

Investigating the Impact of Urbanization Uncertainty and Hydroelectric Energy Consumption on the Ecological Footprint in Iran: A Dynamic Computable General Equilibrium (DCGE) Approach

Masoud Cheshmaghil

PhD Candidate in Public Sector Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Javad Shahraki *

Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Reza Ashraf Ganjoei

Assistant Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Abstract

This study employs a Dynamic Computable General Equilibrium (DCGE) model, Iran's ۲۰۱۱ Social Accounting Matrix (SAM), and ۱۹۷۰–۲۰۲۲ time-series data analyzed in R software to examine how uncertainties in hydroelectric energy consumption, urbanization, natural resource rents, industrial output, and per capita income impact Iran's ecological footprint. Using Monte Carlo simulations, five scenarios were tested, each simulating a ۱% increase in one variable while holding others constant. The results reveal that a ۱% rise in hydroelectric energy consumption (Scenario ۱) reduces the ecological footprint by ۲.۱۲%, underscoring the importance of clean energy in mitigating environmental degradation. In contrast, urbanization (Scenario ۲) leads to a negligible increase (۲.۴۶E-۰۶ %), suggesting efficient urban planning may be minimizing ecological strain. Natural resource rents (Scenario ۳) have the most adverse effect, increasing the footprint by ۳.۱۲%, which reflects the environmental costs of unregulated resource extraction.

* Corresponding Author: j.shahraki@eco.usb.ac.ir

How to Cite: xxxxxxxx

Meanwhile, industrial output (Scenario ۴) shows only a marginal impact (۰,۰۰۲%), likely due to the adoption of green technologies, and per capita income (Scenario ۵) contributes a minimal increase (۱,۷۴E-۰۵%). These findings highlight the need for policies that prioritize renewable energy adoption, sustainable resource management, and green industrial practices to reduce Iran's ecological footprint effectively.

Introduction

The ecological footprint serves as a crucial metric for assessing human pressure on ecosystems. First introduced by Wackernagel (۱۹۹۴) and Rees (۱۹۹۶), this innovative indicator quantifies environmental limitations and the degree to which humanity exceeds Earth's carrying capacity. It comprehensively measures human impact across six key dimensions: agricultural land, pastures, fisheries, forests, carbon emissions, and built infrastructure. At its core, this metric compares humanity's resource consumption and waste generation against the biosphere's regenerative capacity, expressed in terms of the land area required to maintain ecological balance. The rapid pace of urbanization has intensified global environmental challenges, creating a fundamental tension between urban development and natural systems. Modern cities increasingly dominate landscapes with buildings, industries, transportation networks, and economic activities, often at the expense of natural environments. This urban-nature conflict manifests most visibly in widespread pollution and ecosystem degradation. The ecological footprint framework provides cities with valuable tools to pursue sustainable development by quantifying environmental impacts and guiding policy decisions. This study specifically investigates how uncertainties in five critical factors - urbanization rates, hydroelectric energy consumption, natural resource rents, industrial production, and per capita income - influence Iran's ecological footprint. Through rigorous analysis, we aim to identify optimal strategies for managing these impacts and steering Iran toward more sustainable development pathways.

Methods and Material

This study employs a Dynamic Computable General Equilibrium (DCGE) model, rooted in Walrasian general equilibrium theory (Walras, ۱۸۷۴), to conduct comprehensive economic analysis across multiple sectors. As an implementation of pure equilibrium theory in

practical settings, DCGE models excel at capturing inter-sectoral relationships and agent interactions within real-world economies. Their particular strength lies in simulating how endogenous variables respond to exogenous shocks while maintaining full consistency with empirical data and accounting for complex market interconnections. Built upon a Social Accounting Matrix (SAM) framework, the DCGE approach offers significant advantages over conventional input-output models by incorporating complete circular flows of income - including household behavior, income generation, distribution patterns, and consumption dynamics - rather than focusing narrowly on production relationships alone. This makes the DCGE model particularly valuable for policy analysis and impact assessment in complex economic systems.

Results and Discussion

Our sensitivity analysis reveals crucial insights about how different factors influence ecological sustainability. The most significant finding shows that a ۵% increase in hydroelectric energy consumption reduces ecological footprint by ۲,۱۲۴%, demonstrating renewable energy's vital role in environmental protection. This substantial reduction occurs because hydropower effectively displaces fossil fuels, leading to decreased greenhouse gas emissions and improved air quality.

Table ۱. Sensitivity Analysis Results

Scenario		Ecological Footprint Sensitivity Index
۱	۵% increase in hydroelectric energy consumption	-۲,۱۲۴
۲	۵% increase in urbanization rate	۲,۴۶E-۰۵

Scenario		Ecological Footprint Sensitivity Index
۳	۵% increase in natural resource rents	+۳,۱۲۲
۴	۵% increase in industrial production	+۰,۰۰۲
۵	۵% increase in per capita income	۱,۷۴E-۰۶

The analysis yields several important findings: Urbanization shows a negligible impact ($1.74 \times 10^{-6}\%$), suggesting that modern urban planning and efficient infrastructure can successfully mitigate environmental pressures. However, natural resource extraction presents serious concerns - a ۵% increase in rents raises footprint by ۳,۱۲۲%, highlighting the ecological damage from excessive mining and drilling.

More encouraging results emerge from industrial and income factors. Industrial production's minimal impact (۰,۰۰۲%) indicates successful adoption of cleaner technologies and compliance with environmental regulations. Similarly, per capita income's marginal effect ($1.74 \times 10^{-6}\%$) suggests that higher incomes correlate with greater environmental awareness and more sustainable consumption patterns.

These findings collectively demonstrate that while energy transition offers the greatest environmental benefits, responsible resource management and green industrialization are equally crucial for sustainable development.

Conclusion

An increase in hydroelectric power consumption, as a clean and renewable energy source, can play a highly significant role in reducing the ecological footprint. In this scenario, it was observed that a ۵%

increase in hydroelectric energy consumption led to a ۲,۱۲۴% reduction in the ecological footprint. This reduction clearly demonstrates that hydroelectric power can serve as an effective substitute for fossil fuels, which have numerous negative environmental impacts. The increase in urbanization rate showed only a marginal effect on ecological footprint growth, causing just a ۲,۴۶E-۰۶% increase. This indicates that while urbanization may exert pressure on natural resources, when infrastructure is effectively managed, its negative impacts remain limited.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to the editorial board of the Iranian Journal of Energy Economics for their valuable efforts and constructive comments that helped improve this manuscript.

Keywords: Ecological footprint, Urbanization, Hydroelectric energy, Uncertainty, Dynamic Computable General Equilibrium (DCGE) method.

JEL Classification: C۶۸, Q۵۷, Q۴۲, R۲۳, D۸۱



بررسی تأثیر عدم قطعیت شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی بر ردپای اکولوژیکی در ایران: رهیافت مدل تعادل عمومی محاسبه پذیر پویا (DCGE)^۱

دانشجوی دکتری اقتصاد بخش عمومی، دانشکده اقتصاد و علوم اداری،
دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

مسعود چشم‌اغیل 

دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و
بلوچستان، زاهدان، ایران

جواد شهرکی  *

استادیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و
بلوچستان، زاهدان، ایران

رضا اشرف گنجویی 

چکیده

این پژوهش با استفاده از مدل تعادل عمومی محاسبه‌پذیر پویا (DCGE) و داده‌های ماتریس حسابداری اجتماعی (SAM) سال ۱۳۹۰ ایران و سری زمانی ۱۳۴۹-۱۴۰۱ در نرم‌افزار R، تأثیر عدم قطعیت مصرف انرژی برق آبی، رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، تولیدات صنعتی و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی را بررسی کرده است. در قالب ۵ سناریو، اثر افزایش ۵ درصدی هر متغیر با آزمایش‌های مونت کارلو تحلیل شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد افزایش ۵ درصدی مصرف انرژی برق آبی به دلیل جایگزینی انرژی پاک، ردپای اکولوژیکی را ۲/۱۲۴ درصد کاهش می‌دهد. در مقابل، رشد شهرنشینی تنها ۰۶-۲/۴۶E افزایش ایجاد کرد که نشان‌دهنده تأثیر مدیریت شهری کارآمد است. رانت منابع طبیعی با افزایش ۳/۱۲۲ درصدی، بیشترین اثر مخرب را داشت. تولیدات صنعتی به دلیل فناوری‌های سبز، رشد ناچیز ۰/۰۰۲ درصدی و درآمد سرانه افزایش ۰۵-۱/۷۴E درصدی در ردپای اکولوژیکی نشان داد. یافته‌ها بر اهمیت انرژی پاک، نظارت بر استخراج منابع و توسعه صنعت سبز تأکید دارد.

^۱ مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته علوم اقتصادی دانشگاه سیستان و بلوچستان است.

* نویسنده مسئول: j.shahraki@eco.usb.ac.ir

نام خانوادگی نویسنده اول و دوم (بیش از دو نویسنده نام خانوادگی نویسنده اول و همکاران | ۷

کلیدواژه‌ها: ردپای اکولوژیکی، شهرنشینی، انرژی برق‌آبی، عدم قطعیت، روش تعادل عمومی

محاسبه پذیر پویا

طبقه‌بندی JEL: C۶۸، Q۵۷، Q۴۲، R۲۳، D۸۱

۱. مقدمه

ردپای اکولوژیکی یکی از ابزارهای سودمند برای اندازه گیری فشار وارد شده بر اکوسیستم و محیط زیست است. این شاخص برای نخستین بار در سال ۱۹۹۴ توسط واکرناگل^۱ و در سال ۱۹۹۶ توسط ریز^۲ معرفی شد و بیانگر محدودیت های زیست محیطی و میزان فراتر رفتن انسان ها از این محدودیت ها است. ردپای اکولوژیکی، مجموع تأثیرات انسانی بر زمین های زراعی، چراگاه ها، مناطق ماهیگیری، جنگل ها، انتشار دی اکسید کربن و زیرساخت ها را نشان می دهد. (مانفردا و همکاران^۳، ۲۰۰۴). هنگامی که ردپای اکولوژیکی از ظرفیت بیولوژیکی زمین فراتر رود، به این معناست که زمین دیگر قادر به پاسخگویی به نیازهای بشر نخواهد بود.

به موازات افزایش نرخ شهرنشینی، مسائل و مشکلات جدیدی در سطح جهان به وجود آمده است که یکی از مهم ترین این مسائل، مشکلات زیست محیطی است. این مسئله اساساً یکی از مهم ترین معضلات شهرهای امروزی و نتیجه تعارض و تقابل آن ها با طبیعت است؛ چراکه توسعه شهرها ناگزیر با تسلط ساختمان ها، صنایع، حمل و نقل و فعالیت های اقتصادی بر فضاها و طبیعت همراه است و این چیرگی به تدریج به صورت تسلط شهر بر محیط طبیعی نمود پیدا کرده و زمینه آلودگی های گسترده شهری را فراهم نموده است. نتیجه چنین روندی عدم تعادل و ناسازگاری بین بشر و محیط طبیعی و برهم خوردن روابط اکوسیستم خواهد بود (سایه میری و نظری، ۱۳۹۹). کشور ایران نیز در سال های اخیر شاهد رشد سریع شهرنشینی و افزایش چشمگیر جمعیت شهری بوده است. بر اساس آمار، جمعیت شهرنشین ایران در نخستین سرشماری سال ۱۳۳۵ حدود ۳۲ درصد بود، اما این رقم تا سال ۱۳۹۵ به ۷۴ درصد کل جمعیت کشور رسید. این رشد شهرنشینی، همراه با افزایش مصرف انرژی به دلیل وجود منابع فراوان انرژی در ایران و سطح پایین فناوری های سازگار با محیط زیست، کشور را با چالش های جدی زیست محیطی مواجه کرده است.

یکی از مصادیق بارز تأثیرات منفی فعالیت های انسانی بر محیط زیست، تولید برق توسط نیروگاه ها است. در مقابل، انرژی های تجدیدپذیر مانند آب، خورشید و باد تأثیرات کمتری بر محیط زیست دارند (فطرس و معبودی، ۱۳۸۹). از سوی دیگر، انرژی پاک به عنوان یک

^۱ Wackernagel, M.

^۲ Rees, W. E.

^۳ Manfreda, S., et al.

عنصر کلیدی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار باتوجه به پایداری زیست محیطی در نظر گرفته می شود و امروزه به بخشی جدایی ناپذیر از برنامه ریزی و سیاست گذاری انرژی تبدیل شده است. ز نظر تنوری، اعتقاد بر این است که انرژی های تجدیدپذیر می توانند با جایگزینی یا کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی سنتی، آلودگی را کاهش دهند. این موضوع به ویژه در کشورهایی مانند ایران که با چالش های زیست محیطی ناشی از شهرنشینی سریع و مصرف بالای انرژی مواجه هستند، اهمیت دوچندانی پیدا می کند. عدم قطعیت که به طور خاصی در این مطالعه وارد شده است، به وضعیتی اشاره دارد که تصمیم گیری توسط فعالان اقتصادی از جمله خانوارها، بنگاه ها و بخش دولتی، در شرایطی همراه با نبود اطمینان صورت می گیرد. علی الخصوص، در سطح کلان اقتصادی، نحوه اتخاذ تصمیمات بهینه توسط سیاست گذاران و برنامه ریزان در مواجهه با شرایط عدم اطمینان، موضوع بسیاری از تحقیقات و مطالعات بوده است. آثار عدم قطعیت اقتصادی به این شکل نمایان می شود که این شرایط موجب برداشت نادرست از وضعیت اقتصادی شده و در نتیجه، برنامه های سرمایه گذاری را ناکارآمد و سطح سرمایه گذاری را کاهش می دهد.

هدف اصلی تحلیل حاضر بررسی تأثیرات عدم قطعیت نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق آبی، رانت منابع طبیعی، تولیدات صنعتی و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در ایران است. از این رو این مقاله به بررسی اثر عدم قطعیت متغیرهای مذکور بر ردپای اکولوژیکی و راهکارهای بهینه سازی این روند می پردازد. در این مقاله، از مدل تعادل عمومی محاسبه پذیر پویا^۱ (DCGE) برای تحلیل تأثیرات عدم قطعیت نرخ شهرنشینی، مصرف انرژی برق آبی، رانت منابع طبیعی، تولیدات صنعتی و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در ایران استفاده شده است. مدل های تعادل عمومی محاسبه پذیر ابزارهای قدرتمندی هستند که با در نظر گرفتن تعاملات بین بخش های مختلف اقتصاد (مانند خانوارها، بنگاه ها، دولت و بخش خارجی)، تأثیرات سیاست ها و تغییرات اقتصادی را بر محیط زیست و سایر متغیرهای کلان بررسی می کنند. این مدل ها با استفاده از سیستم معادلات ریاضی پیچیده و داده های واقعی اقتصاد، امکان شبیه سازی سناریوهای مختلف و تحلیل تأثیرات متقابل بین متغیرها را فراهم می کنند. در این مطالعه، مدل DCGE به طور خاص برای بررسی تأثیرات عدم قطعیت بر ردپای اکولوژیکی و ارائه راهکارهای بهینه سازی این روند به کار گرفته شده است. باتوجه به مطالبی که بیان شد، تحقیق حاضر به دنبال پاسخ به این سؤال است که عدم قطعیت در نرخ

^۱ Dynamic Computable General Equilibrium (DCGE)

رشد شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی به چه میزان بر ردپای اکولوژیکی مؤثر است؟ این مقاله در پنج قسمت تنظیم شده است؛ پس از مقدمه و در بخش دوم، ادبیات موضوع، در بخش سوم روش تحقیق و در بخش چهارم برآورد مدل موردبررسی قرار می‌گیرد و در نهایت در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه می‌شود.

۲. پیشینه پژوهش

اصفهانی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی رابطه بین رشد اقتصادی، مصرف انرژی و ردپای اکولوژیکی را بررسی کرده‌اند. نتایج آن گویای این است که مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر، نرخ شهرنشینی و افزایش باروری، تأثیر مثبت و معناداری بر افزایش ردپای اکولوژیکی گذاشته‌اند. در مقابل، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و پیشرفت فناوری، تأثیر کاهشی بر ردپای اکولوژیکی داشته‌اند. صفرزاده و شاد استانجین (۱۴۰۱) در پژوهشی به بررسی رابطه کوتاه‌مدت و بلندمدت بین مصرف انرژی برق آبی و شاخص‌های تخریب محیط‌زیست در ایران پرداخته‌اند. نتایج حاکی از آن است که مصرف انرژی برق آبی تأثیر منفی و معناداری بر انتشار گاز دی‌اکسید کربن و ردپای کربن دارد. در مطالعه‌ای دیگر، معین‌الدینی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر کیفیت محیط‌زیست با تأکید بر رانت منابع طبیعی در کشورهای منا پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که رانت منابع طبیعی، سرمایه انسانی، مصرف انرژی، شاخص دموکراسی، شهرنشینی و رشد اقتصادی تأثیر مثبت و معناداری بر ردپای اکولوژیکی داشته‌اند، در حالی که نابرابری درآمد تأثیر منفی و معناداری بر آن گذاشته است.

کهو^۱ (۲۰۲۳)، در مقاله‌ای تأثیر شهری شدن بر تخریب محیط‌زیست در ساحل عاج را بررسی کرده است. نتایج کار وی نشان داد که شهری شدن با افزایش اثر زیست‌محیطی، به تخریب محیط‌زیست در ساحل عاج کمک می‌کند. العین و همکاران^۲ (۲۰۲۴) در پژوهشی رابطه بین تخریب محیط‌زیست، شهرنشینی و رشد اقتصادی در پنج کشور جنوب آسیا را موردبررسی قرار داده‌اند. نتایج این مقاله نشان داد که رشد اقتصادی تأثیر مثبت و معناداری بر افزایش ردپای اکولوژیکی دارد. از سوی دیگر، آدرینتو^۳ (۲۰۲۴) در پژوهشی به این نتیجه

^۱ Keho, Y.

^۲ Al-Ain, S., et al.

^۳ Adrinanto, A.

رسیدند که شهرنشینی تأثیر منفی و معناداری بر ناپایداری محیط زیست دارد. همچنین، در کوتاه مدت، درآمد سرانه و جمعیت فعال تأثیر مثبتی بر ناپایداری محیط زیست داشته اند.

۳. روش^۱

۳-۱. مدل تعادل عمومی محاسبه پذیر پویا (DCGE)

در این پژوهش از مدل تعادل عمومی محاسبه پذیر پویا (DCGE) استفاده خواهد شد که به دلیل انعطاف پذیری در تجزیه و تحلیل اثرات اقتصادی در زمینه های مختلف، ابزاری کارآمد به شمار می رود. این مدل ها به طور عملی، نظریه تعادل عمومی محض را برای تحلیل سیستم های اقتصادی در دنیای واقعی به کار می گیرند. مدل تعادل عمومی محاسبه پذیر پویا (DCGE) بر پایه نظریه اقتصادی تعادل عمومی است که ریشه در کارهای پیشگامانه والراس (۱۸۷۴) دارد.

مدل تعادل عمومی یک نسخه ساده شده از تمام اقتصاد است که جریان های دایره وار اقتصاد را نشان می دهد. طبق شرط والراس، مدل های تعادل عمومی محاسبه پذیر نحوه تخصیص منابع در یک اقتصاد بازار را به عنوان نتیجه تعادل عرضه و تقاضا و تعیین قیمت های تعادلی توضیح می دهند. اجزای اصلی این مدل ها معادلاتی هستند که رفتار عوامل اقتصادی را نشان می دهند. هر یک از این عوامل اقتصادی کالاها، خدمات و عوامل تولید را بر اساس قیمت های آن ها عرضه و تقاضا می کنند. (بورگرس، ۱۹۸۶).

مدل های تعادل عمومی محاسبه پذیر بر مبنای ماتریس حسابداری اجتماعی^۲ (SAM) پایه گذاری شده اند. الگوی ماتریس حسابداری اجتماعی بر خلاف الگوی داده - ستانده که صرفاً بر روابط تولیدی تمرکز دارد، ساختار جامعی از بازارها را ارائه می کند و بر خانوارها و چگونگی ایجاد و توزیع و مصرف درآمد متمرکز می شود. به عبارت دیگر جریان درآمد بین فعالیت های تولید، عوامل تولید و نهادها را توصیف می نماید. ماتریس حسابداری اجتماعی (SAM) ابزاری بسیار مفید برای نمایش جزئیات ساختار اقتصادی است.

در بسیاری از تحقیقات علمی و مهندسی، یکی از چالش های اساسی تحلیل عدم قطعیت های موجود در مدل ها و پیش بینی ها است. شبیه سازی مونت کارلو به عنوان یک روش مؤثر و قدرتمند برای تحلیل و مدیریت این عدم قطعیت ها شناخته می شود (متروپولیس و

^۱ Method

^۲ Social Accounting Matrix (SAM)

اولام^۱، (۱۹۴۹). این روش به طور گسترده در مسائل پیچیده‌ای چون تحلیل ریسک، پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها و بهینه‌سازی فرایندها کاربرد دارد و از یک رویکرد آماری و تصادفی برای مدل‌سازی استفاده می‌کند. در این روش، با استفاده از تکرار تصادفی فرایندها، می‌توان توزیع احتمالی نتایج را شبیه‌سازی کرد و نگاهی جامع به محدوده‌های مختلف نتایج ممکن پیدا کرد (کالوس و ویتلاک^۲، ۲۰۰۸).

۲-۳. تصریح مدل

مدل تعادل عمومی محاسبه‌پذیر پویا (DCGE) که در این پژوهش ارائه شده است، یک مدل اقتصادی است که به بررسی تعاملات بین بخش‌های مختلف اقتصاد (مانند خانوارها، تولید، دولت و محیط‌زیست) می‌پردازد. این مدل به طور خاص تأثیر مصرف انرژی برق‌آبی (HP)، نرخ رشد شهرنشینی (UR)، رانت منابع طبیعی (NR)، تولیدات صنعتی (PI) و درآمد سرانه (IP) بر ردپای اکولوژیکی (EP) را بررسی می‌کند. ردپای اکولوژیکی معیاری است که میزان فشار انسان بر محیط‌زیست را اندازه‌گیری می‌کند. این مدل از چندین بخش اصلی تشکیل شده است که هر کدام به بخش‌های مختلف اقتصاد و محیط‌زیست می‌پردازند. در ادامه هر بخش به تفصیل توضیح داده می‌شود.

۱-۲-۳. معادلات بخش خانوار (شهری و روستایی)

الف- درآمد خانوارها

در مدل پژوهش حاضر، خانوارها به دو بخش خانوارهای شهری و روستایی تفکیک شده است. درآمد هر خانوار از طریق عوامل تولید (نیروی کار و سرمایه) و انتقالات دولتی به دست می‌آید (دکالوئه و همکاران، ۲۰۰۸).

الف-۱. درآمد خانوار شهری در زمان t

در این مدل برای خانوارهای شهری، درآمد کل در زمان t ($Y_{urban}(t)$) با ضرب دستمزد نیروی کار شهری در زمان t ($W_{urban}(t)$) در میزان عرضه نیروی کار شهری در زمان t ($L_{urban}(t)$) محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده درآمد حاصل از کار است.

^۱ Metropolis, N., & Ulam, S.

^۲ Kalo & Whitlock

$$Y_{urban}(t) = w_{urban}(t) \cdot L_{urban}(t) + r(t) \cdot K_{urban}(t) + TR_{urban}(t) \quad (1)$$

الف-۲. درآمد خانوار روستایی در زمان t

به طور مشابه، درآمد خانوارهای روستایی در زمان t ($Y_{rural}(t)$) از مجموع دستمزد نیروی کار روستایی در زمان t ($w_{rural}(t)$) ضربدر عرضه نیروی کار روستایی در زمان t ($L_{rural}(t)$)، بازده سرمایه در بخش روستایی در زمان t ($r \cdot K_{rural}(t)$)، و انتقالات دولتی به خانوارهای روستایی در زمان t ($TR_{rural}(t)$) تشکیل شده است (دکالوئه و همکاران، ۲۰۰۸).

$$Y_{rural}(t) = w_{rural}(t) \cdot L_{rural}(t) + r(t) \cdot K_{rural}(t) + TR_{rural}(t) \quad (2)$$

ب- مصرف خانوارها

به طور کلی خانوارها درآمد خود را صرف مصرف کالاها و خدمات (C)، پس انداز (S) و پرداخت مالیات (T) می کنند (دیتون و موالباور^۱، ۱۹۸۰).

ب-۱. مصرف خانوار شهری در زمان t

$$C_{urban}(t) = \alpha_{urban} \cdot (Y_{urban}(t) - T_{urban}(t)) \quad (3)$$

معادله مصرف خانوار شهری بیان می کند که مصرف خانوارهای شهری در زمان t از حاصل ضرب دو متغیر به دست می آید:

درآمد قابل تصرف خانوارهای شهری در زمان t

سهم مصرف خانوارهای شهری

ب-۲. مصرف خانوار روستایی

$$C_{rural}(t) = \alpha_{rural} \cdot (Y_{rural}(t) - T_{rural}(t)) \quad (4)$$

معادله مصرف خانوار روستایی نیز ساختاری مشابه دارد، اما با پارامترهای مختص بخش روستایی.

ج- پس انداز خانوارها

معادلات پس انداز خانوارهای شهری و روستایی به شرح زیر است:

^۱ Deaton, A., & Muellbauer, J.

ج-۱. پس انداز خانوار شهری در زمان t

$$S_{urban}(t) = Y_{urban}(t) - C_{urban}(t) - T_{urban}(t) \quad (۵)$$

این معادله بیانگر آن است که پس انداز خانوارهای شهری در زمان t ، از کسر مصرف در زمان t ($C_{urban}(t)$) و مالیات در زمان t ($T_{urban}(t)$) از درآمد کل خانوارهای شهری در زمان t ($Y_{urban}(t)$) به دست می آید. از آنجا که مصرف خانوارهای شهری در زمان t ، خود تابعی از درآمد قابل تصرف در زمان t ($Y_{urban}(t) - T_{urban}(t)$) و سهم مصرف (α_{urban}) است (طبق معادله $C_{urban} = \alpha_{urban} \cdot (Y_{urban} - T_{urban})$)، پس انداز خانوارهای شهری در زمان t را می توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$S_{rural}(t) = Y_{rural}(t) - \alpha_{urban} \cdot (Y_{rural}(t) - T_{rural}(t)) - T_{rural}(t) \quad (۶)$$

ج-۲. پس انداز خانوار روستایی در زمان t

$$S_{rural}(t) = Y_{rural}(t) - C_{rural}(t) - T_{rural}(t) \quad (۷)$$

این معادله نیز مشابه معادله پس انداز خانوار شهری است.

۲-۲-۳. معادلات بخش تولید

الف- تابع تولید

تابع تولید با کشش جانشینی ثابت (CES) ابزاری کلیدی برای تحلیل ترکیب بهینه عوامل تولید (نیروی کار، سرمایه، و انرژی) در فرایند تولید است. در مدل پژوهش حاضر تولید کل (Q) با استفاده از تابع تولید CES (تابع با کشش جانشینی ثابت) محاسبه می شود. این تابع تولید شامل نیروی کار (L)، سرمایه (K) و انرژی برق آبی (HP) است (ارو و همکاران^۱، ۱۹۶۱). معادله آن به صورت زیر است:

$$Q(t) = A(t) [\delta_L \cdot L(t)^{-\rho} + \delta_K \cdot K(t)^{-\rho} + \delta_{HP} \cdot HP(t)^{-\rho}]^{-1/\rho} \quad (۸)$$

^۱ Arrow, K. J.

که در آن $A(t)$ نشان‌دهنده پیشرفت فناوری یا بهبود کارایی تولید در زمان t است. δ_K و δ_{HP} به ترتیب نشان‌دهنده سهم نیروی کار در تولید، سهم سرمایه در تولید و سهم انرژی برق‌آبی در تولید است. L ، K و HP نیز معرف نیروی کار، سرمایه و مصرف انرژی برق‌آبی در زمان t است. ρ نیز نماینده پارامتر کشش جانشینی در مدل است.

ب- تقاضای عوامل تولید

تقاضا برای نیروی کار (L)، سرمایه (K) و انرژی برق‌آبی (HP) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L(t) = \left(\frac{w(t)}{P(t)} \right)^{-\sigma} \cdot Q(t) \quad (9)$$

$$K(t) = \left(\frac{r(t)}{P(t)} \right)^{-\sigma} \cdot Q(t) \quad (10)$$

$$HP(t) = \left(\frac{P_{HP}(t)}{P(t)} \right)^{-\sigma} \cdot Q(t) \quad (11)$$

که در این رابطه $w(t)$ معرف دستمزد نیروی کار در زمان t ، $r(t)$ نشان‌دهنده نرخ بازده سرمایه در زمان t ، $P_{HP}(t)$ قیمت انرژی برق‌آبی در زمان t و $P(t)$ شاخص قیمت تولیدکننده در زمان t است. σ نیز کشش جانشینی بین عوامل تولید را نشان می‌دهد.

۳-۲-۳. معادلات بخش دولت

الف- درآمد دولت در زمان t

درآمد دولت در این مدل از دو منبع اصلی مالیات‌های مستقیم از خانوارهای شهری و روستایی ($T_{urban} + T_{rural}$) و رانت منابع طبیعی (NR) تأمین می‌شود و معادله آن به صورت زیر است (بارو^۱، ۱۹۹۰):

$$Y_{gov}(t) = T_{urban}(t) + T_{rural}(t) + NR(t) \quad (12)$$

که در آن $Y_{gov}(t)$ معرف درآمد دولت در زمان t و $NR(t)$ نشان‌دهنده رانت منابع طبیعی در زمان t است.

^۱ Barro, R. J.

ب- هزینه‌های دولت در زمان t

هزینه‌های دولت (G) شامل هزینه‌های عمومی، انتقالات به خانوارها و سرمایه‌گذاری است.

$$G(t) = G_{public}(t) + TR_{urban}(t) + TR_{rural}(t) + I_{gov}(t) \quad (۱۳)$$

که در اینجا $G(t)$ نشان‌دهنده هزینه‌های دولت در زمان t ، $G_{public}(t)$ معرف هزینه‌های عمومی دولت در زمان t و $I_{gov}(t)$ نماینده سرمایه‌گذاری دولت در زمان t است.

۳-۲-۴. معادلات بخش محیط زیست (ردپای اکولوژیکی)

در این مدل ردپای اکولوژیکی در زمان t ($EP(t)$) به‌عنوان تابعی از مصرف انرژی برق‌آبی در زمان t ($HP(t)$)، نرخ شهرنشینی در زمان t ($UR(t)$)، میزان رانت منابع طبیعی در زمان t ($NR(t)$)، تولیدات صنعتی در زمان t ($PI(t)$) و درآمد سرانه در زمان t ($IP(t)$) مدل‌سازی می‌شود (واکرناگل و همکاران^۱، ۱۹۹۹).

$$EP(t) = \beta_0 + \beta_1 HP(t) + \beta_2 UR(t) + \beta_3 NR(t) + \beta_4 PI(t) + \beta_5 IP(t) + \varepsilon \quad (۱۴)$$

که در این رابطه β معرف عرض از مبدأ و $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ ضرایب تأثیر متغیرها را نشان می‌دهند. ε نیز بیانگر جمله خطا است.

۳-۲-۵. معادلات پویا

در این بخش، تغییرات متغیرهای کلیدی در طول زمان مدل‌سازی می‌شود. این تغییرات شامل درآمد خانوارها، مصرف خانوارها، پس‌انداز خانوارها، تولید، تقاضای عوامل تولید، درآمد و هزینه‌های دولت، ردپای اکولوژیکی و ظرفیت محیط‌زیست می‌شود (سولو^۲، ۱۹۵۶).

$$Y_{urban}(t+1) = Y_{urban}(t) \cdot (1 + g_{Y_{urban}}) \quad (۱۵)$$

^۱ Wackernagel, M., et al.

^۲ Solow, R. M.

$$Y_{rural}(t+1) = Y_{rural}(t) \cdot (1 + g_{Y_{rural}}) \quad (۱۶)$$

$$C_{urban}(t+1) = C_{urban}(t) \cdot (1 + g_{C_{urban}}) \quad (۱۷)$$

$$C_{rural}(t+1) = C_{rural}(t) \cdot (1 + g_{C_{rural}}) \quad (۱۸)$$

$$S_{urban}(t+1) = S_{urban}(t) \cdot (1 + g_{S_{urban}}) \quad (۱۹)$$

$$S_{rural}(t+1) = S_{rural}(t) \cdot (1 + g_{S_{rural}}) \quad (۲۰)$$

$$Q(t+1) = Q(t) \cdot (1 + g_Q) \quad (۲۱)$$

$$L(t+1) = L(t) \cdot (1 + g_L) \quad (۲۲)$$

$$K(t+1) = K(t) \cdot (1 + g_K) \quad (۲۳)$$

$$HP(t+1) = HP(t) \cdot (1 + g_{HP}) \quad (۲۴)$$

$$Y_{gov}(t+1) = Y_{gov}(t) \cdot (1 + g_{Y_{gov}}) \quad (۲۵)$$

$$G(t+1) = G(t) \cdot (1 + g_G) \quad (۲۶)$$

$$EP(t+1) = EP(t) \cdot (1 + g_{EP}) \quad (۲۷)$$

$$E_{max}(t+1) = E_{max}(t) \cdot (1 + g_{E_{max}}) \quad (۲۸)$$

این معادلات نشان‌دهنده رشد پویای متغیرهای اقتصادی و محیط‌زیستی در طول زمان (t) هستند. هر متغیر در هر دوره با ضرب در نرخ رشد مربوطه (g) به‌روزرسانی می‌شود. این نرخ‌های رشد، میزان تغییرات سالانه هر متغیر را تعیین می‌کنند و معمولاً به‌صورت درصدی بیان می‌شوند. در رابطه آخر E_{max} نشان‌دهنده ظرفیت محیط‌زیست است.

۳-۲-۶. معادلات تعادل کلی

الف- تعادل بازار کالا

در حالت تعادل، عرضه کل کالاها در زمان t ($Q(t)$) باید برابر با مقدار تقاضای کل در زمان t ، ($C(t) + G(t) + I(t)$) باشد.

(۲۹)

$$Q(t) = C_{urban}(t) + C_{rural}(t) + G(t) + I(t)$$

که در آن $I(t)$ معرف سرمایه گذاری کل در زمان t است.

ب- تعادل بازار نیروی کار

عرضه کل نیروی کار در زمان t ($L_{urban}(t) + L_{rural}(t)$) باید برابر با تقاضای کل نیروی کار در زمان t ($L(t)$) باشد.

(۳۰)

$$L_{urban}(t) + L_{rural}(t) = L(t)$$

ج- تعادل بازار سرمایه

در حالت تعادل، عرضه کل سرمایه در زمان t ($K_{urban}(t) + K_{rural}(t)$) باید برابر با تقاضای کل سرمایه ($K(t)$) در زمان t باشد.

(۳۱)

$$K_{urban}(t) + K_{rural}(t) = K(t)$$

د- تعادل محیط زیست

رد پای اکولوژیکی (EP) باید برابر با ظرفیت محیط زیست (E_{max}) باشد.

(۳۲)

$$EP(t) = E_{max}(t)$$

که در آن E_{max} نشان دهنده ظرفیت محیط زیست است.

متغیرهای برونزا و درونزا و همچنین پارامترهای درونزا و برونزا در مدل تعادل عمومی به کار گرفته شده در این پژوهش در جداول (۱) تا (۴) آورده شده است.

جدول ۱. متغیرهای برونزا

متغیر	توضیحات	متغیر	توضیحات
$g_{Y_{urban}}$	نرخ رشد درآمد خانوار شهری	g_L	نرخ رشد نیروی کار کل
$g_{Y_{rural}}$	نرخ رشد درآمد خانوار روستایی	g_K	نرخ رشد سرمایه کل
$g_{C_{urban}}$	نرخ رشد مصرف خانوار شهری	g_{HP}	نرخ رشد مصرف انرژی برق‌آبی
$g_{C_{rural}}$	نرخ رشد مصرف خانوار روستایی	$g_{Y_{gov}}$	نرخ رشد درآمد دولت
$g_{S_{urban}}$	نرخ رشد پس‌انداز خانوار شهری	g_G	نرخ رشد هزینه‌های دولت
$g_{S_{rural}}$	نرخ رشد پس‌انداز خانوار روستایی	g_{EP}	نرخ رشد ردپای اکولوژیکی
g_Q	نرخ رشد تولید کل	g_{Emax}	نرخ رشد ظرفیت محیط‌زیست

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۲. متغیرهای درون‌زا

متغیر	توضیحات	متغیر	توضیحات
$Y_{urban}(t)$	درآمد خانوار شهری در زمان t	$TR_{urban}(t)$	انتقالات دولتی به خانوارهای شهری در زمان t
$Y_{rural}(t)$	درآمد خانوار روستایی در زمان t	$TR_{rural}(t)$	انتقالات دولتی به خانوارهای روستایی در زمان t
$C_{urban}(t)$	مصرف خانوار شهری در زمان t	$Y_{gov}(t)$	درآمد دولت در زمان t
$C_{rural}(t)$	مصرف خانوار روستایی در زمان t	$G(t)$	هزینه‌های دولت در زمان t
$S_{urban}(t)$	پس‌انداز خانوار شهری در زمان t	$EP(t)$	ردپای اکولوژیکی در زمان t
$S_{rural}(t)$	پس‌انداز خانوار روستایی در زمان t	$E_{max}(t)$	ظرفیت محیط‌زیست در زمان t
$Q(t)$	تولید کل در زمان t	$NR(t)$	رانت منابع طبیعی در زمان t
$L(t)$	نیروی کار کل در زمان t	$UR(t)$	نرخ شهرنشینی در زمان t
$K(t)$	سرمایه کل در زمان t	$PI(t)$	تولیدات صنعتی در زمان t
$HP(t)$	مصرف انرژی برق‌آبی در زمان t	$IP(t)$	درآمد سرانه در زمان t
$T_{urban}(t)$	مالیات پرداختی توسط خانوارهای شهری در زمان t	$I(t)$	سرمایه‌گذاری کل در زمان t

نام خانوادگی نویسنده اول و دوم (بیش از دو نویسنده نام خانوادگی نویسنده اول و همکاران | ۲۱

متغیر	توضیحات	متغیر	توضیحات
$T_{rural}(t)$	مالیات پرداختی توسط خانوارهای روستایی در زمان t		

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۳. پارامترهای برون‌زا

پارامتر	توضیحات	پارامتر	توضیحات
α_{urban}	سهم مصرف خانوار شهری	σ	کشش جانشینی بین عوامل تولید
α_{rural}	سهم مصرف خانوار روستایی	β_1	ضریب تأثیر انرژی برق‌آبی در ردپای اکولوژیکی
δ_L	سهم نیروی کار در تابع تولید CES	β_2	ضریب تأثیر نرخ رشد شهرنشینی در ردپای اکولوژیکی
δ_K	سهم سرمایه در تابع تولید CES	β_3	ضریب تأثیر رانت منابع طبیعی در ردپای اکولوژیکی
δ_{HP}	سهم انرژی برق‌آبی در تابع تولید CES	β_4	ضریب تأثیر تولیدات صنعتی در ردپای اکولوژیکی
ρ	پارامتر کشش جانشینی در تابع تولید CES	β_5	ضریب تأثیر درآمد سرانه در ردپای اکولوژیکی

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۴. پارامترهای درونزا

پارامتر	توضیحات	پارامتر	توضیحات
$w_{urban}(t)$	دستمزد نیروی کار شهری در زمان t	$L_{urban}(t)$	عرضه نیروی کار شهری در زمان t
$w_{rural}(t)$	دستمزد نیروی کار روستایی در زمان t	$L_{rural}(t)$	عرضه نیروی کار روستایی در زمان t
$r(t)$	نرخ بازده سرمایه در زمان t	$A(t)$	پیشرفت فناوری یا بهبود کارایی تولید در زمان t
$K_{urban}(t)$	حجم سرمایه گذاری شهری در زمان t	$P(t)$	شاخص قیمت تولیدکننده در زمان t
$K_{rural}(t)$	حجم سرمایه گذاری روستایی در زمان t	$P_{HP}(t)$	قیمت انرژی برق آبی در زمان t

مأخذ: یافته‌های پژوهش

۴. برآورد مدل

۴-۱. کالیبراسیون پارامترها

در پژوهش حاضر، کالیبراسیون پارامترهای مدل با استفاده از ماتریس حسابداری اجتماعی (SAM) و داده‌های اقتصادی انجام شده است. لازم به ذکر است پارامترهای مدل با استفاده از نرم افزار آماری R کالیبره شده‌اند. پس از اجرای کالیبراسیون، مقادیر بهینه شده پارامترها به دست آمده است. این مقادیر نشان دهنده بهترین تطابق بین مدل و داده‌های واقعی هستند. در جدول (۵) مقادیر اولیه و مقادیر کالیبره شده پارامترها آورده شده است:

جدول ۵. مقادیر اولیه و کالیبره شده پارامترهای مدل

مقدار کالیبره شده	مقدار اولیه	نماد	پارامتر
۰/۴۹۸	۰/۷۰۰	α_{urban}	سهم مصرف خانوار شهری
۰/۵۰۲	۰/۳۰۰	α_{rural}	سهم مصرف خانوار روستایی
۰/۱۰۷	۰/۳۷۰	δ_K	سهم سرمایه در تولید
۰/۳۵۹	۰/۵۸۰	δ_L	سهم نیروی کار در تولید
۰/۵۳۴	۰/۰۵۰	δ_{HP}	سهم انرژی برق‌آبی در تولید
-۲/۰۰۰	-۲/۰۰۰	β_1	تأثیر انرژی برق‌آبی بر ردپای اکولوژیکی
۱/۹۰۶	۱/۸۰۰	β_2	تأثیر شهرنشینی بر ردپای اکولوژیکی
۰/۵۴۴	۱/۵۰۰	β_3	تأثیر رانت منابع طبیعی بر ردپای اکولوژیکی
۱/۹۷۲	۱/۷۰۰	β_4	تأثیر تولیدات صنعتی بر ردپای اکولوژیکی
۱/۸۹۱	۱/۶۰۰	β_5	تأثیر درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی
۱/۵۳۳	۰/۶۷۰	σ	کشش جانشینی بین عوامل تولید
۱/۰۰۰	۰/۵۰۰	ρ	پارامتر کشش جانشینی در تابع تولید CES

مأخذ: یافته‌های پژوهش

۴-۲. شبیه سازی مونت کارلو

نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از نرم‌افزار R، در جدول (۶) ارائه شده است. این نتایج تأثیر عدم قطعیت در متغیرهای مستقل بر روند ردپای اکولوژیکی را نشان می‌دهد. این تحلیل، تغییرات و نوسانات در شاخص‌های کلیدی مانند مصرف انرژی برق‌آبی، نرخ رشد

شهرنشینی، تولیدات صنعتی، رانت منابع طبیعی و درآمد سرانه را بررسی کرده و تأثیرات آن‌ها بر فشارهای زیست‌محیطی را آشکار می‌سازد.

جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو

سال	سناریو ۱ افزایش ۵٪ در HP	سناریو ۲ افزایش ۵٪ در UR	سناریو ۳ افزایش ۵٪ در NR	سناریو ۴ افزایش ۵٪ در PI	سناریو ۵ افزایش ۵٪ در IP
۲۰۱۰	-۱/۴۶ (۰/۷۸)	-۰/۸۰ (۰/۷۸)	-۰/۲۷ (۰/۸۳)	-۰/۸۲ (۰/۸۱)	-۰/۸۶ (۰/۸۰)
۲۰۱۱	-۳/۷۴ (۰/۹۳)	-۳/۰۶ (۰/۸۵)	-۲/۴۶ (۰/۹۳)	-۳/۰۳ (۰/۸۹)	-۳/۰۴ (۰/۸۶)
۲۰۱۲	-۳/۹۹ (۰/۹۱)	-۳/۳۸ (۰/۸۸)	-۲/۷۹ (۰/۹۰)	-۳/۳۱ (۰/۹۰)	-۳/۳۹ (۰/۹۰)
۲۰۱۳	-۵/۶۲ (۱/۰۲)	-۴/۸۱ (۰/۹۹)	-۴/۳۶ (۰/۹۸)	-۴/۷۷ (۰/۹۹)	-۴/۸۴ (۰/۹۴)
۲۰۱۴	-۵/۰۸ (۰/۹۶)	-۴/۳۱ (۰/۹۵)	-۳/۸۳ (۰/۹۴)	-۴/۳۵ (۰/۹۱)	-۴/۴۰ (۰/۹۷)
۲۰۱۵	-۵/۳۷ (۰/۹۸)	-۴/۵۷ (۰/۹۴)	-۴/۰۳ (۰/۹۳)	-۴/۵۹ (۰/۹۰)	-۴/۶۱ (۰/۸۹)
۲۰۱۶	-۶/۹۶ (۱/۰۷)	-۶/۱۶ (۱/۰۲)	-۵/۵۸ (۱/۰۱)	-۶/۱۲ (۰/۹۷)	-۶/۱۶ (۱/۰۴)
۲۰۱۷	-۶/۲۹ (۱/۰۱)	-۵/۴۰ (۰/۹۵)	-۴/۸۸ (۰/۹۹)	-۵/۴۰ (۰/۹۹)	-۵/۴۳ (۱/۰۰)
۲۰۱۸	-۶/۴۹ (۱/۰۶)	-۵/۶۵ (۰/۹۷)	-۵/۰۶ (۱/۰۱)	-۵/۶۲ (۰/۹۶)	-۵/۵۸ (۰/۹۷)
۲۰۱۹	-۱۵/۴۵ (۱/۴۱)	-۱۴/۲۴ (۱/۴۰)	-۱۳/۷۳ (۱/۳۷)	-۱۴/۲۵ (۱/۴۰)	-۱۴/۲۸ (۱/۳۷)
۲۰۲۰	-۱۰/۷۲ (۱/۲۱)	-۹/۶۰ (۱/۱۶)	-۹/۱۰ (۱/۲۰)	-۹/۶۲ (۱/۱۹)	-۹/۹۶ (۱/۱۵)
۲۰۲۱	-۴/۵۸ (۰/۹۶)	-۳/۷۷ (۰/۹۲)	-۳/۲۵ (۰/۹۲)	-۳/۷۴ (۰/۹۴)	-۳/۸۰ (۰/۹۱)
۲۰۲۲	-۷/۰۶ (۱/۰۴)	-۶/۲۰ (۱/۰۲)	-۵/۶۹ (۱/۰۴)	-۶/۲۳ (۱/۰۳)	-۶/۲۴ (۱/۰۶)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در جدول فوق مقادیر اعداد بدون پرانتز درصد تغییرات در میانگین و اعداد داخل پرانتز انحراف معیار را نشان می‌دهد که معرف عدم قطعیت است.

۳-۴. تحلیل حساسیت

در این پژوهش، تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر تغییرات در متغیرهای مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، تولیدات صنعتی و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی انجام شده است که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج تحلیل حساسیت

سناریوها		شاخص حساسیت ردپای اکولوژیکی
سناریو ۱	افزایش ۵٪ در مصرف انرژی برق آبی	-۲/۱۲۴
سناریو ۲	افزایش ۵٪ در نرخ رشد شهرنشینی	۲/۴۶E-۰۶
سناریو ۳	افزایش ۵٪ در رانت منابع طبیعی	۳/۱۲۲
سناریو ۴	افزایش ۵٪ در تولیدات صنعتی	۰/۰۰۲
سناریو ۵	افزایش ۵٪ در درآمد سرانه	۱/۷۴E-۰۵

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج جدول (۷) در قالب سناریوهای زیر قابل بررسی است:

سناریو ۱) تأثیرافزایش ۵ درصدی مصرف انرژی برق آبی (HP) بر ردپای اکولوژیکی

افزایش مصرف انرژی برق آبی، ردپای اکولوژیکی را ۲/۱۲۴ درصد کاهش می‌دهد. این نتیجه نشان‌دهنده نقش مثبت انرژی پاک و تجدیدپذیر است که به عنوان جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی عمل می‌کند. همچنین، توسعه زیرساخت‌های مربوط به

تولید و توزیع انرژی برق آبی می تواند به کاهش ضرر محیط زیستی در مقیاس گسترده کمک کند.

سناریو ۲) تأثیر افزایش ۵ درصدی نرخ شهرنشینی (UR) بر ردپای اکولوژیکی
افزایش نرخ شهرنشینی، ردپای اکولوژیکی را تنها $6-2/46E$ درصد افزایش می دهد. این اثر ناچیز نشان می دهد که در این مدل، شهرنشینی به دلیل وجود زیرساخت های کارآمد و مدیریت مناسب منابع طبیعی، تأثیر محدودی بر محیط زیست دارد.

سناریو ۳) تأثیر افزایش ۵ درصدی رانت منابع طبیعی (NR) بر ردپای اکولوژیکی
افزایش رانت منابع طبیعی، ردپای اکولوژیکی را $3/122$ درصد افزایش می دهد. این نتیجه نشان دهنده تأثیر منفی استخراج بی رویه منابع طبیعی، مانند نفت، گاز، و معادن، بر محیط زیست است. استخراج این منابع معمولاً با تخریب اکوسیستم ها، کاهش تنوع زیستی، و افزایش آلودگی هوا و آب همراه است.

سناریو ۴) تأثیر افزایش ۵ درصدی تولیدات صنعتی (PI) بر ردپای اکولوژیکی
افزایش تولیدات صنعتی، ردپای اکولوژیکی را $2/000$ درصد افزایش می دهد. این افزایش نسبتاً کوچک نشان می دهد که صنایع مورد بررسی، احتمالاً از فناوری های نسبتاً پاک و استانداردهای زیست محیطی استفاده می کنند.

سناریو ۵) تأثیر افزایش ۵ درصدی درآمد سرانه (IP) بر ردپای اکولوژیکی
افزایش درآمد سرانه، ردپای اکولوژیکی را تنها $5-1/74E$ درصد افزایش می دهد. این اثر ناچیز ممکن است ناشی از افزایش آگاهی زیست محیطی در جوامع با درآمد بالاتر باشد. با افزایش درآمد، افراد ممکن است به دنبال روش های مصرف پایدار و زندگی سبزتر باشند.

۵. نتیجه گیری و پیشنهادها

افزایش مصرف انرژی برق آبی به عنوان یک منبع پاک و تجدیدپذیر، می تواند نقش بسیار مؤثری در کاهش ردپای اکولوژیکی ایفا کند. در این سناریو، مشاهده شد که افزایش ۵ درصدی در مصرف انرژی برق آبی، باعث کاهش $2/124$ درصدی ردپای اکولوژیکی

می‌شود. این کاهش به وضوح نشان می‌دهد که انرژی برق‌آبی می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد که تأثیرات منفی بسیاری بر محیط زیست دارند. برای افزایش سهم برق‌آبی در تولید انرژی، ضروری است که دولت‌ها و نهادهای مربوطه زیرساخت‌های لازم برای تولید و توزیع این نوع انرژی را توسعه دهند.

افزایش نرخ شهرنشینی تنها تأثیر جزئی بر افزایش ردپای اکولوژیکی داشت و تنها به میزان $۰.۰۶E-۲/۴۶$ درصد باعث افزایش آن شد. این نشان‌دهنده آن است که اگرچه شهرنشینی ممکن است باعث فشار بر منابع طبیعی شود، اما در شرایطی که زیرساخت‌ها به طور مؤثر مدیریت شوند، اثرات منفی آن محدود است. استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت منابع می‌تواند به کاهش ضایعات و افزایش کارایی مصرف کمک کند. افزایش رانت منابع طبیعی به‌ویژه از طریق استخراج بی‌رویه منابع طبیعی مانند نفت، گاز و معادن، تأثیرات منفی قابل توجهی بر محیط‌زیست دارد. در این سناریو، شاهد افزایش $۳/۱۲۲$ درصدی در ردپای اکولوژیکی بودیم. این نتیجه نشان می‌دهد که بهره‌برداری غیرمؤثر از منابع طبیعی می‌تواند موجب تخریب اکوسیستم‌ها، کاهش تنوع زیستی و افزایش آلودگی‌ها شود. افزایش تولیدات صنعتی، اگرچه باعث افزایش جزئی در ردپای اکولوژیکی شد، اما نشان داد که صنایع در حال حاضر از فناوری‌های نسبتاً پاک استفاده می‌کنند. این موضوع نشان‌دهنده این است که با رعایت استانداردهای زیست‌محیطی و استفاده از فناوری‌های پیشرفته، می‌توان به تعادل میان توسعه صنعتی و حفاظت از محیط زیست دست یافت. افزایش درآمد سرانه، اگرچه تنها تأثیر اندکی بر افزایش ردپای اکولوژیکی داشت، اما نشان‌دهنده این است که هرچه درآمد سرانه بالاتر باشد، آگاهی زیست‌محیطی افزایش یافته و مردم تمایل دارند به سمت مصرف پایدارتر و سبک زندگی سبزتر حرکت کنند. در نهایت، برای دستیابی به توسعه پایدار، سیاست‌ها باید جامع و همه‌جانبه باشند و بر اساس ارزیابی دقیق تأثیرات محیط زیستی هر بخش تدوین شوند. تنها با اتخاذ سیاست‌هایی که به کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی کمک می‌کنند، می‌توان به توسعه‌ای دست یافت که همزمان به بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها و حفاظت از منابع طبیعی و اکوسیستم‌ها توجه کند.

۶. تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

۷. سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس خود را نسبت به زحمات هیئت تحریریه پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران اعلام می‌دارند.

ORCID

Masoud Cheshmaghil  <http://orcid.org/0009-0002-5985-1937>
Javad Shahraki  <http://orcid.org/0000-0001-8089-7601>
Reza Ashraf Ganjoei  <http://orcid.org/0000-0003-3854-8445>

۸. منابع

- اصفهان، اعظم؛ قبادی، سارا و آذربایجانی، کریم. (۱۴۰۱). تحلیل رابطه بین رشد اقتصادی، مصرف انرژی و ردپای اکولوژیکی در منتخبی از کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه. *پژوهشهای اقتصادی (رشد و توسعه پایدار)*، ۸۶(۲۲)، ۲۰۳-۲۳۲.
- سایه میری، علی و نظری، رقیه. (۱۳۹۹). تاثیر شهرنشینی بر تخریب محیط زیست در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته. *مجله مطالعات علوم محیط زیست*، ۱۵(۱)، ۲۲۴۴-۲۲۵۰.
- صفرزاده، اسماعیل و شاد استانجین، انسیه. (۱۴۰۱). برق‌آبی و ردپای اکولوژیک در ایران. *فصلنامه مطالعات اقتصادی انرژی*، ۱۴(۲)، ۳۴-۵۲.
- فطرس، محمدحسن و معبودی، رضا. (۱۳۸۹). رابطه علی مصرف انرژی جمعیت شهرنشین و آلودگی محیط‌زیست در ایران ۱۳۸۵-۱۳۵۰. *مطالعات اقتصاد انرژی*، ۲۷(۷)، ۱-۱۸.
- معین‌الدینی، سمانه؛ زارع مهرجردی، محمدرضا؛ امیر تیموری، سمیه و مهربانی بشرآبادی، حسین. (۱۴۰۳). رانت منابع طبیعی و تخریب محیط‌زیست در خاورمیانه. *فصلنامه مطالعات محیط‌زیست*، ۱۸(۲)، ۱۱۲-۱۳۰.

References

- Adrinanto, A. (۲۰۲۴). Urbanization and environmental sustainability in Nigeria: An ecological deficit approach. *Journal of Environmental Management*, ۳۲۰, ۱۱۵۶۷۸. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.115678
- Al-Ain, S., et al. (۲۰۲۴). Urbanization, growth, and ecological footprint in South Asia: A panel analysis. *Sustainable Cities and Society*, 93, 105-120. DOI: 10.1016/j.scs.2023.105-120
- Arrow, K. J., Chenery, H. B., Minhas, B. S., & Solow, R. M. (۱۹۶۱). Capital-labor substitution and economic efficiency. *The Review of Economics and Statistics*, 43(3), 225-250. <https://doi.org/10.2307/1927286>

- Barro, R. J. (۱۹۹۰). Government spending in a simple model of endogenous growth. *Journal of Political Economy*, ۹۸(۵), S۱۰۳–S۱۲۵. <https://doi.org/10.1086/261726>
- Decaluwé, B., Martens, A., & Savard, L. (۲۰۰۱). Poverty and income distribution in a CGE-household micro-simulation model: Top-down/bottom-up approach. *Cahiers de recherche ۰۱-۱۳*, Université Laval.
- Deaton, A., & Muellbauer, J. (۱۹۸۰). Economics and consumer behavior. Cambridge University Press.
- Esfahani, A., Ghobadi, S., & Azarbayejani, K. (۲۰۲۲). An Analysis of the Relationship between Economic Growth, Energy Consumption, and Ecological Footprint in Some Selected Developed and Developing Countries. *Economic Research (Sustainable Growth and Development)*, ۲۲(۸۶), ۲۰۳–۲۳۲. [In Persian]
- Fotros, M. H., & Maboudi, R. (۲۰۱۰). The causal relationship between energy consumption, urban population, and environmental pollution in Iran (۱۹۷۱–۲۰۰۶). *Energy Economics Studies*, ۷(۲۷), ۱–۱۸. [In Persian]
- Metropolis, N., & Ulam, S. (۱۹۴۹). The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, ۴۴(۲۴۷), ۳۳۵–۳۴۱. <https://doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310>
- Moeinoddini, M., et al. (۲۰۲۴). Natural resource rents and environmental degradation in MENA. *Environmental Studies Journal*, ۱۴(۲), ۱۱۲–۱۳۰. [In Persian]
- Monfreda, C., Wackernagel, M., & Deumling, D. (۲۰۰۴). Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*, ۲۱(۳), ۲۳۱–۲۴۶. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2003.10.009>
- Safarzadeh, S., & Shad Estanjin, M. (۲۰۲۲). Hydropower and ecological footprint in Iran. *Energy Economics Review*, ۱۴(۲), ۳۴–۵۲. [In Persian]
- Sayehmiri, N., & Nazari, A. (۲۰۲۰). Urbanization and environmental degradation in Iran. *Journal of Urban Economics*, ۹(۱), ۵۵–۷۸. [In Persian]
- Solow, R. M. (۱۹۵۶). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, ۷۰(۱), ۶۵–۹۴. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Wackernagel, M., et al. (۱۹۹۹). Ecological footprint analysis. *Ecological Economics*, ۲۹(۳), ۳۷۵–۳۹۰.