



Approaches and challenges of quantifying water-energy-food security nexus in urban areas

Mohammad-Ali Moradi¹ , Parvin Golfam^{2✉} 

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

(Received 15 Sep 2024, Revised 27 Nov 2024, Accepted 11 Dec 2024, Published online 25 Mar 2025) - Research Article

Extended Abstract

Background and Objective

Without sufficient water resources, the provision of various types of energy carriers, and without energy supply, access to available water resources is not possible. Food security will be at risk without providing these two resources. While transparent, the relationship between these three vital human resources is very complex and extensive. The water-energy-food security nexus is the management of the most basic natural resources to meet human needs in the light of their internal and external drivers. The purpose of the present study is to examine two widely used approaches in quantifying the water-energy-food security nexus in urban areas, including: (1) input-output analysis based on modern management and (2) the portfolio concept based on economic theory, and to describe the most important challenges in quantifying the nexus and achieving a generalizable computational modeling based on previous research that have not been considered so far. Understanding these challenges helps to assess conflicts and find solutions that balance demand in different sectors.

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

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): 18-27. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2024.11329.1004>



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

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱، تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵) - مقاله پژوهشی

چکیده

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^۲ 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 راه‌حلهایی که تقاضا در بخش‌های مختلف را متعادل می‌سازد، کمک می‌کند.

کلیدواژه‌ها: پیوند امنیت آب-انرژی-امنیت غذایی، کمی‌سازی پیوند، تحلیل داده-ستانده، مفهوم پورتفولیو^۳.

استناد: مرادی محمدعلی، گلفام پروین. (۱۴۰۴). رویکردها و چالش‌های کمی‌سازی پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی در مناطق شهری. *منابع آب و*

تغییر اقلیم. ۱۱(۱)، ۱۸-۲۷. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2024.11329.1004>

2- Nexus

3- Portfolio



۱- مقدمه

ناشی از پدیده تغییر اقلیم، می‌تواند 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 به‌کارگیری بهینه و یک‌پارچه منابع طبیعی در جهت منافع بشری به‌منظور کمینه کردن اثرات بحران‌های خودساخته انسانی و رخداد‌های طبیعی است. از آنجا که چگونگی وقوع رخداد‌های 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 سازمان‌های بین‌المللی و پژوهشگران ارائه شده است. ساندرز^۵ و ویر^۶، پیوند را تعامل میان بخش‌های مختلف در درون یک سامانه تعریف کردند [۴].

بخش خواروبار سازمان ملل متحد^۷ (FAO)، پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی را رویکردی تحلیلی برای کمی‌سازی ارتباطات میان گره‌های پیوند (یعنی آب، انرژی و امنیت غذایی) و ایجاد مدیریت یک‌پارچه منابع طبیعی در مقیاس‌های مختلف از طریق تعامل و تقابل مدیریتی بیان می‌کند [۵]. مجمع جهانی اقتصاد^۸ پیوند WEF را یکی از بزرگ‌ترین خطرات برای پایداری اقتصاد جهانی معرفی می‌کند [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 ارزش‌گذاری به بخش‌های موجود در پیوند به‌منظور کاهش تلفات و ایجاد یک هم‌افزایی به‌معنای تولید بیش‌تر با فشار کم‌تر بر منابع طبیعی تعریف کردند [۷]. منان^{۱۰} و همکاران، مصرف بهینه منابع

افزایش جمعیت جهان، تغییر الگوی مصرف منابع طبیعی به‌علت توسعه شهرنشینی و تغییر استانداردهای زندگی و ایجاد فشار مضاعف بر منابع حیاتی [۱]، تغییرات اقلیمی شدید و مخاطرات زیست‌محیطی-اقتصادی-اجتماعی ناشی از آن، تنگناهای رشد اقتصادی کشورها به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، از جمله معضلات رو به رشد در جهان امروز است. در صورت ادامه روند فعلی، چالش‌های پیش‌روی بشر در سال‌های آینده بیش‌تر و عمیق‌تر خواهند بود.

در تلاش برای برون‌رفت از این مشکلات فزاینده، مفهوم پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی به‌عنوان راه‌حلی 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 چشم‌گیر میزان خسارت‌های زیست‌محیطی به‌علت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش سطح آلودگی ناشی از آن و در نتیجه افزایش بهره‌وری منابع طبیعی است [۳].

در اقتصاد سبز، منابع طبیعی شامل منابع آب، منابع انرژی و محصولات غذایی ثروتی، با ارزش حیاتی اقتصادی به‌شمار می‌روند که رابطه‌ای ذاتی و درونی دارند بدین‌معنا که نمی‌توان تغییرات در هر منبع را بدون بررسی آثار مستقیم و غیرمستقیم آن در دو منبع دیگر در نظر گرفت. به‌عنوان مثال، آب برای تولید، استخراج، و فرآورش سوخت‌های فسیلی مورد نیاز است و برق برای انتقال آب از منابع به مصرف‌کننده‌ها ضروری است.

علاوه‌بر تعاملات و تقابلات مستقیم متقابل، محرک‌های خارجی نظیر تغییر اقلیم نیز این ارتباط را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش منابع آب در دسترس

3- Green Economic

4- United Nations Environment Program

5- Sanders

6- Webber

7- The Food and Agricultural Organization of the United Nations

8- World Economic Forum

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

10- Mannan

غذایی این منطقه بود، چرا که تأثیرات گسترده اجتماعی-اقتصادی بر مصرف‌کنندگان داشت و از سوی دیگر پایین نگه داشتن تعرفه‌ها به صورت مصنوعی برای افزایش امنیت غذایی منطقه ضروری بود. برای تأمین انرژی در استخراج آب بیش‌تر به علت افزایش جمعیت و توسعه اقتصادی، راه‌کارهایی نظیر استخراج منابع آب زیرزمینی و استفاده از روش‌هایی نظیر نمک‌زدایی و پساب تصفیه‌شده پیشنهاد شدند که به دلیل 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 به شدت 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-محیط زیستی 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 به صورت عمده در سطح ملی یا

و کمینه کردن اثرات زیست‌محیطی در تأمین محصولات و خدمات مختلف را هدف کلیدی رویکرد پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی 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 به دست 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

13- Ozturk

14- Environmental Kuznets Curve

15- Liu

16- Terraapon-Pfaff

11- Gullati

12- Manufacturing

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 سطرهايي که زنجیره تأمین همه بخش‌های اقتصادی را کمی می‌کند، هستند. به‌عنوان مثال در صنایع 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.

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 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

17- Material Flows

18- Trade-Off Analysis

19- Supply Chain Analysis

20- Induced

21- Embodied Energy

برای تعیین ضرایب منطقه‌ای است که تاکنون روش واحدی ارائه نشده است [۱۸].

از سال ۲۰۱۶، از تحلیل داده-ستانده 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.

جدول ۱- تحقیقات پیوند بر مبنای تحلیل داده-ستانده

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 multi-regional input-output	Province

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

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 به‌صورت صریح و شفاف است. مدیریت پورتفولیو نه‌تنها

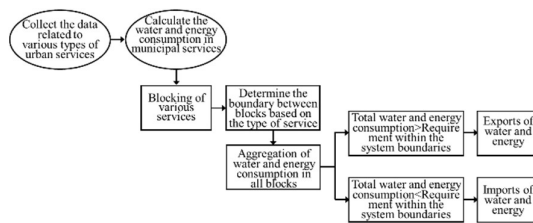


Figure 1. Input-output analysis flowchart

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

در گام بعد، به‌منظور 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-ستانده، 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 به‌دست 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.

به‌طور معمول جداول داده-ستانده در هر کشور توسط آژانس‌های آماری هر کشور در مقیاس ملی تهیه می‌شوند. جداول داده-ستانده 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-ستانده، وجود روش‌های مختلف

²²- Portfolio Management

گام دوم شامل بررسی راه‌کارهای نوین در بخش تولید و انتقال انرژی نظیر فن‌آوری‌های جدید، کاهش تلفات انتقال، تحلیل روند بازار انرژی و ریسک سرمایه‌گذاری در آنها است.

سومین گام، ارزیابی مصرف انواع حامل‌های انرژی در بخش‌های مختلف مصرف‌کننده است. در این گام، عدم قطعیت‌های ذاتی فراوانی ناشی از عوامل مختلف نظیر تغییرات اقلیمی، تغییر شرایط اقتصادی و یا وقوع شوک‌های ناگهانی نظیر وقوع جنگ یا بیماری‌های همه‌گیر وجود دارد.

گام چهارم، ارائه راه‌کارهای مدیریت تقاضا در تمام بخش‌های مصرف‌کننده انرژی است، به نحوی که مصرف انرژی کمینه و بهره‌وری مصرف انرژی بیشینه گردد.

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

امروزه^{۲۳} و همکاران برنامه‌ریزی پایدار انرژی با استفاده از مفهوم پیوند در منطقه تگراس با استفاده از ابزار ارزیابی پورتفولیوی انرژی^{۲۴} (EPAT) انجام دادند [۲۴]. ایشان چارچوبی جامع که ارتباط میان انرژی و سایر سامانه‌ها نظیر آب، اراضی، محیط زیست و مسائل مالی را تعریف و اثرات مدیریت انرژی را برای پایه‌ریزی تصمیم‌گیری‌های پایدار ارزیابی کند، را معرفی کردند.

۴- چالش‌های اساسی در کمی‌سازی پیوند

پس از طرح ضرورت سیاست‌گذاری‌های کلان آینده براساس رویکرد پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی، تلاش‌های بسیاری برای ایجاد روابط نظام‌مند میان منابع آب، انرژی و زنجیره تأمین غذا صورت گرفت. هدف از رویکرد پیوند سیاست‌گذاری یک‌پارچه در منابع طبیعی با در نظر

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 به‌طور 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 براساس مفهوم پورتفولیو نشان داده شده است.

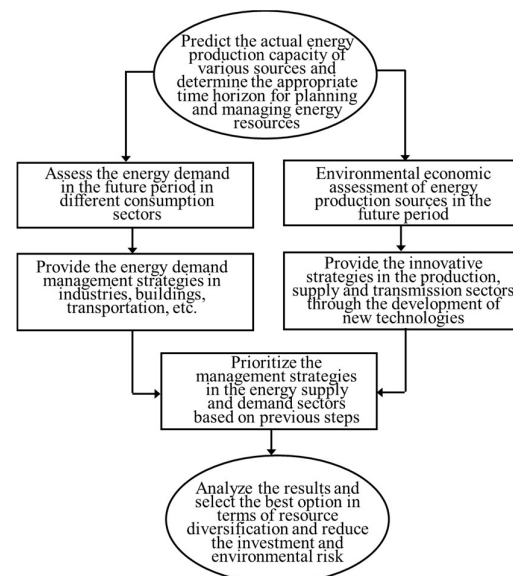


Figure 2. Flowchart of energy planning based on portfolio management

شکل ۲- روندنمای برنامه‌ریزی انرژی براساس مدیریت پورتفولیو

مطابق شکل ۲، اولین گام انتخاب یک افق برنامه‌ریزی مناسب است. در یک بازه زمانی متوسط مانند یک بازه زمانی ۲۰ ساله یا بیشتر، منابع مختلف انرژی شامل منابع تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر، ظرفیت واقعی تولید انرژی آنها، میزان انتشار دی‌اکسید کربن و هزینه‌های فیزیکی نظیر میزان سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری ارزیابی و تحلیل می‌شوند.

²³- Mroue

²⁴- Energy Portfolio Assessment Tool

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، هر چند 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-

گرفتن محرک‌های ذاتی و خارجی بر بخش‌های مختلف است. با توجه به گسترده بودن ابعاد این رویکرد جدید و ضرورت اندازه‌گیری میزان اثرگذاری آن، کمی‌سازی پیوند به‌ویژه در مناطق شهری به‌دلیل رشد چشم‌گیر جمعیت در آنها مورد توجه قرار گرفت. علی‌رغم پژوهش‌های متعدد در این زمینه براساس مفاهیم مختلف، هم‌چنان یک رویکرد پیوندی که قابل تعمیم برای مناطق شهری باشد، حاصل نشده است. شناخت چالش‌های موجود سبب خواهد شد که مسیرهای آینده پژوهش بر یافتن راه‌حلی برای حل مشکلات فعلی متمرکز شوند. در ادامه، چالش‌هایی را که سبب عدم‌دستیابی به رویکردی قابل تعمیم باشد و تاکنون در مطالعات مربوط به پیوند مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، شرح داده خواهند شد:

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

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

علاوه‌بر کمبود داده‌های مورد نیاز، بخش‌های درگیر در پیوند به‌دلایل بسیاری از جمله پیچیده‌تر شدن روابط درونی هر یک 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. چنانگ و همکاران بیان کردند به‌علت وجود ارتباط قوی

قیمت آب به دلیل اثر مهم آن در تولید انرژی، افزایش خواهد یافت [۳۰]. بنابراین، ضروری است رهنمودهای جدیدی برای تعیین ارزش اقتصادی منابع طبیعی در برنامه‌ریزی‌های شهری تدوین گردد تا سیاست‌گذاری‌های آینده، براساس قیمت‌های واقعی پایه‌گذاری گردد.

۵- نتیجه‌گیری

پیوند هم‌چون رشته‌ای است که شبکه‌ای از آب، غذا، انرژی، اقلیم، رشد اقتصادی و چالش‌های جامعه انسانی را که اقتصاد جهانی در دو دهه آینده با آن روبه‌رو است، به یکدیگر متصل می‌کند. از این‌رو ایجاد یک چارچوب نظام‌مند که بتواند این همبستگی را به سوی کسب نتایج اقتصادی ملموس که کلیت جامعه از آن بهره‌مند گردند، سوق دهد ضروری است. گرچه به نظر می‌رسد که عبارت پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی فقط مدیریت منابع اساسی را شامل می‌شود، اما در مفهوم ذاتی آن، مدیریت چالش‌های جامعه انسانی نهفته است.

با توجه به نوظهور بودن مفهوم پیوند، دست‌یابی به شیوه‌های کمی‌سازی یک‌پارچه که قابل گسترش در تمامی مقیاس‌های مکانی، زمانی و سازگار با ساختار سیاسی و اقتصادی کشورهای مختلف باشد، در کوتاه‌مدت دشوار است. تحقیق حاضر، یکی از متداول‌ترین شیوه‌های کمی‌سازی مفهوم پیوند براساس یک نظریه اقتصادی و یک شیوه مدیریتی نوین را مورد بررسی قرار داد. هم‌چنین چالش‌های موجود در این زمینه نیز مورد بحث قرار گرفتند که رفع آنها می‌تواند موضوع پژوهش‌های آینده در ارتباط با مفهوم پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی باشد.

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 ارزش‌گذاری اقتصادی منابع طبیعی در رویکرد

پیوند

در حال حاضر که آب در مرکز توسعه پایدار و به‌عنوان یک کالای اقتصادی مورد بحث قرار گرفته است، یکی از مسائل مورد تأکید در پیوند آب-انرژی-امنیت غذایی ارزش‌گذاری اقتصادی منابع طبیعی است. هزینه‌های نهایی در صنعت آب، تنها شامل هزینه‌های استخراج، تصفیه و انتقال آب به مصرف‌کنندگان است. در حالی که در بخش انرژی، هزینه‌های متعددی شامل استخراج، فرآورش، انتقال، توزیع، هزینه‌های زیست‌محیطی و مالیات بر ارزش افزوده وجود دارد. بنابراین هزینه‌ها در صنعت انرژی نسبت به صنعت آب بسیار قابل توجه است. زمانی که مصرف آب در بخش انرژی به‌ویژه در نیروگاه‌های تولید برق افزایش یابد، هزینه نهایی آب و برق هر دو افزایش خواهد یافت. به‌بیان دیگر،

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.

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](https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.05.003)
- [2] Hoff, H. Understanding the nexus. Background Paper for the bonn 2011. 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.037).
- [15] Leontief W. *Input-output economics*. New York: 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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, Holtzaple 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**.