



Sharif University of Technology

<https://sjie.journals.sharif.edu/>



Research Article

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

Mohammad Taghi Farahnak¹, Mohammad Ali Afshar Kazemi¹, Ali Mohaghar^{*2} and Mohammad Ali Keramati¹

¹Department of Industrial Management, Faculty of Management, Central Tehran branch-Islamic Azad university, Tehran, Iran.

² Faculty of management, University of Tehran, Iran.

* corresponding author: (amohaghar@ut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:23 October 2024

Revised:18 January 2025

Accepted:22 February 2025

Keywords:

System dynamics,
power transmission capacity,
Substations,
transmission and super-
distribution lines,
investment in transmission
capacity development.

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 2041. The numerical results from these three scenarios concerning the construction of transmission capacity by substation type are presented in this paper.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Farahnak, M.T, Afshar Kazemi, M.A., Mohaghar, A. and Keramati, M.A. 2026. Designing a model for sustainable power transmission capacity using systems dynamics approach, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(2), pp.63-77. <https://doi.org/10.24200/ij65.2025.65260.2415>



طراحی مدلی جهت تأمین ظرفیت پایدار شبکه‌ی انتقال برق با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها

محمدتقی فرحناک^۱، محمدعلی افشار کاظمی^۱، علی محقر^{۲*} و محمدعلی کرامتی^۱

^۱گروه مدیریت صنعتی، دانشکده‌ی مدیریت، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۲گروه مدیریت، دانشکده‌ی مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (amohaghar@ut.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
در پژوهش حاضر، با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، ساختار سیستمی توسعه‌ی ظرفیت انتقال به تفکیک پست‌های ۴۰۰، ۲۳۰، ۱۳۲، و ۶۶-۶۳ کیلوولت با در نظر گرفتن تقاضا و عرضه‌ی برق به صورت برون‌زا مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. پس از ایجاد مدل جریان و انباشت، روابط ریاضی بین متغیرهای مدل وارد شده است. 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 سناریو در حوزه‌ی توسعه‌ی ظرفیت انتقال نشان می‌دهند که 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. لذا، جهت جبران اختلاف با کمک مدل پژوهش حاضر، نتایج عددی احداث ظرفیت انتقال به صورت سالانه تا افق ۲۰ ساله، شبیه‌سازی و ارائه شده است.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲ تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴
	واژگان کلیدی: پویایی‌شناسی سیستم‌ها، ظرفیت انتقال برق، خطوط انتقال و فوق توزیع، سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت انتقال.

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، ۳] طبق گزارش‌های وزارت نیرو، شبکه‌ی انتقال برق در ایران، همواره از کمبود سرمایه‌گذاری‌های به موقع رنج می‌برد و همین امر ضرورت توسعه‌ی سریع‌تر زیرساخت‌های مذکور را نشان می‌دهد.^[۴]

ایجاد برنامه‌های بلندمدت برای تکامل شبکه‌ی انتقال می‌تواند به بهبود سیستم‌ها و تجهیزات مرتبط کمک کند و نیازهای مصرف‌کنندگان انرژی را به خوبی برآورده سازد.^[۵] مطالعات انجام‌شده در این زمینه، روش‌های مختلفی برای تشویق سرمایه‌گذاری در بخش انتقال ارائه کرده‌اند.^[۶] همچنین تأثیر سیاست‌های تعرفه‌ای در جریان نقدی شبکه‌ی برق بررسی شده و مدلی برای بهینه‌سازی تصمیم‌های سرمایه‌گذاری توسعه یافته است.^[۷] زامبران^۱ و همکاران (۲۰۱۹)^[۸] نیز با استفاده از روش‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها توانسته‌اند

رابطه‌ی بین میزان سرمایه‌گذاری و ظرفیت انتقال برق را شبیه‌سازی کنند و به این نتیجه رسیده‌اند که برنامه‌ریزی ظرفیت انتقال می‌تواند به دو شیوه‌ی متمرکز یا غیرمتمرکز صورت گیرد، که هر کدام چالش‌ها و مزایای منحصر به فرد خود را دارند. در این راستا، ایشان همچنین به بررسی شرایط صنعت برق کلمبیا پرداخته‌اند.

علاوه بر این، برخی مطالعات پیشین نشان داده‌اند 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 حوزه‌ی اخیر اجتناب‌ناپذیر است.^[۱۰-۱۴] نتایج نشان داده‌اند که علاوه بر سرمایه‌گذاری در تجهیزات تولید، توجه به پژوهش و توسعه (R&D) و افزایش بهره‌وری نیز ضروری است. همچنین، مدیریت تقاضا و کاهش آن از طریق بهبود کارایی تجهیزات مصرف‌کننده‌ی نهایی، نقش مهمی در پایداری تقاضا و تولید ایفا می‌کند.^[۱۵]

در ایران، نیز محقر و نجف‌زاده (۲۰۱۷)، مدلی برای توسعه‌ی بخش عرضه در صنعت برق با توجه به ابعاد فنی، اقتصادی، و زیست‌محیطی ارائه کرده‌اند، که

¹ Zambrano

می‌تواند به برنامه‌ریزی بلندمدت تأمین انرژی الکتریکی کمک کند.^[۱۶] مقایسه‌ی روند توسعه‌ی موجود با روند مبتنی بر مدل اخیر نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌تواند به صرفه‌جویی اقتصادی در توسعه‌ی برق منجر شود.

همچنین احمدوند و کلانتری (۲۰۱۹)،^[۱۷] مدلی برای سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت توزیع برق ارائه کرده‌اند، که شامل یک روش ترکیبی از ویژگی‌های توسعه‌ی متمرکز و غیرمتمرکز بوده و باعث بهبود زمان‌بندی سرمایه‌گذاری نسبت به شیوه‌ی غیرمتمرکز شده و هزینه‌های مصرف را کاهش داده است.

علاوه‌براین، 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 و نتایج نشان داده‌اند که روش‌های اقتصادسنجی دقت بیشتری نسبت به مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها دارند و مدل‌های مذکور بیشتر برای نمایش روابط علت و معلولی متغیرها مناسب هستند.^[۱۸] احمد و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۹] نیز به بررسی و دسته‌بندی مطالعات مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها در حوزه‌ی مدیریت و برنامه‌ریزی برق بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ پرداخته و دریافته‌اند که ارزیابی سیاست‌ها و توسعه‌ی ظرفیت تولید، دو موضوع برجسته‌ی موردتوجه هستند. وانگ و همکاران (۲۰۱۹)،^[۲۰] در چین به اصلاح تعرفه‌های انتقال و توزیع (T&D) و تأثیر آن در ظرفیت مالی شرکت‌های برق پرداخته و با استفاده از مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها، تغییرات درآمد و هزینه‌های شرکت‌های برق را پس از اصلاحات بررسی کرده و دریافته‌اند که درآمد T&D به‌تدریج افزایش پیدا کرده و استهلاک دارایی‌ها، نقش مهمی در ظرفیت مالی داشته است.

درنهایت، مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که میزان سرمایه‌گذاری و احداث ظرفیت انتقال نیازمند برنامه‌ریزی بلندمدت است. با توجه به تأثیر متغیرهای متعدد در حوزه‌ی اخیر و دینامیک روابط بین آن‌ها، برنامه‌ریزی در این زمینه پیچیده و نیازمند ابزاری است که بتواند تمامی متغیرهای اصلی را شبیه‌سازی کند 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. نادیده‌گرفتن پویایی ذاتی پدیده‌ها می‌تواند منجر به اتخاذ تصمیم‌های 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 داده‌اند و امکانات مناسبی را در این خصوص در اختیار قرار می‌دهند.^[۲۲] ویژگی‌های بارز پویایی‌شناسی سیستم‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها، که منجر به به‌کارگیری آن در پژوهش حاضر شده است، به این شرح هستند:

- امکان در نظر گرفتن ارتباط‌های علی و بازخوردی بین متغیرها (عموم روش‌های آماری مثل رگرسیون، این قابلیت را ندارند).
- امکان لحاظ کردن تأخیرهای زمانی بین متغیرهای مختلف، مانند تأخیر بین سرمایه‌گذاری و توسعه‌ی ظرفیت.
- امکان شبیه‌سازی کامپیوتری و مشاهده‌ی رفتار متغیرهای اصلی در بستر زمان.

- امکان استفاده از قابلیت زنجیره‌ی سنی در شبیه‌سازی، چرا که احتمال برکناری ظرفیت با سن تجهیزات، رابطه‌ی مستقیمی دارد و در گذر زمان، سن تجهیزات افزایش می‌یابد.
- امکان تعریف سناریو و مشاهده‌ی آثار آن در رفتار آینده‌ی متغیرهای تشکیل‌دهنده‌ی ساختار مدل.

افزون بر تعداد متغیرها و شاخص‌های اصلی دینامیک مدل، که در سیستم شبکه‌ی انتقال منجر به افزونگی و پیچیدگی می‌شوند؛ ظرفیت‌های انتقال با سن متفاوت و تلفات آن‌ها، تقاضا و عرضه‌ی برق متغیر در طول زمان و ارتباط بین ظرفیت موردانتظار و ظرفیت واقعی و سایر متغیرهایی که در مسئله دخالت دارند؛ منجر به پیچیدگی و بروز ابهام‌هایی در درک تأثیر و تأثر متغیرهای مذکور بر هم می‌شوند. کاربرد رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها در عین حفظ نگاه کلی، مرز سیستم را مشخص و ارتباط بین متغیرهای اخیر را مشخص می‌کند و سبب ایجاد یک مدل ذهنی مشترک بین تصمیم‌گیرندگان و تصمیم‌سازان می‌شود.

پژوهش حاضر، از این جهت با مطالعات پیشین متمایز است که از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی توسعه‌ی ظرفیت انتقال در آینده استفاده کرده است. تاکنون هیچ پژوهشی در ایران به بررسی رفتار توسعه‌ی ظرفیت انتقال با استفاده از ابزار مذکور و دیگر روش‌ها نپرداخته است. لذا، با توجه به خلأ ذکرشده، در پژوهش حاضر به پیش‌بینی و شبیه‌سازی میزان احداث ظرفیت انتقال با تفکیک پست‌های ۴۰۰، ۲۳۰، ۱۳۲، و ۶۶-۶۳ در شرایط مختلف پرداخته شده است. در جدول ۱، خلاصه‌ی نتایج مطالعات پیشین در حوزه‌ی تولید، انتقال، و توزیع ارائه شده و تفاوت‌های آن‌ها را با پژوهش حاضر روشن ساخته است.

پژوهش حاضر با ارائه‌ی یک مدل جدید سیستمی و دینامیک به یک سؤال کلیدی پاسخ داده است: با توجه به روند فزاینده‌ی تقاضا، توسعه‌ی ظرفیت انتقال در کشور به تفکیک پست‌های مختلف چه میزان باشد تا پایداری ظرفیت شبکه‌ی انتقال در صنعت برق حفظ شود و صنعت تحت تأثیر کمبود و ناترازی قرار نگیرد؟

ساختار نوشتار حاضر بدین صورت سازماندهی شده است که در ابتدا، توضیحات مختصری درخصوص رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها ارائه شده است. سپس با کمک نمودار زیرسیستم‌ها، متغیرهای اصلی تأثیرگذار در حوزه‌ی صنعت انتقال برق نشان داده شده‌اند. پس از آن فرضیه‌های دینامیکی در قالب نمودار علت و معلولی تبیین و براساس نمودار علت و معلولی کلی، نمودار جریان-انباشت ترسیم شده است. با تعریف روابط ریاضی بین متغیرها، مدل شبیه‌سازی شده و اعتبارسنجی آن صورت گرفته است. سپس تحت ۳ سناریو، بر روی میزان احداث ظرفیت انتقال در طی ۲۰ سال آینده، بحث و بررسی شده است.

۲. روش شناسی پژوهش

پویایی‌شناسی سیستم‌ها، یک رویکرد بین‌رشته‌ای و جامع است، که هدف آن درک و حل مسائل هدفمند است؛ که به تحلیل و بررسی تعاملات پیچیده در سیستم‌ها می‌پردازد، تا به شناخت بهتر چالش‌های موجود و ارائه‌ی راه‌حل‌های مؤثر کمک کند.^[۲۶] گام‌های اجرای پویایی‌شناسی سیستم‌ها را می‌توان در ۵ گام خلاصه کرد:^[۲۷]

- در گام اول، ابتدا چارچوب مسئله‌ی موردنظر پژوهش تعریف و پس از شناخت

جدول ۱. مقایسه‌ی مطالعات پیشین با پژوهش حاضر.

Row	Reference	Country	Sector Analyzed	Main Focus of the Study
1	[14]	Iran	Distribution	Electricity demand modeling
2	[17]	Iran	Distribution	Investment in electricity distribution capacity expansion
3	[18]	Iran	Transmission	Transmission loss analysis
4	[16]	Iran	Generation	Long-term electricity supply planning
5	[11]	USA	Generation	Application of computational models for power plant construction simulation
6	[15]	Canada	Distribution and Generation	Investment in research and development (R&D)
7	[21]	Malaysia	Distribution	Evaluation of tariff rate changes and their impacts on the power generation sector
8	[7]	China	Transmission	Impact of transmission and distribution tariff policies on the cash flow of the power industry
9	[10]	China	Distribution and Transmission	Capital investment allocation strategies in transmission and distribution sectors
10	[8]	Colombia	Transmission	Investment in transmission capacity, installed capacity, reserve margins, and electricity demand
11	[12]	Iran	Distribution and Generation	Effects of energy pricing policies on electricity supply-demand instability
12	[24]	Iran	Generation	System dynamics modeling of power generation expansion planning
13	[25]	China	Distribution	Electricity consumption forecasting using system dynamics methodology
14	[22]	Iran	Generation and Distribution	Comparative assessment of supply-side expansion and demand-side management
Current Study		Iran	Transmission	Determining the extent of development of the power grid transmission capacity for sustainable electricity supply under different demand scenarios, taking into account the impact of loss variables, inflation, age chain, and depreciation of transmission equipment, and providing a cause-and-effect and state-flow model to examine the trend of power transmission capacity by different substations

آزمون رفتار ساختاری، آزمون رفتار حدی، و... استفاده شده و اعتبار مدل بررسی شده است نمونه‌ی موردی پژوهش حاضر، سیستم انتقال برق کشور ایران و بازه‌ی زمانی اعتبارسنجی در آزمون بازسازی رفتار مرجع از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۱ بوده است.

- درگام پنجم، به‌منظور آزمایش راهبردها، از مدل برای کمی‌سازی تأثیر راهبردهای پیشنهادی استفاده می‌شود. که در پژوهش حاضر، افق شبیه‌سازی، ۲۰ ساله در نظر گرفته شده است.

۲. مدل سازی

۲.۱. نمودار زیرسیستم‌ها یا معماری کلی سیستم

نمودار زیرسیستم‌های تبیین‌شده در شکل ۱، که به گونه‌ای تصویری بزرگ از سیستم موردبررسی است، ارائه شده است. به‌طور کلی، مدل ارائه‌شده در پژوهش

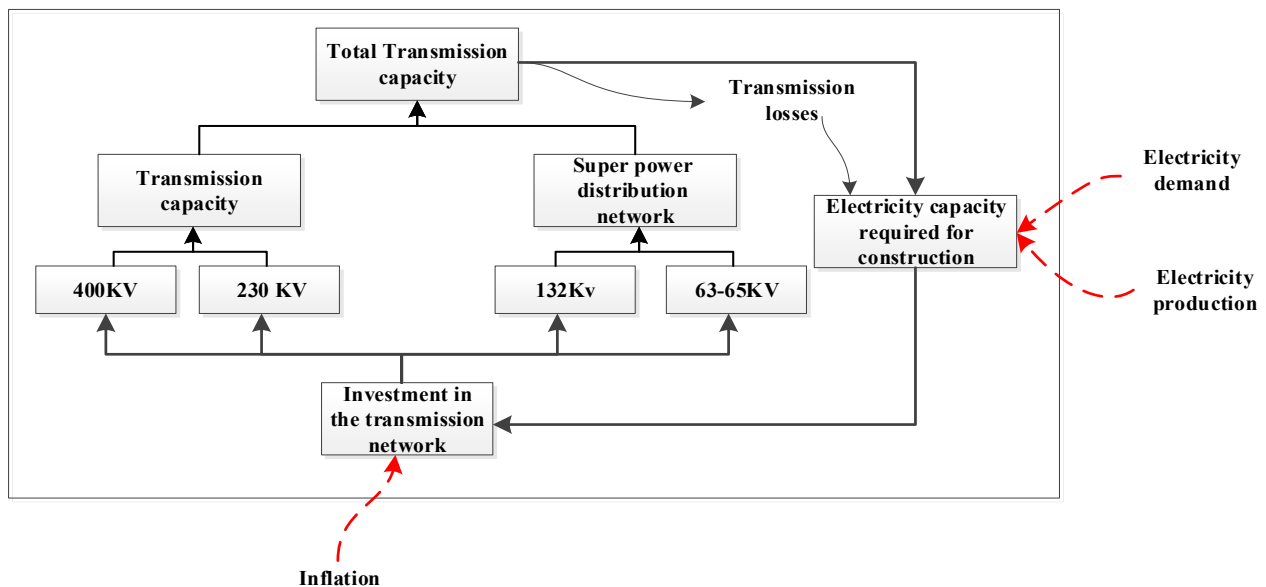
دقیق آن، با مطالعه‌ی منابع موجود و نظرهای صاحب‌نظران، مرز سیستم با کمک نمودار زیرسیستم‌ها مشخص می‌شود.

- در گام دوم، نمودار علی- معلولی سیستم ایجاد می‌شود. همچنین، حلقه‌ها و بازخوردها با علامت مثبت و منفی در شکل نشان داده می‌شوند و علامت کمان‌ها به لحاظ اثرگذاری مثبت یا منفی تعیین می‌شود. همچنین در گام حاضر، پس از شناسایی متغیرهای انباشت و جریان، نمودار جریان و انباشت^۱ نیز ترسیم می‌شود.

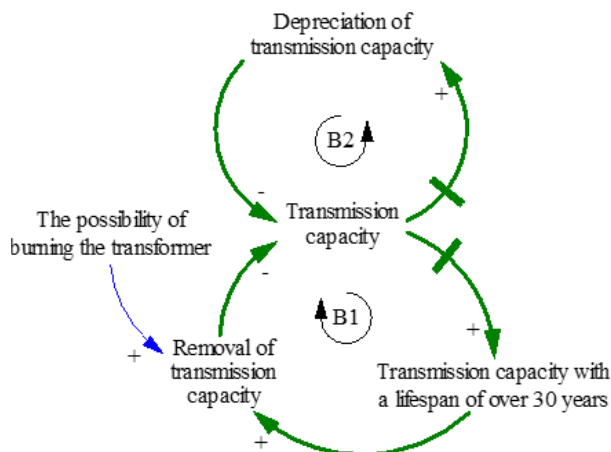
- در گام سوم، با شناسایی ساختار و قوانین تصمیم‌گیری، پارامترها و روابط ریاضی تعیین می‌شوند.

- در گام چهارم، شبیه‌سازی با کمک نرم‌افزار Vensim PLE صورت می‌گیرد. برای اعتبارسنجی مدل از آزمون‌هایی مانند رفتار مرجع، آزمون ساختاری،

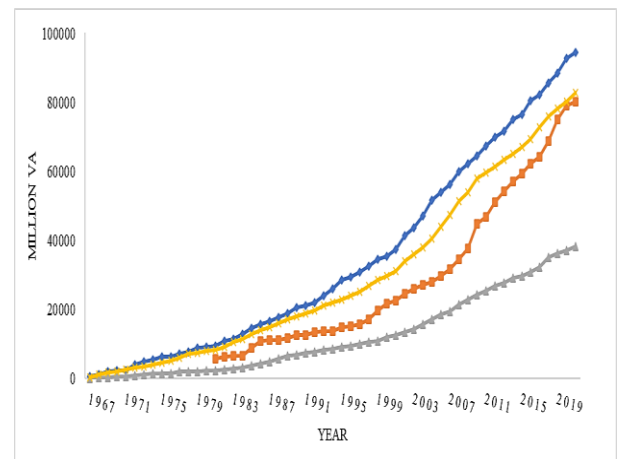
¹ Stock and flow diagram



شکل ۱. نمودار زیرسیستم‌ها یا معماری کلی سیستم انتقال در پژوهش.



شکل ۳. حلقه‌ی تعادلی دوم و سوم تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.



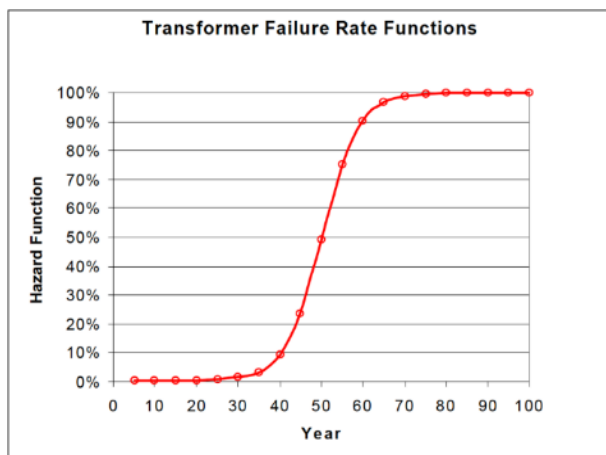
شکل ۲. روند ظرفیت انتقال برق در کشور.^[۴]

حاضر، شامل: (۱) ظرفیت پست‌ها و خطوط انتقال برق، (۲) سرمایه‌گذاری در ظرفیت انتقال برق، (۳) تقاضا و عرضه‌ی برق در شبکه است. در مدل پژوهش، متغیرهایی مانند: تقاضای برق، تولید برق، و تورم به صورت برون‌زا به مدل وارد شده‌اند.

۲.۲. نمودار علت و معلولی

از جمله بازخوردهای در نظر گرفته‌شده در مدل پژوهش حاضر، مشتمل بر سه حلقه‌ی تعدیل‌کننده و دو حلقه‌ی فزاینده است. دو حلقه‌ی متعادلی مدل مربوط به عمر تجهیزات شبکه‌ی انتقال هستند. نمودار روند افزایش ظرفیت انتقال برق در شبکه‌ی کشور ایران در شکل ۲ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، اولین ظرفیت‌های انتقال توسعه داده‌شده مربوط به سال ۱۹۶۷ و ماقبل آن است و هم‌اکنون، تجهیزات مذکور بالای ۵۰ سال، سن دارند.

حلقه‌ی تعادلی B۱ در شکل ۳ مشاهده می‌شود؛ که به دلیل افزایش عمر ترانسفورماتورها، احتمال سوختن به صورت ناگهانی و براساس تابع توزیع هازارد^۲،^[۲۸] وجود دارد. همچنین در حلقه‌ی B۲ به دلیل افزایش عمر و تلفات آن، تجهیزات انتقال برق مستهلک می‌شوند.^[۷]

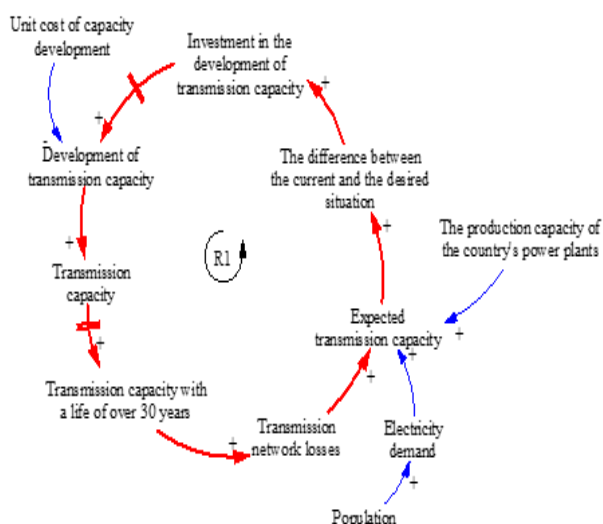


شکل ۴. نمودار تابع توزیع هازارد.^[۲۳]

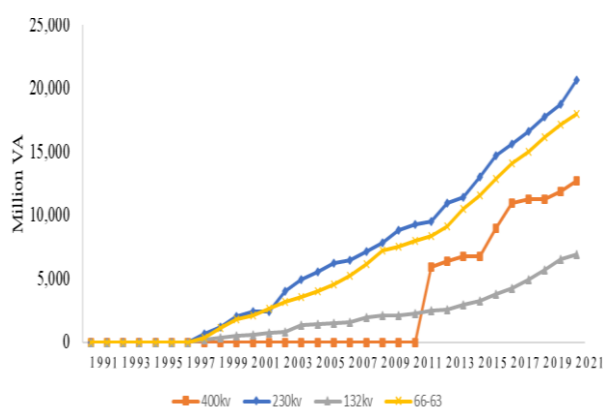
نمودار تابع توزیع هازارد در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش عمر ترانسفورماتورها، احتمال سوختن آن‌ها با رفتاری S شکل افزایش می‌یابد.

در حلقه‌ی تعادلی B۳ (مطابق شکل ۵)، با کاهش ظرفیت انتقال، اختلاف بین ظرفیت موردانتظار و ظرفیت موجود، افزایش و سرمایه‌گذاری نیز افزایش پیدا

^۲ Hazard function



شکل ۸. حلقه‌ی فزاینده‌ی اول تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.



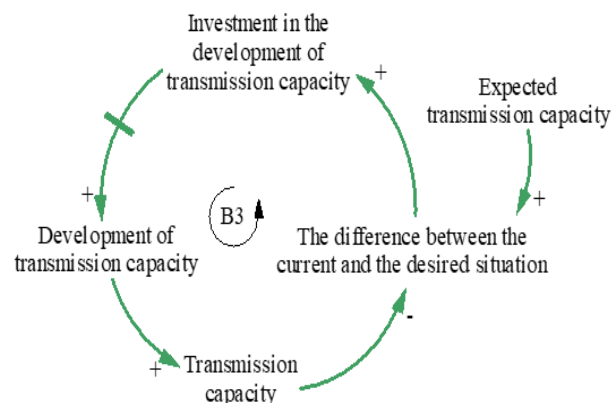
شکل ۹. مقدار توان شبکه‌ی انتقال با عمر بالای ۳۰ سال به تفکیک نوع ترانسفورماتور.^[۴]

سرمایه‌گذاری واقعی، افزایش تقاضا و تولید برق است، که منجر به افزایش ظرفیت انتقال موردانتظار می‌شود. اختلاف مقدار موردانتظار و مقدار واقعی منجر به افزایش سرمایه‌گذاری می‌شود. در نمودار مذکور، تأثیر تورم حذف شده است و تمامی قیمت‌ها به قیمت ثابت سال ۱۹۹۷ هستند.

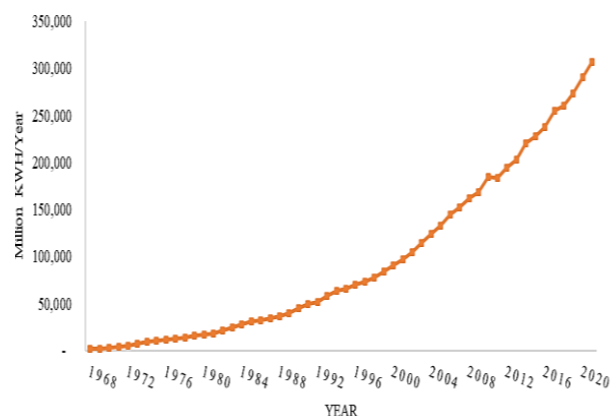
کارایی شبکه‌ی انتقال به معنای نسبت توان خروجی شبکه به توان ورودی آن تعریف می‌شود. تلفات شبکه‌ی انتقال نیز از اختلاف کارایی با عدد ۱ محاسبه می‌شود.^[۲۹] در شکل ۸، حلقه‌ی فزاینده‌ی تأثیر تلفات شبکه‌ی انتقال در توسعه‌ی ظرفیت انتقال، که یک حلقه‌ی تأثیرگذار در بلندمدت است، مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، هر چه سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت انتقال افزایش یابد، توسعه‌ی ظرفیت بیشتر می‌شود و ظرفیت نیز فزونی می‌یابد. اما در بلندمدت، عمر ظرفیت شبکه‌ی انتقال بیشتر می‌شود و تلفات شبکه نیز افزایش می‌یابد.^[۱] بنابراین، نیاز به ظرفیت بیشتری به‌منظور جبران تلفات است، که در نهایت منجر به افزایش سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت انتقال می‌شود.

در شکل ۹، مقدار توان شبکه‌ی انتقال، که عمر بالای ۳۰ سال دارند، مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، از سال ۱۹۹۷ به بعد، عمر شبکه‌ی انتقال برق به ۳۰ سال رسیده است. لذا، تلفات ناشی از تجهیزات مذکور نیز افزایش خواهد یافت.

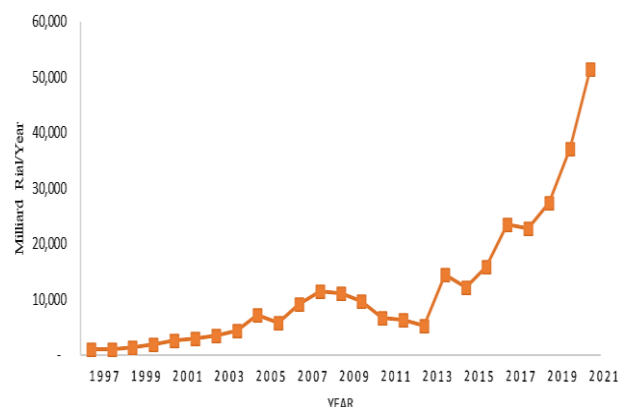
در شکل ۱۰، نیز حلقه‌ی فزاینده‌ی دوم، یعنی تأثیر تلفات شبکه و تلفات موردانتظار در راهبردها در توسعه‌ی ظرفیت انتقال مشاهده می‌شود. هر چه



شکل ۵. حلقه‌ی تعادلی سوم تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.



شکل ۶. نمودار روند صعودی میزان جمع تقاضای برق در کلیه‌ی بخش‌ها.^[۴]



شکل ۷. روند صعودی مقدار واقعی سرمایه‌گذاری در شبکه‌ی انتقال به قیمت ثابت سال ۱۹۹۷.^[۴]

می‌کند.^[۸] با افزایش یافتن سرمایه‌گذاری با تأخیر توسعه‌ی ظرفیت و به تبع ظرفیت انتقال نیز بیشتر می‌شود. بنابراین، کاهش یافتن ظرفیت انتقال در نهایت و با گذر زمان طی حلقه‌ی مذکور جبران خواهد شد.

این تذکر لازم است که ظرفیت انتقال موردانتظار براساس دو بخش عمده‌ی تقاضای برق و ظرفیت تولید برق شکل می‌گیرد. نمودار رفتار مقدار تقاضای برق کل شبکه (مشمول بر تقاضای بخش عمومی، خانگی، صنعتی، کشاورزی، و روشنایی معابر) در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

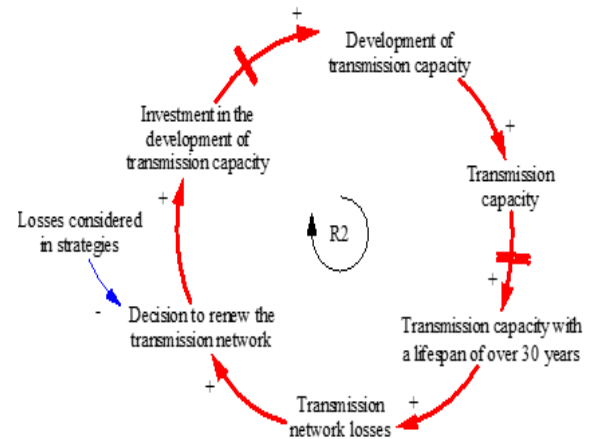
در شکل ۷، نمودار مقدار واقعی سرمایه‌گذاری (بر مبنای سال پایه‌ی ۱۹۹۷) در شبکه‌ی انتقال مشاهده می‌شود. یکی از دلایل عمده‌ی روند صعودی

ظرفیت توسعه داده شده بیشتر شود، در بلندمدت، عمر تجهیزات ذکر شده بالا می‌رود و تلفات آن‌ها افزایش می‌یابد.^[۳۰ و ۳۱] اختلاف مقدار تلفات واقعی و تلفات مدنظر، راهبردهای تصمیم به نوسازی و سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت جدید را افزایش می‌دهد و منجر به افزایش ظرفیت انتقال می‌شود.

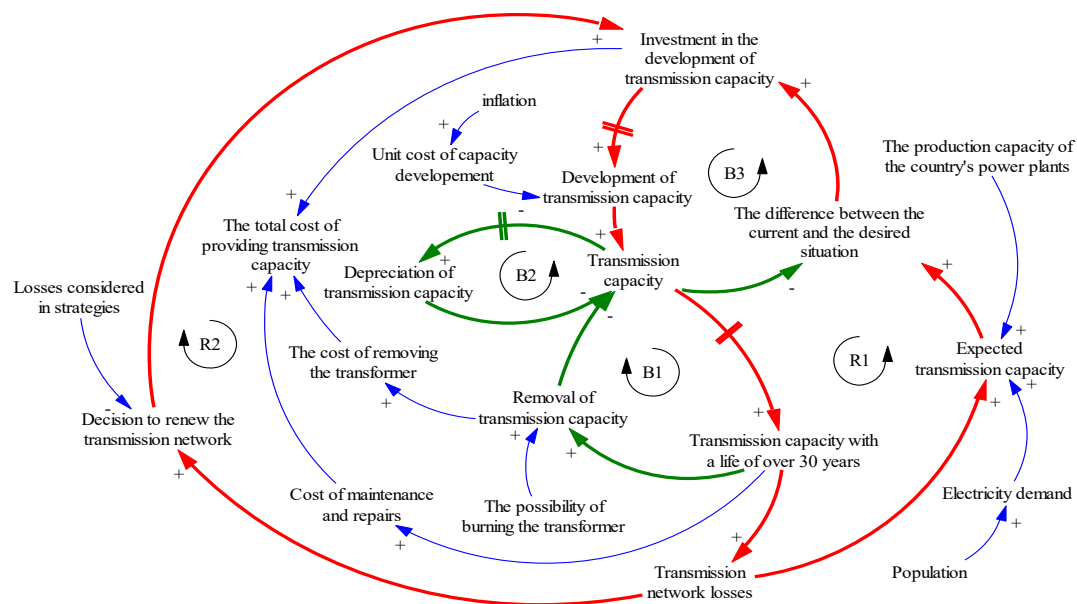
از پیوند تمامی حلقه‌ی تبیین شده در شکل اخیر، نمودار علت و معلولی کلی ارائه شده در شکل ۱۱ ایجاد می‌شود، که مدل علت و معلولی کلی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

۳.۲. نمودار حالت- جریان

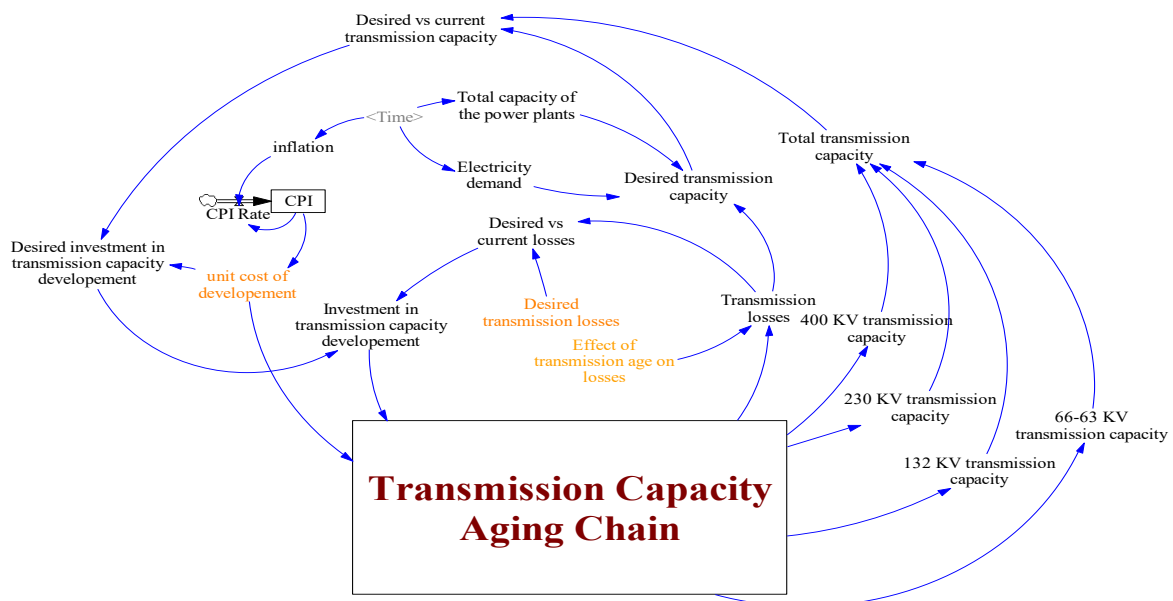
با در نظر گرفتن متغیرهای ظرفیت ترانسفورماتورها، به تفکیک چهار نوع شبکه، طول مدارهای انتقال به تفکیک چهار نوع، و شاخص قیمتی مصرف‌کننده (CPI) به عنوان متغیر انباشت، نمودارهای جریان- انباشت در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۰. حلقه‌ی فزاینده‌ی دوم تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.

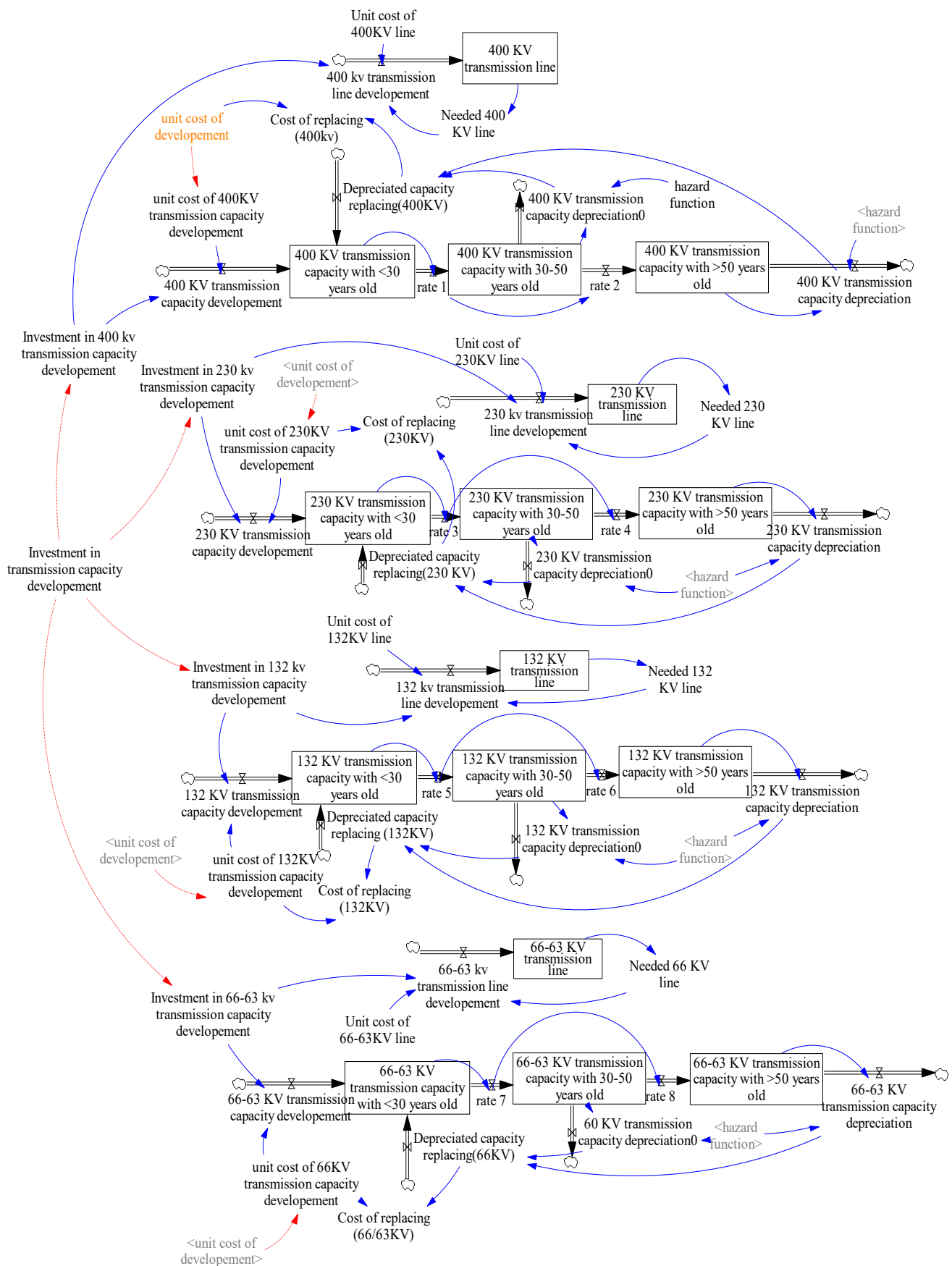


شکل ۱۱. نمودار علت و معلولی کلی پژوهش.

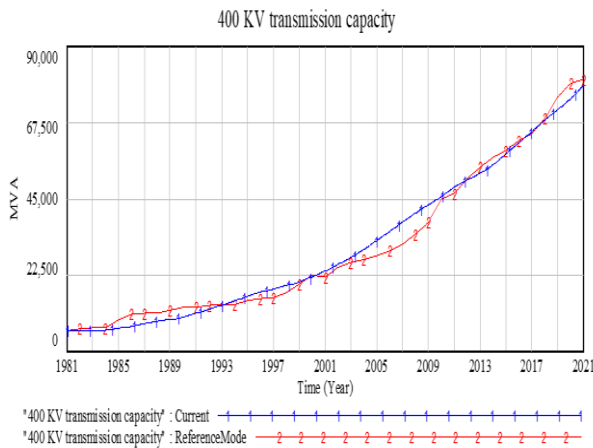


شکل ۱۲. نمودار حالت- جریان حاوی متغیرهای تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.

Transmission Capacity Aging Chain



شکل ۱۳. نمودار حالت - جریان قسمت زنجیره‌ی سنی ظرفیت انتقال.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی داده‌های واقعی و مقدار شبیه‌سازی متغیر ظرفیت انتقال پست‌های ۴۰۰KV (خطا (MAE): ۰.۶/۹).

ساختاری، بازسازی رفتار مرجع، و ... را برای کسب اطمینان از اعتبار مدل در دستیابی به اهداف موردنظر معرفی کرده است.^[۲۷] در پژوهش حاضر، نیز اعتبار مدل با استفاده از انواع روش‌ها، مانند: ارزیابی ساختاری، آزمون حدی، و بازسازی رفتار مرجع تأیید شده است، که در بخش کنونی، فقط به ارائه‌ی نتایج آزمون بازسازی رفتار مرجع بسنده شده است.

در آزمون بازسازی رفتار مرجع، نتایج شبیه‌سازی مدل با داده‌های تاریخی موجود برای متغیرهای اصلی مقایسه شده‌اند. مدل پژوهش حاضر توانسته است رفتار متغیرهای ظرفیت انتقال را با دقت خوبی شبیه‌سازی کند. به عنوان نمونه، در شکل ۱۴، نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های تاریخی متغیر ظرفیت انتقال ۴۰۰ KV ملاحظه می‌شود؛ که مطابق آن، مدل توانسته است رفتار متغیر ظرفیت انتقال را با دقتی بالای ۹۰٪ بازسازی کند. مقدار خطای بازسازی رفتار برای متغیرهای ظرفیت‌های انتقال ۲۳۰، ۱۳۲، و ۶۳-۶۶ کیلوولت نیز ۹/۹، ۶/۹، و ۸/۴ درصد بوده است.

۲.۳. تحلیل آینده‌ی صنعت انتقال برق با تحلیل سناریو

در بخش حاضر، ۳ سناریو مطابق جدول ۲ تعریف شده‌اند؛ و در ادامه، نتایج عددی آن‌ها مقایسه و ارائه شده است.

• سناریوی اول: ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق تا سال ۲۰۴۱

روند تقاضای برق کشور از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۱ در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود.^[۴] در صورتی که قرار باشد ارتباط بین تقاضای برق و سال با یک رابطه‌ی رگرسیونی برازش شود، معادله‌ی ۵، بهترین ارتباط را نشان می‌دهد.

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

اگر با استفاده از معادله‌ی ۵ به پیش‌بینی تقاضای برق برای ۲۰ سال آینده پرداخته شود، روند تقاضا به صورت نمودار قرمز رنگ در شکل ۱۶ خواهد بود.

با اعمال سناریوی ادامه‌ی روند جاری، نتایج شبیه‌سازی برای متغیرهای احداث ظرفیت به صورت نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ است و جهت جبران کمبود ظرفیت باید بر طبق نتایج شبیه‌سازی ذکر شده نسبت به احداث ظرفیت در ظرفیت‌های چهارگانه اقدام شود. بنابراین می‌توان گفت در صورتی که میزان تقاضا مطابق با روند شکل ۱۶ افزایش یابد، جهت جلوگیری از کمبود

پس از ترسیم نمودار جریان- انباشت، لازم است تا روابط ریاضی بین متغیرها تعریف شوند. لذا در ادامه، به ارائه‌ی مهم‌ترین روابط ریاضی در نظر گرفته‌شده پرداخته شده است.

رابطه‌ی ریاضی مقدار توسعه‌ی ظرفیت پست‌ها بر مبنای تأخیر اطلاعاتی مرتبه‌ی اول در نظر گرفته شده است. معادله‌ی ۱، ارتباط بین مقدار سرمایه‌گذاری و مقدار ظرفیت توسعه داده‌شده را نشان می‌دهد؛ که در آن، D_K نشانگر میزان توسعه‌ی ظرفیت هر کدام از ظرفیت‌ها، I_K مقدار سرمایه‌گذاری صورت گرفته در هر کدام از ظرفیت‌ها، و U_K نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی واحد توسعه‌ی هر کدام از ظرفیت‌هاست. در معادله‌ی ۱، تابع $Delay1i$ بیانگر تأخیر مرتبه‌ی اول اطلاعاتی است.

$$D_K = Delay1i\left(\frac{I_K}{U_K}, 1, 0\right) \quad (1)$$

$K \in 400KV, 230KV, 132KV \text{ and } 63-66KV$
transmission capacity

شایان ذکر است مقدار سرمایه‌گذاری در حوزه‌ی افزایش ظرفیت انتقال نیز براساس مقدار ظرفیت انتقال موردانتظار (DTC) و مقدار تلفات موردانتظار (DTL) به صورت معادله‌ی ۲ محاسبه می‌شود؛ که در آن، TC نشانگر مقدار ظرفیت انتقال وضع موجود و TL بیانگر مقدار تلفات وضع فعلی هستند.

$$I_K = U_K \times \max(0, DTC - TC) \times (1 + DTL - TL)^2$$

پارامتر تعیین‌کننده‌ی میزان تلفات انتقال، متوسط سن کل ظرفیت انتقال است، که به صورت معادله‌ی ۳ محاسبه می‌شود؛ که در آن، TC_i به معنای مقدار ظرفیت انتقال با عمر i سال و A ، نشانگر متوسط عمر شبکه‌ی انتقال هستند.

$$A = \frac{\sum_i i \times TC_i}{\sum_i i} = \frac{1 \times TC_1 + 2 \times TC_2 + \dots + TC_{100}}{1 + 2 + \dots + 100} \quad (3)$$

برای محاسبه‌ی میزان تلفات شبکه‌ی انتقال نیز از تابع جدولی LookUp مطابق رابطه‌ی ۴ استفاده شده است؛ که براساس آن، میزان تلفات شبکه، تابعی از متوسط سن شبکه‌ی انتقال (A) است و به ازاء هر مقدار از A ، مقدار تلفات شبکه را با استفاده از درون‌یابی محاسبه می‌کند.

$$TL = F(A) \quad (4)$$

جهت نمایش بهتر، قسمت زنجیره‌ی سنی ظرفیت‌های انتقال که به تفکیک ۴ ظرفیت مذکور طراحی شده است، در نمودار جریان- انباشت جداگانه ارائه شده است. در شکل ۱۲، متغیرهایی که در ظرفیت انتقال تأثیرگذارند، مشاهده می‌شوند؛ که در نمودار اخیر، میزان سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت و هزینه‌ی واحد توسعه‌ی ظرفیت به قسمت زنجیره‌ی سنی ظرفیت وارد و میزان ظرفیت انتقال به تفکیک ۴ ظرفیت از قسمت مذکور خارج شده است. مدل مربوط به قسمت ظرفیت‌های انتقال نیز در شکل ۱۳ مشاهده می‌شوند.

۳. بحث و بررسی

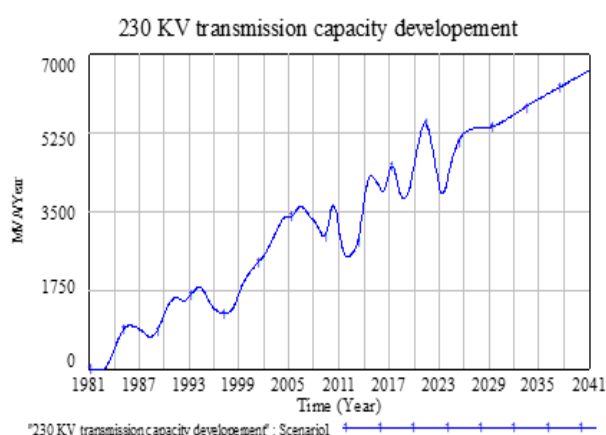
۳.۱. اعتبارسنجی مدل

در بخش حاضر، پس از شبیه‌سازی مدل، به اعتبارسنجی آن پرداخته شده است. استرمن^۳ در کتاب پویایی‌شناسی کسب و کار آزمون‌های حدی، ارزیابی

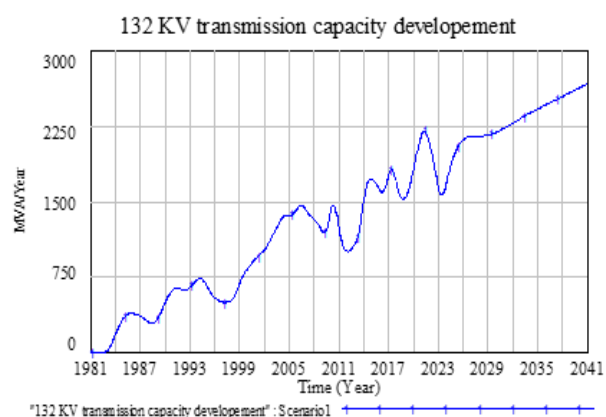
³ Sterman

جدول ۲. سناریوهای تعریف‌شده بر روی تقاضا و توسعه‌ی ظرفیت انتقال برق.

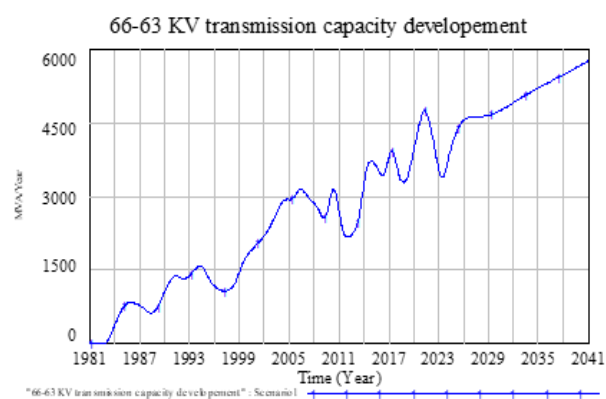
Scenario	Electricity Demand Assumption	Transmission Capacity Expansion
Scenario 1	Electricity demand follows the historical trend	Transmission capacity expansion is endogenously simulated by the model based on the extent of capacity shortfalls
Scenario 2	Electricity demand follows an optimistic trajectory in accordance with the forecasts of Salimian et al. (2021) [31]	Transmission capacity expansion is endogenously simulated by the model based on the extent of capacity shortfalls
Scenario 3	Electricity demand follows the historical trend	Transmission capacity is expanded according to the average development rate observed over the past five years



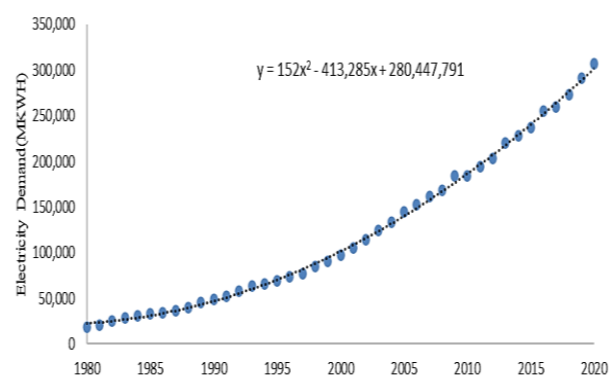
شکل ۱۸. ظرفیت انتقال ۲۳۰KV در سناریوی اول.



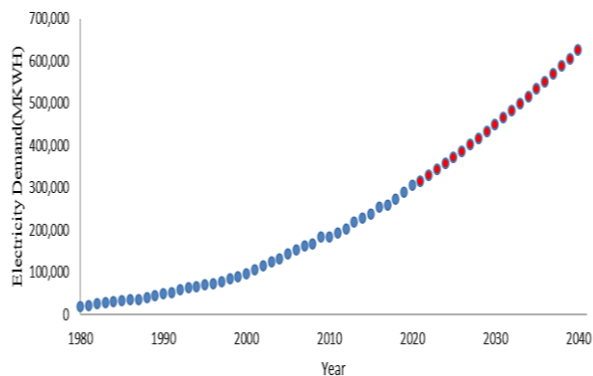
شکل ۱۹. ظرفیت انتقال ۱۳۲KV در سناریوی اول.



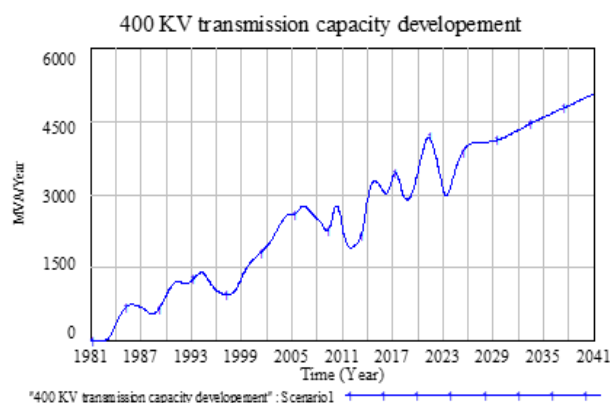
شکل ۲۰. ظرفیت انتقال 66-63KV در سناریوی اول.



شکل ۱۵. رابطه‌ی ریاضی درجه‌ی دوم براساس داده‌های تقاضای برق کشور در ۴۰ سال گذشته.



شکل ۱۶. پیش‌بینی مصرف برق کشور با توجه به روند گذشته با استفاده از تابع غیرخطی درجه‌ی دوم.



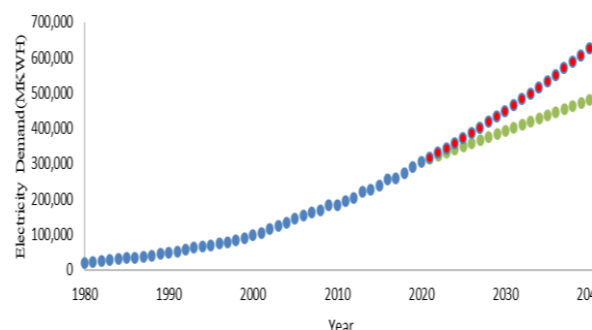
شکل ۱۷. ظرفیت انتقال ۴۰۰KV در سناریوی اول.

ظرفیت انتقال، باید سرمایه‌گذاری‌ها به گونه‌ای باشند که تا سال ۲۰۴۱ مقدار ظرفیت انتقال به میزان ۱۲۸٪ افزایش یابد.

• سناریوی دوم: روند کاهشی تقاضای برق تا سال ۲۰۴۰ (سناریوی خوشبینانه)

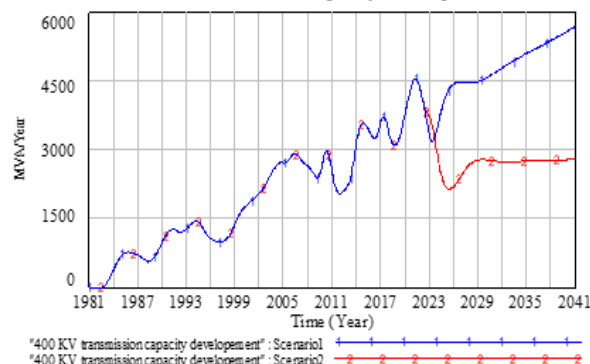
سلیمان و همکاران (۱۴۰۰)، به پیش‌بینی تقاضای برق تا سال ۲۰۴۰ پرداخته‌اند.^[۲۱] ایشان تقاضای برق کشور در سال ۲۰۴۱ را با در نظر گرفتن صرفه‌جویی بیشینه و به صورت خوش‌بینانه ۴۸۱/۷۱۰ تراوات ساعت پیش‌بینی کرده‌اند. با در نظر گرفتن پیشنهاد پژوهش حاضر، سناریوی دوم به صورت نمودار سبزرنگ در شکل ۲۱ در نظر گرفته شده است.

با اعمال سناریوی دوم، نتایج به دست آمده در شکل‌های ۲۲ الی ۲۵ در خصوص متغیرهای مدل مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، در صورتی که تقاضای برق طبق سناریوی خوش‌بینانه، روندی با شیب کمتر نسبت به ادامه‌ی شرایط فعلی داشته باشد، نیاز به احداث ظرفیت انتقال به میزان قابل‌توجهی کاهش پیدا



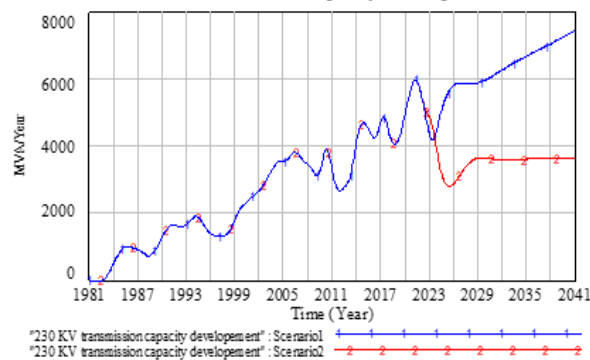
شکل ۲۱. پیش‌بینی مصرف برق کشور با توجه به روند خوش‌بینانه.^[۲۱]

400 KV transmission capacity development



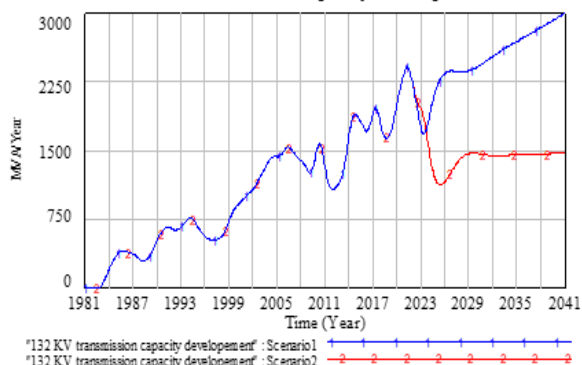
شکل ۲۲. ظرفیت انتقال ۴۰۰KV در دو سناریو.

230 KV transmission capacity development



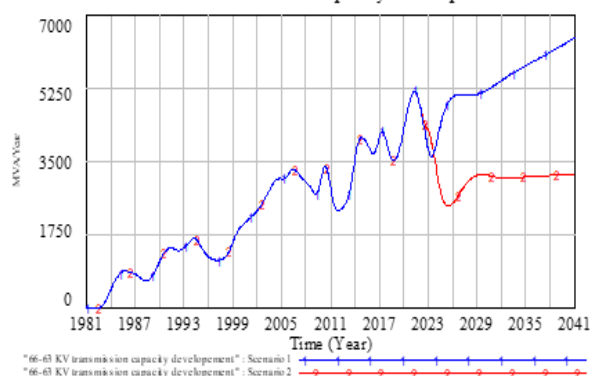
شکل ۲۳. ظرفیت انتقال ۲۳۰KV در دو سناریو.

132 KV transmission capacity development



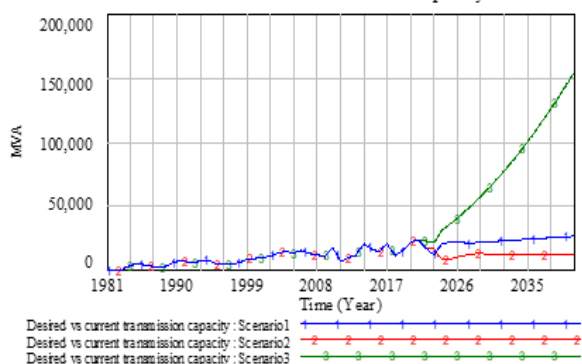
شکل ۲۴. ظرفیت انتقال ۱۳۲KV در دو سناریو.

66-63 KV transmission capacity development



شکل ۲۵. ظرفیت انتقال ۶۶-۶۳ KV در دو سناریو.

Desired vs current transmission capacity



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

سناریوی سوم.

خواهد کرد و سیاست بهبود در سناریوی دوم بدین صورت تعریف می‌شود که سرمایه‌گذاری‌ها باید به گونه‌ای باشند که ظرفیت انتقال تا سال ۲۰۴۱ به میزان ۸۰٪ افزایش یابد.

• سناریوی سوم: ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق و ادامه‌ی روند احداث ظرفیت طبق روند ۵ ساله‌ی گذشته

در سناریوی سوم، فرض شده است که روند تقاضای برق مانند سناریوی اول افزایشی باشد و احداث ظرفیت انتقال از سال ۲۰۲۱ به بعد به جای آنکه در مدل تعیین شود، به صورت برون‌زا و هر ساله به اندازه‌ی میانگین احداث سال (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱) ادامه یابد (مطابق جدول ۳).

در شرایط ذکر شده، مطابق شکل ۲۶ در خصوص میزان کمبود ظرفیت، نسبت قابل‌انتظاری حاصل شده است. مهم‌ترین نکته در خصوص ادامه‌ی شرایط مذکور

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

Year	Construction of 400KV	Construction of 230KV	Construction of 132KV	Construction of 66-63KV
2017	1,910	1,575	1,386	3,338
2018	4,670	3,676	3,027	3,050
2019	6,245	2,814	949	2,462
2020	4,050	4,060	910	1,899
2021	1,145	1,723	1,223	2,556
Average of 5 years	3,604	2,770	1,499	2,661

جدول ۴. میزان احداث ظرفیت انتقال پس از اجرای ۳ سناریوی پژوهش حاضر.

Year	400 KV construction			230 KV construction			132 KV construction			63-66 KV construction		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
2022	4065	4065	3604	5328	5328	2770	2146	2146	1499	4625	4625	2661
2023	3608	3245	3604	4729	4253	2770	1905	1713	1499	4105	3692	2661
2024	3566	2591	3604	4674	3396	2770	1883	1368	1499	4057	2948	2661
2025	3740	2317	3604	4902	3037	2770	1975	1223	1499	4255	2636	2661
2026	3952	2318	3604	5180	3038	2770	2086	1224	1499	4496	2637	2661
2027	4117	2421	3604	5397	3174	2770	2174	1278	1499	4684	2755	2661
2028	4228	2514	3604	5543	3295	2770	2233	1327	1499	4811	2860	2661
2029	4310	2559	3604	5649	3355	2770	2275	1351	1499	4903	2912	2661
2030	4385	2568	3604	5748	3366	2770	2315	1356	1499	4989	2922	2661
2031	4466	2561	3604	5854	3357	2770	2358	1352	1499	5081	2914	2661
2032	4554	2553	3604	5969	3347	2770	2404	1348	1499	5181	2905	2661
2033	4647	2553	3604	6092	3346	2770	2454	1348	1499	5287	2905	2661
2034	4742	2558	3604	6216	3353	2770	2504	1351	1499	5396	2911	2661
2035	4835	2564	3604	6338	3361	2770	2553	1354	1499	5501	2917	2661
2036	4923	2566	3604	6454	3364	2770	2600	1355	1499	5602	2919	2661
2037	5010	2567	3604	6568	3364	2770	2645	1355	1499	5701	2920	2661
2038	5098	2568	3604	6683	3366	2770	2692	1356	1499	5801	2921	2661
2039	5187	2569	3604	6799	3367	2770	2739	1356	1499	5902	2922	2661
2040	5277	2571	3604	6917	3370	2770	2786	1357	1499	6004	2925	2661
2041	5367	2573	3604	7036	3373	2770	2834	1358	1499	6107	2927	2661

مهمی، مانند ظرفیت موجود انتقال برق، استهلاک تجهیزات، سن تجهیزات، هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری، و احتمال سوختن ترانسفورماتورها در نظر گرفته شده و بین ارتباط‌های مستقیم و غیرمستقیم آن‌ها مدل‌سازی صورت گرفته 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٪ مدل در شبیه‌سازی رفتار ۴۰ ساله‌ی گذشته‌ی ظرفیت‌های انتقال بوده و پس از تأیید اعتبار مدل به شبیه‌سازی ۳ سناریو در حوزه‌ی اخیر پرداخته شده است.

(۱) ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق تا افق ۲۰ ساله.

(۲) روند کاهشی تقاضای برق تا افق ۲۰ ساله (سناریوی خوش‌بینانه).

(۳) ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق، و ادامه‌ی روند احداث ظرفیت طبق روند ۵ ساله‌ی گذشته.

نتایج عددی حاصل از اجرای ۳ سناریوی فوق در افق ۲۰ ساله برای متغیرهای بخش اصلی مدل مطابق جدول ۵ بوده است: در ستون اول، مقدار متغیر در

اختلافی است که بین میزان ظرفیت موجود و ظرفیت موردانتظار به‌وجود می‌آید. از آنجا که در سناریوی دوم، تقاضای برق با رفتاری نمایی در حال افزایش بوده است، ادامه‌ی میانگین رفتار ۵ ساله‌ی گذشته قادر به جبران تقاضا نیست.

در جدول ۴، مقدار ایجاد ظرفیت به تفکیک سناریوهای مختلف و پست‌های مختلف ارائه شده است.

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به‌دلیل کثرت متغیرهای تأثیرگذار در صنعت انتقال برق، برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت درخصوص مقدار احداث، زمان احداث، و مکان آن، همواره با چالش‌های متعددی مواجه بوده است. پژوهش حاضر، ضمن مرور مطالعات پیشین داخلی و خارجی، چارچوب مناسبی را جهت تحلیل سیاست‌های مربوط به مقدار سرمایه‌گذاری در صنعت انتقال ارائه داده است. نمودار زیرسیستم‌های پژوهش حاضر، متغیرهای تورم، تقاضا، و عرضه‌ی برق را به صورت برون‌زا در نظر گرفته است. در نمودار علت و معلولی، متغیرهای

جدول ۵. نتایج حاصل از اجرای ۳ سناریوی پژوهش.

Variable*	2021	Scenario 1 (In 2041)		Scenario 2 (In 2041)		Scenario 3 (In 2041)	
		Value	%Change*	Value	%Change*	Value	%Change*
Total transmission Capacity	295,642	674,299	128%	531,720	80%	528,881	79%
400 KV	80,203	168,037	110%	132,183	65%	150,569	88%
230 KV	94,318	222,047	135%	175,048	86%	160,064	70%
132 KV	38,360	91,368	138%	72,437	89%	74,067	93%
63-66 KV	82,761	192,847	133%	152,053	84%	144,181	74%
Average life of transmission network (year)	14.6	21.2	45%	24.7	69%	24.6	168%
required capacity and the created capacity difference	24,125	27,091	12%	12,708	-47%	176,854	633%
* The unit for variables is MVA (MegaVolt-Ampere), and the percentage change with respect to the year 2021 is calculated in the scenarios.							

برق به‌دلیل صرفه‌جویی یا تغییرات مدیریتی به‌طورخوش‌بینانه با شیب کاهشی افزایش می‌یابد. اگر مقدار احداث ظرفیت انتقال سالیانه با استفاده از مدل محاسبه شود، کمترین فاصله بین ظرفیت موردنیاز و ظرفیت واقعی حاصل خواهد شد، که به‌عنوان یک سیاست مناسب برای پیش‌بینی ظرفیت انتقال در آینده به شمار می‌رود.

اما در سناریوی سوم، که در آن هم روند تقاضای برق افزایشی است و هم مقدار احداث ظرفیت سالیانه براساس میانگین پنج سال گذشته ادامه می‌یابد، در سال ۲۰۴۱ بیشترین اختلاف بین ظرفیت انتقال موردنیاز و ظرفیت انتقال واقعی به‌وجود خواهد آمد و پایداری ظرفیت انتقال برق به‌طور معناداری تنزل می‌کند. نتایج عددی سه سناریوی اجراشده بر روی مدل درخصوص میزان احداث ظرفیت انتقال به تفکیک نوع پست‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

سال ۲۰۲۱ و ستون‌های بعدی، مقدار هر کدام از متغیرها را در سال ۲۰۴۱ و درصد تغییر آن‌ها نسبت به سال ۲۰۲۱ ارائه شده است.

نتایج حاصل از اجرای سه سناریوی پژوهش حاضر، طبق جدول ۵ نشان می‌دهد که در سناریوی اول، که براساس ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق تا سال ۲۰۴۱ طراحی شده است، مقدار کل ظرفیت انتقال به‌صورت نمایی افزایش یافته است؛ که براساس تقاضای برق ناشی از افزایش جمعیت کشور و توسعه‌ی اقتصادی آن بوده است. متغیرهای توسعه‌ی ظرفیت انتقال برق نیز به صورت هدفجو افزایش یافته‌اند. متوسط سن شبکه‌ی انتقال نیز به‌صورت هدفجو در حال افزایش بوده است؛ در نتیجه، نیاز به جایگزینی شبکه‌ی انتقال نیز به‌طور نمایی افزایش خواهد یافت. بنابراین، اختلاف بین ظرفیت موردنیاز و ظرفیت موجود نیز رو به فزونی خواهد بود. در سناریوی دوم، در افق ۲۰ ساله، مقدار تقاضای

References – منابع

- Rajabi Mashhadi, M., 2018. Power industry strategies for supplying transformers in the power network of Iran. In 5th International Transformer Conference and Exhibition. Presidential Cultural Institution. [In Persian].
- 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, pp. 298–311. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.014>.
- 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, pp. 773–800. <https://doi.org/10.1007/s12667-020-00385-w>.
- Tavanir, 2022. 55 Years of Iran's Power Industry (1967-2021). [In Persian].
- 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, pp. 123158–123181. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936682>.
- Contreras, J., Gross, G., Arroyo, J.M., Muñoz, J.I., 2009. An incentive-based mechanism for transmission asset investment. *Decis Support Syst*, 47, pp. 22–31.
- 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, pp. 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.062>.
- 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, pp. 924–932. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.029>.
9. Dismukes, D.E., Cope, R.F., Mesyanzhinov, D., 1998. Capacity and economies of scale in electric power transmission. *Util Policy*, 7, pp. 155–162. [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. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/4/042022>.
11. Ford, A., 2001. Waiting for the boom: a simulation study of power plant construction in California. *Energy Policy*, 29, pp. 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, pp. 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 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. Monjazebe, 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, pp. 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*, 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 electricity generation mix. *Appl Energy*, 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. pp. 7-50. [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*, 14(3), 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*, 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 ANNs and Monte Carlo simulations. *Dyna (Medellin)*, 83, pp. 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(1), pp. 51-58. [In Persian].