سبب اضافه برداشت از چاه‌ها در بخش کشاورزی شده و در نتیجه، میزان کل تخلیه چاه‌ها افزایش می یابد و تقاضای انرژی پمپاژ از چاه افزوده می گردد بنابراین تقاضای انرژی در بخش غذا افزایش پیدا می کند و نهایتا تقاضای کل انرژی الکتریکی افزایش یافته با این افزایش، امنیت انرژی الکتریکی به صورت تشدید شونده کاسته می گردد(حلقه تشدیدشونده با علامت مثبت).(شکل (۴)) این حلقه‌های متعادل کننده و تشدید کننده امنیت انرژی الکتریکی، در مورد توسعه بقیه نیروگاه‌های حرارتی(گازی، بخاری، دیزلی، هسته ای) با همین روند تکرار می‌شوند. نکته قابل توجه در این حلقه‌ها چنین است که تامین امنیت انرژی الکتریکی از طریق توسعه نیروگاه‌های حرارتی با منابع تجدیدناپذیر نمی‌تواند راهگشا باشد به این دلیل که از طرف دیگر با برهم زدن تعادل تقاضا و عرضه آب و به خطر افتادن امنیت آب نهایتا امنیت انرژی الکتریکی نیز به صورت تشدیدشونده کاهش پیدا می کند.



شکل(۴) حلقه‌های متعادل کننده و شکل(۵) حلقه‌های متعادل کننده و
و تشدیدکننده امنیت انرژی الکتریکی تشدیدکننده امنیت منابع آب

همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، چنانچه امنیت منابع آب کاهش یابد، برای تامین امنیت آب، پاسخ به تقاضا از منابع آب سطحی افزایش می‌یابد، در نتیجه جریان آب برگشتی از مصارف نیز افزایش یافته و منابع آب سطحی در دسترس افزایش می‌یابد با افزایش منابع، عرضه منابع آب زیاد می‌شود و نهایتا امنیت منابع آب به صورت متعادل کننده تامین و جبران می‌گردد(حلقه متعادل کننده با علامت منفی). از سوی دیگر با کاهش امنیت منابع آب و افزایش پاسخ به تقاضا از منابع آب سطحی و افزایش جریان آب برگشتی از مصارف و نهایتا افزایش منابع آب سطحی و عرضه منابع آب، منابع آب در دسترس کشاورزی افزوده می‌گردد بنابراین تولید محصولات زراعی و باغی زیاد می‌شود با افزایش تولیدات، تقاضای آب در بخش غذا افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه تقاضای کل منابع آب افزوده می‌گردد و مجددا با افزایش تقاضا به صورت تشدید کننده امنیت منابع آبی کاهش پیدا می‌کند (حلقه تشدیدکننده با علامت مثبت).

همان طور که در شکل (۶) مشاهده می شود، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سبب افزایش تغییر اقلیم می‌شود، افزایش تغییرات اقلیمی با افزایش تغییرات دمایی و گرمایش زمین همراه است و در نتیجه تقاضای انرژی الکتریکی زیاد می‌شود، افزایش تقاضا باعث کاهش امنیت انرژی الکتریکی می‌گردد و در نتیجه برای جبران و تامین امنیت انرژی الکتریکی توسعه نیروگاه‌ها (از جمله سیکل ترکیبی) افزایش پیدا می کند، افزایش توسعه سبب افزایش تولید نیروگاه (از جمله سیکل ترکیبی) و در نتیجه افزایش انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر می‌شود و نهایتا انتشار گازهای گلخانه‌ای به صورت فزاینده افزایش پیدا می کند (حلقه تشدیدکننده با علامت مثبت).



شکل (۶) حلقه تشدید کننده و متعادل کننده انتشار گازهای گلخانه‌ای

از سویی دیگر با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای تغییر در تقاضای انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر با منشا کاهش انتشار بیشتر می‌شود به عبارت دیگر با افزایش انتشار، کاهش بیشتری در تقاضای انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر اتفاق می‌افتد و در نتیجه این کاهش سبب کاهش تقاضای کل انرژی الکتریکی شده، در نتیجه با کاهش تقاضا امنیت انرژی الکتریکی بهبود می‌یابد، با بهبود امنیت، میزان توسعه نیروگاه‌های حرارتی (از منابع تجدیدناپذیر) از جمله سیکل ترکیبی کاسته می‌شود و بنابراین تولید انرژی الکتریکی از این نیروگاه‌ها کم می‌گردد و نهایتا منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر کاهش پیدا می‌کند با کاهش انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر انتشار گازهای گلخانه‌ای به صورت تعدیل کننده کاهش پیدا می‌کند(حلقه متعادل کننده با علامت منفی). این حلقه‌های تشدید کننده و تعدیل کننده انتشارگازهای گلخانه‌ای در مورد توسعه همه نیروگاه‌های حرارتی از منابع تجدیدناپذیر(هسته‌ای، بخاری، گازی، دیزلی و سیکل ترکیبی) با همین روند وجود دارند که در اینجا به عنوان نمونه فقط برای نیروگاه سیکل ترکیبی نشان داده شده است.

۳.۵. نمودار حالت-جریان

برای مدلسازی ساختارهای حالت و جریان مدل علاوه بر متغیرهای شناسایی شده در نمودار علّی نیاز به شناسایی متغیرها و پارامترهای جدیدی نیز می‌باشد تا محاسبه روابط ریاضی میان متغیرها تسهیل گردد. برای ساخت مدل جریان، از توابع و روابط ریاضی و مستندات و داده‌های کمی واحدهای درگیر مسئله استفاده شده است. با استفاده از مستندات و داده‌های کمی سال‌های ۱۳۹۰ الی ۱۴۰۰ مدل جریان مسئله ساختاردهی گردید. شکل (۷) نمودار حالت جریان مدل تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر پیوند آب-غذا-انرژی-تغییر اقلیم را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر متغیرهای انباشت مدل در سال پایه و برخی روابط ریاضی اصلی مدل به ترتیب در جداول ۲ و۳ آورده شده است. در ادامه به تشریح زیرسیستم‌ها پرداخته می‌شود.

جدول۲. مقادیر متغیرهای انباشت مدل در سال پایه و واحد اندازه‌گیری آن‌ها (منبع: ترازنامه انرژی و سالنامه آماری ۱۴۰۰)

متغیر حالت	مقدار	واحد	متغیر حالت	مقدار	واحد
منابع انرژی الکتریکی	۲۴۰۳۹۰۳۰۰	مگاوات	منابع آب زیرزمینی	۱۱۰۰۰۰	میلیون متر مکعب
منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر	۱۸۰۴۴۰۰۰	مگاوات	منابع آب سطحی	۲۴۸۵۵۰	میلیون مترمکعب
منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر	۲۲۷۷۵۴۳۰۰	مگاوات	منابع غذا	۱۲۱/۸۴۷	میلیون تن
منابع آب سد	۵۷۱۷	میلیون مترمکعب	جمعیت	۷۴۹۶۱۷۰۲	جمعیت

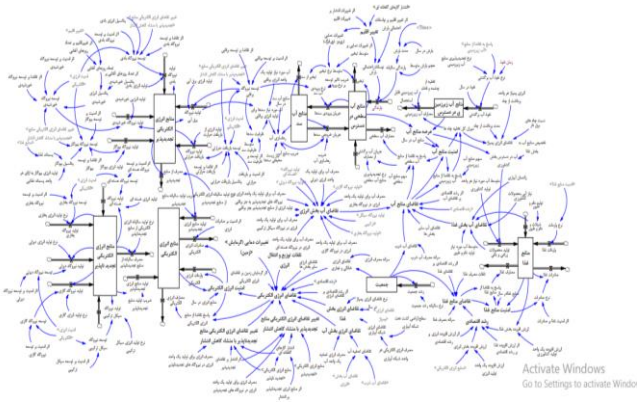
جدول۳. برخی روابط ریاضی متغیرهای مدل پویایی سیستم تامین انرژی الکتریکی

واحد	رابطه ریاضی و منطقی	متغیر
مگاوات	تقاضای انرژی الکتریکی - منابع انرژی الکتریکی	امنیت انرژی الکتریکی
مگاوات	INTEG (تولید منابع انرژی تجدیدناپذیر+ تولید منابع انرژی تجدیدپذیر) (واردات انرژی الکتریکی- صادرات انرژی الکتریکی - مصارف انرژی الکتریکی+	منابع انرژی الکتریکی
مگاوات	INTEG ((تولید نیروگاه + تولید نیروگاه بخاری +تولید نیروگاه دیزلی+ تولید نیروگاه گازی)-مصرف سالیانه از سیکل ترکیبی+تولید نیروگاه هسته ای منابع تجدیدناپذیر)	منابع انرژی الکتریکی تجدید ناپذیر
مگاوات	INTEG ((تولید نیروگاه + تولید نیروگاه بادی +تولید نیروگاه بازیافت حرارتی) تولید نیروگاه خورشیدی)-مصرف از منابع + برق آبی+تولید نیروگاه بیوگاز (تجدیدپذیر	منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر
مگاوات/سال	توسعه نیروگاه بادی+(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی بادی)	تولید نیروگاه بادی
مگاوات/سال	توسعه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی از بازیافت حرارت) نیروگاه بازیافت حرارتی	تولید نیروگاه بازیافت حرارتی
مگاوات/سال	توسعه نیروگاه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی بخاری) بخاری	تولید نیروگاه بخاری

مگاوات/سال	توسعه نیروگاه برق +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی ابرق ابی) ابی	تولید نیروگاه برق ابی
مگاوات/سال	توسعه نیروگاه بیوگاز+(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی بیوگاز)	تولید نیروگاه بیوگاز
مگاوات/سال	توسعه نیروگاه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر×تولید انرژی خورشیدی) خورشیدی	تولید نیروگاه خورشیدی
مگاوات/سال	توسعه نیروگاه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی دیزلی) دیزلی	تولید نیروگاه دیزلی
مگاوات/سال	توسعه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی سیکل ترکیبی) نیروگاه سیکل ترکیبی	تولید نیروگاه سیکل ترکیبی
مگاوات/سال	توسعه نیروگاه گازی+(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی گازی)	تولید نیروگاه گازی
مگاوات/سال	توسعه نیروگاه +(منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر×تولید انرژی هسته ای) هسته ای	تولید نیروگاه هسته ای
مگاوات/سال	(تقاضای انرژی سایر بخش ها+تقاضای انرژی خانگی و تجاری +تقاضای انرژی بخش غذا+تلفات توزیع و انتقال انرژی +تقاضای انرژی بخش آب +تغییر تقاضای انرژی الکتریکی منابع تجدیدپذیر با منشاء کاهش انتشار +تغییر تقاضای انرژی الکتریکی منابع تجدیدناپذیر با منشاء کاهش انتشار) × (۱ +((رشد اقتصادی×اثر رشد اقتصادی بر تقاضای انرژی) +(اثر گرمایش زمین بر تقاضای انرژی الکتریکی×"تغییرات دمایی (گرمایش زمین)")))	تقاضای انرژی الکتریکی
مگاوات/سال	جمعیت×سرانه مصرف انرژی	تقاضای انرژی خانگی و تجاری
مگاوات/سال	IF THEN ELSE(تقاضای انرژی الکتریکی>=۰, امنیت انرژی الکتریکی , (امنیت انرژی الکتریکی+ تقاضای انرژی الکتریکی	پاسخ تقاضا از منابع انرژی الکتریکی
میلیون تن	(منابع انرژی الکتریکی تجدید ناپذیر × اثر منابع انرژی تجدیدناپذیر بر انتشار)	انتشار گازهای گلخانه ای
میلیون مترمکعب/سال	مصرف آب برای تولید یک × تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر بجز برقابی)) تولید نیروگاه هسته)+(واحد انرژی در نیروگاه های تجدیدپذیر به جز برقابی تولید)+(ای×مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه هسته ای نیروگاه بخاری×مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه بخاری تولید نیروگاه دیزلی×مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی)+(مصرف آب برای تولید یک واحد × تولید نیروگاه سیکل ترکیبی)+(دیزلی مصرف آب برای × تولید نیروگاه گازی)+(انرژی در نیروگاه سیکل ترکیبی ((تولید یک واحد انرژی در نیروگاه گازی	تقاضای آب بخش انرژی
مگاوات/سال	MIN(امنیت انرژی الکتریکی×اثر ABS(MIN(,پتانسیل بازیافت حرارتی) تغییر تقاضای انرژی الکتریکی منابع)+(((امنیت بر بازیافت حرارتی ۰ ((تجدیدپذیر با منشاء کاهش انتشار×اثر تقاضا بر توسعه بازیافت حرارتی	توسعه بازیافت حرارتی
مگاوات/سال	MIN(امنیت انرژی الکتریکی×اثر ABS(MIN(,پتانسیل انرژی بادی) تغییر تقاضای)+انرژی الکتریکی منابع (((امنیت بر توسعه نیروگاه بادی، ۰) ((تجدیدپذیر با منشاء کاهش انتشار×اثر تقاضا بر توسعه نیروگاه بادی	توسعه نیروگاه بادی
مگاوات/سال	MIN(امنیت انرژی الکتریکی×اثر ABS(MIN(,پتانسیل انرژی خورشیدی) تغییر تقاضای)+انرژی الکتریکی (((امنیت بر توسعه نیروگاه خورشیدی، ۰)	توسعه نیروگاه خورشیدی

	منابع تجدیدپذیر با منشاء کاهش انتشار×اثر تقاضا بر توسعه نیروگاه ((خورشیدی	
مگاوات/سال	امنیت انرژی الکتریکی×اثر)ABS(MIN ,پتانسیل انرژی بیوگاز)MIN(تغییر تقاضای)+انرژی الکتریکی منابع (((امنیت بر توسعه نیروگاه بیوگاز، ۰) ((تجدیدپذیر با منشاء کاهش انتشار×اثر تقاضا بر توسعه نیروگاه بیوگاز	توسعه نیروگاه بیوگاز
مگاوات/سال	اثر × تغییر تقاضای انرژی الکتریکی منابع تجدیدپذیر با منشاء کاهش انتشار) اثر امنیت× امنیت انرژی الکتریکی)ABS(MIN)+(تقاضا بر توسعه برقابی (((۰,بر توسعه برقابی	توسعه نیروگاه برقابی
مگاوات/سال	, امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بخاری)ABS(MIN ۰))	توسعه نیروگاه بخاری
مگاوات/سال	((۰ ,امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر توسعه نیروگاه دیزلی)ABS(MIN	توسعه نیروگاه دیزلی
مگاوات/سال	, اثر امنیت بر توسعه سیکل ترکیبی×امنیت انرژی الکتریکی)ABS(MIN ۰))	توسعه نیروگاه سیکل ترکیبی
مگاوات/سال	, امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر توسعه نیروگاه هسته ای)ABS(MIN ۰))	توسعه نیروگاه هسته ای
مگاوات/سال	, امنیت انرژی الکتریکی×اثر امنیت بر توسعه نیروگاه گازی)ABS(MIN ۰))	توسعه نیروگاه گازی
میلیون مترمکعب/سال	تقاضای منابع آب - عرضه منابع آب	امنیت منابع آب
میلیون مترمکعب	منابع آب زیرزمینی در دسترس+منابع آب سطحی در دسترس	عرضه منابع آب
میلیون مترمکعب/سال	تقاضای آب بخش انرژی+تقاضای آب بخش غذا+تقاضای آب سایر بخش ها) (((۱+(رشد اقتصادی×اثر رشد اقتصادی بر تقاضای آب × تقاضای آب شرب)+	تقاضای منابع آب
مگاوات/سال	تقاضای تصفیه آب×مصرف انرژی تصفیه یک واحد آب	تقاضای انرژی بخش آب
میلیون مترمکعب/سال	آب زیرزمینی ,(میزان کل تخلیه چاه ها+تخلیه از چشمه و قنات))MIN (قابل استحصال	مصارف آب زیرزمینی
میلیون مترمکعب/سال	(۰/۱۵× ((امنیت منابع آب)ABS+پاسخ به تقاضا از منابع آب زیرزمینی))	میزان کل تخلیه چاه ها
میلیون مترمکعب	(نفوذ آب برگشتی-مصارف آب زیرزمینی) INTEG	منابع آب زیرزمینی در دسترس
میلیون مترمکعب/سال	بارندگی سالیانه×نوسانات احتمالی بارش	بارندگی
میلیون مترمکعب/سال	رهاسازی آب× منابع آب سد	جریان خروجی سدها
میلیون مترمکعب/سال	منابع آب سد >=آب مورد نیاز سدها برای تولید انرژی)IF THEN ELSE آب مورد نیاز سدها برای تولید انرژی)) , نیاز زیست محیطی سدها+ برقابی منابع آب سد /(نیاز زیست محیطی سدها+ برقابی	رهاسازی آب
میلیون مترمکعب/سال	منابع آب سطحی در دسترس×نرخ ورودی آب سد	جریان ورودی سدها

میلیون مترمکعب/سال	متوسط نرخ تبخیر×منابع آب سطحی در دسترس	تبخیر
میلیون مترمکعب	INTEG (((بارندگی+جریان آب برگشتی از مصارف+جریان خروجی سدها) - (تبخیر-جریان ورودی سدها-مصارف آب سطحی	منابع آب سطحی در دسترس
میلیون مترمکعب	INTEG ((جریان ورودی سدها-تبخیر از سد -جریان خروجی سدها)	منابع آب سد
۱/سال	(۰/۲× (اثر تغییرات دمایی بر × تغییرات دمایی (گرمایش زمین)"))"+۱) متوسط تبخیر	متوسط نرخ تبخیر
میلیون مترمکعب/سال	IF THEN ELSE ظرفیت سدها>=(آب مورد نیاز تولید یک واحد انرژی برقابی×تولید نیروگاه برق آبی), آب مورد نیاز تولید یک واحد انرژی برقابی×تولید نیروگاه برق آبی, ظرفیت سدها)	آب مورد نیاز سدها برای تولید انرژی برقابی
میلیون تن/سال	تقاضای منابع غذا-منابع غذا	امنیت منابع غذا
میلیون تن	INTEG (((واردات + تولید محصولات زراعی و باغی+شیلات و دام و طیور) ((غذا-صادرات غذا-مصارف غذا	منابع غذا
میلیون تن/سال	(جمعیت×سرانه مصرف غذا×تلفات مصرف غذا)+(اثر رشد ×رشد اقتصادی) اقتصادی بر تقاضای غذا	تقاضای منابع غذا
مگاوات/سال	تقاضای انرژی شبکه +(تقاضای انرژی پمپاژ×نرخ تقاضای انرژی پمپاژ در سال) آبیاری	تقاضای انرژی بخش غذا
مگاوات/سال	سطح اراضی کشت تحت شبکه آبیاری×مصرف انرژی الکتریکی هر واحد شبکه آبیاری	تقاضای انرژی شبکه آبیاری
مگاوات	INTEG (انرژی پمپاژ × نسبت چاه های برق دار×میزان کل تخلیه چاه ها) هر واحد برداشت از چاه×مدت برداشت از چاه	تقاضای انرژی پمپاژ
روز	MIN(۳۶۵ ،(تغییر اقلیم×اثر تغییراقلیم بر تعداد روزهای آفتابی	تعداد روزهای آفتابی
بدون واحد	تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای×اثر تغییرات انتشار بر تغییرات اقلیم	تغییر اقلیم
بدون واحد	تغییر اقلیم	تغییرات دمایی (گرمایش زمین)
نفر	INTEG (رشد جمعیت)	جمعیت
نفر/سال	جمعیت×نرخ سالیانه رشد جمعیت	رشد جمعیت
درصد	ارزش)+(اثر ارزش افزوده انرژی بر رشد اقتصادی×ارزش افزوده بخش انرژی) (افزوده بخش غذا×اثر ارزش افزوده غذا بر رشد اقتصادی	رشد اقتصادی

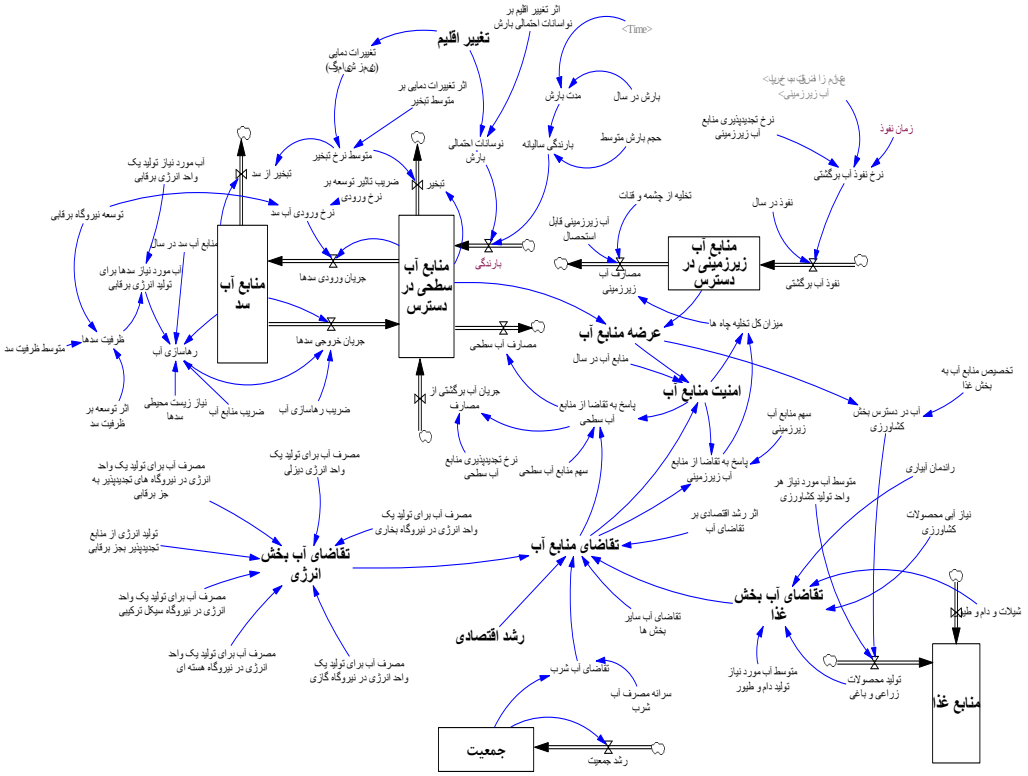


شکل(۷) نمودار حالت-جریان مسئله تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر پیوند آب-غذا-انرژی-تغییر اقلیم

۱.۳.۵. زیر سیستم امنیت آب

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، منابع آب سطحی در دسترس، متغیر انباشت در نظر گرفته شد و متغیرهای نرخ بارندگی، جریان آب برگشتی از مصارف و جریان خروجی سدها منجر به افزایش نرخ سالیانه منابع آب سطحی در دسترس می‌گردند و از سوی دیگر تبخیر، جریان ورودی سدها و مصارف آب سطحی به عنوان نرخ های کاهشی منابع آب سطحی در دسترس در نظر گرفته شده است. منابع آب سطحی از طریق جریان ورودی و خروجی سدها با متغیر انباشت منابع آب سد ارتباط دارد. منابع آب سد با نرخ جریان ورودی سدها که از منابع آب سطحی می‌آیند افزایش و با نرخ تبخیر از سد و همچنین نرخ جریان خروجی سدها که به منابع آب سطحی وارد می‌شوند، کاهش یابد. متغیر انباشت دیگر منابع آب زیرزمینی در دسترس است که با نرخ نفوذ آب برگشتی افزایش و با نرخ مصارف آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. در این مطالعه زیرسیستم امنیت منابع آب به بخش‌های منابع آب، تقاضای آب و امنیت آب تقسیم شده است. منابع آب همان طور که پیش‌تر گفته شد شامل منابع آب سطحی در دسترس و منابع آب زیر زمینی در دسترس می‌شود. رشد جمعیت از طریق تقاضای آب شرب بر تقاضای آب اثرگذار است. رشد اقتصادی همچنین می‌تواند به میزان قابل توجهی بر تقاضای منابع آب تاثیر بگذارد. تقاضای کل حاصل جمع تقاضای آب برای بخش انرژی (جمع تقاضای آب هریک از نیروگاه‌ها برای تولید برق)، تقاضای آب بخش غذا، تقاضای آب شرب و تقاضای آب سایر بخش‌ها است. میزان تقاضای آب شرب با میزان جمعیت و سرانه آب شرب مصرفی تعریف می‌شود. از سوی دیگر تقاضای آب دربخش غذا نیز تابعی از نیاز آبی محصولات کشاورزی و میزان تولیدات کشاورزی و راندمان آبیاری قابل محاسبه است. عرضه منابع آب از طریق دو انباشت

منابع آب سطحی در دسترس و منابع آب زیرزمینی در دسترس تامین می‌گردد و امنیت منابع آب اختلاف بین عرضه و تقاضای آب در نظر گرفته شده است.

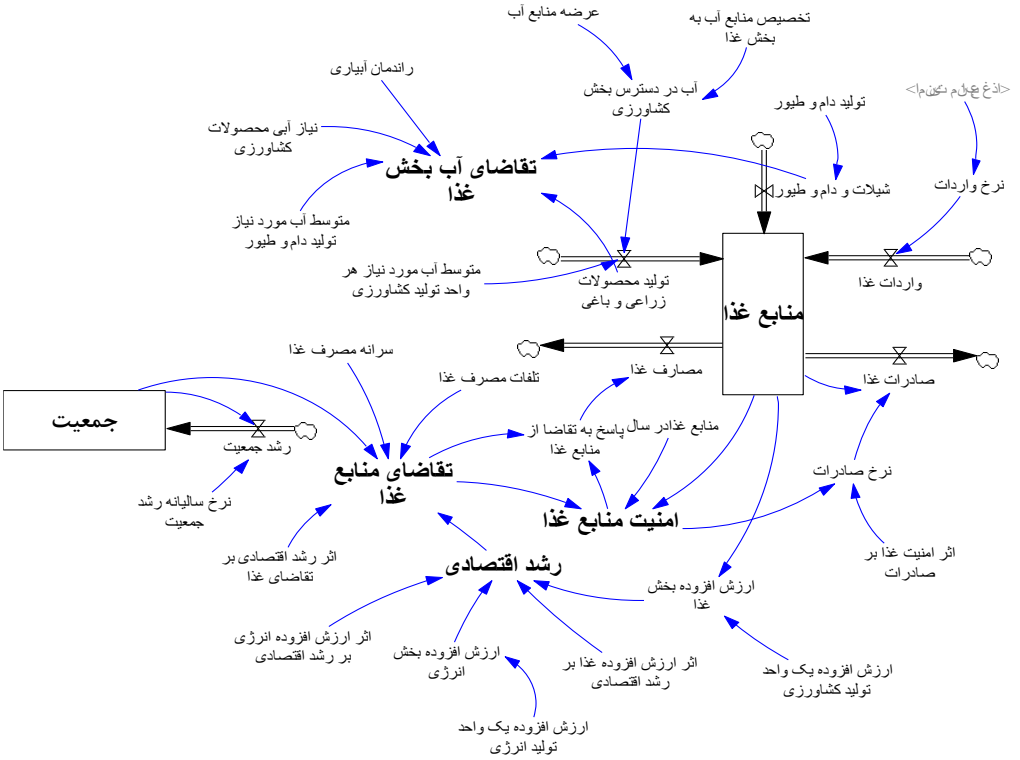


شکل(۸) نمودار حالت – جریان زیرسیستم امنیت منابع آب

۲.۳.۵. زیر سیستم امنیت منابع غذا

همان طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، عرضه غذا در ایران از منابع غذا بخش کشاورزی، شیلات و دام و طیور تامین می‌گردد. هر یک از این زیر بخش‌ها با بخش آب و بخش انرژی ارتباط دارد. تقاضای غذا متناسب بامیزان تقاضای داخلی غذا که ناشی از جمعیت و سرانه مصرف غذا است؛ همچنین رشد اقتصادی می‌تواند بر تقاضای منابع غذایی تاثیر بگذارد. مقدار ارزش افزوده در بخش انرژی و در بخش حاصل از تامین غذا و منابع انرژی نقش مهمی در تولید ناخالص داخلی و رشد اقتصادی دارد. امنیت منابع غذایی، اختلاف عرضه و تقاضای غذا در نظر گرفته شده است. همچنین، ارتباط با دنیای خارج نیز از طریق صادرات و یا واردات محصولات می‌تواند در امنیت غذایی موثر واقع شود. به این صورت که ارتقاء امنیت غذایی می‌تواند منجر به افزایش صادرات شود و از

طرفی به خطر افتادن امنیت غذایی می‌تواند در افزایش نرخ واردات اثر گذار باشد. از طرفی تقاضای کل آب در بخش غذا از مجموع تقاضای آب هر سه بخش کشاورزی، دام و طیور و شیلات حاصل می‌شود. عمده‌ترین تقاضای آب مربوط به بخش کشاورزی است که ناشی از میزان تولید محصولات زراعی و باغی و نیاز آبی محصولات در بخش کشاورزی است.



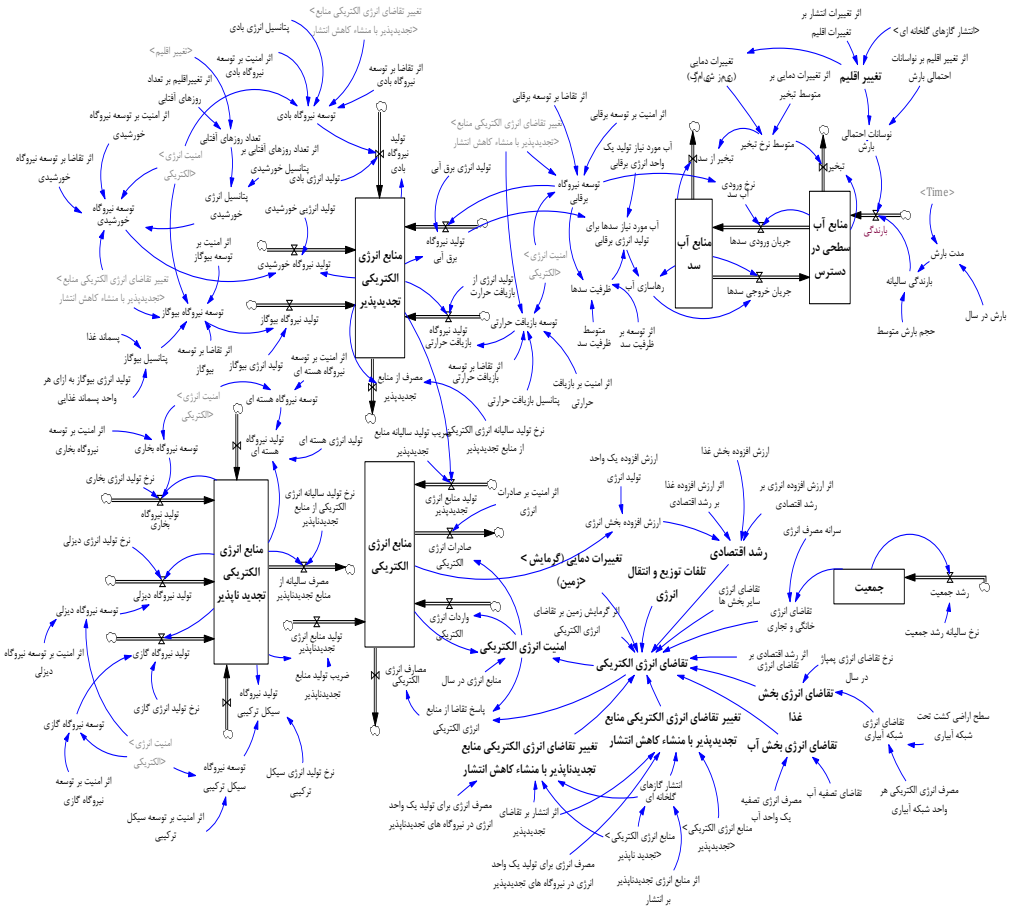
شکل (۹) نمودار حالت – جریان زیرسیستم امنیت منابع غذا

۳.۳.۵. زیرسیستم امنیت منابع انرژی

همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر، به عنوان متغیر انباشت در نظر گرفته شده است و متغیرهای نرخ تولید نیروگاه خورشیدی، تولید نیروگاه بادی، تولید نیروگاه برق‌آبی، تولید نیروگاه بیوگاز و تولید نیروگاه بازیافت حرارتی منجر به افزایش نرخ سالیانه منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر می‌گردند و از سوی دیگر مصرف از منابع تجدیدپذیر به عنوان نرخ کاهشی منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر از طریق متغیر نرخ تولید منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر با متغیر انباشت منابع انرژی الکتریکی

ارتباط دارد. منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر با نرخ تولید نیروگاه بخاری، تولید نیروگاه گازی، تولید نیروگاه دیزلی، تولید نیروگاه سیکل ترکیبی و تولید نیروگاه هسته‌ای افزایش و با نرخ مصرف از منابع تجدیدناپذیر کاهش می یابد. این متغیر انباشت از طریق نرخ تولید منابع انرژی تجدیدناپذیر با متغیر انباشت دیگر منابع انرژی الکتریکی ارتباط می‌یابد. متغیرهای نرخ تولید منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و نیز واردات انرژی الکتریکی منجر به افزایش منابع انرژی الکتریکی می‌گردند و از طرفی نرخ‌های صادرات انرژی الکتریکی و مصارف انرژی الکتریکی به عنوان نرخ کاهشی منابع انرژی الکتریکی در نظرگرفته شده است. در این مطالعه زیرسیستم امنیت منابع انرژی به بخش‌های منابع انرژی الکتریکی، تقاضای انرژی الکتریکی و امنیت انرژی الکتریکی تقسیم شده است. منابع انرژی الکتریکی از دو منبع اصلی منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تامین می‌شود. منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در ایران شامل تولید نیروگاه‌ها از منابع خورشیدی، برق آبی، بادی، بیوگاز، بازیافت حرارت و منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر شامل تولید نیروگاه‌های حرارتی(گازی، بخاری، دیزلی، سیکل ترکیبی) از منابع نفت، گاز و هسته‌ای است. تقاضای انرژی الکتریکی حاصل جمع تقاضای انرژی الکتریکی منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر با منشاء کاهش انتشار، تقاضای انرژی بخش غذا، تقاضای انرژی بخش آب جهت تصفیه، تلفات توزیع و انتقال انرژی و تقاضای انرژی سایر بخش‌ها است. میزان تقاضای انرژی خانگی و تجاری با میزان جمعیت و سرانه مصرف انرژی تعریف می شود. از سوی دیگر تقاضای انرژی الکتریکی در بخش غذا متناسب با تقاضای انرژی پمپاژ و تقاضای انرژی شبکه آبیاری است انرژی پمپاژ وابسته به میزان کل تخلیه چاه‌ها، انرژی پمپاژ هر واحد برداشت از چاه، مدت برداشت از چاه و نسبت چاه‌های برق‌دار است و تقاضای انرژی شبکه آبیاری وابسته به سطح اراضی کشت تحت شبکه آبیاری و مصرف انرژی الکتریکی هر واحد شبکه آبیاری است. همچنین تقاضای انرژی بخش آب جهت تصفیه ناشی از حاصل جمع تقاضای آب شرب و تقاضای آب بخش انرژی(بخش نیروگاهی) است. همچنین تغییرات دمایی و نیز رشد اقتصادی می‌توانند به میزان قابل توجهی بر تقاضای انرژی الکتریکی تاثیر بگذارند. عرضه منابع انرژی الکتریکی از طریق دو انباشت منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تامین می‌گردد و امنیت انرژی الکتریکی اختلاف بین عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی در نظر گرفته شده است.چنانچه امنیت انرژی الکتریکی مورد تهدید قرار گیرد، با توجه به اینکه امنیت انرژی، حاصل تعادل عرضه و تقاضا است، برای تامین امنیت انرژی الکتریکی توسعه در نیروگاه‌ها اتفاق خواهد افتاد. همانطور که در نمودار جریان زیر سیستم امنیت انرژی الکتریکی مشاهده می‌شود، توسعه در نیروگاه‌های حرارتی از منابع تجدیدناپذیر فقط ناشی از اثر امنیت انرژی الکتریکی می‌باشد. افزایش توسعه سبب افزایش تولید نیروگاه های حرارتی از منابع تجدیدناپذیر و در نتیجه افزایش انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر

می‌شود از طرفی تولید برق فسیلی از نیروگاه‌های حرارتی سبب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی می‌شود. نکته قابل توجه چنین است که تامین امنیت انرژی الکتریکی از طریق توسعه نیروگاه‌های حرارتی با منابع تجدیدناپذیر همانطورکه قبلا هم در تشریح حلقه‌های علی بیان شد، نمی‌تواند راهگشا باشد. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سبب افزایش تغییر اقلیم می‌شود، افزایش تغییرات اقلیمی با افزایش تغییرات دمایی و گرمایش زمین همراه است و در نتیجه تقاضای انرژی الکتریکی زیاد می‌شود، افزایش تقاضا نیز مجددا سبب تهدید امنیت انرژی الکتریکی خواهد شد. بنابراین با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای تغییر در تقاضای انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر با منشا کاهش انتشار اتفاق خواهد افتاد به عبارت دیگر با افزایش انتشار گازهای گلخانه-ای ناشی از منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر، در تقاضای انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر کاهش ایجاد می‌شود و به همان نسبت، افزایش تقاضا از منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر رخ می‌دهد. بنابراین دو متغیر تغییر تقاضای انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر با منشا کاهش انتشار در مدل در نظر گرفته شده است. با توجه به آنچه بیان شد در سیستم امنیت انرژی الکتریکی، توسعه نیروگاه‌ها از منابع تجدیدپذیر ناشی از هم اثر امنیت و هم اثر تغییرات تقاضا با منشا کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هم پتانسیل منابع انرژی تجدیدپذیر مدنظر قرار گرفته است. پتانسیل منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی وابسته به تعداد روزهای آفتابی بوده که این متغیر تحت تاثیر تغییر اقلیم قرار دارد. پتانسیل انرژی بیوگاز تابعی از پسماند غذایی و تولید انرژی بیوگاز به ازای هر واحد پسماند غذایی است. پتانسیل بازیافت حرارت و همچنین پتانسیل انرژی بادی به صورت برونزا وارد مدل شده‌اند. شایان یادآوری است که همان طور که در توضیح روابط علی و پیوند امنیت منابع آب و انرژی پیشتر بیان شد، تغییرات اقلیمی بر ارتباط آب برای انرژی تأثیرگذار است و در نمودار حالت جریان زیر سیستم انرژی نیز مشهود است که تغییرات بارندگی و دما ناشی از تغییر اقلیم بر منابع آبی کشور اثر دارد. مقدار برق قابل تولید از نیروگاه های برق به تغییر در جریان آب ورودی به مخازن نیروگاه‌ها بستگی دارد. بنابراین تغییر در بارندگی ناشی از تغییر اقلیم منجر به تغییرات در دسترس بودن آب برای تولید برق خواهد شد.



شکل (۱۰) نمودار حالت – جریان زیرسیستم امنیت منابع انرژی

۴.۵.شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی علاوه بر تأیید آزمون کفایت مرزهای مدل و تطبیق ساختار مدل با دانش توصیفی از سیستم توسط خبرگان بر مبنای معیارهای اعتمادپذیری، قابلیت انتقال پذیری، تاییدپذیری و قابلیت اعتماد، آزمون‌های اعتبار ساختاری و رفتاری شامل آزمون‌های برازندگی،شرایط حدی، تائید پارامتری، حساسیت پارامتری، سازگاری ابعاد، خطای تجمیعی و بازتولید رفتار با توجه به شاخص ریشه میانگین

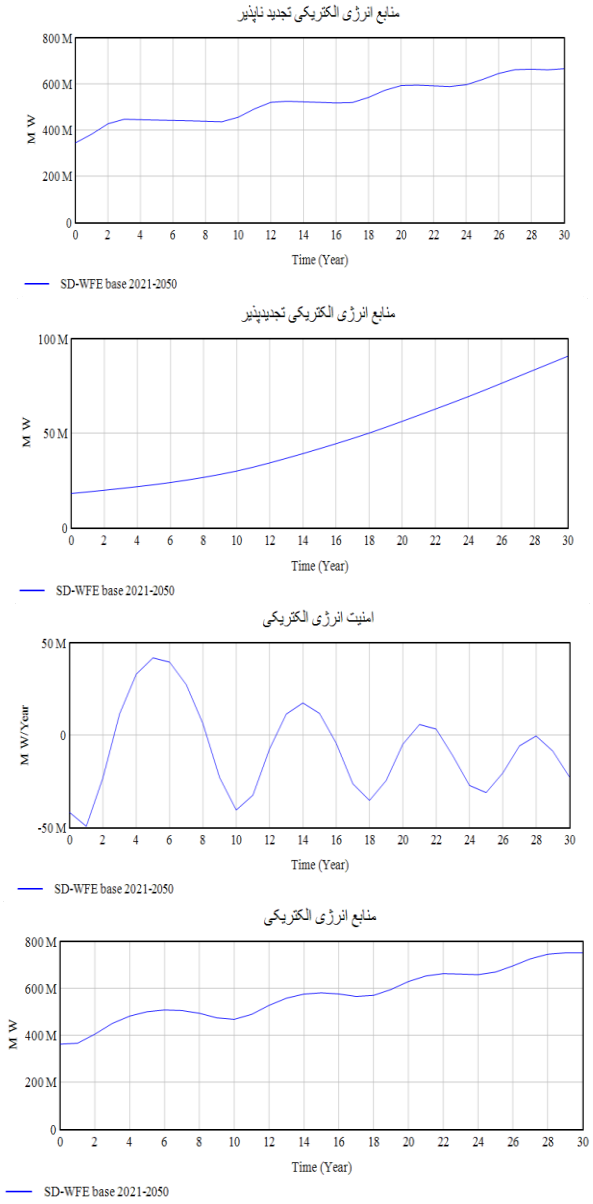
مربع درصد خطا RMSPE[1] انجام گردید. جدول ۴ نتایج آزمون بازتولید رفتار برخی از متغیرهای مدل را نشان می‌دهد.

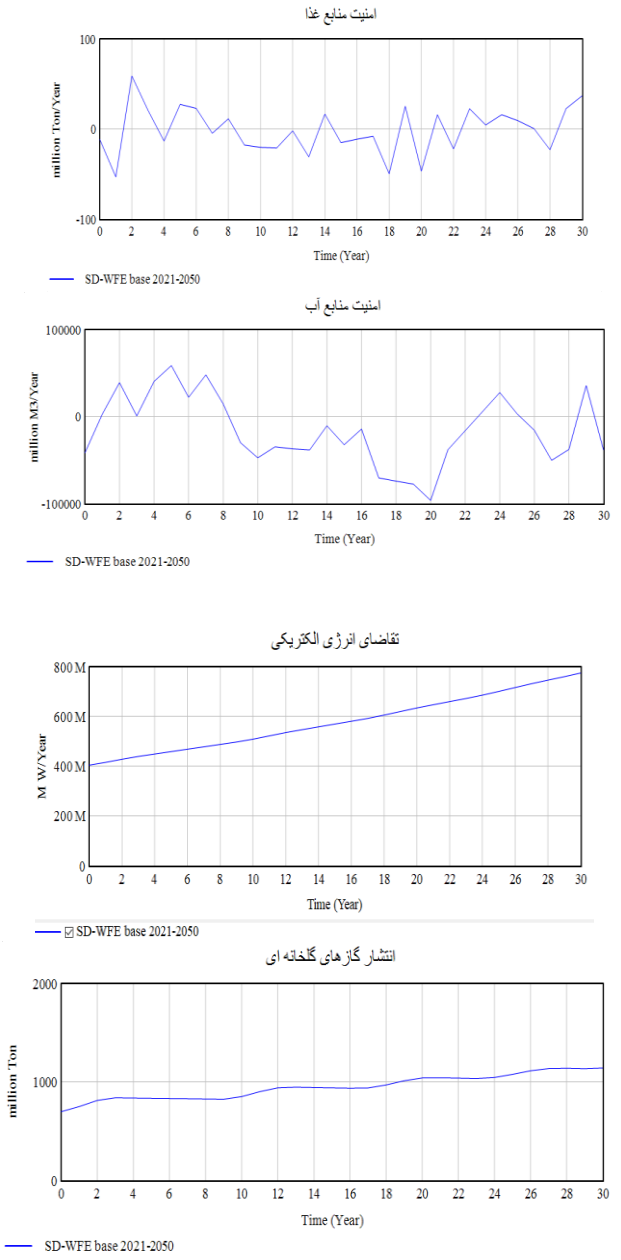
جدول ۴. مقایسه داده‌های واقعی (At) و شبیه‌سازی (St) برخی متغیرهای مدل و محاسبه شاخص RMSPE

متغیر	منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر		منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر		منابع انرژی الکتریکی کل		جمعیت	
مدل	مقدار واقعی	مقدار شبیه سازی شده	مقدار واقعی	مقدار شبیه سازی شده	مقدار واقعی	مقدار شبیه سازی شده	مقدار واقعی	مقدار شبیه سازی شده
۱۳۹۰	۱۲۶۳۶۰۰۰	۱۲۶۳۶۰۰۰	۲۲۷,۷۵۴,۳۰۰	۲۲۷,۷۵۴,۰۰۰	۲۴۰۳۹۰۳۰۰	۲۴۰۳۹۰۰۰۰	۷۴,۹۶۱,۷۰۲	۷۴,۹۶۱,۷۰۰
۱۳۹۱	۱۴۵۱۴۰۰۰	۱۳۴۷۵۹۰۰	۲۴۱,۵۹۹,۳۰۰	۲۵۲,۶۵۲,۰۰۰	۲۵۶۱۱۳۳۰۰	۲۴۴۰۹۴۰۰۰	۷۶,۰۷۵,۰۰۰	۷۵,۴۷۱,۴۰۰
۱۳۹۲	۱۹۲۸۳۰۰۰	۱۸۵۲۳۳۰۰	۴۷,۴۵۴,۹۰۰ ۲	۲۶۸,۹۲۴,۰۰۰	۲۶۶۷۲۳۹۰۰	۲۵۴۲۷۴۰۰۰	۷۷,۰۱۵,۰۰۰	۷۵,۹۸۴,۶۰۰
۱۳۹۳	۱۸۶۱۰۰۰۰	۱۶۵۷۰۷۰۰	۲۶۰,۳۴۲,۱۰۰	۲۸۸,۹۸۹,۰۰۰	۲۷۸۹۵۲۱۰۰	۲۶۴۶۵۵۰۰۰	۷۷,۹۷۰,۰۰۰	۷۶,۵۰۱,۳۰۰
۱۳۹۴	۱۷۲۹۶۰۰۰	۱۶۶۵۴۵۰۰	۲۶۶,۳۰۷,۰۰۰	۲۸۲,۶۹۱,۰۰۰	۲۸۱۳۶۰۳۰۰۰	۲۷۴۹۳۹۰۰۰	۷۸,۹۴۱,۰۰۰	۷۷,۰۲۱,۶۰۰
۱۳۹۵	۲۳۴۲۰۰۰۰	۱۹۸۳۱۳۰۰	۲۷۲,۳۹۵,۸۰	۲۹۳,۰۳۲,۰۰۰	۲۹۵۸۱۵۸۰۰	۲۸۵۲۲۵۰۰۰	۷۹,۹۲۶,۳۰۰	۷۷,۵۴۵,۳۰۰
۱۳۹۶	۲۲۹۸۰۰۰۰	۲۱۱۳۳۱۰۰	۲۹۲,۳۶۸,۲۰۰	۳۰۰,۶۷۹,۰۰۰	۳۱۵۳۲۸۲۰۰	۳۰۵۵۱۳۰۰۰	۸۱,۰۷۰,۰۰۰	۷۸,۰۷۲,۶۰۰
۱۳۹۷	۲۳۹۲۵۰۰۰	۲۱۵۷۹۵۰۰	۲۹۲,۵۰۲,۰۰۰	۳۰۷,۲۵۵,۰۰۰	۳۱۶۴۲۷۰۰۰	۳۰۹۸۰۳۰۰۰	۸۲,۰۸۴,۰۰۰	۷۸,۶۰۳,۵۰۰
۱۳۹۸	۲۸۹۱۰۰۰۰	۲۵۱۸۱۴۰۰	۲۹۴,۲۷۷,۴۰۰	۳۱۷,۲۵۵,۰۰۰	۳۳۳۱۸۱۷۴۰۰	۳۱۶۰۹۶۰۰۰	۸۳,۰۷۵,۰۰۰	۷۹,۱۲۸,۰۰۰
۱۳۹۹	۲۸۸۱۲۰۰۰	۲۸۹۵۱۷۰۰	۳۱۸,۹۴۵,۰۰۰	۳۲۷,۲۵۵,۰۰۰	۳۴۹۸۲۷۰۰۰	۳۲۶۳۹۱۰۰۰	۸۳,۶۸۱,۴۵۳	۷۹,۶۷۶,۱۰۰
۱۴۰۰	۱۸۰۴۴۰۰۰	۲۴۸۹۵۷۰۰	۳۴۴,۲۵۹,۰۰۰	۳۶۷,۲۵۵,۰۰۰	۳۶۲۴۰۳۰۰۰	۳۴۶۶۸۸۰۰۰	۸۴,۲۵۱,۴۱۶	۸۰,۲۱۷,۹۰۰
RSMPE	۰/۰۹		۰/۰۶		۰/۰۳		۰/۰۲	

پس از انجام موفقیت آمیز آزمون‌های اعتبارسنجی، شبیه سازی اولیه در افق ۳۰ ساله انجام شد. در شکل ۱۱ تغییرات هر یک از متغیرهای کلیدی نمودار جریان که رفتار آن‌ها برای بررسی وضعیت کلی اهمیت دارد، ارائه شده است.

[1] Root Mean Square Percentage Error

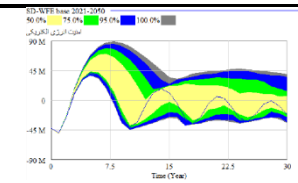
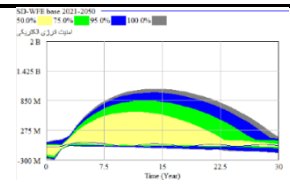
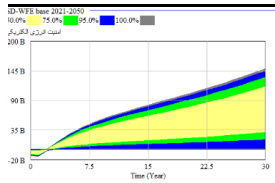
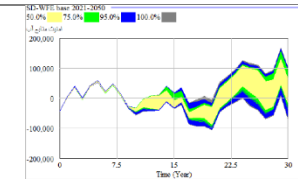
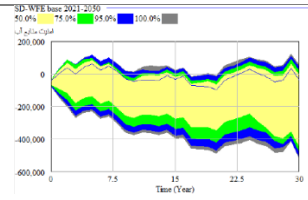
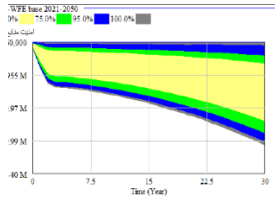

منابع انرژی الکتریکی تجدید ناپذیر
800 M
600 M
400 M
200 M
0
M W
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
SD-WFE base 2021-2050
منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر
100 M
50 M
0
M W
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
SD-WFE base 2021-2050
امنیت انرژی الکتریکی
50 M
0
-50 M
M W/Year
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
SD-WFE base 2021-2050
منابع انرژی الکتریکی
800 M
600 M
400 M
200 M
0
M W
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
SD-WFE base 2021-2050



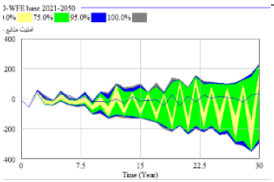
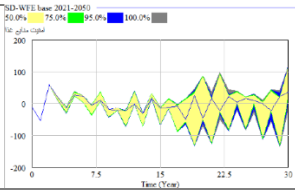
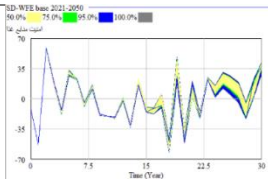
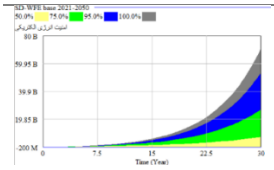
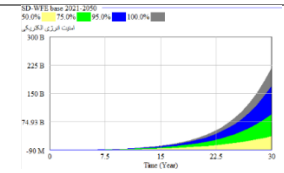
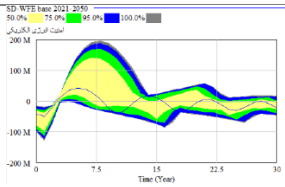
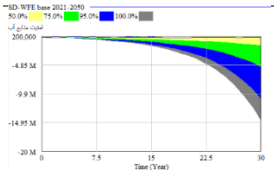
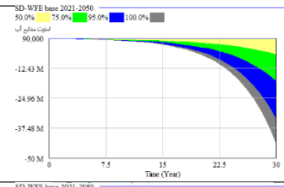
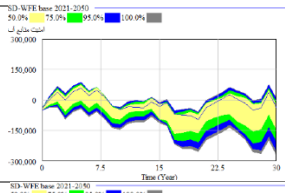
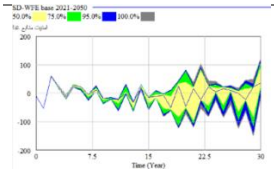
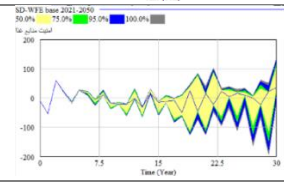
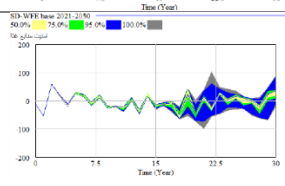
شکل (۱۱). رفتار متغیرهای هدف مدل در افق شبیه‌سازی ۳۰ ساله

در طول افق شبیه سازی سی ساله (۱۴۰۰-۱۴۳۰) مشاهده شده است که امنیت انرژی و امنیت آب با وجود نوساناتی که دارند، مقادیر آنها منفی شده و در گذر زمان به زیر صفر می‌رسند. همچنین روند انتشار گازهای گلخانه‌ای رو به افزایش خواهد بود. پس از شبیه‌سازی اولیه، تحلیل حساسیت مونت کارلو چندمتغیره با در نظر گرفتن تابع توزیع نرمال مقادیر ثابت مدل در دامنه تغییرات با تعداد ۲۰۰ مرتبه انجام شده است. شبیه‌سازی مونت کارلو به عنوان شبیه‌سازی حساسیت چند متغیره[۱] (MVSS) شناخته می‌شود که تحلیل حساسیت را به صورت اتوماتیک انجام می‌دهد. در این حالت صدها یا حتی هزاران شبیه‌سازی به ازای مقادیر مختلف ثابت‌های مدل در یک دامنه خاص انجام می‌شود و نتایج شبیه‌سازی را برای تحلیل‌های بعدی ذخیره می‌کند. بر این مبنا با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مدل، متغیرهایی که بیشترین دامنه تغییرات را ایجاد کرده‌اند و به عبارتی نقاط اهرمی مدل شناسایی شدند. متغیرها، بازه تغییرات و نتایج تحلیل حساسیت مدل در جدول ۵ آورده شده است. نتایج تحلیل حساسیت مدل بر روی رفتار متغیرهای اصلی هدف شامل امنیت انرژی الکتریکی، امنیت منابع آب و امنیت منابع غذا به انجام رسیده است.

جدول ۵. تحلیل حساسیت مونت کارلو متغیرهای برون‌زای مدل و نتایج در متغیرهای هدف

متغیر و بازه	اثر منابع تجدیدناپذیر بر انتشار (صفر الی ۰.۰۰۰۰۱)	سرانه مصرف انرژی (۰.۵ الی ۲)	تلفات انتقال و توزیع انرژی (صفر الی ۱۰۰۰۰۰۰۰۰)
رفتار متغیر هدف امنیت انرژی الکتریکی			
رفتار متغیر هدف امنیت منابع آب			

[۱] Multi variable sensitivity analysis

رفتار متغیر هدف امنیت منابع غذا			
متغیر و بازه	نرخ تولید نیروگاه گازی (۰.۲ الی ۰.۵)	نرخ تولید انرژی سیکل ترکیبی (۰.۲ الی ۰.۵)	مصرف انرژی برای تولید یک واحد انرژی (صفر الی ۰.۱)
رفتار متغیر هدف امنیت انرژی الکتریکی			
رفتار متغیر هدف امنیت منابع آب			
رفتار متغیر هدف امنیت منابع غذا			

۵.۵. شناسایی و ارزیابی سیاست‌ها

مطابق با نتایج تحلیل حساسیت مدل پویایی سیستم و شناسایی نقاط اهرمی و نیز به استناد استراتژی‌های کاهشی یا سازگاری با تغییرات اقلیمی و مدیریت تامین انرژی الکتریکی، سیاست‌های تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر شرایط تغییر اقلیم بر طبق مطالعات و برنامه‌ریزی‌های موجود و همچنین با استفاده از نظر خبرگان در بخش‌های درگیر مسئله در چهار دسته راهبرد شناسایی گردید. با اعمال هر یک از سیاست‌ها در مدل، نتایج بر روی متغیرهای کلیدی از جمله: امنیت منابع آب، امنیت منابع غذا، امنیت انرژی الکتریکی، منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر، منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر، تقاضای انرژی الکتریکی و انتشار گازهای گلخانه‌ای سنجیده شد. در ادامه به تشریح هر یک از دسته راهبردها پرداخته شده است.

۱.۵.۵. راهبرد توسعه تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت عرضه انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر

این استراتژی متمرکز بر مدیریت عرضه انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر طراحی شده است؛ برای این راهبرد سیاست کاهش تلفات عرضه انرژی الکتریکی از طریق بهره‌وری عوامل تولید در نظر گرفته شده است. اقدامات بهره‌وری انرژی برای اطمینان از بهره‌وری در انرژی در تامین، تولید و مصرف انرژی اعمال می‌شود. هدف آنها کاهش مقدار انرژی مورد نیاز برای ارائه همان سطح راحتی یا مطلوبیت است. با کاهش مصرف داخلی نیروگاه‌ها نیز بهره‌وری افزایش یافته و می‌توان به راهکار مدیریت عرضه دست یافت.

۲.۵.۵. راهبرد توسعه تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت عرضه انرژی از منابع تجدیدپذیر

این استراتژی متمرکز بر افزایش تامین انرژی الکتریکی در کشور از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر (به استثنای برق آبی بزرگ) طراحی شده است. برای این راهبرد چهار سیاست توسعه سیستم‌های بازیافت گرما در واحدهای صنعتی، توسعه نیروگاه‌های بیوگاز، توسعه نیروگاه‌های خورشیدی و توسعه نیروگاه‌های بادی در نظر گرفته شده است. یکی از جنبه‌های مهم بحث جهانی تغییر اقلیم سرعت انتقال از منابع تجدیدناپذیر (سوخت‌های فسیلی) به انرژی‌های تجدیدپذیر است(روندهای جهانی ۲۰۴۰، ۲۰۲۱). هدف این تحولات حذف وابستگی فعلی به سوخت‌های فسیلی و دستیابی به یک سیستم انرژی مدرن پاک، کم کربن، ایمن و بسیار کارآمد است.

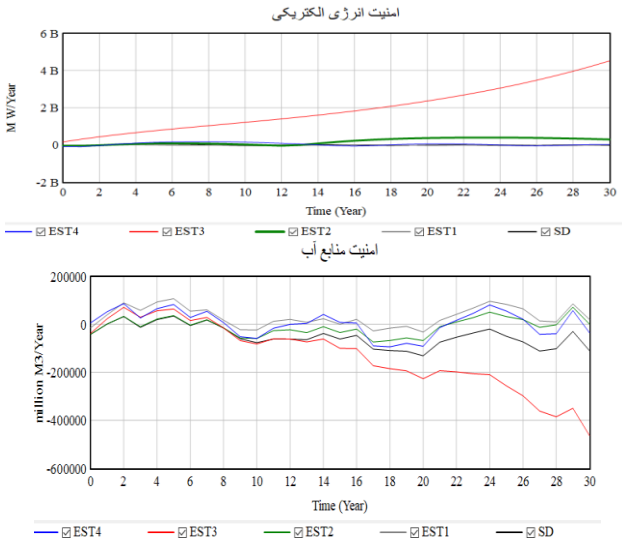
۳.۵.۵. راهبرد تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت تقاضای انرژی الکتریکی

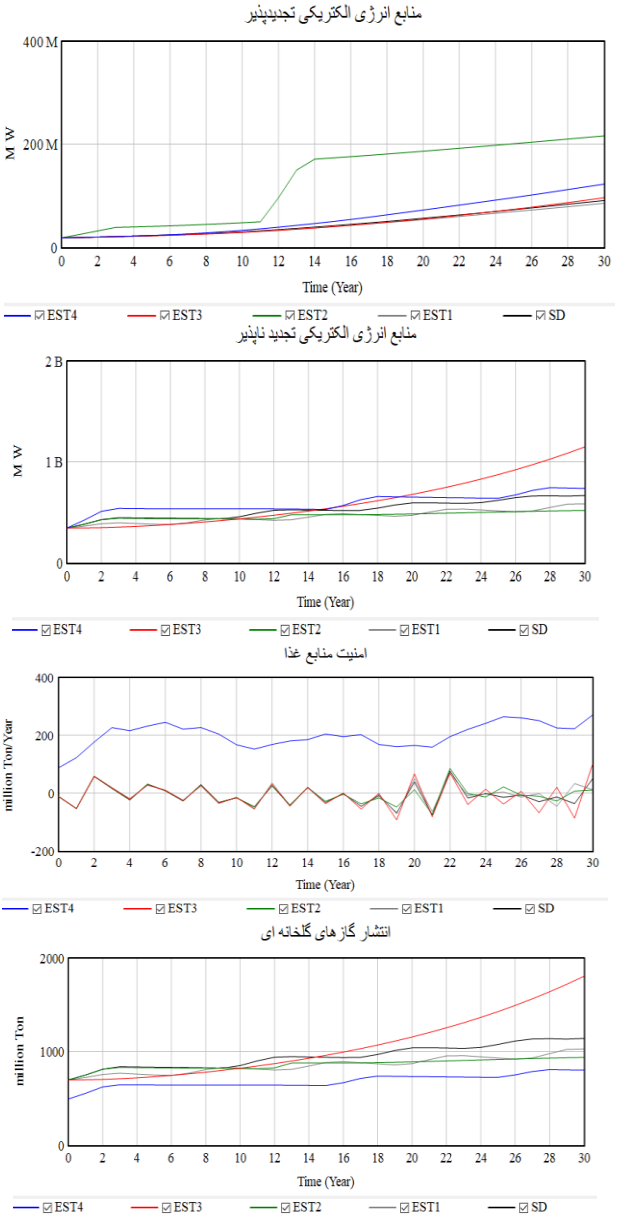
مدیریت تقاضا مربوط به برنامه‌ریزی، برای تمام مواردی است که اثرات مطلوبی بر روی مصرف انرژی الکتریکی دارد و مصرف‌کنندگان به تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد مصرف انرژی الکتریکی اجازه می‌یابند و به کاهش تقاضا کمک می‌کند. در راستای پیاده‌سازی سیاست‌های مدیریت سمت تقاضا و کاهش هدر رفت انرژی، گفته می‌شود که حفظ یک واحد انرژی برابراست با تولید دو واحد انرژی. با توجه به موارد بیان شده در این راهبرد چهار سیاست شامل موارد زیر در نظر گرفته شده است: سیاست کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی، سیاست کاهش سرانه مصرف انرژی، سیاست کاهش تقاضای انرژی بخش آب، سیاست کاهش تقاضای انرژی بخش غذا.

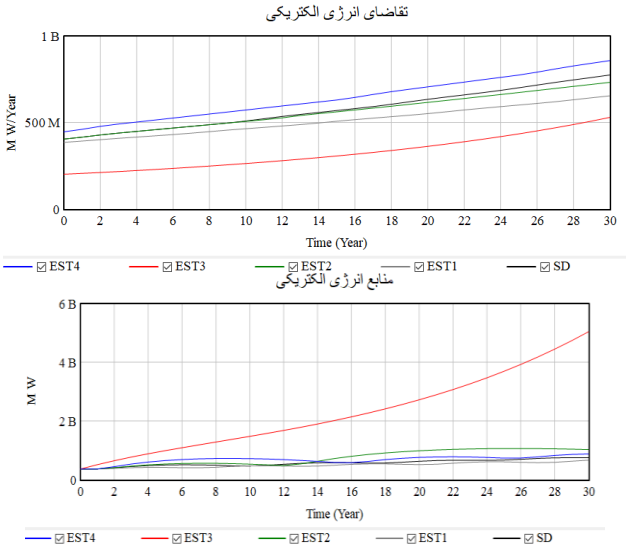
۴.۵.۵. راهبرد تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر سازگاری با تغییرات اقلیمی

اولین سیاست در این راهبرد، سیاست کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع انرژی الکتریکی تجدیدناپذیر در نظر گرفته شده است. همچنین این راهبرد شامل سیاست‌هایی از جمله: سیاست توسعه نیروگاه‌های خورشیدی با توجه به افزایش تعداد روزهای آفتابی مبتنی بر روند تغییرات اقلیمی ایران و همچنین سیاست مدیریت آب در بخش غذا است. این سیاست از این منظر در نظر گرفته شده است که در میان منابع تجدیدپذیر منابع آب بیش از سایر منابع تحت تاثیر تغییرات اقلیمی قرار می‌گیرد. همچنین بزرگترین متقاضی آب بخش کشاورزی است. توجه این سیاست بر افزایش راندمان آبیاری از طریق توسعه فناوری سیستم آبیاری است. با توجه به اینکه در حال حاضر ۳۰ درصد اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری هستند، اگر سایر اراضی نیز تحت پوشش شبکه آبیاری قرار بگیرند، از کل نیاز آبیاری بخش کشاورزی کاسته خواهد شد [۲۶]. از طرفی درصد غذایی که سالانه در مراحل اصلی چرخه حیات سیستم غذایی از بین می‌رود، نشان دهنده اتلاف آب و انرژی‌ای است که برای تولید آنها استفاده می‌شود. حجم آب مورد استفاده در تولید مواد غذایی کشاورزی بسیار زیاد است. بنابراین، اگر ۳۰ درصد از تمام مواد غذایی تولید شده به هدررود، به این معنی است که بیش از ۳۰ درصد از آب مورد استفاده در تولید و پردازش مواد غذایی نیز به هدر می‌رود. این امر به معنای کمک به هدر رفتن منابع آب‌های سطحی وزیر زمینی است.کاهش ضایعات مواد غذایی برای پر کردن شکاف مواد غذایی و کمک به کاهش شکاف‌های آب و انرژی بسیار ضروری است.

در ادامه با اعمال سیاست‌ها بر روی متغیرهای مدل، چهار استراتژی پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل (۱۲) رفتار متغیرهای هدف مدل به منظور مقایسه چهار استراتژی را نشان می‌دهد.




منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر
400 M
200 M
0
M W
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
EST4 EST3 EST2 EST1 SD
منابع انرژی الکتریکی تجدید ناپذیر
2 B
1 B
0
M W
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
EST4 EST3 EST2 EST1 SD
امنیت منابع غذا
400
200
0
-200
million Ton/Year
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
EST4 EST3 EST2 EST1 SD
انتشار گاز های گلخانه ای
2000
1000
0
million Ton
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
EST4 EST3 EST2 EST1 SD



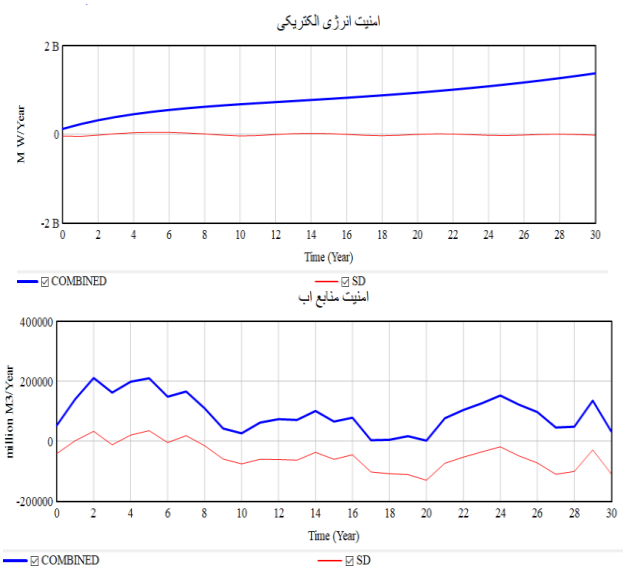
شکل (۱۲) نمودار مقایسه چهار استراتژی از طریق سیاست‌های اعمالی روی متغیرهای مدل در افق شبیه سازی ۳۰ ساله

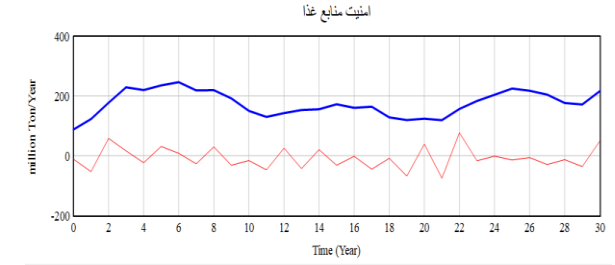
همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر یک از سیاست‌ها متمرکز بر توسعه و بهبود از یک یا دو منظر هستند و به طور هم‌زمان بهبود در همه متغیرهای کلیدی مدل حاصل نشده است. با توجه به اینکه هر یک استراتژی‌ها به تنهایی منجر به بهبود در همه متغیرهای کلیدی نشدند، استراتژی ترکیب سیاست‌های منتخب در نظر گرفته شد. بر این مبنا پس از اعمال هر یک از سیاست‌ها به صورت جداگانه بر روی مدل و نیز اعمال ترکیبی سیاست‌ها، ترکیبات مختلف بر روی مدل مورد آزمون قرار گرفت و متغیرهای کلیدی مدل بررسی شد و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان دادند ترکیبی از سیاست‌ها که در جدول ۶ آورده شده است، بهترین راهکار برای بهبود متغیرهای کلیدی مسئله برای ۳۰ سال شبیه‌سازی شده می‌باشند. شکل (۱۳) نتایج اعمال ترکیبی سیاست‌ها را بر روی متغیرهای کلیدی نشان می‌دهد.

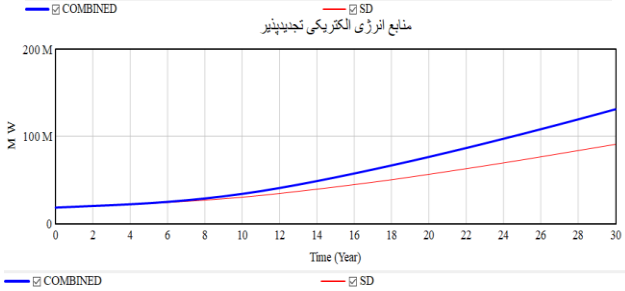
جدول۶. سیاست‌های منتخب

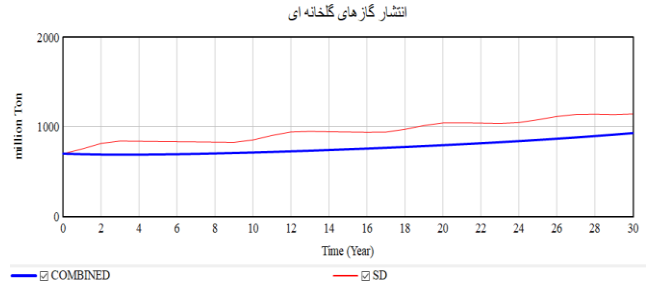
سیاست‌های منتخب	تغییر اعمالی روی مدل	توصیه سیاستی میزان تغییر
۱-کاهش تلفات عرضه از طریق بهره‌وری عوامل تولید	افزایش نرخ تولید انرژی سیکل ترکیبی	۱۸٪ افزایش در طول ۵ سال
	کاهش مصرف انرژی برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه های تجدیدناپذیر	۲٪ کاهش در طول ۵ سال

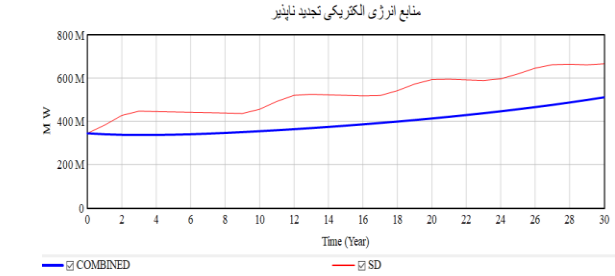
	کاهش نسبت تولید نیروگاه‌های گازی به کل تولید نیروگاه‌های تجدیدناپذیر	۱۸٪ کاهش در طول ۵ سال
	افزایش نرخ اثر امنیت بر توسعه نیروگاه هسته‌ای	۱۶٪ افزایش در طول ۵ سال
۲-کاهش سرانه مصرف انرژی خانگی و تجاری	کاهش سرانه مصرف انرژی به مقدار میانگین جهانی	از ۰/۹۲۶ به ۰/۱۸۲ در طول ۵ سال
۳-کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی	کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی الکتریکی	۵٪ کاهش تلفات توزیع در طول ۵ سال
۴-توسعه سیستم‌های بازیافت حرارت واحدهای صنعتی	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بازیافت حرارتی	تغییر از ۰/۰۰۰۶ به ۰/۰۲ در طول ۵ سال
۵-مدیریت تقاضای آب در بخش غذا مبتنی بر سازگاری با تغییر اقلیم	افزایش راندمان آبیاری در بخش کشاورزی	تغییر از ۵۶٪ به ۸۵٪ در طول ۵ سال
	افزایش سطح اراضی کشت تحت شبکه آبیاری در بخش کشاورزی	افزایش ۲۷٪ در طول ۵ سال
	کاهش تلفات غذا به مقدار میانگین جهانی	تغییر از ۳/۵ به ۰/۹ در طول ۵ سال
۶-توسعه نیروگاه‌های خورشیدی مبتنی بر سازگاری با تغییر اقلیم	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه خورشیدی و افزایش اثر تقاضای انرژی تجدیدپذیر بر توسعه نیروگاه خورشیدی	تغییر اثر امنیت از ۰/۰۰۰۱۷ به ۰/۵ و اثر تقاضا از ۰/۰۰۰۸۶ به ۰/۰۰۳ در طول ۱۰ سال
۷- توسعه نیروگاه‌های بادی	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بادی	تغییر از ۰/۰۱ به ۰/۳ در طول ۱۰ سال
۸-توسعه نیروگاه‌های بیوگاز	افزایش اثر امنیت بر توسعه نیروگاه بیوگاز	از ۰/۰۰۰۲ به ۰/۰۲ در طول ۱۰ سال

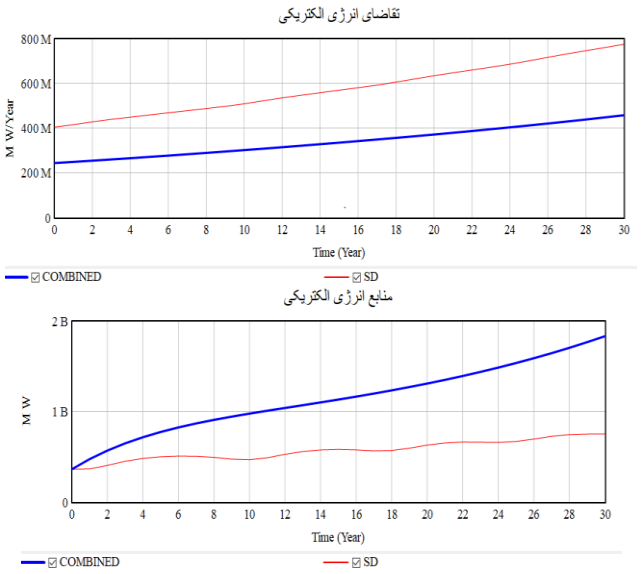



امنیت منابع غذا
400
200
0
-200
million Ton/Year
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
COMBINED
SD


منابع انرژی الکتریکی تجدیدپذیر
200 M
100 M
0
M W
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
COMBINED
SD


انتشار گاز های گلخانه ای
2000
1000
0
million Ton
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
COMBINED
SD


منابع انرژی الکتریکی تجدید ناپذیر
800 M
600 M
400 M
200 M
0
M W
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
Time (Year)
COMBINED
SD



شکل (۱۳) مقایسه استراتژی ترکیب سیاست‌های منتخب در افق شبیه سازی ۳۰ ساله

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش تلاش شده است پویایی‌های تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییر اقلیم با توجه به پیوند آب-غذا-انرژی در کشور ایران مورد مطالعه قرار گیرد، تا با یک رویکرد سیستمی به شبیه‌سازی رفتار سیستم تامین انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییر اقلیم در افق ۳۰ ساله (۱۴۳۰-۱۴۰۰) در کشور پرداخته شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل شبیه‌سازی‌شده می‌تواند رفتار و نتایج قابل قبولی را نسبت به واقعیت ارائه دهد. حفاظت، مدیریت مصارف انرژی و توسعه انرژی جایگزین ضرورت می‌یابد. نهایتا باید برنامه‌های تولید و مصرف انرژی الکتریکی در کشور بر اساس الگوهای هماهنگ با محیط زیست بخصوص تغییر اقلیم و جایگزینی انرژی‌های نو در کشور تنظیم گردد و فرهنگ سازی مناسب در این زمینه بطور جدی انجام شود. بر این اساس با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت مدل و نظر خبرگان و تصمیم‌گیرندگان راه‌کارهای مطلوب در راستای تامین امنیت انرژی الکتریکی تحت تاثیر تغییر اقلیم استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در مقایسه سیاست‌ها مشاهده شد که سیاست‌های تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر مدیریت تقاضا در کوتاه مدت سبب بهبود امنیت انرژی شده است همچنین سیاست کاهش تلفات عرضه از طریق بهره‌وری عوامل تولید در کوتاه مدت سبب بهبود امنیت آب، کاهش تقاضا و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده‌اند. بنابراین این دو دسته سیاست می‌توانند به عنوان راهکارهای کوتاه مدت مدنظر قرار بگیرند. با توجه به سیاست بهره‌روی عوامل

تولید، ظرفیت کنونی قابل تبدیل به سیکل ترکیبی در نیروگاه‌های کشور در حدود ۷۵۰۰ مگاوات است. با انجام عملیات تبدیل نیروگاه‌های گازی، سالانه ۱۲ میلیارد متر مکعب در مصرف سالانه گاز صرفه‌جویی خواهد شد، راندمان ظرفیت نیروگاه‌های حرارتی به بیش از ۴۲ درصد خواهد رسید و از انتشار حدود ۴۳ میلیون تن گازِ گلخانه‌ای در سال جلوگیری می‌شود. از طرفی سیاست‌های مبتنی بر مدیریت عرضه از منابع تجدیدپذیر در بلند مدت و با تاخیر زمانی ۱۰-۱۲ سال سبب جهشی در بهبود امنیت انرژی و افزایش تولید از منابع تجدیدپذیر و همزمان کاهش عرضه از منابع تجدیدناپذیر و در نتیجه کاهش انتشار گازهای‌گلخانه‌ای شده‌اند. همچنین سیاست مدیریت تقاضای آب در بخش غذا تاثیر قابل توجهی در بهبود امنیت غذایی ایجاد کرده و نیز با تاخیر زمانی و بعد از حدود ۱۰ سال سبب افزایش تولید و عرضه انرژی از منابع تجدیدپذیر شده است. بنابراین ترکیب سیاست‌های منتخب در دوسته سیاست‌های کوتاه مدت و بلندمدت در نظر گرفته شدند. در مورد سیاست توسعه نیروگاه-های بازیافت حرارتی شایان توجه است که تولید انرژی الکتریکی از بازیافت انرژی هدررفته در صنعت سیمان می‌تواند تا ٪۴۰ برق موردنیاز در کارخانه را تامین کند. نهایتا بر اساس پیاده‌سازی ترکیب سیاست‌های منتخب در مدل با توجه به نتایج شبیه‌سازی راه‌کارها و تأثیرات این راه‌کارها در رفتار متغیرهای هدف مدل در کوتاه مدت و بلندمدت، به طور خلاصه راه‌کارهای پیشنهادی زیر به تامین امنیت انرژی الکتریکی با توجه به روند تغییرات اقلیمی منجر خواهند شد:

* توسعه ۱۶ درصدی نیروگاه‌های هسته‌ای به منظور مدیریت عرضه انرژی الکتریکی از منابع تجدناپذیر و کم کربن در جهت کاهش تلفات عرضه از طریق بهره‌وری عوامل تولید
* کاهش ۱۸ درصدی نسبت تولید نیروگاه‌های گازی به کل تولید نیروگاه‌های تجدیدناپذیر و افزایش تولید نیروگاه سیکل ترکیبی از طریق تبدیل گازی به سیکل ترکیبی در جهت بهره‌وری عوامل تولید و مدیریت عرضه از منابع تجدیدناپذیر
* تجمیع انرژی و توسعه سیستم های بازیافت گرما در واحدهای صنعتی در جهت توسعه نیروگاه‌های بازیافت حرارتی به میزان ۳۲ درصد
* توسعه نیروگاه‌های بیوگاز، بادی و خورشیدی با توجه به پتانسیل‌های کلیدی موجود در کشور در جهت مدیریت عرضه انرژی از منابع تجدیدپذیر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای
* کاهش ۵ درصدی تلفات انتقال و توزیع انرژی در جهت مدیریت تقاضا و حفظ امنیت انرژی الکتریکی
* کاهش سرانه مصرف انرژی و رسیدن به میانگین جهانی با توجه به افزایش تقاضای روز افزون ناشی از افزایش جمعیت

* مدیریت تقاضای آب در بخش غذا با استفاده از افزایش راندمان آبیاری تا حدود ۸۵ درصد، ۲۷درصد افزایش سطح اراضی تحت شبکه آبیاری و کاهش تلفات غذایی به میانگین جهانی ۰/۹ میلیون تن.

۷. مقایسه نتایج پژوهش با تحقیقات پیشین

از آنجا که در هیچ پژوهشی به مدلسازی کلان تامین انرژی الکتریکی مبتنی بر روند تغییرات اقلیمی با رویکرد پویایی سیستم و تمرکز بر پیوند آب-غذا-انرژی پرداخته نشده بنابراین مبنای دقیقی برای مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین وجود ندارد. با این حال پژوهش حاضر در بخشی از نتایج که توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر مانند بیوگاز، بادی، خورشیدی و بازیافت حرارتی است؛ نتایج پژوهش هوک (۲۰۱۱) که عنوان کرده است طی دو تا سه دهه آینده، ترکیب انرژی جهانی – یعنی ترکیبی از منابع انرژی که جامعه ما را تامین می‌کند - باید از سیستمی که عمدتاً به سوخت‌های فسیلی وابسته است به مجموعه‌ای تبدیل شود که کربن به میزان قابل توجهی کمتری منتشر می‌کند، مورد تائید و تاکید قرار داده است. همچنین با بخشی از نتایج می و همکارانش (۲۰۲۱) و نیز با ایگو و ادیانگ (۲۰۱۰) که بر این واقعیت تاکید کرده اند که تلاش‌های تحقیقاتی برای بقیه قرن بیست و یکم به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر رود، هم‌راستا است. پایان نامه کیهان‌پور به مدلسازی دینامیکی یکپارچه مدیریت پایدار منابع آب با محوریت رویکرد پیوند پرداخته است و در سیاست‌های پیشنهادی حاصل از نتایج مدل پویای این پژوهش سیاست توسعه شبکه آبیاری اراضی کشاورزی به منظور افزایش راندمان آبیاری برای مدیریت پایدار منابع آب توصیه شده است که با نتایج پژوهش حاضر در بخش سیاست پیشنهادی مدیریت تقاضای آب در بخش غذا از طریق افزایش راندمان آبیاری در بخش کشاورزی و افزایش سطح اراضی کشت تحت شیکه آبیاری در بخش کشاورزی هم‌راستا می‌باشد. پژوهش حاضر در بعد توجه و تمرکز بر رویکرد پیوند آب-غذا و انرژی مطابق با مطالعه رسول و شارما (۲۰۱۵) است. این مقاله یک چارچوب مفهومی برای در نظر گرفتن رویکرد پیوند در رابطه با سازگاری با تغییر اقلیم ایجاد کرده است. نویسنده در این پژوهش استدلال کرده است که تمرکز بر مبادلات و همکوشی‌ها با استفاده از رویکرد پیوند می‌تواند سازگاری بیشتر با تغییرات اقلیمی را تسهیل کند و به تضمین امنیت غذایی، آب و انرژی از طریق افزایش بهره‌وری استفاده از منابع کمک کند.

۸. پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد بررسی نحوه تاثیرگذاری تغییرات اقلیمی بر روی سرعت باد و همچنین حجم بارندگی سالیانه به صورت دقیق مورد مطالعه قرار گیرد و برای توسعه مدل می‌تواند در تحقیقات آتی به مدل اضافه شوند. همچنین کشت فرا سرزمینی با توجه به کمبود منابع آبی در

ایران، محدودیت در فعالیت‌های بخش کشاورزی و جلوگیری از بروز مشکلات جدی در پایداری امنیت غذایی در کشور می‌تواند مورد توجه و بررسی قرار گیرد. از طرفی تقویت کشاورزی پایدار توصیه می‌شود. اینکه با فناوری‌های هوش مصنوعی می‌توان با بهینه‌سازی تخصیص منابع، کاهش مصرف آب و بهبود عملکرد محصول، کشاورزی را متحول کرد. همچنین با توجه به اینکه در این مطالعه شبیه‌سازی بر اساس روندهای تاریخی صورت گرفته است بنابراین در زمینه پیشنهادهای پژوهش برای تحقیقات آتی بررسی اثرات تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای تغییر آب و هوا و مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی پیشنهاد می‌گردد. در مورد پیش‌بینی الگوهای آب و هوا و مدل‌سازی آب و هوا، الگوریتم‌های هوش مصنوعی نیز، همراه با داده‌های هواشناسی پیشنهاد می‌گردد که می‌توانند الگوهای آب و هوا را با دقت و جزئیات بیشتر پیش‌بینی کنند. همچنین یک رویکرد اساسی برای مدلسازی آب و هوای آینده استفاده از GCM است. در این بررسی متغیرهای فنی و اقتصادی مدنظر قرار نگرفته‌اند مطالعات بیشتری در مورد تأثیرات فنی و هزینه‌ای تغییرپذیری منابع تجدیدپذیر و تأثیرات رویدادهای آب و هوایی شدید بر همه عناصر سیستم انرژی مورد نیاز است. تأثیر تغییرات شدید آب و هوا نسبت به تغییرات تدریجی (مانند رویدادهای آب و هوایی با مقادیر بالاتر یا پایین تر از حد نرمال) می‌تواند قابل توجه باشد.

منابع

۱. بختیاری, پ., استادی جعفری, م., کرمرودی, م & ., حبیبیان, م .(۱۳۸۸) .جایگاه انرژی های تجدیدپذیر در نظریه حمل و نقل پایدار مسافر .مطالعات مدیریت ترافیک ,۴(۱۲) ,۷۷-۹۶

۲. رائینی, م. (۱۴۰۰ ,آبان ۱۲) .ایران کجای تغییر اقلیم قرار دارد؟ .خ. ایسنا/مازندران , Interviewer) Retrieved from https://www.isna.ir/news/۰۰۰۶۱۸۰۶۵۳۸/

۳. شاهمحمدی,ع.,مفاخری,ص,ویسی,., وخوش بخت، ک.۱۳۹۶.رهیافتی برای دستیابی به توسعه پایدار پیوند آب، غذا و انرژی. شبکه مطالعات سیاست گذاری عمومی یافته‌های پژوهشی سیاستی. شاپا:۲۴۲۳-۵۳۸۵

٤. صیادی, م., سلطانی, ا & ., موحدی, س .(۱۳۹۸) .ارائه یک مدل مفهومی از پویایی هم پیوندی آب-انرژی-غذا در ایران: رویکرد سیستمی .فصلنامه اقتصاد محیط زیست و منابع طبیعی ,۳(۶) , ۱۰۴-۷۹.

٥. علیجانی, ب .(۱۴۰۰ ,مرداد ۱۹) .چه بلایی سر اقلیم ایران آمده است .ر. ت. ایران (Interviewer , Retrieved from http://www.taadolnewspaper.ir/

٦. عنایتی, م & ., بزرگ حداد, ا .(۱۳۹۸) .بازطراحی نیروگاه برقآبی با توجه به همبست آب، غذا و انرژی و ملاحظات زیست محیطی در شرایط تغییر اقلیم .انجمن علمی آموزش محیط زیست و

توسعه پایدار ایران، دومین کنفرانس علوم و مهندسی محیط زیست و توسعه پایدار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.

۷. گودرزی, م., پیریائی, ر., & موسوی, م. (تیر ۱۳۹۹). درک پیوند آب-غذا-انرژی و مدیریت برای بهره وری از منابع آب موجود. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی), ۳۴(۲), ۲۶۸-۲۵۵.

۸. لونی, ر., & شریف زاده, م. (۱۴۰۱). مروری بر مطالعات همبست آب، انرژی و غذا در ایران: ضرورت، چالش‌ها و راهکارهای پیشنهادی پایداری، توسعه و محیط زیست, ۳(۳), ۴۹-۲۹.

۹. Abbasi, T., & Abbasi, S. (۲۰۱۰). Renewable energy sources: Their impact on global warming and pollution. PHI Learning.

۱۰. Avraamidou, S., Beykal, B., Pistikopoulos, I., & Pistikopoulos, E. (۲۰۱۸). A hierarchical Food-Energy-Water Nexus (FEW-N) decision-making approach for Land Use Optimization. Computer Aided Chemical Engineering, ٤٤, ۱۸۸٥-۱۸۹۰. doi:۱۰,۱۰۱٦/B۹۷۸-۰-٤٤٤-٦٤۲٤۱-۷,٥۰۳۰۹-۸

۱۱. Borowski, P. (۲۰۲۰). Nexus between water, energy, food and climate change as challenges facing the modern global, European and Polish economy. AIMS Geosciences. Warsaw University of Life Sciences. Institute of Mechanical Engineering, ٦(٤), ۳۹۷-٤۲۱. doi:۱۰,۳۹۳٤/geosci.۲۰۲۰۰۲۲

۱۲. Chen, A., Stephens, A., Koon Koon, R., Ashtine, M., & Koon, K.-K. (۲۰۲۰). Pathways to climate change mitigation and stable energy by ۱۰۰ % renewable for a small island: Jamaica as an example. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۲۱. doi:۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۱۹,۱۰۹٦۷۱

۱۳. Cronin, J., Anandarajah, G., & Dessens, O. (۲۰۱۸, August ٦). Climate change impacts on the energy system: a review of trends and gaps. Climatic Change, ۱٥۱, ۷۹-۹۳. doi:۱۰,۱۰۰۷٪۲Fs۱٥٥۸٤-۰۱۸-۲۲٦٥-٤

۱٤. Gernaat, D., Boer, H., Daioglou, V., Yalew, S., Müller, C., & Vuuren , D. (۲۰۲۱). Climate change impacts on renewable energy supply. Nature Climate Change, ۱۱, ۱۱۹-۱۲٥. doi:۱۰,۱۰۳۸/s٤۱٥٥۸-۰۲۰-۰۰۹٤۹-۹

۱٥. Ghasemi, M., Soltani Mohammadi, A., Naseri, A., & Moazd, H. (۲۰۱۹). Evaluation and application of the system dynamics model in the investigation and determination of nitrate leaching under different climatic scenarios in Amir Kabir sugarcane cultivation and industrial lands. Iran Irrigation and Drainage Journal,۱٤(۱), ۲۱۷-۲۲۹.

۱٦. Global Energy Transformation: A Roadmap to ۲۰٥۰ (۲۰۱۸ edition). Retrieved from irena.org

۱۷. Global Trends ۲۰٤۰. (۲۰۲۱). A Publication Of The National Intelligence Council, ISBN ۹۷۸-۱-۹۲۹٦٦۷-۳۳-۸. Retrieved from www.dni.gov/nic/globaltrends

۱۸. H. Dale , V., A. Efroymson , R., & L. Kline, K. (۲۰۱۱). The land use–climate change–energy nexus. Landscape Ecol (۲۰۱۱) ۲٦:۷٥٥–۷۷۳, ۲٦, ۷٥٥-۷۷۳. doi:۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۹۸۰-۰۱۱-۹٦۰٦-۲

۱۹. IEA (International Energy Agency) (۲۰۱٥) Global energy-related emissions of carbon dioxide stalled in ۲۰۱٤.

http://www.iea.org/newsroom/news/۲۰۱۵/march/global-energy-related-emissions-of-carbondioxide-stalled-in-۲۰۱٤.html. Accessed ۱۵ Apr. ۲۰۱۷

۲۰. IEA (International Energy Agency) (۲۰۱٤a) Capturing the multiple benefits of energy efficiency. IEA, Paris

۲۱. IEA. (۲۰۱۳) OECD/IEA Technology Roadmap. Wind Energy ٦۳

۲۲. IEA (International Energy Agency) . World energy outlook: ۲۰۰۸. OECD/IEA; ۲۰۰۸.p.٥۷۸

۲۳. IPCC (Intergovenmental Panel on Climate Change)((۲۰۱٤) Climate change ۲۰۱٤: mitigation of climate change. IPCC, New York.

۲٤. IRENA (International Renewable Energy Agency) (۲۰۱٥) Synergies between renewable energy and energy efficiency. IRENA/Copenhagen.

۲٥. IRENA (International Renewable Energy Agency) (۲۰۱٥) http://www.irena.org/document downloads/publications/irena_water_energy_food_nexus_۲۰۱٥.pdf.

۲٦. Kang , J.,& Wei , Y., & Liu , L., & Han , R., &Yu , B., & Wang , J. (۲۰۲۰). Energy systems for climate change mitigation: A systematic review. Applied Energy, ۲٦۳. doi:۱۰,۱۰۱٦/j.apenergy.۲۰۲۰,۱۱٤٦۰۲

۲۷. karamian, F., Mirakzadeh, A., & Azari, A. (۲۰۲۱). The water-energy-food nexus in farming: Managerial insights for a more efficient consumption of agricultural inputs. Sustainable Production and Consumption, ۲۷, ۱۳٥۷-۱۳۷۱. doi:۱۰,۱۰۱٦/j.spc.۲۰۲۱,۰۳,۰۰۸

۲۸. Kaygusuz, k. (۲۰۱۲). Energy for sustainable development: A case of developing countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱٦, ۱۱۱٦-۱۱۲٦. doi:۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۱۱,۱۱,۰۱۳

۲۹. Keyhanpour, M., Musavi Jahromi, S., & Ebrahimi, H. (۲۰۲۱). System dynamics model of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach. Ain Shams Engineering Journal, ۱۲(۲), ۱۲٦۷-۱۲۸۱. doi:doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.asej.۲۰۲۰,۰۷,۰۲۹

۳۰. Lawford, R. Bogardi, J. Marx, S. Jain, S. Ringler, C. Wostl, C.P. and Meza, F. ۲۰۱۳. Science Direct Basin perspectives on the Water – Energy – Food Security Nexus. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.cosust.۲۰۱۳,۱۱,۰۰٥.

۳۱. Li, P., & Ma, H. (۲۰۲۰). Evaluating the environmental impacts of the water-energy-food nexus with a life-cycle approach. Resources, Conservation And Recycling, ۱٥۷, ۱۰٤۷۸۹. doi:۱۰,۱۰۱٦/j.resconrec.۲۰۲۰,۱۰٤۷۸۹

۳۲. Mei, H; Li, Y.P; Suo, C; Ma, Y; Lv, J;. (۲۰۲۰). Analyzing the impact of climate change on energy-economy-carbon nexus system in China. Applied Energy, ۲٦۲. doi:doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.apenergy.۲۰۲۰,۱۱٤٥٦۸

۳۳. Mirzaei A, Saghafian B, Mirchi A, Madani K.(۲۰۱۹) The groundwater–energy–food nexus in Iran's agricultural sector: implications for water security. Water.;۱۱(۹):۱۸۳٥. doi.org/۱۰,۳۳۹۰/w۱۱۰۹۱۸۳٥

۳٤. Naderi MM, Mirchi A, Bavani ARM, Goharian E, Madani K. (۲۰۲۱) System dynamics simulation of regional water supply and demand using a food-energy-water nexus approach: application to Qazvin Plain, Iran. Journal of Environmental Management. ۲۰۲۱; ۲۸۰: ۱۱۱۸٤۳.

۳٥. Norouzi N.(۲۰۲۲). Presenting a conceptual model of water-energy-food nexus in Iran. Current Research in Environmental Sustainability. ۲۰۲۲;٤:۱۰۰۱۱۹.

۳۶. Mei , H., & Li , Y., & Suo , C., & Ma , Y., & Lv , J. (۲۰۲۰). Analyzing the impact of climate change on energy-economy-carbon nexus system in China. Applied Energy, ۲۶۲. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.apenergy.۲۰۲۰,۱۱۴۵۶۸

۳۷. Perera, A., Nik, V., Chen, D., Scartezzini, J.-L., & Hong, T. (۲۰۲۰, February ۱۷). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. Nature Energy, ۵, ۱۵۰-۱۵۹. doi:۱۰,۱۰۳۸/s۴۱۵۶۰-۰۲۰-۰۵۵۸-۰

۳۸. R Albrecht, T., Crootof, A., & A Scott, C. (۲۰۱۸). The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. Environmental Research Letters, ۱۳(۰۴۳۰۰۲). doi:۱۰,۱۰۸۸/۱۷۴۸-۹۳۲۶/aaa۹c۶/meta

۳۹. Raazia, I., Amin, A., & Irfan, S. (۲۰۲۳). Global Climate Change and Human Security Nexus: A Case of Pakistan. Global Foreign Policies Review, VI(I), ۳۹-۵۲. https://doi.org/۱۰,۳۱۷۰۳/gfpr.۲۰۲۳(VI-I).۰۴

۴۰. Rasul, G., & Sharma, B. (۲۰۱۶). The nexus approach to water–energy–food security: an option for adaptation to climate change. Climate Policy, ۱۶(۶), ۶۸۲-۷۰۲. doi:۱۰,۱۰۸۰/۱۴۶۹۳۰۶۲,۲۰۱۵,۱۰۲۹۸۶۵

۴۱.

۴۲. REN ۲۱. Renewables ۲۰۲۲: global-futures-report . https://www.ren۲۱.net/۲۰۲۲-renewables / global-futures-report

۴۳. Report of the National Meteorological Organization (۲۰۲۲), report of the reference secretariat of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Risks of climate change and possible consequences for governments.[In Persian]

۴۴. Samadi-Foroushani, M., Keyhanpour, M., Musavi-Jahromi, S., & Ebrahimi , H. (۲۰۲۲). Integrated Water Resources Management Based on Water Governance and Water-food-energy Nexus through System Dynamics and Social Network Analyzing Approaches. Water Resources Management, ۳۶, ۶۰۹۳-۶۱۱۳. doi:۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۲۶۹-۰۲۲-۰۳۳۴۳-۶

۴۵. Sterman, J. (۲۰۰۰): Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. The first volume. (Translator. Korosh, B. Banafsheh, R. Laleh, M. Parisa, A. Marzieh, & F. Hassan,) Tehran: Organization for the study and compilation of humanities books of universities (Samt).[In Persian]

۴۶. World Bank (۲۰۱۲) Turn down the heat: why a ۴°C warmer world must be avoided. World Bank, Washington.

۴۷. World Meteorological Organisation (WMO)(۲۰۲۲). https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate

۴۸. Yalew, S., van Vliet, M., Gernaat, D., & Ludwig, F. (۲۰۲۰, August ۳). Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. nature energy, ۵, ۷۹۴-۸۰۲. doi:۱۰,۱۰۳۸/s۴۱۵۶۰-۰۲۰-۰۶۶۴-z

۴۹. Uyigue, E., Ediang, O., & Ediang, A. (۲۰۱۰, July ۲۰). Combating Climate Change: The Role of Renewable Energy and Energy Efficiency. anian Journal of Earth Sciences, ۲, ۱۵۰-۱۵۷.

۵۰. Wicaksono, A. and Kang, D. ۲۰۱۹. Nationwide simulation of water, energy, and food nexus: Case study in South Korea and Indonesia. Journal of Hydro-Environment Research, ۲۲ (November ۲۰۱۸), ۷۰-۸۷. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.jher.۲۰۱۸,۱۰,۰۰۳.

۵۱. Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W., & Fu, G. (۲۰۱۸). Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies. Journal Of Cleaner Production, ۱۹۵, ٦۲۵-٦۳۹. doi:۱۰,۱۰۱٦/j.jclepro.۲۰۱۸,۰۵,۱۹٤