



The University of Tehran Press

Dual Lock-In in Energy Policy under Sanctions: Empirical Evidence from Iran Using the DLOCK-S Framework

Seyed Mohammad Bagher Sobhani 

Department of Management, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran. Email: sobhani@iau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 02 December 2025

Revised: 29 December 2025

Accepted: 25 February 2026

Published Online: 22 June 2026

Keywords:

Double Lock-in,
Energy Sanctions,
Hydrocarbon Resource Dependence,
Energy Governance,
Sanctioned Economy.

ABSTRACT

Energy policy in hydrocarbon-dependent economies under international sanctions is shaped by interacting structural constraints rather than discretionary policy choice. This study analyzes how sanctions condition persistent resource, technological, and institutional rigidities in Iran's energy sector using the DLOCK-S Framework (Dual Lock-In under Sanctions). The framework integrates three empirically operationalized dimensions (resource intensity, technological dependency, and institutional network structure) and treats sanctions as a conditioning mechanism that reinforces their interaction. The analysis employs a mixed-methods design combining panel econometric estimation for 30 energy projects (1395–1402), institutional network analysis of 14 energy governance bodies, expert surveys, and qualitative interviews. Results indicate high structural exposure, with a Resource Intensity Index of 8.3/10 and a Technological Dependency Coefficient of 0.87. Panel regression results show that sanctions significantly moderate the relationship between resource intensity and technological dependency, with stronger effects in high-resource-intensity contexts. Institutional network analysis reveals low coordination density and high centralization, contributing to governance bottlenecks and weaker innovation-policy effectiveness. Overall, the findings demonstrate a dual lock-in dynamic in which fossil-fiscal dependence and technology-institutional rigidity jointly constrain adaptive energy transitions. The DLOCK-S Framework provides a transferable analytical basis for evaluating energy policy constraints in sanctioned, hydrocarbon-dependent economies.

Cite this article: Sobhani, M. B. (2026). Dual Lock-In in Energy Policy under Sanctions: Empirical Evidence from Iran Using the DLOCK-S Framework. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (3), 447-471. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.409643.1208>



© Seyed Mohammad Bagher Sobhani

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.409643.1208>

1. Introduction

Energy policy in hydrocarbon-dependent economies operating under international sanctions is characterized by persistent structural constraints rather than by freely chosen policy strategies. In such contexts, reliance on fossil fuel revenues, restricted access to advanced technologies, and fragmented governance structures interact in ways that limit the scope for diversification and technological upgrading. Iran represents a salient case of this condition. Despite possessing extensive oil and gas reserves and articulated policy ambitions for energy diversification, its energy sector continues to experience recurrent supply shortages, high fiscal exposure to hydrocarbons, limited technological localization, and institutional coordination problems. Existing studies on Iran's energy policy and other sanctioned economies typically examine these challenges in isolation, focusing separately on resource dependence, technological constraints, governance fragmentation, or the effects of sanctions. This fragmented analytical approach obscures how these dimensions interact and mutually reinforce one another. As a result, policy debates often oscillate between resource-centered and technology-centered narratives without explaining why transitions remain difficult despite repeated reforms. This

study addresses this gap by introducing the DLOCK-S Framework (Dual Lock-In under Sanctions), which conceptualizes energy-sector vulnerability as the outcome of interacting constraints across three dimensions: (i) resource intensity, reflecting fiscal and macroeconomic dependence on hydrocarbons; (ii) technological dependency, capturing reliance on imported equipment and services under sanctions; and (iii) institutional network structure, describing the coordination capacity of energy governance systems. Sanctions are treated not as an exogenous shock but as a conditioning force that amplifies existing structural lock-ins. The paper applies this framework empirically to Iran to explain the persistence of energy-sector fragility and to identify leverage points for policy assessment.

2. Methodology

The study employs a mixed-methods research design combining quantitative, network-based, and qualitative approaches. Three theoretical perspectives inform the analytical structure: political economy of resource dependence, technological lock-in within multi-level transition theory, and adaptive governance theory. These perspectives are operationalized through measurable indicators within the DLOCK-S Framework. Quantitatively, three core indicators are constructed. The Resource Intensity Index (RII) measures fiscal and macroeconomic exposure to fossil resources using data on proven reserves, GDP, budgetary dependence on oil revenues, global oil prices, and a normalized sanctions coefficient. The Technological Dependency Coefficient (TDC) captures reliance on imported energy technologies, adjusted for sanctions-related restrictions and domestic absorptive capacity; for reporting purposes, it is normalized to a 0–1 scale. The Institutional Network Structure (INA) is assessed through social network analysis of 14 key energy-sector institutions, using metrics such as network density, degree centrality, and Quadratic Assignment Procedure (QAP) correlations. Panel econometric analysis is conducted on project-level data covering 30 energy projects over 2016–2023. The regression specification includes RII, sanctions severity, and their interaction to test whether sanctions condition the relationship between resource intensity and technological dependency. Qualitative data are collected through semi-structured interviews with senior experts and policymakers, complemented by document analysis of development plans, regulatory decisions, and sectoral reports. A Policy Assessment Matrix (PAM) integrates quantitative and qualitative findings to evaluate policy options under localized weighting criteria.

3. Results

Empirical results reveal high structural exposure across all three dimensions of the DLOCK-S Framework. Iran's RII equals 8.3 out of 10, reflecting strong dependence on hydrocarbon revenues, including approximately 42% budgetary reliance on oil, combined with a high sanctions coefficient (0.85). The TDC averages 0.87, indicating substantial technological dependency, with roughly 80% of key energy equipment imported and limited domestic absorptive capacity (0.4). Institutional network analysis shows low coordination density (0.23) and high concentration of authority, with the National Iranian Oil Company (NIOC) exhibiting very high centrality (0.92), creating coordination bottlenecks. Panel regression results demonstrate statistically significant relationships between the key variables. Sanctions and resource intensity both exhibit significant associations with the measured technological dependency indicator, and the interaction term is strongly significant. Importantly, the negative coefficients are interpreted in light of TDC's construction: reductions in measured dependency under sanctions likely reflect import compression and forced substitution, rather than improvements in domestic technological capability. The interaction effect indicates that sanctions condition the resource–technology relationship more strongly in high-RII contexts, consistent with the dual lock-in hypothesis. Hypothesis testing confirms three patterns: (i) the marginal effect of sanctions on technological dependency becomes stronger as resource intensity increases; (ii) high institutional centrality is associated with reduced innovation-policy effectiveness, though with variation across institutions; and (iii) increased investment in hybrid technologies is associated with lower measured vulnerability under sanctions. Sensitivity and robustness checks support the stability of these findings. Scenario analyses suggest that improving institutional coordination, reducing fiscal exposure to hydrocarbons, and strengthening absorptive capacity are key leverage points for reducing vulnerability.

4. Conclusion

This study demonstrates that Iran's energy-sector challenges under sanctions cannot be explained by isolated resource, technology, or governance factors. Instead, they arise from a dual lock-in dynamic in which fossil-based fiscal dependence and technology–institutional rigidity reinforces one another under external pressure. Sanctions do not merely restrict access to markets and technologies; they amplify pre-existing structural constraints and limit the effectiveness of conventional policy interventions. The DLOCK-S Framework contributes analytically by operationalizing these interactions through measurable indicators and by treating sanctions as a conditioning variable rather than an external disturbance. Empirically, the findings show that high resource intensity magnifies sanction effects, institutional over-centralization weakens innovation outcomes, and targeted investments in hybrid technologies can mitigate, but not fully overcome, structural vulnerability. While the analysis is specific to Iran and constrained by data availability, the framework is transferable to other hydrocarbon-dependent economies facing external pressures. Future research can extend the framework through cross-country comparisons, higher-frequency sanctions data, and computational scenario modeling. Overall, the study provides an evidence-based foundation for assessing energy policy constraints in sanctioned economies and for designing more resilient policy pathways under persistent external constraints.



قفل‌شدگی دوگانه در سیاست انرژی تحت تحریم‌ها: شواهدی تجربی از ایران با چارچوب DLOCK-S

سید محمدباقر سبحانی

استاد گروه مدیریت، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران. رایانامه: sobhani@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه:

قفل‌شدگی دوگانه،

تحریم‌های انرژی،

وابستگی به منابع هیدروکربنی،

حکمرانی انرژی،

اقتصاد تحریم‌شده.

سیاست انرژی در اقتصادهای وابسته به هیدروکربن تحت تحریم‌های بین‌المللی با محدودیت‌هایی فراتر از انتخاب‌های فنی مواجه است و بیش از هر چیز تحت تأثیر وابستگی‌های ساختاری قرار دارد. این پژوهش با ارائه چارچوب تحلیلی DLOCK-S (قفل‌شدگی دوگانه تحت تحریم)، تعامل میان وابستگی منابعی، وابستگی فناورانه و ساختار حکمرانی انرژی را در ایران طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ بررسی می‌کند. در این چارچوب، تحریم‌ها به عنوان سازوکاری شرطی‌ساز عمل می‌کنند که شدت و هم‌زمانی این محدودیت‌ها را تقویت می‌کند. مطالعه از یک طراحی روش ترکیبی بهره می‌گیرد که شامل برآورد مدل داده‌های تابلویی برای ۳۰ پروژه انرژی و تحلیل شبکه نهادی ۱۴ نهاد اصلی حکمرانی انرژی می‌شود و تکمیل آن با داده‌های حاصل از نظرسنجی خبرگان و مصاحبه‌های کیفی است. نتایج نشان می‌دهد شاخص شدت وابستگی به منابع (RII) برابر ۸/۳ از ۱۰ و شاخص وابستگی فناورانه (TDC) به طور میانگین ۰/۸۷ است که بیانگر سطح بالای مواجهه ساختاری است. برآوردهای پانلی بیانگر آن است که شدت تحریم‌ها رابطه میان وابستگی منابعی و وابستگی فناورانه را به طور معناداری تعدیل می‌کند و اثر آن در زمینه‌های با شدت منابعی بالاتر قوی‌تر است. تحلیل شبکه نهادی نیز چگالی پایین هماهنگی و تمرکز بالا را نشان می‌دهد و با افزایش ریسک گلوگاه اجرایی و کاهش اثربخشی سیاست‌های نوآوری همراه است. در مجموع، یافته‌ها با پویایی قفل‌شدگی دوگانه سازگار است؛ وضعیتی که در آن وابستگی مالی - فسیلی و سخت‌شدگی فناورانه - نهادی به طور هم‌زمان ظرفیت سازگاری و گذار انرژی را محدود می‌کنند. چارچوب DLOCK-S می‌تواند مبنایی تحلیلی برای ارزیابی محدودیت‌های سیاست انرژی در اقتصادهای تحریم‌شده فراهم آورد.

استناد: سبحانی، سید محمدباقر (۱۴۰۵). قفل‌شدگی دوگانه در سیاست انرژی تحت تحریم‌ها: شواهدی تجربی از ایران با چارچوب DLOCK-S. *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۳) ۴۴۷-۴۷۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.409643.1208>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© سید محمدباقر سبحانی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.409643.1208>

۱. مقدمه

سیاست انرژی در دوران معاصر حوزه‌ای پیچیده از تصمیم‌گیری است که تحت اثر عملکرد اقتصادی، محدودیت‌های زیست‌محیطی، و فشارهای ژئوپلیتیکی شکل می‌گیرد. این پیچیدگی در اقتصادهای مبتنی بر منابع هیدروکربنی برجسته‌تر است؛ جایی که اتکای بالای مالی به سوخت‌های فسیلی با الزامات گذار جهانی به سیستم‌های کم‌کربن و محدودیت‌های سیاسی خارجی هم‌زمان می‌شود. در چنین شرایطی، سیاست انرژی تأثیر مستقیمی بر امنیت انرژی، ثبات اقتصاد کلان و پایداری زیست‌محیطی دارد. ایران با بیش از ۱۵۷ میلیارد بشکه ذخایر اثبات‌شده نفت، در رتبه چهارم جهانی قرار دارد [۱] و حدود ۳۳ تریلیون مترمکعب ذخایر گاز طبیعی را در اختیار دارد [۲]. این منابع موجب شکل‌گیری وابستگی ساختاری بالا به استخراج و مصرف هیدروکربن‌ها شده‌اند، به گونه‌ای که بخش انرژی به مهم‌ترین منبع درآمدهای ارزی و مالی دولت تبدیل شده است [۳] و [۴]. با این حال، این وابستگی با آسیب‌پذیری‌هایی همچون تحریم‌های بین‌المللی، الگوهای ناکارآمد مصرف انرژی و بروز مکرر بحران‌های داخلی انرژی همراه است [۵]. در دوره‌های اوج مصرف، کمبود برق کشور به ۱۴ تا ۱۵ هزار مگاوات می‌رسد و بیش از ۹۳ درصد برق از نیروگاه‌های حرارتی تأمین می‌شود که سالانه بیش از ۷۰ میلیارد مترمکعب گاز طبیعی مصرف می‌کنند [۶ و ۷]. همچنین، سیاست‌های یارانه‌ای انرژی موجب تشدید مصرف بی‌رویه و اتلاف منابع شده و تلفات شبکه انتقال را به بیش از ۱۳ درصد رسانده است؛ به طوری که زیان‌های اقتصادی سالانه ناشی از قطعی برق در بخش صنعت بین ۵ تا ۸ میلیارد دلار برآورد می‌شود [۸ و ۹]. هم‌زمان، سیستم انرژی ایران با محدودیت‌های فناورانه و نهادی جدی مواجه است که ظرفیت تنوع‌بخشی به سبد انرژی و ارتقای بهره‌وری را محدود می‌کند. با وجود پتانسیل قابل توجه انرژی‌های تجدیدپذیر، از جمله بیش از ۹۱ هزار تراوات‌ساعت ظرفیت بالقوه انرژی خورشیدی و حدود ۱۸ هزار مگاوات ظرفیت انرژی بادی [۱۰ و ۱۱]، استقرار فناوری‌های پیشرفته به دلیل محدودیت دسترسی به تجهیزات خارجی، ظرفیت جذب داخلی محدود و ساختارهای حکمرانی پراکنده با چالش مواجه است [۵، ۱۰ و ۱۲]. این محدودیت‌های درهم‌تنیده ضرورت استفاده از چارچوبی تحلیلی را برجسته می‌سازد که تعامل میان وابستگی به منابع، وابستگی فناورانه و ساختارهای نهادی را در شرایط تحریمی به صورت سیستمی بررسی کند.

برنامه‌های پنج‌ساله توسعه ایران دستیابی به سهم ۵ درصدی انرژی‌های تجدیدپذیر از ظرفیت کل تولید برق تا سال ۲۰۲۱ را هدف‌گذاری کرده بودند. با این حال، پیشرفت در این حوزه محدود بوده و سهم تجدیدپذیرها همچنان کمتر از ۱ درصد تولید برق کشور است [۱۳]. اگرچه دولت اهداف بلندپروازانه‌ای از جمله دستیابی به ۲۰ گیگاوات ظرفیت تجدیدپذیر تا سال ۲۰۲۷، نصب ۱۰ گیگاوات نیروگاه خورشیدی تا سال ۲۰۳۰ و تأمین ۱۰ درصد برق از منابع تجدیدپذیر تا سال ۲۰۲۵ اعلام کرده است، تحقق این اهداف با محدودیت‌هایی نظیر تحریم‌های بین‌المللی، کمبود سرمایه‌گذاری خارجی و دسترسی محدود به فناوری‌های پیشرفته مواجه بوده است [۱۳ و ۱۴]. تحلیل محتوای برنامه‌های پنج‌ساله توسعه نشان‌دهنده شکاف مستمر میان اهداف اعلام‌شده و ظرفیت اجرایی کشور است که ریشه در محدودیت‌های زیرساختی، مدیریتی و اقتصادی دارد. در حالی که کشورهای منطقه‌ای مانند عربستان سعودی و ترکیه تا سال ۲۰۲۳ به ترتیب ۲۸۴۰ و ۲۸۰۰ مگاوات ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر را به شبکه خود افزوده‌اند [۱۵]، پیشرفت ایران در این حوزه محدود باقی مانده است. این وضعیت بازتاب‌دهنده دو محدودیت ساختاری درهم‌تنیده است: وابستگی بالای مالی و تولیدی به هیدروکربن‌ها و همچنین، محدودیت دسترسی به فناوری‌های خارجی همراه با ظرفیت جذب داخلی محدود، که هر دو تحت تأثیر تحریم‌ها تشدید شده‌اند. این محدودیت‌ها نه به عنوان جهت‌گیری‌های سیاستی جایگزین، بلکه به صورت تعاملی به شکل‌گیری پویایی‌های قفل‌شدگی پایدار در سرمایه‌گذاری، حکمرانی و نوآوری منجر می‌شوند. مطالعه حاضر این محدودیت‌ها را از طریق چارچوب DLOCK-S عملیاتی کرده و بررسی می‌کند که چگونه تحریم‌ها سازوکارهای قفل‌شدگی دوگانه را در بخش انرژی ایران تقویت می‌کنند.

مطالعه حاضر، به خلاف رویکردهایی که تحریم‌ها را فقط به عنوان یک شوک خارجی منفرد در نظر می‌گیرند یا وابستگی به منابع، محدودیت‌های فناورانه و چالش‌های حکمرانی را به صورت جداگانه تحلیل می‌کنند، این ابعاد را به‌مثابه اجزای به‌هم‌پیوسته یک پویایی ساختاری خودتقویت‌شونده مفهوم‌سازی می‌کنند که از آن با عنوان «قفل‌شدگی دوگانه تحت تحریم» یاد می‌شود. در این چارچوب، تحریم‌ها به عنوان یک سازوکار شرطی‌ساز عمل می‌کنند که هم‌زمان وابستگی مالی - فسیلی و سخت‌شدگی

فناورانه - نهادی را تشدید می‌کنند و در نتیجه، ظرفیت سازگاری و گذار انرژی را محدود می‌سازند. از نظر روش‌شناختی، پژوهش با ادغام شاخص‌های قابل اندازه‌گیری شدت وابستگی به منابع، وابستگی فناورانه و ساختار شبکه نهادی در یک معماری تجربی منسجم، امکان ارزیابی هم‌زمان محدودیت‌های سیاستی و ظرفیت اجرایی را فراهم می‌کند. استفاده از مشخصات تعاملی در مدل تجربی نیز فراتر از تحلیل‌های خطی متعارف می‌رود و نشان می‌دهد اثر تحریم‌ها بسته به سطح وابستگی منابعی متفاوت است و به این ترتیب ناهمگنی ساختاری آسیب‌پذیری را برجسته می‌سازد. افزون بر این، مطالعه با تبدیل مباحث کلی درباره پراکندگی یا تمرکز نهادی به سنجش‌های کمی شبکه‌ای، پیوند مستقیمی میان ساختار حکمرانی و پیامدهای نوآوری برقرار می‌کند و آن را به حوزه قابل مداخله سیاستی تبدیل می‌سازد. در نهایت، اتصال این چارچوب چندبعدی به یک ماتریس ارزیابی سیاستی متناسب با زمینه، پژوهش را از سطح تشخیص توصیفی فراتر می‌برد و مبنایی نظام‌مند برای اولویت‌بندی مداخلات در شرایط محدودیت فراهم می‌آورد. در مجموع، این مطالعه نه تنها یک صورت‌بندی مفهومی جدید ارائه می‌کند، بلکه رویکردی تجربی و سیاست‌محور عرضه می‌دارد که توضیح می‌دهد چگونه فشارهای خارجی با وابستگی‌های ساختاری درهم‌تنیده شده و مسیر تحول نظام‌های انرژی در اقتصادهای منابع‌محور تحت تحریم را شکل می‌دهد.

۲. مرور ادبیات و زمینه مفهومی

پژوهش‌های مرتبط با سیاست انرژی در اقتصادهای مبتنی بر منابع هیدروکربنی‌ها بر پیامدهای ساختاری اتکای پایدار به منابع فسیلی تأکید دارند. در کشورهایی مانند ایران، درآمدهای نفت و گاز سهم قابل توجهی از صادرات و منابع مالی دولت را تشکیل می‌دهند و در نتیجه، سطح بالایی از شدت وابستگی به منابع و وابستگی بلندمدت به زیرساخت‌های فسیلی را تقویت می‌کنند [۵ و ۱۶]. اگرچه ظرفیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای در اسناد سیاستی مورد توجه قرار گرفته‌اند، توسعه عملی آن‌ها به دلیل محدودیت‌های ژئوپلیتیکی، ضعف سرمایه‌گذاری و قیود فیزیکی نظیر کمبود زمین، محدودیت منابع آب و دسترسی ناکافی به مواد اولیه حیاتی با کندی مواجه بوده است [۹، ۱۷ و ۱۸]. این شرایط به ایجاد موانع ساختاری برای تنوع‌بخشی به سبد انرژی و تداوم اتکای به سیستم‌های فسیلی مسلط منجر شده است [۱۹]. بخش قابل توجهی از ادبیات موجود این پویایی‌ها را از طریق سازوکارهای کلان‌ساختاری مانند نفرین منابع و بیماری هلندی توضیح می‌دهد. نظریه نفرین منابع بیان می‌کند که وابستگی بیش‌ازحد به درآمدهای هیدروکربنی می‌تواند بهره‌وری و سرمایه‌گذاری در بخش‌های غیرمنبع‌محور را تضعیف کند و به تمرکز اقتصادی بلندمدت بینجامد [۲۰]. شواهد تجربی از اقتصادهای صادرکننده نفت نشان می‌دهد وفور منابع اغلب با توسعه صنعتی ضعیف‌تر همراه است، هرچند کیفیت نهادی و طراحی سیاست‌ها می‌تواند این اثرات را تعدیل کند [۲۱]. در همین راستا، مدل بیماری هلندی نشان می‌دهد ورود درآمدهای نفتی از طریق افزایش نرخ ارز واقعی، رشد بخش‌های قابل مبادله را محدود کرده و وابستگی به بخش انرژی فسیلی را تقویت می‌کند [۲۲ و ۲۳].

در تکمیل این دیدگاه‌ها، ادبیات قفل‌شدگی کربنی بر نقش وابستگی مسیر در سیستم‌های انرژی تأکید دارد. زیرساخت‌های فسیلی بادوام، سرمایه‌گذاری‌های انباشته و ترتیبات نهادی موجب ایجاد هزینه‌های بالای گذار می‌شوند و حتی در شرایط وجود گزینه‌های کم‌کربن اقتصادی، انتقال به سیستم‌های پایدار را به تأخیر می‌اندازند [۲۴ و ۲۵]. در اقتصادهای مبتنی بر منابع، این پدیده اغلب با سرمایه‌گذاری ناکافی در تحقیق و توسعه و اتکای بالا به فناوری‌های وارداتی همراه است و به وابستگی فناورانه پایدار می‌انجامد [۲۶ و ۲۷]. مطالعات تجربی همچنین نشان می‌دهند محدودیت‌های خارجی، به‌ویژه تحریم‌های بین‌المللی، وابستگی فناورانه را تشدید می‌کنند؛ زیرا دسترسی به تجهیزات پیشرفته، منابع مالی و شبکه‌های دانشی جهانی را محدود می‌سازند. شواهد بنگاه‌محور از اقتصادهای تحت تحریم نشان می‌دهد تحریم‌ها به طور معناداری نوآوری فناورانه را سرکوب می‌کنند، به‌ویژه در بخش‌های فناوری‌بر، که این امر عمدتاً از طریق کاهش ظرفیت تأمین مالی و اختلال در جریان‌های تجاری و سرمایه‌گذاری رخ می‌دهد [۲۸ و ۲۹]. تجربه تطبیقی کشورهایی مانند نروژ و امارات متحده عربی نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری راهبردی و هماهنگی نهادی می‌تواند تا حدی شدت قفل‌شدگی فناورانه را کاهش دهد، هرچند تکرار چنین الگوهایی در شرایط تحریم پایدار با محدودیت جدی مواجه است [۳۰]. ساختار حکمرانی، بُعد سومی است که نتایج سیاست انرژی را شکل می‌دهد. در اقتصادهای مبتنی بر منابع هیدروکربنی‌ها، پراکندگی نهادی و تداخل وظایف میان نهادهای متعدد، هماهنگی سیاستی را

تضعیف می‌کند و اجرای ابزارهای یکپارچه‌ای نظیر قیمت‌گذاری کربن و اصلاح یارانه‌ها را با مانع مواجه می‌سازد [۳۱ - ۳۳]. پژوهش‌های اخیر بر ارزش تحلیلی رویکردهای مبتنی بر شبکه برای شناسایی گلوگاه‌های هماهنگی و گره‌های کلیدی تصمیم‌گیری در سیستم‌های سیاستی پیچیده تأکید دارند [۳۴ و ۳۵].

مرور ادبیات حاضر، چندین محدودیت اساسی در پژوهش‌های موجود دربارهٔ سیاست انرژی در اقتصادهای مبتنی بر منابع هیدروکربنی و تحت محدودیت‌های خارجی را شناسایی کرده است. نخست، اگرچه مطالعات متعددی به سازوکارهای نفرین منابع و بیماری هلندی پرداخته‌اند [۲۰، ۲۱، ۲۳ و ۲۵]، چارچوبی پویا برای تحلیل تحول هم‌زمان وابستگی به منابع و محدودیت‌های فناورانه در شرایط تحریمی ارائه نشده است. دوم، پژوهش‌های مرتبط با حکمرانی انرژی، علی‌رغم تأکید بر پراکندگی نهادی، به‌ندرت شناسایی نظام‌مند گره‌های کلیدی تصمیم‌گیری یا روابط علی میان نهادهای سیاست‌گذار را در دستور کار قرار داده‌اند [۲۷، ۳۱، ۳۲، ۳۴ و ۳۵]. سوم، با وجود بررسی اثر تحریم‌ها بر نوآوری فناورانه، مدل‌های تجربی که روابط غیرخطی و اثرات آستانه‌ای تحریم‌ها را به‌ویژه در بسترهای ملی مانند ایران لحاظ کنند، همچنان محدود هستند [۲۸ و ۲۹]. چهارم، مدل‌های ارزیابی سیاستی موجود غالباً از وزن‌دهی‌های یکسان جهانی استفاده می‌کنند و اولویت‌های بومی نظیر امنیت عرضه و شدت مواجهه با تحریم‌ها را نادیده می‌گیرند [۲۲، ۳۳ و ۳۶]. در نهایت، فقدان ادغام نظام‌مند تجربیات تطبیقی منطقه‌ای، توسعهٔ راهکارهای سیاستی قابل انتقال و عملیاتی را محدود کرده است [۲۴، ۲۶ و ۳۰]. در مجموع، این کاستی‌ها ضرورت ارائهٔ یک چارچوب تحلیلی یکپارچه و چندسطحی را برای بررسی هم‌زمان شدت وابستگی به منابع، وابستگی فناورانه و پویایی‌های حکمرانی در شرایط فشارهای خارجی برجسته می‌سازد. جدول ۱ این شکاف‌ها را خلاصه کرده و بر ضرورت وجود یک چارچوب یکپارچه و چندسطحی برای تحلیل تعامل پویای منابع، فناوری و حکمرانی در اقتصادهای تحت فشارهای خارجی تأکید می‌کند.

جدول ۱. شکاف‌های شناسایی‌شده در مطالعات پیشین

مطالعه	عناصر دیده‌شده	شکاف شناسایی‌شده
[۲۰]	• عدم یکپارچگی میان پدیده‌های اقتصادی و زیست‌محیطی	فقدان یک چارچوب پویا برای اندازه‌گیری هم‌تغییری بین منابع و فناوری تحت تحریم‌ها
[۲۱]	• فقدان تحلیل یکپارچه از قفل‌های فسیلی و نهادی	
[۲۳]	• غفلت از اثرات ترکیبی تحریم‌ها و قفل‌ها	
[۲۵]		
[۲۷]	• تأکید بر تحلیل‌های کلان بدون در نظر گرفتن جزئیات نهادی	فقدان تحلیل سیستماتیک شبکهٔ حکمرانی انرژی
[۳۲]	• عدم شناسایی گره‌های حیاتی حکمرانی در ایران	
[۳۱]	• غفلت از روابط علی بین نهادها	
[۳۵]		
[۳۴]		
[۲۸]	• تأکید بر روابط خطی ساده	عدم مدل‌سازی رابطهٔ غیرخطی بین تحریم‌ها و نوآوری
[۲۹]	• عدم توجه به متغیرهای تعدیل‌کننده • نادیده گرفتن اثر آستانه‌ای تحریم‌ها	
[۲۲]	• اعمال وزن‌های جهانی یکسان	فقدان یک مدل محلی برای ارزیابی سیاست‌های انرژی
[۳۶]	• عدم توجه به اولویت‌های بومی ایران	
[۳۳]	• غفلت از ملاحظات امنیت انرژی	
[۲۴]	• فقدان تحلیل تطبیقی با کشورهای مشابه	فقدان تحلیل تطبیقی منطقه‌ای
[۲۶]	• غفلت از تجربیات موفق منطقه‌ای	
[۳۰]	• عدم ارائه راه‌حل‌های قابل تعمیم	

ژای و همکاران^۱ [۳۷] نشان دادند تحریم‌های اقتصادی می‌توانند به طور معناداری سطح نوآوری فناورانه را تضعیف کنند؛ آن‌ها با استفاده از داده‌های پانلی استان‌های چین استدلال می‌کنند که تحریم‌ها از طریق قطع پیوندهای انسانی و فنی با

کشورهای فرستنده، تضعیف ثبات مالی و اعتماد سرمایه‌گذاران، و محدودسازی تجارت بین‌الملل، مکانیزم‌های تقویت‌کننده نوآوری را مختل می‌کنند و در نتیجه خروجی نوآوری کاهش می‌یابد. همچنین، تأکید می‌کنند که سیاست‌های حمایتی R&D و ساختار صنعتی بهینه‌تر می‌تواند شدت اثر منفی تحریم را کاهش دهد. هان و همکاران^۱ [۳۸] با اتکا به داده‌های ثبت اختراع، مفهوم «جداسازی فناوریانه» میان آمریکا و چین را تعریف کردند و نشان دادند در کنار روندهای کلی همگرایی - واگرایی فناوریانه، اثر تحریم‌ها و سیاست‌های صنعتی می‌تواند ناهمگن باشد؛ به طوری که برخی بنگاه‌ها پس از تحریم‌ها از نظر عملکرد اقتصادی آسیب می‌بینند، اما الگوهای پیوند فناوریانه و کیفیت نوآوری در زنجیره ارزش (بالادست و پایین‌دست) یکسان نیست و حتی می‌تواند در برخی بخش‌ها به بهبود بهره‌وری یا نوآوری‌های باکیفیت‌تر منجر شود. یی و همکاران^۲ [۳۹] با یک رویکرد سناریومحور نشان دادند تاب‌آوری بخش انرژی در برابر شوک‌های قیمتی و رویدادهای بزرگ (مانند همه‌گیری و جنگ) طی زمان تغییر می‌کند و عوامل کلان مانند عدم قطعیت سیاست اقتصادی، ریسک ژئوپلیتیکی و نوسان بازار معمولاً تاب‌آوری را تضعیف می‌کنند. این نتیجه برای چارچوب‌های تحلیل محدودیت‌های سیاست انرژی مهم است، زیرا نشان می‌دهد فشارهای ژئوپلیتیکی و نااطمینانی می‌توانند هم شدت و هم تداوم آسیب‌پذیری را در بخش انرژی افزایش دهند.

اشمیتز و همکاران^۳ [۴۰] با بازنگری مفاهیم امنیت و تاب‌آوری در بخش انرژی، تمایز تحلیلی مهمی میان «شوک‌های ناگهانی» و «فرایندهای کندسوز» ارائه کردند و نشان دادند برنامه‌ریزی تحول سیستم‌های انرژی باید هم‌زمان هر دو نوع اختلال را در افق‌های زمانی مختلف لحاظ کند؛ این نگاه کمک می‌کند تا در مطالعه حاضر نیز تحریم‌ها فقط به عنوان یک شوک مقطعی دیده نشوند، بلکه به عنوان فشاری ساختاری که می‌تواند مسیرهای گذار را در بلندمدت قفل کند، صورت‌بندی شوند. وایز و همکاران^۴ [۴۱] با مطالعه شبکه حکمرانی بین‌بخشی در برنامه‌ریزی انرژی محلی نشان دادند حکمرانی مشارکتی می‌تواند پیوندها و هماهنگی را تقویت کند، اما نتایج آن در عمل به محدودیت‌های ساختاری مانند عدم تقارن قدرت، شکاف منابع و شکاف سواد انرژی حساس است و این عوامل می‌توانند اعتماد و اثربخشی همکاری را فرسایش دهند. این یافته با بخش نهادی مقاله حاضر هم‌راستا است، زیرا نشان می‌دهد تمرکز/پراکندگی شبکه و نابرابری‌های نهادی می‌تواند به گلوگاه اجرا و تضعیف سیاست‌های نوآوری منجر شود. کانچانا با یک تحلیل تطبیقی سیاست‌های گذار انرژی و با اتکا به چارچوب برنامه‌ریزی یکپارچه انرژی و نظریه حکمرانی شبکه‌ای، بر ضرورت هدف‌گذاری روشن تجدیدپذیرها، چارچوب حقوقی پایدار، مشارکت ذی‌نفعان و حکمرانی غیرمتمرکز تأکید کرد و نتیجه گرفت که ظرفیت نهادی و سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های کم‌کربن برای تاب‌آوری و امنیت انرژی تعیین‌کننده است. این ادبیات برای مطالعه حاضر از آن جهت اهمیت دارد که نشان می‌دهد توصیه‌های سیاستی باید از سطح کلی‌گویی فراتر رود و به ابزارهای اجرایی نهادی و فناوریانه متکی شود. در مجموع، این مطالعات جدید به صورت مکمل نشان می‌دهند فشارهای ژئوپلیتیکی و تحریمی می‌تواند از کانال‌های فناوریانه، مالی و حکمرانی، مسیرهای نوآوری و تاب‌آوری انرژی را به طور ناهمگن دگرگون کند. بنابراین، چارچوب DLOCK-S در مقاله حاضر با قرار دادن «تحریم» به عنوان مکانیزم شرطی‌ساز و با تلفیق هم‌زمان وابستگی منابعی، وابستگی فناوریانه و ساختار شبکه نهادی، تلاش می‌کند این تعامل چندلایه را به صورت یکپارچه توضیح دهد و مبنایی برای تفسیر تجربی و تدوین پیشنهادی سیاستی عملیاتی فراهم آورد.

در اقتصادهای وابسته به هیدروکربن، به‌ویژه در شرایط تحریم و فشارهای ژئوپلیتیکی، سیاست انرژی فقط یک مسئله فنی یا برنامه‌ریزی بخشی نیست، بلکه به مسئله‌ای ساختاری با پیامدهای کلان اقتصادی، فناوریانه و نهادی تبدیل می‌شود. تشدید نااطمینانی‌های بین‌المللی، اختلال در زنجیره‌های تأمین فناوری، محدودیت‌های مالی و نوسانات بازار انرژی در سال‌های اخیر نشان داده است وابستگی‌های منابعی و فناوریانه می‌توانند به طور هم‌زمان ظرفیت سازگاری سیستم انرژی را تضعیف کنند و مسیر گذار به سمت الگوهای کم‌کربن را با چالش مواجه سازند. در چنین بستری، سیاست‌گذاری انرژی مستلزم ایجاد توازن میان ساختارهای تثبیت‌شده مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و ضرورت ارتقای فناوریانه و اصلاحات نهادی است؛ امری که بدون

1. Han et al.
2. Ye et al.
3. Schmitz et al.
4. Wyse et al.

بهره‌گیری از چارچوب‌های تحلیلی یکپارچه که نظریه و شواهد تجربی را هم‌زمان تلفیق کنند، به دشواری قابل تحقق است. در پاسخ به این خلأ، پژوهش حاضر با ارائه چارچوب DLOCK-S، نحوه برهم‌کنش شدت وابستگی به منابع، وابستگی فناورانه و ساختار حکمرانی را در شکل‌دهی به نتایج سیاست انرژی تحت شرایط تحریمی بررسی می‌کند. این چارچوب از یک سو مفهوم «قفل‌شدگی دوگانه» را به عنوان تعامل میان قفل مالی - فسیلی و سخت‌شدگی فناورانه - نهادی صورت‌بندی می‌کند، از سوی دیگر رابطه تحریم‌ها، شدت وابستگی به منابع و پیامدهای فناورانه را در قالب مدل‌سازی تجربی تحلیل می‌کند و در نهایت، با ارائه یک ماتریس ارزیابی سیاستی مبتنی بر معیارهای بومی‌سازی‌شده، امکان ارزیابی نظام‌مند گزینه‌های سیاست انرژی را فراهم می‌آورد. به این ترتیب، پژوهش حاضر بنیانی تحلیلی منسجم برای فهم محدودیت‌های سیاست انرژی و طراحی مداخلات واقع‌بینانه و تاب‌آور در اقتصادهای منابع‌محور تحت تحریم فراهم می‌کند؛ موضوعی که با توجه به تشدید ریسک‌های ژئوپلیتیکی و الزامات گذار انرژی، از اهمیت راهبردی برخوردار است.

هدف اصلی این مطالعه، ارتقای درک چگونگی برهم‌کنش وابستگی به منابع، محدودیت‌های فناورانه و ساختارهای نهادی در شکل‌دهی پیامدهای سیاست انرژی ایران تحت فشارهای خارجی نظیر تحریم‌های بین‌المللی بوده است. با اتکا به محدودیت‌های شناسایی‌شده در ادبیات، این مطالعه بر سه چالش به‌هم‌پیوسته تمرکز دارد: (۱) تداوم وابستگی به منابع فسیلی؛ (۲) ضعف در هماهنگی نهادی در نظام حکمرانی انرژی؛ (۳) تشدید شکاف‌های توانمندی فناورانه در شرایط تحریمی. بر این اساس، اهداف اصلی پژوهش عبارت‌اند از: (الف) شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر تعامل میان منابع، فناوری و حکمرانی تحت تحریم از طریق توسعه شاخص‌های کمی ترکیبی، (ب) ارائه راهبردهای تعدیل ساختاری عملیاتی برای غلبه بر سخت‌شدگی‌های سیاستی با استفاده از یک مدل تحلیلی اجرایی، و (ج) معرفی چارچوبی عملی و قابل‌تعمیم برای سایر اقتصادهای مبتنی بر منابع هیدروکربنی که با محدودیت‌های خارجی مواجه‌اند. این اهداف در مجموع به ارائه بینش‌های مبتنی بر شواهد برای بهبود طراحی سیاست انرژی در محیط‌های محدودشده منجر می‌شوند.

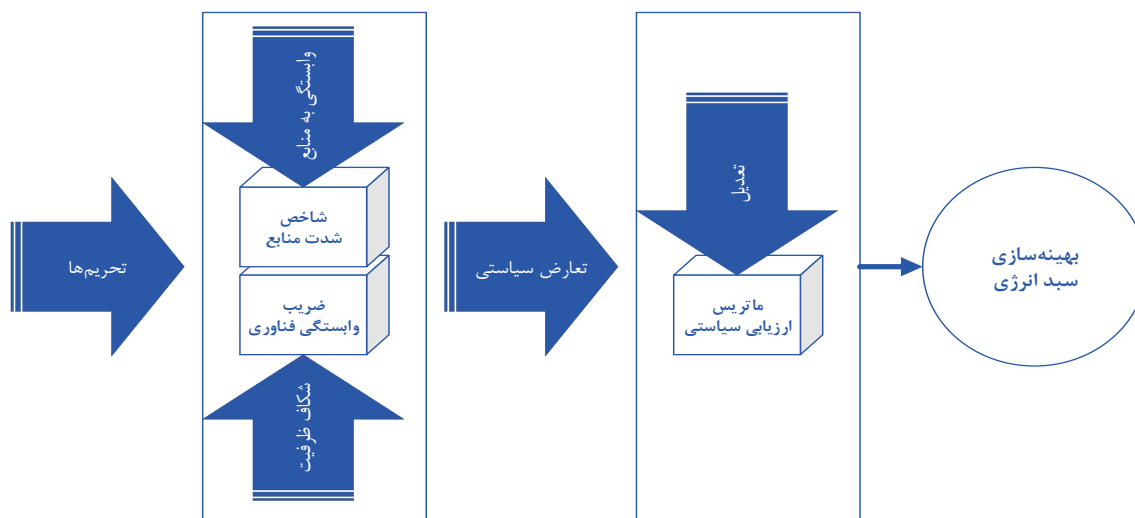
۳. روش‌شناسی

این پژوهش از نوعی رویکرد یکپارچه برای تحلیل پویایی‌های سیاست انرژی در ایران تحت محدودیت‌های خارجی استفاده می‌کند. با اتکا به بینش‌های اقتصاد سیاسی منابع طبیعی، مطالعات گذار فناورانه و پژوهش‌های حکمرانی، روش تحقیق به گونه‌ای طراحی شده است که برهم‌کنش شدت وابستگی به منابع، قفل‌شدگی فناورانه و ساختارهای نهادی را در شکل‌دهی به پیامدهای سیاستی در شرایط تحریمی بررسی کند. اقتصاد سیاسی منابع نشان می‌دهد اتکای مالی به سوخت‌های فسیلی ظرفیت سرمایه‌گذاری و نوآوری را محدود می‌سازد [۴۲ و ۴۳]. در حالی که دیدگاه‌های گذار فناورانه بر تداوم قفل‌شدگی فناوری در نظام‌های انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی تأکید دارند [۲۷]. این پویایی‌ها تحت تأثیر ترتیبات حکمرانی قرار می‌گیرند، به گونه‌ای که میزان هماهنگی میان سطوح مختلف نهادی نقش تعیین‌کننده‌ای در اثربخشی سیاست‌ها ایفا می‌کند [۴۴ و ۴۵]. از منظر روش‌شناسی، پژوهش حاضر از یک طرح آمیخته در سه مرحله متوالی بهره می‌گیرد. در مرحله نخست، تحلیل‌های کمی برای آزمون فرضیه‌های مرتبط با تحریم‌ها، شدت وابستگی به منابع و پیامدهای فناورانه انجام می‌شود. در مرحله دوم، تحلیل کیفی برای واکاوی سازوکارهای علی و تعاملات نهادی مؤثر بر الگوهای مشاهده‌شده به کار گرفته می‌شود. در مرحله سوم، نتایج حاصل به منظور توسعه یک چارچوب مدل‌سازی سیاستی یکپارچه تلفیق می‌شوند. این ترکیب نظام‌مند از روش‌ها امکان ارائه ارزیابی جامع و مبتنی بر شواهد از محدودیت‌های سیاست انرژی و مسیرهای تعدیل ساختاری در ایران تحت شرایط تحریمی را فراهم می‌کند.

۳-۱. مدل مفهومی اثر تحریم‌ها بر محدودیت‌های ساختاری

یک مدل مفهومی برای تبیین چگونگی برهم‌کنش تحریم‌های بین‌المللی با ویژگی‌های ساختاری اقتصادهای وابسته به هیدروکربن ارائه شده است. در این مدل، تحریم‌ها به عنوان شوک‌های برون‌زا عمل می‌کنند که قفل‌شدگی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی را تشدید می‌کنند، ارتقای فناورانه را محدود می‌سازند و ناکارآمدی‌های هماهنگی نهادی را افزایش می‌دهند. این برهم‌کنش‌ها به

سخت‌شدگی‌های پایدار سیاستی و تضادهای تصمیم‌گیری منجر می‌شود و ضرورت استفاده از ابزارهای تحلیلی ساختاریافته برای ارزیابی مسیرهای تعدیل در سبد انرژی را برجسته می‌سازد. شکل ۱ نمایی شماتیک از این تعاملات ارائه می‌دهد.



شکل ۱. مدل مفهومی تعامل تحریم‌ها با وضعیت منابع و فناوری

برای عملیاتی‌سازی مدل، سه مؤلفه تحلیلی اصلی معرفی شدند: (۱) شاخص شدت وابستگی به منابع (RII)؛ (۲) ضریب وابستگی فناوریانه (TDC) و (۳) ماتریس ارزیابی سیاستی (PAM). این مؤلفه‌ها به صورت مکمل محدودیت‌های ساختاری مؤثر بر وابستگی به منابع، توانمندی فناوریانه و عملکرد سیاستی را در شرایط تحریمی بازنمایی می‌کنند. RII، میزان اتکای اقتصاد به منابع فسیلی در شرایط تحریم را اندازه‌گیری می‌کند. معادله ۱ نشان می‌دهد این شاخص به صورت یک شاخص ترکیبی از متغیرهای نرمال‌شده شامل ذخایر فسیلی، وابستگی بودجه‌ای به درآمدهای هیدروکربنی و شدت تحریم‌ها تعریف می‌شود.

$$RII = \left(\frac{FR}{GDP} \right)^* \times \left(\frac{BD}{OP} \right)^* \times SC \times 10 \quad (1)$$

که در آن FR نشان‌دهنده ذخایر اثبات‌شده سوخت‌های فسیلی، GDP تولید ناخالص داخلی، BD وابستگی بودجه دولت به درآمدهای نفتی، OP قیمت جهانی نفت و SC ضریب تحریم‌ها است. علامت (*) بیانگر نرمال‌سازی متغیرها پیش از جمع است. براساس معادله ۲، SC شدت محدودیت‌های خارجی را از طریق ترکیب وزنی محدودیت‌های فناوریانه، مالی و سرمایه‌گذاری اندازه‌گیری می‌کند.

$$SC = 0.4T + 0.3F + 0.3I \quad (2)$$

که در آن T محدودیت‌های فناوریانه، F محدودیت‌های مالی، و I محدودیت‌های سرمایه‌گذاری ناشی از تحریم‌ها را نشان می‌دهد. تمامی مؤلفه‌ها در بازه [۰ و ۱] نرمال شده‌اند. همچنین، براساس معادله ۳، TDC میزان اتکای بخش انرژی به فناوری‌های وارداتی نسبت به ظرفیت تولید داخلی را با لحاظ محدودیت‌های فناوریانه و ظرفیت جذب نوآوری اندازه‌گیری می‌کند.

$$TDC = \frac{TI}{TP} \times \frac{TR}{TA} \quad (3)$$

که در آن TI واردات فناوری انرژی، TP تولید داخلی فناوری، TR محدودیت‌های فناوریانه ناشی از تحریم‌ها، و TA ظرفیت جذب فناوری داخلی را نشان می‌دهد. در نهایت، PAM گزینه‌های سیاست انرژی را بر اساس معیارهای متعدد ارزیابی کرده و امتیاز ترکیبی سیاست (PAS) را مطابق معادله ۴ محاسبه می‌کند.

1. Resource Intensity Index
2. Technology Dependency Coefficient
3. Policy Assessment Matrix
4. Policy Assessment Score

$$PAS = \sum_i (PAI_i \times W_i) \quad (۴)$$

که در آن PAI_i شاخص ارزیابی سیاست برای معیار i (شامل امنیت عرضه، هزینه اقتصادی، پایداری زیست‌محیطی و توانمندی فناورانه) و W وزن متناظر با هر معیار است. این ماتریس امکان مقایسه نظام‌مند گزینه‌های سیاستی در شرایط محدودیت‌های ساختاری و تحریمی را فراهم می‌سازد.

برای افزایش قابلیت تکرار و شفافیت، شاخص‌های RII، SC و TDC بر اساس یک روال مشترک عملیاتی‌سازی شده‌اند: ابتدا هر مؤلفه خام در بازه ۰ تا ۱، به صورت حداکثر - حداقل، نرمال‌سازی شده و سپس تجمیع وزنی انجام شده است. در گام بعد، مؤلفه‌های نرمال‌شده بر اساس وزن‌های نظری تجمیع می‌شوند. در مورد RII، هدف سنجش مواجهه منابعی و مالی است، لذا وزن‌دهی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که سهم مؤلفه‌های وابستگی بودجه‌ای و شدت تحریم در ایجاد شکنندگی مالی منعکس شود. در مورد SC، سه زیرمؤلفه محدودیت فناورانه، محدودیت مالی و محدودیت سرمایه‌گذاری خارجی به صورت جداگانه سنجیده و سپس تجمیع می‌شوند. در مورد TDC نیز هدف سنجش اتکای فناورانه و شکنندگی تأمین فناوری است؛ بنابراین شاخص لزوماً به معنای سطح توانمندی فناورانه داخلی نیست، بلکه شدت اتکای وارداتی و حساسیت به محدودیت‌های انتقال فناوری را بازنمایی می‌کند. بر این اساس، تفسیر تغییرات TDC باید با احتیاط انجام شود؛ زیرا کاهش TDC در دوره‌های تشدید تحریم می‌تواند ناشی از فشردگی واردات و جانشینی اجباری باشد، نه بهبود توانمندی فناورانه. به همین دلیل، نتایج اقتصادسنجی در این مقاله به عنوان شواهد سازگار با سازوکار شرطی شدن رابطه منابع - فناوری تحت تحریم‌ها تفسیر می‌شود.

۳-۲. فرضیات پژوهش

مجموعه‌ای از فرضیه‌های آزمون‌پذیر برای بررسی چگونگی برهم‌کنش تحریم‌های بین‌المللی با محدودیت‌های ساختاری در شکل‌دهی به پیامدهای فناورانه و آسیب‌پذیری سیاستی در بخش انرژی ایران تدوین شده‌اند. فرضیه‌ها بر اساس مدل مفهومی ارائه‌شده و با استفاده از شاخص‌های قابل اندازه‌گیری عملیاتی شده‌اند، که در ادامه هر یک از آن‌ها بیان شده‌اند.

۳-۲-۱. فرضیه اول: شدت وابستگی به منابع و وابستگی فناورانه در شرایط تحریمی

فرض می‌شود که سطوح بالاتر شدت وابستگی به منابع اثر منفی تحریم‌ها بر وابستگی فناورانه را تشدید می‌کند. شدت وابستگی به منابع با شاخص شدت وابستگی به منابع و وابستگی فناورانه با ضریب وابستگی فناورانه اندازه‌گیری می‌شود. شدت تحریم‌ها از طریق ضریب تحریم‌ها بیان می‌شود. این فرض را می‌توان به صورت معادله ۵ نشان داد.

$$TDC = \alpha + \beta_1 SC + \beta_2 RII + \beta_3 (SC \times RII) + \varepsilon \quad (۵)$$

که در آن α جمله ثابت و نشان‌دهنده سطح پایه وابستگی فناورانه در غیاب فشار تحریم و وابستگی منابع است؛ β_1 اثر نهایی شدت تحریم‌ها بر وابستگی فناورانه؛ β_2 اثر مستقیم شدت وابستگی به منابع؛ و β_3 اثر تعاملی را نشان می‌دهد، که بیانگر نقش تعدیل‌کننده وابستگی به منابع بر اثر تحریم‌ها است. جمله خطا ε اثر عوامل مشاهده‌نشده را در بر می‌گیرد.

۳-۲-۲. فرضیه دوم: ساختار نهادی و اثربخشی نوآوری

فرضیه دوم نقش ساختار نهادی در شکل‌دهی به پیامدهای نوآوری تحت تحریم را بررسی می‌کند. تمرکز نهادی میزان تمرکز اختیار تصمیم‌گیری در میان نهادهای حاکم بر بخش انرژی را نشان می‌دهد. اثربخشی نوآوری بیانگر توان سیاست‌های انرژی در تبدیل ورودی‌های نوآورانه به خروجی‌های فناورانه قابل مشاهده است. این فرض به صورت معادله ۶ در آزمون مدل قرار گرفته است.

$$IE = \gamma_0 + \gamma_1 IC + \gamma_2 SC + \varepsilon \quad (۶)$$

که در آن γ_0 جمله ثابت؛ γ_1 اثر تمرکز نهادی بر اثربخشی نوآوری؛ γ_2 اثر مستقیم شدت تحریم‌ها؛ و ε بیانگر عوامل نهادی مشاهده‌نشده است. انتظار می‌رود که γ_1 در شرایط تحریمی منفی باشد.

۳-۲-۳. فرضیه سوم: ترکیب سرمایه‌گذاری و آسیب‌پذیری سیاستی

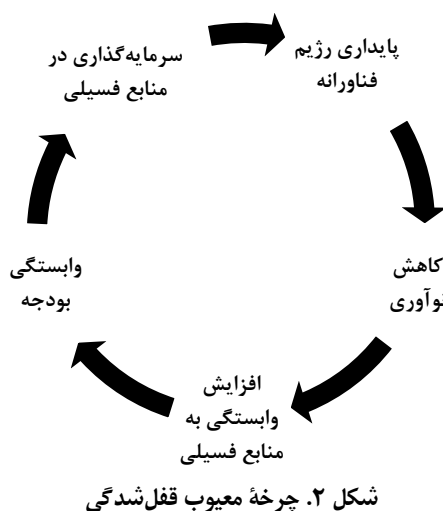
فرضیه سوم به بررسی نقش ترکیب سرمایه‌گذاری انرژی در کاهش آسیب‌پذیری نسبت به تحریم‌ها می‌پردازد. آسیب‌پذیری سیاستی (VUL)، میزان مواجهه نظام انرژی با اختلالات ناشی از تحریم‌ها را نشان می‌دهد. سرمایه‌گذاری در فناوری‌های ترکیبی (INV)، به سرمایه‌گذاری در سامانه‌هایی اشاره دارد که سوخت‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر را ترکیب می‌کنند و این فرض، به صورت معادله ۷ مورد آزمون قرار گرفته است.

$$VUL = \delta_0 + \delta_1 TDC + \delta_2 INV + \varepsilon \quad (7)$$

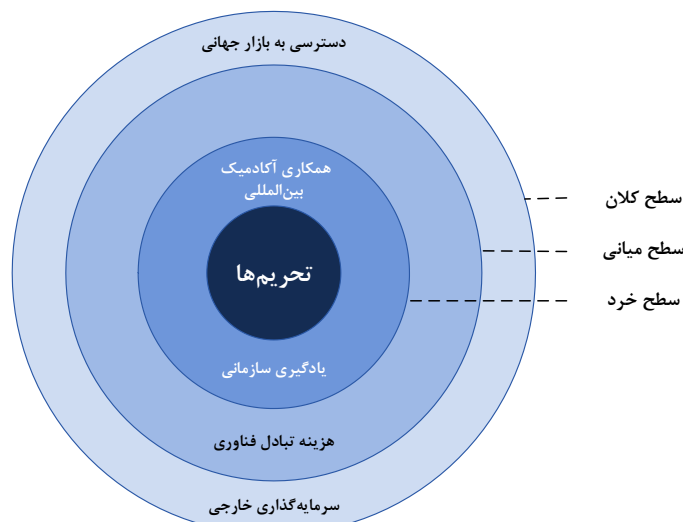
که در آن δ_0 جمله ثابت؛ δ_1 اثر وابستگی فناورانه بر افزایش آسیب‌پذیری؛ δ_2 اثر کاهنده سرمایه‌گذاری ترکیبی؛ و ε اثر شوک‌ها و عوامل سیاستی مشاهده‌نشده را در بر می‌گیرد. در مجموع، این فرضیه‌ها سازوکارهای تعاملی چارچوب DLOCK-S را به صورت تجربی عملیاتی کرده و مبنای تحلیل پویایی‌های قفل‌شدگی ناشی از تحریم‌ها در بخش انرژی ایران را فراهم می‌کنند.

۳-۳. سازوکارهای علی

چارچوب تحلیلی این پژوهش بر دو سازوکار علی به هم پیوسته استوار است که از طریق آن‌ها تحریم‌ها موجب تقویت قفل‌شدگی ساختاری در نظام‌های انرژی وابسته به هیدروکربن می‌شوند. سازوکار نخست، چرخه خودتقویت‌شونده قفل‌شدگی است که در شکل ۲ نمایش داده شده است. این چرخه با وابستگی مالی و سرمایه‌گذاری بالا به بخش‌های فسیلی آغاز می‌شود؛ وابستگی‌ای که موجب هدایت منابع عمومی به فعالیت‌های بالادستی هیدروکربنی می‌شود. این الگوی تخصیص، رژیم‌های فناورانه و نهادی مسلط را تثبیت می‌کند، انگیزه و ظرفیت نوآوری را کاهش می‌دهد و تنوع‌بخشی به فناوری‌های جایگزین انرژی را به تأخیر می‌اندازد. در نتیجه، اتکای مداوم به سوخت‌های فسیلی بازتولید می‌شود و شرایط اولیه وابستگی منابع تداوم می‌یابد. مطالعات تجربی درباره بخش انرژی ایران این الگوی پایدار سرمایه‌گذاری و پیامدهای آن برای نوآوری و تنوع‌بخشی را تأیید می‌کنند [۴۶ و ۴۷].



سازوکار دوم، که مکمل چرخه قفل‌شدگی است، به انتقال چندسطحی آسیب‌پذیری ناشی از تحریم‌ها می‌پردازد و در شکل ۳ ترسیم شده است. این سازوکار با تکیه بر دیدگاه گذار چندسطحی و حکمرانی، در سه سطح کلان، میانی و خرد عمل می‌کند. در سطح کلان، تحریم‌ها دسترسی به بازارهای بین‌المللی، منابع مالی و سرمایه‌گذاری فرامرزی را محدود می‌سازند و در نتیجه، ظرفیت تأمین مالی پروژه‌های انرژی را کاهش می‌دهند. در سطح میانی، تحریم‌ها هزینه‌های مبادله مرتبط با انتقال فناوری، تأمین تجهیزات و همکاری‌های سازمانی در بخش انرژی را افزایش می‌دهند. در سطح خرد، تحریم‌ها فرایندهای یادگیری سازمانی را از طریق محدود کردن دسترسی به شبکه‌های پژوهشی بین‌المللی، فرصت‌های آموزشی و تبادل دانش تضعیف می‌کنند.



شکل ۳. آثار چندسطحی تحریم‌ها

در مجموع، این سازوکارها نشان می‌دهند چگونه محدودیت‌های خارجی از طریق ساختارهای مالی، نظام‌های فناورانه و ترتیبات نهادی گسترش می‌یابند و پویایی‌های قفل‌شدگی دوگانه را تقویت می‌کنند. پیوند میان الگوهای سرمایه‌گذاری، سخت‌شدگی حکمرانی و محدودیت‌های نوآوری، بنیان علی لازم برای آزمون فرضیه‌های تجربی در بخش‌های بعدی را فراهم می‌سازد.

۳-۴. جمع‌آوری داده‌ها

محاسبه شاخص شدت وابستگی به منابع، مبتنی بر مجموعه‌ای از متغیرهای کلان اقتصادی و بخشی است. وابستگی بودجه‌ای (BD) به صورت نسبت درآمدهای نفتی به کل درآمدهای دولت تعریف می‌شود که برای سال مالی ۱۴۰۲ - ۱۴۰۳ برابر با ۴۲ درصد گزارش شده است [۴۸]. ذخایر اثبات‌شده فسیلی (FR) شامل نفت خام و گاز طبیعی است و حدود ۱۵۷ میلیارد بشکه معادل نفت خام برای نفت و ۲۱۰ میلیارد بشکه معادل نفت خام برای گاز طبیعی برآورد می‌شود، که در آن BOE بیانگر محتوای انرژی یک بشکه نفت خام است [۴۷]. تولید ناخالص داخلی (GDP) ایران برای سال ۱۴۰۲ حدود ۴۰۰ میلیارد دلار برآورد شده است [۴۹]. قیمت جهانی نفت (OP) بر اساس میانگین قیمت نفت برنت و برابر با ۸۵ دلار به‌ازای هر بشکه در نظر گرفته شده است [۵۰]. ضریب تحریم‌ها (SC) بر اساس سه بعد مستقل شامل محدودیت‌های فناورانه انرژی، محدودیت‌های مالی - بانکی و محدودیت‌های سرمایه‌گذاری خارجی ساخته شده است. هر بعد به صورت جداگانه توسط خبرگان امتیازدهی و سپس نرمال‌سازی شده است. برای افزایش روایی، هم‌زمانی تغییرات امتیازهای سالانه با رویدادهای تحریمی مشخص (مانند تشدید تحریم‌های ثانویه یا محدودیت‌های بانکی) بررسی شده و هم‌راستایی کیفی آن‌ها تأیید شده است. به این ترتیب، SC نه فقط یک سنجش ادراکی، بلکه شاخصی ترکیبی با اعتبارسنجی تاریخی - رویدادی تلقی می‌شود. به منظور تقویت روایی شاخص تحریم، علاوه بر سازه‌پردازی خبرگانی، یک اعتبارسنجی رویدادمحور انجام می‌شود؛ به این معنا که روند امتیازهای سالانه SC با نقاط عطف شناخته‌شده در رژیم تحریم‌ها و شوک‌های مرتبط با دسترسی بانکی، صادرات نفت و محدودیت‌های انتقال فناوری تطبیق داده می‌شود و هم‌جهتی کیفی آن بررسی می‌شود. همچنین، برای کاهش وابستگی کامل به ادراک خبرگان، از مثلث‌سازی با منابع اسنادی (گزارش‌ها و بیانیه‌های رسمی، تغییرات مقررات محدودکننده، و شواهد ثبت‌شده درباره محدودیت‌های مبادلات مالی، و تجاری) استفاده می‌شود. این رویکرد، هرچند جایگزین کامل داده‌های رسمی کمی نیست، اما شاخص SC را از حالت صرفاً ادراکی خارج می‌کند و آن را به سنجش با پشتوانه خارجی - تاریخی نزدیک‌تر می‌سازد.

جامعه آماری پژوهش در سه سطح تحلیلی سازمان‌دهی شده است. در سطح کلان، تحلیل شامل ۳۰ پروژه انرژی (۱۵ پروژه فسیلی، ۱۰ پروژه تجدیدپذیر و ۵ پروژه مرتبط با انرژی هسته‌ای) است. در سطح میانی، یک سرشماری کامل از ۱۴ نهاد درگیر در

سیاست‌گذاری و تنظیم‌گری انرژی انجام شده است. در سطح خرد، جامعه هدف شامل ۱۲۰ مدیر و کارشناس ارشد فعال در بخش انرژی است. روش نمونه‌گیری متناسب با هر سطح طراحی شده است. پروژه‌های انرژی با استفاده از نمونه‌گیری طبقه‌بندی شده بر اساس نوع فناوری، پراکندگی جغرافیایی و مقیاس سرمایه‌گذاری انتخاب شده‌اند. تحلیل نهادی بر مبنای سرشماری کامل و تمرکز بر نهادهای دارای اختیار رسمی سیاست‌گذاری انجام شده است. انتخاب افراد از طریق نمونه‌گیری هدفمند گلوله‌برفی صورت گرفته و حداقل ۱۰ سال سابقه تصمیم‌گیری در حوزه انرژی به عنوان شرط ورود در نظر گرفته شده است.

گردآوری داده‌ها شامل روش‌های کمی و کیفی است. داده‌های کمی از پایگاه داده پانلی بخش انرژی در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ استخراج شده‌اند که از منابعی نظیر وزارت نفت، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) و مرکز آمار ایران گردآوری شده‌اند. این پایگاه داده شامل ۵۸ شاخص در چهار حوزه ساختارهای منابعی، ظرفیت فناوریانه، ترتیبات حکمرانی و محدودیت‌های ناشی از تحریم‌ها است. علاوه بر این، یک پرسشنامه استاندارد با ضریب پایایی آلفای کرونباخ برابر با ۰/۸۹ اجرا شده است که شامل گویه‌هایی برای سنجش وابستگی منابعی، ظرفیت فناوریانه و اثرات تحریم‌ها است. داده‌های کیفی از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و بر اساس راهنمای مصاحبه همسو با چارچوب DLOCK-S گردآوری شده‌اند. میانگین زمان هر مصاحبه حدود ۶۵ دقیقه بوده و داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MAXQDA تحلیل شده‌اند. همچنین، تحلیل اسنادی شامل بررسی قوانین برنامه‌های توسعه، مصوبات شورای انرژی، گزارش‌های فنی نهادهای ملی انرژی و پروتکل‌های رسمی تصمیم‌گیری در بازه ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ انجام شده است.

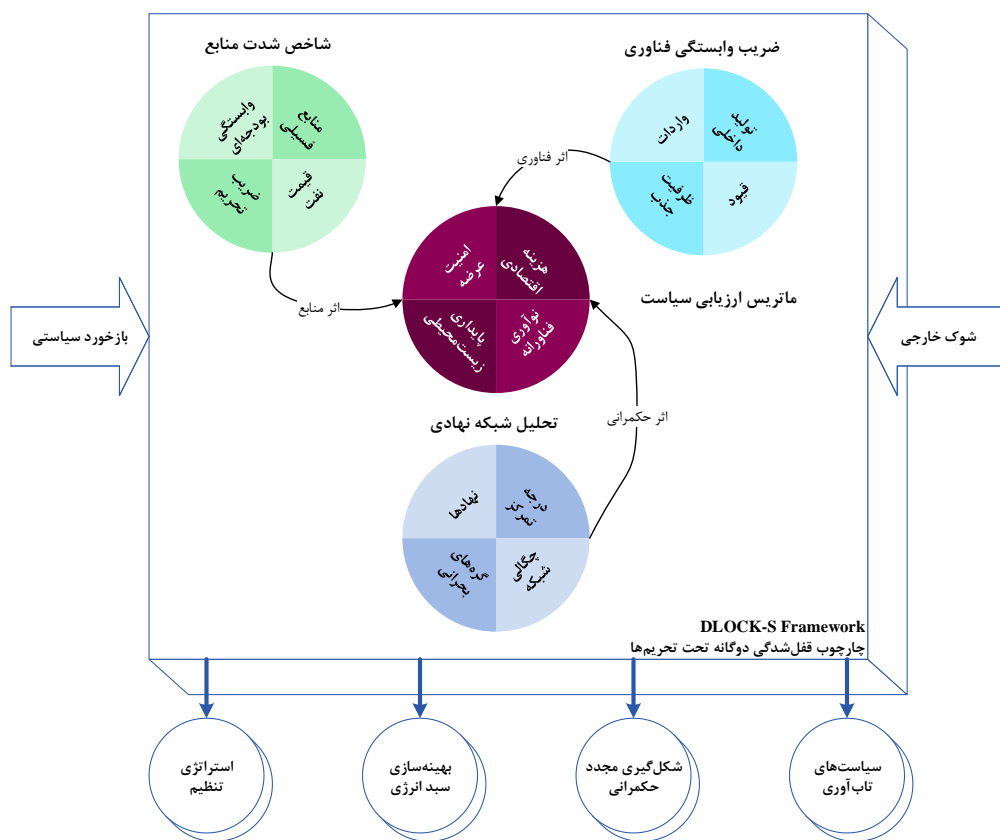
۳-۵. ابزار تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها در این پژوهش بر پایه یک رویکرد ترکیبی کمی - کیفی طراحی شده است که هدف آن، آزمون سازگاری تجربی چارچوب DLOCK-S با الگوهای مشاهده‌شده در بخش انرژی ایران است. در بخش کمی، از مدل‌های داده‌های تابلویی با اثرات ثابت استفاده می‌شود تا تغییرات درون‌پروژه‌ای طی زمان و تفاوت‌های ثابت میان پروژه‌ها کنترل شود. انتخاب مشخصات اثرات ثابت با توجه به ناهمگنی‌های مشاهده‌نشده میان پروژه‌های انرژی (از جمله تفاوت در مقیاس، فناوری پایه و ساختار تأمین مالی) انجام شده است. در این چارچوب، شدت وابستگی به منابع، شدت تحریم‌ها و جمله تعاملی آن‌ها به عنوان متغیرهای توضیحی اصلی وارد مدل شده و شاخص وابستگی فناوریانه به عنوان متغیر وابسته تعریف می‌شود. به منظور کاهش نگرانی‌های ناشی از حذف متغیرهای کلان مشترک، اثرات زمانی سالانه در مدل لحاظ شده‌اند تا شوک‌های اقتصاد کلان نظیر نوسانات نرخ ارز، تغییرات سیاست‌های یارانه‌ای و تحولات سیاسی داخلی جذب شوند. با توجه به محدودیت دسترسی به ابزارهای برون‌زای معتبر برای شدت تحریم‌ها، از برآوردهای پویا استفاده نشده است؛ از این‌رو نتایج به عنوان روابط هم‌بستگی شرطی تفسیر می‌شوند که میزان سازگاری داده‌ها با سازوکار نظری پیشنهادی را نشان می‌دهند، نه شناسایی علی قطعی. در تکمیل تحلیل کمی، ساختار نهادی با استفاده از تحلیل شبکه اجتماعی بررسی شده و شاخص‌هایی مانند چگالی شبکه، درجه مرکزیت و شاخص همبستگی QAP محاسبه شده است تا الگوهای هماهنگی و تمرکز تصمیم‌گیری در نظام حکمرانی انرژی ارزیابی شود. همچنین، داده‌های کیفی حاصل از مصاحبه‌ها و تحلیل اسناد با روش کدگذاری مضمون‌محور تحلیل شده‌اند تا سازوکارهای علی و زمینه‌ای مکمل نتایج کمی شناسایی شوند. این ترکیب روش‌ها امکان مثلث‌سازی یافته‌ها را فراهم کرده و تفسیر نتایج را در چارچوبی ساختاری و نهادی تقویت می‌کند.

در این چارچوب، متغیرهای کلان نظیر نرخ ارز، قیمت داخلی گاز و سایر حامل‌های انرژی، اصلاحات یارانه‌ای و شوک‌های سیاسی داخلی که در سطح ملی و به صورت مشترک بر تمامی پروژه‌ها اثر می‌گذارند، از طریق اثرات ثابت زمانی سالانه کنترل می‌شوند. از آنجا که این متغیرها در هر سال برای تمامی واحدهای مقطعی مقدار یکسان دارند، ورود مستقیم آن‌ها به مدل پانلی با اثرات زمانی منجر به هم‌خطی کامل می‌شود؛ بنابراین استفاده از اثرات زمانی راهکار استاندارد برای جذب شوک‌های کلان مشترک محسوب می‌شود. به این ترتیب، تغییرات سالانه ناشی از سیاست‌های کلان یا نوسانات اقتصاد کلان در ضرایب متغیرهای اصلی منعکس نمی‌شود و تخمین‌ها بر تغییرات درون‌پروژه‌ای تمرکز دارند.

۳-۶. توسعه چارچوب DLOCK-S

چارچوب DLOCK-S (قفل‌شدگی دوگانه تحت تحریم) محدودیت‌های بخش انرژی را به عنوان برهم‌کنش سه مؤلفه ساختاری قابل مشاهده تجربی در شرایط فشار خارجی مفهوم‌سازی می‌کند. مؤلفه نخست، شدت وابستگی به منابع، میزان مواجهه مالی و کلان‌اقتصادی با درآمدهای هیدروکربنی را نشان می‌دهد و حساسیت اقتصاد به شوک‌های خارجی، نوسانات قیمت و محدودیت‌های درآمدی ناشی از تحریم‌ها را بازتاب می‌دهد. مؤلفه دوم، وابستگی فناورانه، میزان اتکای بخش انرژی به کالاهای سرمایه‌ای، تجهیزات و خدمات فنی وارداتی را با در نظر گرفتن ظرفیت جذب داخلی و محدودیت‌های فناورانه ناشی از تحریم‌ها اندازه‌گیری می‌کند. مؤلفه سوم، ساختار شبکه نهادی، پیکربندی و ظرفیت هماهنگی نهادهای درگیر در سیاست‌گذاری انرژی را منعکس می‌سازد. این مؤلفه از طریق شاخص‌های تحلیل شبکه اجتماعی از جمله چگالی شبکه، درجه تمرکز و میزان ارتباطات میان‌نهادی عملیاتی می‌شود که در مجموع سطح هماهنگی، تمرکز قدرت تصمیم‌گیری و جریان اطلاعات در نظام حکمرانی انرژی را نشان می‌دهند. در چارچوب DLOCK-S، تحریم‌ها به عنوان یک محدودیت برون‌زا عمل می‌کنند که به طور هم‌زمان وابستگی به منابع فسیلی را تشدید می‌کنند، ارتقای فناورانه را محدود می‌سازند و هماهنگی نهادی را تضعیف می‌کنند. برهم‌کنش این سازوکارها به شکل‌گیری یک پویایی قفل‌شدگی دوگانه منجر می‌شود که به صورت تقویت هم‌زمان (۱) وابستگی مالی - فسیلی و (۲) سخت‌شدگی فناورانه - نهادی تعریف می‌شود. این قفل‌شدگی دوگانه حتی در حضور مداخلات سیاستی، امکان تحول ساختاری در بخش انرژی را محدود می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، چارچوب DLOCK-S شاخص‌های کمی، تحلیل شبکه نهادی و سازوکارهای علی را در یک ساختار تحلیلی یکپارچه ادغام می‌کند. این یکپارچگی امکان ارزیابی نظام‌مند محدودیت‌های ناشی از تحریم‌ها را فراهم کرده و مبنایی منسجم برای آزمون تجربی و ارزیابی سیاستی در اقتصادهای وابسته به هیدروکربن تحت فشار خارجی ایجاد می‌کند.



شکل ۴. ساختار مفهومی چارچوب DLOCK-S

۳-۷. اعتبار سنجی، ملاحظات اخلاقی و محدودیت‌ها

اعتبار پژوهش بر اساس چهار معیار ارزیابی شده است: اعتبار درونی، اعتبار بیرونی، پایایی و قابلیت انتقال. اعتبار درونی از طریق مثلث‌سازی روش‌ها و داده‌ها تقویت شده است؛ به گونه‌ای که تحلیل‌های اقتصادسنجی کمی، مصاحبه‌های کیفی و اسناد رسمی به صورت هم‌زمان به کار گرفته شده‌اند. اعتبار بیرونی با بررسی موارد متضاد، از جمله پروژه‌هایی که به اهداف مورد نظر دست نیافته‌اند، افزایش یافته است. پایایی از طریق آزمون بازآزمایی در یک بازه چهار هفته‌ای سنجیده شده و ضریب همبستگی ۰/۹۲ به دست آمده است. قابلیت انتقال با ارائه توصیف غنی از بستر نهادی و سیاستی ایران تقویت شده است. ملاحظات اخلاقی در تمامی مراحل پژوهش رعایت شده‌اند. حقوق مشارکت‌کنندگان از طریق اخذ رضایت‌نامه آگاهانه کتبی و فراهم‌سازی امکان خروج از پژوهش در هر مرحله تضمین شده است. شفافیت روش‌شناختی از طریق مستندسازی پروتکل تحلیل و اعلام محدودیت‌های دسترسی به داده‌های طبقه‌بندی شده رعایت شده است. بی‌طرفی علمی نیز با پرهیز از وابستگی مالی به نهادهای انرژی و با انتخاب متوازن خبرگان از بخش‌های دولتی، خصوصی و دانشگاهی حفظ شده است. این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز مواجه است، از جمله دسترسی محدود به داده‌های محرمانه، احتمال سوگیری حافظه در مصاحبه‌ها و عدم قطعیت در سنجش شدت تحریم‌ها. برای جبران محدودیت داده‌ها، از شاخص‌های جانشین مانند مصرف برق به جای داده‌های تولید استفاده شده است. همچنین، برای کاهش سوگیری حافظه، داده‌های مصاحبه با اسناد آرشیوی و گزارش‌های رسمی تطبیق داده شده‌اند. طراحی پژوهش دارای ویژگی‌های روش‌شناختی متعددی است که تحلیل تجربی را تقویت می‌کند. این ویژگی‌ها شامل ادغام تحلیل شبکه نهادی و مدل‌سازی اقتصادسنجی برای بررسی هم‌زمان روابط نهادی و متغیرهای عملکردی، و نیز ساخت شاخص ترکیبی تحریم‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های حقوقی، فناوریانه و مالی است. علاوه بر این، تحلیل با استفاده از تقسیم‌بندی تاریخی - راهبردی دوره ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ انجام شده تا تغییرات زمینه‌ای سیاست‌ها و رژیم‌های تحریمی لحاظ شود. در مجموع، این عناصر روش‌شناختی امکان آزمون تجربی دقیق چارچوب DLOCK-S را فراهم می‌سازند. طراحی پژوهش چندسطحی است، داده‌ها را در سطح پروژه، نهاد و فرد گردآوری می‌کند، قابلیت انطباق با شاخص‌های بومی را دارد و از اعتبار اکولوژیکی برخوردار است؛ زیرا بر هشت سال داده میدانی و آرشیوی استوار است. در بخش بعد، نتایج تجربی حاصل از اجرای این چارچوب ارائه می‌شود.

۴. نتایج

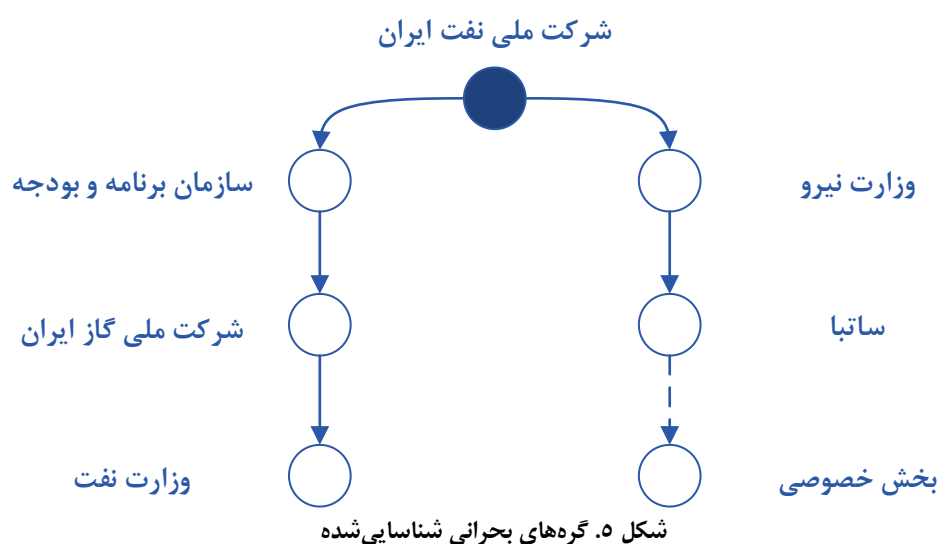
چارچوب DLOCK-S برای ارزیابی این موضوع به کار گرفته می‌شود که تحریم‌ها چگونه با محدودیت‌های ساختاری در بخش انرژی ایران برهم‌کنش دارند. تحلیل حاضر چهار بُعد را به صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد: (۱) شدت وابستگی به منابع؛ (۲) وابستگی فناوریانه؛ (۳) ساختار شبکه نهادی؛ (۴) ارزیابی سیاستی. این بخش یافته‌های تجربی حاصل از محاسبه شاخص‌ها، برآورد رگرسیون تابلویی، سنجش شبکه نهادی و شبیه‌سازی سناریویی را بر اساس داده‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ گزارش می‌کند. در مجموع، نتایج به وجود پویایی قفل‌شدگی دوگانه اشاره دارد که از یک‌سو با تداوم وابستگی مالی-فسیلی و از سوی دیگر با سخت‌شدگی فناوریانه و حکمرانی همراه است.

۴-۱. شاخص‌های مؤلفه و ساختار نهادی

محاسبه کمی RII برای ایران در سال ۱۴۰۲ مقدار ۸/۳ از ۱۰ را نشان می‌دهد، که بیانگر وابستگی بالای مالی و کلان‌اقتصادی به شرایط مبتنی بر سوخت‌های فسیلی است. در این محاسبه از تولید ناخالص داخلی حدود ۴۰۰ میلیارد دلار [۵۱]، وابستگی بودجه‌ای به درآمدهای نفتی ۴۲ درصد [۴۸]، میانگین قیمت نفت برنت ۸۵ دلار به ازای هر بشکه [۵۲]، و مجموع ذخایر اثبات‌شده فسیلی حدود ۳۶۷ میلیارد بشکه معادل نفت خام (BOE) شامل نفت و گاز [۵۳]، استفاده شده است. ضریب تحریم به‌کاررفته در تجمیع شاخص برابر ۰/۸۵ (در مقیاس ۰ تا ۱) است که مطابق بخش گردآوری داده‌ها از امتیازهای خبرگان استخراج و نرمال‌سازی شده است. بررسی حساسیت نشان می‌دهد RII نسبت به فرض‌های قیمت نفت و شدت تحریم حساسیت بالایی دارد: کاهش قیمت نفت مؤلفه فشار مالی شاخص را افزایش می‌دهد و افزایش ضریب تحریم، مواجهه کلی با وابستگی منابع را تشدید می‌کند. این یافته‌ها آسیب‌پذیری ساختاری نظام انرژی را در شرایط اتصال شدید به درآمدهای هیدروکربنی

برجسته می‌سازد. میانگین TDC در دوره مطالعه ۰/۸۷ (در مقیاس ۰ تا ۱) است که وابستگی فناورانه بالا را نشان می‌دهد. TDC مطابق معادله ۳ و بر پایه وابستگی وارداتی، ظرفیت تولید داخلی، محدودیت‌های فناورانه ناشی از تحریم و ظرفیت جذب نوآوری محاسبه شده است. برای گزارش و قابلیت مقایسه میان موارد، مقدار خام شاخص به مقیاس کراندار ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شده و مقدار گزارش شده حاصل این نرمال‌سازی است. مؤلفه‌های زیرین شاخص حاکی از سهم بالای تجهیزات و خدمات وارداتی در کنار محدودیت‌های شدید تحریمی و ظرفیت محدود جذب و بومی‌سازی است.

تحلیل شبکه ۱۴ نهاد تنظیم‌گر، چگالی شبکه ۰/۲۳ را نشان می‌دهد، که بیانگر پیوندهای محدود و جریان اطلاعات ضعیف‌تر از سطح مطلوب هماهنگی است. میانگین درجه مرکزیت ۰/۶۲ نشان‌دهنده تمرکز متوسط نفوذ است و شاخص QAP برابر ۰/۶۸ بیانگر ارتباط قوی میان نزدیکی نهادی و الگوهای هماهنگی مشاهده شده است. تحلیل گره‌های بحرانی نشان می‌دهد شرکت ملی نفت ایران، یک هاب غالب با درجه مرکزیت ۰/۹۲ است و به وزارت نیرو، سازمان برنامه و بودجه و شرکت ملی گاز ایران پیوندهای نزدیک دارد. نمودار شبکه (شکل ۵) شکاف‌های هماهنگی را برجسته می‌کند؛ از جمله پیوندهای ضعیف میان نهادهای مرتبط با تجدیدپذیرها (مانند ساتبا) و بدنه اصلی بخش گاز، و نیز ریسک گلوگاه ناشی از تمرکز بالا.



در PAM وزن‌های بومی‌سازی شده به این صورت اعمال شده‌اند: امنیت عرضه (۰/۴۵)، هزینه اقتصادی (۰/۳۵)، پایداری زیست‌محیطی (۰/۱۰) و توانمندی فناورانه (۰/۱۰). این وزن‌دهی اولویت‌دهی به تاب‌آوری کوتاه‌مدت در شرایط تحریم را بازتاب می‌دهد و هم‌زمان اهداف زیست‌محیطی و فناوری‌سازی را با وزن کمتر حفظ می‌کند. جدول ۲ امتیازهای سیاستی نمونه را تحت این وزن‌ها گزارش می‌کند و نشان می‌دهد گزینه‌های توسعه تجدیدپذیر، تحت محدودیت‌های فعلی، امتیاز بالاتری از قیمت‌گذاری کربن دریافت می‌کنند که عمدتاً ناشی از ملاحظات امکان‌پذیری و امنیت عرضه است.

جدول ۲. ارزیابی سیاست‌های کلیدی

سیاست	امتیاز	برتری	کاستی
هدفمند کردن یارانه‌ها	۶/۲	کاهش مصرف انرژی	تورم قیمت
توسعه نیروگاه‌های خورشیدی	۷/۸	تنوع‌بخشی به سبد عرضه	هزینه سرمایه‌گذاری
قیمت‌گذاری کربن	۵/۴	کاهش انتشار	تأثیر بر رقابت‌پذیری

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، ارزیابی سیاست‌های کلیدی، امتیاز ۶/۲ را برای یارانه‌های هدفمند که مصرف انرژی را کاهش می‌دهند اما باعث تورم قیمت می‌شوند، ۷/۸ را برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی که با وجود سرمایه‌گذاری‌های اولیه بالا، تنوع‌بخشی را ترویج می‌دهند و ۵/۴ را برای قیمت‌گذاری کربن که انتشار گازهای گلخانه‌ای را مهار می‌کند، اما

رقابت‌پذیری را تضعیف می‌کند، به دست داد. تحلیل حساسیت نشان داد کاهش ۱۰ درصد در وزن امنیت عرضه، امتیاز سیاست پایداری را ۱۵ درصد افزایش می‌دهد، در حالی که تشدید تحریم‌ها، وزن امنیت عرضه را ۲۰ درصد افزایش می‌دهد، که نشان‌دهنده سازگاری PAM با شرایط در حال تحول و کاربرد آن در بهینه‌سازی تخصیص منابع است.

افزایش شدت تحریم‌ها با افزایش آسیب‌پذیری کلی سیستم همراه است؛ زیرا آثار تجمعی آن بر مواجهه مالی، دسترسی فناوری و هماهنگی نهادی هم‌زمان عمل می‌کنند. در سناریوی تشدید تحریم‌ها، مدل افزایش در مؤلفه‌های مواجهه منابعی و محدودیت فناوری را بازتولید می‌کند و در نتیجه، آسیب‌پذیری ترکیبی افزایش می‌یابد. در مقابل، سناریوهایی که ظرفیت جذب و بومی‌سازی (مانند افزایش فعالیت تحقیق و توسعه و توان داخلی‌سازی) را بهبود می‌دهند، مؤلفه محدودیت فناوری را کاهش می‌دهند و آسیب‌پذیری را پایین می‌آورند. همچنین، بهبود هماهنگی نهادی (مطابق سنجه‌های INA) یک نقطه اهرمی مکمل است که با کاهش گلوگاه‌ها، ظرفیت اجرا را ارتقا می‌دهد. شکل ۶ جهت این تعاملات را در سازوکار قفل‌شدگی دوگانه خلاصه می‌کند.



شکل ۶. آثار قفل‌شدگی دوگانه بر وضعیت منابع و فناوری در سیستم

برای بررسی روابط میان متغیرهای کلیدی، مدل رگرسیون تابلویی بر اساس مشخصات تعاملی ارائه‌شده در معادله ۵ برآورد شد. نتایج نشان می‌دهد جمله ثابت α برابر ۰/۸۵ است ($p = ۰/۰۰۰$; $t = ۱۱/۹۷$; $SE = ۰/۰۷۱$). ضریب شدت وابستگی به منابع (β_1 برای RII)، برابر با -۰/۱۵ است ($p = ۰/۰۰۱$; $t = -۳/۶۶$; $SE = ۰/۰۴۱$). ضریب شدت تحریم‌ها (β_2 برای SC)، برابر -۰/۲۸ است ($p = ۰/۰۰۰$; $t = -۸/۷۵$; $SE = ۰/۰۳۲$). همچنین، ضریب جمله تعاملی (β_3 برای $RII \times SC$)، برابر -۰/۱۹ است ($p = ۰/۰۰۰$; $t = -۷/۰۴$; $SE = ۰/۰۲۷$). همه ضرایب برآوردشده در سطوح متعارف از نظر آماری معنادار هستند. نتایج کامل برآورد در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳. نتایج تخمین رگرسیون تابلویی

متغیر	ضریب	خطای استاندارد	آماره t	سطح اثرگذاری
α	۰/۸۵	۰/۰۷۱	۱۱/۹۷	۰/۰۰۰
β_1	-۰/۱۵	۰/۰۴۱	-۳/۶۶	۰/۰۰۱
β_2	-۰/۲۸	۰/۰۳۲	-۸/۷۵	۰/۰۰۰
β_3	-۰/۱۹	۰/۰۲۷	-۷/۰۴	۰/۰۰۰

شاخص‌های برازش مدل نشان‌دهنده عملکرد قوی هستند. مقدار R^2 درون‌گروهی برابر ۰/۷۸ و آماره F برابر ۲۹/۳۴ است؛ این نتایج بر اساس ۲۴۰ مشاهده (۳۰ پروژه در ۸ سال) و ۳۰ گروه به دست آمده‌اند. این شاخص‌ها نشان می‌دهند مشخصات مدل بخش قابل توجهی از تغییرات درون‌پروژه‌ای TDC را توضیح می‌دهد. ضرایب برآوردشده بیانگر ارتباط‌های معنادار آماری میان شدت وابستگی به منابع، شدت تحریم‌ها و شاخص وابستگی فناوری اندازه‌گیری شده هستند. اثر مستقیم RII برابر ۰/۱۵-، اثر مستقیم SC برابر ۰/۲۸-، و ضریب جمله تعاملی ($RII \times SC$) برابر ۰/۱۹- است. منفی و معنادار بودن جمله تعاملی نشان

می‌دهد اثر تحریم‌ها بر TDC با افزایش شدت وابستگی به منابع از نظر قدر مطلق تقویت می‌شود؛ نتیجه‌ای که با سازوکار شرطی پیشنهادی در چارچوب DLOCK-S سازگار است. با این حال، از آنجا که TDC برای سنجش وابستگی عمدتاً بر اتکای وارداتی و محدودیت‌های ناشی از تحریم بنا شده است، کاهش TDC در شرایط تحریمی می‌تواند بازتاب فشرده‌گی واردات و جانمایی اجباری باشد، نه الزاماً بهبود توانمندی فناوری داخلی. بنابراین، نتیجه‌ی تعاملی به عنوان شواهدی تفسیر می‌شود که تحریم‌ها رابطه‌ی منابع - فناوری را در بسترهای با RII بالاتر قوی‌تر مشروط می‌کنند، نه اینکه تحریم‌ها عملکرد فناوری را بهبود داده باشند. باید توجه داشت که TDC، وابستگی و شکنندگی تأمین فناوری را عملیاتی می‌کند و به صورت مستقیم سنجش‌های از توانمندی فناوری داخلی نیست؛ بنابراین، تغییرات TDC، به‌ویژه در دوره‌های تشدید تحریم، ممکن است از مسیر کاهش واردات، جایگزینی اجباری یا تغییر ترکیب عرضه رخ دهد و نباید به صورت ساده به معنای بهبود عملکرد فناوری تفسیر شود. این عناصر علیتی قطعی از تحریم به توانمندی فناوری را نشان نمی‌دهند، اما سازگاری مشهودی با مسئله‌ی شرطی‌سازی تحریم‌ها را روشن می‌کند. آزمون‌های تشخیصی کفایت مشخصات مدل را تأیید می‌کنند. آزمون هاسمن^۱ ($p = 0.003$; $\chi^2 = 15/32$) مدل اثرات ثابت را ترجیح می‌دهد. آزمون وولدریج^۲ برای خودهمبستگی ($p > 0.05$; $F = 1/32$) نبود خودهمبستگی سریالی را نشان می‌دهد. آزمون وایت^۳ برای ناهمسانی واریانس ($p < 0.01$; $\chi^2 = 23/45$) وجود ناهمسانی واریانس را پیشنهاد می‌کند، که با استفاده از خطاهای معیار مقاوم کنترل شده است. آزمون جارک-یرا^۴ ($p > 0.05$; $\chi^2 = 2/18$) نرمال بودن باقی‌مانده‌ها را تأیید می‌کند. بررسی‌های حساسیت (مانند حذف داده‌های پرت) فقط تغییرات اندکی در ضرایب ایجاد کرده است ($\beta_3 = -0.18$)؛ $\beta_2 = -0.26$ ؛ $\beta_1 = -0.14$ ؛ که همگی کمتر از ۱۰ درصد با مقادیر پایه تفاوت دارند. این مدل با دقت ۸۵ درصد مقادیر TDC را پیش‌بینی می‌کند و کارایی آن را برای تحلیل پویایی‌های DLOCK-S تقویت می‌سازد.

از منظر درون‌زایی بالقوه، متغیر SC به عنوان یک شوک سیاست خارجی برون‌زا در سطح ملی در نظر گرفته می‌شود که در سطح پروژه انرژی تعیین نمی‌شود. بنابراین، امکان تأثیر معکوس وابستگی فناوری پروژه‌ها بر شدت تحریم‌های بین‌المللی از نظر نظری محدود است. با این حال، مقاله از ادعای علیت قطعی پرهیز کرده و نتایج را به عنوان شواهد سازگار با سازوکار نظری تفسیر می‌کند. در ادبیات تحریم‌ها نیز به طور گسترده‌ای از مشخصات پانلی با شوک‌های سیاست خارجی به عنوان متغیرهای برون‌زا استفاده شده است، مشروط بر آنکه دامنه‌ی تفسیر محدود به همبستگی شرطی باشد. در مشخصات مدل، اثرات ثابت زمانی لحاظ شده‌اند که شوک‌های کلان مشترک شامل نوسانات نرخ ارز، تغییرات قیمت داخلی حامل‌های انرژی، اصلاحات یارانه‌ای و شوک‌های سیاسی داخلی را در سطح سال کنترل می‌کنند. از آنجا که این متغیرها در سطح پروژه تغییرپذیری مقطعی ندارند، اثرات زمانی سالانه بخش عمده تغییرات کلان مشترک را جذب می‌کنند. بنابراین، نگرانی حذف متغیرهای کلان در چارچوب مدل اثرات ثابت تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

۴-۲. آزمون فرضیات

فرضیه اول بیان می‌کند که افزایش شدت وابستگی به منابع، از طریق جمله تعاملی در معادله ۵، اثر تحریم‌ها بر وابستگی فناوری را تقویت می‌کند. ضریب تعاملی برآوردشده ($\beta_3 = -0.19$) از نظر آماری معنادار است ($p < 0.001$). این مسئله نشان می‌دهد اثر نهایی تحریم‌ها بر TDC با افزایش RII از نظر قدر مطلق بزرگ‌تر می‌شود. بر اساس تفسیر جمله تعاملی، با افزایش یک واحدی RII، اثر نهایی تحریم‌ها بر TDC به میزان -0.19 واحد تغییر می‌کند. در سطح میانگین RII برابر با $8/3$ ، اثر نهایی متناظر $-1/86$ به دست می‌آید که با منطق تعاملی مدل سازگار است، و حساسیت بالاتر اقتصادهای با RII بالا نسبت به تحریم‌ها را نشان می‌دهد.

برای نمایش پایداری نتایج در بازه‌های محتمل شاخص، اثرات نهایی در سه سطح RII ($5/0$ ، $8/3$ و $10/0$) محاسبه شد که مقادیر متناظر $-1/23$ ، $-1/86$ و $-2/18$ را نشان می‌دهد. این الگوی یکنواخت افزایشی در مقدار مطلق، تأیید می‌کند که با

1. Hausman test
2. Wooldridge test
3. White test
4. Jarque-Bera test

افزایش شدت وابستگی به منابع، تحریم‌ها با تغییرات شدیدتری در شاخص وابستگی فناورانه اندازه‌گیری شده همراه می‌شوند. در مجموع، این نتایج با معنادار بودن جمله تعاملی، فرضیه اول را تأیید می‌کند و سازوکار تعاملی تحریم و شدت وابستگی به منابع را در شکل‌دهی به وابستگی فناورانه نشان می‌دهد.

فرضیه‌های دوم و سوم با تکیه بر تحلیل شبکه نهادی و مشخصات رگرسیونی، پویایی‌های نهادی و سرمایه‌گذاری را بررسی می‌کنند. در فرضیه دوم، نتایج نشان می‌دهد افزایش مرکزیت نهادی با کاهش اثربخشی سیاست‌های نوآوری همراه است، که با ریسک گلوگاه و سخت‌شدگی هماهنگی در ساختارهای بسیار متمرکز سازگار است. در شبکه نهادی، شرکت ملی نفت ایران دارای مرکزیت بالا (۰/۹۲) است. با استفاده از مشخصات اثر مرکزیت در معادله ۶ و ضریب اثر برآوردشده ۰/۳۳- کاهش مشاهده شده ۳۰/۴ درصد در اثربخشی نوآوری به دست می‌آید. همچنین همبستگی‌های شبکه‌ای نشان‌دهنده رابطه معکوس قوی میان مرکزیت نهادی و اثربخشی نوآوری است ($\rho = 0/78$) و نهادهایی با مرکزیت بالاتر از ۰/۷۰ حدود ۳۳ درصد، نرخ موفقیت پایین‌تر در پروژه‌های نوآوری دارند، که با سازوکار «سخت‌شدگی هماهنگی» هم‌راستا است.

در فرضیه سوم، مشخصات سرمایه‌گذاری - آسیب‌پذیری در معادله ۷ نشان می‌دهد افزایش سرمایه‌گذاری در فناوری‌های ترکیبی با کاهش آسیب‌پذیری نسبت به تحریم‌ها همراه است. ضریب سرمایه‌گذاری برآوردشده ($\tau = -0/68$) از نظر آماری معنادار است ($p < 0/01$)، و بیان می‌کند افزایش ۱۰ درصد سرمایه‌گذاری در فناوری‌های ترکیبی با کاهش تقریبی ۶/۸ درصد در آسیب‌پذیری مرتبط است. نتایج سناریویی ارائه شده در نمودار جریان نیز با این برآورد سازگار است و نشان می‌دهد، که افزایش سرمایه‌گذاری ترکیبی از طریق بهبود انعطاف عرضه، کاهش مواجهه با محدودیت‌های تجهیزات وارداتی و تقویت یادگیری داخلی، به کاهش آسیب‌پذیری کمک می‌کند. جدول ۴ خلاصه نتایج آزمون فرضیه‌ها را ارائه می‌دهد.

جدول ۴. خلاصه آزمون فرضیات

فرضیه	پیش‌بینی	نتیجه تجربی	وضعیت
اول	عبارت تعاملی $SC \times RII$ از نظر آماری معنادار است، که نشان می‌دهد اثر نهایی تحریم‌ها بر TDC با شدت منابع تغییر می‌کند.	اثر حاشیه‌ای $-1/86$ در $8/3 = RII$	تأیید
دوم	مرکزیت نهادی بالاتر با اثربخشی پایین‌تر سیاست نوآوری (تنگناهای هماهنگی در شرایط تمرکز بالا) مرتبط است.	کاهش ۳۳٪ در اثر نوآوری	تأیید نسبی
سوم	سرمایه‌گذاری بیشتر در فناوری‌های هیبریدی با آسیب‌پذیری کمتر در شرایط تحریم مرتبط است.	کاهش ۶/۸٪ آسیب‌پذیری	تأیید

عبارت تأیید نسبی در جدول ۴، یعنی جهت و معناداری رابطه با فرضیه سازگار است، اما اندازه اثر با معیار از پیش تعیین شده کاملاً منطبق نیست. برای تجمیع و اطمینان‌بخشی به یافته‌ها، آزمون‌های حساسیت و بررسی عدم قطعیت برای هر فرضیه انجام شد. در فرضیه اول، برآورد جمله تعاملی ($\beta_3 = -0/19$) پایدار باقی می‌ماند؛ بازه اطمینان ۹۵ درصد از ثبات آماری پشتیبانی می‌کند و محاسبات اثر نهایی در سطوح متفاوت RII نتایج سازگاری را نشان می‌دهد. در فرضیه دوم، مرکزیت با دقت گزارش شده تلورانس ۰/۰۵ اندازه‌گیری شده و کاهش برآوردشده در اثربخشی نوآوری در بازه اطمینان ۹۵ درصد قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده ارتباط منفی معنادار و نسبتاً پایدار میان مرکزیت نهادی بالا و عملکرد سیاست‌های نوآوری است. در فرضیه سوم، مدل آسیب‌پذیری توان تبیین مناسبی دارد ($R^2 = 0/72$) و کاهش آسیب‌پذیری متناظر با افزایش سرمایه‌گذاری ترکیبی در بازه اطمینان ۹۵ درصد قرار می‌گیرد که استحکام رابطه سرمایه‌گذاری - آسیب‌پذیری را تأیید می‌کند. این بررسی‌های عدم قطعیت، الگوهای تجربی گزارش شده را تقویت می‌کنند. تفسیرهای سناریو محور نشان می‌دهد کاهش تمرکز نهادی (برای نمونه، کاهش مرکزیت گره غالب از ۰/۹۲ به سمت ۰/۷۰)، افزایش سهم بودجه اختصاص یافته به فناوری‌های ترکیبی و بهبود ظرفیت هماهنگی می‌تواند به طور مشترک آسیب‌پذیری اندازه‌گیری شده را کاهش دهد؛ با این حال، اندازه اثرات ترکیبی به مفروضات سناریو وابسته است و باید به عنوان نتایج تقریبی و نه قطعی تفسیر شود.

۵. نتیجه‌گیری

چارچوب DLOCK-S با یکپارچه‌سازی سه مؤلفه «مواجهه منابع»، «وابستگی فناورانه» و «ساختار شبکه نهادی»، محدودیت‌های سیاست انرژی در ایران را در شرایط تحریم به صورت چندبعدی ارزیابی می‌کند. نتایج کلی نشان‌دهنده سطح بالای آسیب‌پذیری ساختاری و هم‌زمانی چند قید پایدار است؛ به نحوی که تحریم‌ها نه به عنوان یک عامل بیرونی منفرد، بلکه به عنوان مکانیزمی شرطی‌ساز عمل کرده و تعامل میان قفل‌های منابعی، فناورانه و نهادی را تقویت می‌کنند. بر این اساس، سیاست انرژی در چنین بستری بیش از آنکه حاصل انتخاب‌های اختیاری باشد، تحت تأثیر محدودیت‌های متقابل و خودتقویت‌شونده قرار می‌گیرد که امکان تعدیل سریع مسیر را کاهش می‌دهند. از منظر مواجهه منابعی، شاخص شدت وابستگی به منابع (RII) برابر $\frac{8}{3}$ از 10 به دست آمده است که وابستگی بالا به درآمدهای هیدروکربنی و آسیب‌پذیری مالی ناشی از نوسانات درآمدی و محدودیت‌های صادراتی را نشان می‌دهد. این مقدار با واقعیت‌های ساختاری اقتصاد انرژی ایران سازگار است؛ از جمله وابستگی 42 درصد بودجه دولت به نفت و همچنین ضریب تحریم نرمال شده ($SC = 0/85$) که بازتاب‌دهنده فشار بالای محدودیت‌های خارجی در سه بعد فناورانه، مالی و سرمایه‌گذاری است. به طور ضمنی، این نتایج نشان می‌دهد هرگونه سیاست‌گذاری در حوزه گذار انرژی یا اصلاحات ساختاری، در صورت بی‌توجهی به وابستگی مالی - فسیلی، با ریسک بازتولید قفل‌های منابعی و ناپایداری اجرایی مواجه خواهد شد. در بُعد فناوری، ضریب وابستگی فناورانه (TDC) به طور میانگین $0/87$ (در مقیاس 0 تا 1) گزارش شده است که نشان‌دهنده اتکای بالای بخش انرژی به تجهیزات، کالاهای سرمایه‌ای و خدمات فنی وارداتی است. این مقدار با نشانه‌های تجربی مانند اتکای حدود 80 درصد به تجهیزات وارداتی و ظرفیت جذب داخلی محدود برابر با $0/4$ ، سازگار است و از وجود شکاف پایدار میان نیازهای فناورانه پروژه‌ها و توان داخلی برای تأمین و بومی‌سازی فناوری حکایت دارد. در چنین شرایطی، حتی سیاست‌های توسعه تجدیدپذیر یا بهینه‌سازی مصرف نیز می‌توانند به دلیل محدودیت تأمین تجهیزات و زیرساخت‌های پشتیبان، با کندی اجرا و افزایش هزینه‌های مبادله مواجه شوند؛ بنابراین وابستگی فناورانه نه فقط یک مسئله تکنیکی، بلکه یک قید سیاستی با پیامدهای مستقیم برای تاب‌آوری عرضه و هزینه‌های اقتصادی است. در بُعد نهادی، تحلیل شبکه حکمرانی انرژی ضعف هماهنگی و ریسک گلوگاه تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. چگالی شبکه برابر با $0/23$ بیانگر سطح پایین پیوندهای هماهنگی و جریان اطلاعات میان نهادهای اصلی است و تمرکز شبکه نیز قابل توجه است؛ به طوری که شرکت ملی نفت ایران دارای مرکزیت بالا، برابر با $0/92$ ، گزارش شده است. این الگوی شبکه‌ای به صورت تجربی نشان می‌دهد قدرت تصمیم‌گیری و منابع اطلاعاتی در چند گره محدود متمرکز می‌شود و چنین تمرکزی می‌تواند ضمن کاهش چابکی سیاستی، احتمال تضاد منافع، تعارض نهادی و تاخیر در اجرای سیاست‌های نوآوری یا گذار انرژی را افزایش دهد. از این منظر، محدودیت نهادی نه تنها بر «امکان اتخاذ سیاست»، بلکه بر «توان اجرای سیاست» اثرگذار است.

نتایج رگرسیون تابلویی نشان می‌دهد شدت تحریم‌ها با تغییر در شاخص وابستگی فناورانه اندازه‌گیری شده ارتباط قوی دارد و این رابطه از طریق جمله تعاملی به شدت وابستگی منابعی مشروط می‌شود. به بیان دقیق‌تر، منفی و معنادار بودن جمله تعاملی نشان می‌دهد در محیط‌هایی با شدت وابستگی منابعی بالاتر، اثر تحریم‌ها بر شاخص TDC از نظر قدر مطلق قوی‌تر می‌شود؛ یعنی تحریم‌ها در زمینه‌های منابع‌محور، رابطه منابع - فناوری را با شدت بیشتری «شرطی» می‌کنند. با این حال، تفسیر علامت ضرایب نیازمند توجه جدی به نحوه سنجش TDC است؛ چون TDC بر اتکای وارداتی و مؤلفه‌های محدودیت فناورانه بنا شده است، کاهش TDC در دوره‌های تشدید تحریم می‌تواند ناشی از فشردگی واردات و جانشینی اجباری باشد و نه الزاماً بهبود توانمندی فناورانه داخلی. بر این اساس، نتایج اقتصادسنجی باید به عنوان شواهد سازگار با سازوکار نظری قفل‌شدگی دوگانه تفسیر شود و از تفسیرهای ساده‌انگارانه مانند «بهبود فناوری تحت تحریم» پرهیز شود. آزمون فرضیه‌ها سه الگوی اصلی را تأیید می‌کند: (۱) رابطه تحریم - فناوری از نظر شدت اثر در سطوح بالاتر RII قوی‌تر می‌شود و این امر با منطبق وابستگی مالی - فسیلی و شکنندگی تأمین فناوری در شرایط تحریم هم‌راستا است؛ (۲) مرکزیت نهادی بالاتر با کاهش اثربخشی سیاست‌های نوآوری همراه است، که با سازوکار «گلوگاه هماهنگی» و محدودیت جریان اطلاعات در شبکه‌های متمرکز سازگار است؛ و (۳) افزایش سرمایه‌گذاری در فناوری‌های ترکیبی با کاهش آسیب‌پذیری تحت تحریم همراه است، زیرا چنین سرمایه‌گذاری‌هایی

انعطاف عرضه را افزایش می‌دهد و امکان یادگیری و جانشینی فناورانه را تقویت می‌کند. در مجموع، این یافته‌ها با پویایی «قفل‌شدگی دوگانه» سازگار است؛ به گونه‌ای که وابستگی مالی - فسیلی و سخت‌شدگی فناورانه - نهادی به صورت هم‌زمان ظرفیت سازگاری، تنوع‌بخشی و تغییر مسیر سیاست انرژی را در شرایط فشار خارجی محدود می‌کنند.

البته محدودیت‌هایی نیز انجام مطالعه را تحت تأثیر قرار داده‌اند. نخست آنکه، تحلیل تجربی بر داده‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ متکی است و هرگونه تغییر در رژیم تحریم‌ها، ساختار بازار انرژی یا سیاست‌های داخلی پس از این دوره می‌تواند پایداری روابط مشاهده‌شده را تحت تأثیر قرار دهد. دوم، تحلیل نهادی ممکن است به دلیل دسترسی محدود به داده‌های داخلی هماهنگی، تعاملات غیررسمی و کانال‌های غیررسمی تصمیم‌گیری با درجه‌ای از سوگیری مواجه باشد. سوم، مدل‌ها بر مفروضات ساخت‌یافته و متغیرهای قابل مشاهده تکیه دارند و نمی‌توانند تمامی شوک‌های ژئوپلیتیکی مشاهده‌نشده یا تغییرات ناگهانی در محیط تصمیم‌گیری را به طور کامل وارد کنند. در نهایت، هرچند چارچوب DLOCK-S از نظر مفهومی قابلیت انتقال دارد، کاربرد آن در سایر کشورها نیازمند کالیبراسیون مجدد شاخص‌ها، نگاهت نهادی متناسب با ساختار حکمرانی محلی و سنجش متناسب شدت محدودیت‌های خارجی است. همچنین، به دلیل محدودیت ابزارهای برون‌زا و نبود داده‌های قابل اتکا برای ابزارگذاری شدت تحریم‌ها، امکان استفاده از IV، و GMM فراهم نبود و به همین دلیل، نتایج باید در چارچوب هم‌بستگی شرطی و سازگاری با سازوکار نظری تفسیر شود. با وجود کنترل اثرات زمانی، امکان آن وجود دارد که برخی شوک‌های کلان با شدت‌های ناهمگن بر پروژه‌ها اثر گذاشته باشند که به طور کامل در چارچوب مدل جذب نشده باشند؛ از این رو نتایج باید با ملاحظه این محدودیت تفسیر شوند. مطالعات آینده می‌توانند چارچوب DLOCK-S را در سه مسیر توسعه دهند: (۱) کاربرد تطبیقی در سایر اقتصادهای وابسته به هیدروکربن برای تقویت اعتبار بیرونی و امکان مقایسه نتایج؛ (۲) توسعه شاخص‌های پربسامد و نزدیک به زمان واقعی برای رصد پویای تحریم‌ها و اثرات آن‌ها بر فناوری و سرمایه‌گذاری؛ و (۳) ادغام ابزارهای محاسباتی، شبیه‌سازی سناریویی یا روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارزیابی تاب‌آوری سیاست‌ها تحت عدم قطعیت و شوک‌های چندگانه. از منظر ارزیابی سیاستی، نتایج سه اهرم عملی را برجسته می‌کنند: کاهش مواجهه مالی با هیدروکربن‌ها (برای شکستن قفل منابعی)، تقویت ظرفیت جذب و بومی‌سازی فناوری (برای کاهش شکنندگی فناورانه)، و بهبود هماهنگی نهادی و کاهش گلوگاه‌ها (برای افزایش اثربخشی اجرا). با این حال، میزان اثرگذاری این اهرم‌ها به طراحی دقیق ابزارها، کیفیت اجرا و نیز مفروضات سناریویی وابسته است؛ بنابراین سیاست‌گذاری اثربخش باید به‌جای اتکا به یک ابزار منفرد، بر بسته‌های سیاستی مکمل و مرحله‌بندی‌شده تمرکز کند.

منابع

- [1] M. Alipour, "Petroleum systems of the Iranian Zagros Fold and Thrust Belt," *Results in Earth Sciences*, vol. 2, p. 100027, 2024/12/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rines.2024.100027>.
- [2] R. Hafezi, D. A. Wood, A. N. Akhavan, and S. Pakseresht, "Iran in the emerging global natural gas market: A scenario-based competitive analysis and policy assessment," *Resources Policy*, vol. 68, p. 101790, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101790>.
- [3] H. Raei, A. Maleki, and Z. Farajzadeh, "Analysis of energy policy reform in Iran: Energy and emission intensity changes," *Economic Analysis and Policy*, vol. 81, pp. 1535-1557, 2024/03/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eap.2024.02.023>.
- [4] A. Taiebnia and S. Barkhordari, "The dismantling of reform policies in the Iranian energy sector," *Energy Policy*, vol. 161, p. 112749, 2022/02/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112749>.
- [5] S. Solaymani, "A Review on Energy and Renewable Energy Policies in Iran," *Sustainability*, vol. 13, no. 13, doi: 10.3390/su13137328.
- [6] H. Dehghan, N. Nahavandi, S. K. Chaharsooghi, J. Zarei, and M. R. Amin-Naseri, "A hybrid game theory and system dynamics model to determine optimal electricity generation mix," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 166, p. 107990, 2022/10/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107990>.
- [7] S. M. Hosseini, A. Aslani, and A. Kasaeian, "Energy, water, and environmental impacts assessment of electricity generation in Iran," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102193, 2022/08/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102193>.
- [8] G. Farshchian, S. A. Darestani, and N. Hamidi, "Developing a decision-making dashboard for power losses attributes of Iran's electricity distribution network," *Energy*, vol. 216, p. 119248, 2021/02/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119248>.
- [9] R. Zahedi, E. Sadeghitabar, M. Khazaei, R. Faryadras, and A. Ahmadi, "Potentiometry of wind, solar and geothermal energy resources and their future perspectives in Iran," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 27, no. 7, pp. 15311-15337, 2025/07/01 2025, doi: 10.1007/s10668-024-04633-2.
- [10] M.-B. Jamali, M. Rasti-Barzoki, H. Khosroshahi, and J. Altmann, "An evolutionary game-theoretic approach to study the technological transformation of the industrial sector toward renewable electricity procurement: A case study of Iran," *Applied Energy*, vol. 318, p. 119083, 2022/07/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.119083>.
- [11] M. Makkiabadi *et al.*, "Performance Evaluation of Solar Power Plants: A Review and a Case Study," *Processes*, vol. 9, no. 12, doi: 10.3390/pr9122253.
- [12] M. Mahdavi, K. Schmitt, R. A. V. Ramos, and H. H. Alhelou, "Role of hydrocarbons and renewable energies in Iran's energy matrix focusing on bioenergy: review," *IET Renewable Power Generation*, vol. 16, no. 15, pp. 3384-3405, 2022/11/01 2022, doi: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12540>.
- [13] S. Dehghani *et al.*, "Five-Year Development Plans of Renewable Energy Policies in Iran: A Content Analysis," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, doi: 10.3390/su14031501.
- [14] R. Hajimineh, Rezaei Rad, E., "The future of renewable energy in Iran's energy policy," *Future Energy*, vol. 03, no. 03, pp. 01-13, 2024, doi: 10.55670/fppl.fuen.3.3.1.
- [15] A. M. Abed, M. Alhuyi Nazari, M. H. Ahmadi, A. Mukhtar, R. Kumar, and N. Gharib, "Power generation by utilization of different renewable energy sources in five Middle Eastern countries: Present status, opportunities and challenges," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 73, p. 104101, 2025/01/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104101>.
- [16] K. Fartash and A. Ghorbani, "Under domination of oil and gas: future scenarios of renewable energy development in Iran," *Foresight*, vol. 25, no. 3, pp. 367-383, 2022, doi: 10.1108/FS-08-2021-0157.
- [17] A. A. Barati, M. D. Pour, and M. A. Sardoei, "Water crisis in Iran: A system dynamics approach on water, energy, food, land and climate (WEFLC) nexus ", *Science of The Total Environment*, vol. 882, p. 163549, 2023/07/15/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163549>.

- [18] R. Hafezi *et al.*, "Iran's approach to energy policy towards 2040: a participatory scenario method," *Foresight*, vol. 25, no. 5, pp. 649-665, 2023, doi: 10.1108/FS-11-2021-0228.
- [19] A. Behzadi Forough, N. Norouzi, and M. Fani, "More Secure Iranian Energy System: A Markal Based Energy Security Model for Iranian Energy Demand-side," (in en), *Iranica Journal of Energy & Environment*, vol. 12, no. 2, pp. 100-108, 2021, doi: 10.5829/ijee.2021.12.02.01.
- [20] M. Alssadek and J. Benhin, "Natural resource curse: A literature survey and comparative assessment of regional groupings of oil-rich countries," *Resources Policy*, vol. 84, p. 103741, 2023/07/01 /2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103741>.
- [21] T. Muhammad, G. Ni, Z. Chen, S. Mallek, M. Dudek, and G. Mentel, "Addressing resource curse: How mineral resources influence industrial structure dynamics of the BRI 57 oil-exporting countries," *Resources Policy*, vol. 99, p. 105420, 2024/12/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105420>.
- [22] M. Nejati and M. Bahmani, "The economic impacts of foreign direct investment in oil and gas sector: A CGE analysis for iranian economy," *Energy Strategy Reviews*, vol. 32, p. 100579, 2020/11/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100579>.
- [23] M. Alssadek and J. Benhin, "Oil boom, exchange rate and sectoral output: An empirical analysis of Dutch disease in oil-rich countries," *Resources Policy*, vol. 74, p. 102362, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102362>.
- [24] G. Trencher, A. Rinscheid, M. Duygan, N. Truong, and J. Asuka, "Revisiting carbon lock-in in energy systems: Explaining the perpetuation of coal power in Japan," *Energy Research & Social Science*, vol. 69, p. 101770, 2020/11/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101770>.
- [25] J. E. Goldstein, B. Neimark, B. Garvey, and J. Phelps, "Unlocking "lock-in" and path dependency: A review across disciplines and socio-environmental contexts," *World Development*, vol. 161, p. 106116, 2023/01/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.106116>.
- [26] J. Hadden, "Why Are Fossil Fuels So Entrenched?," *Global Environmental Politics*, vol. 20, no. 2, pp. 157-161, 2020, doi: 10.1162/glep_a_00550.
- [27] Z. Wu, Q. Shao, Y. Su, and D. Zhang, "A socio-technical transition path for new energy vehicles in China: A multi-level perspective," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 172, p. 121007, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121007>.
- [28] J. Wen, S. Wang, S. Yang, and X. Chen, "International Sanctions and Innovation : Empirical Evidence from China's A-Share Listed Companies," *Emerging Markets Finance and Trade*, vol. 60, no. 2, pp. 263-281, 2024/01/26 2024, doi: 10.1080/1540496X.2023.2218519.
- [29] F. Chang, "Strategizing in a turbulent world: Analyzing the effects of international sanctions and policy shifts on corporate innovation," *Finance Research Letters*, vol. 67, p. 105765, 2024/09/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.105765>.
- [30] S. Griffiths, B. Sovacool, M. Iskandarova, and H. J. Walnum, "Bridging the gap between defossilization and decarbonization to achieve net-zero industry," *Environmental Research Letters*, vol. 20, 2025-01-27 2025, doi: 10.1088/1748-9326/adaed6.
- [31] S. Levi, C. Flachsland, and M. Jakob, "Political Economy Determinants of Carbon Pricing," *Global Environmental Politics*, vol. 20, no. 2, pp. 128-156, 2020, doi: 10.1162/glep_a_00549.
- [32] S. Zhang and P. Andrews-Speed, "State versus market in China's low-carbon energy transition: An institutional perspective," *Energy Research & Social Science*, vol. 66, p. 101503, 2020/08/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101503>.
- [33] M. Grubb, A. Poncia, P. Drummond, K. Neuhoff, and J.-C. Hourcade, "Policy complementarity and the paradox of carbon pricing," *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 39, no. 4, pp. 711-730, 2023, doi: 10.1093/oxrep/grad045.
- [34] R. E. Kim, "Is Global Governance Fragmented, Polycentric, or Complex? The State of the Art of the Network Approach," *International Studies Review*, vol. 22, no. 4, pp. 903-931, 2020, doi: 10.1093/isr/viz052.
- [35] J. Hedlund, F. Metz, and Ö. Bodin, "Networking strategies for coordinating interdependent policy issues: A motif approach," *Policy Studies Journal*, vol. n/a, no. n/a, 2025/01/23 2025, doi: <https://doi.org/10.1111/psj.12588>.
- [36] S. Narayanamoorthy, L. Ramya, S. Kalaiselvan, J. V. Kureethara, and D. Kang, "Use of DEMATEL and COPRAS method to select best alternative fuel for control of impact of

- greenhouse gas emissions," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 76, p. 100996, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100996>.
- [37] Y. Zhai, W. He, X. Zhao, and Y. Shi, "Does economic sanctions bring risks to technological innovation in China?," *Economic Analysis and Policy*, vol. 86, pp. 812-825, 2025/06/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eap.2025.03.047>.
- [38] P. Han, W. Jiang, and D. Mei, "Mapping U.S.–China Technology Decoupling: Policies, Innovation, and Firm Performance," *Management Science*, vol. 70, no. 12, pp. 8386-8413, 2024/12/01 2024, doi: 10.1287/mnsc.2022.02057.
- [39] S. Ye, H. Zhang, M. Zhou, and T. Zheng, "Assessing energy sector resilience to adverse shocks: A scenario-based QVAR approach," *Energy Economics*, vol. 149, p. 108733, 2025/09/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108733>.
- [40] R. Schmitz, F. Flachsbarth, L. S. Plaga, M. Braun, and P. Härtel, "Energy security and resilience: Revisiting concepts and advancing planning perspectives for transforming integrated energy systems," *Energy Policy*, vol. 207, p. 114796, 2025/12/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114796>.
- [41] S. M. Wyse, J. Iveniuk, J. Young, E. McGarry Ware, and D. Sparks, "Collaborative governance in "community energy planning": insights from an intersectoral governance network in Durham Region, Canada," *Local Environment*, vol. 30, no. 8, pp. 1036-1055, 2025/08/03 2025, doi: 10.1080/13549839.2025.2450486.
- [42] M. Manioudis and G. Meramveliotakis, "Broad strokes towards a grand theory in the analysis of sustainable development: a return to the classical political economy," *New Political Economy*, vol. 27, no. 5, pp. 866-878, 2022/09/03 2022, doi: 10.1080/13563467.2022.2038114.
- [43] Z. Cheng, L. Li, and J. Liu, "Natural resource abundance, resource industry dependence and economic green growth in China," *Resources Policy*, vol. 68, p. 101734, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101734>.
- [44] L. Hooghe and G. Marks, "A postfunctionalist theory of multilevel governance," *The British Journal of Politics and International Relations*, vol. 22, no. 4, pp. 820-826, 2020/11/01 2020, doi: 10.1177/1369148120935303.
- [45] K. van Assche, V. Valentinov, and G. Verschaegen, "Adaptive governance: learning from what organizations do and managing the role they play," *Kybernetes*, vol. 51, no. 5, pp. 1738-1758, 2021, doi: 10.1108/K-11-2020-0759.
- [46] M. Aien and O. Mahdavi, "On the Way of Policy Making to Reduce the Reliance of Fossil Fuels: Case Study of Iran," *Sustainability*, vol. 12, no. 24, doi: 10.3390/su122410606.
- [47] H. Sadeghi *et al.*, "Design an integrated strategic resource planning to analyze the development of renewable energy sources," *Energy Strategy Reviews*, vol. 53, p. 101427, 2024/05/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101427>.
- [48] M. Sayadi and M. Khoshkalam Khosroshahi, "Assessing Alternative Investment Policies in a Resource-Rich Capital-Scarce Country: Results from a DSGE analysis for Iran," *Energy Policy*, vol. 146, p. 111813, 2020/11/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111813>.
- [49] P. Rahbarinejad, S. R. Sobhani, N. Sangsefidi, K. Irankhah, and M. Mohamadinarab, "Exploring the association between socio-economic and environmental factors and food consumption in Iran: insights from time series data," *BMC Public Health*, vol. 25, no. 1, p. 2289, 2025/07/02 2025, doi: 10.1186/s12889-025-23437-1.
- [50] Y. Xu, T. Liu, Q. Fang, P. Du, and J. Wang, "Crude oil price forecasting with multivariate selection, machine learning, and a nonlinear combination strategy," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 139, p. 109510, 2025/01/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109510>.
- [51] "Iran GDP | Historical Chart & Data," *Macrotrends.net*, 2023. [Online]. Available: <https://www.macrotrends.net/global-metrics/countries/irn/iran/gdp-gross-domestic-product>.
- [52] "Brent crude oil price annually 1976-2025 | Statista," *Statista*, 2025. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/262860/uk-brent-crude-oil-price-changes-since-1976/>.
- [53] "bp Statistical Review of World Energy 2022 | 71st Edition," 2022. [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>