

طراحی مدلی جهت تامین ظرفیت پایدار شبکه انتقال برق با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها

محمد تقی فرحناک

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران mt.farahnak@gmail.com

محمدعلی افشار کاظمی

استاد، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران dr.mafshar@gmail.com

علی محقر^۱

استاد، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران amohaghar@ut.ac.ir

محمدعلی کرامتی

دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران mohammadalikeramati@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها ساختار سیستمی توسعه ظرفیت انتقال به تفکیک پستهای ۴۰۰، ۲۳۰، ۲۳۲ و ۶۶-۶۳ کیلوولت با در نظر گرفتن تقاضا و عرضه برق به صورت برونزا مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. پس از ایجاد مدل جریان و انباشت، روابط ریاضی بین متغیرهای مدل وارد شده و سپس جهت تعیین اعتبار با انواع روشهای اعتبارسنجی مرسوم مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها، مانند آزمون حدی، آزمون ارزیابی ساختاری و آزمون بازسازی رفتار مرجع، استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۳ سیاست در حوزه توسعه ظرفیت انتقال نشان می‌دهند با توجه به روند صعودی تقاضا، در صورتی که روند احداث ظرفیت انتقال همانند دوره‌های گذشته باشد، اختلاف قابل توجهی مابین مقدار ظرفیت انتقال مورد نیاز و ظرفیت انتقال در دسترس به وجود خواهد آمد و جهت جبران اختلاف با کمک مدل پژوهش، نتایج عددی احداث ظرفیت انتقال به صورت سالانه تا افق ۱۴۲۰ شبیه‌سازی و ارائه شده است.

کلمات کلیدی: پویایی‌شناسی سیستم‌ها، ظرفیت انتقال برق، خطوط انتقال و فوق توزیع، سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت انتقال.

^۱ نویسنده مسئول

Designing a Model for Sustainable Power Transmission Capacity Using Systems Dynamics Approach

Mohammad Taghi Farahnak, mt.farahnak@gmail.com

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Azad University, Tehran, Iran

Mohammad Ali Afshar Kazemi, dr.mafshar@gmail.com

Professor, Department of management information technology, faculty of Management, Central Tehran branch-Islamic Azad university, Tehran, Iran

Ali Mohaghar, (Corresponding author), amohaghar@ut.ac.ir

Professor, Faculty of management, University of Tehran, Iran

Mohammad Ali Keramati, mohammadalikeramati@yahoo.com

Associate Professor, Department of management information technology, Faculty of Management, Central Tehran branch-Islamic Azad university, Tehran, Iran

Abstract

In this research, a system dynamics approach has been employed to model and simulate the structural dynamics of capacity development for power transmission, specifically focusing on substations operating at 400, 230, 232, and 66-63 kilovolts. The model takes into account the exogenous factors of electricity demand and supply. This study reviews previous domestic and international research, providing a suitable framework for analyzing investment policies in the transmission industry. The diagram of subsystems incorporates variables such as inflation, electricity demand, and electricity supply in an exogenous manner. In the causal loop diagram, key variables including existing transmission capacity, equipment depreciation, equipment age, maintenance costs, transmission network losses, and transformer failure probability are considered, with both direct and indirect relationships among them modeled accordingly. After establishing the stock and flow diagram model, mathematical relationships between the model variables were incorporated. Various conventional validation methods for system dynamics models were utilized to ascertain the model's credibility, including boundary tests, structural evaluation tests, and behavioral reproduction tests. The results from the behavioral reproduction test indicated that the model accurately simulated the past 40 years of transmission capacity with over 90% accuracy. Upon validating the model, three scenarios were simulated within this domain. The outcomes reveal that in the second scenario, where electricity demand is optimistically projected to increase due to savings or other changes over a 20-year horizon, the annual construction of transmission capacity calculated by the model results in the smallest gap between required and actual capacity. Conversely, in the third scenario, where both electricity demand increases and annual capacity construction continues based on a previous five-year average, the largest discrepancy between required and actual transmission capacity is expected by the year 1420. The numerical results from these three scenarios concerning the construction of transmission capacity by substation type are presented in this paper.

Keywords: system dynamics, power transmission capacity, investment in transmission capacity development

۱. مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که امروزه صنعت برق با آن دست به گریبان است، مربوط به نوسازی و بهبود شبکه‌های انتقال انرژی و همچنین فرسودگی تجهیزات موجود است [۱]. علاوه بر این، نبود اطمینان در مورد زمان، مکان و مقدار سرمایه‌گذاری‌های مورد نیاز، به چالشی دیگر در این حوزه به شمار می‌آید [۲] و [۳]. طبق گزارش‌های وزارت نیرو، شبکه انتقال برق در ایران همواره از کمبود سرمایه‌گذاری‌های به‌موقع رنج می‌برد و همین امر ضرورت توسعه سریعتر این زیرساخت‌ها را نشان می‌دهد. [۴].

ایجاد برنامه‌های بلندمدت برای تکامل شبکه انتقال می‌تواند به بهبود سیستم‌ها و تجهیزات مرتبط کمک کند و نیازهای مصرف‌کنندگان انرژی را به‌خوبی برآورده سازد [۵]. تحقیقات انجام‌شده در این زمینه، روش‌های مختلفی برای تشویق سرمایه‌گذاری در بخش انتقال ارائه کرده‌اند [۶]. همچنین تأثیر سیاست‌های تعرفه‌ای بر روی جریان نقدی شبکه برق بررسی شده و مدلی برای بهینه‌سازی تصمیمات سرمایه‌گذاری توسعه یافته است [۷]. محققین نیز با استفاده از تکنیک‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها، توانسته‌اند رابطه بین میزان سرمایه‌گذاری و ظرفیت انتقال برق را شبیه‌سازی کنند و به این نتیجه رسیده‌اند که برنامه‌ریزی ظرفیت انتقال می‌تواند به دو شیوه متمرکز یا غیرمتمرکز صورت گیرد که هر کدام چالش‌ها و مزایای منحصر به فرد خود را دارند. در این راستا، آن‌ها همچنین به بررسی شرایط صنعت برق کلمبیا پرداخته‌اند [۸].

علاوه بر این، مطالعات گذشته نشان می‌دهند که بیشتر تحلیل‌ها بر بخش تولید متمرکز بوده‌اند [۹] و نظر به وجود تعدد متغیرهای دخیل، روابط بازخوری بین متغیرها و همچنین ساختار سنی بین ظرفیت‌های انتقال استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها در این حوزه اجتناب‌ناپذیر است [۱۰-۱۴]. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر سرمایه‌گذاری در تجهیزات تولید، توجه به تحقیق و توسعه (R&D) و افزایش بهره‌وری نیز ضروری است. همچنین مدیریت تقاضا و کاهش آن از طریق بهبود کارایی تجهیزات مصرف‌کننده نهایی، نقش مهمی در پایداری تقاضا و تولید ایفا می‌کند [۱۵].

در ایران، پژوهشی و مدلی برای توسعه بخش عرضه در صنعت برق با توجه به ابعاد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه داده است که می‌تواند به برنامه‌ریزی بلندمدت تأمین انرژی الکتریکی کمک کند. مقایسه روند توسعه موجود با روند مبتنی بر مدل نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌تواند به صرفه‌جویی اقتصادی در توسعه برق منجر شود [۱۶]. همچنین تحقیقی دیگر مدلی برای سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت توزیع برق ارائه کرده است که از روشی ترکیبی شامل ویژگی‌های توسعه متمرکز و غیرمتمرکز بهره می‌برد. این روش باعث بهبود زمان‌بندی سرمایه‌گذاری نسبت به شیوه غیرمتمرکز شده و هزینه‌های مصرف را کاهش می‌دهد [۱۷].

علاوه بر اینها، تلفات انرژی نیز یکی از عواملی است که نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر در صنعت برق را افزایش می‌دهد. با استفاده از داده‌های سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ در ایران، تلفات انرژی با دو روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها و رگرسیون پیش‌بینی شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های اقتصادسنجی دقت بیشتری نسبت به مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها دارند و این مدل‌ها بیشتر برای نمایش روابط علت و معلولی متغیرها مناسب هستند [۱۸]. تحقیقی دیگر نیز به

بررسی و دسته‌بندی مطالعات مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها در حوزه مدیریت و برنامه‌ریزی برق بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی سیاست‌ها و توسعه ظرفیت تولید، دو موضوع برجسته مورد توجه هستند [۱۹]. تحقیق دیگری در چین به اصلاح تعرفه‌های انتقال و توزیع (T&D) و تأثیر آن بر ظرفیت مالی شرکت‌های برق می‌پردازد. با استفاده از مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها، تغییرات درآمد و هزینه‌های این شرکت‌ها پس از اصلاحات بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که درآمد T&D به تدریج افزایش پیدا می‌کند و استهلاك دارایی‌ها نقش مهمی در ظرفیت مالی دارد [۲۰].

در نهایت، مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که میزان سرمایه‌گذاری و احداث ظرفیت انتقال نیازمند برنامه‌ریزی بلندمدت است. با توجه به تأثیر متغیرهای متعدد در این حوزه و دینامیک روابط بین آنها، برنامه‌ریزی در این زمینه پیچیده

بوده و نیازمند ابزاری است که بتواند تمامی متغیرهای اصلی را شبیه‌سازی کرده و سناریوهای مناسبی برای آینده ارائه دهد.

تفکر غیرخطی و نگاه پویا به پدیده‌ها و پیامدها، از نکات مغفول در تصمیم‌گیری‌های مدیران در کسب‌وکارها و سازمان‌های تجاری و غیرتجاری است. نادیده گرفتن پویایی ذاتی پدیده‌ها می‌تواند منجر به اتخاذ تصمیمات ضعیف و بی‌کیفیت شود که به جای حل مسائل، مشکلات جدیدی ایجاد می‌کنند و بر چالش‌های موجود می‌افزایند. [۲۱]. پویایی‌شناسی سیستم‌ها کارآمد بودن خود را در موضوعات مختلف اقتصادی و اجتماعی به خوبی نشان داده است و امکانات مناسبی را در این خصوص در اختیار قرار می‌دهد [۲۲]. ویژگی‌های بارز پویایی‌شناسی سیستم‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها که منجر به بکارگیری آن در تحقیق حاضر گردید به شرح زیر است:

- امکان در نظر گرفتن ارتباطات علی و بازخوردی بین متغیرها (عموم روش‌های آماری مثل رگرسیون دارای این قابلیت نیستند)
- امکان لحاظ کردن تاخیرات زمانی بین متغیرهای مختلف مانند تاخیر بین سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت
- امکان شبیه‌سازی کامپیوتری و مشاهده رفتار متغیرهای اصلی در بستر زمان
- امکان استفاده از قابلیت زنجیره سنی در شبیه‌سازی چرا که احتمال برکناری ظرفیت با سن تجهیزات رابطه

مستقیمی دارد و در گذر زمان سن تجهیزات افزایش می‌یابد

- امکان تعریف سناریو و مشاهده تاثیرات آن بر رفتار آینده متغیرهای تشکیل دهنده ساختار مدل.

افزون بر تعداد متغیرها و شاخص‌های اصلی دینامیک مدل در بالا که در سیستم شبکه انتقال منجر به افزونگی و پیچیدگی می‌شوند. ظرفیت‌های انتقال با سن متفاوت و تلفات آنها، تقاضا و عرضه برق متغیر در طول زمان و ارتباط بین ظرفیت مورد انتظار و ظرفیت واقعی و سایر متغیرهایی که در مساله دخالت دارند. منجر به پیچیدگی و بروز ابهامات در درک تاثیر و تأثر این متغیرها بر هم می‌گردند. کاربرد رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها در عین حفظ نگاه کلی، مرز سیستم را مشخص کرده و ارتباط بین این متغیرها را مشخص می‌نماید و که این فرآیند منجر به ایجاد مدل ذهنی مشترک بین تصمیم‌گیرندگان و تصمیم‌سازان می‌شود.

این پژوهش از این جهت با تحقیقات پیشین متمایز است که از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی توسعه ظرفیت انتقال در آینده استفاده می‌کند. تاکنون هیچ تحقیقی در ایران به بررسی رفتار توسعه ظرفیت انتقال با استفاده از این ابزار و دیگر روش‌ها نپرداخته است. با توجه به این خلاء، پژوهش حاضر به پیش‌بینی و شبیه‌سازی میزان احداث ظرفیت انتقال با تفکیک پست‌های ۴۰۰، ۲۳۰، ۲۳۲ و ۶۶-۶۳ در شرایط مختلف می‌پردازد. جدول ۱ نتایج تحقیقات پیشین در حوزه تولید، انتقال و توزیع را خلاصه کرده و تفاوت‌های آن‌ها را با پژوهش حاضر روشن می‌سازد.

جدول ۱: مقایسه تحقیقات پیشین با تحقیق حاضر

ردیف	تحقیق	کشور مورد بررسی	بخش مورد تحلیل			موضوع اصلی مورد بحث
			تولید	انتقال	توزیع	
۱	[۱۴]	ایران			*	مدلسازی تقاضای انرژی الکتریکی
۲	[۱۷]	ایران			*	سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت توزیع برق
۳	[۱۸]	ایران		*		تلفات انتقال
۴	[۱۶]	ایران	*			توسعه برنامه بلندمدت تامین انرژی الکتریکی
۵	[۱۱]، [۱۵]	آمریکا	*			استفاده از مدل‌های کامپیوتری جهت شبیه‌سازی ساخت نیروگاه‌های برق
۶	[۱۵]	کانادا	*		*	سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه (R&D)
۷	[۲۱]	مالزی			*	ارزیابی تغییرات نرخ تعرفه و تاثیرات آن در بخش تولید
۸	[۷]	چین		*		تاثیر سیاست‌های تعرفه‌ای انتقال و توزیع برق بر جریان نقدی صنعت برق

۹	[۱۰]	چین	*	*	استراتژی تخصیص سرمایه‌گذاری در بخش انتقال و توزیع
۱۰	[۸]	کلمبیا	*	*	سرمایه‌گذاری در ظرفیت انتقال، ظرفیت انتقال نصب شده، حاشیه مطلوب فعلی، حاشیه ظرفیت انتقال، حاشیه ظرفیت انتقال مطلوب، تقاضای برق
۱۱	[۱۲]	ایران	*	*	تأثیر سیاستهای قیمتی انرژی ناپایداری عرضه و تقاضای آن
۱۲	[۲۴]	ایران	*	*	مدلسازی سیستمی برنامه ریزی توسعه تولید برق
۱۳	[۲۵]	چین	*	*	پیش‌بینی مصرف برق با کمک ابزار پویایی‌شناسی سیستم‌ها
۱۴	[۲۲]	ایران	*	*	مقایسه دو رویکرد توسعه سمت عرضه در مقابل مدیریت سمت تقاضا
تحقیق حاضر		ایران	*	*	تعیین میزان توسعه ظرفیت انتقال شبکه برق جهت تامین پایدار برق تحت سناریوهای مختلف تقاضا با لحاظ تأثیر متغیرهای تلفات، تورم، زنجیره سنی و استهلاك تجهیزات انتقال ارائه مدل علت و معلولی و جریان-انباشت جهت بررسی روند ظرفیت انتقال برق به تفکیک پست‌های مختلف

در گام اول ابتدا چارچوب مسأله موردنظر پژوهش تعریف شده و پس از شناخت دقیق آن، با مطالعه منابع موجود و نظرات صاحب‌نظران، مرز سیستم با کمک نمودار زیرسیستمها مشخص می‌شود. در گام دوم، نمودار علی- معلولی سیستم ایجاد می‌شود. در این گام حلقه‌ها و بازخوردها با علامت مثبت و منفی در شکل نشان داده می‌شوند و همچنین علامت کمان‌ها به لحاظ اثرگذاری مثبت یا منفی تعیین می‌شود. همچنین در این گام پس از شناسایی متغیرهای انباشت و جریان، نمودار جریان و انباشت نیز ترسیم می‌شود.

در گام سوم، با شناسایی ساختار و قوانین تصمیم‌گیری، پارامترها و روابط ریاضی تعیین می‌شوند و در گام چهارم، شبیه‌سازی با کمک نرم‌افزار Vensim PLE صورت می‌گیرد. برای اعتبارسنجی مدل از آزمون‌هایی مانند رفتار مرجع، آزمون ساختاری، آزمون رفتار ساختاری، آزمون رفتار حدی و... استفاده شده و اعتبار مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمونه موردی پژوهش، سیستم انتقال برق کشور ایران و بازه زمانی اعتبارسنجی در آزمون بازسازی رفتار مرجع از سال ۱۳۶۰ تا ۱۴۰۰ است.

در گام پنجم، به منظور آزمایش راهبردها، از مدل برای کمی‌سازی تأثیر راهبردهای پیشنهادی استفاده می‌شود. افق شبیه‌سازی ۲۰ ساله در نظر گرفته شده است.

۲. مدل سازی

۲.۱. نمودار زیرسیستم‌ها

این پژوهش با ارائه یک مدل جدید سیستمی و دینامیک به یک سوال کلیدی پاسخ می‌دهد: با توجه به روند فزاینده تقاضا، توسعه ظرفیت انتقال در کشور به تفکیک پست‌های مختلف چه میزان باشد تا پایداری ظرفیت شبکه انتقال در صنعت برق حفظ شود و صنعت تحت تأثیر کمبود و ناترازی قرار نگیرد؟

ساختار این مقاله بدین صورت سازماندهی شده است که در ابتدا توضیحات مختصر در خصوص رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها ارائه شده و پس از آن با کمک نمودار زیرسیستمها متغیرهای اصلی تأثیرگذار در حوزه صنعت انتقال برق نشان داده شده است. پس از آن فرضیات دینامیکی در قالب نمودار علت و معلولی تبیین و بر اساس نمودار علت و معلولی کلی، نمودار جریان-انباشت ترسیم گردیده است. با تعریف روابط ریاضی بین متغیرها، مدل شبیه‌سازی شده و به اعتبارسنجی آن پرداخته شده است. سپس ذیل ۳ سناریو میزان احداث ظرفیت انتقال در طی ۲۰ سال آینده مورد بحث قرار گرفته است.

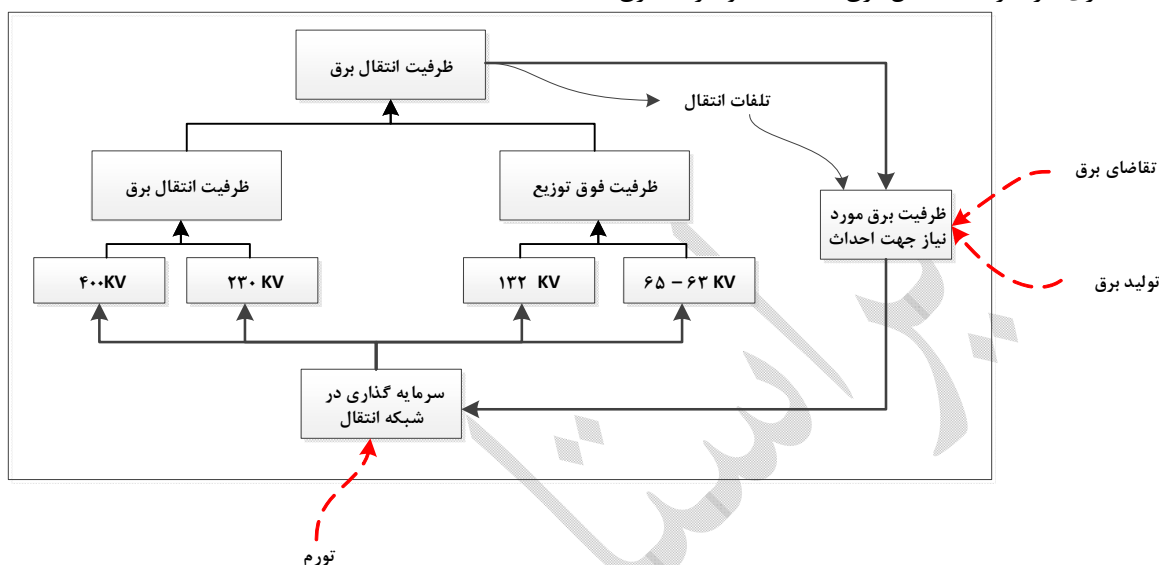
۲. روش شناسی پژوهش

پویایی‌شناسی سیستم‌ها یک رویکرد بین‌رشته‌ای و جامع است که هدف آن درک و حل مسائل سیستماتیک می‌باشد. این حوزه علمی به تحلیل و بررسی تعاملات پیچیده در سیستم‌ها می‌پردازد تا به شناخت بهتر این چالش‌ها و ارائه راه‌حل‌های مؤثر کمک کند [۲۶]. گام‌های اجرای پویایی‌شناسی سیستم‌ها را می‌توان در ۵ گام خلاصه کرد

[۲۷].

در شبکه است. در مدل پژوهش متغیرهایی مانند تقاضای برق، تولید برق و تورم به صورت برونزا به مدل وارد می‌شوند.

نمودار زیرسیستم‌های تبیین شده در شکل ۱ که به گونه‌ای تصویر بزرگ از سیستم مورد بررسی است، ارائه گردیده است. به طور کلی مدل ارائه شده در این پژوهش شامل ۱- ظرفیت پستها و خطوط انتقال برق، ۲- سرمایه‌گذاری در ظرفیت انتقال برق ۳- تقاضا و عرضه برق

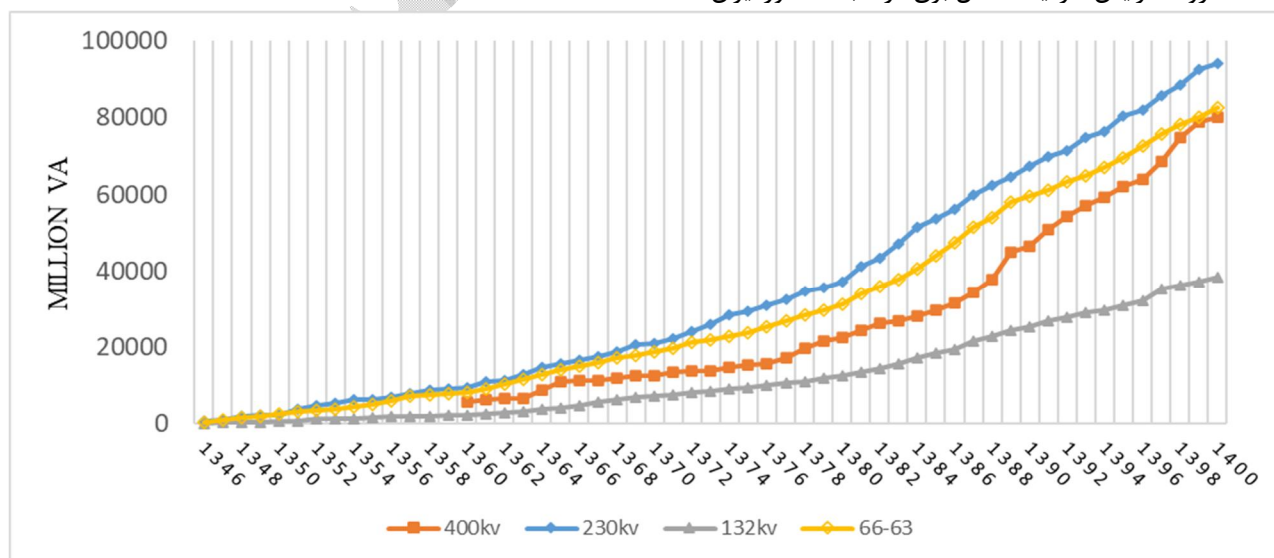


شکل ۱: نمودار زیرسیستم‌های پژوهش

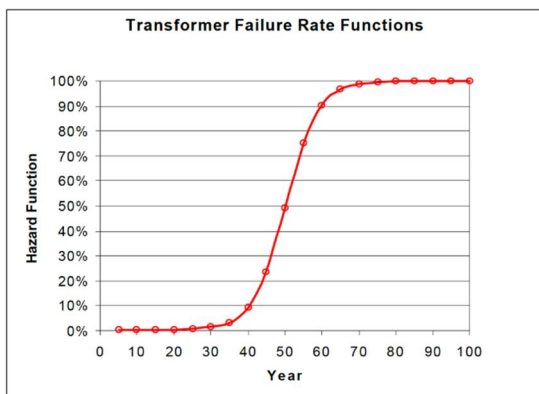
به صورت نمودار شکل ۲ است. همانطور که در نمودار زیر مشخص است، اولین ظرفیتهای انتقال توسعه داده شده مربوط به سال ۱۳۴۶ و ماقبل آن است و این تجهیزات هم اکنون سن بالای ۵۰ سال دارند.

۲.۲. نمودار علت و معلولی

از جمله بازخوردهای در نظر گرفته شده در مدل این پژوهش مشتمل بر سه حلقه تعدیل کننده و دو حلقه فزاینده می‌باشد. دو حلقه متعادلی مدل مربوط به عمر تجهیزات شبکه انتقال هستند. روند افزایش ظرفیت انتقال برق در شبکه کشور ایران

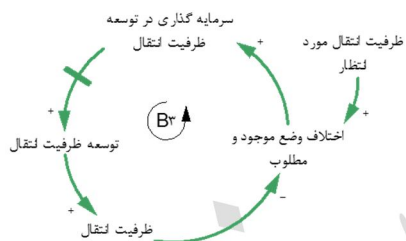


شکل ۲: روند ظرفیت انتقال برق در کشور [۴]



شکل ۴: تابع توزیع هازارد [۲۳]

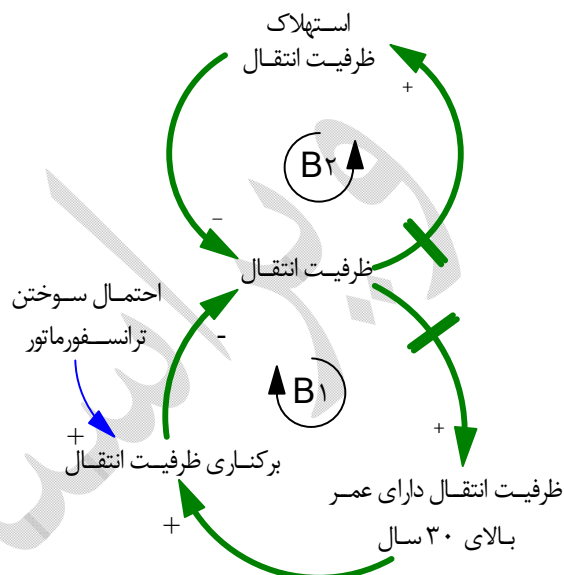
در حلقه تعادلی B3 (شکل ۵) با کاهش ظرفیت انتقال، اختلاف بین ظرفیت مورد انتظار و ظرفیت موجود افزایش و سرمایه‌گذاری نیز افزایش پیدا می‌کند [۸]. با افزایش یافتن سرمایه‌گذاری با تاخیر توسعه ظرفیت و به تبع ظرفیت انتقال نیز بیشتر می‌شود. بنابراین کاهش یافتن ظرفیت انتقال در نهایت و با گذر زمان طی این حلقه جبران خواهد شد.



شکل ۵: حلقه تعادلی سوم تاثیرگذار بر ظرفیت انتقال

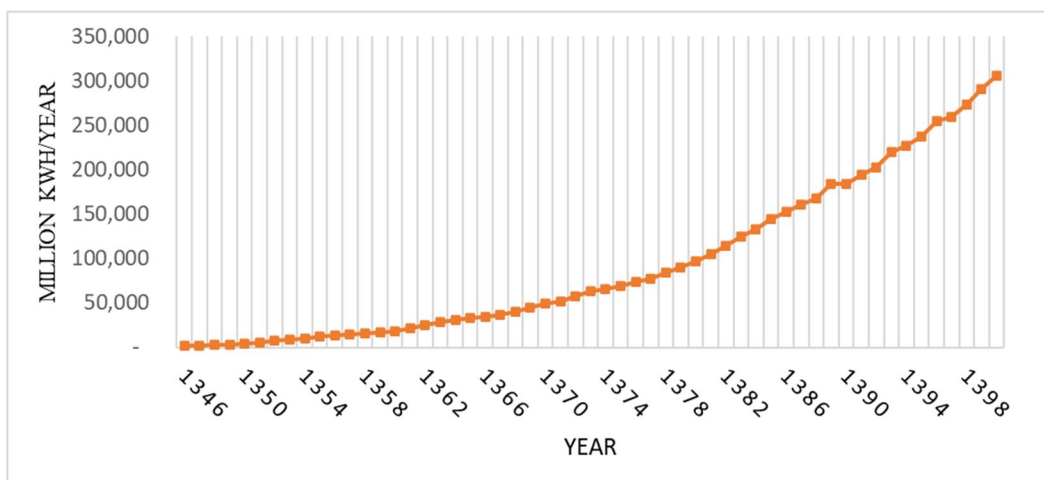
لازم به ذکر است ظرفیت انتقال مورد انتظار بر اساس دو بخش عمده تقاضای برق و ظرفیت تولید برق شکل می‌گیرد. رفتار مقدار تقاضای برق کل شبکه (مشمول بر تقاضای بخش عمومی، خانگی، صنعتی، کشاورزی و روشنایی معابر) در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است.

حلقه تعادلی B1 در شکل ۳ نشان می‌دهد به دلیل افزایش عمر ترانسفورماتورها احتمال سوختن به صورت ناگهانی و بر اساس تابع توزیع هازارد [۲۸] وجود دارد. همچنین در حلقه B2 به دلیل افزایش عمر و تلفات آن، تجهیزات انتقال برق مستهلک می‌شوند [۷].



شکل ۳: حلقه تعادلی دوم و سوم تاثیرگذار بر ظرفیت انتقال

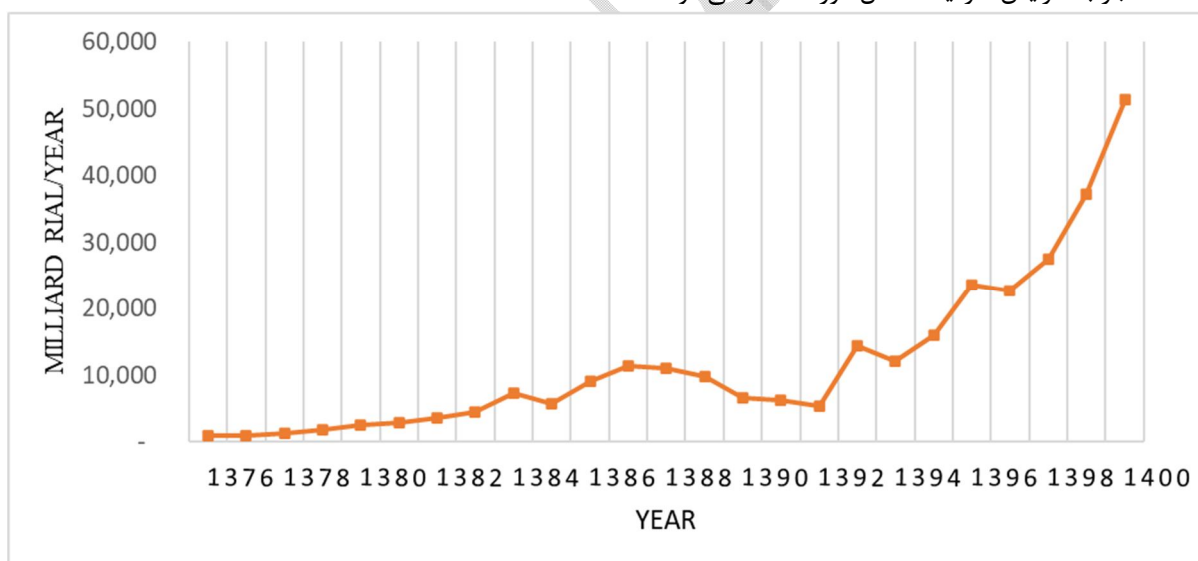
تابع توزیع هازارد بر اساس شکل ۴ می‌باشد. در این نمودار با افزایش عمر ترانسفورماتورها احتمال سوختن آنها با رفتاری S شکل افزایش می‌یابد.



شکل ۶: روند صعودی میزان جمع تقاضای برق در کلیه بخشها [۴]

اختلاف مقدار مورد انتظار و مقدار واقعی منجر به افزایش سرمایه‌گذاری می‌شود. در این نمودار تاثیر تورم حذف شده است و تمامی قیمت‌ها به قیمت ثابت سال ۱۳۷۶ هستند.

نمودار شکل ۷ مقدار واقعی سرمایه‌گذاری (بر مبنای سال پایه ۱۳۷۶) در شبکه انتقال را نشان می‌دهد. یکی از دلایل عمده روند صعودی سرمایه‌گذاری واقعی، افزایش تقاضا و تولید برق است که منجر به افزایش ظرفیت انتقال مورد انتظار می‌شود.



شکل ۷: روند صعودی مقدار واقعی سرمایه‌گذاری در شبکه انتقال به قیمت ثابت سال ۱۳۷۶ [۴]

فزونی می‌یابد. اما در بلندمدت عمر ظرفیت شبکه انتقال بیشتر شده و تلفات شبکه نیز افزایش می‌یابد [۱] و بنابراین نیاز به ظرفیت بیشتری به منظور جبران تلفات می‌باشد که در نهایت منجر به افزایش سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت انتقال می‌شود.

کارایی شبکه انتقال به معنای نسبت توان خروجی شبکه به توان ورودی آن تعریف می‌شود و تلفات شبکه انتقال نیز از اختلاف کارایی با عدد ۱ محاسبه می‌شود [۲۹]. شکل ۸ حلقه فزاینده تاثیر تلفات شبکه انتقال بر توسعه ظرفیت انتقال را نشان می‌دهد. این حلقه که یک حلقه تاثیرگذار در بلندمدت می‌باشد، نشان می‌دهد هرچه سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت انتقال افزایش یابد، توسعه ظرفیت بیشتر شده و ظرفیت نیز

[illegible]

The graph illustrates the cumulative value added in the manufacturing sector over time for four different voltage levels. The 230kv line (blue) shows the most significant and steady growth, starting around 1375 and reaching over 20 million VA by 1400. The 400kv line (orange) remains at zero until approximately 1389, after which it rises sharply to about 13 million VA. The 66-63 line (yellow) shows a consistent upward trend from 1375, reaching nearly 18 million VA. The 132kv line (grey) shows the slowest growth, starting around 1375 and reaching about 7 million VA by 1400.

Year	400kv (MILLION VA)	230kv (MILLION VA)	132kv (MILLION VA)	66-63 (MILLION VA)
1370	0	0	0	0
1373	0	0	0	0
1376	0	1000	0	0
1379	0	2500	500	2500
1382	0	5000	1000	4000
1385	0	7000	1500	6000
1388	0	9000	2000	8000
1391	6000	11000	2500	10000
1394	11000	15000	4000	14000
1397	11500	18000	6000	16500
1400	13000	21000	7000	18000

```

graph TD
    A[توسعه ظرفیت انتقال] -- "+" --> B[ظرفیت انتقال]
    B -- "+" --> C[ظرفیت انتقال دارای عمر بالای ۳۰ سال]
    C -- "+" --> D[تلفات شبکه انتقال]
    D -- "+" --> E[تصمیم به نو سازی شبکه انتقال]
    E -- "+" --> A
    F[تلفات مدختر در راهبردها] -- "blue arrow" --> E
  
```

شکل ۱۰ نیز حلقه فراینده دوم یعنی تاثیر تلفات شبکه و تلفات مورد انتظار در راهبردها را در توسعه ظرفیت انتقال نشان می‌دهد. هر چه ظرفیت توسعه داده شده بیشتر شود، در بلندمدت عمر این تجهیزات بالا رفته و تلفات آنها افزایش می‌یابد [۱] و [۳۰]. اختلاف مقدار تلفات واقعی و تلفات مدنظر، راهبردها تصمیم به نوسازی و سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت جدید را افزایش می‌دهد و منجر به افزایش ظرفیت انتقال خواهد شد.

9

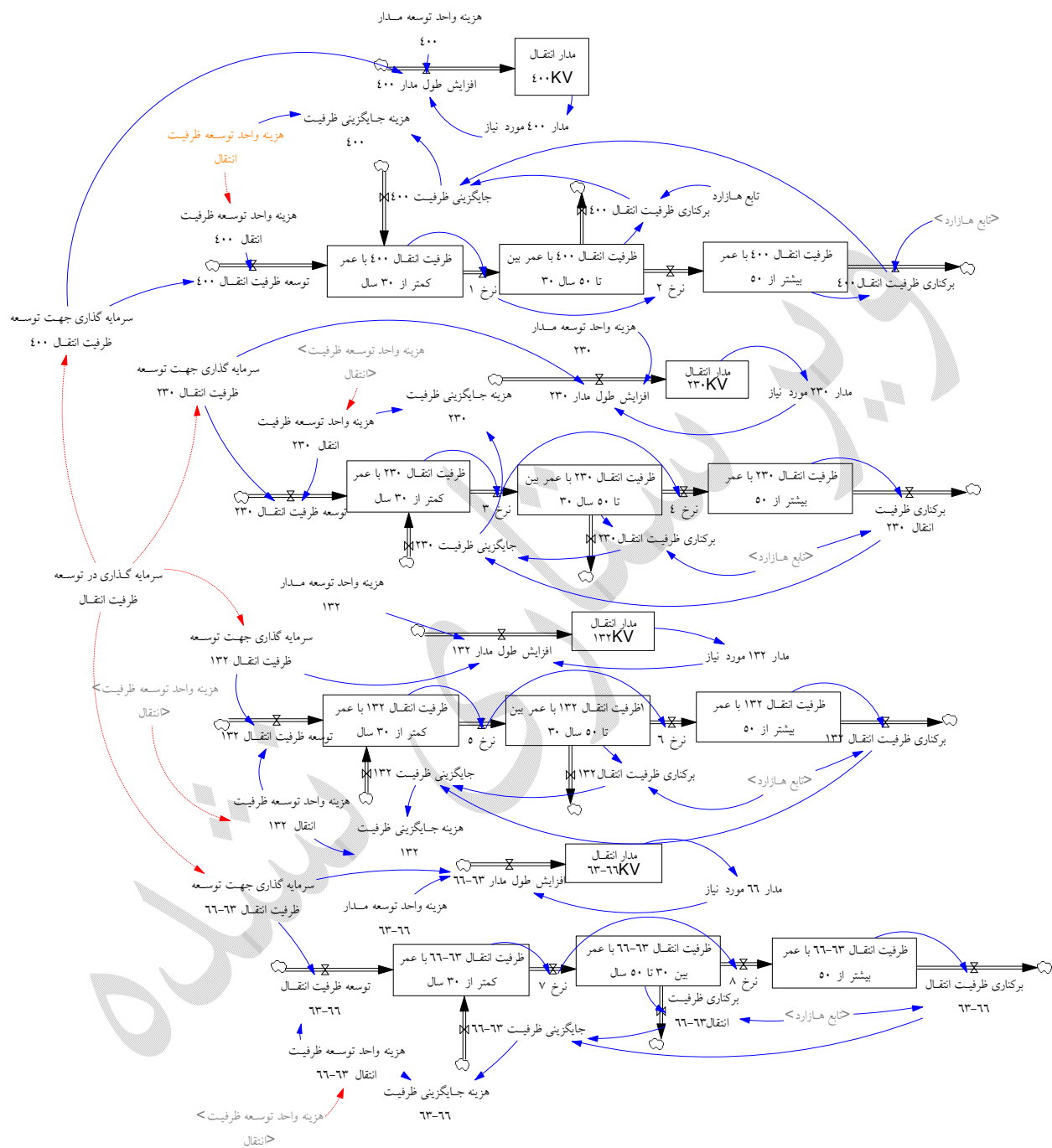
می‌شود. در این رابطه TC_i به معنای مقدار ظرفیت انتقال با عمر i سال و A نشان دهنده متوسط عمر شبکه انتقال است.

$$A = \frac{\sum_i i \times TC_i}{\sum_i i} \quad (3)$$

$$= \frac{1 \times TC_1 + 2 \times TC_2 + \dots + TC_{100}}{1 + 2 + \dots + 100}$$

شکل ۱۲: نمودار جریان انباشت حاوی متغیرهای تاثیر گذار بر روی ظرفیت انتقال

زنجیره سنی ظرفیت انتقال



شکل ۱۳؛ نمودار جریان انباشت قسمت زنجیره سنی ظرفیت انتقال

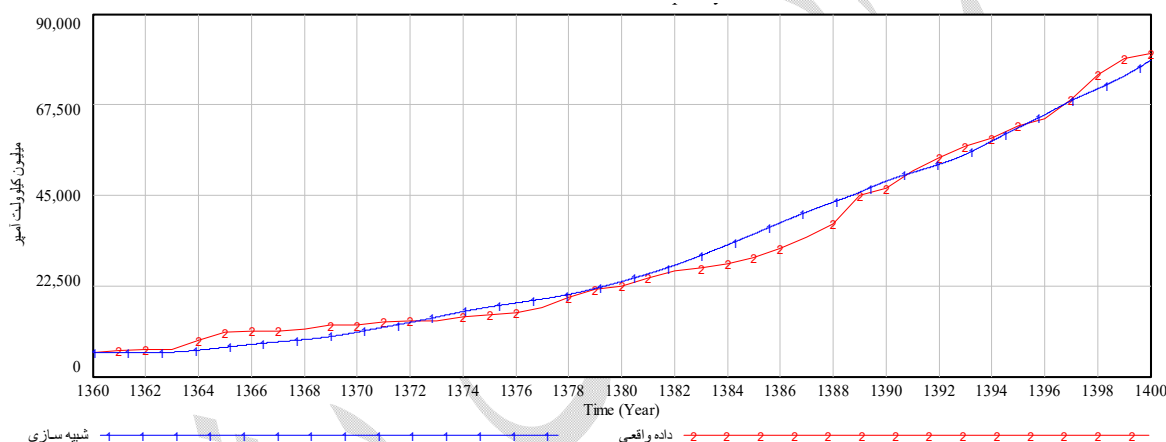
۳. بحث و بررسی

۱.۳. اعتبارسنجی مدل

در این بخش پس از شبیه‌سازی مدل، به اعتبارسنجی آن پرداخته شده است. استرمن در کتاب پویایی شناسی کسب و کار آزمون‌های حدی، ارزیابی ساختاری، بازسازی رفتار مرجع و ... را برای کسب اطمینان از اعتبار مدل در دستیابی به اهداف موردنظر معرفی کرده است [۲۷]. در این پژوهش نیز اعتبار مدل با استفاده از انواع روشها مانند ارزیابی ساختاری، آزمون حدی و بازسازی رفتار مرجع مورد تایید قرار گرفت که

در این جا تنها به ارائه نتایج آزمون بازسازی رفتار مرجع بسنده می‌شود.

در آزمون بازسازی رفتار مرجع، نتایج شبیه‌سازی مدل با داده های تاریخی موجود برای متغیرهای اصلی مقایسه می‌شود. مدل پژوهش حاضر توانست رفتار متغیرهای ظرفیت انتقال را با دقت خوبی شبیه‌سازی کند. به عنوان نمونه شکل ۱۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده تاریخی متغیر ظرفیت انتقال 400KV را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود مدل توانسته رفتار این متغیر را با دقتی بالای ۹۰٪ بازسازی نماید. مقدار خطای بازسازی رفتار برای متغیرهای ظرفیت انتقال ۲۳۰، ۱۳۲ و ۶۳-۶۶ کیلوولت نیز ۹.۹٪، ۶.۹٪ و ۸.۴٪ است.



شکل ۱۴: مقایسه داده های واقعی و مقدار شبیه‌سازی متغیر ظرفیت انتقال پستهای ۴۰۰KV (خط^۱ (MAE): 6.9%)

۳.۲. تحلیل آینده صنعت انتقال برق با تحلیل سناریو

در این قسمت، ۳ سناریو مطابق به جدول ۲ تعریف شده و در ادامه نتایج عددی آنها مقایسه و ارائه شده است.

جدول ۲: سناریوهای تعریف شده بر روی تقاضا و توسعه ظرفیت انتقال برق

سناریو	تقاضای برق	توسعه ظرفیت انتقال
سناریو ۱	مطابق با روند گذشته ادامه یابد	توسط مدل و بر اساس میزان کمبود ظرفیت شبیه سازی شود.
سناریو ۲	روندی خوشبینانه مطابق با پیش‌بینی سلیمیان و همکاران (۱۴۰۰) [۳۱]	توسط مدل و بر اساس میزان کمبود ظرفیت شبیه سازی شود.
سناریو ۳	مطابق با روند گذشته ادامه یابد	بر اساس متوسط ۵ سال گذشته توسعه ظرفیت صورت گیرد.

^۱ Mean Absolute Error

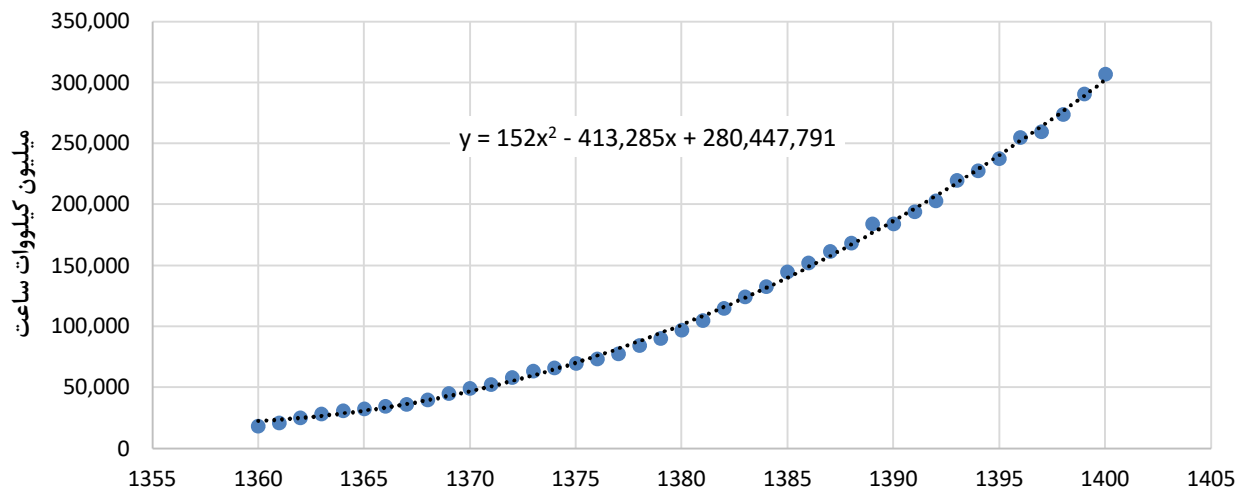
• سناریوی اول: ادامه روند فعلی تقاضای برق تا

سال ۱۴۲۰

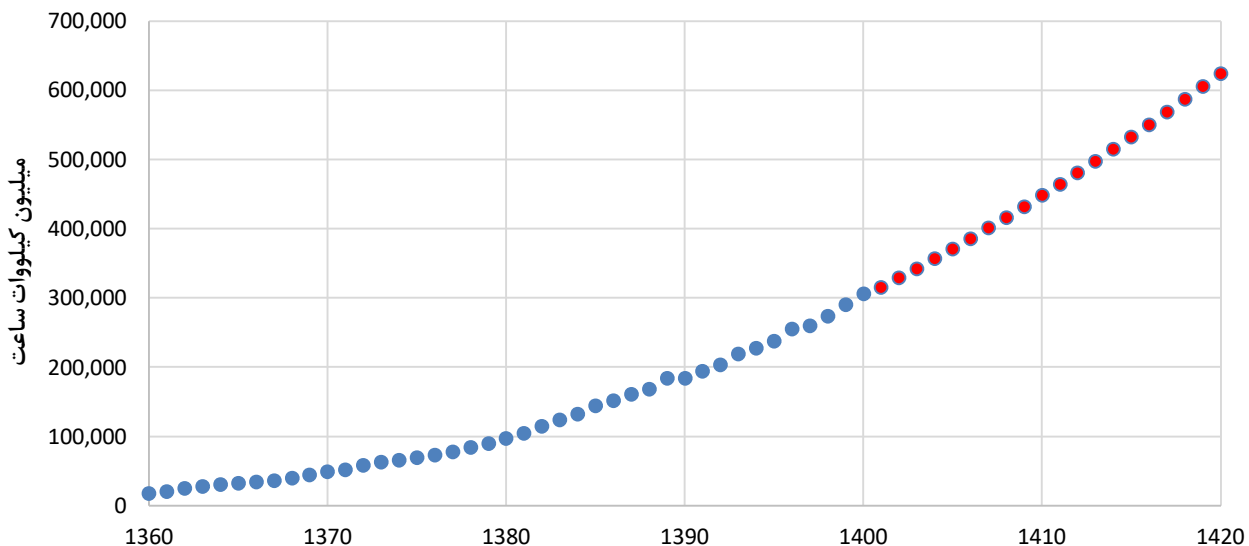
روند تقاضای برق کشور از سال ۱۳۶۰ تا ۱۴۰۰ به صورت شکل ۱۵ است [۴]. در صورتی که بخواهیم ارتباط بین تقاضای برق و سال را با یک رابطه رگرسیونی برازش کنیم، معادله ۵ بهترین ارتباط را نشان می‌دهد.

$$y = 152x^2 - 413,285x + 280,447,791 \quad (5)$$

اگر با استفاده از معادله ۵ به پیش بینی تقاضای برق برای ۲۰ سال آینده بپردازیم، روند تقاضا به صورت نمودار قرمز رنگ شکل ۱۶ خواهد بود.



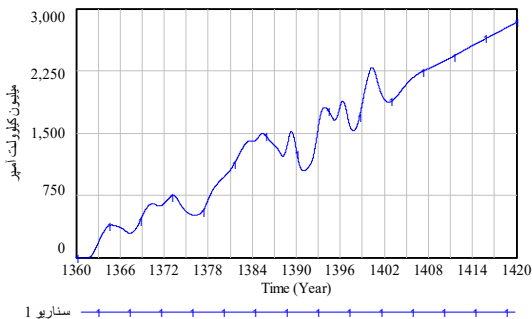
شکل ۱۵: رابطه ریاضی درجه دوم بر اساس داده های تقاضای برق کشور در ۴۰ سال گذشته



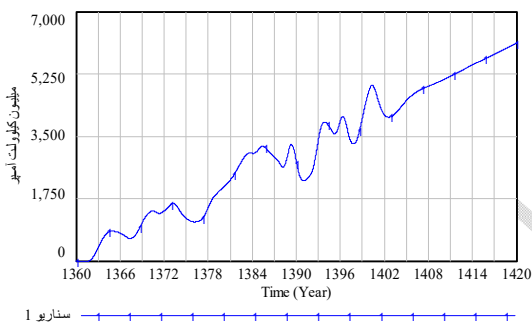
شکل ۱۶: پیش بینی مصرف برق کشور با توجه به روند گذشته با استفاده از تابع غیرخطی درجه دوم

شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ است و جهت جبران کمبود ظرفیت می‌بایست بر طبق نتایج شبیه سازی زیر نسبت به احداث

با اعمال سناریوی ادامه روند جاری، نتایج شبیه‌سازی برای متغیرهای احداث ظرفیت به صورت نمودارهای ارائه شده در



شکل ۱۹: ظرفیت انتقال ۱۳۲KV در سناریوی اول



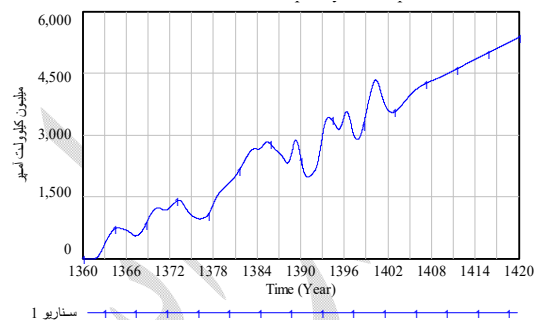
شکل ۲۰: ظرفیت انتقال 66-63KV در سناریوی اول

• سناریوی دوم: روند کاهشی تقاضای برق تا سال

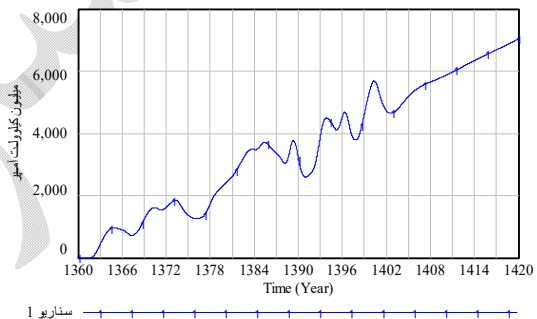
۱۴۲۰ (سناریوی خوشبینانه)

سلیمیان و همکاران (۱۴۰۰) به پیش بینی تقاضای برق در سال ۱۴۲۰ پرداخته‌اند [۳۱]. ایشان تقاضای برق کشور در سال ۱۴۲۰ را با در نظر گرفتن صرفه جویی حداکثری و به صورت خوشبینانه ۴۸۱/۷۱۰ تراوات ساعت پیش بینی کرده‌اند. با در نظر گرفتن پیشنهاد این تحقیق سناریوی دوم به صورت نمودار سبز رنگ شکل ۲۱ در نظر گرفته شده است.

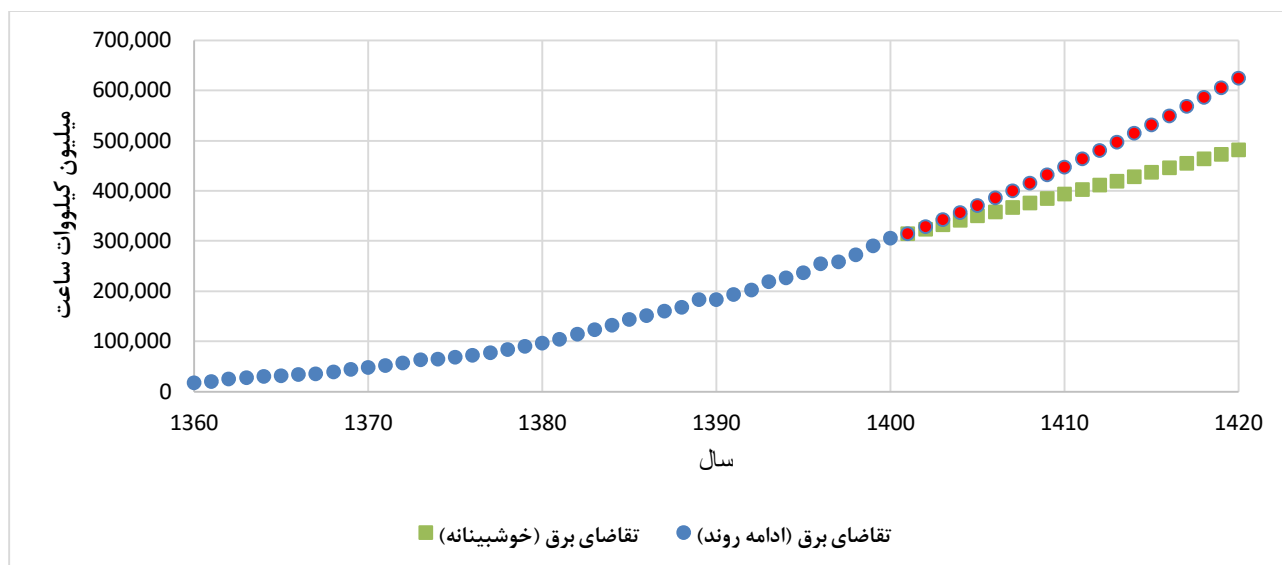
ظرفیت در ظرفیتهای چهارگانه اقدام شود. بنابراین می توان گفت در صورتی که میزان تقاضا مطابق با روند شکل ۱۶ افزایش یابد، جهت جلوگیری از کمبود ظرفیت انتقال، می‌بایست سرمایه‌گذاری‌ها به گونه‌ای باشد که تا سال ۱۴۲۰ مقدار ظرفیت انتقال به میزان ۱۲۸ درصد افزایش یابد.



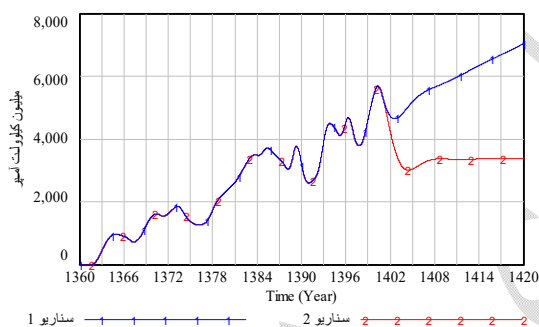
شکل ۱۷: ظرفیت انتقال ۴۰۰KV در سناریوی اول



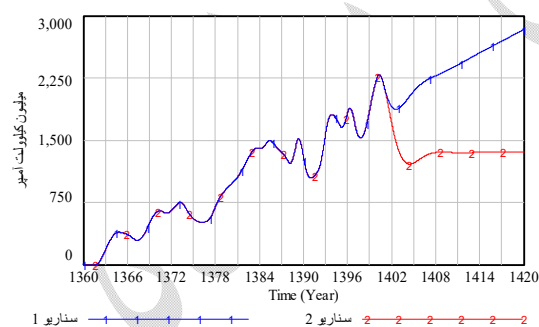
شکل ۱۸: ظرفیت انتقال ۲۳۰KV در سناریوی اول



شکل ۲۱؛ پیشبینی مصرف برق کشور با توجه به روند خوش بینانه [۳۱]

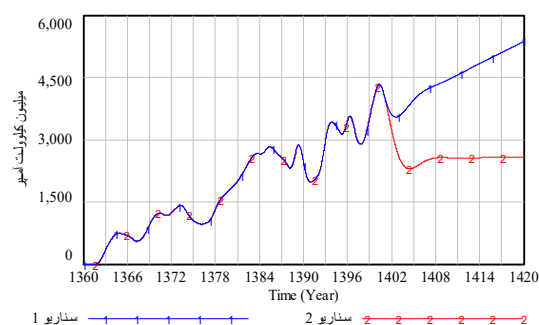


شکل ۲۳؛ ظرفیت انتقال ۲۳۰KV در دو سناریو



شکل ۲۴؛ ظرفیت انتقال ۱۳۲KV در دو سناریو

با اعمال این سناریو نتایج شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ در خصوص متغیرهای مدل حاصل می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد در صورتی که تقاضای برق طبق سناریوی خوشبینانه روند با شیب کمتری نسبت به ادامه شرایط فعلی داشته باشد، نیاز به احداث ظرفیت انتقال به میزان قابل توجهی کاهش پیدا خواهد کرد و سیاست بهبود در این سناریو بدین صورت تعریف می‌شود که سرمایه‌گذاری‌ها باید به گونه‌ای باشد که ظرفیت انتقال تا سال ۱۴۲۰ به میزان ۸۰ درصد افزایش یابد.



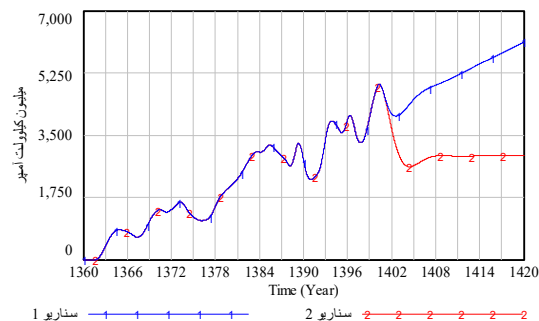
شکل ۲۲؛ ظرفیت انتقال ۴۰۰KV در دو سناریو

• سناریوی سوم: ادامه روند فعلی تقاضای برق و

ادامه روند احداث ظرفیت طبق روند ۵ ساله

گذشته

در این سناریو فرض شود روند تقاضای برق مانند سناریوی اول افزایشی باشد و احداث ظرفیت انتقال از سال ۱۴۰۰ به بعد به جای آن که در مدل تعیین شود به صورت برونزا و هرساله به اندازه میانگین احداث ۵ سال ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ ادامه یابد (مطابق جدول ۳).



شکل ۲۵: ظرفیت انتقال 66-63KV در دو سناریو

جدول ۳: مقدار احداث ظرفیت شبکه انتقال با توجه به میانگین مقدار ۵ ساله (مگاوات آمپر)

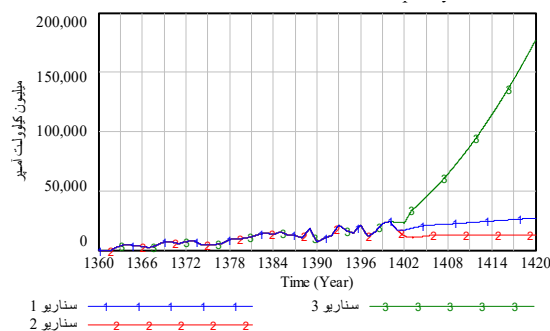
سال	احداث 400KV	احداث 230KV	احداث 132KV	احداث 66-63KV
۱۳۹۶	۱۹۱۰	۱۵۷۵	۱۳۸۶	۳۳۳۸
۱۳۹۷	۴۶۷۰	۳۶۷۶	۳۰۲۷	۳۰۵۰
۱۳۹۸	۶۲۴۵	۲۸۱۴	۹۴۹	۲۴۶۲
۱۳۹۹	۴۰۵۰	۴۰۶۰	۹۱۰	۱۸۹۹
۱۴۰۰	۱۱۴۵	۱۷۲۳	۱۲۲۳	۲۵۵۶
میانگین ۵ ساله	۳۶۰۴	۲۷۷۰	۱۴۹۹	۲۶۶۱

شکل ۲۶: اختلاف بین ظرفیت مورد نیاز و ظرفیت ایجاد شده در

سناریوی سوم

جدول ۴: مقدار ایجاد ظرفیت به تفکیک سناریوهای مختلف و پستهای مختلف ارائه می‌دهد.

در این شرایط نتایج شکل ۲۶ در خصوص میزان کمبود ظرفیت نسبت مقدار قابل انتظار حاصل می‌گردد. مهمترین نکته در خصوص ادامه این شرایط اختلافی است که بین میزان ظرفیت موجود و ظرفیت مورد انتظار بوجود می‌آید. از آنجا که در این سناریو تقاضای برق با رفتاری نمایی در حال افزایش است، ادامه میانگین رفتار ۵ ساله گذشته قادر به جبران تقاضا نیست.



جدول ۴: میزان احداث ظرفیت انتقال پس از اجرای ۳ سناریوی تحقیق

سال	احداث ۴۰۰ کیلوولت			احداث ۲۳۰ کیلوولت			احداث ۱۳۲ کیلوولت			احداث ۶۶-۶۳ کیلوولت		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
۱۴۰۱	۴۰۶۵	۴۰۶۵	۳۶۰۴	۵۳۲۸	۲۷۷۰	۲۱۴۶	۲۱۴۶	۱۴۹۹	۴۶۲۵	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۰۲	۳۶۰۸	۳۲۴۵	۳۶۰۴	۴۷۲۹	۲۷۷۰	۱۹۰۵	۱۷۱۳	۱۴۹۹	۳۶۹۲	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۰۳	۳۵۶۶	۲۵۹۱	۳۶۰۴	۴۶۷۴	۲۷۷۰	۱۸۸۳	۱۳۶۸	۱۴۹۹	۲۹۴۸	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۰۴	۳۷۴۰	۲۳۱۷	۳۶۰۴	۴۹۰۲	۲۷۷۰	۱۹۷۵	۱۲۲۳	۱۴۹۹	۲۶۳۶	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۰۵	۳۹۵۲	۲۳۱۸	۳۶۰۴	۵۱۸۰	۲۷۷۰	۲۰۸۶	۱۲۲۴	۱۴۹۹	۲۶۳۷	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۰۶	۴۱۱۷	۲۴۲۱	۳۶۰۴	۵۳۹۷	۲۷۷۰	۲۱۷۴	۱۲۷۸	۱۴۹۹	۲۷۵۵	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۰۷	۴۲۲۸	۲۵۱۴	۳۶۰۴	۵۵۴۳	۲۷۷۰	۲۲۳۳	۱۳۲۷	۱۴۹۹	۲۸۶۰	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۰۸	۴۳۱۰	۲۵۵۹	۳۶۰۴	۵۶۴۹	۲۷۷۰	۲۲۷۵	۱۳۵۱	۱۴۹۹	۲۹۱۲	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۰۹	۴۳۸۵	۲۵۶۸	۳۶۰۴	۵۷۴۸	۲۷۷۰	۲۳۱۵	۱۳۵۶	۱۴۹۹	۲۹۲۲	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۰	۴۴۶۶	۲۵۶۱	۳۶۰۴	۵۸۵۴	۲۷۷۰	۲۳۵۸	۱۳۵۲	۱۴۹۹	۲۹۱۴	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۱	۴۵۵۴	۲۵۵۳	۳۶۰۴	۵۹۶۹	۲۷۷۰	۲۴۰۴	۱۳۴۸	۱۴۹۹	۲۹۰۵	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۲	۴۶۴۷	۲۵۵۳	۳۶۰۴	۶۰۹۲	۲۷۷۰	۲۴۵۴	۱۳۴۸	۱۴۹۹	۲۹۰۵	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۳	۴۷۴۲	۲۵۵۸	۳۶۰۴	۶۲۱۶	۲۷۷۰	۲۵۰۴	۱۳۵۱	۱۴۹۹	۲۹۱۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۴	۴۸۳۵	۲۵۶۴	۳۶۰۴	۶۳۳۸	۲۷۷۰	۲۵۵۳	۱۳۵۴	۱۴۹۹	۲۹۱۷	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۵	۴۹۲۳	۲۵۶۶	۳۶۰۴	۶۴۵۴	۲۷۷۰	۲۶۰۰	۱۳۵۵	۱۴۹۹	۲۹۱۹	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۶	۵۰۱۰	۲۵۶۷	۳۶۰۴	۶۵۶۸	۲۷۷۰	۲۶۴۵	۱۳۵۵	۱۴۹۹	۲۹۲۰	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۷	۵۰۹۸	۲۵۶۸	۳۶۰۴	۶۶۸۳	۲۷۷۰	۲۶۹۲	۱۳۵۶	۱۴۹۹	۲۹۲۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۸	۵۱۸۷	۲۵۶۹	۳۶۰۴	۶۷۹۹	۲۷۷۰	۲۷۳۹	۱۳۵۶	۱۴۹۹	۲۹۲۲	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۱۹	۵۲۷۷	۲۵۷۱	۳۶۰۴	۶۹۱۷	۲۷۷۰	۲۷۸۶	۱۳۵۷	۱۴۹۹	۲۹۲۵	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱
۱۴۲۰	۵۳۶۷	۲۵۷۳	۳۶۰۴	۷۰۳۶	۲۷۷۰	۲۸۳۴	۱۳۵۸	۱۴۹۹	۲۹۲۷	۲۶۶۱	۲۶۶۱	۲۶۶۱

۴. جمع بندی و نتیجه گیری

به دلیل کثرت متغیرهای تاثیرگذار در صنعت انتقال برق، برنامه‌ریزی کوتاه مدت و بلند مدت در خصوص مقدار احداث، زمان احداث و مکان آن همواره با چالشهای متعددی مواجه بوده است. این پژوهش ضمن مرور تحقیقات پیشین داخلی و خارجی، چارچوب مناسبی را جهت تحلیل سیاستهای مربوط به مقدار سرمایه‌گذاری در صنعت انتقال ارائه می‌دهد. نمودار زیرسیستم های این پژوهش متغیرهای تورم، تقاضا و عرضه برق را به صورت برونزا در نظر گرفته است. در نمودار علت و

معلولی متغیرهای مهمی مانند ظرفیت موجود انتقال برق، استهلاك تجهیزات، سن تجهیزات، هزینه تعمیرات و نگهداری و احتمال سوختن ترانسفورماتورها در نظر گرفته شده و ارتباطات مستقیم و غیرمستقیم بین آنها مدل سازی شده است. پس از آن مدل جریان-انباشت ترسیم و پس از ورود روابط ریاضی بین متغیرها به شبیه‌سازی و اعتبارسنجی آن پرداخته شده است. نتایج آزمون بازسازی رفتار مرجع حاکی از دقت بالای ۹۰ درصد مدل در شبیه‌سازی رفتار ۴۰ ساله گذشته ظرفیت های انتقال بود و پس از تایید اعتبار مدل به شبیه‌سازی ۳ سناریو در این حوزه پرداخته شد.

- (۱) ادامه روند فعلی تقاضای برق تا سال ۱۴۲۰
 - (۲) روند کاهشی تقاضای برق تا سال ۱۴۲۰ (سناریوی خوشبینانه)
 - (۴) ادامه روند فعلی تقاضای برق و ادامه روند احداث ظرفیت طبق روند ۵ ساله گذشته
- نتایج عددی حاصل از اجرای ۳ سناریوی فوق در افق ۲۰ ساله در جدول ۵ برای متغیرهای بخش اصلی مدل ارائه گردیده است. ستون اول در این جدول مقدار متغیر در سال ۱۴۰۰ را نشان می‌دهد و ستونهای بعدی مقدار هر کدام از متغیرها در سال ۱۴۲۰ و درصد تغییر آنها نسبت به سال ۱۴۰۰ را نشان داده است.

جدول ۵: نتایج حاصل از اجرای ۳ سناریوی پژوهش

متغیر*	سال ۱۴۰۰	سناریوی اول (سال ۱۴۲۰)	سناریوی دوم (سال ۱۴۲۰)	سناریوی سوم (سال ۱۴۲۰)	
		مقدار	% تغییر*	مقدار	% تغییر
کل ظرفیت انتقال	۲۹۵۶۴۲	۶۷۴۲۹۹	۱۲۸٪	۵۳۱۷۲۰	۸۰٪
ظرفیت انتقال ۴۰۰KV	۸۰۲۰۳	۱۶۸۰۳۷	۱۱۰٪	۱۳۲۱۸۳	۶۵٪
ظرفیت انتقال ۲۳۰KV	۹۴۳۱۸	۲۲۲۰۴۷	۱۳۵٪	۱۷۵۰۴۸	۸۶٪
ظرفیت انتقال ۱۳۲KV	۳۸۳۶۰	۹۱۳۶۸	۱۳۸٪	۷۲۴۳۷	۸۹٪
ظرفیت انتقال ۶۳-۶۶ KV	۸۲۷۶۱	۱۹۲۸۴۷	۱۳۳٪	۱۵۲۰۵۳	۸۴٪
اختلاف بین ظرفیت مورد نیاز و ظرفیت ایجاد شده	۲۴۱۲۵	۲۷۰۹۱	۱۲٪	۱۲۷۰۸	-۴۷٪

* واحد متغیرها (MVA) می‌باشد و در سناریوها درصد تغییر نسبت به سال ۱۴۰۰ محاسبه شده است.

اما در سناریوی سوم، که در آن هم روند تقاضای برق افزایشی است و هم مقدار احداث ظرفیت سالیانه بر اساس میانگین پنج سال گذشته ادامه می‌یابد، در سال ۱۴۲۰ بیشترین اختلاف بین ظرفیت انتقال مورد نیاز و ظرفیت انتقال واقعی به وجود خواهد آمد و پایداری ظرفیت انتقال برق به طور معناداری تنزل می‌کند. نتایج عددی سه سناریوی اجرا شده بر روی مدل در خصوص میزان احداث ظرفیت انتقال به تفکیک نوع پستها در جدول ۴ ارائه شده است.

نتایج حاصل از اجرای سه سناریوی پژوهش، طبق جدول شماره ۵ مقاله، نشان می‌دهد که در سناریوی اول، که بر اساس ادامه روند فعلی تقاضای برق تا سال ۱۴۲۰ طراحی شده است، مقدار کل ظرفیت انتقال به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این رشد بر اساس تقاضای برق ناشی از افزایش جمعیت کشور و توسعه اقتصادی آن است. متغیرهای توسعه ظرفیت انتقال برق نیز به صورت هدف‌جو افزایش یافته‌اند. متوسط سن شبکه انتقال نیز به صورت هدف‌جو در حال افزایش است و در نتیجه، نیاز به جایگزینی شبکه انتقال نیز به طور نمایی افزایش خواهد یافت. بنابراین، اختلاف بین ظرفیت مورد نیاز و ظرفیت موجود نیز رو به فزونی خواهد بود. در سناریوی دوم، در افق ۲۰ ساله، مقدار تقاضای برق به دلیل صرفه‌جویی یا تغییرات مدیریتی به طور خوش‌بینانه با شیب کاهشی افزایش می‌یابد. اگر مقدار احداث ظرفیت انتقال سالیانه با استفاده از مدل محاسبه شود، کمترین فاصله بین ظرفیت مورد نیاز و ظرفیت واقعی حاصل خواهد شد که به عنوان یک سیاست مناسب برای پیش‌بینی ظرفیت انتقال در آینده به شمار می‌رود.

پانویسها

1. Hazard function
2. Stock and flow diagram
3. Causal-loop diagram

References

- [1] Rajabi Mashhadi, M., 2018. Power Industry Strategies for Supplying

- [https://doi.org/10.1016/S0957-1787\(98\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0957-1787(98)00010-1)
- [10] Sha, M., Chen, S., Gao, M., Chen, Y., Wang, Z., Tian, Y., 2018a. Research on the Investments Allocation of Comprehensive Plan of Power Grid Enterprises under the Electricity Transmission and Distribution Price Reformation, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. p. 42022.
- [11] Ford, A., 2001. Waiting for the boom: a simulation study of power plant construction in California. *Energy Policy* 29, 847–869. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00035-0)
- [12] Dehghan, H., Amin-Naseri, M.R., Nahavandi, N., 2021. A system dynamics model to analyze future electricity supply and demand in Iran under alternative pricing policies. *Util Policy* 69, 101165. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101165>
- [13] Li, J., Luo, Y., Wei, S., 2022. Long-term electricity consumption forecasting method based on system dynamics under the carbon-neutral target. *Energy* 244, 122572. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122572>
- [14] Rezaei, H., Manzour, D., 2009. Modeling Electric Energy Demand in the Iran with a System Dynamics Approach, in: 7th National Energy Conference (Energy Sustainability, Supply Security, Demand Management, and Consumption Pattern Reform), Tehran. [In Persian].
- [15] Qudrat-Ullah, H., 2013. Understanding the dynamics of electricity generation capacity in Canada: A system dynamics approach. *Energy* 59, 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.029>
- [16] Mohaghar, A., Najafzadeh, K., 2017. A System Dynamics Model for Enhancing Capacity of Electricity Generation in Transformers in the Power Network of Iran, in: 5th International Transformer Conference and Exhibition. Presidential Cultural Institution. [In Persian].
- [2] Strbac, G., Pollitt, M., Konstantinidis, C.V., Konstantelos, I., Moreno, R., Newbery, D., Green, R., 2014. Electricity transmission arrangements in Great Britain: Time for change? *Energy Policy* 73, 298–311.
- [3] Kucuksayacigil, F., Min, K.J., 2021. A lattice method for jump-diffusion process applied to transmission expansion investments under demand and distributed generation uncertainties. *Energy Systems* 12, 773–800.
- [4] Tavanir, 2022. 55 Years of Iran's Power Industry (1967-2021). [In Persian].
- [5] Ude, N.G., Yskandar, H., Graham, R.C., 2019. A comprehensive state-of-the-art survey on the transmission network expansion planning optimization algorithms. *IEEE Access* 7, 123158–123181.
- [6] Contreras, J., Gross, G., Arroyo, J.M., Muñoz, J.I., 2009. An incentive-based mechanism for transmission asset investment. *Decis Support Syst* 47, 22–31.
- [7] Y He, Y.X., Jiao, J., Chen, R.J., Shu, H., 2018. The optimization of Chinese power grid investment based on transmission and distribution tariff policy: A system dynamics approach. *Energy Policy* 113, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.062>
- [8] Zambrano, C., Arango-Aramburo, S., Olaya, Y., 2019. Dynamics of power-transmission capacity expansion under regulated remuneration. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 104, 924–932.
- [9] Dismukes, D.E., Cope, R.F., Mesyanzhinov, D., 1998. Capacity and economies of scale in electric power transmission. *Util Policy* 7, 155–162.

- electricity generation mix. *Appl Energy*, vol. 146, pp. 217–229.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.076>.
- [24] Dianat, F., khodakarami, vahid, Hosseini, S.H., Shakouri Ganjavi, H., 2021. Systemic Modeling of Renewable Electricity Generation Expansion Planning in Competition with Conventional Electricity. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research* 7. [In Persian].
- [25] Lin, W., Lu, J., Zhu, J., Xu, L., 2022. Research on the Sustainable Development and Dynamic Capabilities of China's Aircraft Leasing Industry Based on System Dynamics Theory. *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1806.
<https://doi.org/doi: 10.3390/su14031806>.
- [26] Suryani E., Hendrawan RA., Adipraja, PF., Indraswari, R., 2020. System dynamics simulation model for urban transportation planning: a case study. *International Journal of Simulation Modelling*. Vol. 19, pp. 5-16.
<http://dx.doi.org/10.2507/IJSIMM19-1-493>
- [27] Sterman, J., 2002. *System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*.
- [28] PE, W.H.B., 2003b. Analysis of transformer failures, in: 36th Annual Conference of International Association of Engineering Insurers–Stockholm.
- [29] Arri, E., Locci, N., Mocci, F., 1990. Measurement of transformer power losses and efficiency in real working conditions, in: *Conference on Precision Electromagnetic Measurements*. IEEE, pp. 164–165.
<https://doi.org/10.1109/CPEM.1990.109973>
- [30] Romero-Quete, A.A., Mombello, E.E., Rattá, G., 2016. Assessing the loss-of-insulation life of power transformers by estimating their historical loads and ambient temperature profiles using Iran. *Management and Development Process* 30. [In Persian].
- [17] Ahmadvand, A.M., Kalantari Hermzi, M., 2019. Dynamic Investment Model in Power Distribution Capacity Development, in: *The Second National Conference of the Iranian System Dynamics Society*, Tehran. [In Persian].
- [18] Monjazez, M., Rezaei Movahed, B., 2019. Forecasting Electricity Losses in Transmission and Distribution Grids: System Dynamics Approach Compared to Econometric Method. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research* 5. [In Persian].
- [19] Ahmad, S., Mat Tahar, R., Muhammad-Sukki, F., Munir, A.B., Abdul Rahim, R., 2016. Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, 29–37.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.034>
- [20] Wang, Y., Zhang, F., Zhang, Y., Wang, X., Fan, L., Song, F., Ma, Y. and Wang, S., 2019. Chinese power-grid financial capacity based on transmission and distribution tariff policy: A system dynamics approach. *Utilities Policy*, 60, p.100941.
<https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.100941>
- [21] Mashayekhi, A., 2019. *System dynamics: A Systemic Perspective*. 4th ed. Aryana Qalam Publications. ISBN: 978-600-7677-25-4. [In Persian].
- [22] Nahavandi, N., Najafzadeh, K., 2012. Comparison of demand side control and supply side Development of Electricity Energy by System Dynamics Approach. *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, vol. 22, pp. 341–358. [In Persian].
- [23] Shahmohammadi, M. S., Yusuff, R., Keyhanian, S., Shakouri, H. G., 2015. A decision support system for evaluating effects of Feed-in Tariff mechanism: Dynamic modeling of Malaysia's

ANNs and Monte Carlo simulations.
Dyna (Medellin) 83, 104–113.

- [31] Salimian, Z., GoodarziRad, R., Farmad, M., Bodaghi, M., Mokarizadeh, V., Shafie Zadeh, M.A., 2021. Effects of DSM on Final Energy Uses: Implications of MESSAGE Energy Model. Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research 7. [In Persian].

روانشناسی
نشد