

A Prospective Methodological Framework for Predicting Technological Innovation System (TIS) Failures in Emerging Technologies: Using The Systems Engineering (SE) Metaphor

Fatemeh Saghafi¹, Sepehr Ghazinoory², Naser Bagheri Moghaddam³, Mohammad Amin Fakhimi⁴

1- Associate Professor, Department of System Management & Decision Science, College of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. (Corresponding Author: fsaghafi@ut.ac.ir) 

2- Professor, Department of Information Technology Management, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Technology & Innovation Policy, National Research Institute for Science Policy, Tehran, Iran.

4- PhD candidate in Science and Technology Policy, College of Management, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

The theory of technological innovation system (TIS) is an efficient framework for explaining the structure and functions of emerging technologies, but its analysis tools are mainly descriptive and a posteriori in nature and lack a numerical-probability mechanism to predict the chain of functional failures in the early stages of system formation. The aim of this research is to develop a forward-looking methodological framework for probabilistic-numerical prediction of functional failures in the innovation system of emerging technologies. For this purpose, relying on the strategy of metaphorical research, the model of functional analysis of systems engineering (origin area) was mapped to the field of innovation system failure analysis (destination area). In this regard, functional flow diagram (FFBD) and fault tree analysis (FTA) tools were used to model the sequence of functions and potential failure paths. In order to validate the metaphor, a 9-member panel of experts in methodology, policy and systems engineering was held in two asynchronous and workshop phases. The findings of the research show that the functional analysis tool of systems engineering, with changes in some stages and in accordance with the soft requirements of a socio-technical system, is able to reveal the hidden functional dependencies of TIS and predict system failure scenarios. This research adds to the TIS literature by providing a generalizable and forward-looking method for failure analysis in emerging technologies, and by considering the possibility of identifying possible system failure states along with the severity of the failure probability, it provides valuable policy insights for designing more resilient innovation paths.

Keywords: Technological Innovation System (TIS), Metaphor Research; Functional Analysis, Systemic Failure Prediction, Emerging Technologies, Functional Flow Block Diagram (FFBD)

How to Cite this Paper:

Saghafi, F., Ghazinoory, S., Bagheri Moghaddam, N. & Fakhimi, M.A. (2026). **A Prospective Methodological Framework for Predicting Technological Innovation System (TIS) Failures in Emerging Technologies: Using The Systems Engineering (SE) Metaphor.** *Journal of Science & Technology Policy*, 19(3), 1-20. {In Persian}.
doi: 10.22034/jstp.2026.12319.2056



پیش‌بینی شکست‌های نظام نوآوری فناورانه در فناوری‌های نوظهور: بهره‌گیری از استعاره مهندسی سیستم‌ها

فاطمه ثقفی^۱، سپهر قاضی‌نوری^۲، ناصر باقری‌مقدم^۳، محمدامین فخمی^۴

۱- دانشیار گروه مدیریت سیستم و علوم تصمیم، دانشکده‌های مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fsaghafi@ut.ac.ir)

۲- استاد گروه مدیریت فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- دانشیار گروه پژوهشی سیاست فناوری و نوآوری، موسسه تحقیقات سیاست علمی کشور، تهران، ایران.

۴- دانشجوی دکترای سیاست‌گذاری علم و فناوری، دانشکده‌های مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

نظریه نظام نوآوری فناورانه (TIS) چارچوبی کارآمد برای تبیین ساختار و کارکردهای فناوری‌های نوظهور است، اما ابزارهای تحلیل آن عمدتاً ماهیتی توصیفی و پسینی دارند و فاقد سازوکار عددی-احتمالاتی برای پیش‌بینی زنجیره شکست‌های کارکردی در مراحل اولیه شکل‌گیری نظام هستند. هدف این پژوهش، توسعه یک چارچوب روش‌شناختی آینده‌نگر برای پیش‌بینی احتمالاتی-عددی شکست‌های کارکردی در نظام نوآوری فناوری‌های نوظهور است. بدین منظور، با اتکا بر راهبرد استعاره‌پژوهی، الگوی تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها (قلمرو مبدأ) به حوزه تحلیل شکست نظام نوآوری (قلمرو مقصد) نگاشت شد. در این راستا، ابزارهای نمودار جریان کارکردی (FFBD) و تحلیل درخت خطا (FTA) برای مدل‌سازی توالی کارکردها و مسیرهای بالقوه شکست به کار گرفته شدند. جهت صحت‌سنجی استعاره، یک پنل ۹ نفره از متخصصان روش‌شناسی، سیاست‌گذاری و مهندسی سیستم‌ها در دو فاز ناهمزمان و کارگاهی برگزار شد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ابزار تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها با تغییراتی در برخی مراحل و در تناسب با اقتضائات نرم یک نظام اجتماعی-فنی، قادر است وابستگی‌های کارکردی پنهان TIS را آشکار نموده و سناریوهای شکست سیستم را پیش‌بینی کند. این پژوهش با ارائه روشی قابل تعمیم و آینده‌نگر برای تحلیل شکست در فناوری‌های نوظهور، به ادبیات TIS افزوده و با توجه امکان‌شناسایی حالات شکست احتمالی سیستم به همراه شدت احتمال شکست، بینش‌های سیاستی ارزشمندی را برای طراحی مسیرهای نوآوری مقاوم‌تر فراهم می‌آورد.

کلیدواژه‌ها: نظام نوآوری فناورانه؛ استعاره‌پژوهی؛ تحلیل کارکردی؛ پیش‌بینی شکست سیستمی؛ فناوری‌های نوظهور؛ نمودار جریان کارکردی.

برای استنادات بعدی به این مقاله، قالب زیر به نویسندگان محترم مقالات پیشنهاد می‌شود:

ثقفی، فاطمه، قاضی‌نوری، سپهر، باقری‌مقدم، ناصر. و فخمی، محمدامین. (۱۴۰۵). پیش‌بینی شکست‌های نظام نوآوری فناورانه در فناوری‌های نوظهور: بهره‌گیری از استعاره مهندسی سیستم‌ها، (۳)، ۱۹-۲۰.

doi:10.22034/JSTP.2026.12319.2056



۱- مقدمه

تحولات فناورانه دهه‌های اخیر نشان داده است که نوآوری نه در قالب پیشرفت‌های منفرد، بلکه در چارچوب نظام‌های پیچیده‌ای شکل می‌گیرد که در آن بازیگران، نهادها، شبکه‌ها و زیرساخت‌ها به صورت پویا با یکدیگر تعامل دارند. در این میان، رویکرد نظام نوآوری فناورانه (TIS) به عنوان یکی از کارآمدترین چارچوب‌های تحلیلی، با تمرکز بر تعامل پویای بازیگران، نهادها و شبکه‌ها در بستر زیرساخت‌های نهادی، نقش مؤثری در تبیین مرحله شکل‌گیری فناوری‌های نوظهور ایفا کرده است [۱]. این رویکرد به‌ویژه در تحلیل فناوری‌های پیچیده که هنوز ساختارهای نهادی تثبیت‌شده‌ای ندارند، کاربرد وسیعی یافته است [۲ و ۳]. با این حال، TIS ریشه در پارادایم اقتصاد تکاملی دارد [۱] و به دلیل وابستگی به مسیر، تنوع‌پذیری و نقش تعیین‌کننده وقایع تاریخی، تحلیل‌های آن عمدتاً پسینی هستند؛ یعنی نظام را پس از شکل‌گیری یا در میانه مسیر کالبدشکافی می‌کنند و پیش‌بینی قطعی از آینده ارائه نمی‌دهند. این ویژگی، یک بن‌بست روش‌شناختی برای سیاست‌گذار ایجاد می‌کند: سیاست‌گذار در زمان حال ایستاده و مجبور به تصمیم‌گیری پیشینی درباره فناوری‌ای است که هنوز ساختارهای نهادی آن تثبیت نشده است. لازم به تأکید است که واژه «پیش‌بینی» در این پژوهش، نه به معنای پیش‌گویی^۱ قطعی به سبک پارادایم نئوکلاسیک، بلکه به معنای آینده‌پژوهی اکتشافی^۲ در چارچوب اقتصاد تکاملی است؛ ابزارهای پیشنهادی، با اتکا به احتمالات ذهنی خبرگان، به دنبال شناسایی و اولویت‌بندی زنجیره‌های محتمل شکست هستند، نه تعیین قطعیت رویدادهای آینده. این رویکرد، ضمن حفظ سازگاری با مبانی هستی‌شناختی TIS، پاسخی عملی به نیاز سیاست‌گذار برای تصمیم‌گیری پیشینی در شرایط عدم قطعیت شدید فراهم می‌آورد [۴].

مرور انتقادی منابع ۲۰ سال ۲۰۰۶-۲۰۲۶ نشان می‌دهد سه دسته مطالعات به این مسئله نزدیک شده، اما هیچ‌یک شکاف را پر نکرده‌اند: مطالعات تحلیل کارکردی که شکست‌ها را به صورت پسینی و کیفی شناسایی کرده‌اند [۵ و ۶]؛ مطالعات

مدل‌سازی پویایی‌های سیستم که توالی کارکردها را تبیین کرده‌اند اما ابزار پیش‌بینی عددی ارائه نداده‌اند [۷]؛ و مطالعات آینده‌پژوهی فناوری که به جای پیش‌بینی شکست، به پیش‌بینی ظهور فناوری پرداخته‌اند [۴]. بنابراین، شکاف اصلی در تقاطع سه نیاز قرار دارد: (الف) تحلیل کارکردی TIS، (ب) رویکرد آینده‌نگر، و (ج) ارزیابی احتمالاتی-عددی در مراحل اولیه شکل‌گیری.

پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف، از راهبرد استعاره‌پژوهی استفاده می‌کند تا منطق تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها (قلمرو مبدأ) را به حوزه تحلیل شکست TIS (قلمرو مقصد) منتقل کند. در این راستا، ابزارهای FFBD (برای مدل‌سازی توالی کارکردها) و FTA (برای شناسایی مسیرهای شکست و محاسبه احتمال آن‌ها) به کار گرفته می‌شوند. سؤال اصلی ما عبارت است از: «چگونه می‌توان با بهره‌گیری از منطق تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها، شکست‌های احتمالی یک نظام نوآوری فناورانه نوظهور را پیش از شکل‌گیری ساختارهای نهادی آن پیش‌بینی کرد؟»

ساختار مقاله بدین شرح است: بخش دوم به مرور پیشینه و تبیین دقیق شکاف اختصاص دارد؛ بخش سوم روش‌شناسی استعاره‌پژوهی و چارچوب پیشنهادی را ارائه می‌دهد؛ بخش چهارم مراحل اجرایی را تشریح می‌کند؛ و بخش پنجم به نتیجه‌گیری و پیشنهادهای سیاستی می‌پردازد.

۲- پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهش حاضر در سه بخش مجزا اما یکپارچه سازماندهی شده است: ابتدا رویکرد نظام نوآوری فناورانه (TIS) به عنوان چارچوب نظری معرفی شده و دو ویژگی متمایز آن، یعنی رویکرد پویا-کارکردمحور و بافازمندی، تبیین می‌شود. سپس مفهوم شکست سیستمی در TIS تعریف و رویکردهای مختلف تحلیل آن، با تأکید بر تمایز میان دو دیدگاه برگک و همکاران [۸] و سورس و هکرت [۵]، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نهایتاً با اتکا به چارچوب مایلز (۲۰۱۷) [۹] برای تبیین شکاف پژوهشی، یک مرور انتقادی بر ادبیات دو دهه اخیر انجام شده و شکاف روش‌شناختی اصلی پژوهش در تقاطع سه حوزه کلیدی شناسایی و بیان می‌شود.

^۱ Prediction^۲ Exploratory

۲-۱ رویکرد نظام نوآوری فناورانه و بافتارمندی آن

رویکرد نظام نوآوری فناورانه (TIS) تحولات فناورانه را از منظر تعاملات میان عوامل نهادی، سازمانی، اقتصادی، سیاسی و فنی تحلیل می‌کند. تعریف کارلسون و استنکیویچ [۱] از TIS به عنوان «شبکه‌ای پویا از عاملان که در یک ناحیه اقتصادی/صنعتی تحت زیرساخت‌های نهادی خاص با یکدیگر در تعامل بوده و در تولید، انتشار و بهره‌برداری از فناوری سهم هستند»، محبوب‌ترین تعریفی است که اکثر صاحب‌نظران به آن استناد کرده‌اند [۵ و ۱۰]. تمرکز TIS می‌تواند بر حوزه‌های بالغ فناوری یا بر ظهور و انتشار نوآوری‌های جدید و ریشه‌ای باشد [۱۱]. با این حال، برخلاف رویکرد نظام نوآوری بخشی (SIS) که در تبیین فناوری‌های بالغ موفق‌تر است، TIS عمدتاً برای توضیح و تبیین شکل‌گیری فناوری‌های نوظهور و تغییرات فناورانه به کار گرفته می‌شود [۳]. مارکارد و همکاران نیز TIS را به عنوان چارچوبی معرفی می‌کنند که توانایی تحلیل فناوری‌های ریشه‌ای و حوزه‌های نوظهور یا در حال ظهور فناورانه را داراست [۱۰].

مهم‌ترین ویژگی TIS که آن را از سایر رویکردهای نظام نوآوری متمایز می‌سازد، تمرکز بر پویایی سیستم و دیدگاه کارکردمحور به آن است [۱]. در چارچوب TIS، شکل‌گیری و توسعه فناوری‌های نوظهور از طریق تحقق مجموعه‌ای از کارکردهای کلیدی انجام می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها شامل ایجاد و انتشار دانش، هدایت جستجو، فعالیت‌های کارآفرینانه، شکل‌دهی به بازار، بسیج منابع و ایجاد مشروعیت است. تحقق این کارکردها شرط لازم برای شکل‌گیری و توسعه نظام نوآوری محسوب می‌شود. با این حال، توسعه فناوری فرآیندی خطی و همزمان نبوده و کارکردها در توالی‌های زمانی متفاوت و تحت تأثیر شرایط محیطی، نهادی و صنعتی فعال می‌شوند.

مطالعات حوزه TIS نشان می‌دهد تعاملات میان کارکردها به تدریج حلقه‌هایی از بازخورد ایجاد می‌کند که به تقویت متقابل فعالیت‌ها و تسریع فرآیند شکل‌گیری نظام نوآوری منجر می‌شود. سورس و هکرت این حلقه‌های تعاملی را تحت عنوان «موتورهای محرک نوآوری» معرفی کرده‌اند و

آن‌ها را سازوکارهای اصلی پویایی و توسعه نظام نوآوری فناورانه می‌دانند. این موتورها شامل چهار دسته اصلی هستند: موتور محرک علم و فناوری، موتور محرک کارآفرینی، موتور محرک ایجاد سیستم و موتور محرک بازار [۵]. با این حال، توالی شکل‌گیری و فعال‌شدن موتورهای نوآوری در تمامی فناوری‌ها یکسان نیست و بسته به ویژگی‌های فناوری، شرایط صنعتی و زمینه نهادی می‌تواند متفاوت باشد [۷]. از این رو، شکل‌گیری موفق نظام نوآوری مستلزم فعال‌سازی صحیح این موتورها و ایجاد پیوستگی میان آن‌ها است. هرگونه اختلال در تعاملات کارکردی یا ناتوانی در انتقال مناسب میان موتورهای محرک می‌تواند روند توسعه فناوری را مختل کرده و به بروز ضعف‌ها و شکست‌های سیستمی منجر شود.

یکی از تکامل‌های مهم ادبیات TIS، نحوه برهم‌کنش سیستم نوظهور با محیط پیرامون و ساختارهای مستقر است که توسط برگگ و همکاران [۱۱] تبیین شده است. بر این اساس، پویایی‌های فرآیندی یک فناوری نوظهور به شدت تحت تأثیر چهار ساختار بافتاری قرار دارد:

(۱) بافتار جغرافیایی: نظام نوآوری ملی و منطقه‌ای؛

(۲) بافتار بخشی: صنایع و بخش‌های مستقر که می‌تواند شامل چندین TIS باشد؛

(۳) بافتار فناورانه: نظام‌های نوآوری فناورانه رقیب یا مکمل؛

(۴) بافتار سیاسی: ائتلاف‌های قدرت و سیاست‌های کلان.

اهمیت این بافتارمندی^۱ در این است که ساختارها می‌توانند از طریق سازوکارهای بازدارنده درون رژیم مستقر و یا با اثرات خارجی کارکردی، پویایی کارکردهای داخلی TIS را مختل کرده و یا با ایجاد هم‌افزایی، شکل‌گیری آن را شتاب بخشند. به عبارت دیگر، هم ساختارها و هم کارکردهای موجود در بافتار می‌توانند پیامدهایی را بر TIS داشته باشند که بدون در نظر گرفتن این شرایط زمینه‌ای، امکان تحلیل اثربخش نظام وجود ندارد. برای مثال، تحقق، ضعف یا قوت کارکردهای هفت‌گانه در خارج از مرزهای TIS (درون بافتار) می‌تواند بر روی عملکرد کارکردهای داخلی TIS اثر مثبت یا منفی بگذارد که در این صورت اثرات خارجی کارکردی^۲ ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، ممکن است اشتراک بازیگران، نهادها

^۱ Contextuality

^۲ Functional External Effects

یا شبکه‌ها میان TIS و بافتار باعث شود یک نوع جفت‌شدگی و اتصال ساختاری^۱ رخ بدهد:

(۱) در حالت اشتراک بازیگران، یک شرکت، دانشگاه یا سازمان دولتی که هم‌زمان در حال توسعه فناوری نوظهور است، ممکن است هم‌زمان عضو کلیدی نظام نوآوری ملی یا بخشی نیز باشد.

(۲) در صورت اشتراک نهادها، یک قانون یا مقررات حکومتی می‌تواند هم‌زمان بر فناوری نوظهور و کل صنعت وضع شده باشد.

(۳) در صورت اشتراک شبکه‌ها نیز ممکن است انجمن‌های علمی یا ائتلاف‌های صنعتی وجود داشته باشند که هر دو حوزه را پوشش دهند.

این تبیین بافتاری از نظام نوآوری فناورانه اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا هرگونه تحلیل شکست در TIS بایستی با در نظر گرفتن شرایط زمینه‌ای آن از هر چهار بعد توضیح داده شده صورت پذیرد. علاوه بر این موارد، ممکن است ابعاد دیگری از شرایط بافتاری بر TIS مورد بررسی مؤثر باشد که این موضوع ضرورت انتخاب و به‌کارگیری خبرگان مرتبط را در تحلیل‌های TIS روشن می‌نماید.

۲-۲ شکست‌های نظام نوآوری فناورانه و رویکردهای تحلیل آن‌ها

عده‌ای از صاحب‌نظران حوزه نظام نوآوری فناورانه، مسائل سیستمی را در فناوری‌های مختلف شناسایی کرده و هر یک طبقه‌بندی متفاوتی از این موانع ارائه داده‌اند. جاکوبسون و جانسون در تحلیل خود از نظام نوآوری انرژی‌های نو در سوئد، مجموعه‌ای از عوامل بازدارنده توسعه و انتشار فناوری را در سه حوزه اصلی «بازیگران و بازار»، «شبکه‌ها» و «نهادها» طبقه‌بندی کرده‌اند [۱۲]. این طبقه‌بندی با چارچوب ارائه شده توسط چامیناد و ادوکیست هم‌راستا است که طیفی گسترده‌تر از مشکلات سیستمی شامل مشکلات تأمین زیرساخت و سرمایه‌گذاری، مشکلات نهادی (سخت و نرم)، قفل‌شدگی فناورانه، مشکلات یادگیری و توانایی، مسائل شبکه‌ای، عدم تعادل میان اکتشاف و بهره‌برداری، و مشکلات تکمیل‌شوندگی را پوشش می‌دهد [۱۳]. در ادامه، اسمیث با

رویکردی سیاست‌محور، شکست‌های سیستمی را در چهار دسته اصلی شامل شکست‌های زیرساختی و سرمایه‌گذاری، شکست‌های قفل‌شدگی و شکست‌های نهادی طبقه‌بندی می‌کند [۱۴]. در سطح کلان‌تر، گزارش OECD نیز مجموعه‌ای از شکست‌های نظام نوآوری را شامل کمبود تعامل میان بازیگران، عدم هم‌راستایی میان پژوهش‌های بنیادی و کاربردی، ضعف نهادهای انتقال فناوری و ناکارآمدی جذب و پردازش اطلاعات در بنگاه‌ها معرفی می‌کند.

نکته مهم دیگر که در قسمت قبل اشاره شد، بافتارمند بودن نظام نوآوری فناورانه است. بر اساس دیدگاه برگک و همکاران [۱۱]، یک TIS به‌صورت مجزا فعالیت نمی‌کند، بلکه در یک بافتار شامل ساختارهای نهادی، سیاسی و سرریزهای سایر فناوری‌ها محصور شده است که پویایی آن را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند.

برای تحلیل این شکست‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که در طول دوره‌های زمانی مختلف تکامل یافته‌اند. این روش‌ها عبارتند از تحلیل بر پایه خروجی، بر پایه کارکردهای نظام، بر پایه اجزای ساختاری نظام، و بر پایه ارتباط بین کارکردها و ساختارها. خروجی هر یک از این روش‌ها موانع و مسائل سیستمی نظام نوآوری فناورانه است. ادبیات TIS نشان می‌دهد رابطه‌ای دوسویه میان اجزای ساختاری و کارکردهای نظام نوآوری وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که ساختارها بر عملکرد کارکردها اثرگذار بوده و همچنین اگر کارکردی در نظام با مشکل مواجه شود، ریشه آن را می‌بایست در ساختارها و عملکرد آن‌ها جستجو نمود [۵ و ۶]. همچنین در مراحل اولیه شکل‌گیری فناوری، ساختارهای نظام از طریق بازخوردهای ناشی از کارکردها تکامل می‌یابند [۸ و ۱۵]. بنابراین تحلیل توأمان کارکردی-ساختاری مقبولیت و پوشش بهتری نسبت به دیگر رویکردها داراست. این رویکرد به شناسایی مسائل ساختاری موجود در هر یک از کارکردهای نظام می‌پردازد. در این رویکرد، ایده اصلی بر این استوار است که بر اساس رابطه و تأثیر متقابل کارکردها و عوامل ساختاری، علت ضعف یا قوت هر یک از کارکردهای سیستم، عوامل ساختاری مرتبط با آن کارکرد هستند [۲ و ۱۶]. با وجود این، محدودیت اصلی این رویکرد آن است که کارکردها غالباً

^۱ Structural Coupling

به صورت مجزا تحلیل می‌شوند و وابستگی‌ها و تعاملات میان آن‌ها، توالی سیستماتیک کارکردها و به تبع آن پیش‌بینی زنجیره شکست‌های کارکردی از ابتدای مراحل اولیه شکل‌گیری نظام نوآوری کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

باتوجه به توضیحات ارائه‌شده از مفهوم شکست و روش‌های تحلیل آن، در حالی که برگک و همکاران [۸] شکست را به مثابه سازوکارهای بازدارنده ناشی از نقص اجزای ساختاری تبیین می‌کنند که در نهایت مانع از تحقق کارکردها به شکل صحیح می‌شود، سورس و هکرت [۵] شکست سیستمی را یک پدیده پویا، فرآیندی و از جنس حلقه‌های معیوب بازخورد و به صورت علی-معلولی می‌دانند که در آن، وقوع یک رویداد منفی یا اختلال در یک کارکرد، به صورت زنجیره‌ای به کارکردهای دیگر سرایت کرده و منجر به سقوط کل سیستم در مرحله شکل‌گیری می‌شود. بنابراین باتوجه به مسأله پژوهش حاضر که مرتبط با شکست‌ها و پویایی‌های کارکردی فناوری‌های نوظهور است، این پژوهش به طور مشخص رویکرد فرآیندی و کارکردمحور سورس و هکرت را در تبیین مفهوم شکست سیستمی برمی‌گزیند.

۲-۳ مرور انتقادی و تبیین شکاف

چنان که ذکر شد، رویکرد نظام نوآوری فناورانه از منظر مبانی نظری ریشه در پارادایم اقتصاد تکاملی دارد و تحولات را در قالب فرآیندهای پویا، غیرخطی و باز تبیین می‌کند [۱]. همان‌طور که همه پژوهشگران اصلی این حوزه در چارچوب اقتصاد تکاملی به توسعه این نظریه پرداخته‌اند، طبیعی است که به دلیل سازوکارهای تنوع‌پذیری، وابستگی به مسیر و نقش تعیین‌کننده وقایع تاریخی، پیش‌بینی‌های قطعی از آینده شکست‌های سیستم ارائه نمی‌شود و تحلیل‌ها عمدتاً متکی بر کالبدشکافی رویدادهای گذشته و در یک کلام «پسینی» هستند. لذا به دلیل همین ویژگی پسینی و تکاملی ادبیات TIS، یک شکاف روش‌شناختی برای ارائه تحلیل‌های آینده‌نگرانه از شکست‌های احتمالی نظام نوآوری در حال شکل‌گیری در فناوری‌های نوظهور وجود دارد. این موضوع نیاز حاضر سیاست‌گذاران فناوری است که در زمان حال ایستاده و ناگزیر به اتخاذ تصمیمات و مداخلات پیشینی در مواجهه با عدم قطعیت‌های فناوری‌های نوظهور هستند. با

این حال، عده‌ای از پژوهشگران تلاش‌هایی را در جهت تلفیق نظریه‌های مختلف با رویکرد TIS در تحلیل فناوری‌های نوظهور داشته‌اند. برخی نیز سعی در ارائه رویکرد آینده‌نگر برای پیش‌بینی نظام‌های نوآوری مستعد ظهور نموده‌اند که به منظور صورت‌بندی دقیق‌تر مسأله پژوهش حاضر در میان مقالات این حوزه، در ادامه شکاف پیشینه تبیین شده است.

براساس دستورالعمل ارائه‌شده توسط مایلز [۹] بایستی ۴ گام برای نوشتن شکاف پژوهشی طی شود که عبارتند از:

گام اول: مرور انتقادی ادبیات : به عنوان گام اول شناسایی شکاف نظری، علاوه بر آنچه از مطالعات پیشین در حوزه بافتمندبودن نظام نوآوری فناورانه بیان شد، یک مرور انتقادی بر ادبیات ۲۰ ساله (۲۰۰۶-۲۰۲۶) در پایگاه Scopus انجام شد. در مرحله نخست ۱۲۹ مقاله شناسایی و پس از اعمال معیارهای مرتبط با کیفیت مجلات، حوزه موضوعی و ارتباط با شکست‌های سیستمی، ۳۱ مقاله انتخاب شد. در ادامه با اعمال معیار ارتباط مفهومی با TIS و قابلیت تحلیل/پیش‌بینی شکست، پویایی سیستم‌های نوظهور و رویکردهای آینده‌نگر، ۱۰ مقاله بین‌المللی انتخاب شد که مبنای تحلیل انتقادی این پژوهش قرار گرفت. علاوه بر آن، سه مجله مهم ایرانی حوزه مدیریت و سیاستگذاری نوآوری با عناوین موضوعی مرتبط با تحلیل شکست و توالی کارکردی در نظام نوآوری فناورانه در فناوری‌های نوظهور بررسی شده و از بیش از ۱۸ مقاله یافت‌شده، ۷ مورد با بیشترین ارتباط موضوعی، انتخاب و ارزیابی شد (مجموعاً ۱۷ مقاله فارسی و انگلیسی). مرور انتقادی پژوهش در سه خوشه اصلی قابل طبقه‌بندی است:

– خوشه ۱ (تحلیل شکست‌های TIS با رویکرد کارکردی): مقالات این بخش که هم‌راستا با جریان غالب ادبیات TIS و تحلیل شکست‌های نظام نوآوری بوده، با مطالعه موردی فناوری‌ها و یا صنایع مختلف بر کارکردهای نظام نوآوری و تحلیل تاریخی سیستم‌های بالغ یا نوظهور تمرکز نموده‌اند [۵، ۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱]. این مطالعات عمدتاً با رویکرد حال‌نگر یا پسینی، شکست‌های سیستم را شناسایی و اولویت‌بندی نموده‌اند. هرچند برخی از این مطالعات بر بستر اصلی نظری پژوهش حاضر یعنی «مرحله شکل‌گیری» انجام

شده‌اند، ولی فاقد سازوکارهای ارزیابی عددی-احتمالاتی آینده‌نگرانه بوده‌اند و قابلیت پیش‌بینی شکست ارائه نداده‌اند. -خوشه ۲ (مدل‌سازی تحولات فناورانه و پویایی‌های سیستم): در این دسته مطالعات، روابط علی-معلولی میان کارکردها با معرفی تئوری‌های مختلفی همچون موتورهای محرک نوآوری و با محوریت تحلیل پویایی‌های نظام نوآوری تحلیل و تبیین شده است. علاوه بر آن، مطالعاتی که به پویایی‌های سیستم با استفاده از حوزه‌های نظری مرتبط با تحول فناورانه، رویکرد چندسطحی، ارزیابی سازنده فناوری (CTA)، مدیریت کنام‌های راهبردی (SNM) و رویکردهای تلفیقی برای نگاشت این حوزه‌ها پرداخته‌اند نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۷،۲۲،۲۳،۲۴،۲۵،۲۶]. مقالات این بخش (غیر از حوزه مربوط به موتورهای محرک نوآوری) لزوماً در دسته مطالعات نظام نوآوری فناورانه قرار نمی‌گیرند، ولی به دلیل نزدیکی به حوزه تحلیل فناوری‌های نوظهور و رویکردهای آینده‌نگر، در بررسی اضافه شده‌اند. با این حال، خلأ پیش‌بینی آینده‌نگر از شکست‌های نظام نوآوری در حال شکل‌گیری و یا قابلیتی که از آن برای پیش‌بینی و یا شناسایی احتمالات عددی شکست در یک نظام نوآوری بتوان استفاده نمود، وجود دارد. -خوشه ۳ (مطالعات آینده‌پژوهی فناوری): این دسته مطالعات با تمرکز بر مسیرهای توسعه فناوری و سیگنال‌های رشد صنایع و ظهور فناوری‌های جدید همچون بیوگاز و جلبک، بعضاً تحلیل‌هایی را در حوزه TIS با رویکرد آینده‌نگر ارائه داده‌اند [۴ و ۲۷ و ۲۸]. این مطالعات به‌جای پیش‌بینی شکست‌های نظام نوآوری در حال شکل‌گیری، به پیش‌بینی نظام‌های نوآوری آینده پرداخته‌اند که در این مسیر بعضاً از روش‌های کمی، تحلیل پتنت و تحلیل روند استفاده کرده‌اند. با وجود اینکه رویکرد این مقالات آینده‌نگر بوده و حتی پیش‌بینی‌هایی با استفاده از TIS برای آینده یک صنعت خاص و فناوری‌هایی که احتمالاً ظهور خواهد نمود ارائه شده است، ولی کماکان رویکردی که بتواند شکست‌های محتمل و چالش‌های شکل‌گیری TIS مد نظر را به‌شیوه‌ای الگوریتم‌محور و با ارائه امکان تحلیل احتمالاتی شناسایی نماید، معرفی نشده است.

گام دوم: تبیین خلأهای موجود: برآیند مرور ادبیات نشان

می‌دهد که علی‌رغم بلوغ نظری حوزه TIS و قابلیت بالای این ابزار در تحلیل فناوری‌های نوظهور، ابزاری روش‌مند و آینده‌نگر برای پیش‌بینی احتمالاتی-عددی شکست‌های سیستمی در مراحل اولیه شکل‌گیری فناوری وجود ندارد. در نتیجه، همان‌طور که در مرور پیشینه ارائه شد، شکاف اصلی در تقاطع سه حوزه روشی زیر قرار دارد:

الف) تحلیل کارکردی TIS

ب) تحلیل آینده‌نگرانه از شکست‌های سیستمی

ج) پیش‌بینی احتمالاتی در مراحل اولیه شکل‌گیری فناوری لذا می‌توان گفت ادبیات موجود فاقد چارچوبی یکپارچه، روش‌مند و الگوریتم‌محور برای پیش‌بینی و اولویت‌بندی شکست‌های سیستمی در نظام‌های نوآوری در حال شکل‌گیری است که بتواند هم‌زمان پویایی‌های کارکردی-ساختاری و عدم‌قطعیت بالای مرحله اولیه توسعه فناوری را مدل‌سازی کند. به عبارت دیگر، هرچند تئوری نظام نوآوری فناورانه با فناوری‌های نوظهور انطباق بالایی دارد، اما در میان ادبیات تحلیل شکست نظام نوآوری فناورانه خلأ ابزارهای آینده‌نگر برای پیش‌بینی شکست وجود دارد که نیازمند توسعه روش است. بنابراین شکاف اصلی ادبیات موجود در پژوهش حاضر از جنس «شکاف روش‌شناختی» است.

-گام سوم و چهارم: تبیین اهمیت و ضرورت: به‌عنوان گام سوم و چهارم تبیین شکاف، ضروری است اهمیت و ضرورت پرداختن به شکاف توضیح داده شود. در این راستا، همان‌طور که برآیند مرور ادبیات نشان می‌دهد، گرچه چارچوب نظام نوآوری فناورانه (TIS) در تبیین سیستم در حال شکل‌گیری و تعیین کارکردهای حیاتی برای توسعه فناوری‌های نوظهور مناسب است، اما رویکردهای مرسوم تحلیل کارکردی، ساختاری و کارکردی-ساختاری آن، عمدتاً حال‌نگر و کیفی است. این رویکردها عمدتاً فاقد سازوکارهای عددی-احتمالاتی، پویا و آینده‌پژوهانه برای شبیه‌سازی سناریوهای شکست یا شناسایی «نقاط اهرمی شکننده» در مراحل اولیه شکل‌گیری نظام هستند. چالش شناسایی شده در هر فناوری نوظهوری، به دلیل نبود داده‌های تاریخی از شکست آن فناوری، امکان وقوع دارد. بنابراین، برای عبور از توصیف شکست‌های سیستم به پیش‌بینی احتمالاتی-عددی

شکست‌های سیستم، تحلیل TIS نیازمند تلفیق با ابزارهایی مانند تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها است تا علاوه بر قابلیت عددی‌سازی احتمالات شکست در آینده، امکان تحلیل اندرکنش و تعاملات کارکردها با یکدیگر و پویایی‌های ذاتی یک نظام نوآوری در حال شکل‌گیری را نیز فراهم آورد. در این راستا، ابزار تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها به دلیل رویکرد الگوریتمیک، می‌تواند قابلیت جدیدی را برای تحلیل شکست‌های نظام نوآوری فناورانه ایجاد نماید که این موضوع ایده اصلی توسعه روشی است که در این پژوهش دنبال می‌شود. لذا پژوهش حاضر در دو سطح دارای نوآوری است:

(۱) ارائه چارچوب روش‌شناختی آینده‌نگر و شبه‌کمی برای پیش‌بینی و اولویت‌بندی شکست در نظام‌های نوآوری فناورانه نوظهور

(۲) انتقال و ترجمه مفهومی ابزارهای تحلیل کارکردی در مهندسی سیستم‌ها به حوزه مطالعات نوآوری و ایجاد پیوند میان این دو حوزه

این رویکرد می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند تا پیش از تثبیت ساختارهای نهادی، مسیرهای شکست را به صورت فرآیندی شناسایی و مداخلات پیش‌دستانه و هدفمندتری برای شکل‌دهی نظام نوآوری طراحی کنند. لذا هدف پژوهش حاضر توسعه چارچوبی آینده‌نگر برای پیش‌بینی شکست‌های نظام نوآوری فناورانه در فناوری‌های نوظهور است.

۳- روش‌شناسی پژوهش

در حوزه مطالعات نوآوری استفاده استعاری از مفاهیم دیگر حوزه‌های علمی و دلالت‌پژوهی در راستای تبیین مسائل ناملموس بسیار رایج است. نصری و همکاران طی پژوهشی به شناسایی پنج دسته از این نگاشت‌های استعاری در حوزه مطالعات نوآوری پرداخته و نشان دادند بسیاری از نویسندگان مقالات مربوطه بدون اینکه به طور مستقیم از لفظ استعاره استفاده کرده باشند از حوزه‌های تخصصی مهندسی، هنر، ادبیات، زیست‌شناسی، اقلیم‌شناسی، فیزیک و غیره به عنوان قلمرو مبدأ استعاره، الهام گرفته‌اند [۲۹]. به طور کلی راهبرد استعاره‌پژوهی با هدف حل مسائل ناملموس، پیچیده و دارای خلأ در حوزه نظری به کار می‌رود تا دست محقق را برای

دریافت دلالت‌های نظری از حوزه‌های دیگر باز نماید. قاضی نوری و آقایی با الگوگیری از کانتینن^۱ و ساویر^۲ چهار مرحله استفاده از راهبرد استعاره‌پژوهی را متشکل از «تدارک و آماده‌سازی»^۳، نهفتگی^۴، بینش^۵ و صحت‌سنجی^۶ معرفی نموده‌اند [۳۲]. براین اساس در پژوهش، مراحل فوق طی شده است. در مرحله اول (تدارک) باید تحلیل اولیه‌ای از مسأله تبیین گردد. این موضوع در مقدمه و پیشینه پژوهش با بیان شکاف موجود در ادبیات تحلیل کارکردی TIS و نبود مدل الگوریتم‌محور احتمالاتی-عددی برای پیش‌بینی شکست‌های نظام نوآوری فناوری نوظهور ذکر شد. در مرحله دوم (نهفتگی) استعاره‌هایی که به طور بالقوه توانایی پاسخ به مسأله پژوهش را دارند شناسایی می‌گردد که در این راستا حدود ۱۰ استعاره از حوزه‌های دانشی سیستم‌های زیستی، فیزیک ذرات، مهندسی مکانیک و هوافضا بررسی شده است. استعاره بعدی که مورد ارزیابی قرار گرفت «اصول طراحی در مهندسی سیستم‌ها و فرآیندهای مربوط به تحلیل کارکردی و تخصیص، و کاربرد آن در مدل کردن فرآیند تحلیل شکست در نظام نوآوری فناورانه» بود که پس از طی مراحل سوم (بینش) و چهارم (صحت‌سنجی) و با اعمال ویرایش‌هایی بر مبنای نظر خبرگان در نهایت بدلیل تطابق بالا با مسأله پژوهش انتخاب شد. سپس با تشکیل پنل خبرگان حوزه مدیریت فناوری، متخصصان روش‌شناسی و متخصصان مهندسی سیستم‌ها (مجموعاً ۹ نفر) الگوی نهایی این استعاره‌پژوهی استخراج شد. انتخاب اعضای پنل به صورت هدفمند و با تکیه بر معیارهای شایستگی مرتبط با مسأله پژوهش صورت گرفت. از آنجا که این روش‌شناسی نیازمند بومی‌سازی ابزارهای مهندسی سیستم‌ها در بستر نظام نوآوری است، ترکیب خبرگان به گونه‌ای انتخاب شد که مرزهای میان دانش روش‌شناختی، دانش فنی-مهندسی و تجربه سیاست‌گذاری را پوشش دهد. معیارهای ورود به پنل عبارت بودند از: داشتن مدرک دکترا یا سابقه مدیریت ارشد در

¹ Kontinen 2018

² Sawyer 2006

³ Preparation

⁴ Incubation

⁵ Insight

⁶ Verification

پروژه‌های سیستم‌محور پیچیده، تسلط بر نظریه نظام نوآوری و حوزه سیاست‌گذاری فناوری، و داشتن حداقل ۱۰ سال سابقه فعالیت علمی یا اجرایی (جدول ۱).

به‌منظور تبیین روش‌شناسی این پژوهش، از چارچوب نوین «نقشه راه طراحی پژوهش» [۳۳] بهره گرفته شده که برخلاف مدل‌های سنتی مانند پیاژ پژوهش‌سازان، هم‌راستایی پویا و دقیقی میان لایه‌های مختلف معرفت‌شناختی تا عملیاتی برقرار می‌کند. بر اساس نقشه مزبور، طراحی پژوهش حاضر در ۵ لایه استاندارد به شرح زیر تبیین و نگاشت می‌گردد:

۱. لایه پارادایم فلسفی: این لایه به مبانی هستی‌شناختی و معرفت‌شناختی پژوهش می‌پردازد. با توجه به اینکه این تحقیق به دنبال حل یک مسئله واقعی در بستر سیاست‌گذاری فناوری و توسعه یک چارچوب روش‌شناختی کارآمد است، پارادایم «پراگماتیسم (عمل‌گرایی)» و رویکرد کلان «علم طراحی در مدیریت (DSR)» به عنوان پارادایم فلسفی مبنا قرار گرفته است.

۲. لایه هدف و سؤال پژوهش: در این لایه، اهداف و پرسش‌های محقق می‌شوند. هدف اصلی پژوهش، «توسعه

چارچوبی آینده‌نگر برای پیش‌بینی شکست‌های نظام نوآوری فناورانه در فناوری‌های نوظهور با بهره‌گیری از استعاره مهندسی سیستم‌ها» است و سؤال اصلی پژوهش عبارت است از: «چگونه می‌توان با بهره‌گیری از منطق تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها، شکست‌های احتمالی یک نظام نوآوری فناورانه نوظهور را پیش از شکل‌گیری ساختارهای نهادی آن پیش‌بینی کرد؟»

۳. لایه راهبردهای پژوهش: این لایه مشخص می‌کند که برای پاسخ به سؤالات پژوهش، از چه مسیری استفاده شود. با توجه به اینکه در اینجا دو حوزه نظری با مبانی هستی‌شناسانه متفاوت تطبیق داده می‌شوند، استراتژی این پژوهش «استعاره‌پژوهی» [۳۴] است. بر اساس پژوهش لاکوف و جانسون [۳۲]، ساختار موجود در یک مفهوم (تحلیل کارکردی در مهندسی سیستم‌ها) در مفهوم دیگر (تحلیل نظام نوآوری فناورانه) شناسانده می‌شود، پس این استعاره از نوع «ساختاری» است که به عنوان ابزار اصلی در دل پارادایم DSR برای نگاشت قلمرو مبدأ به مقصد به کار می‌رود.

جدول ۱) مشخصات پتل خبرگان پژوهش

تعداد	حوزه تخصصی خبرگان	سمت و درجه علمی اشخاص
۳ نفر	اساتید روش‌شناسی دارای تجربه استعاره‌پژوهی در حوزه تخصصی مدیریت و سیاست‌گذاری علم و فناوری	عضو هیأت علمی موسسه تحقیقات سیاست علمی کشور
		عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس
		عضو هیأت علمی دانشگاه تهران
۲ نفر	متخصصین مهندسی سیستم‌ها (مدیران واحد مهندسی سیستم‌ها در پروژه‌های پیچیده)	دکتری مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شریف
		ارشد مهندسی هسته‌ای دانشگاه شهید بهشتی
۲ نفر	سیاست‌گذاران و مدیران یک صنعت فناوری-بالا و دارای آشنایی با حوزه علمی حکمرانی و سیاست‌گذاری	دکتری مهندسی هسته‌ای دانشگاه شریف
		دکتری مهندسی هسته‌ای دانشگاه شریف
		دکتری مدیریت کسب و کار دانشگاه شریف

احتمالاتی-شبه‌کمی مبتنی بر قضاوت خبرگان» برای تحلیل توالی کارکردها و مسیرهای شکست استفاده شده است.

۵. لایه ابزارهای گردآوری داده: در این لایه، ابزارهای عملیاتی برای جمع‌آوری شواهد مشخص می‌شوند. ابزارهای گردآوری داده در این پژوهش شامل «مرور نظام‌مند ادبیات (برای شناخت سیستم و شکست‌های پیشین)»، «بررسی اسناد

۴. لایه روش‌های تحلیل داده: این لایه به تکنیک‌های پردازش و تفسیر داده‌ها اختصاص دارد. در پژوهش حاضر، پس از استخراج داده‌ها و نگاشت استعاری، از روش‌های «تحلیل کارکردی و تخصیص»، «مدل‌سازی نمودار جریان کارکردی (FFBD)»، «تحلیل درخت خطا (FTA)» و «تحلیل

آغازگر^۸ خطا(که می‌تواند عامل انسانی یا طبیعی باشد) توسط خبرگان تعیین می‌شود. ۶) یکپارچه‌سازی کارکردها. یکی از علل انتخاب فرآیند تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها به‌عنوان مبدأ استعاره‌پژوهی، تشابه بنیادین در ماهیت سیستم‌محور دو قلمرو است. جوانب اجتماعی نظام نوآوری، دارای اجزای متعدد، درهم‌تنیده و بعضاً غیرملموسی هستند که پیچیدگی آن‌ها را به‌مراتب بیش از یک سیستم مهندسی می‌سازد. با این حال، هسته مرکزی هر دو رویکرد، «کارکرد» است: در مهندسی سیستم‌ها، عدم تحقق کارکردهای محصول به‌معنای شکست سیستم است و در TIS نیز کارکردها مرکز ثقل نظریه و عامل پویایی‌های نظام محسوب می‌شوند. این هم‌ساختاری، امکان نگاشت استعاری را فراهم می‌سازد.

۳-۲ دریافت نظرات خبرگان درخصوص الگوی اولیه

چنانکه اشاره شد، بر اساس راهبرد استعاره‌پژوهی قاضی‌نوری و آقایی[۳۲]، پس از مراحل «تدارک، نهفتگی و شکل‌گیری بینش اولیه»، مرحله چهارم یعنی صحت‌سنجی جهت تأیید نهایی و بافتارپذیری استعاره ضرورت دارد. از آنجا که ایده محوری این پژوهش، توسعه یک روش‌شناسی در تقاطع دو حوزه با هستی‌شناسی متفاوت (مهندسی سیستم‌ها و سیاست‌گذاری نوآوری) است، برای تضمین «اعتبار محتوایی» چارچوب پیشنهادی، یک پنل خبرگان ساختاریافته شامل ۹ نفر از متخصصان حوزه‌های مرتبط تشکیل شد. منطبق بر الگوی اعتبارسنجی استعاره‌های پیچیده در حوزه نوآوری توسط قاضی‌نوری و همکاران [۳۶]، در این فرآیند پنل خبرگان دو سطح روایی را به‌طور مجزا بررسی کردند:

۱) روایی اصطلاحی و مفهومی: تأیید اینکه مفاهیم وام‌گرفته‌شده از مهندسی سیستم‌ها در انتقال به حوزه مقصد دچار تحریف معنایی نشده و با ریشه‌های مفاهیم قلمرو مقصد سازگاری دارند. مثلاً مفهوم «شکست» در مهندسی سیستم‌ها به‌معنای عدم تحقق کارکرد است، در حالی که در اینجا می‌تواند به‌معنای ضعف ساختاری یا اختلال در موتورهای محرک نوآوری باشد. خبرگان باید تأیید می‌کردند که این نگاشت معنایی، بدون تحریف و با حفظ هستی‌شناسی حوزه نوآوری انجام شده است.

سیاستی و بالادستی» و «پنل خبرگان ساختاریافته (شامل ارزیابی ناهمزمان و کارگاه مجازی جهت صحت‌سنجی استعاره)» می‌باشند.

۳-۱ تطبیق مؤلفه‌های رویکرد مقصد (نظام نوآوری) و رویکرد مبدأ (مهندسی سیستم‌ها)

مهندسی سیستم‌ها یک شاخه از مهندسی است که به طراحی، تحلیل، اداره و بهبود سیستم‌های پیچیده می‌پردازد. به عبارت دیگر محصولاتی که طراحی و ساخت آن‌ها ساده باشد و یا از ترکیب چندین ماژول تشکیل شده باشد (محصولات ماژولار) نیاز چندانی به مهندسی سیستم‌ها ندارد، بلکه سیستم‌های پیچیده و با درجه درهم‌تنیدگی بالا که اجزای^۱ آن بایکدیگر یکپارچه^۲ شده اند، برای توسعه نیازمند این حوزه تخصصی می‌باشد. یکی از اقداماتی که در طراحی سیستم‌های محصول انجام می‌شود «تحلیل کارکردی و تخصیص»^۳ است [۳۵]. خروجی این مرحله تعیین معماری کارکردی سیستم درحال طراحی است. فعالیت‌های اصلی این گام عبارت است از: ۱) تعریف حالات^۴ و وضعیت‌هایی که سیستم در آن قرار می‌گیرد؛ ۲) ترسیم بلوک دیاگرام جریان کارکردی یا FFBD^۵ به معنای ترسیم الزامات سیستم، تحت عبارات کارکردی و در سطوح چندگانه؛ ۳) تعریف واسط‌های خارجی سیستم و کارکردهایی که به ارتباط سیستم با سیستم‌های دیگر مربوط می‌شود؛ ۴) تخصیص الزامات عملکردی به کارکردها؛ ۵) تحلیل درخت خطا (FTA)^۶ و تجزیه و تحلیل عوامل شکست سیستم و آثار آن (FMEA)^۷ (لازم به ذکر است فرآیند دیگری تحت عنوان تحلیل شکست وجود دارد که به مرحله تست‌های صحت‌گذاری مرتبط است و با این مورد متفاوت است)؛ در این مرحله براساس FFBD ترسیم شده سیستم و جمع‌آوری گزارشات خطا در سیستم‌های مشابه، احتمال وقوع خطا در زنجیره فرآیندی سیستم شناسایی می‌شود. در شرایطی که دسترسی به داده‌های قبلی وجود نداشته باشد، احتمالات خطا در هر فرآیند به همراه رویداد

^۱ System Element

^۲ Integrate

^۳ Functional Analysis and Allocation

^۴ Modes

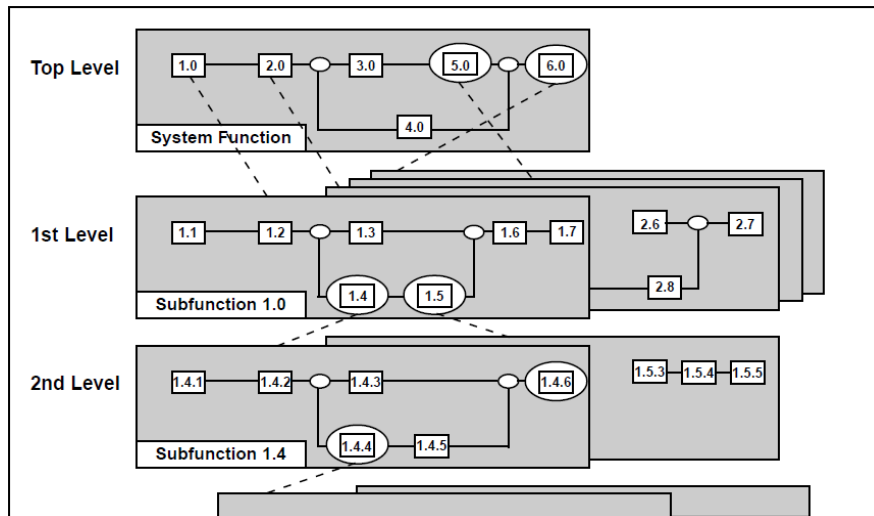
^۵ Functional Flow Block Diagram(FFBD)

^۶ Fault Tree Analysis

^۷ Failure Mode and Effect Analysis

^۸ Initial Event

پیش‌بینی شکست‌های نظام نوآوری فناورانه در فناوری‌های نوظهور: بهره‌گیری از استعاره مهندسی سیستم‌ها



شکل (۱) نمایش مدل FFBD یک سیستم فرضی با شکست سه سطحی [۳۵]

جدول (۲) تطبیق‌دهی و نگاشت مؤلفه‌های رویکرد نظام نوآوری بر مهندسی سیستم‌ها در تحلیل شکست

ردیف	مؤلفه‌های رویکرد	تحلیل شکست در نظام نوآوری فناورانه (TIS)	تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها	خلأ و شکاف موجود در تحلیل TIS که با استعاره مهندسی سیستم‌ها جبران‌شدنی است
۱	هدف	شناسایی ضعف‌ها و شکست‌های پدیدآمده در TIS	پیش‌بینی شکست‌های احتمالی سامانه (حالات شکست FTA) و شناسایی رخداد خطاها	با وجود تشابه حالات شکست FTA با ضعف‌های TIS، قابلیت پیش‌بینی شکست‌ها در مهندسی سیستم‌ها وجود دارد که در تحلیل TIS نیست.
۲	تمرکز تحلیل	کیفیت و چگونگی تحقق کارکردهای نظام نوآوری (۷ کارکرد)	تحقق یا عدم تحقق کارکردهای اصلی و زیرکارکردهای سامانه	(دارای تشابه)
۳	منظرگاه زمانی	حال‌نگر (براساس ارزیابی کیفیت تحقق کارکردهای نظام)	آینده‌نگر (براساس ارزیابی احتمالاتی پدیده‌های آینده، به‌مراه بررسی تاریخچه عملکرد سامانه‌های مشابه)	اتخاذ رویکرد آینده‌نگر و ارائه احتمالات عددی در مهندسی سیستم‌ها
۴	اجزای تشکیل‌دهنده (ساختاری)	مؤلفه‌های ساختاری (بازیگران، نهادها، تعاملات)	اجزا (components) و واسط‌ها (interfaces)	(دارای تشابه)
۵	معنی‌بخش‌ها و پویایی‌های اجزا	کارکردهای TIS	کارکردهای سیستم در قالب بلوک‌های FFBD	(دارای تشابه)
۶	پیامد و خدمات رویکرد	شناسایی کیفیت تحقق کارکردها در ساختاری	تعیین معماری کارکردی بهینه سامانه	قابلیت تحلیل زنجیره‌ای و فهم توالی بهینه کارکردها در مهندسی سیستم‌ها

۲) روایی نگاشت ساختاری و ارتباطی: اعتبارسنجی ماتریس تطبیق مؤلفه‌ها (جدول ۲) با هدف اطمینان از اینکه ساختار قلمرو مبدأ (FFBD و FTA) قابل تطبیق با زنجیره کارکردهای TIS و پویایی‌های یک نظام نوآوری فناورانه در حال شکل‌گیری است. این سطح از روایی، به‌ویژه با توجه به ماهیت نرم و انسانی TIS (در مقابل ماهیت سخت مهندسی سیستم‌ها) و همچنین بافتارمندی نظام نوآوری [۱۱]، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود.

به‌منظور کنترل سوگیری‌های خبرگان نظیر تفکر گروهی یا سوگیری همنوایی با اکثریت، فرآیند دریافت نظرات خبرگان در دو گام و به صورت رفت‌و برگشت طراحی شد:

گام اول: ارزیابی ناهمزمان و مستقل در این گام، تطبیق اولیه مؤلفه‌های TIS و مهندسی سیستم‌ها (جدول ۲) به همراه فرآیند ۶ مرحله‌ای تحلیل کارکردی، به‌صورت انفرادی و مکتوب برای اعضای پنل ارسال شد. هدف از این گام، تضمین استقلال رأی خبرگان و کنترل سوگیری سلطه بازیگران مقتدر بر پنل بود. هر یک از ۹ عضو پنل، به‌طور مستقل، نظرات خود را درباره روایی اصطلاحی و ساختاری نگاشت استعاری ارائه دادند.

گام دوم: کارگاه مجازی و بحث جمعی پس از جمع‌آوری بازخوردهای انفرادی و مشخص‌شدن موارد افتراق، یک جلسه کارگاهی مجازی با حضور تمام اعضای پنل تشکیل شد. در این جلسه، مواردی که توافق اولیه بر روی آن‌ها وجود نداشت، به بحث گذاشته شدند. مهم‌ترین چالش‌های مطرح‌شده عبارت بودند از:

چالش تعمیم نرخ خرابی مکانیکی به نظام‌های نوآوری: در مهندسی سیستم‌ها، احتمال شکست از داده‌های آماری قطعی استخراج می‌شود، اما در TIS، به دلیل ماهیت نرم و انسانی نظام نوآوری، چنین داده‌هایی وجود ندارند.

ضرورت تخصیص الزامات عملکردی کمی: در مهندسی سیستم‌ها، برای هر کارکرد، الزامات عملکردی کمی (مانند دما، فشار، سرعت) تعریف می‌شود، اما در TIS، بسیاری از شاخص‌های کارکردی کیفی هستند.

در نهایت، ضمن تأیید روایی استعاره فوق و تأکید مشترک خبرگان بر مزایای این رویکرد در پیش‌بینی احتمالاتی-عددی

و نیز رویکرد الگوریتمیک مهندسی سیستم‌ها برای تحلیل نظام نوآوری، مراحل این روش پیشنهادی، متناسب با اقتضائات نرم یک نظام نوآوری فناورانه و بافتارمند، بازتعریف شد. جمع‌بندی نکات مطرح‌شده به شرح زیر است:

- پیش از آغاز تحلیل نظام نوآوری، ابتدا می‌بایست شناخت سیستم اتفاق بیفتد و داده‌های مورد نیاز تحلیل، از مطالعه فناوری نوظهور استخراج گردد. در تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها نیز گام اول «تعریف حالات و وضعیت‌هایی که سیستم در آن قرار می‌گیرد» می‌باشد. ضمن تأیید اینکه دو موضوع فوق در یک روش قابل جمع است، گام اول رویکرد پیشنهادی می‌بایست مبتنی بر مطالعه فناوری نوظهور در کشورهایی باشد که از کشور ما جلوتر هستند. در این گام پیشنهاد می‌شود مقالات و تجربیاتی که از شکست‌های احتمالی و چالش‌های پیش‌بینی‌شده (یا محقق‌شده) آن فناوری در کشورهای مختلف ثبت شده است، مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. هدف از این کار، فهم وضعیت‌هایی است که کارکردهای نظام نوآوری با آن مواجه خواهد شد.

پس از تعیین چالش‌ها، بر اساس قضاوت محقق امکان ترسیم بلوک دیاگرام جریان کارکردی (FFBD) نظام نوآوری فناوری نوظهور وجود دارد، اما این جریان کارکردی با واقعیت و شرایط بافتاری و بومی ایران لزوماً منطبق نیست. همان‌طور که در بخش پیشینه پژوهش ذکر شد، یک TIS به‌صورت مجزا فعالیت نمی‌کند، بلکه در یک بافتار و زمینه شامل ساختارهای نهادی، سیاسی و سرریزهای سایر فناوری‌ها محصور شده است که پویایی آن را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۱]. لذا در چارچوب روش‌شناختی پیشنهادی باید این ابعاد بافتاری و شرایط زمینه‌ای، به‌عنوان الزامات ورودی و وضعیت‌های اولیه سیستم در نمودار جریان کارکردی (FFBD) و همچنین به‌عنوان رویدادهای آغازگر در درخت خطا (FTA) مدل‌سازی شوند تا فرآیند پیش‌بینی شکست، کاملاً بافتارپذیر و منطبق بر واقعیات رژیم مستقر باشد. لذا حتماً در این گام قضاوت خبرگانی از صنعت مورد نظر ضروری است. بنابراین باید یک گام «تطبیق‌سنجی توسط خبرگان صنعتی» به مراحل تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها

اضافه شود.

- طبق مراحل تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها، گام بعدی «تعریف واسطه‌های خارجی سیستم و کارکردهایی که به ارتباط سیستم با سیستم‌های دیگر مربوط می‌شود» است. این موضوع متناظر با ساختارهای بافتاری برگک و همکاران [۱۱] و اثرات خارجی مثبت یا منفی آن‌ها در شکل‌گیری نظام نوآوری است. به عبارت دیگر، ورودی‌های شرایط زمینه‌ای و بافتاری می‌توانند به‌عنوان رویدادهای آغازگر در کف درخت خطا قرار گرفته و منجر به سرایت خطاهای محیطی به کارکردهای داخلی TIS شوند. با توجه به اینکه منطق این گام شناسایی برهم‌کنش‌های اجزای سیستم با یکدیگر است، در الگوی نظام نوآوری فناورانه تعاملات و توالی کارکردهای مختلف و اثر آن‌ها بر هم، ذیل چارچوب «موتورهای محرک نوآوری سورس-هکرت» معنابخشی شده است. در این گام هم پیشنهاد می‌شود از این موتورها برای توصیف بهتر تعاملات کارکردی درون نظام نوآوری فناوری نوظهور استفاده شود.
- گام بعدی تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها «تخصیص الزامات عملکردی به کارکردها» است. منظور این است که ویژگی‌ها و حدود مجاز عملکردی برای هر کارکرد مشخص شود. برای مثال دما و فشار مجاز یک ویژگی عملکردی سیستم محسوب می‌شود. با توجه به نوظهور بودن فناوری و ماهیت کیفی بسیاری از شاخص‌های کارکردی در نظام نوآوری، این مرحله ضروری نیست. هرچند برای معرفی الگوی دقیق‌تر و در صورتی که اطلاعات کافی از فناوری در دسترس باشد، می‌توان شاخص‌هایی را برای کارکردها مشخص کرد که دقت آن افزایش یابد. مثلاً «کارکرد شکل‌دهی به بازار» باید به نحوی عمل کند که حجم بازار بالقوه $\times$ میلیون دلار برای فناوری ایجاد شود.
- دو گام پایانی رویکرد تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها «تحلیل درخت خطا (FTA)» و «یکپارچه‌سازی کارکردها» است. در تحلیل نظام نوآوری نیز برای تکمیل FFBD ترسیم‌شده باید درخت خطا به همراه احتمال بروز هریک

از خطاهای کارکردی با نظر خبرگان صنعت ترسیم شود. اهمیت این فاز در این است که هدف از تحلیل نظام نوآوری شناسایی مهم‌ترین شکست‌هاست، نه کلیه شکست‌های ممکن. از این طریق و با روش احتمالاتی می‌توان مهم‌ترین موارد را جهت اقدامات سیاستی بعدی احصاء نمود. با توجه به عدم قطعیت فناوری‌های نوظهور و فقدان داده‌های آماری از شکست‌های قبلی، احتمالات شکست بر اساس قضاوت خبرگانی کشف می‌شود که با پیچیدگی‌های نظام‌های نوآوری مشابه آشنایی بیشتری دارند.

۳-۳ تبیین روایی، معرفت‌شناختی و حدود استعاره‌پژوهی در تحقیق

بر اساس نظریه استعاره‌های مفهومی^۱ لکاف و جانسون [۳۴]، استعاره‌ها صرفاً ابزارهای ادبی نیستند، بلکه سازوکارهای بنیادین معرفت‌شناختی هستند که ذهن انسان از طریق آن‌ها، یک قلمرو مقصد انتزاعی، پیچیده و ناملموس را بر اساس ساختار یک قلمرو مبدأ ملموس‌تر، نظام‌مندتر و توسعه‌یافته‌تر درک و تحلیل می‌کند. از این رو در این بخش مشروعیت معرفت‌شناختی کاربست این استعاره تبیین شده است. در این پژوهش، قلمرو مبدأ «تحلیل کارکردی در مهندسی سیستم‌ها» و قلمرو مقصد «تحلیل شکست در نظام نوآوری فناورانه (TIS)» است. بدیهی است که دو پدیده از هر حیث هم‌ارز و یکسان نیستند ولی طبق اصل نگاشت جزئی^۲ که در مدل کورنلیسن [۳۷] نیز به آن اشاره شده، نیازی به هم‌ارزی ۱۰۰ درصدی یا تطابق کامل هستی‌شناختی میان کلیه ابعاد قلمرو مبدأ و مقصد وجود ندارد. همانطور که در بخش روش تحقیق ذکر شد، نوع استعاره به‌کاررفته در این پژوهش «استعاره ساختاری» است. در این نوع استعاره، از ساختار روابط میان اجزا در قلمرو مبدأ، برای سازمان‌دهی به پدیده مقصد وام گرفته می‌شود. در جدول ۲ تفاوت‌ها و شباهت‌های ساختار دو حوزه مبدأ و مقصد نشان داده شد تا مرزهای تحلیلی آن شفاف گردد. مهم‌ترین شباهت این است که هر دو حوزه سیستم‌محور بوده و موفقیت آن‌ها منوط به یکپارچگی

^۱ Conceptual Metaphor Theory

^۲ Partial Mapping

کارکردی اجزا است. علاوه بر آن مفهوم «شکست» به عنوان ناتوانی سیستم در تحقق کارکرد، در هر دو قلمرو به طور ساختاری متناظرند. این موضوعات باعث می شود قابلیت ابزارهای FFBD و FTA در قلمرو مبدأ امکان ردیابی وابستگی های کارکردی و نیز شناسایی علت و معلولی شکست های نظام را فراهم سازد. از سوی دیگر وجوه تمایزی میان دو رویکرد وجود دارد که آن ها را به عنوان محدودیت های استعاره در نظر می گیریم و در توسعه روش براساس پنل خبرگان می بایست مورد ویرایش و تطابق با شرایط قلمرو مقصد قرار گیرد. برای مثال در مهندسی سیستم ها، مرزهای یک محصول مهندسی و فنی بسته و بازیگران بی جان هستند اما در TIS مرزها باز و بازیگران انسان های مستقل هستند. مورد تمایز دیگر این است که در مهندسی سیستم ها نرخ خرابی از داده های آماری قطعی استخراج می شود و تنها در شرایطی که فناوری کاملاً از صفر طراحی می شود و هیچ داده آماری قبلی وجود ندارد، از قضاوت متخصصان به صورت کمی استفاده می شود. لذا برای مواجهه با این محدودیت، به دلیل عدم قطعیت فناوری های نوظهور، احتمالات شکست بر اساس قضاوت خبرگانی کشف می شود که با پیچیدگی های نظام های نوآوری مشابه آشنایی بیشتر دارند.

همان طور که قاضی نوری و آقای [۳۲] نشان داده اند، هنر روش شناختی استعاره پژوهی در تفکیک وجوه تشابه (نگاشت ساختاری روابط علی) از وجوه تمایز (محدودیت های استعاره) نهفته است. بر این اساس، پنل خبرگان این پژوهش با در نظر گرفتن مرزهای استعاره، دو ویرایش بنیادین را برای حفظ سازگاری ساختاری اعمال نمود: اول، حذف گام الزامات عملکردی مهندسی؛ و دوم، بازتعریف تخصیص احتمالات در تحلیل درخت خطا (FTA) که به دلیل ماهیت پویا و عدم قطعیت شدید فناوری های نوظهور، احتمالات ذهنی مبتنی بر قضاوت خبرگانی جایگزین نرخ خرابی های آماری و قطعی گردد. در نتیجه، کاربست استعاری این رویکرد مهندسی، تحریف نظری در TIS ایجاد نمی کند. بلکه با اتکا به شباهت های ساختاری-کارکردی، به سیاست گذار اجازه می دهد تا از توصیف های صرفاً کیفی و گذشته نگر عبور

کرده و به شبیه سازی سناریوهای پویای شکست قبل از شکل گیری کامل رژیم فنی-اجتماعی دست یابد. در چارچوب پژوهش علم طراحی [۳۸] تمایز بنیادینی میان دو مرحله توسعه مصنوع روش شناختی و نمایش روش در بافتار قائل می شوند؛ بر این اساس، اعتبار یک متدولوژی توسعه یافته در مرحله نخست، لزوماً نیازمند پیاده سازی در یک مطالعه موردی تجربی خاص نیست، بلکه از طریق انسجام منطقی درونی، سازگاری با ادبیات نظری و تأیید خرد جمعی خبرگان اثبات می شود.

از سوی دیگر طبق تئوری های بنیادین حوزه DSR (که ذیل چارچوب نقشه راه پژوهش انطباق آن با رویکرد این پژوهش بیان شد) ارزیابی روایی و اعتبار مصنوع توسعه یافته (روش شناسی معرفی شده) نیازمند آزمون های آماری یا پیاده سازی های محلی نیست؛ بلکه اعتبار روش شناسی پیشنهادی از طریق انسجام منطق داخلی اثبات می شود [۳۹]. بدین منظور و برای تضمین روایی کیفی این روش شناسی، از چارچوب چند لنز کرسول و میلر [۴۰] استفاده شده است. بدین صورت که از منظر (لنز) مشارکت کنندگان^۱ پس از نگاشت استعاره مفهومی اولیه توسط محقق (جدول ۲)، پیش نویس الگوریتم در اختیار پنل خبرگان قرار گرفت. برخی از این خبرگان که خود تجربه مهندسی سیستم ها در پروژه های پیچیده و نیز جایگاه مدیریتی در اکوسیستم علم و فناوری کشور را داشتند نیز پس از جرح و تعدیل گام ها (نظیر حذف الزامات عملکردی و تایید احتمالات ذهنی)، تایید کردند که ابزار نهایی به درستی قادر است پویایی و ریسک های واقعی این نظام های نوآوری نوظهور را در بستر بافتار کشور بازنمایی کند. علاوه بر آن با استفاده از ممیزی همپایان مستقل^۲، حضور ۳ نفر از اساتید ارشد روش شناسی و سیاست گذاری فناوری در پنل خبرگان به عنوان ممیزان مستقل، فرآیند تحقیق را مصون از سوگیری کرد. این اساتید با به چالش کشیدن حدود استعاره و مفروضات معرفت شناختی این راهبرد منجر به پختگی و تایید چارچوب شدند. از سوی دیگر منطبق بر لنز محقق که کرسول و میلر تحت عنوان

^۱ Member Checking

^۲ Peer Debriefing

مثلت‌سازی^۱ شرح داده‌اند، اعتبار ساختاری این روش‌شناسی پیشنهادی را می‌توان حاصل هم‌گرایی سه منبع داده‌ای متمایز یعنی «مرور انتقادی ادبیات مرتبط با تحلیل شکست در TIS»، «فرآیندهای تحلیل کارکردی در مهندسی سیستم‌ها» و نیز دانش ضمنی پنل نخبگان دانست که هر یک مستقلاً با روش پیشنهادی نهایی منطبق و موافق بوده است. بنابراین از میان ۹ راهبرد معرفی شده توسط کرسول و میلر ۳ راهبرد مثلث‌سازی، بازبینی اعضا و ممیزی همتایان مستقل برای تایید روایی این پژوهش به کار گرفته شده است.

۴- یافته‌های پژوهش

با الهام‌گیری و دلالت‌پژوهی از رویکرد تحلیل کارکردی در مهندسی سیستم‌ها برای تحلیل نظام نوآوری که تطابق مؤلفه‌های آن در گام اول انجام شد، طبق نظر خبرگان مراحل اجرایی روش پیشنهادی برای فناوری‌های نوظهور که احتمالاً داده‌های عددی قبلی از شکست‌های احتمالی در آن فناوری وجود ندارد، ارائه شده است. همانطور که در پنل خبرگان مطرح شد، در گام نخست شناخت سیستم باید اتفاق بیافتد و داده‌های مورد نیاز تحلیل، درخصوص مورد مطالعه یعنی نظام نوآوری فناوری نوظهور مد نظر استخراج گردد. به همین ترتیب مراحل طی می‌شود تا در نهایت حالات شکست نظام نوآوری و احتمال وقوع هریک از شکست‌ها مبتنی بر روش پیمایشی بدست بیاید. باتوجه به جمع‌بندی تطبیق‌دهی دو رویکرد و مباحث مطرح شده در پنل خبرگان، مراحل چارچوب پیشنهادی به شرح زیر خواهد بود. لازم بذکر است برخی گام‌های ذکر شده در پنل خبرگان به جهت رعایت اختصار باهم ادغام شده است:

- ۱- شناسایی انواع الگوهای کارکردی و مصادیق کارکردهای نظام نوآوری در فناوری نوظهور در کشور و نیز شکست‌های مربوط به آن، براساس مرور نظام‌مند ادبیات مقالات منتشر شده درخصوص مدیریت آن فناوری؛
- ۲- بررسی اسناد سیاستی (قوانین، سیاست‌های بالادستی، مقررات و تصویب‌نامه‌های هیأت وزیران) مرتبط با فناوری تحت مطالعه و عرضه نتایج به خبرگان صنعت

به‌منظور تطبیق‌دهی یافته‌های مرور نظام‌مند با شرایط بافتاری کشور در چهار بعد نظام نوآوری ملی، صنایع و بخش‌های مرتبط دیگر، TIS‌های رقیب یا مکمل و درنهایت بعد سیاسی و سیاست‌های کلان مؤثر بر فناوری و تحلیل مضامین مصاحبه‌ها با هدف شناسایی مصادیق کارکردها و شکست‌های احتمالی آن؛

۳- بدست آوردن بلوک دیاگرام جریان کارکردی (FFBD^۲) پیش‌بینی شده نظام نوآوری فناوری نوظهور باتوجه به موتورهای محرک نوآوری ۴گانه سورس-هکرت و شکستن آن در لایه‌های زیرین به منظور شرح و بسط فرآیندها و کارکردهای نظام؛

۴- ترسیم درخت خطا (برای انجام تحلیل FTA^۳) برای نظام نوآوری مد نظر براساس FFBD ترسیم شده و شناسایی زنجیره خطاهای احتمالی باتوجه به رویدادهای آغازگر (در داخل TIS و یا عوامل بافتاری خارج از TIS) مورد اشاره خبرگان صنعت؛

۵- تجزیه و تحلیل حالات احتمالی و بالقوه شکست نظام نوآوری و اثرات آن و تعیین احتمالات شکست موتورهای محرک نوآوری؛

۶- اعتبارسنجی احتمالات و اولویت‌بندی شکست‌های شناسایی‌شده براساس پنل خبرگان.

در شکل ۳ گام‌های اجرایی چارچوب پیشنهادی در قالب نمودار فرآیند نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل فوق نشان داده شده است، رویکرد پیشنهادی در سه فاز اجرا می‌شود: فاز اول، آماده‌سازی زمینه تحلیل از طریق مرور نظام‌مند ادبیات و تطبیق آن با دانش ضمنی خبرگان صنعت برای شناسایی شکست‌های اولیه با توجه به بافتارمندی TIS؛ فاز دوم، به‌کارگیری دلالت‌های استخراج‌شده از تحلیل کارکردی مهندسی سیستم‌ها که در آن با ترسیم FFBD بر اساس شکست‌های شناسایی‌شده، دیدگاهی زنجیره‌ای و پیوسته از پویایی‌های نظام نوآوری به دست می‌آید و با ترسیم درخت خطا (FTA) برای کارکردهای موجود در FFBD، احتمال تجمعی بروز هر شکست محاسبه می‌شود؛ و فاز سوم، اعتبارسنجی نهایی با

^۲ Functional Flow Block Diagram

^۳ Fault Tree Analysis

^۱ Triangulation

نظر خبرگان به منظور انطباق بافتاری.

تلفیق این دو رویکرد، سه دستاورد روش شناختی مشخص برای تحلیل شکست TIS به همراه داشته است:

(۱) گذار از تحلیل کیفی-توصیفی به تحلیل شبه کمی و الگوریتمیک: با ترسیم FFBD و FTA، تحلیل شکست از سطح شناسایی صرف نقاط ضعف، به سطح اولویت بندی عددی و احتمالاتی ارتقا یافته است؛

(۲) شناسایی زنجیره ای و سرایتی شکست ها: برخلاف رویکردهای مرسوم که کارکردها را مجزا تحلیل می کنند، این چارچوب امکان ردیابی سرایت خطا از یک کارکرد به کارکردهای دیگر و فهم توالی بهینه آن ها را فراهم می سازد؛

(۳) بافتارپذیری تحلیل: با افزودن گام تطبیق سنجی توسط خبرگان صنعتی، عوامل بافتاری [۱۱] به عنوان رویدادهای آغازگر در FTA مدل سازی می شوند تا پیش بینی شکست کاملاً منطبق بر واقعیات نظام مستقر باشد.

این سه دستاورد نشان می دهد که استعاره مهندسی سیستم ها در پژوهش حاضر، صرفاً در سطح تشابه مفهومی باقی نمانده، بلکه به صورت یک نگاشت ساختاری-کارکردی برای تحلیل و پیش بینی شکست های محتمل در نظام های نوآوری فناورانه در حال شکل گیری به کار گرفته شده است.

۴-۱ نمایش کارکردی چارچوب پیشنهادی (با داده های فرضی)

همان طور که در بخش روش شناسی تبیین شد، هدف این پژوهش توسعه یک مصنوع روش شناختی است و اجرای آن بر روی یک مطالعه موردی تجربی مستقر، در محدوده این مقاله نمی گنجد. با این حال، به منظور اثبات کارکردی بودن الگوریتم و نشان دادن چگونگی تولید خروجی های عددی (برای نشان دادن اعتبار کارکردی روش)، در این بخش یک نمایش کارکردی با داده های فرضی استخراج شده از قضاوت خبرگان پنل ارائه می شود. فرض می کنیم این چارچوب برای پیش بینی شکست در یک فناوری نوظهور سیستم محور مانند راکتورهای کوچک ماژولار در حال اجراست. بر اساس گام های شش گانه، رویدادهای آغازگر بافتاری، شناسایی و احتمالات ذهنی آن ها توسط خبرگان استخراج شده است. برای نمونه، دو رویداد آغازگر «تأخیر در صدور مجوزهای

قانونی» (با احتمال ذهنی ۰/۳) و «مقاومت اجتماعی محلی» (با احتمال ذهنی ۰/۴) به عنوان ورودی های کف درخت خطا (FTA) برای کارکرد «ایجاد مشروعیت» در نظر گرفته می شوند. از آنجا که هر یک به تنهایی می تواند مشروعیت را مختل کند با قرار دادن این دو رویداد در یک گیت OR، احتمال شکست در این کارکرد محاسبه می شود:

$$P(\text{legitimacy failure})$$

$$= 1 - [(1 - 0.3) \times (1 - 0.4)] = 0.58$$

$$P(\text{Legitimacy Failure})$$

$$= 1 - [(1 - 0.3) \times (1 - 0.4)] = 0.58$$

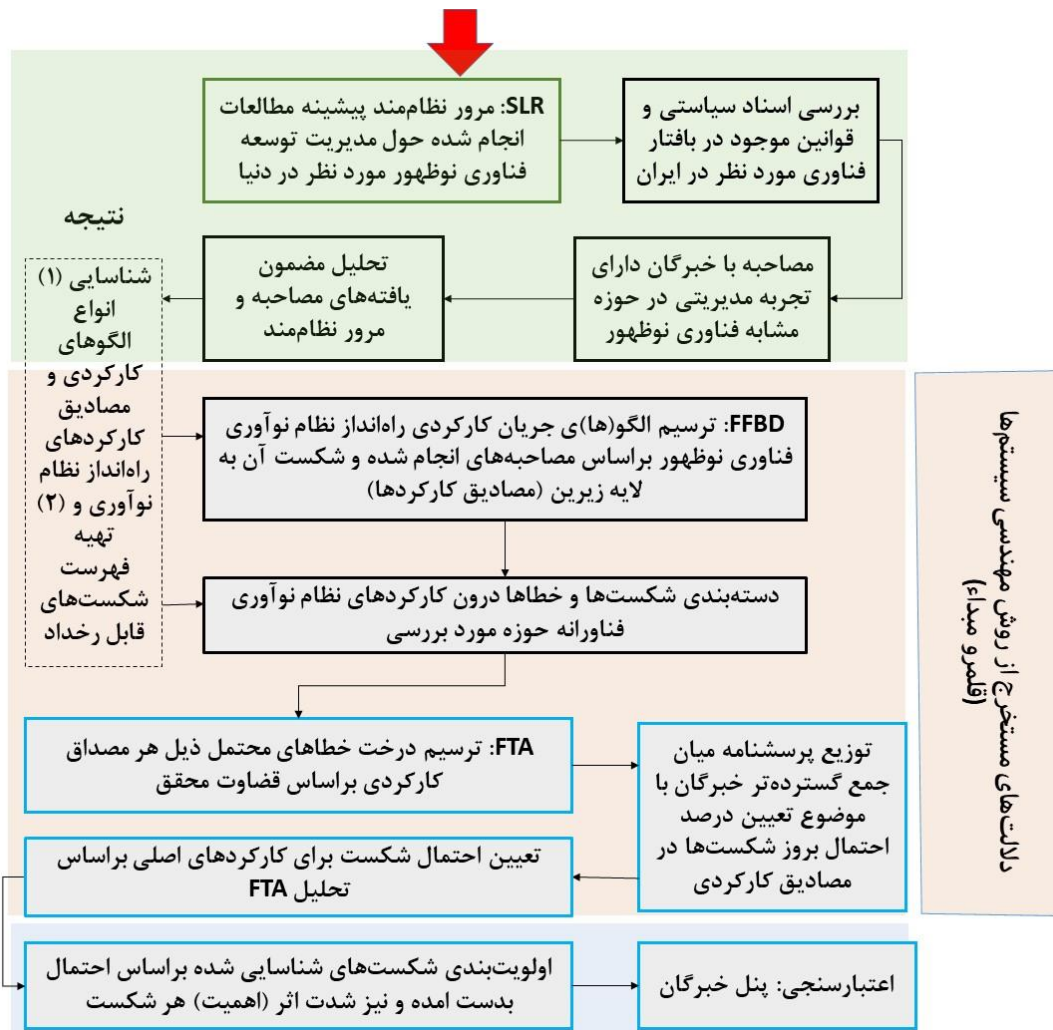
سپس، بر اساس موتورهای محرک نوآوری [۵]، این شکست کارکردی از طریق موتور محرک بازار به کارکرد «شکل دهی به بازار» سرایت کرده و احتمال شکست زنجیره ای را به ۰/۷۲ افزایش می دهد. این مثال عددی نشان می دهد که چگونه چارچوب پیشنهادی، برخلاف روش های کیفی مرسوم، امکان ردیابی عددی، زنجیره ای و احتمالاتی سرایت شکست را بدون نیاز به داده های تاریخی فراهم می کند و از یک ایده انتزاعی به یک ابزار شبه کمی محاسبه پذیر تبدیل می شود.

۵- نتیجه گیری

در چارچوب نظام نوآوری فناورانه تاکنون رویکردهای مختلفی برای توصیف و تحلیل ارائه شده است. مهم ترین رویکردهای معرفی شده عبارتند از رویکرد ساختاری، رویکرد کارکردی و رویکرد توأمان ساختاری-کارکردی. همه این مفاهیم برای تحلیل نظام نوآوری مستقر یا درحال شکل گیری هستند که بتوان اجزای آن را شناسایی و ارزیابی نمود. لذا قابلیت ارائه تحلیل برای فناوری های انتخاب شده که نظام نوآوری آن ها توسط سیاستگذاران درحال طرح ریزی است را ندارند. در پژوهش حاضر معرفی رویکرد تحلیل نظام های نوآوری آینده (درحال شکل گیری) صورت گرفت که براساس منطق طراحی های مهندسی در حوزه مهندسی

میان اجزای سیستم» می‌باشد.

سیستم‌ها این موضوع دنبال شده است. قابلیت بالای حوزه تخصصی مهندسی سیستم‌ها در تطابق با تئوری نظام نوآوری بدلیل مشابهت هدف دو رویکرد یعنی «برقراری یکپارچگی



شکل ۲) چارچوب مفهومی آینده‌نگر برای پیش‌بینی شکست‌های نظام نوآوری فناورانه در فناوری‌های نوظهور مبتنی بر استعاره مهندسی سیستم‌ها

مهندسی سیستم‌ها که برآمده از رویکرد فنی و مهندسی است در علوم اجتماعی گامی در راستای حرکت به سمت علوم و فناوری‌های همگرا محسوب می‌شود که می‌تواند ورود پژوهشگران عرصه مهندسی سیستم‌ها در رشته‌های فنی و مهندسی و نیز مهندسی صنایع را به حوزه مطالعات نظام نوآوری و توسعه مفاهیم این نظریه با استفاده از دانش فنی و مهندسی تسهیل نماید. به عبارت دیگر مشخص شد منطق تحلیل کارکردی در مهندسی سیستم‌ها که بر شناسایی توالی‌ها، وابستگی‌ها و نقاط آسیب‌پذیر سیستم تأکید دارد، می‌تواند به‌صورت استعاری به حوزه مطالعات نوآوری منتقل شود و چارچوبی ساختاریافته برای تحلیل آینده‌نگر

در روش‌های پیشین تحلیل نظام نوآوری همان‌گونه که در بخش مرور پیشینه اشاره شد، هیچ تحلیل احتمالاتی و مرتبط با اعداد و ارقام ارائه نمی‌شود و صرفاً نقاط شکست مؤلفه‌های ساختاری در هریک از کارکردهای موجود معین می‌شود. در حالی که در روش نوآورانه الهام گرفته از تحلیل کارکردی در مهندسی سیستم‌ها، علاوه بر ارائه جلوه بصری و قابل فهم از تعاملات کارکردی درون نظام (با ترسیم FFBD) امکان شناسایی حالات شکست احتمالی سیستم به‌همراه میزان و شدت احتمال شکست مهیا می‌شود که می‌تواند دست تحلیل‌گران سیاستی را برای ارائه پیشنهادات مدیریتی بازتر نماید. به طور کلی کاربست روش‌های حوزه تخصصی

۳. استفاده از رویکرد معرفی شده: پژوهش‌های آینده می‌توانند این رویکرد را در یک فناوری نوظهور مهم و کاربردی در اقتصاد کشور مانند راکتورهای کوچک ماژولار هسته‌ای (SMR)، سامانه‌های حمل‌ونقل شهری خودران و متصل (CAV)، هوش مصنوعی، انرژی‌های نو، زیست‌فناوری و بلاک‌چین اجرا کرده و FFBD و FTA واقعی را ترسیم کنند.

۴. همچنین اگر مطالعه تطبیقی میان کشورها انجام شود، پژوهش‌های آینده می‌توانند بررسی کنند که چگونه تفاوت‌های نهادی میان کشورها بر مسیرهای شکست تأثیر می‌گذارد.

تعارض منافع

نویسندگان تعهد می‌کنند که هیچ تعارض منافی در این مقاله وجود نداشته‌است.

اظهارنامه استفاده از هوش مصنوعی

در نگارش و ویرایش این مقاله، از مدل هوش مصنوعی GapGPT-۵,۴ (نسخه ایرانی) استفاده شده است. از این ابزار صرفاً در مراحل «بهبود نگارش فارسی»، «بازخوانی متون»، «ویراستاری ادبی» و «ترجمه اولیه برخی اصطلاحات» کمک گرفته شده است. کلیه خروجی‌های تولیدشده توسط هوش مصنوعی، پیش از نهایی‌شدن، به‌طور کامل توسط نویسندگان بازبینی، اصلاح و از نظر صحت علمی و مفهومی اعتبارسنجی شده است. مسئولیت کامل محتوای علمی مقاله بر عهده نویسندگان است و هیچ‌یک از بخش‌های اصلی (شامل ایده‌پردازی، طراحی روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها و نتیجه‌گیری) توسط هوش مصنوعی تولید نشده است.

References

- [1] Carlsson, B., & Stankiewicz, R. (1991). On The Nature, Function And Composition Of Technological Systems. *Journal of Evolutionary Economics*, 1, 93-118. <https://doi.org/10.1007/BF01224915>
- [2] Markard, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). Sustainability Transitions: An Emerging Field Of

شکست‌ها فراهم آورد. این انتقال مفهومی، علاوه بر غنی‌سازی ادبیات TIS، مسیر جدیدی برای توسعه روش‌های تحلیلی در فناوری‌های نوظهور می‌گشاید. مطالعه نشان داد که این رویکرد باتوجه به اعتبارسنجی صورت گرفته از روایی مناسب به‌عنوان یک روش‌شناسی معرفی‌شده برای فناوری‌های نوظهور برخوردار است. پژوهش‌های آتی می‌توانند با به‌کارگیری این رویکرد در فناوری‌های نوظهور و پیچیده‌ای نظیر راکتورهای کوچک ماژولار (SMR) یا سامانه‌های خودران (CAV)، ضمن ترسیم FFBD و FTA اختصاصی آن‌ها، مرزهای کاربرد و میزان انتقال‌پذیری این متدولوژی را در بافتارهای نهادی متفاوت مورد آزمون قرار دهند. از آنجا که این پژوهش در پارادایم علم طراحی (DSR) و با هدف توسعه یک مصنوع روش‌شناختی انجام شده است، اعتبار آن بر اساس انسجام منطقی درونی و روایی سازه (از طریق پل خبرگان) سنجیده شده است. با این حال، به دلیل ماهیت به‌شدت بافتارمند نظام‌های نوآوری فناورانه [۱۱] تعمیم‌پذیری این الگوریتم به معنای آماری آن نیست، بلکه به معنای ارائه یک «لنز تحلیلی منعطف» است که محققان و سیاست‌گذاران می‌توانند با بومی‌سازی رویدادهای آغازگر (عوامل بافتاری)، آن را به حوزه‌های فناوری دیگر منتقل نمایند.

پیشنهادهای سیاستی و پژوهشی حاصل از این پژوهش بدین شرح است:

۱. توسعه ابزارهای تحلیلی آینده‌نگر و طراحی مداخلات پیش‌دستانه سیاستی: سیاست‌گذار باید پیش از شکل‌گیری کامل نظام نوآوری، مسیرهای بالقوه شکست را شناسایی کرده و مداخلات اصلاحی را در مراحل اولیه اعمال کند که استفاده از رویکردهایی همچون روش پیشنهاد شده در این پژوهش گامی در این راستاست. لذا پیشنهاد می‌شود ظرفیت استفاده از ابزارهای FFBD و FTA در تحلیل‌های آینده‌نگر سیاستی استفاده شده و رویکردهای کامل‌تر توسعه یابد.
۲. توسعه مدل‌های کمی برای برآورد احتمال شکست: در تحقیقات آتی ترکیب FTA با روش‌های کمی مانند تحلیل بیزین می‌تواند دقت پیش‌بینی شکست‌ها را افزایش دهد.

Technological Innovation Systems In Contexts: Conceptualizing Contextual Structures And Interaction Dynamics. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 16, 51–64.

<https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.003>

[12] Jacobsson, S., & Johnson, A. (2000). **The Diffusion Of Renewable Energy Technology: An Analytical Framework And Key Issues For Research.** *Energy Policy*, 28(9), 625–640.

[https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00041-0)

[13] Chaminade, C., & Edquist, C. (2010). **Rationales For Public Policy Intervention In The Innovation Process: Systems Of Innovation Approach.** In *The Theory and Practice of Innovation Policy*. Edward Elgar Publishing.

<https://doi.org/10.4337/9781849804424.00012>

[14] Smits, R., & Kuhlmann, S. (2004). **The Rise Of Systemic Instruments In Innovation Policy.** *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, 1(1–2), 4–32.

<https://doi.org/10.1504/IJFIP.2004.004621>

[15] Markard, J., & Truffer, B. (2008). **Technological Innovation Systems And The Multi-Level Perspective: Towards An Integrated Framework.** *Research Policy*, 37(4), 596–615.

<https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.01.004>

[16] Truffer, B., Rohrer, H., & Markard, J. (2009). **The Analysis Of Institutions In Technological Innovation Systems: A Conceptual Framework Applied To Biogas Development In Austria.** *Copenhagen Business School*.

[17] Miremadi, T., & Rahimirad, Z. (2016). **Identification Of System Failures In Biofuels Technological Innovation System Of Iran.** *Journal of Science and Technology Policy*, 9(1), 27–41. https://jstp.nrisc.ac.ir/article_12946.html?lang=en {In Persian}

[18] Suurs, R. A., Hekkert, M. P., Kieboom, S., & Smits, R. E. (2010). **Understanding The Formative Stage Of Technological Innovation System Development: The Case Of Natural Gas As An Automotive Fuel.** *Energy Policy*, 38(1), 419–431. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.032>

[19] Heirani, H., Bagheri Moghadam, N., & Fazli, M. H. (2020). **Causal Layered Analysis Of Cogeneration Of Heat And Power Innovation System In Iran.** *Innovation Management Journal*, 9(3), 7–36. https://www.nowavari.ir/article_125704.html?lang=en {In Persian}

[20] Rahimi Rad, Z., Yahyazade Far, M., Miremadi, T., & Madhoshi, M. (2018). **Analysis Of Photovoltaic Solar System Technological Innovation System In Iran.** *Innovation Management Journal*, 6(4), 1–28.

Research And Its Prospects. *Research Policy*, 41(6), 955–967. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013>

[3] Musiolik, J., Markard, J., & Hekkert, M. P. (2012). **Networks And Network Resources In Technological Innovation Systems: Towards A Conceptual Framework For System Building.** *Technological Forecasting and Social Change*, 79, 1032–1048. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.01.003>

[4] Markard, J., Stadelmann, M., & Truffer, B. (2009). **Prospective Analysis Of Technological Innovation Systems: Identifying Technological And Organizational Development Options For Biogas In Switzerland.** *Research Policy*, 38(4), 655–667. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2009.01.013>

[5] Suurs, R. A., & Hekkert, M. P. (2009). **Cumulative Causation In The Formation Of A Technological Innovation System: The Case Of Biofuels In The Netherlands.** *Technological Forecasting and Social Change*, 76(8), 1003–1020. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2009.03.002>

[6] Heirani, H., Ghodsypour, S. H., Bagheri Moghaddam, N., & Karimian, H. (2014). **Dynamic Structural-Functional Analysis Of Technology Development Process In The Context Of Technological Innovation System: The Case Of Iran Combined Heat And Power (CHP) Technology.** *Journal of Technology Development Management*, 2(3), 49–80. <https://doi.org/10.22104/jtdm.2015.181> {In Persian}

[7] Taqva, M. R., Bagheri Moghaddam, N., Tabatabaeian, S. H., & Taqhavi Fard, M. T. (2017). **Explain The Process Of Technology Development By Motors Of Innovation; The Case Of Wind Power Plants In Iran.** *Journal of Technology Development Management*, 4(4), 75–106. <https://doi.org/10.22104/jtdm.2017.1960.1681> {In Persian}

[8] Bergek, A., Jacobsson, S., Carlsson, B., Lindmark, S., & Rickne, A. (2008). **Analyzing The Functional Dynamics Of Technological Innovation Systems: A Scheme Of Analysis.** *Research Policy*, 37(3), 407–429. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.12.003>

[9] Miles, D. A. (2017). **A Taxonomy Of Research Gaps: Identifying And Defining The Seven Research Gaps.** *Doctoral Student Workshop: Finding Research Gaps—Research Methods and Strategies*. <https://www.researchgate.net/publication/319244623>

[10] Markard, J., Hekkert, M., & Jacobsson, S. (2015). **The Technological Innovation Systems Framework: Response To Six Criticisms.** *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 16, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.006>

[11] Bergek, A., Hekkert, M. P., Jacobsson, S., Markard, J., Sandén, B., & Truffer, B. (2015).

Science and Technology Policy, 15(3), 75–92.
<https://doi.org/10.22034/jstp.2022.13959> {In Persian}

[30] Konttinen, J. (2018). **Managing The Creative Process In Game Development** [Bachelor's thesis]. *Lappeenranta University of Technology*.
<https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201802093304>

[31] Sawyer, R. K. (2006). **Explaining Creativity: The Science Of Human Innovation**. Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780195161649.001.0001>

[32] Ghazinoory, S., & Aghaei, P. (2023). **Metaphor Research As A Research Strategy In Social Sciences And Humanities**. *Quality & Quantity*.
<https://doi.org/10.1007/s11135-023-01641-8>

[33] Ghazinoory, S., Zadeegan, M. G., & Phaal, R. (2025). **Research Design Unlocked! Roadmapping For Integration Of Paradigms, Strategies, And Tools**. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 11(4), 100688.
<https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100688>

[34] Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). **The Metaphorical Structure Of The Human Conceptual System**. *Cognitive Science*, 4(2), 195–208.
https://doi.org/10.1207/s15516709cog0402_4

[35] Cloutier, R. J. (2023). **Guide To The Systems Engineering Body Of Knowledge (SEBoK)**. *Stevens Institute of Technology*.
<https://www.sebokwiki.org/>

[36] Ghazinoory, S., Nasri, S., Afshari-Mofrad, M., & Taghizadeh Moghadam, N. (2023). **National Innovation Biome (NIB): A Novel Conceptualization For Innovation Development At The National Level**. *Technological Forecasting and Social Change*, 196, 122834.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122834>

[37] Cornelissen, J. P. (2005). **Beyond Compare: Metaphor In Organization Theory**. *Academy of Management Review*, 30(4), 751–764.
<https://doi.org/10.5465/amr.2005.18378876>

[38] Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). **Design Science In Information Systems Research**. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105.
<https://doi.org/10.2307/25148625>

[39] Denyer, D., Tranfield, D., & van Aken, J. E. (2008). **Developing Design Propositions Through Research Synthesis**. *Organization Studies*, 29(3), 393–413.
<https://doi.org/10.1177/0170840607088020>

https://www.nowavari.ir/article_70595.html?lang=en {In Persian}

[21] Miremadi, T., Baharloo, M., & Behzadizad, M. (2018). **Structural-Functional Analysis Of The Rotary Wing Technological Innovation System In Iran**. *Innovation Management Journal*, 7(1), 33–56.
https://www.nowavari.ir/article_81030.html?lang=en {In Persian}

[22] Meelen, T., & Farla, J. (2013). **Towards An Integrated Framework For Analysing Sustainable Innovation Policy**. *Technology Analysis & Strategic Management*, 25(8), 957–970.
<https://doi.org/10.1080/09537325.2013.823146>

[23] Mohaghar, A., Saghaei, F., Mokhtarzade, N., & Azadegan-Mehr, M. (2019). **Anticipating Technological Transition Path In Iran's Financial Sector Based On Multilevel Perspective**. *Journal of Science and Technology Policy*, 12(4), 77–98.
<https://doi.org/10.22034/jstp.2020.11.4.1066> {In Persian}

[24] Raven, R., & Walrave, B. (2020). **Overcoming Transformational Failures Through Policy Mixes In The Dynamics Of Technological Innovation Systems**. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119297.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.05.008>

[25] Verbong, G., Geels, F. W., & Raven, R. (2013). **Multi-Niche Analysis Of Dynamics And Policies In Dutch Renewable Energy Innovation Journeys (1970–2006): Hype-Cycles, Closed Networks And Technology-Focused Learning**. In *The Dynamics of Sustainable Innovation Journeys* (pp. 35–53). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315873435-3>

[26] Zumofen, G. (2025). **Combining A Conjoint Experiment And Machine Learning Model To Include End-Users In A Constructive Technology Assessment: The Case Of Seasonal Thermal Energy Storage**. *Technology in Society*, 81, 102833.
<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2025.102833>

[27] Berg, S., Wustmans, M., & Bröring, S. (2019). **Identifying First Signals Of Emerging Dominance In A Technological Innovation System: A Novel Approach Based On Patents**. *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 706–722.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.07.046>

[28] Kokko, S., & Fischer, K. (2021). **A Practice Approach To Understanding The Multilevel Dynamics Of Sanitation Innovation**. *Technology in Society*, 64, 101522.
<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101522>

[29] Nasri, S., Bakhtiar, A., & Ghazinoory, S. (2022). **Identifying And Categorizing The Metaphorical Maps In The Field Of Innovation Studies**. *Journal of*

Theory Into Practice, 39(3), 124–130.
https://doi.org/10.1207/s15430421tip3903_2

[40] Creswell, J. W., & Miller, D. L. (2000).
Determining Validity In Qualitative Inquiry.