

Development and Validation of a Causal Model for Assessing Energy Imbalance in Iran's Gas Industry

Reza Abdolalizadeh¹, Morteza Mahmoudzadeh^{1*}, Mir Hossein Seyyedi¹, Reza Rostamzadeh²

1. Department of Management, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2. Department of Management, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran

* Corresponding author email address: m.mahmoudzadeh@iau.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Original Research

How to cite this article:

Abdolalizadeh, R., Mahmoudzadeh, M., Seyyedi, M. H., & Rostamzadeh, R. (2026). Development and Validation of a Causal Model for Assessing Energy Imbalance in Iran's Gas Industry. *Decision Science and Intelligent Systems*. 3(1), 1-27.



© 2026 the authors. Published by KMAN Publication Inc. (KMANPUB), Ontario, Canada. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

This study aimed to identify and explain the factors influencing the severity of the gas imbalance, examine its consequences, and develop an integrated causal model. In terms of purpose, the study was applied, and methodologically, it employed an exploratory sequential mixed-methods design. Participants in the qualitative phase consisted of experts, managers, and specialists knowledgeable about issues related to the gas and energy industries. Data were collected through semi-structured interviews until theoretical saturation was reached and were subsequently analyzed. The statistical population of the quantitative phase comprised individuals with relevant knowledge and experience in the gas and energy sectors. Data from 300 respondents were examined using a researcher-developed 40-item questionnaire. Quantitative data were analyzed using SPSS and SmartPLS software and partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). The qualitative findings indicated that the gas imbalance is a multidimensional and systemic phenomenon. Its determinants were classified into six principal dimensions: demand pressure and consumption patterns; the quality of energy policymaking and governance; infrastructure capacity and reliability; demand-side management, technology, and efficiency; climatic and environmental pressures; and temporal and feedback complexities. The severity of the gas imbalance was also identified as the central construct, while its economic, industrial, social, environmental, and security consequences were identified as the model's ultimate outcomes. The quantitative results confirmed the satisfactory reliability and validity of the measurement model and demonstrated that all seven research hypotheses were statistically significant. Demand pressure and consumption patterns, with a path coefficient of 0.291; temporal and feedback complexities, with a coefficient of 0.267; and climatic and environmental pressures, with a coefficient of 0.160, had positive and significant effects on the severity of the gas imbalance. Conversely, infrastructure capacity and reliability, with a coefficient of -0.256; the quality of energy policymaking and governance, with a coefficient of -0.201; and demand-side management, technology, and efficiency, with a coefficient of -0.147, had negative and significant effects on the severity of the imbalance. Furthermore, the severity of the gas imbalance had a strong positive effect on its consequences, with a path coefficient of 0.712. Collectively, the six predictor variables explained 62.9% of the variance in the severity of the gas imbalance, while the severity of the imbalance explained 50.6% of the variance in its consequences. The predictive relevance index values for the severity of the imbalance and its consequences were 0.408 and 0.316, respectively, and the model's overall fit was assessed as acceptable and relatively satisfactory. Overall, the findings demonstrated that the gas imbalance is not attributable to a single factor and that its sustainable reduction requires simultaneous interventions in demand management, infrastructure development and modernization, governance reform, improvements in efficiency and technology, and the management of climatic impacts and time delays.

Keywords: gas imbalance, consumption patterns, energy governance, gas infrastructure, energy efficiency, temporal dynamics, structural equation modeling.

Extended Abstract

Introduction

Natural gas is a strategic energy carrier that supports economic growth, industrial production, household welfare, electricity generation, and the overall stability of national energy systems. Iran's energy structure is particularly dependent on natural gas, which supplies a substantial proportion of the energy consumed by households, power plants, commercial users, and energy-intensive industries. Despite the country's extensive natural gas reserves, the widening gap between available supply and actual demand, especially during periods of peak winter consumption, has transformed the gas imbalance into a major managerial, economic, and energy-security challenge. In this context, a gas imbalance refers to a condition in which production, transmission, distribution, and storage capacities cannot reliably meet the level and temporal pattern of demand.

The gas imbalance should not be interpreted merely as an absolute shortage of natural gas. It is a multidimensional and dynamic phenomenon resulting from interactions among technical, economic, institutional, climatic, behavioral, and temporal factors. Iran's natural gas demand is influenced by nonlinear changes in household consumption, industrial activity, climatic conditions, energy prices, and production structures (Kani et al., 2013). Seasonal demand fluctuations, particularly the sharp increase in household heating demand during cold periods, place considerable pressure on production and transmission networks. At the same time, insufficient underground storage capacity, aging facilities, declining production in some gas fields, and delays in infrastructure development restrict the system's ability to respond flexibly to sudden changes in demand.

Demand-side conditions also contribute substantially to the persistence of the imbalance. Low subsidized prices, limited consumer responsiveness to price signals, inadequate thermal efficiency in buildings, inefficient industrial equipment, and insufficient public awareness reduce incentives for energy conservation. Therefore, price reform alone is unlikely to establish a sustainable balance unless it is accompanied by improvements in energy efficiency, technological modernization, targeted incentives, effective consumer education, and enforceable efficiency standards. Technological tools, including smart metering, real-time monitoring, data analytics, and supervisory control and data acquisition systems, can improve demand forecasting, identify network losses, and facilitate more responsive management of gas distribution systems (Mohammadpoor & Torabi, 2018; Shafiq et al., 2018; Upadhyay & Sampalli, 2020).

The consequences of the gas imbalance extend beyond temporary supply restrictions. Gas curtailment can disrupt the activities of steel, cement, petrochemical, and other energy-intensive industries, reduce industrial output, and weaken national value creation. When power plants replace natural gas with more polluting fuels, the imbalance also generates environmental and public-health costs. Moreover, recurring pressure reductions, industrial supply interruptions, increased operating costs, declining public satisfaction, and potential dependence on imports can undermine national energy security. Consequently, gas imbalance management requires a coordinated approach that considers demand, supply, infrastructure, governance, technology, and environmental uncertainty simultaneously.

A systemic perspective is especially important because energy imbalances develop through feedback loops and time delays. Decisions regarding investment, pricing, infrastructure construction, energy-efficiency programs, and consumer education may require months or years to influence system performance. A delayed policy response can consequently allow the initial supply–demand gap to

accumulate and intensify. System dynamics theory explains such outcomes through interactions among stocks, flows, feedback loops, investment decisions, production capacity, and demand behavior (Sterman, 2000). Recent energy research similarly demonstrates the value of system dynamics for modeling gas balances and assessing the long-term implications of alternative policies (Yang et al., 2025). Structural equation modeling can complement this perspective by empirically estimating relationships among latent technical, institutional, environmental, and behavioral constructs (Gao et al., 2025).

Previous studies have often examined individual dimensions of gas consumption, pricing, infrastructure, efficiency, or energy governance separately. Such fragmented analyses provide limited insight into the mechanisms through which these factors jointly intensify or mitigate the imbalance. An integrated, empirically testable model is therefore needed to identify the principal determinants of the gas imbalance, estimate the direction and magnitude of their effects, and explain how the severity of the imbalance generates broader consequences. Accordingly, this study aimed to develop and validate a causal model for assessing energy imbalance in Iran's gas industry by integrating qualitative evidence from experts with quantitative analysis based on partial least squares structural equation modeling.

Methods and Materials

This applied-developmental study employed an exploratory sequential mixed-methods design. The investigation was conducted in two interconnected phases. The qualitative phase identified the principal concepts, dimensions, and causal relationships associated with the gas imbalance. The quantitative phase subsequently operationalized these qualitative findings and tested the proposed relationships empirically.

The qualitative participants consisted of managers and specialists from the gas industry, experts affiliated with the Ministry of Petroleum, university academics specializing in energy economics and policy, and researchers experienced in energy efficiency and demand-side management. Eligibility required at least five years of relevant professional or managerial experience, an appropriate scientific background, participation in energy-efficiency projects, or experience in energy-related policymaking and research. Participants were recruited through purposive and snowball sampling. Semi-structured interviews continued until theoretical saturation was achieved. Saturation became apparent after the fourteenth interview and was confirmed through two additional interviews, resulting in a final qualitative sample of 16 participants.

The interviews examined the technical and economic causes of the imbalance, pricing and subsidy policies, production and storage capacity, transmission infrastructure, energy efficiency, emerging technologies, consumer behavior, climatic conditions, institutional barriers, time delays, feedback mechanisms, and consequences of prolonged imbalance. Interviews were recorded with informed consent, transcribed verbatim, and analyzed through thematic analysis using MAXQDA. Meaning units were coded, conceptually similar codes were merged, and the resulting categories were organized into subthemes and main themes. Member checking, peer review of codes, documentation of analytical decisions, and the use of direct interview evidence were employed to strengthen the credibility, dependability, and confirmability of the qualitative findings.

The quantitative population included managers, professionals, and technical experts working in the National Iranian Gas Company, organizations affiliated with the Ministry of Petroleum, fuel-consumption optimization organizations, power plants, gas-intensive industries, and energy research centers. Stratified random sampling was used to ensure the representation of managerial, industrial,

power-generation, commercial, operational, and technical groups. Data from 300 respondents were analyzed.

A researcher-developed 40-item questionnaire was constructed from the qualitative findings. It measured eight constructs: demand pressure and consumption patterns; quality of energy policymaking and governance; infrastructure capacity and reliability; demand-side management, technology, and efficiency; climatic and environmental pressures; temporal and feedback complexities; severity of the gas imbalance; and consequences of the gas imbalance. Responses were recorded on a five-point Likert scale. Face and content validity were assessed by academic and executive experts. SPSS was used for preliminary and descriptive analyses, while SmartPLS was employed to evaluate the measurement and structural models through partial least squares structural equation modeling. Reliability, convergent validity, discriminant validity, collinearity, path coefficients, coefficients of determination, predictive relevance, and model fit were evaluated. The statistical significance of the structural paths was assessed using bootstrapping.

Findings

Analysis of the 16 interviews generated 305 initial codes, with between 17 and 22 codes extracted from each interview. After conceptually overlapping codes were merged, 16 subthemes and seven principal themes were identified. The main themes comprised demand structure and consumption patterns; energy policymaking and governance; technical and infrastructural capacity; demand-side management, technology, and efficiency; climatic and environmental factors; temporal and feedback dynamics; and the consequences of the gas imbalance. The qualitative model indicated that imbalance emerges when demand pressure exceeds the production, transmission, storage, distribution, and management capacities of the gas system. The model also showed that policy quality, technological capacity, consumer behavior, climate, and delayed feedback can either intensify or mitigate this gap.

In the quantitative phase, climatic and environmental pressures produced the highest mean score ($M = 3.518$, $SD = 0.986$), followed by the severity of the gas imbalance ($M = 3.440$, $SD = 0.941$), demand pressure and consumption patterns ($M = 3.386$, $SD = 0.931$), consequences of the imbalance ($M = 3.377$, $SD = 0.933$), and temporal and feedback complexities ($M = 3.338$, $SD = 1.016$). The mean scores for the quality of energy policymaking and governance ($M = 2.764$, $SD = 0.939$) and infrastructure capacity and reliability ($M = 2.865$, $SD = 1.007$) were below the midpoint of the scale, indicating unfavorable respondent evaluations of these dimensions.

All 40 indicators were retained because their factor loadings ranged from 0.786 to 0.874. Cronbach's alpha coefficients ranged from 0.863 to 0.901, rho_A values ranged from 0.866 to 0.903, and composite reliability values ranged from 0.907 to 0.926. Average variance extracted values ranged from 0.670 to 0.715, confirming convergent validity. Heterotrait–monotrait ratios ranged from 0.059 to 0.790 and remained below 0.85, supporting discriminant validity. Variance inflation factor values ranged from 1.000 to 1.391, indicating no problematic multicollinearity.

All seven structural paths were statistically significant ($p < .001$). Demand pressure and consumption patterns had a positive effect on gas imbalance severity ($\beta = .291$, $t = 7.088$). Temporal and feedback complexities also increased imbalance severity ($\beta = .267$, $t = 6.790$), as did climatic and environmental pressures ($\beta = .160$, $t = 4.024$). Conversely, infrastructure capacity and reliability reduced imbalance severity ($\beta = -.256$, $t = 6.600$). The quality of energy policymaking and governance had a significant negative effect ($\beta = -.201$, $t = 4.976$), while demand-side management, technology, and

efficiency also reduced imbalance severity ($\beta = -.147$, $t = 3.522$). Gas imbalance severity exerted a strong positive effect on its economic, industrial, social, environmental, and security consequences ($\beta = .712$, $t = 24.653$).

The six predictor constructs collectively explained 62.9% of the variance in gas imbalance severity. Gas imbalance severity explained 50.6% of the variance in its consequences. Predictive relevance values were 0.408 for imbalance severity and 0.316 for its consequences, demonstrating satisfactory predictive capability. The standardized root mean square residual was 0.043 for the saturated model and 0.047 for the estimated model. These values indicated an acceptable and comparatively strong overall model fit.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that the gas imbalance in Iran is neither a single-factor problem nor simply a consequence of insufficient production. It is produced by the simultaneous interaction of excessive and volatile demand, infrastructural limitations, weaknesses in energy governance, inadequate demand management, climatic pressure, and delayed system responses. Demand pressure was the strongest positive antecedent, indicating that seasonal consumption peaks and inefficient consumption patterns place substantial stress on the gas system. Temporal and feedback complexities were also highly influential, showing that delayed investments and postponed policy effects can intensify the imbalance even after corrective measures have begun.

Infrastructure capacity and reliability demonstrated the strongest mitigating effect. This finding highlights the importance of expanding storage capacity, upgrading transmission networks, improving maintenance, modernizing pressure-regulation facilities, and accelerating investments in production and distribution infrastructure. Governance quality also reduced the imbalance, suggesting that coordinated policymaking, stable long-term planning, realistic pricing arrangements, institutional accountability, and improved demand forecasting are essential for sustainable gas management.

The strong relationship between imbalance severity and its consequences confirms that continuing supply–demand gaps can generate interconnected economic, industrial, social, environmental, and security risks. Sustainable improvement therefore requires an integrated policy portfolio rather than isolated measures. Demand management, infrastructure expansion, governance reform, technological modernization, efficiency improvement, climate preparedness, and recognition of implementation delays should be pursued concurrently. The validated model provides a comprehensive framework through which policymakers and gas-industry managers can identify critical intervention points, compare strategic priorities, and design coordinated measures to improve the resilience, reliability, and long-term security of Iran's gas system.

توسعه و اعتبارسنجی مدل علی ارزیابی ناترازی انرژی در صنعت گاز ایران

رضا عبدالعلی زاده^{۱*}، مرتضی محمودزاده^{۱*}، میرحسین سیدی^{۲*}، رضا رستم زاده^{۳*}

۱. گروه مدیریت، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲. دانشیار گروه مدیریت، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: m.mahmoudzadeh@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله

پژوهشی/اصیل

نحوه استناد به این مقاله:

عبدالعلی زاده، رضا، محمودزاده، مرتضی، سیدی، میرحسین، و رستم زاده، رضا. (۱۴۰۵). توسعه و اعتبارسنجی مدل علی ارزیابی ناترازی انرژی در صنعت گاز ایران. علم تصمیم گیری و سیستم های هوشمند، ۳(۱)، ۱-۲۷.



© ۱۴۰۵ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است. انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY-NC 4.0) صورت گرفته است.

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تبیین عوامل مؤثر بر شدت ناترازی گاز، بررسی پیامدهای آن و ارائه یک مدل علی و یکپارچه انجام شد. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، آمیخته اکتشافی متوالی بود. جامعه مشارکت کنندگان بخش کیفی را خبرگان، مدیران و کارشناسان آگاه به مسائل صنعت گاز و انرژی تشکیل دادند و داده ها از طریق مصاحبه های نیمه ساختاریافته تا دستیابی به اشباع نظری گردآوری و تحلیل شدند. جامعه آماری بخش کمی نیز شامل افراد دارای دانش و تجربه مرتبط با حوزه گاز و انرژی بود که داده های ۳۰۰ مورد با استفاده از پرسشنامه محقق ساخته ۴۰ گویه ای بررسی شد. تحلیل داده های کمی با استفاده از نرم افزارهای SPSS و SmartPLS و روش مدل سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی انجام گرفت. یافته های بخش کیفی نشان داد که ناترازی گاز، پدیده ای چندبعدی و نظام مند است و عوامل مؤثر بر آن در شش محور اصلی شامل فشار تقاضا و الگوی مصرف، کیفیت سیاست گذاری و حکمرانی انرژی، ظرفیت و قابلیت اطمینان زیرساختی، مدیریت مصرف، فناوری و بهره وری، فشارهای اقلیمی و محیطی و پیچیدگی های زمانی و بازخوردی قرار می گیرند. همچنین، شدت ناترازی گاز به عنوان سازه مرکزی و پیامدهای اقتصادی، صنعتی، اجتماعی، زیست محیطی و امنیتی به عنوان خروجی نهایی مدل شناسایی شدند. نتایج بخش کمی، پایایی و روایی مناسب مدل اندازه گیری را تأیید کرد و نشان داد هر هفت فرضیه پژوهش معنادارند. فشار تقاضا و الگوی مصرف با ضریب مسیر ۰/۲۹۱، پیچیدگی های زمانی و بازخوردی با ضریب ۰/۲۶۷ و فشارهای اقلیمی و محیطی با ضریب ۰/۱۶۰، اثر مثبت و معناداری بر شدت ناترازی داشتند. در مقابل، ظرفیت و قابلیت اطمینان زیرساختی با ضریب ۰/۲۵۶، کیفیت سیاست گذاری و حکمرانی انرژی با ضریب ۰/۲۰۱ و مدیریت مصرف، فناوری و بهره وری با ضریب ۰/۱۴۷، اثر منفی و معناداری بر شدت ناترازی نشان دادند. همچنین، شدت ناترازی گاز با ضریب ۰/۷۱۲ اثر مثبت و قوی بر پیامدهای آن داشت. شش عامل پیش بین در مجموع ۶۲/۹ درصد از تغییرات شدت ناترازی را تبیین کردند و شدت ناترازی نیز ۵۰/۶ درصد از تغییرات پیامدهای آن را توضیح داد. مقادیر شاخص قدرت پیش بینی برای شدت ناترازی و پیامدهای آن به ترتیب ۰/۴۰۸ و ۰/۳۱۶ به دست آمد و برازش کلی مدل قابل قبول و نسبتاً مطلوب ارزیابی شد. در مجموع، نتایج نشان داد ناترازی گاز مسئله ای تک عاملی نیست و کاهش پایدار آن به مداخله هم زمان در مدیریت تقاضا، توسعه و نوسازی زیرساخت ها، اصلاح حکمرانی، ارتقای بهره وری و فناوری و مدیریت آثار اقلیمی و تأخیرهای زمانی نیاز دارد.

کلیدواژگان: ناترازی گاز، الگوی مصرف، حکمرانی انرژی، زیرساخت گاز، بهره وری انرژی، پویایی های زمانی، مدل سازی معادلات ساختاری.

۱. مقدمه

گاز طبیعی یکی از مهم ترین حامل های انرژی و از ارکان اساسی رشد اقتصادی، تولید صنعتی، رفاه خانوار و پایداری شبکه برق محسوب می شود. این منبع در دهه های اخیر به دلیل مزیت های فنی، اقتصادی و زیست محیطی نسبی، سهم فزاینده ای در سبد انرژی جهان پیدا کرده است. در ایران نیز گاز طبیعی بخش عمده ای از مصرف انرژی را تأمین می کند و استمرار فعالیت بسیاری از صنایع، نیروگاه ها و بخش خانگی به عرضه پایدار آن وابسته است (آریافر و همکاران، ۱۴۰۲؛ جوکار، ۱۴۰۳). با وجود برخورداری ایران از ذخایر گسترده گاز طبیعی، افزایش فاصله میان عرضه قابل دسترس و تقاضای مصرفی، به ویژه در دوره های اوج زمستانی، ناترازی گاز را به یکی از چالش های اصلی نظام انرژی کشور تبدیل کرده است (ظفریان و صابری، ۱۴۰۲؛ صابری و همکاران، ۱۴۰۲).

ناترازی گاز به وضعیتی اشاره دارد که در آن ظرفیت تولید، انتقال و تأمین گاز قادر به پاسخ گویی پایدار به سطح و الگوی تقاضا نیست. این پدیده صرفاً حاصل کمبود تولید یا افزایش مصرف نیست، بلکه از برهم کنش مجموعه ای از عوامل فنی، اقتصادی، نهادی، ساختاری، اقلیمی و رفتاری شکل می گیرد. رشد سریع مصرف در بخش های خانگی و صنعتی، پایین بودن بهره وری انرژی، فرسودگی زیرساخت ها، محدودیت ظرفیت ذخیره سازی، تأخیر در توسعه میادین، سیاست های ناکارآمد قیمت گذاری، استمرار یارانه های غیرهدفمند و محدودیت دسترسی به فناوری های جدید از مهم ترین عوامل مؤثر بر تشدید این شکاف به شمار می روند (اویسی کهک ها و حسین زاده، ۲۰۲۳؛ جباری و همکاران، ۲۰۲۴؛ رجبی و همکاران، ۲۰۲۵).

شواهد موجود نشان می دهد که نوسان فصلی تقاضای گاز در ایران بسیار بالاست و ظرفیت محدود ذخیره سازی زیرزمینی، انعطاف پذیری شبکه را در مواجهه با اوج مصرف کاهش داده است. اختلاف مصرف میان ماه های سرد و گرم سال به بیش از ۲۲۰ میلیون مترمکعب در روز می رسد، در حالی که نسبت ظرفیت ذخیره سازی به مصرف سالانه کشور به مراتب کمتر از میانگین جهانی گزارش شده است (ظفریان و صابری، ۱۴۰۲؛ صابری و همکاران، ۱۴۰۲). از سوی دیگر، افت طبیعی تولید در برخی میادین، فرسودگی تأسیسات، محدودیت سرمایه گذاری و تأخیر در پروژه های افزایش ظرفیت، امکان جبران سریع کسری عرضه را محدود کرده است. تداوم این وضعیت می تواند وابستگی کشور به واردات گاز را افزایش داده و پیامدهایی جدی برای امنیت انرژی، تولید صنعتی و رشد اقتصادی ایجاد کند (آریافر و همکاران، ۱۴۰۲؛ ظفریان و صابری، ۱۴۰۲).

در سمت تقاضا نیز ترکیب تولید صنعتی، توسعه صنایع انرژی بر، الگوی مصرف خانوار و شرایط اقلیمی نقش تعیین کننده ای در شکل گیری ناترازی دارند. مطالعات استانی نشان داده اند که افزایش سهم صنایع انرژی بر علاوه بر اثر مستقیم بر مصرف گاز، از طریق سرریزهای مکانی نیز مصرف مناطق هم جوار را افزایش می دهد؛ بنابراین، اتکای صرف به ابزار قیمت برای مدیریت تقاضا کافی نیست و اصلاحات ساختاری در الگوی تولید و فناوری نیز ضرورت دارد (اویسی کهک ها و حسین زاده، ۲۰۲۳). همچنین، تحریم های اقتصادی و محدودیت انتقال فناوری، به ویژه در صنایع واردات محور، موجب کاهش کارایی انرژی شده و حتی در صورت ثبات ظرفیت عرضه، تقاضای مؤثر گاز را در سطح بالایی حفظ می کند (جباری و همکاران، ۲۰۲۴؛ حسن و اختریان زند، ۲۰۲۲).

پیامدهای ناترازی گاز تنها به محدودیت عرضه در بخش خانگی محدود نمی شود، بلکه می تواند زنجیره ای از آثار اقتصادی، زیست محیطی و امنیتی ایجاد کند. اعمال محدودیت بر صنایع فولاد، سیمان و پتروشیمی در دوره های سرد سال، ظرفیت تولید و ارزش افزوده ملی را کاهش می دهد و استفاده از سوخت های جایگزین مانند مازوت در نیروگاه ها نیز هزینه های زیست محیطی و اجتماعی گسترده ای به همراه دارد (آدونگا و همکاران، ۲۰۲۲؛ رجبی و همکاران، ۲۰۲۵). از این منظر، ناترازی گاز تهدیدی برای امنیت انرژی است؛ زیرا پایداری نظام

انرژی را در برابر شوک‌های اقلیمی، فنی و اقتصادی کاهش می‌دهد. تجربه بحران انرژی اروپا نیز نشان داده است که توسعه ذخیره‌سازی، تنوع‌بخشی به منابع، افزایش انعطاف‌پذیری شبکه و مدیریت فعال تقاضا از الزامات کاهش آسیب‌پذیری سیستم انرژی هستند (کیارنس و همکاران، ۲۰۱۱؛ جوکار، ۱۴۰۳؛ اورازیاف و همکاران، ۲۰۲۰).

با وجود گسترش مطالعات مرتبط با مصرف، تولید و تراز انرژی، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های داخلی بر شناسایی جداگانه عوامل مؤثر یا تحلیل‌های ایستا متمرکز بوده‌اند و کمتر به سازوکارهای علی و مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم اثرگذاری میان متغیرها پرداخته‌اند (حیدری و همکاران، ۲۰۱۳؛ سلیمانی، ۲۰۲۱؛ اسماعیلی و همکاران، ۲۰۲۴). در نتیجه، هنوز چارچوبی منسجم و آزمون‌پذیر که بتواند تعامل میان سیاست‌های قیمت‌گذاری، ظرفیت عرضه، زیرساخت انتقال، ذخیره‌سازی، بهره‌وری، ساختار تولید، فناوری و رفتار مصرف‌کننده را به‌طور هم‌زمان توضیح دهد، به‌طور کامل توسعه نیافته است. این خلأ، امکان ارزیابی آثار متقابل سیاست‌ها و شناسایی پیامدهای ناخواسته مداخلات تک‌بعدی را محدود می‌کند.

ماهیت چندبعدی و پویای ناترازی گاز ایجاب می‌کند که این مسئله از منظر سیستمی و علی بررسی شود. نظریه پویایی سیستم، رفتار نظام انرژی را حاصل حلقه‌های بازخوردی میان عرضه، تقاضا، قیمت، سرمایه‌گذاری و ظرفیت زیرساختی می‌داند و امکان تحلیل تغییرات این متغیرها را در طول زمان فراهم می‌سازد (عباسپور و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۵). در کنار آن، مدل‌سازی معادلات ساختاری می‌تواند روابط مستقیم، غیرمستقیم و میانجی میان سازه‌های اقتصادی، فنی، نهادی و رفتاری را آزمون کند (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۲۴؛ رجبی و صادقی‌شهدانی، ۲۰۲۵). تلفیق این رویکردها با شواهد کیفی حاصل از دیدگاه خبرگان، زمینه تدوین مدلی بومی و مبتنی بر واقعیت‌های صنعت گاز ایران را فراهم می‌کند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف توسعه و اعتبارسنجی یک مدل علی برای ارزیابی ناترازی انرژی در صنعت گاز ایران انجام شده است. در این مدل، ناترازی حاصل تعامل سه خوشه اصلی شامل سیاست‌ها و ساختار نهادی، عرضه و زیرساخت فنی، و تقاضا و رفتار مصرف در نظر گرفته می‌شود. متغیرهایی مانند بهره‌وری انرژی، کارایی زیرساخت‌ها، ظرفیت ذخیره‌سازی و فناوری‌های هوشمند نیز به‌عنوان سازوکارهای میانجی در ارتباط میان این خوشه‌ها بررسی می‌شوند. پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی کیفی و کمی، ابتدا عوامل و روابط علی را از طریق تحلیل دیدگاه خبرگان شناسایی کرده و سپس مسیرهای پیشنهادی را با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری و پویایی‌شناسی سیستم ارزیابی می‌کند. انتظار می‌رود مدل حاصل، ضمن ارتقای درک نظری از سازوکار ناترازی گاز، مبنایی برای طراحی سیاست‌های منسجم در حوزه مدیریت تقاضا، توسعه زیرساخت، ارتقای بهره‌وری و افزایش تاب‌آوری نظام انرژی کشور فراهم آورد.

۲. مرور ادبیات و مبانی نظری

۲-۱. مفهوم ناترازی انرژی

ناترازی انرژی در ادبیات اقتصاد و مهندسی انرژی به فاصله میان عرضه قابل‌دسترس و تقاضای واقعی انرژی در یک دوره زمانی مشخص اشاره دارد. این وضعیت ممکن است به‌صورت مازاد عرضه یا کمبود عرضه ظاهر شود؛ با این حال، در صنعت گاز ایران، ناترازی عمدتاً در قالب ناتوانی ظرفیت تولید، انتقال و ذخیره‌سازی در پاسخ‌گویی به تقاضای فزاینده، به‌ویژه در دوره‌های اوج مصرف زمستانی، بروز می‌کند (مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۴۰۳؛ رجبی و صادقی‌شاهدانی، ۱۴۰۴). از این منظر، ناترازی را نمی‌توان صرفاً یک کمبود فیزیکی یا اختلاف حسابداری میان تولید و مصرف دانست، بلکه این پدیده نتیجه تعامل مجموعه‌ای از متغیرهای فنی، اقتصادی، نهادی، اقلیمی و رفتاری است که در قالب یک سیستم پیچیده و پویا عمل می‌کنند.

بر اساس نظریه تعادل انرژی، پایداری یک نظام انرژی به هماهنگی میان منابع تولید، ظرفیت انتقال، امکانات ذخیره سازی و الگوی مصرف وابسته است. هرگونه اختلال در یکی از این اجزا می تواند تعادل کل سیستم را بر هم بزند. برای مثال، کاهش سرمایه گذاری در توسعه زیرساخت، افت ظرفیت تولید یا افزایش سریع مصرف می تواند به ایجاد شکافی پایدار میان عرضه و تقاضا منجر شود (سدیگاز، ۲۰۲۰؛ گائو و همکاران، ۲۰۲۵). از دیدگاه اقتصاد انرژی نیز ناترازی با عواملی مانند کشش قیمتی تقاضا، شدت مصرف، تخصیص غیربهبینه منابع و پایین بودن بهره وری ارتباط دارد. باین حال، رویکردهای جدید نشان می دهند که تصمیم مصرف کننده فقط تابع قیمت نیست و عواملی مانند فرهنگ مصرف، نگرش های اجتماعی، شرایط اقلیمی، اعتماد به نهادهای انرژی و دسترسی به فناوری های کارآمد نیز بر آن اثر می گذارند (جوکار، ۱۴۰۳؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

نظریه پویایی سیستم ها، ناترازی انرژی را پیامد حلقه های بازخوردی میان عرضه، تقاضا، قیمت، سرمایه گذاری و ذخایر می داند. بر اساس این دیدگاه، تأخیر در سرمایه گذاری، توسعه ظرفیت و اجرای سیاست های اصلاحی می تواند آثار اولیه یک عدم تعادل را در طول زمان تشدید کند. بنابراین، ناترازی یک رویداد مقطعی نیست، بلکه رفتاری سیستمی است که از ساختار روابط میان اجزای نظام انرژی ناشی می شود (استرمن، ۲۰۰۰؛ پازوکی و همکاران، ۲۰۲۵). نظریه علیت ساختاری نیز بر آن است که روابط میان سیاست، فناوری، مصرف و تولید تنها همبستگی های آماری نیستند، بلکه از سازوکارهای علی مستقیم و غیرمستقیم پیروی می کنند. مدل سازی معادلات ساختاری امکان بررسی این مسیرها و سنجش نقش متغیرهای میانجی، از جمله بهره وری انرژی، فرهنگ مصرف و سرمایه گذاری فناورانه، را فراهم می کند (بولن، ۱۹۸۹؛ فریادرس و همکاران، ۲۰۲۵).

از دیدگاه نهادی نیز ناترازی می تواند نتیجه ناهماهنگی در حکمرانی انرژی، تعدد نهادهای تصمیم گیر، نبود پاسخ گویی و غلبه تصمیم های کوتاه مدت بر برنامه ریزی بلندمدت باشد. در چنین شرایطی، سیاست های قیمت گذاری، یارانه ای و تخصیصی نه تنها به اصلاح رفتار تولیدکننده و مصرف کننده منجر نمی شوند، بلکه ممکن است شدت ناترازی را افزایش دهند (پژوهشکده مطالعات انرژی ایران، ۱۴۰۲؛ رسکی و همکاران، ۱۴۰۳). بنابراین، مفهوم ناترازی انرژی در پژوهش حاضر به عنوان پدیده ای چندبعدی در نظر گرفته می شود که در آن ابعاد فنی، اقتصادی، نهادی و رفتاری به صورت متقابل بر یکدیگر اثر می گذارند.

۲-۲. عوامل مؤثر بر ناترازی

عوامل مؤثر بر ناترازی گاز را می توان در چند دسته اصلی طبقه بندی کرد. نخستین دسته به ساختار عرضه و زیرساخت فنی مربوط است. محدودیت ظرفیت تولید، افت طبیعی میادین، فرسودگی تجهیزات، تأخیر در توسعه زیرساخت های انتقال و کمبود ظرفیت ذخیره سازی زیرزمینی، انعطاف سیستم گاز را کاهش می دهند. در شرایط اوج مصرف، نبود ذخایر کافی و تأخیر در ظرفیت سازی سبب می شود سیستم نتواند افزایش تقاضا را جبران کند (انجمن مهندسی شیمی ایران، ۱۴۰۲؛ ظفریان و صابری، ۱۴۰۲). مطالعات مبتنی بر پویایی سیستم ها نیز نشان داده اند که فاصله زمانی میان تصمیم سرمایه گذاری و بهره برداری از ظرفیت جدید، می تواند چرخه های کمبود را تداوم بخشد (فارستر، ۱۹۶۱؛ عباسپور و همکاران، ۲۰۱۳).

دسته دوم عوامل به ساختار تقاضا و رفتار مصرف کنندگان مربوط است. سهم بالای گاز در مصارف خانگی، صنعتی و نیروگاهی، پایین بودن حساسیت مصرف کنندگان به قیمت و تأثیر شدید دما بر مصرف، موجب افزایش نوسانات فصلی تقاضا شده است. یافته های داخلی نشان می دهد مصرف خانگی بیش از آنکه صرفاً تابع قیمت باشد، تحت تأثیر درجه روز گرمایش، عادات های مصرفی، کیفیت ساختمان ها و سطح آگاهی مصرف کنندگان قرار دارد (مرکز آمار و اطلاعات انرژی، ۱۴۰۲؛ جوکار، ۱۴۰۳). همچنین، گسترش صنایع انرژی بر و تفاوت ساختار تولید میان استان ها، مصرف گاز را به صورت مستقیم و از طریق سرریزهای منطقه ای افزایش می دهد (اویسی کهک ها و حسین زاده، ۱۴۰۲).

عامل سوم به سیاست‌های قیمت‌گذاری، یارانه و مدیریت تقاضا بازمی‌گردد. قیمت‌های یارانه‌ای، در صورت نبود سیاست‌های مکمل، انگیزه لازم برای بهینه‌سازی مصرف، نوسازی تجهیزات و استفاده از فناوری‌های کم‌مصرف را کاهش می‌دهند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد اصلاح قیمت به‌تنهایی نیز نمی‌تواند تعادل پایدار ایجاد کند و باید همراه با استانداردهای ساختمانی، تجهیزات پربازده، آموزش مصرف‌کنندگان و حمایت از سرمایه‌گذاری‌های بهینه‌سازی اجرا شود (حیدری و همکاران، ۲۰۱۳؛ مرکز بهینه‌سازی مصرف انرژی، ۱۴۰۲). در این میان، بهره‌وری انرژی نقش یک متغیر میانجی را ایفا می‌کند؛ به این معنا که سیاست‌های قیمتی و فناوریانه از طریق تغییر بهره‌وری بر شدت مصرف و در نهایت بر ناترازی اثر می‌گذارند (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۲۴).

چهارمین دسته، عوامل نهادی و حکمرانی است. ناهماهنگی میان نهادهای مسئول تولید، توزیع، قیمت‌گذاری و برنامه‌ریزی، نبود ارزیابی مستمر سیاست‌ها و تغییرات کوتاه‌مدت در تصمیمات، موجب کاهش اثربخشی برنامه‌های مدیریت انرژی می‌شود. از منظر نظریه حکمرانی انرژی، پایداری زمانی حاصل می‌شود که سیاست‌گذاران، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در یک سازوکار هماهنگ و یادگیرنده عمل کنند (پژوهشکده مطالعات انرژی ایران، ۱۴۰۲؛ مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۴۰۳). افزون بر این، محدودیت انتقال فناوری و سرمایه‌گذاری ناکافی در سامانه‌های هوشمند مدیریت انرژی، امکان پایش بلادرنگ، پیش‌بینی مصرف و مدیریت انعطاف شبکه را محدود می‌کند. در نهایت، شرایط اقلیمی و محیطی نیز یکی از محرک‌های مهم ناترازی است. کاهش دما به‌طور مستقیم تقاضای گرمایشی را افزایش می‌دهد و موجب ایجاد اوج‌های مصرفی شدید و کوتاه‌مدت می‌شود. این اثر در مناطقی که ساختمان‌ها از کارایی حرارتی پایین‌تری برخوردارند، شدیدتر است. بنابراین، ناترازی گاز نتیجه یک عامل منفرد نیست، بلکه محصول هم‌زمان ضعف زیرساخت، الگوی مصرف، سیاست‌های ناکارا، مشکلات نهادی و شوک‌های اقلیمی است.

۲-۳. پیامدهای ناترازی

پیامدهای ناترازی انرژی را می‌توان در ابعاد اقتصادی، صنعتی، اجتماعی، زیست‌محیطی و امنیتی بررسی کرد. از منظر اقتصادی، کمبود گاز موجب کاهش تولید در صنایع وابسته به انرژی و افت ارزش افزوده بخش‌های صنعتی می‌شود. صنایع شیمیایی، فولاد، سیمان، پتروشیمی، تولید برق و حمل‌ونقل از طریق لوله از جمله بخش‌هایی هستند که در دوره‌های محدودیت عرضه، بیشترین آسیب را متحمل می‌شوند. نتایج پژوهش رجبی و صادقی‌شاهدانی (۱۴۰۴) نشان می‌دهد کمبود گاز می‌تواند کاهش معناداری در تولید ناخالص داخلی ایجاد کند. الکراز و ویلاوازو (۲۰۱۷) نیز تأیید کرده‌اند که محدودیت عرضه گاز، رشد تولید صنعتی را به‌طور معناداری کاهش می‌دهد. در سطح عملیاتی، ناترازی موجب اعمال محدودیت یا قطع گاز صنایع، کاهش تولید برق و استفاده از سوخت‌های جایگزین می‌شود. جایگزینی گاز با سوخت‌های آلاینده‌تر، افزون بر افزایش هزینه تولید، پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی قابل‌توجهی ایجاد می‌کند. از منظر زیست‌محیطی، ناترازی می‌تواند به افزایش مصرف سوخت‌های سنگین، کاهش بهره‌وری و تشدید انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای منجر شود (یانگ و همکاران، ۲۰۲۵؛ گائو و همکاران، ۲۰۲۵).

از منظر اجتماعی، اختلال در عرضه پایدار انرژی بر رفاه خانوار، کیفیت خدمات عمومی و اعتماد عمومی به نظام سیاست‌گذاری اثر منفی می‌گذارد. همچنین، تخصیص گاز میان بخش خانگی، صنعتی و نیروگاهی می‌تواند تعارض‌های سیاستی و توزیعی ایجاد کند. هونگ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده‌اند که در شرایط کمبود، استفاده از سازوکارهای تخصیص پویا و اولویت‌بندی بخشی می‌تواند هزینه اجتماعی ناترازی را کاهش دهد. در بعد امنیت انرژی نیز وابستگی شدید اقتصاد به یک حامل، همراه با پایین بودن ظرفیت ذخیره‌سازی و انعطاف محدود شبکه، آسیب‌پذیری نظام انرژی را در برابر شوک‌های مصرف، اختلالات فنی و تحولات خارجی افزایش می‌دهد (آریافر و همکاران، ۱۴۰۲؛ کیارتس و همکاران، ۲۰۱۱).

۴-۲. مطالعات پیشین

مطالعات داخلی ناترازی گاز عمدتاً بر یکی از ابعاد اقتصادی، فنی، منطقه‌ای یا سیاستی تمرکز داشته‌اند. رجبی و صادقی‌شاهدانی (۱۴۰۴) با استفاده از جداول داده-ستانده و سناریونویسی، پیامدهای کلان کمبود گاز را ارزیابی کردند و نشان دادند که ناترازی می‌تواند تولید صنعتی و تولید ناخالص داخلی را کاهش دهد. جوکار (۱۴۰۳) در مطالعه تطبیقی ایران و اروپا، تنوع‌بخشی به منابع، توسعه ذخیره‌سازی و مدیریت تقاضا را از مهم‌ترین مؤلفه‌های افزایش تاب‌آوری معرفی کرد. ظفریان و صابری (۱۴۰۲) و مرکز پژوهش‌های مجلس (۱۴۰۳) نیز بر محدودیت ظرفیت ذخیره‌سازی و ضرورت اصلاح قواعد موازنه و قیمت‌گذاری خدمات انعطاف تأکید کرده‌اند.

اویسی‌کهک‌ها و حسین‌زاده (۱۴۰۲) با استفاده از اقتصادسنجی فضایی نشان دادند که ساختار صنایع انرژی‌بر بر مصرف گاز یک استان و مناطق مجاور اثرگذار است. مطالعات مرکز آمار و اطلاعات انرژی (۱۴۰۲) نیز اثر قابل‌توجه عوامل اقلیمی و حساسیت پایین مصرف خانگی به قیمت را گزارش کرده‌اند. اسماعیلی و همکاران (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از مدل معادلات ساختاری نشان دادند سیاست‌های قیمتی از طریق متغیرهای میانجی مانند فناوری و بهره‌وری انرژی بر شدت مصرف اثر می‌گذارند. عباسپور و همکاران (۲۰۱۳) نیز با استفاده از پویایی سیستم‌ها نتیجه گرفتند که تأخیر در توسعه زیرساخت و قیمت‌گذاری غیربهبینه، ناترازی بلندمدت را تشدید می‌کند.

در مطالعات خارجی، گرایش به استفاده از مدل‌های سیستمی، علی و سناریومحور مشهود است. کیارتس و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند توسعه ذخیره‌سازی، تنوع منابع و اصلاح قواعد تراز، تاب‌آوری شبکه گاز اروپا را افزایش می‌دهد. پازوکی و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از پویایی سیستم‌ها، تأخیرهای زیرساختی و قیمت‌گذاری ناکارا را از عوامل ایجاد ناترازی بلندمدت معرفی کردند. فریادرس و همکاران (۲۰۲۵) نیز نتیجه گرفتند ترکیب تدریجی اصلاح قیمت، ارتقای بهره‌وری و توسعه ذخیره‌سازی، نسبت به سیاست‌های تک‌ابزاری پایداری بیشتری دارد. مطالعات یانگ و همکاران (۲۰۲۵) و گائو و همکاران (۲۰۲۵) بر نقش مسیرهای غیرمستقیم سیاست، فناوری، انگیزش و رفتار مصرف‌کننده در کاهش شدت انرژی تأکید کرده‌اند.

مرور روش‌های به‌کاررفته نشان می‌دهد مدل‌های معادلات ساختاری برای تحلیل روابط مستقیم و غیرمستقیم و سنجش متغیرهای میانجی مناسب‌اند، در حالی که مدل‌های پویایی سیستم‌ها امکان بررسی بازخوردها، تأخیرهای زمانی و رفتار بلندمدت سیستم را فراهم می‌کنند. مدل‌های ترکیبی نیز با ادغام این دو رویکرد، هم ساختار علی و هم رفتار زمانی ناترازی را تبیین می‌کنند (مانارا، ۲۰۲۴؛ فریادرس و همکاران، ۲۰۲۵).

۵-۲. شکاف پژوهش

با وجود گسترش مطالعات مرتبط با ناترازی گاز، همچنان خلأهای مهمی در ادبیات پژوهش وجود دارد. بیشتر پژوهش‌های داخلی به بررسی جداگانه ابعاد مختلف ناترازی، مانند قیمت، مصرف، زیرساخت یا حکمرانی پرداخته‌اند و کمتر روابط هم‌زمان میان عوامل سیاستی، نهادی، فنی و رفتاری را در قالب یک مدل علی یکپارچه بررسی کرده‌اند. همچنین، نقش متغیرهای میانجی نظیر بهره‌وری انرژی، ظرفیت ذخیره‌سازی و فناوری‌های هوشمند به‌صورت نظام‌مند مورد توجه قرار نگرفته است. از سوی دیگر، مطالعات داخلی عمدتاً بر رویکردهای صرفاً کیفی یا کمی متمرکز بوده‌اند، در حالی که پژوهش‌های بین‌المللی با تلفیق دیدگاه خبرگان، مدل‌های علی و پویایی سیستم، چارچوب‌های جامع‌تری برای تحلیل و ارزیابی سناریوهای سیاستی ارائه کرده‌اند (گائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ فریادرس و همکاران، ۲۰۲۵). بر این اساس، مهم‌ترین شکاف پژوهشی، نبود یک مدل علی بومی، یکپارچه و آزمون‌پذیر برای تبیین ناترازی گاز در ایران است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی کیفی-کمی، مدل‌سازی معادلات ساختاری و پویایی‌شناسی سیستم، درصدد پر کردن این خلأ و ارائه چارچوبی علمی برای حمایت از سیاست‌گذاری انرژی است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. طراحی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی-توسعه‌ای و از نظر روش، آمیخته اکتشافی متوالی است. انتخاب این طرح با توجه به ماهیت چندبعدی و پیچیده ناترازی گاز انجام شد؛ زیرا بررسی این پدیده مستلزم شناسایی عمیق عوامل و سازوکارهای مؤثر و سپس آزمون تجربی روابط میان آن‌هاست. در مرحله نخست، از رویکرد کیفی برای استخراج مؤلفه‌ها، مضامین و مسیرهای علی استفاده شد و در مرحله دوم، مدل حاصل با بهره‌گیری از داده‌های کمی و مدل‌سازی معادلات ساختاری آزمون و اعتبارسنجی گردید. در ادامه، برای بررسی رفتار زمانی متغیرها و تحلیل آثار بلندمدت سیاست‌های مختلف، از رویکرد پویایی سیستم‌ها به‌عنوان لایه تکمیلی پژوهش استفاده شد. فلسفه حاکم بر پژوهش، عمل‌گرایی بود؛ به این معنا که انتخاب روش‌ها و ابزارهای تحلیل بر اساس تناسب آن‌ها با مسئله پژوهش انجام گرفت، نه بر مبنای پابندی به یک رویکرد صرفاً کیفی یا کمی. بر این اساس، فرایند پژوهش در سه سطح مکمل طراحی شد: کشف مفاهیم و روابط در مرحله کیفی، آزمون روابط علی در مرحله کمی و تحلیل پویایی سیستم در شرایط و سناریوهای مختلف. این ساختار امکان ارائه مدلی را فراهم کرد که هم از غنای نظری و تفسیری برخوردار باشد و هم از نظر آماری و سیاستی قابلیت اتکا داشته باشد.

۳-۲. مرحله کیفی

مرحله کیفی با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر ناترازی گاز، استخراج سازه‌های اصلی و تبیین روابط علی میان آن‌ها انجام شد. جامعه مشارکت‌کنندگان این بخش شامل مدیران و کارشناسان صنعت گاز، متخصصان وزارت نفت، استادان دانشگاه در حوزه اقتصاد و سیاست‌گذاری انرژی و پژوهشگران فعال در زمینه بهره‌وری و مدیریت مصرف انرژی بود. معیار ورود به مطالعه شامل داشتن حداقل پنج سال سابقه تخصصی یا مدیریتی در حوزه انرژی، سابقه علمی مرتبط، تجربه مشارکت در طرح‌های بهینه‌سازی مصرف یا فعالیت در نهادهای پژوهشی و سیاست‌گذاری مرتبط بود.

مشارکت‌کنندگان با استفاده از نمونه‌گیری هدفمند و تکنیک گلوله‌برفی انتخاب شدند. نمونه‌گیری تا دستیابی به اشباع نظری ادامه یافت؛ به این معنا که فرایند مصاحبه زمانی متوقف شد که داده‌های جدید به مفهوم یا مضمون تازه‌ای منجر نمی‌شدند. تنوع مشارکت‌کنندگان از نظر سابقه کاری، حوزه تخصص و جایگاه سازمانی مورد توجه قرار گرفت تا ابعاد مختلف فنی، اقتصادی، نهادی و رفتاری ناترازی گاز در داده‌ها بازتاب یابد.

ابزار گردآوری داده‌ها، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته بود. پرسش‌های مصاحبه بر اساس اهداف پژوهش و مرور ادبیات طراحی شدند و موضوعاتی مانند عوامل فنی و اقتصادی ناترازی، نقش سیاست‌های قیمت‌گذاری و یارانه‌ای، وضعیت تولید و زیرساخت‌های انتقال و ذخیره‌سازی، بهره‌وری انرژی، فناوری‌های نوین، رفتار مصرف‌کننده و موانع نهادی را پوشش می‌دادند. پیش از اجرای اصلی، راهنمای مصاحبه با مشارکت چند متخصص بازمینی و اصلاح شد. مصاحبه‌ها پس از اخذ رضایت آگاهانه ضبط، به‌صورت واژه‌به‌واژه پیاده‌سازی و برای تحلیل آماده شدند.

تحلیل داده‌های کیفی با استفاده از روش تحلیل تماتیک انجام شد. در گام نخست، متن مصاحبه‌ها چندین بار مطالعه شد تا پژوهشگر با محتوای داده‌ها آشنا شود. سپس واحدهای معنایی شناسایی و کدهای اولیه استخراج شدند. در مرحله بعد، کدهای مشابه در قالب مقوله‌ها و مضامین فرعی گروه‌بندی و پس از بازمینی و ادغام، مضامین اصلی شکل گرفتند. در نهایت، روابط میان مضامین و جهت اثرگذاری آن‌ها تعیین و مدل مفهومی اولیه پژوهش ترسیم شد. برای سازمان‌دهی، مدیریت و بازبانی داده‌ها از نرم‌افزار MAXQDA استفاده شد.

اعتبار یافته‌های کیفی از طریق بازبینی مشارکت کنندگان، مرور کدها توسط افراد آشنا با موضوع، ثبت مستند مراحل تحلیل و استفاده از شواهد مستقیم مصاحبه‌ها تقویت شد. همچنین، فرایند کدگذاری، تغییرات کدها و تصمیمات تحلیلی به صورت مستمر ثبت شد تا پایداری و تأییدپذیری یافته‌ها حفظ شود. خروجی این مرحله، مجموعه‌ای از سازه‌ها، ابعاد و مسیرهای علی بود که مبنای طراحی پرسشنامه و مدل کمی قرار گرفت.

۳-۳. مرحله کمی

مرحله کمی با هدف آزمون مدل مفهومی استخراج شده از بخش کیفی و سنجش روابط مستقیم و غیرمستقیم میان متغیرهای پژوهش انجام شد. جامعه آماری این بخش شامل مدیران، کارشناسان و متخصصان فعال در شرکت ملی گاز ایران، شرکت‌های تابعه وزارت نفت، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، نیروگاه‌ها، صنایع گازبر و مراکز پژوهشی مرتبط با حوزه انرژی بود. انتخاب این جامعه به دلیل آشنایی پاسخ‌دهندگان با فرایندهای تولید، انتقال، توزیع، مصرف و سیاست‌گذاری گاز طبیعی صورت گرفت.

برای انتخاب نمونه از روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌ای استفاده شد تا گروه‌های مختلف مرتبط با صنعت گاز و مصرف انرژی، از جمله بخش‌های مدیریتی، صنعتی، نیروگاهی، تجاری و اجرایی، در نمونه حضور داشته باشند. حجم نمونه با توجه به الزامات مدل‌سازی معادلات ساختاری و تعداد گویه‌ها تعیین شد. بر این اساس، کفایت نمونه با رعایت نسبت مناسب تعداد پاسخ‌دهندگان به شاخص‌های مشاهده‌پذیر و قدرت آماری مورد نیاز بررسی شد.

ابزار گردآوری داده‌ها، پرسشنامه محقق‌ساخته‌ای بود که بر اساس نتایج تحلیل کیفی و مدل مفهومی اولیه تدوین شد. پرسشنامه از دو بخش تشکیل شد: بخش نخست شامل اطلاعات جمعیت‌شناختی و حرفه‌ای پاسخ‌دهندگان و بخش دوم شامل گویه‌های مربوط به سازه‌های اصلی پژوهش، از جمله سیاست‌های انرژی، رفتار مصرف، بهره‌وری انرژی، زیرساخت فنی، فناوری‌های هوشمند و نাত্রازی گاز بود. پاسخ‌ها بر اساس مقیاس پنج‌درجه‌ای لیکرت از «کاملاً مخالفم» تا «کاملاً موافقم» اندازه‌گیری شدند.

روایی صوری و محتوایی پرسشنامه از طریق دریافت نظر خبرگان دانشگاهی و اجرایی ارزیابی شد. در این مرحله، وضوح، تناسب، جامعیت و ارتباط گویه‌ها با سازه‌های مورد سنجش بررسی و اصلاحات لازم اعمال شد. روایی سازه نیز در مرحله تحلیل داده‌ها از طریق ارزیابی مدل اندازه‌گیری بررسی شد. برای سنجش روایی همگرا از میانگین واریانس استخراج‌شده و بارهای عاملی و برای سنجش روایی واگرا از معیار فورنل-لارکر و نسبت هتروتریت-مونوتریت استفاده شد.

پایایی ابزار با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی ارزیابی شد. مقادیر بیشتر از ۰/۷ برای آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی و مقادیر بیشتر از ۰/۵ برای میانگین واریانس استخراج‌شده، به عنوان حدود قابل قبول در نظر گرفته شدند. همچنین، گویه‌هایی که از بار عاملی کافی برخوردار نبودند، پس از بررسی نظری و آماری حذف یا اصلاح شدند.

۳-۴. تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌های کمی در دو سطح مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری انجام شد. ابتدا داده‌ها از نظر کامل بودن پاسخ‌ها، داده‌های گمشده، مقادیر پرت و الگوی توزیع بررسی شدند. سپس با استفاده از آمار توصیفی، ویژگی‌های پاسخ‌دهندگان و وضعیت متغیرهای اصلی پژوهش گزارش شد. در ادامه، مدل اندازه‌گیری برای ارزیابی کیفیت شاخص‌ها و سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

برای آزمون مدل پژوهش از رویکرد مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی و نرم‌افزار SmartPLS استفاده شد. انتخاب این روش به دلیل ماهیت پیش‌بینانه پژوهش، پیچیدگی مدل، وجود روابط میانجی و امکان تحلیل هم‌زمان چندین سازه انجام گرفت. در ارزیابی مدل اندازه‌گیری، بارهای عاملی، آلفای کرونباخ، پایایی ترکیبی، میانگین واریانس استخراج‌شده، معیار فورنل-لارکر و

HTMT بررسی شدند. بارهای عاملی بیش از ۰/۷ مطلوب تلقی شدند، هرچند بارهای بین ۰/۴ تا ۰/۷ با توجه به تأثیر آن‌ها بر پایایی و روایی سازه‌ها به صورت موردی بررسی شدند.

پس از تأیید مدل اندازه‌گیری، مدل ساختاری ارزیابی شد. در این مرحله، هم‌خطی میان سازه‌های پیش‌بین با استفاده از شاخص VIF بررسی شد. سپس ضرایب مسیر، آماره t و سطح معناداری روابط با استفاده از روش بوت‌استرپ محاسبه گردید. برای ارزیابی قدرت تبیینی مدل از ضریب تعیین R^2 و برای سنجش اندازه اثر هر متغیر پیش‌بین از شاخص f^2 استفاده شد. همچنین، توان پیش‌بینی مدل با شاخص Q^2 و روش Blindfolding بررسی شد. مقادیر مثبت Q^2 نشان‌دهنده برخورداری مدل از قدرت پیش‌بینی بود.

در کنار این شاخص‌ها، برازش کلی مدل با استفاده از شاخص SRMR ارزیابی شد. مقادیر کمتر از ۰/۰۸ به عنوان برازش مطلوب و مقادیر کمتر از ۰/۱۰ به عنوان برازش قابل قبول در نظر گرفته شدند. علاوه بر اثرات مستقیم، اثرات غیرمستقیم و میانجی نیز با استفاده از بوت‌استرپ تحلیل شدند تا مشخص شود متغیرهایی مانند بهره‌وری انرژی، رفتار مصرف‌کننده و کارایی زیرساخت‌ها چگونه رابطه میان سیاست‌های انرژی و ناترازی گاز را انتقال می‌دهند.

در مرحله نهایی، روابط تأییدشده در مدل ساختاری برای توسعه مدل پویایی سیستم مورد استفاده قرار گرفتند. متغیرهای کلیدی در قالب انبارها، جریان‌ها، متغیرهای کمکی و حلقه‌های بازخوردی سازمان‌دهی شدند و رفتار سیستم در سناریوهای مختلف، از جمله تداوم وضع موجود، اصلاح قیمت، افزایش بهره‌وری، توسعه زیرساخت و اجرای سیاست ترکیبی، تحلیل شد. این فرایند امکان بررسی آثار بلندمدت سیاست‌ها و شناسایی نقاط مداخله مؤثر در مدیریت ناترازی گاز را فراهم کرد.

۴. یافته‌های پژوهش

۴-۱. یافته‌های بخش کیفی

• کدهای اولیه استخراج‌شده از مصاحبه‌ها

پس از پیاده‌سازی کامل مصاحبه‌ها، متن هر مصاحبه به صورت خطبه خط مطالعه و گزاره‌های مرتبط با عوامل ایجادکننده ناترازی گاز، روابط میان عوامل، راهکارهای مدیریتی و پیامدهای تداوم وضعیت موجود شناسایی شد. در این مرحله، برای هر واحد معنایی یک کد اولیه اختصاص یافت. کدهای هم‌معنا یا بسیار نزدیک در سطح هر مصاحبه با یکدیگر ادغام شدند تا از افزایش غیرضروری تعداد کدها جلوگیری شود؛ با این حال، تلاش شد تمام مفاهیم معنادار و مرتبط با اهداف پژوهش حفظ شوند.

فراوانی گزارش‌شده در جدول، بیانگر تعداد کدهای اولیه متمایز استخراج‌شده از هر مصاحبه است و نباید با تعداد تکرار واژه‌ها یا عبارت‌ها در متن مصاحبه یکسان تلقی شود. با توجه به حجم زیاد کدهای استخراج‌شده از ۱۶ مصاحبه، در جدول زیر صرفاً دو نمونه از فرایند کدگذاری اولیه ارائه شده است. این دو مصاحبه به منظور نمایش تنوع مفاهیم، نحوه استخراج کدها و تفاوت زاویه دید مشارکت‌کنندگان انتخاب شده‌اند.

جدول (۱) نمونه کدهای اولیه استخراج‌شده از مصاحبه‌های بخش کیفی

کد	کدهای اولیه استخراج‌شده	فراوانی	نقل قول‌های منتخب
P۱	افزایش مصرف خانگی در اوج زمستان؛ محدودیت ظرفیت خطوط انتقال؛ ضعف هماهنگی میان تولید و مصرف نیروگاهی؛ ضعف پیش‌بینی تقاضا؛ نوسان فصلی مصرف؛ فشار مصرف صنعتی و نیروگاهی؛ افزایش مصرف تجاری؛ پایین بودن قیمت و یارانه‌ای بودن گاز؛ کاهش انگیزه مصرف بهینه؛ ناکارآمدی تعرفه‌ها؛ اثر سرمای شدید؛ ضرورت توسعه خطوط و ایستگاه‌های تقویت فشار؛ نیاز به سرمایه‌گذاری بلندمدت؛ اثر سیاست‌های انرژی بر رفتار	۲۲	«ناترازی ناشی از چند عامل است: افزایش ناگهانی مصرف خانگی در زمستان، محدودیت ظرفیت خطوط انتقال و هماهنگی ناکافی بین تولید و مصرف نیروگاهی.» همچنین، «تصمیمات قیمت‌گذاری و

15

خطوط، ضعف نگهداری، رفتار مصرف کننده، آموزش، فناوری پایش، تأخیر زمانی و پیامدهای ناترازی، پیش تر در مصاحبه های دیگر شناسایی شده بودند. بنابراین، این دو مصاحبه مضمون اصلی جدیدی به ساختار تحلیل اضافه نکردند و بیشتر موجب تأیید و تثبیت یافته های پیشین شدند. بر این اساس، می توان نتیجه گرفت که فرایند نزدیک شدن به اشباع از مصاحبه سیزدهم آغاز شد، در مصاحبه چهاردهم اشباع مضمونی حاصل گردید و با انجام مصاحبه های پانزدهم و شانزدهم، ثبات و کفایت داده های کیفی تأیید شد. در مجموع، تنوع تخصصی مشارکت کنندگان موجب شد ناترازی گاز از ابعاد مدیریتی، سیاستی، فنی، عملیاتی و رفتاری بررسی شود، در حالی که تکرار تدریجی کدها نیز از کفایت تعداد مصاحبه ها و انسجام چارچوب مفهومی استخراج شده حمایت کرد.

• دسته بندی کدهای اولیه و استخراج مضامین فرعی

پس از استخراج کدهای اولیه، کدها از نظر شباهت معنایی، ارتباط مفهومی و نقش آن ها در ایجاد، تشدید، کنترل یا پیامدهای ناترازی گاز با یکدیگر مقایسه شدند. کدهایی که با عبارات متفاوت به یک مفهوم مشترک اشاره داشتند، در یک طبقه قرار گرفتند و موارد تکراری یا بسیار نزدیک با یکدیگر ادغام شدند. برای مثال، کدهایی مانند افزایش مصرف خانگی در زمستان، پیک مصرف صنعتی، افزایش مصرف نیروگاهی و تمرکز تقاضا در ساعات اوج، در مضمون فرعی «نوسانات فصلی و تمرکز زمانی تقاضا» قرار گرفتند. همچنین، کدهای مرتبط با قیمت پایین گاز، یارانه گسترده، تعرفه ناکارآمد و کاهش انگیزه صرفه جویی، در مضمون «ناکارآمدی نظام قیمت گذاری و یارانه ای» دسته بندی شدند. فراوانی هر مضمون فرعی نشان دهنده تعداد مصاحبه هایی است که حداقل یک کد مرتبط با آن مضمون در آن ها مشاهده شده است. بنابراین، فراوانی ۱۶ به این معناست که مضمون مورد نظر در هر ۱۶ مصاحبه مطرح شده و لزوماً بیانگر میزان یکسان تأکید یا تعداد تکرار برابر در همه مصاحبه ها نیست. با توجه به حجم بالای جدول اصلی، در جدول زیر صرفاً ردیف نخست و آخر به عنوان نمونه ارائه شده اند و سایر مضامین در تحلیل کامل پژوهش لحاظ شده اند.

جدول (۲) نمونه ای از دسته بندی کدهای اولیه و استخراج مضامین فرعی

ردیف	کدهای اولیه مرتبط و ادغام شده	مضمون فرعی استخراج شده	فراوانی مصاحبه ای	مشارکت کنندگان مرتبط
۱	افزایش مصرف خانگی در زمستان؛ افزایش مصرف نیروگاهی در تابستان؛ پیک مصرف صنعتی؛ نوسان مصرف تجاری؛ افزایش ناگهانی تقاضا؛ تمرکز مصرف در ساعات اوج؛ پیش بینی ناپذیری تقاضا	نوسانات فصلی و تمرکز زمانی تقاضا	۱۶	P۱ تا P۱۶
۲ تا ۱۵	-----	-----	-----	-----
۱۶	افزایش کسری عرضه؛ افزایش فشار و هزینه های عملیاتی؛ قطعی و محدودیت گاز صنایع و نیروگاه ها؛ اختلال در تولید و خدمات؛ افزایش نیاز به واردات؛ نارضایتی عمومی؛ افزایش آلودگی؛ پیامدهای اقتصادی و زیست محیطی؛ تهدید پایداری تأمین انرژی	پیامدهای اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و تأمین انرژی	۱۶	P۱ تا P۱۶

نتایج تحلیل نشان داد که کدهای اولیه در قالب ۱۶ مضمون فرعی سازمان دهی شدند. بیشتر این مضامین در تمامی مصاحبه ها مشاهده شدند که نشان دهنده اشتراک قابل توجه دیدگاه مشارکت کنندگان درباره عوامل و سازوکارهای ناترازی گاز است. باین حال، نوع تأکید افراد با توجه به حوزه تخصص و تجربه حرفه ای آنان متفاوت بود. مشارکت کنندگان بخش خانگی و توزیع شهری بیشتر بر مصرف زمستانی، افت فشار، قیمت یارانه ای و ضعف آگاهی مصرف کنندگان تأکید داشتند؛ در حالی که مدیران و متخصصان بخش صنعت، تولید و برنامه ریزی، محدودیت زیرساخت، بهره وری تجهیزات، سرمایه گذاری، تأخیرهای زمانی و روابط باخوردی را برجسته تر دانستند. در مجموع، مضامین

استخراج‌شده نشان دادند که ناترازی گاز پدیده‌ای تک‌عاملی نیست، بلکه حاصل تعامل میان الگوی تقاضا، رفتار مصرف‌کنندگان، سیاست‌های قیمتی، ظرفیت و کیفیت زیرساخت، شرایط اقلیمی، فناوری، آموزش و ضعف هماهنگی نهادی است. تکرار مضامین در مصاحبه‌های پایانی نیز موجب تأیید و تثبیت طبقات موجود شد و مضمون جدیدی خارج از ساختار تحلیل ایجاد نکرد. در مرحله بعد، این ۱۶ مضمون فرعی بر اساس نزدیکی مفهومی و نقش آن‌ها در مدل پژوهش، در قالب مضامین اصلی دسته‌بندی شدند.

• استخراج و تبیین مضامین اصلی

پس از دسته‌بندی کدهای اولیه و استخراج ۱۶ مضمون فرعی، این مضامین بر اساس شباهت مفهومی، نقش آن‌ها در فرایند شکل‌گیری ناترازی و ارتباط میان آن‌ها، در قالب هفت مضمون اصلی سازمان‌دهی شدند. این مرحله به تبیین ساختار مفهومی پژوهش و شناسایی ابعاد اصلی ناترازی گاز کمک کرد و مبنای طراحی مدل علی پژوهش قرار گرفت. جدول (۳) خلاصه نتایج این طبقه‌بندی را نشان می‌دهد.

جدول (۳) دسته‌بندی مضامین فرعی در قالب مضامین اصلی

ردیف	مضمون اصلی	مضامین فرعی مرتبط	مضامین فرعی	نقش در فرایند ناترازی
۱	ساختار تقاضا و الگوی مصرف	نوسانات فصلی و تمرکز زمانی تقاضا؛ تفاوت نقش بخش‌های مصرف‌کننده و هم‌زمانی مصارف؛ رفتار غیرکارای مصرف‌کنندگان	۳	عامل مستقیم ایجاد فشار تقاضا
۲	سیاست‌گذاری و حکمرانی انرژی	ناکارآمدی نظام قیمت‌گذاری و یارانه‌ای؛ ضعف هماهنگی، پیش‌بینی و برنامه‌ریزی تقاضا؛ اصلاح سیاست‌های قیمتی و ایجاد مشوق‌های مصرف بهینه	۳	عامل زمینه‌ساز و هدایت‌کننده رفتار مصرف
۳	ظرفیت فنی و زیرساختی	محدودیت ظرفیت زیرساخت‌ها و شبکه گاز؛ فرسودگی، ضعف نگهداری و پایین بودن بهره‌وری تجهیزات؛ توسعه زیرساخت، سرمایه‌گذاری و افزایش انعطاف شبکه	۳	عامل تعیین‌کننده توان پاسخ‌گویی عرضه
۴	مدیریت مصرف، فناوری و بهره‌وری	ضعف آموزش، آگاهی و فرهنگ مصرف بهینه؛ فناوری‌های هوشمند، پایش و کنترل شبکه؛ محدودیت پوشش و اثربخشی برنامه‌های بهینه‌سازی	۳	عامل میانجی و تعدیل‌کننده
۵	عوامل اقلیمی و محیطی	اثر عوامل اقلیمی و شرایط محیطی	۱	عامل زمینه‌ای و محرک بیرونی
۶	پویایی‌های زمانی و بازخوردی سیستم	تأخیر زمانی اثر سیاست‌ها و اقدامات اصلاحی؛ تعاملات بازخوردی و پویایی سیستم گاز	۲	سازوکار انتقال و تشدید اثر
۷	پیامدهای ناترازی گاز	پیامدهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و تأمین ناترازی	۱	خروجی و پیامد نهایی سیستم
	جمع		۱۶	

نتایج نشان داد که ناترازی گاز پدیده‌ای چندبعدی است و از تعامل هم‌زمان عوامل مرتبط با تقاضا، سیاست‌گذاری، زیرساخت، فناوری، شرایط اقلیمی و سازوکارهای بازخوردی شکل می‌گیرد. این هفت مضمون اصلی، چارچوب مفهومی پژوهش را تشکیل داده و مبنای طراحی مدل علی و آزمون روابط میان متغیرها در مرحله کمی قرار گرفتند.

پس از استخراج هفت مضمون اصلی، روابط مفهومی میان آن‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که این مضامین به‌صورت مستقل عمل نمی‌کنند، بلکه از طریق روابط مستقیم، غیرمستقیم و بازخوردی در شکل‌گیری ناترازی گاز نقش دارند. بر اساس یافته‌های کیفی، ناترازی زمانی ایجاد می‌شود که فشار تقاضا از ظرفیت تولید، انتقال، توزیع و مدیریت مصرف فراتر رود و این وضعیت تحت تأثیر عواملی مانند سیاست‌های انرژی، رفتار مصرف‌کنندگان، زیرساخت‌ها، فناوری، شرایط اقلیمی و تأخیرهای زمانی تشدید یا کنترل می‌شود. روابط شناسایی‌شده در این مرحله، مبنای طراحی مدل علی و آزمون آن در بخش کمی پژوهش قرار گرفت.

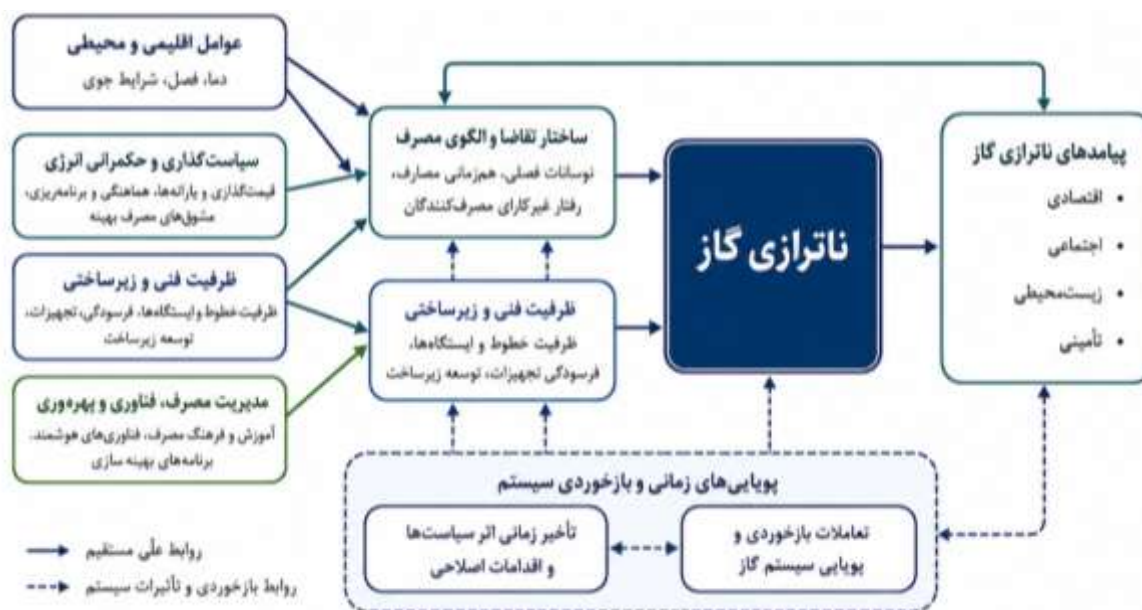
جدول (۴) روابط مفهومی میان مضامین اصلی پژوهش

ردیف	مضمون مبدأ	مضمون مقصد	نوع رابطه	تبیین رابطه
۱	عوامل اقلیمی و محیطی	ساختار تقاضا و الگوی مصرف	تشدیدکننده مستقیم	کاهش شدید دما، مصرف خانگی را در زمستان افزایش می‌دهد و افزایش دما، تقاضای گاز نیروگاه‌ها را در فصل گرم بیشتر می‌کند.
۲	ظرفیت فنی و زیرساختی	ظرفیت فنی و زیرساختی	کاهنده ظرفیت عملیاتی	سرما، بارش و شرایط نامساعد جوی می‌توانند عملکرد خطوط، ایستگاه‌ها و عملیات تعمیر و نگهداری را مختل کنند.
۳	سیاست‌گذاری و حکمرانی انرژی	ساختار تقاضا و الگوی مصرف	اثرگذاری غیرمستقیم از طریق رفتار	قیمت پایین، یارانه‌های غیرهدفمند و تعرفه‌های ناکارآمد، انگیزه صرفه‌جویی را کاهش داده و مصرف غیرضروری را افزایش می‌دهند.
۴	ظرفیت فنی و زیرساختی	ظرفیت فنی و زیرساختی	اثرگذاری بلندمدت	کیفیت برنامه‌ریزی، سرمایه‌گذاری و هماهنگی نهادی بر توسعه، نگهداری و انعطاف زیرساخت‌ها اثر می‌گذارد.
۵	ساختار تقاضا و الگوی مصرف	ساختار تقاضا و الگوی مصرف	تشدیدکننده مستقیم	افزایش فصلی، هم‌زمانی پیک بخش‌ها و رفتار غیرکاری مصرف‌کنندگان، شکاف میان تقاضا و عرضه قابل دسترس را افزایش می‌دهد.
۶	ناترازی گاز	ناترازی گاز	رابطه معکوس	محدودیت خطوط، ایستگاه‌ها و ذخیره‌سازی موجب تشدید ناترازی می‌شود؛ در مقابل، توسعه ظرفیت و انعطاف شبکه، آن را کاهش می‌دهد.
۷	مدیریت مصرف، فناوری و بهره‌وری	ساختار تقاضا و الگوی مصرف	کاهنده و تعدیل‌کننده	آموزش، کنترلهای هوشمند، تجهیزات کم‌مصرف و مدیریت انرژی می‌توانند مصرف غیرضروری و پیک تقاضا را کاهش دهند.
۸	ظرفیت فنی و زیرساختی	ظرفیت فنی و زیرساختی	تقویت‌کننده عملکرد	پایش لحظه‌ای، کنترل هوشمند و هشدار سریع، بهره‌برداری مؤثرتر از ظرفیت موجود شبکه را امکان‌پذیر می‌کنند.
۹	پویایی‌های زمانی بازخوردی	سیاست‌ها و اقدامات اصلاحی	تأخیری	نتایج اصلاح قیمت، آموزش، نوسازی تجهیزات و توسعه زیرساخت با فاصله زمانی ظاهر می‌شوند.
۱۰	ناترازی گاز	ناترازی گاز	تداوم‌دهنده یا کنترل‌کننده	حلقه‌های بازخوردی ممکن است فشار تقاضا و محدودیت عرضه را تشدید کنند یا از طریق اصلاح رفتار و مداخله مدیریتی آن را کاهش دهند.
۱۱	ناترازی گاز	پیامدهای ناترازی	رابطه پیامدی مستقیم	افزایش شکاف عرضه و تقاضا به افت فشار، محدودیت تأمین، اختلال تولید، افزایش هزینه، آلودگی و نارضایتی عمومی منجر می‌شود.
۱۲	پیامدهای ناترازی	سیاست‌گذاری و رفتار مصرف	رابطه بازخوردی	آشکار شدن قطعی‌ها، هزینه‌ها و نارضایتی می‌تواند سیاست‌گذاران و مصرف‌کنندگان را به اصلاح تصمیم‌ها و رفتارها وادار کند.

نتایج نشان داد که ناترازی گاز حاصل تعامل هم‌زمان عوامل مرتبط با تقاضا، سیاست‌گذاری، زیرساخت، فناوری، شرایط اقلیمی و سازوکارهای بازخوردی است. افزایش تقاضا، همراه با سیاست‌های ناکارآمد و محدودیت‌های زیرساختی، زمینه شکل‌گیری ناترازی را فراهم می‌کند، درحالی‌که مدیریت مصرف، فناوری و بهبود بهره‌وری می‌توانند این وضعیت را تعدیل کنند. همچنین، تأخیرهای زمانی و روابط بازخوردی بر شدت و تداوم ناترازی اثرگذار هستند. بر این اساس، کنترل پایدار ناترازی مستلزم مداخلات هماهنگ در ابعاد فنی، مدیریتی، اقتصادی و رفتاری است و این روابط، مبنای تدوین مدل مفهومی پژوهش را تشکیل دادند.

• ارائه مدل مفهومی بخش کیفی پژوهش

بر اساس نتایج تحلیل مضمونی، مدل مفهومی بخش کیفی پژوهش تدوین شد. این مدل، عوامل مؤثر بر ناترازی گاز، روابط میان آن‌ها و پیامدهای حاصل را در یک چارچوب منسجم نشان می‌دهد. یافته‌ها بیانگر آن است که ناترازی گاز نتیجه تعامل هم‌زمان عوامل مرتبط با تقاضا، سیاست‌گذاری، زیرساخت، مدیریت مصرف، فناوری و شرایط اقلیمی است و تأخیرهای زمانی و روابط بازخوردی نیز در تشدید یا تعدیل این پدیده نقش دارند. این مدل، مبنای طراحی مدل پژوهش و آزمون روابط میان متغیرها در بخش کمی قرار گرفت.



شکل (۱) مدل مفهومی بخش کیفی پژوهش

• استخراج ابعاد، شاخص‌ها و گویه‌های اولیه پرسشنامه

بر اساس یافته‌های مرحله کیفی، ابعاد، مؤلفه‌ها و گویه‌های اولیه پرسشنامه طراحی شدند. در این مرحله، هفت مضمون اصلی و ۱۶ مضمون فرعی استخراج شده از مصاحبه‌ها به متغیرهای قابل سنجش تبدیل شدند. همچنین، «شدت ناترازی گاز» به عنوان متغیر کانونی مدل به طور مستقل در پرسشنامه در نظر گرفته شد. تمامی گویه‌ها در قالب طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت تنظیم شدند و جدول (۵) خلاصه ابعاد و مؤلفه‌های اولیه پرسشنامه را نشان می‌دهد.

جدول (۵) ابعاد و مؤلفه‌های اولیه پرسشنامه برآمده از یافته‌های کیفی

ردیف	بعد اصلی	مؤلفه‌ها و مضامین فرعی	تعداد گویه
۱	فشار تقاضا و الگوی مصرف	نوسانات فصلی، هم‌زمانی مصرف، رفتار غیرکارای مصرف‌کنندگان	۵
۲	کیفیت سیاست‌گذاری و حکمرانی انرژی	نظام قیمت‌گذاری، هماهنگی نهادی، برنامه‌ریزی تقاضا، مشوق‌های اقتصادی	۵
۳	ظرفیت و قابلیت اطمینان زیرساختی	ظرفیت شبکه، ذخیره‌سازی، نگهداری تجهیزات، توسعه زیرساخت	۵
۴	مدیریت مصرف، فناوری و بهره‌وری	آموزش، فناوری‌های هوشمند، پایش و کنترل، بهره‌وری	۵
۵	فشارهای اقلیمی و محیطی	شرایط اقلیمی و اثر آن بر تقاضا و عملکرد شبکه	۴
۶	پیچیدگی‌های زمانی و بازخوردی سیستم	تأخیرهای زمانی و روابط بازخوردی	۵
۷	شدت ناترازی گاز	شکاف عرضه و تقاضا، افت فشار، محدودیت انتقال	۵
۸	پیامدهای ناترازی گاز	پیامدهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و تأمینی	۶
	جمع		۴۰

۲-۴. یافته‌های بخش کمی

• شاخص‌های توصیفی متغیرهای پژوهش

برای توصیف متغیرهای اصلی پژوهش، شاخص‌های حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و واریانس محاسبه شد. با توجه به استفاده از طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت، مقدار ۳ به عنوان نقطه میانی مقیاس در نظر گرفته شد. نتایج شاخص‌های توصیفی در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول (۶) شاخص‌های توصیفی متغیرهای اصلی پژوهش

ردیف	متغیر	تعداد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	واریانس
۱	فشار تقاضا و الگوی مصرف	۳۰۰	۱/۲۰	۵/۰۰	۳/۳۸۶	۰/۹۳۱	۰/۸۶۶
۲	کیفیت سیاست‌گذاری و حکمرانی انرژی	۳۰۰	۱/۰۰	۵/۰۰	۲/۷۶۴	۰/۹۳۹	۰/۸۸۲
۳	ظرفیت و قابلیت اطمینان زیرساختی	۳۰۰	۱/۰۰	۵/۰۰	۲/۸۶۵	۱/۰۰۷	۱/۰۱۴
۴	مدیریت مصرف، فناوری و بهره‌وری	۳۰۰	۱/۰۰	۵/۰۰	۳/۰۶۵	۰/۹۳۷	۰/۸۷۸
۵	فشارهای اقلیمی و محیطی	۳۰۰	۱/۰۰	۵/۰۰	۳/۵۱۸	۰/۹۸۶	۰/۹۷۲
۶	پیچیدگی‌های زمانی و بازخوردی سیستم	۳۰۰	۱/۰۰	۵/۰۰	۳/۳۳۸	۱/۰۱۶	۱/۰۳۲
۷	شدت ناترازی گاز	۳۰۰	۱/۰۰	۵/۰۰	۳/۴۴۰	۰/۹۴۱	۰/۸۸۶
۸	پیامدهای ناترازی گاز	۳۰۰	۱/۰۰	۵/۰۰	۳/۳۷۷	۰/۹۳۳	۰/۸۷۱

نتایج نشان داد که «فشارهای اقلیمی و محیطی» با میانگین ۳/۵۱۸ بیشترین میانگین را داشته و پس از آن «شدت ناترازی گاز» (۳/۴۴۰) و «فشار تقاضا و الگوی مصرف» (۳/۳۸۶) قرار دارند. در مقابل، میانگین «کیفیت سیاست‌گذاری و حکمرانی انرژی» (۲/۷۶۴) و «ظرفیت و قابلیت اطمینان زیرساختی» (۲/۸۶۵) کمتر از نقطه میانی مقیاس بوده که بیانگر ارزیابی نامطلوب پاسخ‌دهندگان از این دو بعد است. همچنین، انحراف معیار متغیرها بین ۰/۹۳۱ تا ۱/۰۱۶ قرار داشت که نشان‌دهنده پراکندگی قابل قبول پاسخ‌ها و مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل‌های استنباطی است.

بررسی شکل توزیع متغیرهای پژوهش

برای بررسی شکل توزیع متغیرهای پژوهش، شاخص‌های چولگی و کشیدگی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴-۱۴ ارائه شده است.

جدول (۷) شاخص‌های مربوط به شکل توزیع متغیرهای پژوهش

متغیر	حداقل	حداکثر	دامنه تغییرات	دامنه چارکی	بین چولگی	خطای چولگی	استاندارد کشیدگی	خطای کشیدگی	استاندارد
فشار تقاضا و الگوی مصرف	۱/۲۰	۵/۰۰	۳/۸۰	۱/۳۵	-۰/۲۲۶	۰/۱۴۱	-۰/۶۵۹	۰/۲۸۱	
کیفیت سیاست‌گذاری و حکمرانی انرژی	۱/۰۰	۵/۰۰	۴/۰۰	۱/۴۰	۰/۱۴۵	۰/۱۴۱	-۰/۷۰۸	۰/۲۸۱	
ظرفیت و قابلیت اطمینان زیرساختی	۱/۰۰	۵/۰۰	۴/۰۰	۱/۴۰	۰/۰۷۱	۰/۱۴۱	-۰/۷۴۶	۰/۲۸۱	
مدیریت مصرف، فناوری و بهره‌وری	۱/۰۰	۵/۰۰	۴/۰۰	۱/۴۰	-۰/۰۲۴	۰/۱۴۱	-۰/۷۱۰	۰/۲۸۱	
فشارهای اقلیمی و محیطی	۱/۰۰	۵/۰۰	۴/۰۰	۱/۴۴	-۰/۳۱۶	۰/۱۴۱	-۰/۷۰۴	۰/۲۸۱	
پیچیدگی‌های زمانی و بازخوردی سیستم	۱/۰۰	۵/۰۰	۴/۰۰	۱/۶۰	-۰/۲۲۶	۰/۱۴۱	-۰/۸۳۱	۰/۲۸۱	
شدت ناترازی گاز	۱/۰۰	۵/۰۰	۴/۰۰	۱/۴۰	-۰/۳۴۱	۰/۱۴۱	-۰/۵۵۵	۰/۲۸۱	
پیامدهای ناترازی گاز	۱/۰۰	۵/۰۰	۴/۰۰	۱/۴۶	-۰/۱۹۳	۰/۱۴۱	-۰/۶۵۲	۰/۲۸۱	

بررسی نتایج نشان داد که مقادیر چولگی و کشیدگی تمامی متغیرها در دامنه قابل قبول قرار دارند. مقدار چولگی بین -۰/۳۴۱ تا ۰/۱۴۵ و مقدار کشیدگی بین -۰/۸۳۱ تا -۰/۵۵۵ متغیر بود که بیانگر انحراف ناچیز از توزیع نرمال است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که

توزیع متغیرهای پژوهش از نرمال بودن تک‌متغیره مناسبی برخوردار بوده و داده‌ها برای انجام تحلیل‌های استنباطی و مدل‌سازی معادلات ساختاری مناسب هستند.

• ارزیابی مدل اندازه‌گیری

پس از تأیید کیفیت داده‌ها، مدل اندازه‌گیری با استفاده از رویکرد حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) ارزیابی شد. در این مرحله، بارهای عاملی، پایایی سازه‌ها، روایی همگرا و روایی واگرا بررسی شدند تا از کفایت مدل اندازه‌گیری اطمینان حاصل شود.

• بررسی بارهای عاملی گویه‌ها

بارهای عاملی تمامی ۴۰ گویه بیشتر از ۰/۷۰ بود و در بازه ۰/۷۸۶ تا ۰/۸۷۴ قرار گرفت؛ بنابراین، همه گویه‌ها ارتباط مناسبی با سازه‌های مربوطه داشته و هیچ گویه‌ای از مدل حذف نشد.

جدول (۸) خلاصه نتایج بارهای عاملی گویه‌ها

شاخص	مقدار
کمترین بار عاملی	۰/۷۸۶
بیشترین بار عاملی	۰/۸۷۴
تعداد گویه‌ها	۴۰
گویه حذف‌شده	۰

• بررسی پایایی سازه‌ها و روایی همگرا

نتایج نشان داد که تمامی سازه‌ها از پایایی و روایی همگرای مطلوب برخوردار هستند. مقادیر آلفای کرونباخ، ρ_A و پایایی ترکیبی همگی بیشتر از ۰/۷۰ و مقادیر AVE نیز بیشتر از ۰/۵۰ بود که تأییدکننده کیفیت مناسب مدل اندازه‌گیری است.

جدول (۹) خلاصه نتایج پایایی و روایی همگرا

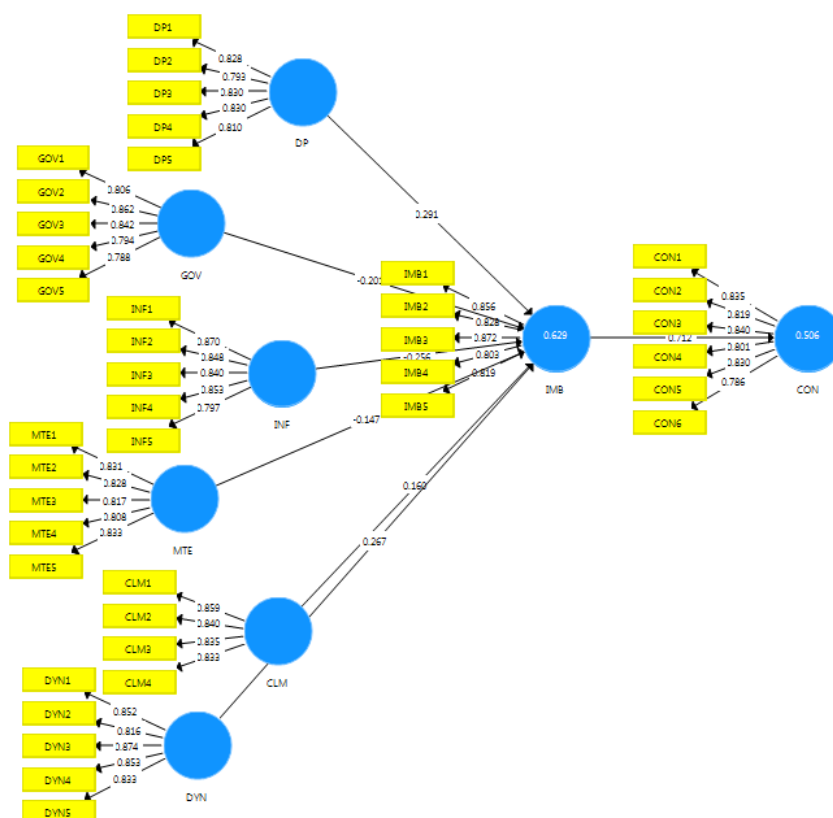
شاخص	دامنه مقادیر
آلفای کرونباخ	۰/۸۶۳ تا ۰/۹۰۱
ρ_A	۰/۸۶۶ تا ۰/۹۰۳
پایایی ترکیبی	۰/۹۰۷ تا ۰/۹۲۶
AVE	۰/۶۷۰ تا ۰/۷۱۵

• بررسی روایی واگرا

روایی واگرای سازه‌ها با استفاده از معیار HTMT ارزیابی شد. تمامی مقادیر HTMT کمتر از مقدار بحرانی ۰/۸۵ بودند و در بازه ۰/۰۵۹ تا ۰/۷۹۰ قرار داشتند؛ بنابراین، تمایز مفهومی و تجربی میان سازه‌های پژوهش تأیید شد و مدل اندازه‌گیری از روایی واگرای مطلوب برخوردار است.

جدول (۱۰) خلاصه نتایج روایی واگرا (HTMT)

شاخص	مقدار
کمترین مقدار HTMT	۰/۰۵۹
بیشترین مقدار HTMT	۰/۷۹۰
حد قابل قبول	کمتر از ۰/۸۵
نتیجه	تأیید روایی واگرا



شکل (۲) مدل پژوهش در حالت ضرایب استاندارد شده الگوریتم حداقل مربعات جزئی

• بررسی هم خطی میان سازه های پیش بین

پیش از آزمون روابط ساختاری، هم خطی میان سازه های پیش بین با استفاده از شاخص عامل تورم واریانس (VIF) بررسی شد. نتایج نشان داد که تمامی مقادیر VIF در بازه ۱/۰۰۰ تا ۱/۳۹۱ قرار دارند که به مراتب کمتر از حد آستانه ۵ هستند؛ بنابراین، مشکل هم خطی در مدل وجود نداشته و امکان برآورد مستقل ضرایب مسیر فراهم است.

جدول (۱۱) خلاصه نتایج شاخص VIF

شاخص	مقدار
کمترین VIF	۱/۰۰۰
بیشترین VIF	۱/۳۹۱
نتیجه	عدم وجود هم خطی

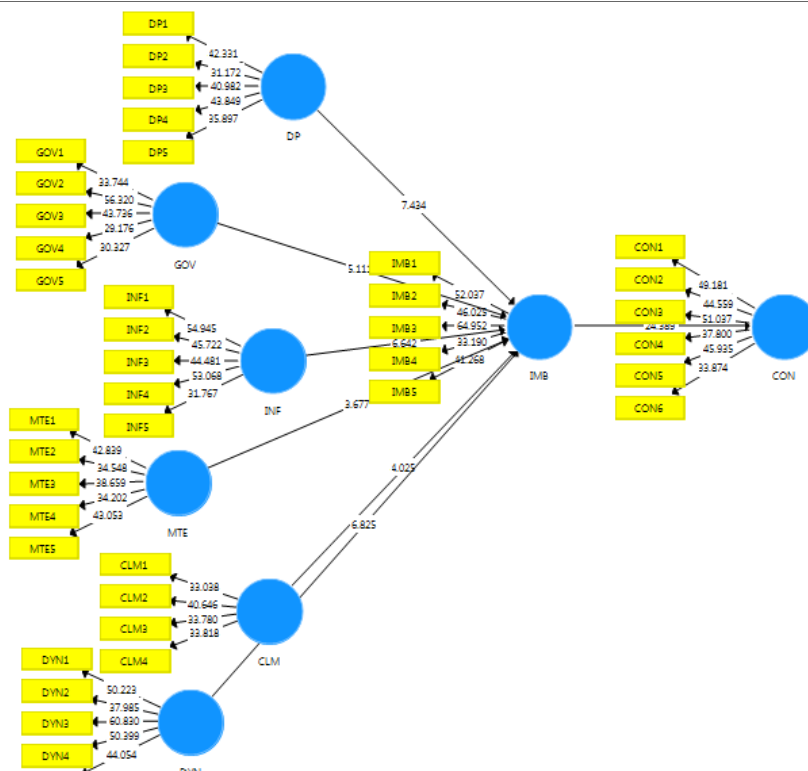
• بررسی معناداری ضرایب مسیر

برای آزمون فرضیه های پژوهش، از روش بوت استرپ استفاده شد. نتایج نشان داد که همه مسیرهای مدل از نظر آماری معنادار هستند؛ به گونه ای که مقدار آماره t در تمامی روابط بیش از ۱۰۹۶ و مقدار p در همه آنها کمتر از ۰۰۰۱ بود. بیشترین اثر در مدل مربوط به رابطه «شدت ناترازی گاز» و «پیامدهای ناترازی» با ضریب مسیر ۰۰۷۱۲ بود. همچنین، متغیرهای «فشار تقاضا و الگوی مصرف» (ضریب مسیر ۰۰۲۹۱)، «پیچیدگی های زمانی و بازخوردی» (ضریب مسیر ۰۰۲۶۷) و «فشارهای اقلیمی و محیطی» (ضریب مسیر ۰۰۱۶۰) اثر مثبت و معناداری بر شدت ناترازی گاز داشتند. در مقابل، متغیرهای «ظرفیت و قابلیت اطمینان زیرساختی» (ضریب مسیر ۰۰۲۵۶-)، «کیفیت

سیاست‌گذاری و حکمرانی انرژی» (ضریب مسیر ۰/۲۰۱) و «مدیریت مصرف، فناوری و بهره‌وری» (ضریب مسیر ۰/۱۴۷) اثر منفی و معناداری بر شدت ناترازی گاز نشان دادند.

جدول (۱۲) خلاصه نتایج آزمون ضرایب مسیر

شاخص	نتیجه
تعداد مسیرهای آزمون‌شده	۷
مسیرهای معنادار	۷
سطح معناداری	$p < ۰.۰۰۱$
بیشترین ضریب مسیر	۰/۷۱۲
نتیجه کلی	تأیید تمامی فرضیه‌های مدل



شکل (۳) مدل پژوهش در حالت آماره‌های t حاصل از روش بوت‌استرپ

• نتایج بوت‌استرپ شاخص‌های برازش دقیق مدل

برای ارزیابی برازش دقیق مدل، از شاخص‌های $SRMR$ ، d_ULS و d_G در هر دو مدل اشباع‌شده و برآوردشده استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون بوت‌استرپ در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۱۳) نتایج بوت‌استرپ شاخص‌های برازش دقیق مدل

شاخص و مدل	مقدار اصلی	میانگین بوت‌استرپ	حد ۹۵٪	حد ۹۹٪	نتیجه
$SRMR$ مدل اشباع‌شده	۰/۰۴۳	۰/۰۳۹	۰/۰۴۲	۰/۰۴۳	در سطح ۹۹٪ مرزی
$SRMR$ مدل برآوردشده	۰/۰۴۷	۰/۰۴۲	۰/۰۴۶	۰/۰۴۹	قابل قبول در سطح ۹۹٪
d_ULS مدل اشباع‌شده	۱/۵۲۸	۱/۲۲۲	۱/۴۳۹	۱/۵۴۳	قابل قبول در سطح ۹۹٪
d_ULS مدل برآوردشده	۱/۸۰۲	۱/۴۳۵	۱/۷۵۲	۱/۹۶۰	قابل قبول در سطح ۹۹٪
d_G مدل اشباع‌شده	۰/۶۰۱	۰/۵۹۹	۰/۶۸۱	۰/۷۲۲	قابل قبول در سطح ۹۵٪
d_G مدل برآوردشده	۰/۶۱۱	۰/۶۰۶	۰/۶۸۷	۰/۷۲۶	قابل قبول در سطح ۹۵٪

نتایج نشان داد که شاخص d_G در هر دو مدل، برازش دقیق را در سطح اطمینان ۹۵ درصد تأیید می‌کند. همچنین، مقادیر d_ULS و $SRMR$ در سطح اطمینان ۹۹ درصد در محدوده قابل قبول قرار دارند. از سوی دیگر، مقدار $SRMR$ در هر دو مدل کمتر از آستانه ۰/۰۸ است که بیانگر برازش مناسب مدل است. در مجموع، نتایج آزمون بوت‌استرپ حاکی از آن است که مدل پژوهش از برازش مطلوب و قابل قبول برخوردار است.

انطباق مضامین کیفی با سازه‌های مدل کمی

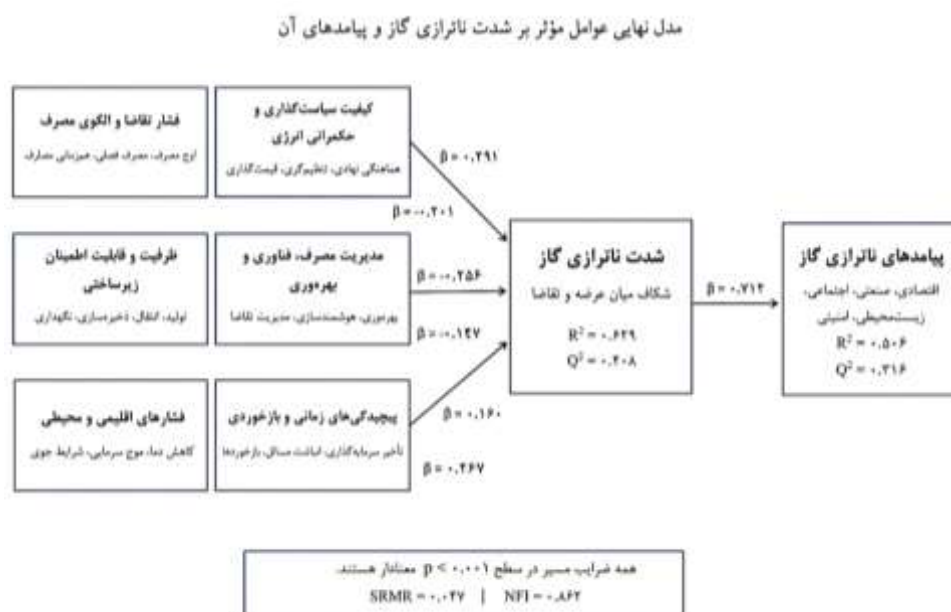
مقایسه یافته‌های دو مرحله نشان داد که مضامین اصلی استخراج‌شده در بخش کیفی، در مدل کمی در قالب شش سازه مؤثر بر شدت ناترازی گاز، یک سازه مربوط به شدت ناترازی و یک سازه مربوط به پیامدهای آن عملیاتی شدند. نتایج تلفیقی در جدول (۱۴) ارائه شده است.

جدول (۱۴) تلفیق یافته‌های کیفی و کمی پژوهش

مضمون اصلی بخش کیفی	سازه متناظر در بخش کمی	ضریب مسیر	آماره t	نتیجه تلفیقی
افزایش و نوسان تقاضا و نامتوازن بودن الگوی مصرف	فشار تقاضا و الگوی مصرف	۰/۲۹۱	۷/۰۸۸	تأیید و همگرایی یافته‌ها
ضعف هماهنگی، سیاست‌گذاری و حکمرانی انرژی	کیفیت سیاست‌گذاری و حکمرانی انرژی	-۰/۲۰۱	۴/۹۷۶	تأیید و همگرایی یافته‌ها
محدودیت ظرفیت و کاهش قابلیت اطمینان زیرساخت‌ها	ظرفیت و قابلیت اطمینان زیرساختی	-۰/۲۵۶	۶/۶۰۰	تأیید و همگرایی یافته‌ها
ضعف مدیریت مصرف، فناوری و بهره‌وری انرژی	مدیریت مصرف، فناوری و بهره‌وری	-۰/۱۴۷	۳/۵۲۲	تأیید و همگرایی یافته‌ها
تأثیر شرایط اقلیمی و محیطی بر مصرف و عرضه	فشارهای اقلیمی و محیطی	۰/۱۶۰	۴/۰۲۴	تأیید و همگرایی یافته‌ها
تأخیرهای زمانی، بازخوردها و انباشت مسائل	پیچیدگی‌های زمانی و بازخوردی	۰/۲۶۷	۶/۷۹۰	تأیید و همگرایی یافته‌ها
گسترش شکاف میان عرضه و تقاضای گاز	شدت ناترازی گاز	-	-	سازه مرکزی مدل
پیامدهای اقتصادی، صنعتی، اجتماعی، زیست‌محیطی و امنیتی	پیامدهای ناترازی گاز	۰/۷۱۲	۲۴/۶۵۳	تأیید قوی رابطه

بر اساس جدول (۱۴)، تمام سازه‌هایی که از مرحله کیفی استخراج و در مدل کمی وارد شدند، دارای روابط معنادار با شدت ناترازی گاز یا پیامدهای آن بودند. از این‌رو، میان یافته‌های کیفی و کمی همگرایی قابل‌توجهی مشاهده شد و هیچ‌یک از عوامل اصلی شناسایی شده در بخش کیفی در مرحله کمی رد نشد.

مدل نهایی پژوهش با تلفیق یافته‌های کیفی و نتایج مدل‌سازی معادلات ساختاری تدوین شد و نشان داد که شش عامل شامل فشار تقاضا، کیفیت حکمرانی، ظرفیت زیرساختی، مدیریت مصرف، عوامل اقلیمی و پیچیدگی‌های زمانی، شدت ناترازی گاز را تبیین می‌کنند. نتایج بیانگر آن بود که فشار تقاضا، عوامل اقلیمی و پیچیدگی‌های زمانی موجب تشدید ناترازی، در حالی که بهبود زیرساخت‌ها، حکمرانی و مدیریت مصرف باعث کاهش آن می‌شوند. همچنین، شدت ناترازی با ضریب مسیر ۰/۷۱۲ مهم‌ترین عامل ایجاد پیامدهای اقتصادی، صنعتی، اجتماعی، زیست‌محیطی و امنیتی بوده و مدل از قدرت تبیین مناسبی برخوردار است.



شکل (۴) مدل نهایی عوامل مؤثر بر شدت ناترازی گاز و پیامدهای آن

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ناترازی گاز پدیده‌ای چندبعدی است و از تعامل هم‌زمان عوامل تقاضایی، زیرساختی، مدیریتی، نهادی، اقلیمی و زمانی شکل می‌گیرد. یافته‌ها بیانگر آن بود که فشار تقاضا و الگوی مصرف، پیچیدگی‌های زمانی و عوامل اقلیمی موجب افزایش شدت ناترازی می‌شوند، در حالی که توسعه زیرساخت‌ها، ارتقای کیفیت حکمرانی انرژی و بهبود مدیریت مصرف و بهره‌وری نقش مؤثری در کاهش آن دارند. از این‌رو، ناترازی گاز را نمی‌توان صرفاً با افزایش تولید یا کنترل مصرف به‌تنهایی مدیریت کرد.

نتایج مدل ساختاری همچنین نشان داد که شدت ناترازی گاز متغیر محوری مدل است و به‌طور مستقیم پیامدهای اقتصادی، صنعتی، اجتماعی، زیست‌محیطی و امنیتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، استمرار ناترازی علاوه بر کاهش قابلیت اطمینان شبکه گاز، می‌تواند موجب اختلال در فعالیت صنایع، افزایش هزینه‌های تأمین انرژی، کاهش رفاه عمومی و تضعیف امنیت انرژی کشور شود. این یافته‌ها اهمیت پیشگیری از تشدید ناترازی را بیش از اقدامات مقطعی و واکنشی نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج پژوهش، کاهش پایدار ناترازی مستلزم مداخله هم‌زمان در هر دو بخش عرضه و تقاضا است. توسعه و نوسازی زیرساخت‌ها، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و انتقال، اصلاح سیاست‌گذاری و حکمرانی، ارتقای بهره‌وری انرژی و اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف باید به‌صورت هماهنگ دنبال شوند. همچنین، توجه به آثار تأخیری تصمیم‌ها و آمادگی در برابر تغییرات اقلیمی، از الزامات برنامه‌ریزی بلندمدت برای افزایش تاب‌آوری نظام گاز کشور به شمار می‌رود.

در مجموع، مدل ارائه‌شده در این پژوهش توانست تصویری جامع از عوامل مؤثر بر ناترازی گاز و روابط میان آن‌ها ارائه دهد و چارچوبی علمی برای تحلیل و مدیریت این مسئله فراهم سازد. بهره‌گیری از این مدل می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران صنعت گاز در طراحی راهبردهای مؤثر، کاهش شدت ناترازی و ارتقای امنیت انرژی کشور کمک کند.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

- Abbasi, J. (2017). Evaluation of gas supply-and-demand dynamics in Iran's residential sector. *Energy Research Journal*, 9(3), 62–87.
- Amiri, Z., Mohammadian Saravi, M., & Karimi Gorji, S. M. (2024). The role of smart technologies in improving energy policies and reducing the gas imbalance. *Futures Studies and Policy-Making Studies*, 10(3), 25–31.
- Arpino, F., Dell'Isola, M., Ficco, G., & Vigo, P. (2014). Unaccounted-for gas in natural gas transmission networks: Prediction and analysis. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 1123–1127.
- Botev, L., & Johnson, P. (2020). Applications of statistical process control in the management of unaccounted-for gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 76, Article 103194. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103194>
- Farhadi, S. (2019). The effect of energy subsidy reform policies on the national gas balance. *Iranian Journal of Economic Research*, 21(4), 34–59.
- Faryadres, S., Khani, A., & Rouhi, A. (2025). Dynamic modeling of gas consumption and pricing policies in Iran. *International Journal of Energy Studies*, 41(2), 77–98.
- Gao, H., Wu, Y., & Chen, T. (2025). Structural equation modeling of energy imbalance and demand elasticity: Evidence from East Asia. *Applied Energy*, 370(5), 118–134.
- Habibi, M., & Naderi, K. (2018). Price- and climate-related effects on natural gas consumption patterns. *Iranian Journal of Energy Economics*, 19(1), 45–68.
- Heidari, F., & Nasiri, M. (2015). Energy data analysis using a system dynamics approach. *Energy Engineering Quarterly*, 6(3), 11–29.
- Hosseini, S. (2019). An examination of natural gas consumption patterns in Iran's power-generation sector. *Journal of Engineering and the Environment*, 11(2), 81–102.
- Iran Energy Studies Institute. (2023). *Annual report on the national gas imbalance and corrective strategies*. Ministry of Petroleum.
- Iran Renewable Energy Organization (SANA). (2021). *Energy balance report 2021*. Ministry of Energy.
- Jafari, N., & Mahmoudi, F. (2022). A causal model of the effects of energy policies on natural gas consumption intensity. *Journal of Energy Planning*, 15(4), 92–115.
- Kani, A., Abbaspour, M., & Abedi, M. (2013). Natural gas demand function in Iran: A STR approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 17, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.01.003>
- Karimi, R., & Yousefi, M. (2019). Challenges associated with the natural gas imbalance and consumption optimization policies in Iran. *Journal of Energy Economics and Management*, 24(1), 54–77.
- Kazemi, A., & Rezaei, D. (2021). Evaluation of energy efficiency and pricing policies in Iran's residential gas sector. *Energy Economics Quarterly*, 23(2), 67–90.
- Kiarts, R., & Johansen, T. (2019). Smart energy management systems for gas distribution networks. *Energy Technology Journal*, 14(2), 119–145.
- Lee, J., & Park, S. (2023). Modeling feedback loops in national gas supply systems. *Energy Economics*, 122(3), 204–221.

- Manara, C. (2024). Integrating SEM and SD models to study household gas demand in Europe. *Energy Systems Review*, 12(1), 89–105.
- Mirzaei, S. (2022). Examining the effects of emerging technologies on gas consumption optimization in the industrial sector. *Journal of Energy Technology*, 10(3), 40–58.
- Mohammadpoor, M., & Torabi, F. (2018). Big data analytics in oil and gas industry: An emerging trend. *Petroleum*. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.11.001>
- Nemati, R., & Talebi, H. (2020). A systems analysis of the gas imbalance and the effects of environmental variables. *Journal of Economics and Energy Research*, 18(1), 70–95.
- Rajabi, H., & Sadeghi-Shahdani, M. (2025). An analysis of pricing policies and natural gas consumer behavior in Iran. *Iranian Economic Research Quarterly*, 25(1), 55–78.
- Salehi, N. (2016). A systems model of residential gas consumption with an emphasis on pricing policies. *Iranian Journal of Energy Management*, 7(2), 25–49.
- Sedigaz. (2020). *World natural gas report: Global balance, consumption, and trade patterns*. Sedigaz Press.
- Shafiq, M., Nisar, W. B., Savino, M. M., Rashid, Z., & Ahmad, Z. (2018). Monitoring and controlling of unaccounted-for gas (UFG) in distribution networks: A case study of SNGPL Pakistan. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 253–258. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.284>
- Soleimani, M. (2023). An examination of the factors affecting energy efficiency in Iran's gas-intensive industries. *Iranian Journal of Energy Management*, 8(2), 45–63.
- Statistical Center of Iran. (2014). *Statistical report on natural gas consumption in Iran*. Plan and Budget Organization.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.
- Upadhyay, D., & Sampalli, S. (2020). SCADA systems: Vulnerability assessment and security recommendations. *Computers & Security*, 89, Article 101666. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101666>
- Yang, L., Li, X., & Zhang, M. (2025). A system dynamics approach to modeling natural gas balance in developing economies. *Energy Policy*, 193(4), 122–137.
- Yazdani, P. (2020). The role of technical infrastructure in reducing the gas imbalance in Iran. *Journal of Energy Engineering*, 5(2), 23–46.
- Zafarian, A., Saberi, H., & Nasab-Nikkhah, M. (2023). *The national natural gas imbalance (Part 2): A framework of proposed solutions*. Islamic Parliament Research Center.
- Zhao, R., & Chen, L. (2023). Evaluating energy efficiency improvement and gas consumption behavior. *Journal of Cleaner Production*, 396(2), 45–61.