

Approaches and Challenges of Quantifying Water-Energy-Food Security Nexus in Urban Areas

Mohammad-Ali Moradi¹, Parvin Golfam²

1. Energy Systems Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: Muhammad.Morady@gmail.com
2. Corresponding Author, Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: P.Golfam@stu.qom.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 15 Sep 2024
Revised 27 Nov 2024
Accepted 11 Dec 2024
Published 25 Mar 2025

Keywords:

Water-Energy-Food Security Nexus,
Quantifying the Nexus,
Input-Output Analysis,
Concept of Portfolio.

ABSTRACT

Without the provision of adequate water resources, the production and distribution of various energy carriers become unfeasible; likewise, without a reliable energy supply, access to available water resources cannot be ensured. The absence of these two essential inputs places food security at significant risk. Although the interconnection among these three vital resources—water, energy, and food—is conceptually transparent, it is characterized by a highly complex and expansive network of interactions. The water-energy-food security nexus represents the integrated management of the most fundamental natural resources required to meet basic human needs, shaped by both internal and external drivers. The objective of the present study is to examine two widely adopted approaches for quantifying the water-energy-food security nexus in urban contexts: (1) input-output analysis grounded in modern resource management principles, and (2) the portfolio approach based on economic theory. Furthermore, the study aims to identify and elaborate on the key challenges associated with quantifying the nexus and developing a generalizable computational modeling framework—challenges that have remained largely unaddressed in previous research. A deeper understanding of these challenges facilitates the assessment of sectoral conflicts and supports the formulation of solutions that harmonize resource demand across different domains.

Cite this article: Moradi MA, Golfam P. Approaches and challenges of quantifying water-energy-food security nexus in urban areas. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(1): 17-26.
<https://doi.org/10.22091/wrcc.2024.11329.1004>.

Approaches and Challenges of Quantifying Water-Energy-Food Security Nexus in Urban Areas

Mohammad-Ali Moradi¹ , Parvin Golfam² 

1. Energy Systems Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: Muhammad.Morady@gmail.com
2. Corresponding Author, Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: P.Golfam@stu.qom.ac.ir

Extended Abstract

Background and Objective

Water, energy, and food are three foundational pillars of human survival and development, intricately linked in a dynamic and interdependent system. Without adequate water resources, the production and distribution of various energy carriers—such as hydropower, biofuels, and even cooling systems for thermal power plants—becomes severely constrained. Conversely, without a reliable energy supply, the extraction, treatment, and distribution of water resources are not feasible. This mutual dependency means that any disruption in one component directly affects the others. Consequently, food security is placed at significant risk when either water or energy availability is compromised, as agricultural production relies heavily on both for irrigation, processing, transportation, and storage.

Although the interconnection among these three vital resources may appear straightforward at first glance, the underlying relationships are highly complex, multifaceted, and influenced by a wide range of internal and external factors—including climate change, population growth, urbanization, and economic development. The concept of the water-energy-food security nexus refers to an integrated management approach aimed at optimizing the use of these essential natural resources to meet human needs sustainably. It requires a holistic understanding of how decisions in one sector impact the others, and how to navigate trade-offs and synergies across the system.

The present study aims to explore and critically evaluate two prominent methodologies used to quantify the water-energy-food security nexus in urban environments: (1) input-output analysis, which is rooted in modern resource management and systems thinking, and (2) the portfolio approach, derived from economic theory, which emphasizes diversification and risk management in resource allocation. In doing so, the study seeks to identify and articulate the key challenges that hinder the development of a robust and generalizable computational model for nexus analysis—challenges that have often been overlooked in previous research. These include data limitations, sectoral fragmentation, methodological inconsistencies, and the difficulty of capturing dynamic interactions over time.

By gaining a deeper understanding of these challenges, researchers and policymakers can better assess potential conflicts among sectors and devise strategies that promote balanced resource distribution, resilience, and long-term sustainability in urban settings.

Methodology

In general, the water-energy-food security nexus can be divided into the following groups from an economic perspective: (1) input-output analysis, (2) trade-off analysis, (3) economic modeling, (4) supply-chain analysis, (5) portfolio concept. Given the frequency of input-output analysis in nexus studies, the concept and history of its integration to the water-energy-food security nexus in urban areas will be described. The concept of portfolio management will also be investigated as a new tool in quantifying the nexus concept.

Findings

The nexus acts as a thread that interconnects a network of water, food, energy, climate, economic growth, and the challenges of human society that the global economy will face over the next two decades. Therefore, establishing a systematic framework that can guide this interconnection toward achieving tangible economic outcomes that benefit society as a whole is essential. Although the term 'water-energy-food security nexus' may seem to refer solely to the management of fundamental resources, its intrinsic meaning encompasses the management of the challenges facing human society

Conclusion

Given the newness of the nexus concept, it is difficult to achieve integrated quantification methods that can be extended across all spatial and temporal scales and are compatible with the political and economic structures of different countries in the short term. The present study investigated one of the most common methods of quantifying the nexus concept based on an economic theory and a new management method. The challenges in this field were also discussed, the resolution of which could be the subject of future research related to the concept of the water-energy-food security nexus.

Keywords: Water-energy-food security nexus, Quantifying the nexus, Input-output analysis, Concept of portfolio.

Cite this article: Moradi MA, Golfam P. Approaches and challenges of quantifying water-energy-food security nexus in urban areas. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(1): 17-26. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2024.11329.1004>.

Declarations

- **Ethical Approval**

■ The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

- **Competing interests**

■ Conflict of Interest - None

- **Availability of data and materials**

■ Data will be made available on the request.

- **Authors Contributions**

Parvin Golfam developed the theory and performed the computations. Mohammad Ali Moradi verified the analytical methods and encouraged Parvin Golfam to investigate a specific aspect. Mohammad Ali Moradi supervised the findings of this work. All authors discussed the results and contributed to the final manuscript. Parvin Golfam wrote the manuscript with support from Mohammad Ali Moradi. Parvin Golfam conceived the original idea.

- **Acknowledgements**

- The authors would like to thank all participants in the present study

- **Funding**

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

رویکردها و چالش‌های کمی‌سازی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی در مناطق شهری

محمدعلی مرادی^۱، پروین گلفام^۲

۱. گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: Muhammad.Morady@gmail.com
 ۲. نویسنده مسئول، دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: P.Golfam@stu.qom.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵ کلیدواژه‌ها: پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی، کمی‌سازی پیوند، تحلیل داده-ستانده، مفهوم پورتفولیو^۲.	بدون تأمین منابع آب کافی، تأمین انواع مختلف حامل‌های انرژی و بدون تأمین انرژی، دستیابی به منابع آب در دسترس امکان‌پذیر نیست و بدون تأمین این دو منبع، امنیت مواد غذایی دچار مخاطره خواهد شد. ارتباط میان این سه منبع حیاتی بشر، در عین شفافیت بسیار پیچیده و گسترده است. پیوند^۱ آب-انرژی-امنیت غذایی مدیریت اساسی‌ترین منابع طبیعی برای تأمین نیازهای اولیه بشر در سایه محرک‌های درونی و بیرونی آنها است. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی دو رویکرد بسیار پرکاربرد در کمی‌سازی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی در مناطق شهری شامل: (۱) تحلیل داده-ستانده بر مبنای مدیریت نوین و (۲) مفهوم پورتفولیو بر اساس نظریه اقتصادی و شرح مهم‌ترین چالش‌ها در کمی‌سازی پیوند و دستیابی به یک مدل‌سازی محاسباتی قابل تعمیم بر اساس پژوهش‌های پیشین است که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته‌اند. درک این چالش‌ها به ارزیابی تضادها و یافتن راه‌حلی که تقاضا در بخش‌های مختلف را متعادل می‌سازد، کمک می‌کند.

استناد: مرادی محمدعلی، گلفام پروین. رویکردها و چالش‌های کمی‌سازی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی در مناطق شهری. منابع آب و تغییر اقلیم.

<http://doi.org/10.22091/wrcc.2024.11329.1004> ۱۴۰۴؛ (۱) ۲۶-۱۷

²- Portfolio

³- Nexus

۱- مقدمه

افزایش جمعیت جهان، تغییر الگوی مصرف منابع طبیعی به علت توسعه شهرنشینی و تغییر استانداردهای زندگی و ایجاد فشار مضاعف بر منابع حیاتی [۱]، تغییرات اقلیمی شدید و مخاطرات زیست محیطی-اقتصادی-اجتماعی ناشی از آن، تنگناهای رشد اقتصادی کشورها به ویژه کشورهای در حال توسعه، از جمله معضلات رو به رشد در جهان امروز است. در صورت ادامه روند فعلی، چالش های پیش روی بشر در سال های آینده بیش تر و عمیق تر خواهند بود.

در تلاش برای برون رفت از این مشکلات فزاینده، مفهوم پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی به عنوان راه حلی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار تحت عنوان اقتصاد سبز^۳ ارائه شد [۲]. طبق تعریف برنامه محیط زیستی سازمان ملل^۴ (UNEP) اقتصاد سبز، اقتصادی است که منجر به بهبود رفاه بشر، افزایش عدالت اجتماعی و در عین حال کاهش چشم گیر میزان خسارت های زیست محیطی به علت کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و کاهش سطح آلودگی ناشی از آن و در نتیجه افزایش بهره وری منابع طبیعی است [۳].

در اقتصاد سبز، منابع طبیعی شامل منابع آب، منابع انرژی و محصولات غذایی ثروتی، با ارزش حیاتی اقتصادی به شمار می روند که رابطه ای ذاتی و درونی دارند بدین معنا که نمی توان تغییرات در هر منبع را بدون بررسی آثار مستقیم و غیرمستقیم آن در دو منبع دیگر در نظر گرفت. به عنوان مثال، آب برای تولید، استخراج، و فرآوری سوخت های فسیلی مورد نیاز است و برق برای انتقال آب از منابع به مصرف کننده ها ضروری است.

علاوه بر تعاملات و تقابلات مستقیم متقابل، محرک های خارجی نظیر تغییر اقلیم نیز این ارتباط را تحت

تأثیر قرار می دهد. کاهش منابع آب در دسترس ناشی از پدیده تغییر اقلیم، می تواند تولید محصولات کشاورزی را کاهش دهد و یا سبب افزایش مصرف انرژی در اثر افزایش دما گردد.

بنابراین، رویکرد پیوند تلاشی برای اجرایی کردن اهداف توسعه پایدار در به کارگیری بهینه و یک پارچه منابع طبیعی در جهت منافع بشری به منظور کمینه کردن اثرات بحران های خودساخته انسانی و رخ داده های طبیعی است. از آنجا که چگونگی وقوع رخ داده های طبیعی و انسانی و دامنه اثر مکانی و زمانی آنها در نقاط مختلف جهان متفاوت است، تعاریف متعددی برای مفهوم پیوند از سوی نهادها و سازمان های بین المللی و پژوهشگران ارائه شده است. ساندِرز^۵ و وِبر^۶، پیوند را تعامل میان بخش های مختلف در درون یک سامانه تعریف کردند [۴].

بخش خواروبار سازمان ملل متحد^۷ (FAO)، پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی را رویکردی تحلیلی برای کمی سازی ارتباطات میان گره های پیوند (یعنی آب، انرژی و امنیت غذایی) و ایجاد مدیریت یک پارچه منابع طبیعی در مقیاس های مختلف از طریق تعامل و تقابل مدیریتی بیان می کند [۵]. مجمع جهانی اقتصاد^۸ پیوند WEF را یکی از بزرگ ترین خطرات برای پایداری اقتصاد جهانی معرفی می کند [۶].

سازگاری با تغییر اقلیم برای بخش آب در منطقه منا^۹ (ACCWAM)، رویکرد تفکر پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی را تغییر در فعالیتهای تجاری معمول و ذهنیت فعلی، پیوند دادن و ارزش گذاری به بخش های موجود در پیوند به منظور کاهش تلفات و ایجاد یک هم افزایی به معنای تولید بیش تر با فشار کم تر بر منابع طبیعی تعریف کردند [۷]. منان^{۱۰} و همکاران، مصرف بهینه منابع و کمینه کردن اثرات زیست محیطی در تأمین محصولات و خدمات مختلف را هدف کلیدی رویکرد پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی

^۸- World Economic Forum

^۹- Adaptation to Climate Change for the Water Sector in the Mena Region

^{۱۰}- Mannan

^۳- Green Economic

^۴- United Nations Environment Program

^۵- Sanders

^۶- Webber

^۷- The Food and Agricultural Organization of the United Nations

بیش‌تر به‌علت افزایش جمعیت و توسعه اقتصادی، راه‌کارهایی نظیر استخراج منابع آب زیرزمینی و استفاده از روش‌هایی نظیر نمک‌زدایی و پساب تصفیه‌شده پیشنهاد شدند که به‌دلیل افزایش قیمت حامل‌های انرژی، در نهایت منجر به افزایش هزینه‌های اقتصادی مصرف‌کنندگان می‌شود.

اوزتورک^{۱۳} بیان کرد که در منطقه (BRICS) شامل کشورهای برزیل، روسیه، هند، چین و آفریقای جنوبی، رشد اقتصادی سبب افزایش تقاضا در بخش‌های مختلف پیوند به‌ویژه در بخش انرژی خواهد شد که افزایش فشار بر منابع، خود عاملی برای اختلال در رونق اقتصادی است [۱۲]. از سوی دیگر شاخص امنیت غذایی در این مناطق به‌شدت تحت تأثیر کمبود انرژی و منابع آب ناکافی بود. هم‌چنین در این پژوهش فرضیه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی^{۱۴} (EKC) در تمام این کشورها آزمایش شد. نتایج این پژوهش نشان دادند منحنی معکوس U بین انتشار دی‌اکسید کربن و رشد اقتصادی وجود داشت که می‌تواند راهنمای ایجاد سیاست‌های اقتصادی-محیط‌زیستی مناسب‌تری در آینده باشد.

لیو^{۱۵} و همکاران بیان کردند در حالی که درک کیفی ارتباط میان بخش‌های پیوند در سال‌های اخیر رشد یافته است، اما بیان ارتباط به شکل کمی به شدت ناقص است [۱۳]. تراپون-پی‌فاف^{۱۶} و همکاران بیان کردند تاکنون تمرکز پژوهش‌های مرتبط با کمی‌سازی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی به‌صورت عمده در سطح ملی یا محلی، جریان‌های مواد^{۱۷}، و توسعه زیربنایی بوده است [۱۴].

در مناطق شهری، رشد جمعیت سبب افزایش فشار فزاینده بر سامانه‌های آب، انرژی، زمین‌های کشاورزی شده است. این امر به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که دارای بیشینه نرخ شهرنشینی هستند، اما ظرفیت برنامه‌ریزی کافی ندارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا سبب

تعریف کردند [۸]. با در نظر گرفتن چگونگی تعامل میان سامانه‌های آب، انرژی، مواد غذایی، رویکرد پیوند به بیشینه کردن هم‌افزایی‌ها و کمینه کردن تقابلات، بهبود بهره‌وری و استفاده از منابع کمک می‌کند [۹].

۲- ضرورت کمی‌سازی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی

علی‌رغم انجام پژوهش‌های متعدد برای کمی‌سازی پیوند، تاکنون چارچوب مشخصی برای کمی‌سازی آن به‌دست نیامده است [۱]. این در حالی است که نخستین گام برای یک‌پارچه کردن مدل‌سازی سامانه‌های WEF و مدیریت قوی‌تر آن، کمی‌سازی ارتباطات میان بخش‌های آب، انرژی و غذا است [۱۰]. تحلیل اقتصادی از طریق کمی‌سازی سود و هزینه‌های پروژه‌های مرتبط با آب، انرژی و محصولات غذایی در افق زمانی بلندمدت و نیز بهینه‌سازی تخصیص این منابع در بخش‌های مختلف مصرف از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، چرا که دستیابی به اهداف هزاره سوم بدون در نظر گرفتن نقش اقتصاد ممکن نیست. گولاتی^{۱۱} و همکاران ارتباط بین قیمت آب، انرژی و امنیت غذایی در آفریقای جنوبی را با هدف بررسی اثر افزایش قیمت تولید برق بر قیمت محصولات غذایی بررسی کردند [۱۱]. نتایج نشان دادند که در سال‌های (۲۰۰۰-۱۹۹۹) تا (۲۰۱۱-۲۰۱۰) مصرف برق در بخش کشاورزی تنها سه درصد افزایش داشته است، در حالی که هزینه سالانه تولید برق در این بازه زمانی بیش از ۲۰ درصد افزایش داشته و سبب افزایش قیمت صنایع^{۱۲} وابسته به تولید محصولات غذایی شده بود. از یک‌سو قیمت‌گذاری آب عامل بسیار مهمی در تأمین امنیت غذایی این منطقه بود، چرا که تأثیرات گسترده اجتماعی-اقتصادی بر مصرف‌کنندگان داشت و از سوی دیگر پایین نگه داشتن تعرفه‌ها به‌صورت مصنوعی برای افزایش امنیت غذایی منطقه ضروری بود. برای تأمین انرژی در استخراج آب

^{۱۵}- Liu

^{۱۶}- Terrapon-Pfaff

^{۱۷}- Material Flows

^{۱۱}- Gullati

^{۱۲}- Manufacturing

^{۱۳}- Ozturk

^{۱۴}- Environmental Kuznets Curve

تولید خودرو، منابع مورد نیاز برای ساخت اتومبیل شامل مقدار فولاد، آلومینیوم، پلاستیک و غیره تعیین می‌شود. سپس جدول‌های تحلیل داده-ستانده میزان نیروی کار مورد نیاز به‌ازای هر واحد دلار سرمایه‌گذاری یا تولید را نشان می‌دهد.

مدل‌های داده-ستانده سه نوع تأثیر اقتصادی را تخمین می‌زنند: (۱) مستقیم، (۲) غیرمستقیم، (۳) القایی^{۲۰}. این تأثیرات برای در نظر گرفتن اثرات اولیه، ثانویه و ثالث است که در صورت تغییر در سطوح ورودی، اثرات آن در کل اقتصاد موج می‌زند و تصمیم‌گیران می‌توانند تغییر در هر سطحی را به‌دلیل تغییرات ورودی اولیه برآورد کنند. تأثیر مستقیم شوک اقتصادی، تغییر در هزینه‌ها است. اثر غیرمستقیم ناشی از تأمین‌کنندگان و تأثیر القایی ناشی از تقاضا برای دریافت خدمات بیش‌تر است.

کمی‌سازی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی با استفاده از مفهوم تحلیل داده-ستانده، مصرف انرژی تجسم‌یافته^{۲۱} (مستقیم و غیرمستقیم) مورد نیاز برای تولید کالا و خدمات شهری را براساس تعامل میان بخش‌های مختلف اقتصادی، ارزیابی می‌کند. روندنمای تحلیل داده-ستانده در شکل ۱ آورده شده است.

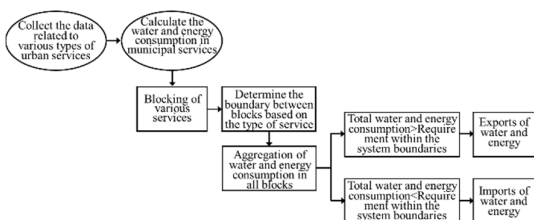


Figure 1. Input-output analysis flowchart

شکل ۱- روندنمای تحلیل داده-ستانده

مطابق شکل ۱، در گام نخست خدمات در مناطق شهری بلوک‌بندی می‌شوند؛ به‌عنوان مثال، بخش‌های کشاورزی، معدن، حمل و نقل، تولیدات، تأمین گاز و برق و خدمات مربوط به هریک از آنها. علت انتخاب مناطق شهری به‌عنوان مقیاس مکانی، امکان تعیین میزان مصرف آب و

ایجاد چالش‌های قابل توجه در مدیریت تنش‌ها بدون در معرض ریسک قرار دادن توانایی نسل‌های آینده در تأمین تقاضاهایشان خواهد شد.

بررسی روش‌های کمی‌سازی پیوند و چالش‌های آن، به ایجاد یک تصویر واضح از چگونگی تأثیر رفتار انسانی، سیاست‌ها و تغییرات محیطی بر WEF کمک خواهد کرد.

۳- رویکردهای کمی‌سازی پیوند

به‌طور کلی می‌توان بررسی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی را از منظر اقتصادی به گروه‌های زیر تقسیم کرد: (۱) تحلیل داده-ستانده، (۲) تحلیل تقابلات^{۱۸}، (۳) مدل‌سازی اقتصادی، (۴) تحلیل زنجیره تأمین^{۱۹}، (۵) مفهوم پورتفولیو. بیش‌ترین فراوانی مطالعات در رویکردهای اشاره‌شده، تحلیل داده-ستانده است که در ادامه مفهوم آن و تاریخچه یک‌پارچه‌سازی آن در مباحث مرتبط با پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی در مناطق شهری شرح داده خواهد شد. همچنین مفهوم مدیریت پورتفولیو به‌عنوان ابزاری نوین که می‌تواند در کمی‌سازی مفهوم پیوند بسیار کارآمد باشد نیز بررسی خواهد شد.

۳-۱- تحلیل داده-ستانده

تحلیل داده-ستانده، نوعی تحلیل کلان اقتصادی است که نمایان‌گر وابستگی متقابل بین بخش‌های مختلف اقتصاد ملی یا اقتصادهای مختلف منطقه‌ای است که به‌طور معمول برای برآورد اثرات شوک‌های مثبت یا منفی اقتصادی یا تحلیل اثرات موج‌دار در کل اقتصاد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵]. این نوع تحلیل به‌طور گسترده‌ای برای تخمین اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده می‌شود [۱۶].

مبنای تحلیل داده-ستانده، جدول‌های داده-ستانده با ستون‌ها و سطورهایی که زنجیره تأمین همه بخش‌های اقتصادی را کمی می‌کند، هستند. به‌عنوان مثال در صنایع

²⁰- Induced

²¹- Embodied Energy

¹⁸- Trade-Off Analysis

¹⁹- Supply Chain Analysis

جدول ۱- تحقیقات پیوند بر مبنای تحلیل داده-ستاده

Table 1. Research on Nexus based on input-output analysis

Researchers	Nexus type	Method	Spatial scale
Duan and Chen [19]	Energy-Water-Carbon	Input-output analysis, Material Flow Analysis [MFA]	City
Chen et al. [20]	Water-Energy	Multi-regional physical input-output analysis	Multi-district
Meng et al. [21]	Water-Carbon	Disaggregated input-output model	City
Nawab et al. [22]	Energy-Water	Extended multi-scale input-output	City
Liang et al. [23]	Food-Energy-Water	Environmentally extended multiregional input-output	Province

۳-۲- مفهوم پورتفولیو

مفهوم مدیریت پورتفولیو^{۲۲} (PM) یکی از مفاهیم بسیار گسترده و وسیع در اقتصاد است. مزیت رویکرد مدیریت پورتفولیو، ایجاد ابزاری با یک فرآیند نظام‌مند و یا مجموعه‌ای از ابزارها برای پاسخ دادن به پرسش‌ها به صورت صریح و شفاف است. مدیریت پورتفولیو نه تنها می‌تواند مفروضات و داده‌های ورودی را نشان دهد، بلکه می‌تواند تعاملات بین اهداف تحت راهکارهای پیشنهادی را نیز تعریف و کمیت آن را نشان دهد. این مسأله از این منظر دارای اهمیت است که برنامه‌ریزی منابع انرژی در سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای پیچیده شده است و برنامه‌ریزان نیازمند ابزار و روش‌هایی هستند که بتوانند تعیین کنند که آیا برنامه‌ریزی برای یک منبع خاص منجر به ایجاد خدمت مطمئن و با سرعتی معقول می‌شود؟ در شکل ۲، گام‌های اصلی برنامه‌ریزی انرژی بر اساس مفهوم پورتفولیو نشان داده شده است.

انرژی برای ایجاد خدمات نهایی بیش‌تر و تنوع فن‌آوری‌های تولید انرژی کم‌تر است.

در گام بعد، به منظور تعیین میزان تولید و مصرف انرژی در هر بلوک، مرز میان بلوک‌ها با یکدیگر تعیین و براساس نوع خدمات ارائه‌شده در هر بلوک با استفاده از جدول‌های داده-ستاده، انرژی تجسم‌یافته، آب مورد نیاز و نیز هزینه‌های مرتبط با آن، میزان کسری یا مازاد انرژی و آب در هر بلوک محاسبه می‌شود.

در گام آخر، تولید و مصرف آب و انرژی در تمام بلوک‌ها با یکدیگر جمع شده و کسری و مازاد آب و انرژی نهایی به دست می‌آید. در صورت وجود کسری انرژی، برنامه‌ریزی برای واردات و در صورت وجود مازاد انرژی، برنامه‌ریزی برای صادرات آن به خارج از مرزهای سامانه انجام می‌شود.

به طور معمول جداول داده-ستاده در هر کشور توسط آژانس‌های آماری هر کشور در مقیاس ملی تهیه می‌شوند. جداول داده-ستاده در چند مورد محدود در مقیاس منطقه‌ای نیز ایجاد شده‌اند و در سایر موارد با تعریف ضریب موقعیت مکانی برای ایجاد ضرایب منطقه‌ای از جداول ملی استفاده می‌کنند [۱۷]. یکی از چالش‌های استفاده از تحلیل داده-ستاده، وجود روش‌های مختلف برای تعیین ضرایب منطقه‌ای است که تاکنون روش واحدی ارائه نشده است [۱۸].

از سال ۲۰۱۶، از تحلیل داده-ستاده با هدف کمی‌سازی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی در مناطق شهری استفاده شده که فهرست برخی از این تحقیقات در جدول ۱ آورده شده است.

همان‌گونه که جدول ۱ نشان می‌دهد، استفاده از تحلیل داده-ستاده سبب در نظر گرفتن انواع مختلف پیوند شده است و نشان‌دهنده آن است که مسائل متعددی در قالب مفهوم پیوند، قابل بررسی هستند.

گام چهارم، ارائه راه کارهای مدیریت تقاضا در تمام بخش های مصرف کننده انرژی است، به نحوی که مصرف انرژی کمینه و بهره وری مصرف انرژی بیشینه گردد.

گام نهمی شناسایی راه کارهای نهایی شامل ترکیبی از منابع مختلف که بتواند با سطح اطمینان پذیری بالا تداوم عرضه انرژی را که همان امنیت انرژی از منظر سیاسی است، را حفظ کند.

امرو^{۲۳} و همکاران برنامه ریزی پایدار انرژی با استفاده از مفهوم پیوند در منطقه تگزاس با استفاده از ابزار ارزیابی پورتفولیوی انرژی^{۲۴} (EPAT) انجام دادند [۲۴]. ایشان چارچوبی جامع که ارتباط میان انرژی و سایر سامانه ها نظیر آب، اراضی، محیط زیست و مسائل مالی را تعریف و اثرات مدیریت انرژی را برای پایه ریزی تصمیم گیری های پایدار ارزیابی کند، را معرفی کردند.

۴- چالش های اساسی در کمی سازی پیوند

پس از طرح ضرورت سیاست گذاری های کلان آینده براساس رویکرد پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی، تلاش های بسیاری برای ایجاد روابط نظام مند میان منابع آب، انرژی و زنجیره تأمین غذا صورت گرفت. هدف از رویکرد پیوند سیاست گذاری یک پارچه در منابع طبیعی با در نظر گرفتن محرک های ذاتی و خارجی بر بخش های مختلف است. با توجه به گسترده بودن ابعاد این رویکرد جدید و ضرورت اندازه گیری میزان اثرگذاری آن، کمی سازی پیوند به ویژه در مناطق شهری به دلیل رشد چشم گیر جمعیت در آنها مورد توجه قرار گرفت. علی رغم پژوهش های متعدد در این زمینه براساس مفاهیم مختلف، هم چنان یک رویکرد پیوندی که قابل تعمیم برای مناطق شهری باشد، حاصل نشده است. شناخت چالش های موجود سبب خواهد شد که مسیرهای آینده پژوهش بر یافتن راه حل هایی برای حل مشکلات فعلی متمرکز شوند. در ادامه، چالش هایی را که سبب عدم دستیابی به رویکردی قابل تعمیم باشد و تاکنون در

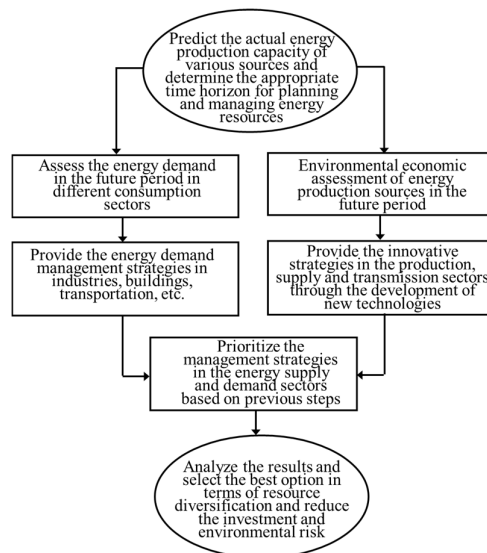


Figure 2. Flowchart of energy planning based on portfolio management

شکل ۲- روندنمای برنامه ریزی انرژی براساس مدیریت پورتفولیو

مطابق شکل ۲، اولین گام انتخاب یک افق برنامه ریزی مناسب است. در یک بازه زمانی متوسط مانند یک بازه زمانی ۲۰ ساله یا بیش تر، منابع مختلف انرژی شامل منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، ظرفیت واقعی تولید انرژی آنها، میزان انتشار دی اکسید کربن و هزینه های فیزیکی نظیر میزان سرمایه گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری ارزیابی و تحلیل می شوند.

گام دوم شامل بررسی راه کارهای نوین در بخش تولید و انتقال انرژی نظیر فن آوری های جدید، کاهش تلفات انتقال، تحلیل روند بازار انرژی و ریسک سرمایه گذاری در آنها است.

سومین گام، ارزیابی مصرف انواع حامل های انرژی در بخش های مختلف مصرف کننده است. در این گام، عدم قطعیت های ذاتی فراوانی ناشی از عوامل مختلف نظیر تغییرات اقلیمی، تغییر شرایط اقتصادی و یا وقوع شوک های ناگهانی نظیر وقوع جنگ یا بیماری های همه گیر وجود دارد.

²⁴- Energy Portfolio Assessment Tool

²³- Mroue

مطالعات مربوط به پیوند مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، شرح داده خواهند شد:

۴-۱- وسع‌تر شدن ابعاد پیوند و ناکافی بودن داده‌های مورد نیاز

یکی از مهم‌ترین چالش‌های فعلی در مدل‌سازی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی، عدم دسترسی و عدم شفافیت در داده‌های مورد نیاز برای بخش‌های مختلف پیوند است. برای بسیاری از داده‌های مورد نیاز، ابزار اندازه‌گیری دقیق وجود ندارد و بسیاری از داده‌ها به‌دلیل مختلف منتشر نمی‌گردد. کمی‌سازی پیوند می‌تواند اثرگذاری قابل توجهی بر سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های آینده داشته باشد و بنابراین نیازمند داده‌های اولیه دقیق است.

علاوه بر کمبود داده‌های مورد نیاز، بخش‌های درگیر در پیوند به‌دلیل بسیاری از جمله پیچیده‌تر شدن روابط درونی هریک از ابعاد پیوند و نیاز به تحلیل‌های دقیق‌تر برای کمی‌سازی پیوند افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، بررسی پیوند آب-انرژی در کشورهایی که از نظر اقتصادی به‌شدت وابسته به نفت هستند و منابع آب مورد نیاز خود را از طریق آب مجازی تأمین می‌کنند، نسبت به کشورهای دارای منابع آبی کافی، دشوارتر خواهد بود. چانگ و همکاران بیان کردند به‌علت وجود ارتباط قوی بین سامانه‌های آب-انرژی-غذا و زیست‌بوم‌های آنها، مثلث پایداری شامل ابعاد بیش‌تری مانند پیوند آب-انرژی-اراضی-محصولات غذایی (WELF) [۲۶]، و یا پیوند آب-انرژی-اقلیم-محصولات غذایی [۲۷]، پیوند آب-PM_{2.5} [۲۸]، پیوند انرژی-آب-کربن [۱۹] شده است [۲۵].

۴-۲- وجود ناهمگونی‌های متعدد

ناهمگونی در داده‌ها، روش‌ها و استانداردها برای هر بعد از پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی، محدودیت‌هایی برای کمی‌سازی پیوند در یک چارچوب یک‌پارچه و نظام‌مند ایجاد کرده است. به‌عنوان مثال، محاسبه مقدار آب مصرفی

در بخش انرژی بسیار راحت‌تر از محاسبه مقدار انرژی مصرفی در بخش آب و یا بخش آب و کشاورزی است و یا در بخش آب، معیار برداشت و مصرف آب یکسان‌سازی شود؛ چرا که ممکن است میزان آب برداشتی برای یک فن‌آوری تولید انرژی بسیار قابل توجه باشد، اما میزان مصرف آن بسیار کم باشد و حالتی عکس رخ دهد. یکی دیگر از ناهمگونی‌های مهم در پیوند، محاسبه آب مجازی و ارتباط با منابع انرژی، محصولات کشاورزی و اقتصاد است. در بخش انرژی، نوع فن‌آوری تولید انرژی مورد نظر باید به‌عنوان یک الگو برای اغلب کشورها مشخص باشد. البته در بیش‌تر پژوهش‌ها منظور از انرژی در مفهوم پیوند، میزان الکتریسیته تولیدی است. اما در برخی کشورها که رشد اقتصادی چشم‌گیری را تجربه می‌کنند نظیر چین، انرژی حاصل از احتراق زغال‌سنگ به‌عنوان منبع مهم و ارزان انرژی مورد توجه قرار می‌گیرد، هرچند که اثرات زیست‌محیطی آن نادیده گرفته می‌شود.

۴-۳- تنوع در اولویت‌های توسعه‌ای هر منطقه و توجه به نابرابری‌های اجتماعی-اقتصادی

تنوع در اولویت‌های توسعه‌ای در هر کشور نیز نوع تعاملات و تقابلات را تغییر می‌دهد و تعیین مرزهای جغرافیایی و مقیاس زمانی برای هر بعد از پیوند آب-انرژی-غذا، در انتخاب رویکرد کمی‌سازی نقش بسیار مهمی دارد. هدف از پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی حفظ و حفاظت منابع فعلی است. در حالی که دسترسی به منابع آب و انرژی و محصولات کشاورزی و مواد غذایی از طریق شاخص‌های مختلفی در رویکردهای متعدد پیوند محاسبه می‌گردند، اما تضمین‌کننده دسترسی امن همه افراد جامعه به منابع طبیعی نیستند. در حالی که دسترسی به آب پاک، انرژی پایدار و مقدار غذای کافی با ارزش غذایی مناسب از مهم‌ترین شاخص‌های توسعه‌یافتگی برای هر جامعه‌ای به‌شمار می‌آیند. در حالی بسیاری از پژوهش‌ها متمرکز بر وابستگی انرژی و آب هستند، تحقیقات کمی به بررسی نقش پیوند در توسعه اجتماعی پرداخته‌اند [۲۹].

۴-۴- تغییر ارزش گذاری اقتصادی منابع طبیعی در رویکرد

پیوند

در حال حاضر که آب در مرکز توسعه پایدار و به عنوان یک کالای اقتصادی مورد بحث قرار گرفته است، یکی از مسائل مورد تأکید در پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی ارزش گذاری اقتصادی منابع طبیعی است. هزینه های نهایی در صنعت آب، تنها شامل هزینه های استخراج، تصفیه و انتقال آب به مصرف کنندگان است. در حالی که در بخش انرژی، هزینه های متعددی شامل استخراج، فرآوری، انتقال، توزیع، هزینه های زیست محیطی و مالیات بر ارزش افزوده وجود دارد. بنابراین هزینه ها در صنعت انرژی نسبت به صنعت آب بسیار قابل توجه است. زمانی که مصرف آب در بخش انرژی به ویژه در نیروگاه های تولید برق افزایش یابد، هزینه نهایی آب و برق هر دو افزایش خواهد یافت. به بیان دیگر، قیمت آب به دلیل اثر مهم آن در تولید انرژی، افزایش خواهد یافت [۳۰]. لازم است رهنمودهای جدیدی برای تعیین ارزش اقتصادی منابع طبیعی در برنامه ریزی های شهری تدوین گردد تا سیاست گذاری های آینده، براساس قیمت های واقعی پایه گذاری گردد.

۵- نتیجه گیری

پیوند هم چون رشته ای است که شبکه ای از آب، غذا، انرژی، اقلیم، رشد اقتصادی و چالش های جامعه انسانی را که اقتصاد جهانی در دو دهه آینده با آن روبه رو است، به یکدیگر متصل می کند. از این رو ایجاد یک چارچوب نظام مند که بتواند این همبستگی را به سوی کسب نتایج اقتصادی ملموس که کلیت جامعه از آن بهره مند گردند، سوق دهد ضروری است. گرچه به نظر می رسد که عبارت پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی فقط مدیریت منابع اساسی را شامل می شود، اما در مفهوم ذاتی آن، مدیریت چالش های جامعه انسانی نهفته است.

با توجه به نوظهور بودن مفهوم پیوند، دستیابی به شیوه های کمی سازی یک پارچه که قابل گسترش در تمامی

مقیاس های مکانی، زمانی و سازگار با ساختار سیاسی و اقتصادی کشورهای مختلف باشد، در کوتاه مدت دشوار است. تحقیق حاضر، یکی از متداول ترین شیوه های کمی سازی مفهوم پیوند براساس یک نظریه اقتصادی و یک شیوه مدیریتی نوین را مورد بررسی قرار داد. هم چنین چالش های موجود در این زمینه نیز مورد بحث قرار گرفتند که رفع آنها می تواند موضوع پژوهش های آینده در ارتباط با مفهوم پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

مشارکت نویسندگان

پروین گلفام نظریه این تحقیق را توسعه داد و محاسبات را انجام داد. محمد علی مرادی روش های تحلیلی را تأیید کرد و پروین گلفام را به بررسی یک جنبه خاص تشویق کرد. محمد علی مرادی بر یافته های این کار نظارت داشت. همه نویسندگان نتایج را مورد بحث قرار دادند و در نسخه نهایی مشارکت داشتند. پروین گلفام نسخه خطی را با حمایت محمد علی مرادی نوشت. پروین گلفام ایده اولیه را مطرح کرد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ گونه کمک هزینه خاصی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می شود.

References

- [1] Sušnik J. Economic metrics to estimate current and future resource use, with a focus on water withdrawals. *Sustainable Production and Consumption*. 2015 Sep 10; 2: 109-127. **doi: 10.1016/j.spc.2015.05.003.**
- [2] Hoff H. Understanding the nexus: Background paper for the Bonn2011 Conference – The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm: Stockholm Environment Institute; 2011.
- [3] UNEP. Towards a green economy, pathways to sustainable development and poverty eradication, a synthesis for policy makers. 2011.
- [4] Sanders KT, Webber ME. Evaluating the energy consumed for water use in the United States. *Environmental Research Letters*. 2011 Sep 20; 7: 034034. **doi: 10.1088/1748-9326/7/3/034034.**
- [5] FAO. The water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture. Rome: Food Agric. Organ. 2014.
- [6] World Economic Forum. Global risks 2011 (6th ed.) Cologne/Geneva: World Economic Forum.
- [7] ACCWaM. Nexus Evidence Base. Based on the project ‘Mainstreaming the water-energy-food security nexus into policies and institutions in the MENA region’, within the GIZ regional programme: ‘Adaptation to Climate Change in the Water Sector in the MENA Region – ACCWaM’. 2017.
- [8] Mannan M, Al-Ansari T, Mackey HR, Al-Ghamdi SG. Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2018 May 7; 193: 300-314. **doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.050.**
- [9] Kurian M. The water-energy-food nexus: Trade-offs, thresholds and transdisciplinary approaches to sustainable development. *Environmental Science & Policy*. 2016 Dec 5; 68: 97-106. **doi: 10.1016/j.envsci.2016.11.006.**
- [10] Chang Y, Li G, Yao Y, Zhang L, Yu C. Quantifying the water-energy-food nexus: Current status and trends. *Energies*. 2016 Jan 22; 9(2): 1-17. **doi: 10.3390/en9020065.**
- [11] Gulati M, Jacobs I, Jooste A, Naidoo D, Fakir S. The water-energy-food security nexus: challenges and opportunities for food security in South Africa. *Aquatic Procedia*, 2013 Aug 21; 1: 150-164. **doi: 10.1016/j.aqpro.2013.07.013.**
- [12] Ozturk I. Sustainability in the food-water-energy nexus: Evidence-base from BRICS (Brazil, the Russian Federation, India, China and South Africa) countries. *Energy*. 2015 Oct 22; 93: 999-1010. **doi: 10.1016/j.energy.2015.09.104.**
- [13] Liu J, Yang H, Cudennec C, Gain AK, Hoff H, Lawford R, Qi J, Strasser LD, Yillia PT, Zheng C. Challenges in operationalizing the water–energy–food nexus. *Hydrological Sciences Journal*. 2017 Jul 21; 62 (11): 1714-1720. **doi: 10.1080/02626667.2017.1353695.**
- [14] Terrapon-Pfaff J, Ortiz W, Dienst C, Gröne M-C. Energising the WEF nexus to enhance sustainable development at local level. *Journal of Environmental Management*. 2017 Jun 23; 223: 409-416. **doi: 10.1016/j.jenvman.2018.06.037.**
- [15] Leontief W. Input-output economics. NewYork: University Press.1986.
- [16] Ogarenko I, Hubacek K. Estimating indirect energy subsidies in Ukraine: Estimation of environmental and socioeconomic effects using input-output modeling. *Journal of Economic Structures*. 2013 Sep 11; 2(7): 1-27. **doi: 10.1186/2193-2409-2-7.**
- [17] Flegg AT, Webber CD, Elliot MV. On the appropriate use of location quotients in generating regional input-output tables. *Regional Studies*. 2007 Jun 16; 29(6): 547-561. **doi: 10.1080/00343409512331349173.**
- [18] Lehtonen O, Tykkyläinen M. Estimating regional input coefficients and multipliers: Is the choice of a non-survey technique a gamble?. *Regional Studies*, 2012 Mar 1; 48(2): 1-18. **doi: 10.1080/00343404.2012.657619.**
- [19] Duan C, Chen B. Energy-water-carbon nexus at urban scale. *Energy Procedia*, 2016 Dec 27; 104: 183-190. **doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.032.**
- [20] Chen PC, Alvarado V, Hsu SC. Water-energy nexus in city and hinterlands: Multi-regional physical input-output analysis for Hong-Kong and South China. *Applied Energy*. 2018 May 26; 225: 986-997. **doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.083.**
- [21] Meng F, Liu G, Chang Y, Su M, Hu Y, Yang Z. Quantification of urban water-carbon nexus using disaggregated input-output model: A case study in Beijing (China). *Energy*. 2019 Jan 5; 171: 403-418. **doi: 10.1016/j.energy.2019.01.013.**

- [22] Nawab A, Liu G, Meng F, Hao Y, Zhang Y, Hu Y, Casazza M. Exploring urban energy-water nexus embodied in domestic and international trade: A case of Shanghai. *Journal of Cleaner Production*. 2019 Mar 15; 223: 522-535. doi: **10.1016/j.jclepro.2019.03.119**.
- [23] Liang Y, Li Y, Liang S, Feng C, Xu L, Qi J, Yang X, Wang Y, Zhang C, Li K, Li H, Yang ZZ. Quantifying direct and indirect spatial food-energy-water (FEW) nexus in China. *Environmental Science and Technology*. 2020 Jul 17; 54: 9791-9803. doi: **10.1021/acs.est.9b06548**.
- [24] Mroue AM, Mohtar RH, Pistikopoulos EN, Holtzapple MT. Energy portfolio assessment tool (EPAT): Sustainable energy planning using the WEF nexus approach-Texas case. *Science of Total Environment*. 2018 Aug 12; 648: 1649-1664. doi: **10.1016/j.scitotenv.2018.08.135**.
- [25] Chang Y, Li G, Yao Y, Zhang L, Yu C. Quantifying the water-energy-food nexus: Current status and trends. *Energies*. 2016 Jan 22; 9(2): 1-17. doi: **10.3390/en9020065**.
- [26] Ringler C, Bhaduri A, Lawford R. The nexus across water, energy, land and food (WELF): Potential for improved resources use efficiency? *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2013 Nov 20; 5(6): 617-624. doi: **10.1016/j.cosust.2013.11.002**.
- [27] Beck MB, Walker RV. On water security, sustainability, and the water-food-energy-climate nexus. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 2013 Aug 23; 7(5): 626-639. doi: **10.1007/s11783-013-0548-6**.
- [28] Gao T, Fang D, Chen B. Multi-regional input-output and linkage analysis for water-PM_{2.5} nexus. *Applied Energy*. 2020 Apr 18; 268, 115018. doi: **10.1016/j.apenergy.2020.115018**.
- [29] Fang Z, Chiu Y-H, Chen Y, Lin T-Y, Chang T-H. Linkage analysis for water-energy-economic system efficiency in China. *Environment, Development and Sustainability*. 2024 Jan 20; doi: **10.1007/s10668-023-04409-0**.
- [30] Walsh B-P, Murray SN, O'Sullivan D. The water energy nexus, an ISO50001 water case study and the need for a water value system. *Water Resources and Industry*. 2015 Feb 20; 10: 15-28. doi: **10.1016/j.wri.2015.02.001**.