

Determining ICT Subsidies for Achieving Environmental Goals of the Intergovernmental Panel on Climate Change in Iran and Middle Eastern Countries: A RICE Approach

Neda Jamshidi¹, Rouhollah Shahnazi² , Ebrahim Hadian³ Sakine Owjimehr⁴

1. Ph.D. Candidate in Economics, Department of Economics, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: n.jamshidi23@gmail.com
2. Professor, Department of Economics, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran. (Corresponding Author) Email: rshahnazi@shirazu.ac.ir
3. Professor, Department of Economics, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: ehadian@rose.shirazu.ac.ir
4. Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: s.owjimehr@shirazu.ac.ir

Abstract

In response to global commitments to address climate change, economic policies must align with the goal of reducing carbon dioxide (CO₂) emissions and achieving the targets set by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Information and Communication Technology (ICT) is increasingly recognized as a strategic tool influencing both economic productivity and environmental sustainability. Assessing the appropriate level of economic support for ICT in alignment with IPCC goals is, therefore, a critical step toward managing this technology for sustainable development. This study aims to estimate the ICT subsidy levels required to achieve IPCC environmental targets using the Regional Integrated Climate–Economy (RICE) model. It also investigates the impact of ICT on economic growth and CO₂ emissions. The model is calibrated for Iran and Middle Eastern countries using structural parameters developed by Nordhaus in 2013, and simulations are conducted under four scenarios: (1) a baseline scenario, (2) baseline with ICT, (3) a 2°C temperature constraint scenario (aligned with IPCC goals), and (4) a 2°C scenario with ICT integration. Results show that ICT subsidies are lowest in the baseline scenario and increase significantly under the 2°C constraint scenario. ICT implementation leads to higher economic growth, lower CO₂ concentrations, reduced global temperature, and decreased carbon pricing compared to non-ICT scenarios. These findings highlight the need for targeted ICT support through subsidies for low-carbon digital projects, improved infrastructure in underserved regions, and tax incentives for technology-based businesses—advancing CO₂ reduction, IPCC compliance, and economic development simultaneously.

Article information

Review History:

Received: Mar. 26, 2025
Revised: Apr. 15, 2025
Accepted: may. 24, 2025
Published online: des.08, 2025

Keywords:

CO₂ Emissions
Economic Growth
Regional Integrated Model of Climate and Economy (RICE)
ICT Subsidies

JEL Classification:

O33, Q54, Q58, C68, F64

Corresponding Author:

rshahnazi@shirazu.ac.ir



Economic Research and Perspectives

Original Research Article/ Vol.26, No.1, 2026, pp: 299-330

Aim and Introduction:

In response to global commitments to combat climate change, economic policies must be structured to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions and achieve the objectives set by the IPCC. One of the key instruments in this context is ICT, which significantly affects both economic productivity and environmental sustainability. ICT enhances efficiency across various economic sectors while simultaneously contributing to emission reduction strategies. Therefore, evaluating economic support for ICT in alignment with IPCC objectives is crucial for managing this technology effectively toward sustainable development.

This study aims to quantify the ICT subsidies necessary to meet the environmental targets of the IPCC using the RICE model. It also examines the impact of ICT on economic growth and CO₂ emissions.

Methodology:

To achieve the research objectives, this study utilizes the theoretical framework of the RICE model, specifically applied to Iran and Middle Eastern countries. The structural parameters of the model are adopted from Nordhaus (2013), and simulations are conducted under four different scenarios:

- 1) Baseline scenario – reflecting business-as-usual economic growth without ICT integration.
- 2) Baseline with ICT – incorporating ICT development into the economic system.
- 3) 2 °C temperature constraint – aligning with the IPCC’s climate target but excluding ICT considerations.
- 4) 2 °C constraint with ICT – integrating ICT in a constrained climate regime.

These scenarios are used to estimate the ICT subsidy levels required to achieve environmental goals while considering their effects on economic growth and CO₂ emissions. The model incorporates dynamic interactions among economic activities, technological advancements, and climate policies, providing a comprehensive analysis of how ICT subsidies can influence regional economic and environmental outcomes.

Findings:

The results present a compelling case for policy-driven ICT expansion. In both Iran and Middle Eastern countries, the baseline scenarios yield the lowest ICT subsidy requirements. However, when climate constraints are introduced—particularly the IPCC’s 2°C target—the need for subsidies increases substantially. This suggests that more stringent environmental goals necessitate stronger financial support for clean technology transitions.

Importantly, ICT implementation not only reduces CO₂ concentrations but also generates significant positive effects on regional economic growth. By enhancing productivity and enabling low-carbon innovation, ICT lowers the average global temperature trajectory while improving macroeconomic performance. Moreover, scenarios incorporating ICT exhibit notably lower carbon prices, indicating that ICT adoption serves as a cost-effective mitigation mechanism.

In the Middle East, where digital infrastructure is expanding rapidly but unevenly, the required subsidies are higher than in Iran, reflecting differences in baseline

Economic Research and Perspectives

Original Research Article/ Vol.26, No.1, 2026, pp: 299-330

ICT penetration, governance capacity, and institutional readiness. Nevertheless, both regions demonstrate improved economic outcomes and environmental indicators when ICT is integrated under constrained scenarios.

Discussion and Conclusion:

The integration of ICT into environmental–economic models such as RICE underscores its strategic value in advancing sustainable development. By facilitating real-time emissions monitoring, optimizing energy consumption, and digitizing traditionally resource-intensive sectors, ICT can act as a catalyst for green growth. The study's findings underscore the necessity of tailored ICT subsidy programs that reflect each region's unique developmental challenges and opportunities.

Crucially, the simulations indicate that ICT does not merely function as a supportive tool—it actively transforms the policy landscape. Its capacity to lower the marginal cost of carbon abatement and reduce dependency on fossil-fuel-driven growth models makes it indispensable for climate-smart policy design. In scenarios where ICT is present, the economic system demonstrates greater resilience to climate shocks and stricter emissions regulations, supporting the notion that digital transformation can be harmonized with ecological sustainability.

Furthermore, the study identifies a strong inverse relationship between ICT proliferation and CO₂ intensity, particularly when subsidies are optimized. This finding supports the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis, which posits an inverted U-shaped relationship between environmental degradation and economic growth. Environmental degradation initially increases with growth but declines after reaching a certain level of technological maturity and institutional efficiency. ICT accelerates this turning point by fostering cleaner production methods and smarter consumption patterns.

From a policy perspective, this research advocates for smart, region-specific subsidy strategies that maximize the environmental return on investment. Subsidies should prioritize digital infrastructure in underserved areas, incentivize private-sector innovation, and be complemented by measures such as carbon pricing and regulatory reform.

In conclusion, the study confirms that ICT is a critical enabler in the global response to climate change. When supported by appropriate economic incentives, it not only reduces greenhouse gas emissions but also drives inclusive economic growth. For countries such as Iran and those in the Middle East, where climate risks are high and digital transitions are ongoing, investing in ICT subsidies is not merely a policy option—it is a strategic imperative.

تعیین یارانه فناوری اطلاعات و ارتباطات جهت تحقق اهداف زیست‌محیطی هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم در ایران و کشورهای خاورمیانه: رهیافت RICE

ندا جمشیدی^۱، روح‌اله شهنازی^۲ , ابراهیم هادیان^۳، سکینه اوجی مهر^۴

۱. دانشجوی دکتری رشته اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. n.jamshidi23@gmail.com

۲. استاد، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. (نویسنده مسئول). rshahnazi@shirazu.ac.ir

۳. استاد، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. ehadian@rose.shirazu.ac.ir

۴. دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. s.ojimehr@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۴/۱/۱۶ بازنگری: ۱۴۰۴/۱/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۳ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۹/۱۷</p> <p>کلمات کلیدی: انتشار CO₂ رشد اقتصادی مدل منطقه‌ای ادغام اقلیم و اقتصاد یارانه فناوری اطلاعات و ارتباطات</p> <p>طبقه‌بندی JEL: O33, O54, Q58, C68, F64</p> <p>نویسنده مسئول: rshahnazi@shirazu.ac.ir</p>	<p>در راستای تعهدات جهانی مقابله با تغییرات اقلیمی، سیاست‌های اقتصادی باید به کاهش انتشار کربن دی‌اکسید (CO₂) و تحقق اهداف هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) کمک کنند. یکی از ابزارهای مورد توجه در این زمینه، فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) است که ممکن است بر بهره‌وری اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی تأثیرگذار باشد. هدف از این پژوهش، برآورد میزان یارانه بر ICT جهت تحقق اهداف زیست‌محیطی IPCC در چهارچوب مدل منطقه‌ای ادغام اقلیم و اقتصاد (RICE) و نیز بررسی اثر ICT بر رشد اقتصادی و انتشار CO₂ نیز می‌باشد. برای این منظور، با استفاده از پارامترهای ساختاری مدل نوردهاوس (۲۰۱۳)، ۴ سناریو (پایه، پایه با اعمال ICT، محدودیت دمایی ۲ درجه (مطابق با هدف IPCC)، و محدودیت دمایی ۲ درجه با اعمال ICT) برای مناطق ایران و کشورهای خاورمیانه شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در هر دو منطقه مورد بررسی، در سناریوی پایه، یارانه ICT در پایین‌ترین مقدار خود قرار دارد، اما در سناریوی محدودیت دمایی، این یارانه به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. همچنین، ICT منجر به افزایش رشد اقتصادی، کاهش غلظت کربن، کاهش قیمت کربن و کاهش دمای متوسط شده است.</p>

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، دغدغه حفظ محیط‌زیست و کاهش آسیب‌های ناشی از تغییرات اقلیمی، به یکی از اولویت‌های اصلی سیاستگذاران اقتصادی تبدیل شده است. کشورها در تلاش‌اند تا ضمن تداوم رشد اقتصادی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه انتشار کربن دی‌اکسید (CO₂)، را در راستای تعهدات بین‌المللی مانند اهداف هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) کاهش دهند. با این حال، همزمانی اهداف رشد و حفاظت محیط‌زیست، گاه با چالش تعارض منافع مواجه است. از یک سو، تولید و مصرف انبوه کالاها با هدف ارتقاء سطح استانداردهای زندگی بشر انجام می‌شود و از سوی دیگر، همین فرایندها منجر به بروز آسیب‌های جدی زیست‌محیطی شده‌اند که دستیابی همزمان به هر دو هدف را دشوار می‌سازد. این تعارض، دولت‌ها را ملزم می‌کند تا در اجرای برنامه‌های رشد و توسعه اقتصادی، سیاست‌هایی اتخاذ نمایند که انتشار CO₂ را نیز کنترل کند.

در این میان، یکی از ابزارهایی که در سال‌های اخیر با سرعت چشمگیر در حال گسترش است، فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) می‌باشد. گسترش فعالیت‌های دولت الکترونیک، بانکداری دیجیتال، تجارت الکترونیک و خدمات مشابه، بیانگر اهمیت روزافزون این فناوری در ساختارهای اقتصادی و اجتماعی است. ICT به هر نوع دستگاه ارتباطی یا برنامه کاربردی از قبیل رادیو، تلویزیون، تلفن‌های همراه، رایانه، نرم‌افزار، سخت‌افزارهای شبکه و سیستم‌های ماهواره‌ای اطلاق می‌شود که مجموعه متنوعی از خدمات را ارائه می‌دهند (بریگلور، ۲۰۲۳).

در ایران نیز، این روند رشد کاملاً مشهود است. فناوری اطلاعات و ارتباطات، سهم قابل توجهی از اقتصاد را به خود اختصاص داده است؛ به طوری که طبق گزارش سازمان توسعه صنعتی ملل متحد، سهم این بخش در تولید ناخالص داخلی کشور در سال ۲۰۱۷ حدود ۲/۵ درصد برآورد شده است. این سهم در سال‌های اخیر افزایش یافته و روندی رو به رشد داشته است؛ اما گسترش ICT صرفاً یک پدیده اقتصادی نیست؛ این فناوری پیامدهایی زیست‌محیطی نیز دارد.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که انتشار سرانه CO₂ در ایران در سال ۲۰۲۱ حدود ۷/۶۶ تن گزارش شده که بالاتر از میانگین جهانی است (ورلدومتر، ۲۰۲۵). این داده‌ها، زنگ خطری برای اثرات جانبی توسعه فناوری در غیاب سیاست‌های تنظیمی مؤثر محسوب می‌شود.

درواقع، فناوری‌های ارتباطی، علاوه بر نقش مهمی که در رشد اقتصادی ایفا می‌کنند، تأثیرات قابل توجهی نیز بر محیط‌زیست دارند. این تأثیر از سه کانال اصلی ناشی می‌شود: ۱- اثرات استفاده، شامل افزایش تقاضا برای تجهیزات ICT است که هم اثرات منفی (نظیر تولید و دفع تجهیزات) و هم مثبت (مانند پایش و کنترل آلاینده‌ها) دارد؛ ۲- اثر جایگزینی، که به بهینه‌سازی فرایندهای تولید و

1. The Intergovernmental Panel on Climate Change
2. Briglauer et al. (2023).
3. Worldometer (2021).

کاهش انتشار CO₂ از طریق جایگزینی کالاهای فیزیکی با خدمات دیجیتال مانند آموزش و تجارت الکترونیک مربوط می‌شود؛ ۳- اثرات هزینه که ناشی از کاهش قیمت خدمات ICT است و می‌تواند با افزایش تقاضا برای کالاها و خدمات، منجر به افزایش انتشار CO₂ گردد (نجاتی و شاه، ۲۰۲۳؛ شهنازی و دهقان شابانی، ۲۰۱۹). در نتیجه، تأثیر نهایی ICT بر محیط‌زیست، تابعی از برآیند این سه اثر متضاد است. مطالعات تجربی نیز بر پیچیدگی این رابطه تأکید دارند.

با توجه به پیچیدگی و گاه تناقض‌آمیز بودن آثار زیست‌محیطی ICT، بررسی این تأثیرات در کشورهایی با سطوح متفاوت توسعه فناوری و میزان تدوین و اجرای سیاست‌های زیست‌محیطی، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این میان، کشورهای خاورمیانه، از جمله ایران، طی دهه اخیر شاهد توسعه قابل توجه زیرساخت‌های ICT بوده‌اند. با این حال، این روند توسعه همزمان با چالش‌هایی مانند نابرابری در دسترسی، پراکندگی سیاست‌ها و ضعف در حکمرانی دیجیتال همراه بوده است. از این رو، تحلیل‌های سیاست‌محور در این زمینه، باید متکی به شرایط واقعی این مناطق باشد تا بتوان با طراحی سیاست‌های متناسب، اثرات مثبت ICT بر محیط‌زیست را تقویت و آثار منفی آن را کنترل کرد. در این چهارچوب، بررسی تجربه‌های پیشین درباره تأثیر متغیرهای اقتصادی بر آلودگی زیست‌محیطی در سطوح ملی و منطقه‌ای، می‌تواند مبنای مناسبی برای گسترش تحلیل‌ها در حوزه ICT فراهم آورد؛ چراکه این تجربیات، به درک بهتر تعامل میان اقتصاد، محیط‌زیست و فناوری کمک می‌کنند. بر این اساس، سیاست‌های حمایت مالی از ICT نیز باید با در نظر گرفتن همین پیچیدگی‌های اقتصادی و نهادی و با تکیه بر شواهد بومی‌شده، طراحی شوند؛ اما پیش از پرداختن به طراحی این سیاست‌ها، ضروری است که به شرایطی پرداخته شود که تحت آن‌ها ICT می‌تواند در مسیر توسعه پایدار هدایت شود.

در صورتی که اثرات زیست‌محیطی ICT در مسیر رشد اقتصادی مثبت باشد و منجر به بهبود کیفیت محیط‌زیست گردد، می‌تواند کشورها را به سمت توسعه پایدار هدایت کند؛ اما در صورتی که اثرات زیست‌محیطی این نوع ابزارها، منفی باشد و کیفیت محیط‌زیست را کاهش دهد، دو هدف مذکور در تعارض با هم قرار گرفته و دستیابی به توسعه پایدار دشوار خواهد شد. بنابراین، اثرات زیست‌محیطی نامشخص ICT و گسترش اجتناب‌ناپذیر آن ایجاب می‌کند که سیاست‌گذاران در برنامه‌های دستیابی به توسعه پایدار خود، از ابزارهایی بهره‌گیرند که اثرات منفی را کاهش داده و اثرات مثبت آن را تقویت کنند (نگویین و له، ۲۰۲۴).

1. Nejati & Shah (2023).
2. Shahnazi & Dehghan Shabani (2019).
3. Nguyen & Le (2024).

در این راستا، یکی از سیاست‌هایی که می‌تواند در خصوص ICT به‌کار گرفته شود، اعمال یارانه‌های مالی (مثبت یا منفی) بر آن‌ها است. طبق تعریف سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) و بانک جهانی، یارانه‌های ICT شامل هرگونه حمایت مالی مستقیم یا غیرمستقیم دولت‌ها از تولید، توسعه، عرضه و یا مصرف خدمات و زیرساخت‌های مرتبط با این فناوری هستند (OECD، ۲۰۱۷؛ بانک جهانی، ۲۰۱۳). این حمایت‌ها معمولاً با هدف کاهش هزینه‌های دسترسی، ارتقاء پوشش دیجیتال، بهبود کیفیت خدمات و افزایش شمول دیجیتال در جامعه ارائه می‌شوند.

در صورتی که ICT اثر فزاینده بر انتشار CO₂ داشته باشد، با اعمال یارانه منفی (مالیات)، هزینه استفاده از آن افزایش یافته و در نتیجه، مصرف آن کاهش می‌یابد. در مقابل، اگر ICT اثری کاهنده بر انتشار CO₂ داشته باشد، با اعمال یارانه مثبت بر این فناوری‌ها، می‌توان به افزایش بهره‌گیری از آن کمک کرد. در چنین شرایطی، حمایت هدفمند از ICT می‌تواند موجب کاهش آثار زیان‌بار زیست‌محیطی گردد. با این حال، پرسش اساسی آن است که آیا هر سطحی از یارانه بر این فناوری‌ها اعمال شود، منجر به تحقق این هدف می‌شود یا باید سطح مشخص و بهینه‌ای از یارانه برای آن تعیین گردد؟ از این‌رو، در پژوهش حاضر، تلاش شده است تا با بهره‌گیری از مدل منطقه‌ای ادغام اقلیم و اقتصاد^۳ (RICE)، میزان یارانه لازم برای ICT به‌منظور تحقق اهداف زیست‌محیطی تعیین شده توسط IPCC محاسبه گردد. علاوه بر این، تأثیر این یارانه‌ها بر رشد اقتصادی و انتشار CO₂ در مناطق ایران و خاورمیانه نیز بررسی می‌شود.

نوآوری اصلی پژوهش، تعیین مقدار یارانه روی ICT به‌عنوان یک سیاست جدید برای مقابله با آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌هنگام افزایش رشد اقتصادی است. در ادامه، ابتدا پیشینه پژوهش شامل مختصری از مهم‌ترین مطالعات داخلی و خارجی ارائه شده، سپس در بخش سوم، مدل مورد استفاده در پژوهش، به‌طور مختصر تشریح شده، در بخش چهارم، نتایج تجربی مطالعه آورده شده و در نهایت، در بخش پایانی، بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات سیاستی ارائه شده است.

۲. پیشینه پژوهش

در مطالعات متعددی، سیاست‌های مقابله با آلودگی‌های زیست‌محیطی، با بهره‌گیری از مدل‌های تعادل عمومی و مدل‌های ادغام اقلیم و اقتصاد مثل DICE^۴ و RICE^۵، و همچنین نقش ICT در این حوزه، بررسی شده است. این مطالعات در دو دسته زیر مرور می‌شوند:

1. OECD

2. World Bank (2014).

۳. مدل RICE (Regional Integrated model of Climate and the Economy) یک مدل تعادل

عمومی پویای منطقه‌ای است که توسط William Nordhaus برای شبیه‌سازی تعامل میان متغیرهای

اقتصادی و اقلیمی در مناطق مختلف جهان توسعه یافته است.

4. Dynamic Integrated Climate-Economy

۱-۲. سیاست‌های مقابله با آلودگی‌های زیست‌محیطی

این دسته از مطالعات، عمدتاً به روش تعادل عمومی و نظریه بازی‌ها انجام شده‌اند. در ایران، بخشی دست‌چندی و همکاران (۱۳۹۷)، با مدل DICE نشان دادند که افزایش عدالت بین نسلی باعث کاهش گرمایش زمین و افزایش رشد اقتصادی می‌شود.

فرازمند و همکاران (۱۳۹۸)، نیز با این مدل، هزینه اجتماعی کربن را برای ایران در سال ۱۳۹۵ برابر با ۵۱۳۸۹۱/۲۳۲ ریال بر تن CO₂ اعلام کردند.

حق‌شناس و همکاران (۱۴۰۰)، در چهارچوب مدل RICE افزایش دما تا ۴/۴۹ درجه تا سال ۲۱۰۵ را در نبود سیاست‌های ممانعتی پیش‌بینی کردند.

نوروزی و همکاران (۱۴۰۳)، با درون‌سازی رشد در RICE نشان دادند که مالیات بهینه بر کربن، می‌تواند دمای جهانی را زیر دو درجه حفظ کند.

سایر مطالعات در این زمینه، عمدتاً با استفاده از مدل‌های تعادل عمومی، نظریه بازی‌ها و مدل‌های اقتصادسنجی، به بررسی اثرات مالیات بر کربن و یارانه‌های انرژی پرداخته‌اند؛ از جمله، نعمت‌اللهی و همکاران (۱۳۹۷)، با استفاده از یک الگوی تعادل عمومی محاسبه‌پذیر، اثرگذاری همزمان مالیات انرژی و یارانه R&D را در کاهش مصرف انرژی و آلودگی تأیید کردند.

جهانگرد و همکاران (۱۳۹۸)، نیز نشان دادند که مالیات بر انتشار کربن، مؤثرتر از مالیات بر قیمت انرژی است.

فرجی دیزجی (۱۴۰۱)، دریافت که مالیات کربن، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر را در OECD تقویت می‌کند.

نعمت‌اللهی سروسنایی و همکاران (۱۴۰۲)، با استفاده از الگوی تعادل عمومی محیط‌زیست‌محور، پروژه تحلیل تجارت جهانی^۱ (GTAP-E) کاهش تولید و تجارت صنایع انرژی‌بر ایران را در پی تعرفه کربن جهانی نشان دادند.

صیادی و همکاران (۱۴۰۲)، نیز با تحلیل سناریوهای حذف یارانه انرژی در ایران، کاهش انتشار CO₂ در بلندمدت و کاهش تولید در کوتاه‌مدت را تأیید کردند.

در مطالعات بین‌المللی، لیو و همکاران^۲ (۲۰۱۷) و ژو و همکاران^۳ (۲۰۱۸)، با استفاده از مدل‌های بازی تکاملی، دریافته‌اند که سیاست‌های مالیاتی و یارانه‌ای پویا مؤثرتر از سیاست‌های ایستا هستند.

یوین و جینکسی^۴ (۲۰۱۸)، دریافته‌اند که یارانه‌های دولتی به کاهش انتشار کربن کمک می‌کند، اما مالیات کربن تنها در شرایط خاصی مؤثر است.

1. The global trade analysis project

2. Liu et al. (2017).

3. Zhu et al. (2018).

4. Yuyin & Jinxi (2018).

چن و هو (۲۰۱۸؛ ۲۰۲۰)، نشان دادند، ترکیب مالیات و یارانه و همکاری دولت-مردم اثر بخشی بیشتری دارد.

قزوانی و همکاران (۲۰۲۰)، کاهش انتشار CO₂ در اروپا با مالیات را تأیید کردند. یو (۲۰۲۰)، به تأثیر گروه‌های ذی‌نفع بر نوع سیاست مالیاتی یا یارانه‌ای کربن پرداخت و دریافت که کشورها بسته به نفوذ این گروه‌ها، سیاست‌های متفاوتی را اتخاذ می‌کنند. دو و همکاران (۲۰۲۱)، نیز مزیت مالیات پویا را برای توسعه ساختمان‌های کم‌کربن نشان دادند.

۲-۲. ICT و آلودگی‌های زیست محیطی

دیدگاه‌ها درباره تأثیر ICT متفاوت است؛ برخی آن را افزایش‌دهنده و برخی کاهش‌دهنده آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌دانند، و گروهی به رابطه غیرخطی اشاره دارند.

در ایران، فلاحی و همکاران (۱۳۹۱)، اثر مثبت خطوط تلفن و منفی کاربران اینترنت بر محیط‌زیست را یافتند.

مراد حاصل و مزینی (۱۳۹۲)، نشان دادند، اثر ICT بر آلودگی در کشورهای توسعه‌یافته، افزایشی و در کشورهای در حال توسعه، نامحسوس است.

علوی‌پور و همکاران (۱۳۹۲)، نیز به آثار دوگانه ICT اشاره کردند.

قاسمی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۵)، اثر مثبت ICT بر انتشار CO₂ در کشورهای در حال توسعه و اثر منفی در کشورهای توسعه یافته را گزارش دادند.

جعفری پرویزخانلو و همکاران (۱۴۰۰) و علمی و آریان‌فر (۱۴۰۲)، وجود رابطه U معکوس بین ICT و انتشار CO₂ را تأیید کردند.

همچنین، حاجی‌پور اپورواری و همکاران (۱۴۰۲)، نشان دادند که کاهش تعرفه واردات کالاهای ICT، اگر با افزایش بهره‌وری همراه نباشد، به کاهش تولید انرژی‌های تجدیدپذیر می‌انجامد. در مقابل، اگر بهره‌وری نیز ارتقا یابد، هم تولید انرژی‌های پاک افزایش و هم، انتشار CO₂ کاهش می‌یابد. در مطالعات خارجی، رحیم و همکاران (۲۰۲۰)، ارشد و همکاران (۲۰۲۰)، آووم و همکاران (۲۰۲۰)،

1. Chen & Hu (2018).
2. Ghazouani et al. (2020).
3. Yu (2020).
4. Du et al. (2021).
5. Raheem et al. (2020).
6. Arshad et al. (2020).
7. Avom et al. (2020).

مگازینو و همکاران^۱ (۲۰۲۱)، آلتاش^۲ (۲۰۲۱) و شارفالدین و کاهیا^۳ (۲۰۲۱)، تأثیر مثبت ICT بر افزایش انتشار CO₂ را گزارش کردند.

در مقابل، اوزجان و آپرگیس^۴ (۲۰۱۸)، لوه^۵ (۲۰۱۸)، ژانگ و همکاران^۶ (۲۰۱۹)، خان و همکاران^۷ (۲۰۲۰)، اولوکاک و خان^۸ (۲۰۲۰)، چین و همکاران^۹ (۲۰۲۱)، ون و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۲)، مرشد^{۱۱} (۲۰۲۰)، کاهولی و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۲) و شبنم‌نژاد و شیرازی^{۱۳} (۲۰۲۲)، شواهدی از تأثیر منفی ICT بر انتشار CO₂ و بهبود کیفیت محیط‌زیست ارائه کرده‌اند.

عده‌ای نیز همچون لترفورس و همکاران^{۱۴} (۲۰۱۵)، آسونگو و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۸)، دهقان شبانی و شهنازی^{۱۶} (۲۰۱۹) و خان و همکاران (۲۰۲۲)، تأثیرات ICT را وابسته به بخش‌ها یا گروه کشورها می‌دانند و بر وجود اثرات خالص متناقض یا ترکیبی تأکید دارند.

اپیا اوتو و همکاران^{۱۷} (۲۰۲۲)، نیز اثر متفاوت ICT بر حسب کیفیت آن در کشورها را گزارش کرده‌اند.

همچنین، هیگونا و همکاران^{۱۸} (۲۰۱۷)، شهنازی و دهقان شبانی (۲۰۱۹)، فیصل و همکاران^{۱۹} (۲۰۲۰) و بن لاهویی و همکاران (۲۰۲۲)، ادعا کردند که رابطه بین ICT و انتشار CO₂، یک رابطه U معکوس شکل است؛ به‌طوری‌که پس از عبور از یک آستانه، نفوذ ICT، موجب کاهش تخریب محیط‌زیست می‌شود.

با توجه به پژوهش‌های مذکور، می‌توان گفت اثر ICT بر انتشار CO₂ چالش برانگیز بوده و لازم است علاوه بر سیاست‌های مذکور برای مقابله با انتشار CO₂، یارانه ICT نیز اعمال شود؛ در حالی که

1. Magazzino et al. (2021).
2. Alataş (2021).
3. Charfeddine & Kahia (2021).
4. Ozcan & Apergis (2018).
5. Lu (2018).
6. Zhang et al. (2019).
7. Khan et al. (2020).
8. Ulucak & Khan et al. (2020).
9. Chien et al. (2021).
10. Wen et al. (2022).
11. Murshed (2020).
12. Kahouli et al. (2022).
13. Shaaban-Nejad & Shirazi (2022).
14. Lennerfors et al. (2015).
15. Asongu et al. (2018).
16. Shabani & Shahnazi (2019).
17. Appiah-Otoo et al. (2022).
18. Hígón et al. (2017).
19. Faisal et al. (2020).

اکثر پژوهش‌هایی که در زمینه حفاظت از محیط‌زیست انجام شده، یا فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات را در نظر نگرفته‌اند و یا اگر این فناوری‌ها را در نظر گرفته‌اند، از فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس استفاده کرده‌اند و در مدل‌های مهمی مثل مدل DICE که یک مدل مورد توافق جهانی است، خلأ این نوع فناوری‌ها وجود دارد.

از این‌رو، در پژوهش حاضر، این نوع فناوری‌ها به مدل RICE اضافه شده و در این اقتصاد، علاوه بر قیمت کربن، یارانه ICT در زمینه سیاست‌های مقابله با آلودگی‌های زیست‌محیطی محاسبه شده است. برای این منظور، در بخش بعدی، مدل RICE توسعه‌یافته و نحوه وارد کردن ICT در ساختار آن توضیح داده خواهد شد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. معرفی مدل پژوهش

مدل نظری مورد استفاده در این مطالعه براساس مدل RICE ساخته می‌شود. این مدل، توسعه یافته مدل DICE می‌باشد. مدل DICE، اولین الگویی است که اقتصاد و اقلیم را در چهارچوب بهینه‌سازی پویا بررسی می‌کند. این مدل برای نخستین بار توسط ویلیام نوردهاوس^۱ در دوره ۱۹۷۹-۱۹۷۴ ابداع و در ادبیات اقتصاد تغییرات آب و هوا و گرمای جهانی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. نسخه‌های ارتقاء یافته این مدل در دوره‌های ۱۹۸۲-۱۹۸۰، ۱۹۹۴-۱۹۹۰، ۲۰۰۰-۱۹۹۷ و در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰ توسط نوردهاوس با همکاری چند تن دیگر از محققان ارائه گردید. در یکی از این توسعه‌ها که توسط نوردهاوس و یانگ^۲ (۱۹۹۶) انجام شد، مدل DICE به ده گروه مختلف از کشورهای عضو سازمان ملل تجزیه، و مدل RICE ساخته شد.

مدل RICE یا مدل منطقه‌ای ادغام شده آب و هوا و اقتصاد، یک مدل منطقه‌ای، پویا و تعادل عمومی اقتصاد است که فعالیت اقتصادی را با منابع، انتشارات و پیامدهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی ادغام می‌کند. در مدل RICE، جهان به تعدادی از مناطق تقسیم شده است و برای هر کدام از این مناطق، درجات مختلف همکاری بین ملت‌ها در نظر گرفته می‌شود. هر منطقه دارای سرمایه اولیه، جمعیت و تکنولوژی اولیه است. جمعیت و تکنولوژی برونزا فرض می‌شود. تابع تولید کابداگلاس است. در بلندمدت، سرمایه کاملاً متحرک است؛ به‌طوری‌که بازده واقعی سرمایه در مناطق مختلف، برابر می‌شود. تابع ترجیحات هر منطقه، یک تابع مطلوبیت لگاریتمی است. همچنین، مدل RICE شامل معادلات انتشارات ویژه منطقه، معادله غلظت جهانی، معادله جهانی تغییر آب و هوا و روابط منطقه‌ای آسیب آب و هوا است. انتشارات درون‌زا محدود به CO₂ است، درحالی‌که سایر

1. Nordhaus

2. Nordhaus & Yang (1996).

گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان برونزا مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین در این مدل، فرض می‌شود که اثرات اقتصادی تغییرات آب و هوا همراه با افزایش دما، افزایش می‌یابد.

مدل RICE بر مبنای مدل رشد بهینه رمزی^۱ است که به‌صورت یک مسأله بهینه‌یابی بیان می‌شود. هر مسأله بهینه‌یابی، دارای یک تابع هدف و تعدادی قید است. در ادامه، معادلات مدل به تفکیک تابع هدف و قیدها شرح داده می‌شود.

در این مدل، فرض شده مناطق یک تابع رفاه اجتماعی دارند که براساس آن، مجموع مطلوبیت ناشی از مصرف سرانه‌ای که برحسب جمعیت وزن‌یافته را حداکثر می‌کنند. معادله (۱) بیان ریاضی تابع هدف مدل برای منطقه i می‌باشد.

$$\max_{c_i(t)} W = \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T \frac{\varphi_{it} U^i[c_i(t), L_i(t)]}{(1 + \rho)^t} \quad (1)$$

که در آن:

W : تابع رفاه اجتماعی که توسط سطح مصرف سرانه کشور یا منطقه i تعیین می‌شود؛

φ_{it} : وزن رفاه در کشور i ؛

ρ : نرخ خالص ترجیح زمانی اجتماعی در زمان t و بنابراین، $R(t) = (1 + \rho)^{-t}$ عامل تنزیل

است؛

$U^i[c_i(t), L_i(t)]$: مطلوبیت ناشی از مصرف سرانه برای کشور i است که فرم صریح این تابع

از نوع کشش جانشینی ثابت (CES) به شکل رابطه (۲) در نظر گرفته شده و α مقدار ثابت کشش

مطلوبیت نهایی ناشی از مصرف سرانه است؛

$$U^i[c_i(t), L_i(t)] = \frac{L_i(t)[c_i(t)^{1-\alpha}]}{(1 - \alpha)} \quad (2)$$

$c_i(t)$: جریان مصرف سرانه در زمان t ؛

$L_i(t)$: سطح جمعیت در زمان t ، که متناسب با نهاده نیروی کار است.

بنابراین معادله (۳)، شکل خاص تابع هدف منطقه i می‌باشد:

$$\max_{c_i(t)} W = \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^{\infty} \frac{\varphi_{it} R(t) L_i(t) [c_i(t)^{1-\alpha}]}{(1 - \alpha)} \quad (3)$$

محدودیت‌های این تابع هدف در ادامه تشریح شده است. تابع تولید در مدل RICE، تابع تولید

استاندارد نئوکلاسیک است. برای منطقه i ، تولید ناخالص داخلی یک تابع تولید کابداگلاس با

بازدهی ثابت به مقیاس و به‌صورت تابعی از سرمایه، نیروی کار ۱ و سطح تکنولوژی در منطقه i و دوره t ، است. بنابراین، تولید ناخالص داخلی یا منطقه‌ای به‌صورت رابطه (۴) است:

$$Y_i(t) = A_i(t)K_i(t)^\gamma L_i(t)^{1-\gamma} \quad (۴)$$

که در آن، γ کشش تولید نسبت به سرمایه، $A_i(t)$ سطح تکنولوژی و $K_i(t)$ موجودی سرمایه است که به‌صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$K_i(t) = I_i + (1 - \delta_K)K_i(t-1) \quad (۵)$$

$I_i(t)$ سرمایه‌گذاری ناخالص منطقه i در زمان t و δ_K نرخ استهلاک موجودی سرمایه است. همچنین تولید ناخالص ملی یا منطقه‌ای (خالص از خسارت آب و هوا و هزینه‌های کاهش) نیز به صورت رابطه (۶) است:

$$Q_i(t) = \Omega_i(t)[1 - \Lambda_i(t)]Y_i(t) \quad (۶)$$

که در آن، $\Lambda_i(t)$ هزینه کاهش انتشار (هزینه‌های کاهش به‌عنوان کسری از تولید منطقه‌ای) و $\Omega_i(t)$ خسارت آب و هوا (خسارات آب و هوایی به‌عنوان کسری از تولید منطقه) یا به عبارت بهتر، عامل از بین رفتن تولید به‌دلیل کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و آسیب‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی در منطقه i و در آغاز دوره t است. $\Lambda_i(t)$ با رابطه (۷) مشخص می‌شود:

$$\Lambda_i(t) = Y_i(t)\theta_1(t)\mu_i(t)^{\theta_2} \quad (۷)$$

که در آن، $\theta_1(t)$ و θ_2 پارامترهای تابع هزینه کاهش انتشار، $\mu_i(t)$ نرخ کنترل انتشار (کسری از انتشارات کنترل نشده) است. همچنین، $\Omega_i(t)$ با رابطه (۸) مشخص می‌شود:

$$\Omega_i(t) = \frac{g_i[T(t), SLR(t), M_{AT}(t)]}{1 + g_i[T(t), SLR(t), M_{AT}(t)]} = \frac{D_i(t)}{1 + D_i(t)} \quad (۸)$$

که در آن، $D_i(t)$ یا $g_i[T(t), SLR(t), M_{AT}(t)]$ تابع خسارت است که براساس معادلات $T(t)$ ، $SLR(t)$ ، $M_{AT}(t)$ استخراج می‌شود. $SLR(t)$ افزایش سطح دریا (گسترش حرارتی، یخچال‌های طبیعی، صفحات یخی) و عبارت است از:

۱. شایان ذکر است که در این مدل، از متغیر جمعیت به‌عنوان نیروی کار استفاده می‌شود. با توجه به افق زمانی مدل در طی یک قرن، می‌توان فرض کرد، جمعیت و نیروی کار، جایگزین هستند؛ با این استدلال که با پیر شدن نیروی کار نسل اول، نیروی کار نسل دوم، جایگزین آن خواهد گردید و به همین ترتیب، برای سایر دوره‌ها، حرکت پیوسته رخ می‌دهد. بنابراین، در مدل‌های رشد، جایگزینی جمعیت به‌جای نیروی کار در تابع تولید منطقی است.

$$SLR(t) = SLR(t-1) + \left[\sum_{j=1}^5 \pi_{1,j} + \pi_{2,j} T_{AT}(t-1) + \pi_{2,j} [T_{AT}(t-1) - \overline{T_{AT}^J}] \right] \quad (۹)$$

$\overline{T_{AT}^J}$ دمای آستانه برای صفحات یخی و T_{AT} میانگین دمای سطح جهانی است که با رابطه (۱۰) مشخص می‌شود:

$$T_{AT} = T_{AT}(t-1) + \{\xi_1 F(t) - \xi_2 T_{AT}(t-1) - \xi_3 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)]\} \quad (۱۰)$$

که در این رابطه، ξ_1 ، ξ_2 و ξ_3 پارامترهای معادله آب و هوا هستند و $T_{LO}(t)$ دمای اعماق اقیانوس است که از رابطه (۱۱) تعیین می‌شود:

$$T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \xi_4 \{T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)\} \quad (۱۱)$$

در این رابطه نیز ξ_4 پارامتر معادله آب و هوا است. همچنین، $F(t)$ در رابطه (۱۰) نیروی تابشی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد که از رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$F(t) = \eta \{ \log_2 [M_{AT}(t)/M_{AT}(1750)] \} + F_{EX}(t) \quad (۱۲)$$

در این رابطه، η پارامتر دما (درجه سانتیگراد بر وات بر متر مربع) و $F_{EX}(t)$ نیروی تابشی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای برونزا و $M_{AT}(t)$ افزایش غلظت CO_2 در اتمسفر نسبت به سطح پیش از صنعتی شدن است و از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$M_{AT}(t) = E_i(t) + \phi_{11} M_{AT}(t-1) + \phi_{21} M_{UP}(t-1) \quad (۱۳)$$

در این رابطه، ϕ_{11} و ϕ_{21} پارامترهای چرخه کربن و M_{UP} غلظت CO_2 در بالای اقیانوس است که از رابطه (۱۴) زیر به دست می‌آید:

$$M_{UP}(t) = \phi_{12} M_{AT}(t-1) + \phi_{22} M_{UP}(t-1) + \phi_{32} M_{LO}(t-1) \quad (۱۴)$$

در این رابطه نیز، ϕ_{12} ، ϕ_{22} ، ϕ_{32} پارامترهای چرخه کربن و M_{LO} غلظت CO_2 در پایین اقیانوس است. رابطه (۱۵) نحوه محاسبه M_{LO} را نشان می‌دهد:

$$M_{LO}(t) = \phi_{23} M_{UP}(t-1) + \phi_{33} M_{LO}(t-1) \quad (۱۵)$$

همچنین، $E_i(t)$ در رابطه (۲۰) نشان‌دهنده انتشار CO_2 است که از رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$E_i(t) = E_i^{Ind}(t) + E_i^{Land}(t) \quad (۱۶)$$

که E_i^{Land} انتشار کربن ناشی از استفاده از زمین و E_i^{Ind} انتشار کربن صنعتی است و برابر با رابطه (۱۷) است:

$$E_i^{Ind}(t) = [1 - \mu_i(t)]\sigma_i(t)Y_i(t), \quad 0 \leq \mu_i(t) \leq 1 \quad (17)$$

$\sigma_i(t)$ نسبت انتشار صنعتی کنترل نشده CO₂ به تولید است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma(t) = \sigma(t-1)[1 + g_\sigma(t)] \quad (18)$$

شایان ذکر است که محدودیت در کل منابع سوخت کربن به صورت رابطه (۱۹) می‌باشد:

$$CCum \geq \sum_{t=1}^{Tmax} \left[\sum_{i=1}^2 E_i^{Ind}(t) \right] \quad (19)$$

۲-۳. توسعه الگو

در پژوهش حاضر، تلاش می‌شود، مدل مذکور که در قالب یک اقتصاد سنتی طراحی شده را به یک اقتصاد جدید تبدیل کرده و سیاست یارانه بر فناوری اطلاعات و ارتباطات را اعمال و به پرسش‌های پژوهش پاسخ داده شود. برای این منظور، ICT به دو طریق در مدل RICE وارد شده است: نخست، ICT به‌عنوان نهاده‌ای مستقل در تابع تولید منطقه‌ای لحاظ شده و از این طریق با افزایش بهره‌وری، بر رشد اقتصادی تأثیر می‌گذارد؛ دوم، شدت انتشار CO₂ به صورت تابعی نمایی نزولی از سرمایه‌گذاری در ICT مدل‌سازی شده است، به نحوی که با گسترش ICT، شدت انرژی کاهش یافته و سطح آلودگی زیست‌محیطی نیز کاهش می‌یابد.

در این راستا، به پیروی از کوا (۲۰۰۳) و پوجولا (۲۰۰۲)، محصول از ورودی‌های متشکل از سرمایه فناوری اطلاعات و ارتباطات ICT، سرمایه فیزیکی K و نیروی کار L تولید می‌شود. در واقع، شکل تابع خاص تولید به صورت زیر می‌باشد:

$$Q_i(t) = A_i(t)K_i(t)^\gamma L_i(t)^\beta ICT_i(t)^\delta \quad (20)$$

1. Quah (2003).

2. Pohjola (2002).

۳. کوا (۲۰۰۳)، ICT را با این استدلال که توسعه آن باعث تسریع در انتقال فناوری میان کشورها و بنگاه‌ها می‌شود و از این طریق، بهره‌وری کل عوامل (TFP) افزایش می‌یابد، آن را به‌عنوان یک نهاده کلیدی در تولید در نظر می‌گیرد و ادعا می‌کند که این فناوری از طریق انتشار دانش و اثرات سرریز (spillover effects)، به رشد اقتصادی کمک می‌کند. همچنین، پوجولا (۲۰۰۲)، ICT را مشابه سرمایه فیزیکی در تابع تولید مدل‌سازی می‌کند و نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در ICT می‌تواند رشد بهره‌وری نیروی کار و سرمایه را افزایش دهد. او بر این نکته تأکید دارد که رشد اقتصادی کشورها، وابسته به میزان سرمایه‌گذاری آن‌ها در زیرساخت‌های دیجیتال و توانایی جذب این فناوری است.

که $ICT_i(t)$ نهاده سرمایه ICT و δ کشش تولید نسبت به سرمایه ICT می‌باشد. بنابراین، در این ساختار، ICT به‌عنوان یک نهاده تولیدی، تأثیر مستقیمی بر رشد اقتصادی دارد. انتظار می‌رود که افزایش سطح ICT در کنار سرمایه‌گذاری در سایر نهاده‌های تولیدی، منجر به افزایش بهره‌وری کل عوامل تولید (TFP) شود. همچنین، اثرات جانبی ICT می‌تواند از طریق بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش شدت کربن تولید نمایان شود.

برای در نظر گرفتن نقش ICT در شدت انتشار CO_2 ، فرض شده است که شدت انتشار کربن به‌صورت تابعی نمایی از میزان استفاده از ICT است. بنابراین در مدل جدید، شدت انتشار کربن $(\sigma_i(t))$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_i(t) = \sigma_{i0} e^{-\lambda ICT_{it}} \quad (21)$$

که در آن، σ_{i0} شدت انتشار اولیه و λ پارامتر حساسیت شدت انتشار نسبت به ICT است. همچنین، در مدل جدید، با توجه به تأثیر مثبت ICT بر کاهش شدت انتشار کربن، قیمت کربن به‌صورت تابعی از ICT بازنویسی شده است:

$$P_{CO_2}(t) = P_{CO_2}^{Base} \cdot e^{-\gamma ICT_{it}} \quad (22)$$

که در آن، $P_{CO_2}^{Base}$ قیمت کربن در حالت پایه و $P_{CO_2}(t)$ قیمت تعدیل‌شده کربن پس از در نظر گرفتن ICT است. γ پارامتری است که نشان‌دهنده میزان حساسیت قیمت کربن به نهاده ICT است. همچنین، به‌منظور تشویق استفاده از ICT، یارانه‌ای به شرکت‌ها و صنایع اختصاص داده می‌شود که در توسعه و بهره‌گیری از این فناوری سرمایه‌گذاری می‌کنند. یارانه ICT به‌صورت کاهش در هزینه‌های سرمایه‌گذاری در سرمایه ICT تعریف می‌شود:

$$Sub_{ICT_i}(t) = s_i(t) ICT_i(t) \quad (23)$$

که در آن، $s_i(t)$ نرخ یارانه ICT در منطقه i و $ICT_i(t)$ میزان سرمایه فناوری اطلاعات و ارتباطات است. برای تعیین مقدار بهینه یارانه ICT، شرطی در نظر گرفته می‌شود که بیشترین تأثیر را بر کاهش انتشار CO_2 و افزایش رشد اقتصادی داشته باشد. نرخ بهینه یارانه از حل معادله زیر به‌دست می‌آید:

۱. این رابطه براساس روندهای مشاهده‌شده در مطالعات اولوکاک و خان (۲۰۲۰)، چین و همکاران (۲۰۲۱)، شبنم‌نژاد و شیرازی (۲۰۲۲)، بیلدیریچی و همکاران (۲۰۲۲) و ون و همکاران (۲۰۲۲) که به بررسی اثر ICT بر شدت انتشار کربن می‌پردازند، توسعه داده شده است.

۲. سیاست‌گذار به‌دنبال حداکثرسازی رفاه اقتصادی است که به دو عامل وابسته است:

۱. افزایش تولید ناخالص داخلی (Y) با افزودن نهاده ICT؛

۲. کاهش انتشار کربن (E) از طریق اثرات مثبت ICT بر بهره‌وری انرژی.

$$s_i(t)^* = \frac{\partial Y_i(t)}{\partial ICT_i(t)} - \lambda \frac{\partial E_i(t)}{\partial ICT_i(t)} \quad (24)$$

که در آن، $\frac{\partial Y_i(t)}{\partial ICT_i(t)}$ نشان‌دهنده اثر ICT بر رشد اقتصادی و $\frac{\partial E_i(t)}{\partial ICT_i(t)}$ میزان کاهش انتشار کربن ناشی از ICT است. همچنین، λ ضریب وزنی است که نشان می‌دهد سیاستگذار چقدر به کاهش انتشار کربن در برابر رشد اقتصادی اهمیت می‌دهد.

در ادامه، با حل این الگو از طریق روش کالیبراسیون، تغییر و نوسان‌های کلان اقتصاد و نیز تغییرات انتشار CO₂ در اثر افزودن ICT تبیین خواهد شد. برای این منظور، پویایی‌های الگوی نظری پیش‌گفته، برای مناطق ایران و خاورمیانه با استفاده از پارامترهای ساختاری موجود در مطالعه نوردهاوس (۲۰۱۳) و پارامترهای محاسباتی نویسندگان، شبیه‌سازی می‌شود.

۳-۳. معرفی داده‌های پژوهش

این مطالعه از یک مجموعه داده جامع که از منابع معتبر مختلف جمع‌آوری شده استفاده می‌کند. منابع داده شامل پایگاه داده EDGAR است که اطلاعات دقیقی در مورد انتشار CO₂ در سطح جهانی ارائه می‌دهد و به دلیل قابلیت اعتماد و پوشش جامع خود، شناخته شده است. بانک جهانی و حساب‌های ملی OECD نیز داده‌های حیاتی در مورد تولید ناخالص داخلی (GDP)، جمعیت و سایر شاخص‌های اقتصادی را فراهم می‌کنند.

شایان ذکر است که مطالعات پیشین، شاخص‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ICT معرفی کرده‌اند، در این تحقیق، ما مطابق با رویکرد پیشنهاد شده توسط تودار و همکاران (۲۰۱۸)، میوولا و همکاران (۲۰۲۰) و آپیا-اوتو و سونگ (۲۰۲۱)، از شاخص میانگین هندسی اشتراکات پهن‌بند ثابت، افراد استفاده‌کننده از اینترنت و اشتراکات تلفن همراه به‌عنوان شاخص‌های منتخب خود استفاده کردیم. در واقع، شاخص‌های ICT انتخاب‌شده یک دیدگاه جامع از توسعه ICT ارائه می‌دهند؛ پهن‌بند ثابت،

بنابراین، تابع هدف را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\max_{s_i(t)} W_i(t) = Y_i(t) - \lambda E_i(t)$$

سیاست‌گذار میزان یارانه ICT، یعنی $s_i(t)$ را به‌نحوی تنظیم می‌کند که تأثیر آن بر رشد اقتصادی و کاهش انتشار، بهینه باشد. در اینجا، نرخ بهینه یارانه از شرایط مرتبه اول بهینه‌سازی لاگرانژ به‌دست می‌آید. بنابراین، شرط مرتبه اول به شکل زیر است:

$$\frac{\partial W_i(t)}{\partial ICT_i(t)} = \frac{\partial Y_i(t)}{\partial ICT_i(t)} - \lambda \frac{\partial E_i(t)}{\partial ICT_i(t)} = 0 \rightarrow \frac{\partial Y_i(t)}{\partial ICT_i(t)} = \lambda \frac{\partial E_i(t)}{\partial ICT_i(t)}$$

زیرساخت را نشان می‌دهد، استفاده از اینترنت، پذیرش اجتماعی را به نمایش می‌گذارد و اشتراکات موبایل، دسترسی در مناطق مختلف را برجسته می‌کند. برای اطلاع از جزئیات کامل منابع آماری استفاده شده در پژوهش، به جدول A1 در ضمیمه مراجعه شود.

۳-۴. روش تجزیه و تحلیل داده‌های پژوهش

با توجه به اینکه نوع مطالعه توصیفی-تحلیلی بوده و پارامترهای مدل RICE مقداردهی می‌شود، از نرم‌افزارهای استاتا^۱ و اکسل^۲ برای تجزیه و تحلیل استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا مدل RICE، با جایگذاری پارامترها در فایل اکسل DICE-2013R^۳ برای ایران و خاورمیانه شبیه‌سازی شده و سپس، در مرحله بعد، با استفاده از نرم‌افزار استاتا، چندین رگرسیون برای محاسبه پارامترهای مورد نیاز توسعه الگو و اضافه کردن ICT، تخمین زده شده و سپس با به‌کارگیری پارامترهای محاسبه شده، مدل توسعه یافته در اکسل شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱: پارامترهای کلیدی استفاده شده از مطالعه نورهاوس (۲۰۱۳)

Table 1: Key Parameters Used from Nordhaus (2013) Study

پارامتر	مقدار
نرخ ترجیح زمانی اجتماعی	0.015 (1.5% در سال)
کشش مطلوبیت نهایی مصرف	1.45
حساسیت تعادل آب و هوا به دو برابر شدن CO ₂	2.9 درجه سانتیگراد
ضریب آسیب دمایی	0.002136
هزینه فناوری جایگزین	344 دلار به ازای هر تن CO ₂ (قیمت 2005)
نرخ کنترل اولیه انتشار	0.005 (0.5%)
حداکثر منابع کربن	6000 گیگا تن کربن
ضریب انتقال چرخه کربن	8.8
نرخ کاهش سیگما	-0.001 (منفی 0.1% در سال)

مأخذ: نورهاوس، ۲۰۱۳

این پارامترها به‌عنوان ورودی‌های اصلی مدل، مورد استفاده قرار گرفتند و مبنای تحلیل‌های کمی پژوهش را تشکیل دادند.

به‌منظور استخراج پارامترهای مورد نیاز برای توسعه مدل و شبیه‌سازی اثر ICT، از روش اقتصادسنجی مدل برآورد تعمیم‌یافته گستاورها (GMM) استفاده شده است. این روش، به‌دلیل

1. Stata
 2. Excel
 3. DICE-2013R model, beta version of November 25, 2013, developed by William Nordhaus and Paul Sztorc, Yale University.

قابلیت مقابله با هم‌خطی متغیرها و اثرات تصادفی مناسب، برای تخمین ضرایب انتخاب گردید. پارامترها در دو مدل مجزا برای اثر ICT بر رشد اقتصادی و انتشار CO₂ تخمین زده شدند. معناداری ضرایب برآوردی با استفاده از آزمون‌های آماری استاندارد نظیر آمار F و سطح معناداری ضرایب (p-value) بررسی شده است. نتایج کامل این برآوردها، شامل ضرایب تخمینی، آمار آزمون‌ها و شاخص‌های کیفیت مدل، به دلیل حفظ انسجام متن اصلی، در بخش پیوست B ارائه شده است. بنابراین، مدل توسعه یافته با استفاده از پارامترهای استخراج شده در این تحلیل‌های اقتصادسنجی تکمیل و سپس در محیط اکسل برای شبیه‌سازی، به کار گرفته شده است. با تعریف کامل مدل، در بخش بعد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در قالب سناریوهای مختلف ارائه خواهد شد.

۴. نتایج و بحث

در این بخش، با استفاده از مدل توسعه یافته RICE که شامل متغیرهای اقتصادی و زیست‌محیطی است، اثر ICT بر رشد اقتصادی، انتشار CO₂ و قیمت کربن در افق زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۱۲۲ بررسی و میزان یارانه ICT به منظور تحقق اهداف زیست‌محیطی هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم محاسبه شده است. شبیه‌سازی مدل برای ایران و کشورهای خاورمیانه انجام، و نتایج در قالب چهار سناریو به شرح زیر ارائه شده‌اند:

۱) حالت پایه (Base): در این سناریو، مدل DICE-2013R بدون هیچ‌گونه مداخله‌ای در متغیرهای سیاستی برای منطقه مورد نظر اجرا می‌شود. فرض بر این است که اقتصاد جهانی به مسیر عادی خود ادامه می‌دهد و انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس روند تاریخی رشد می‌کند. این حالت به‌عنوان یک مرجع برای مقایسه سایر سناریوها در نظر گرفته می‌شود.

۲) محدودیت دمایی (Limt2): در این سناریو، هدف آن است که مسیر رشد اقتصادی به گونه‌ای تنظیم شود که افزایش دمای میانگین جهانی از ۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به سطح پیشاصنعتی تجاوز نکند. این هدف مطابق با توصیه‌های IPCC برای جلوگیری از تغییرات اقلیمی خطرناک تعیین شده است. در چهارچوب مدل RICE، این محدودیت از طریق اعمال یک سقف تجمعی برای انتشار CO₂ در طول افق زمانی مدل اعمال می‌شود. در این حالت، هیچ‌گونه یارانه‌ای برای ICT در نظر گرفته نشده و اثرات مستقیم ICT بر بهره‌وری یا کاهش شدت انتشار، لحاظ نمی‌شود.

۳) سناریوی پایه با ICT: در این سناریو، سرمایه‌گذاری در ICT از ابتدای افق زمانی مدل به صورت یکنواخت و بدون اعمال محدودیت دمایی افزایش می‌یابد. به‌طور مشخص، متغیر $ICT_i(t)$ در تابع تولید فعال می‌شود (رابطه ۲۰) و شدت انتشار $\sigma_i(t)$ مطابق رابطه (۲۱) به تابعی نزولی از ICT تبدیل می‌شود؛ اما کنترل‌های اقلیمی (مانند محدودیت دمایی) همچنان غیرفعال هستند.

۴) محدودیت دمایی با ICT: ترکیبی از سناریوهای ۲ و ۳ است؛ هم محدودیت دمایی لحاظ شده و هم، یارانه ICT به صورت تصاعدی طی زمان افزایش می‌یابد تا امکان دستیابی به هدف اقلیمی تسهیل گردد.

در ادامه، ابتدا نتایج میزان یارانه ICT در قالب جدول (۲) گزارش شده و سپس نتایج اثرگذاری ICT بر رشد اقتصادی و انتشار CO₂ در مناطق مورد مطالعه در قالب شکل‌های (۱) تا (۴) ارائه گردیده است.

جدول ۲: میزان یارانه ICT در سناریوهای مختلف در ایران و خاورمیانه

Table 2: ICT Subsidy Levels in Different Scenarios in Iran and the Middle East

سناریوی محدودیت دمایی برای خاورمیانه	سناریوی پایه با ICT برای خاورمیانه	سناریوی محدودیت دمایی برای ایران	سناریوی پایه با ICT برای ایران	سال
0.3558	0.2274	0.1056	0.0739	2022
0.6417	0.4102	0.1998	0.1399	2032
1.1572	0.7397	0.3781	0.2646	2042
2.0868	1.3339	0.7152	0.5006	2052
3.7633	2.4056	1.3528	0.9470	2062
6.7865	4.3381	2.5591	1.7913	2072
12.2383	7.8231	4.8408	3.3885	2082
22.0697	14.1076	9.1568	6.4097	2092
39.7989	25.4407	17.3209	12.1246	2102
71.7706	45.8780	32.7642	22.9349	2112
129.4262	82.7331	61.9766	43.3836	2122

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بر اساس جدول فوق، یارانه ICT در ایران و خاورمیانه طی دوره ۲۰۲۲ تا ۲۱۲۲، روندی افزایشی را نشان می‌دهد. بررسی دو سناریوی "پایه" و "محدودیت دمایی" بیانگر تأثیر سرمایه‌گذاری‌ها و سیاست‌های حمایتی بر رشد این شاخص است.

در خاورمیانه، یارانه ICT در سناریوی پایه از مقدار ۰/۲۲۷ در سال ۲۰۲۲ شروع می‌شود و تا سال ۲۱۲۲ به ۸۲/۷۳۳ افزایش می‌یابد. در سناریوی محدودیت دمایی، این مقدار از ۰/۳۵۵ در سال ۲۰۲۲ به ۱۲۹/۴۲۶ در سال ۲۱۲۲ می‌رسد. این روند، نشان‌دهنده وابستگی فزاینده منطقه به فناوری‌های دیجیتال و تأثیر سیاست‌های حمایتی در رشد بیشتر این شاخص است.

همچنین بر اساس این جدول، در ایران، در سناریوی پایه، یارانه ICT از مقدار ۰/۰۷۳ در سال ۲۰۲۲ آغاز شده و تا سال ۲۱۲۲ به ۴۳/۳۸۳ افزایش می‌یابد. در سناریوی محدودشده، این مقدار از ۰/۱۰۵ به ۶۱/۹۷۶ می‌رسد. این روند، بیانگر افزایش مستمر یارانه ICT در ایران است، هر چند که مقادیر آن نسبت به خاورمیانه کمتر است.

شایان ذکر است که در سناریوی محدودیت دمایی، هدفگذاری اقلیمی بر اساس سقف ۲ درجه سانتی‌گراد، الزاماتی فراتر از سناریوهای پایه را تحمیل می‌کند. در این چهارچوب، نیاز به کاهش شدیدتر و سریع‌تر انتشار گازهای گلخانه‌ای، ایجاب می‌کند که سیاست‌های مداخله‌ای با شدت بیشتری پیاده‌سازی شوند.

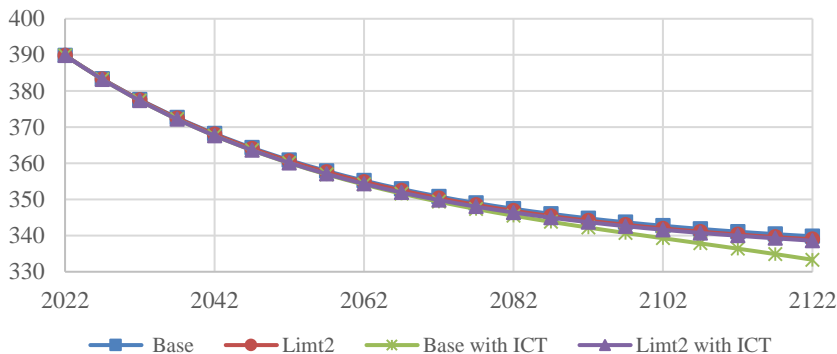
از آنجا که ICT در مدل پیشنهادی، به‌صورت مستقیم بر کاهش شدت انرژی و بهینه‌سازی مصرف منابع اثرگذار است، افزایش تصاعدی یارانه‌ها، بازتاب‌دهنده‌ی دو نیاز اساسی است:

۱. شتاببخشی به فرایند جایگزینی فناوری‌های پرکربن با فناوری‌های هوشمند و کم‌کربن؛
۲. افزایش ظرفیت زیرساخت‌های دیجیتال برای جذب تقاضای جدید و ایفای نقش مکمل در گذار به اقتصاد سبز.

افزون بر این، در سناریوی محدودیت دمایی، چون هر واحد کاهش انتشار نسبت به سناریوی پایه مستلزم صرف هزینه بیشتری است (براساس منحنی هزینه حاشیه‌ای کاهش انتشار)، تخصیص تدریجی اما فزاینده یارانه‌ها به ICT، ابزاری کارآمد برای افزایش کارآیی سیاست اقلیمی محسوب می‌شود. بنابراین، روند صعودی یارانه‌ها، بازتابی از افزایش نیاز به مداخلات فناورانه همزمان با تشدید اهداف اقلیمی و همچنین پاسخ منطقی به پویایی‌های هزینه-فایده در مدل بهینه‌سازی است.

مقایسه این دو منطقه، نشان می‌دهد که رشد یارانه ICT در خاورمیانه، به‌مراتب سریع‌تر از ایران بوده، به‌ویژه در سناریوی دارای محدودیت که سیاست‌های حمایتی قوی‌تری در نظر گرفته شده است. این تفاوت، حاکی از تأثیر سیاست‌های کلان اقتصادی، میزان سرمایه‌گذاری در فناوری اطلاعات و توسعه زیرساخت‌های دیجیتال بر روند رشد یارانه ICT است. در مجموع، داده‌ها نشان‌دهنده رشد مستمر یارانه ICT در ایران و خاورمیانه هستند، اما سرعت رشد در ایران کمتر است.

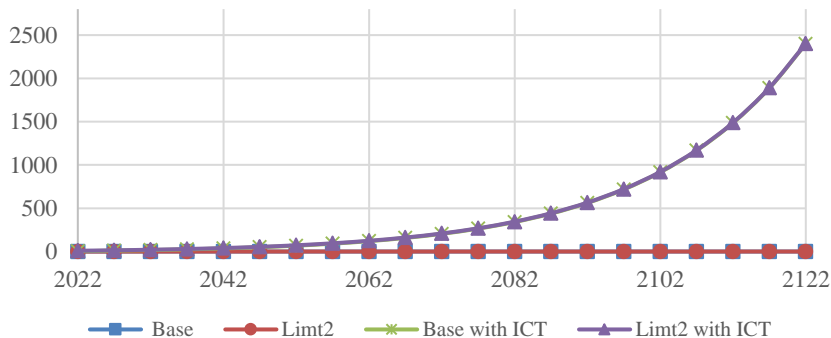
در گام بعدی، نتایج اثرگذاری ICT بر رشد اقتصادی، انتشار CO₂، قیمت کربن و دما ابتدا در خاورمیانه و سپس در ایران ارائه شده است.



شکل ۱: روند غلظت CO₂ در خاورمیانه

Figure 1: CO₂ Concentration Trend in the Middle East

مأخذ: یافته‌های پژوهش



شکل ۲: روند رشد اقتصادی در خاورمیانه

Figure 2: Economic Growth Trend in the Middle East

مأخذ: یافته‌های پژوهش

به طور کلی، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که ICT می‌تواند کاهش انتشار CO₂، افزایش رشد اقتصادی، کاهش قیمت کربن (هزینه‌های تنظیم مقررات و کنترل تغییرات اقلیمی) و کاهش دما را به دنبال داشته باشد.

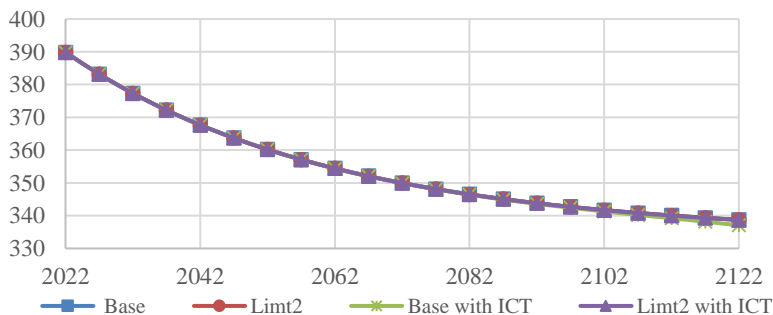
در خاورمیانه، که به شدت وابسته به تولید و صادرات نفت است، تأثیر ICT بر انتشار کربن، به میزان قابل توجهی مثبت ارزیابی شده است. بر اساس شکل (۱) سناریوهای "پایه" و "محدودیت دمایی"، نشان می‌دهند که انتشار CO₂ در نبود ICT به روند صعودی خود ادامه خواهد داد؛ اما در سناریوهای دارای ICT، میزان کاهش انتشار قابل‌ملاحظه بوده، که نشان‌دهنده نقش حیاتی این فناوری در کاهش آلاینده‌ها و حرکت به سوی یک اقتصاد کم‌کربن در این منطقه است. یکی از

چالش‌های مهم در کشورهای خاورمیانه، وابستگی شدید به درآمدهای نفتی است که مانع از اجرای سیاست‌های زیست‌محیطی می‌شود. همچنین، براساس نمودار (۲) تولید اقتصادی کشورهای خاورمیانه در سناریوهای با ICT افزایش یافته است، که حاکی از آن است که دیجیتالی شدن صنایع و توسعه بخش‌های نوین فناوری محور، می‌تواند وابستگی این منطقه به اقتصاد نفتی را کاهش دهند و باعث افزایش بهره‌وری کل در سطح منطقه شوند. علاوه بر این، توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و اینترنت پرسرعت، می‌تواند به افزایش جذب سرمایه‌گذاری خارجی در بخش‌های فناوری منجر شود و به رشد اقتصادی بلندمدت کمک کند.

همچنین، طبق نتایج شبیه‌سازی، درمی‌یابیم که در سناریوهای با ICT، نرخ رشد قیمت کربن کمتر بوده است. این موضوع، نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های نوین، نه تنها باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، بلکه هزینه‌های تنظیم مقررات زیست‌محیطی را نیز کاهش می‌دهد. از منظر تغییرات دما نیز، نتایج برای کشورهای خاورمیانه، حاکی از آن است که استفاده از ICT می‌تواند موجب کاهش میزان افزایش دما شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که دیجیتالی شدن، می‌تواند تأثیرات مخرب تغییرات اقلیمی را کاهش داده و به مدیریت بهتر منابع طبیعی کمک کند.

در نتیجه، این پژوهش، بر نقش کلیدی یارانه‌های ICT در کاهش انتشار کربن، افزایش بهره‌وری اقتصادی و کنترل تغییرات اقلیمی در کشورهای خاورمیانه تأکید دارد. سیاست‌گذاران این کشورها می‌توانند با حمایت از توسعه فناوری‌های دیجیتالی، به تحقق اهداف زیست‌محیطی تعیین شده توسط IPCC کمک کرده و در عین حال، رشد اقتصادی پایدارتری را تضمین کنند.

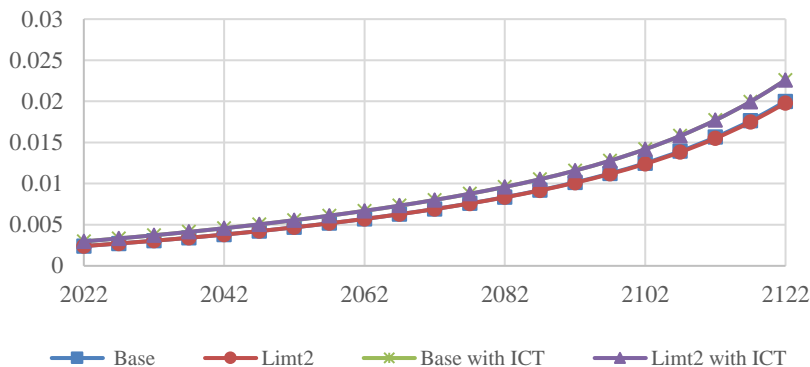
در ایران نیز الگوی مشابه، اما محدودتری مشاهده شده که در شکل‌های (۳) و (۴) به تصویر کشیده شده‌اند.



شکل ۳: روند غلظت CO₂ در ایران

Figure 3: CO₂ Concentration Trend in Iran

مأخذ: یافته‌های پژوهش



شکل ۴: روند رشد اقتصادی در ایران
Figure 4: Economic Growth Trend in Iran

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بر اساس شکل (۳)، در ایران، سناریوهای "پایه" و "محدودیت دمایی"، نشان می‌دهند که در صورت عدم وجود ICT، میزان انتشار کربن همچنان در حال افزایش خواهد بود؛ اما در سناریوهای "پایه با ICT" و "محدودیت دمایی با ICT"، میزان انتشار کربن به‌طور محسوسی کاهش یافته است. این نتایج، بیانگر آن است که ICT می‌تواند از طریق بهینه‌سازی مصرف انرژی، دیجیتالی کردن صنایع و جایگزینی فناوری‌های سنتی با روش‌های کم‌کربن‌تر، نقش مؤثری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا کند.

در یک اقتصاد در حال توسعه مانند ایران، که بسیاری از صنایع به‌شدت به سوخت‌های فسیلی وابسته هستند، استفاده از ICT می‌تواند مسیر انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر را تسهیل کند. یکی از مهم‌ترین مزایای این فناوری، امکان بهینه‌سازی تولید و توزیع انرژی از طریق شبکه‌های هوشمند است که می‌تواند به کاهش هدررفت انرژی و افزایش بهره‌وری تولید منجر شود.

علاوه بر این، براساس شکل (۴)، افزایش تولید ناخالص داخلی (GDP) در سناریوهای دارای ICT حاکی از تأثیر مثبت این فناوری در رشد اقتصادی ایران است. فناوری‌های دیجیتال موجب افزایش بهره‌وری نیروی کار، کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهینه‌سازی فرایندهای تولید شده‌اند. همچنین، از طریق بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع انرژی و مدیریت هوشمند منابع، میزان مصرف انرژی کاهش یافته و به کاهش هزینه‌های کلان اقتصادی کمک کرده است. به‌ویژه، توسعه اقتصاد دیجیتال در ایران، می‌تواند به ایجاد مشاغل جدید و کاهش وابستگی به صنایع سنتی منجر شود.

در زمینه سیاستگذاری کربن در ایران، نتایج نشان می‌دهد که قیمت کربن در سناریوهای بدون ICT، روند افزایشی داشته است؛ اما در سناریوهای "پایه با ICT" و "محدودیت دمایی با ICT"، مشاهده می‌شود که قیمت کربن در این منطقه با سرعت کمتری افزایش یافته است. همچنین، در

سناریوهای بدون ICT، دما در طول سال‌های آتی افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد، در حالی که در سناریوهای دارای ICT، این میزان کاهش یافته است. در ادامه، یافته‌های مدل با تمرکز بر دلالت‌های سیاستی، مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات سیاستی

هدف اصلی از این پژوهش، محاسبه میزان بارانه بر ICT برای تحقق اهداف زیست‌محیطی IPCC در چهارچوب مدل منطقه‌ای ادغام اقلیم و اقتصاد RICE بوده و در کنار آن، اثرات ICT بر رشد اقتصادی و انتشار CO₂ نیز مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل‌ها با استفاده از چهار سناریوی مختلف برای ایران و منطقه خاورمیانه انجام شد تا اثرات ترکیبی سیاست‌های زیست‌محیطی و توسعه فناوری شبیه‌سازی شود.

نتایج مطالعه، نشان می‌دهد که مقدار بارانه ICT در خاورمیانه به‌طور قابل توجهی بالاتر از ایران است، به‌ویژه در سناریوی "محدودیت دمایی" که محدودیت‌های اقلیمی سخت‌گیرانه‌تری اعمال شده‌اند. این تفاوت‌ها نه تنها ضرورت توجه به شرایط خاص اقتصادی و اجتماعی هر منطقه را نمایان می‌سازد، بلکه بر لزوم طراحی و اجرای سیاست‌های فناوری با رویکردهای متناسب با ویژگی‌های جغرافیایی، اقتصادی و زیست‌محیطی هر منطقه تأکید می‌کند.

همچنین، نتایج شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که توسعه ICT، در تمامی سناریوها، رشد اقتصادی را بهبود بخشیده است. این اثر به‌ویژه در سناریوی "محدودیت دمایی ۲ درجه با اعمال ICT" آشکارتر است، جایی که فناوری توانسته بخشی از افت اقتصادی ناشی از محدودیت‌های زیست‌محیطی را جبران کند. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین نظیر فرناندز-پورتیلو و همکاران (۲۰۲۰)، آپیا اوتو و سونگ (۲۰۲۱)، شهنازی (۲۰۲۱) و عواد و آلبایتی (۲۰۲۲) همسو است.

همچنین، در سناریوهای دارای ICT، سطح انتشار CO₂ در هر دو منطقه ایران و خاورمیانه کاهش یافته است. این نتیجه، مطابق با مطالعات اوزجان و آپرگیس (۲۰۱۸)، لو (۲۰۱۸)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)، خان و همکاران (۲۰۲۰؛ ۲۰۲۲)، اولوکاک و خان (۲۰۲۰)، چین و همکاران (۲۰۲۱)، شبنم‌نژاد و شیرازی (۲۰۲۲)، بیلدیریچی و همکاران (۲۰۲۲) و ون و همکاران (۲۰۲۲) است. همچنین، بررسی روند دما، نشان می‌دهد که ICT توانسته روند افزایش دما را در تمام سناریوها کندتر کند.

از منظر اقتصادی، تأثیر توسعه ICT بر قیمت کربن نیز قابل توجه است. در سناریوهای محدودیت دمایی، قیمت کربن در حضور ICT، رشد بیشتری داشته که بیانگر تغییرات ساختاری در بازار کربن و سیاست‌گذاری‌های اقلیمی است.

شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، سطح توسعه ICT در کشورهای عربی خاورمیانه، به مراتب بالاتر از ایران است. کشورهایی مانند امارات، عربستان و قطر طی دهه گذشته، با سرمایه‌گذاری گسترده در زیرساخت‌های دیجیتال، به بهره‌وری بالاتر و پذیرش سریع‌تر فناوری‌های سبز دست یافته‌اند. در مقابل، ایران با چالش‌هایی مانند تحریم‌ها، محدودیت‌های مالی و پراکندگی نهادی، روند کندتری در توسعه ICT داشته است. افزون بر آن، کشورهای خاورمیانه از منابع نفتی برای تأمین مالی سیاست‌های فناوری استفاده کرده‌اند، در حالی که ایران نیازمند رویکردهای نوآورانه‌تر برای تأمین مالی ICT است. بنابراین، سیاست‌های یارانه‌ای باید با در نظر گرفتن تفاوت‌های نهادی، زیرساختی و مالی هر کشور، به صورت منطقه‌ای و بومی طراحی شوند.

با وجود اهمیت یافته‌های فوق در طراحی سیاست‌های بومی و منطقه‌ای، باید توجه داشت که تفسیر این نتایج در چهارچوب محدودیت‌های ذاتی مدل RICE انجام می‌گیرد. نخست، این مدل بسیاری از روابط اقتصادی و زیست‌محیطی را به صورت ساده‌سازی شده در نظر می‌گیرد؛ دوم، عدم قطعیت‌هایی مانند نوسانات بازار انرژی، پیشرفت‌های ناگهانی فناوری و واکنش‌های نهادی به سیاست‌های اقلیمی در مدل لحاظ نشده‌اند؛ سوم، درونزا نبودن برخی پارامترها که ممکن است دقت نتایج بلندمدت را تحت تأثیر قرار دهد؛ چهارم، نادیده گرفتن عواملی همچون ظرفیت جذب فناوری. به‌طور خاص، اثر ICT بر بهره‌وری در مدل به صورت مستقیم لحاظ شده، در حالی که در واقعیت این اثر، تابعی از آموزش نیروی کار، زیرساخت‌های دیجیتال و آمادگی نهادی است. عدم لحاظ این بُعد می‌تواند منجر به برآوردهای خوش‌بینانه از تأثیر ICT بر کاهش هزینه‌های اقلیمی شود.

افزون بر محدودیت‌های مدل، تحقق اثربخش سیاست‌های یارانه‌ای نیز مستلزم توجه به ملاحظات اجرایی در دنیای واقعی است؛ از جمله چالش‌هایی مانند پایداری مالی منابع عمومی، ضعف زیرساخت‌های ارتباطی در برخی مناطق، و نیاز به ظرفیت‌سازی نهادی برای اجرای موفق این سیاست‌ها.

در پرتو این ملاحظات، برای بهره‌برداری بهینه از یافته‌های این مطالعه، مجموعه‌ای از توصیه‌های سیاستی برای ایران و کشورهای خاورمیانه ارائه می‌شود:

- توسعه زیرساخت‌های دیجیتال، به‌ویژه در مناطق کمتر توسعه یافته، از طریق سرمایه‌گذاری در اینترنت پهن‌بند، مراکز داده و شبکه‌های پایدار ارتباطی؛
- اعطای مشوق‌هایی مانند معافیت‌های مالیاتی و تسهیلات مالی، برای کسب و کارهایی که از ICT برای بهینه‌سازی انرژی یا کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بهره می‌برند، به‌ویژه در حوزه‌های دولت الکترونیک، تجارت الکترونیک و خدمات عمومی؛
- توانمندسازی منابع انسانی از طریق آموزش مهارت‌های دیجیتال، با تمرکز بر اقشار آسیب‌پذیر و مناطق کم‌برخوردار؛

- حمایت از تحقیق و توسعه (R&D) در حوزه ICT و کاربردهای اقلیمی آن، از طریق تأمین منابع مالی برای دانشگاه‌ها و شرکت‌های فناور؛
- ایجاد چهارچوب‌های نهادی و حقوقی شفاف برای حکمرانی دیجیتال، با هدف تضمین امنیت داده‌ها، حفظ حریم خصوصی، و تسهیل پیاده‌سازی سیاست‌های حمایتی ICT در سطح ملی و منطقه‌ای؛
- توسعه شبکه‌های هوشمند انرژی با بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، برای کاهش هدررفت انرژی، بهینه‌سازی مصرف برق و تقویت تاب‌آوری زیرساخت‌های زیست‌محیطی؛
- توسعه همکاری‌های منطقه‌ای برای تبادل فناوری‌های کم‌کربن و هماهنگی در سیاست‌های زیست‌محیطی؛
- اجرای سیاست‌های مالیاتی سبز، مانند مالیات بر کربن و تخصیص آن به پروژه‌های دیجیتال و فناوری‌های کم‌کربن.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش، نشان می‌دهد که سیاست‌های حمایتی در حوزه ICT، می‌توانند به‌طور همزمان موجب رشد اقتصادی و کاهش انتشار کربن در ایران و کشورهای خاورمیانه شوند. با این حال، تعمیم این سیاست‌ها به مناطق دیگر، نیازمند توجه به عوامل بومی مانند سطح توسعه، بلوغ نهادی، زیرساخت‌های دیجیتال و دسترسی به فناوری‌های پاک است. مطالعات آتی می‌توانند با مدل‌سازی پویاتر و لحاظ عدم قطعیت‌های نهادی و فناورانه، مسیرهای سیاست‌گذاری اثربخش‌تری ارائه دهند.

سپاسگزاری: موردی وجود ندارد.

تأییدیه‌های اخلاقی: نویسندگان اعلام می‌دارند که موردی وجود ندارد.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی بین آنان وجود ندارد.

سهم نویسندگان در مقاله: تمامی نویسندگان به یک اندازه در نگارش مقاله سهم دارند.

منابع مالی / حمایت‌ها: این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۲۵۶۸۲ انجام شده است.

References

- Alataş, S. (2021). The role of information and communication technologies for environmental sustainability: Evidence from a large panel data analysis. *Journal of Environmental Management*, 293, 112889.
- Alavipour, F., Ehsani, E., Thalathi, M., & Chahraazar, F. (2013). The impact of information and communication technology on sustainable environmental development. *Quarterly Journal of Environmental Education and Sustainable Development*, 2(5), 53-72. [In Persian].
- Appiah-Otoo, I., & Song, N. (2021). The impact of ICT on economic growth- Comparing rich and poor countries. *Telecommunications Policy*, 45(2), 102082.
- Appiah-Otoo, I., Acheampong, A. O., Song, N., & Chen, X. (2022). The impact of information and communication technology (ICT) on carbon dioxide emissions: Evidence from heterogeneous ICT countries. *Energy & Environment*, 0958305X221118877.
- Arshad, Z., Robaina, M., & Botelho, A. (2020). The role of ICT in energy consumption and environment: An empirical investigation of Asian economies with cluster analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(26), 32913-32932.
- Asongu, S. A., Le Roux, S., & Biekpe, N. (2018). Enhancing ICT for environmental sustainability in sub-Saharan Africa. *Technological Forecasting and Social Change*, 127, 209-216.
- Avom, D., Nkengfack, H., Fotio, H. K., & Totouom, A. (2020). ICT and environmental quality in Sub-Saharan Africa: Effects and transmission channels. *Technological Forecasting and Social Change*, 155, 120028.
- Bakhshei Dashjerdi, R., Nazari Zanyani, A., & Dehghani Shahzadeh, F. (2018). The impact of intergenerational equity on global warming and economic growth, with emphasis on the role of the time preference rate: A case study of the Middle East and North Africa region. *Quarterly Journal of Economic Research and Policy*, 26(86), 67-104. [In Persian].
- Ben Lahouel, B., Taleb, L., Managi, Sh., & Guesmi, K. (2022). The threshold effects of ICT on CO₂ emissions: Evidence from the MENA countries. *Environmental Economics and Policy Studies*, 1-21. https://ideas.repec.org/a/spr/envpol/v26y2024i2d10.1007_s10018-022-00346-w.html
- Briglauer, W., Cambini, C., & Grajek, M. (2023). Evaluating the effects of ICT core elements on CO₂ emissions: Recent evidence from OECD countries. *Telecommunications Policy*, 47(5), 102492. <https://DOI.org/10.1016/j.telpol.2023.102492>
- Charfeddine, L., & Kahia, M. (2021). Do information and communication technology and renewable energy use matter for carbon dioxide emissions reduction? Evidence from the Middle East and North Africa region. *Journal of Cleaner Production*, 327, 129410.

- Chen, W., & Hu, Z. H. (2018). Using evolutionary game theory to study governments and manufacturers' behavioral strategies under various carbon taxes and subsidies. *Journal of Cleaner Production*, 201, 123-141.
- Chen, W., & Hu, Z. H. (2020). Analysis of multi-stakeholders' behavioral strategies considering public participation under carbon taxes and subsidies: An evolutionary game approach. *Sustainability*, 12(3), 1023.
- Chien, F., Anwar, A., Hsu, C. C., Sharif, A., Razzaq, A., & Sinha, A. (2021). The role of information and communication technology in encountering environmental degradation: Proposing an SDG framework for the BRICS countries. *Technology in Society*, 65, 101587.
- Du, Q., Yan, Y., Huang, Y., Hao, C., & Wu, J. (2021). Evolutionary games of low-carbon behaviors of construction stakeholders under carbon taxes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 508.
- Elmi, Z., & Arianfar, F. (2023). The role of information and communication technology and per capita income on CO₂ emissions in OPEC Plus oil-exporting countries with an emphasis on the environmental Kuznets curve. *Environmental Science Studies*, 8(3), 7130-7148. [In Persian].
- Faisal, F., Tursoy, T., & Pervaiz, R. (2020). Does ICT lessen CO₂ emissions for fast-emerging economies? An application of the heterogeneous panel estimations. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(10), 10778-10789.
- Fallahi, F., Sadoodi, S., & Memipur, S. (2012). The impact of information and communication technology (ICT) on the environmental quality in Iran. *Quarterly Journal of Environmental Economics and Energy*, 1(2), 149-171. [In Persian]
- Farazmand, H., Salahmanesh, E., Andayesh, Y., & Rezaei, M. (2019). Social cost of carbon in Iran: Concepts and results of the DICE-2016R model and alternative approaches. *Quarterly Journal of Economic Research and Policies*, 27(90), 276-243. [In Persian]
- Fernández-Portillo, A., Almodóvar-González, M., & Hernández-Mogollón, R. (2020). Impact of ICT development on economic growth: A study of OECD European Union countries. *Technology in Society*, 63, 101420.
- Ghasemi Nejad, M., Jahangard, E., & Sharifi, M. (2016). The impact of information and communication technology on carbon dioxide emissions in selected countries. Master's Thesis, Allameh Tabataba'i University, Faculty of Economic Sciences. [In Persian]
- Ghazouani, A., Xia, W., Ben Jebli, M., & Shahzad, U. (2020). Exploring the role of carbon taxation policies on CO₂ emissions: Contextual evidence from tax implementation and non-implementation European Countries. *Sustainability*, 12(20), 8680.
- Hajipour Apourvari, M., Nejati, M., Bahmani, M., Jalaei, A., & Seyed Abdolmajid, M. (2023). Investigating the effect of ICT goods imports on renewable energy production: The case of Iran. *Economic Modeling Research Quarterly*, 14(51), 68-112. [In Persian]

- Haqshenas, M., Moayedfar, R., Farahmand, S., & Sharifi, A. (2021). Economic outlook of MENA countries until 2105: The application of the RICE model. *Quarterly Journal of Applied Economic Theories*, 4(8), 35-76. [In Persian]
- Hasel, N., & Mazini, E. (2013). Evaluating the effect of information and communication technology on the environment. *Environmental Research Studies*, 4(7), 114-103. [In Persian]
- Higón, D. A., Gholami, R., & Shirazi, F. (2017). ICT and environmental sustainability: A global perspective. *Telematics and Informatics*, 34(4), 85-95.
- Jafari Parvazkhahlu, K., Paytakhti Eskoui, A., & Azali, R. (2021). Investigating the impact of information and communication technology (ICT) and economic growth on environmental pollution: A case study of Gulf Cooperation Council (GCC) countries. *Biannual Journal of Scientific Studies and Economic Policies*, 1(8), 111-138. [In Persian]
- Jahangard, E., Banoui, A., Barkhordari, S., Amadeh, H., & Doodabinejad, E. (2019). Comparing the economic effects of implementing carbon taxes and energy price taxes in Iran's economy: A computable general equilibrium approach. *Iranian Journal of Energy Economics Research*, 8(30), 61-92. [In Persian]
- Kahouli, B., Hamdi, B., Nafla, A., & Chabaane, N. (2022). Investigating the relationship between ICT, green energy, total factor productivity, and ecological footprint: Empirical evidence from Saudi Arabia. *Energy Strategy Reviews*, 42, 100871.
- Khan, F. N., Sana, A., & Arif, U. (2020). Information and communication technology (ICT) and environmental sustainability: A panel data analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(29), 36718-36731.
- Khan, H., Weili, L., & Khan, I. (2022). Examining the effect of information and communication technology, innovations, and renewable energy consumption on CO2 emission: Evidence from BRICS countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(31), 1-17.
- Lennerfors, T. T., Fors, P., & van Rooijen, J. (2015). ICT and environmental sustainability in a changing society: The view of ecological World Systems Theory. *Information Technology & People*, № 4, 758-774.
- Liu, C., Huang, W., & Yang, C. (2017). The evolutionary dynamics of China's electric vehicle industry-Taxes vs. subsidies. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 103-122.
- Lu, W. C. (2018). The impacts of information and communication technology, energy consumption, financial development, and economic growth on carbon dioxide emissions in 12 Asian countries. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23(8), 1351-1365.
- Magazzino, C., Porrini, D., Fusco, G., & Schneider, N. (2021). Investigating the link among ICT, electricity consumption, air pollution, and economic growth in EU countries. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 16(11-12), 976-998.

- Majdzadeh Tabatabaei, Sh., Hadian, E., & Zibae, M. (2016). Determining the appropriate subsidy level for renewable energy development in Iran using a computable general equilibrium model with a hybrid approach. *Iranian Journal of Energy Economics Research*, 5(17), 167-129. [In Persian]
- Murshed, M. (2020). An empirical analysis of the non-linear impacts of ICT-trade openness on renewable energy transition, energy efficiency, clean cooking fuel access and environmental sustainability in South Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(29), 36254-36281.
- Nejati, M., & Shah, S. A. A. (2023). Effect of information and communication technology on CO₂ emissions: An empirical analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 189, 122375.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122375>
- Nematollahi, Fatemeh., Sadraye Jowaheri, Ahmad., Samadi, Ali-Hossein, & Ruhollah Shahnazi. (2018). Determining the necessary subsidy for investment in research and development for air pollution reduction policy in Iran using a computable general equilibrium model: A case study of Iran's economy. *Scientific-Research Quarterly Journal of Economic Growth and Development Research*, 8(32), 46-33. [In Persian]
- Nematollahi Sarvestani, Sh., Memarnezhad, A., & Mohammadi, T. (2023). The effect of carbon tariffs on production and trade in energy industries in Iran using the GTAP-E computable general equilibrium model. *Business Studies*, 21(121), 21-36. [In Persian]
- Nguyen, V. C. T., & Le, H. Q. (2024). The impact of ICT infrastructure, technological innovation, renewable energy consumption and financial development on carbon dioxide emission in emerging economies: New evidence from Vietnam. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 35(6), 1233-1253.
<https://doi.org/10.1108/MEQ-09-2023-0325>
- Nordhaus, W. D., & Yang, Z. (1996). A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *The American Economic Review*, Vol. 86, No. 4, 741-765.
- Noroozi, Hayedeh, Shahnazi, Ruhollah, Hadian, Ebrahim, & Farajzadeh, Zakaria. (2024). Determining the carbon tax rate considering endogenous growth: A case study of Iran. *Quarterly Journal of Economic Modeling Studies*. Vol. 14, Issue 53. [In Persian]
- OECD. (2017). Policies to support the ICT sector. (*OECD Digital Economy Papers, DSTI/CDEP/MADE(2017)1*). Organisation for Economic Co-operation and Development. [https://one.oecd.org/document/DSTI/CDEP/MADE\(2017\)1/en/pdf](https://one.oecd.org/document/DSTI/CDEP/MADE(2017)1/en/pdf)
- Ozcan, B., & Apergis, N. (2018). The impact of internet use on air pollution: Evidence from emerging countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(5), 4174-4189.
- Pohjola, M. (2002). The new economy in growth and development. *Oxford Review of Economic Policy*, 18(3), 380-396.
- Quah, D. (2003). Digital goods and the new economy. Available at SSRN 410604.

- Raheem, I. D., Tiwari, A. K., & Balsalobre-Lorente, D. (2020). The role of ICT and financial development in CO₂ emissions and economic growth. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 1912-1922.
- Sayyadi, M., Soheili Ahmadi, H., Aryafar, M., & Moradi, F. (2023). Scenario analysis of short-term and long-term impacts of carbon tax policy and energy subsidy removal on CO₂ emissions in Iran. *Journal of Energy Planning and Policy Studies*, 3(9), 125-170. [In Persian]
- Shaaban-Nejad, S., & Shirazi, F. (2022). ICT and Environmental Sustainability: A Comparative Study. *Sustainability*, 14(14), 8651.
- Shabani, Z. D., & Shahnazi, R. (2019). Energy consumption, carbon dioxide emissions, information and communications technology, and gross domestic product in Iranian economic sectors: A panel causality analysis. *Energy*, 169, 1064-1078.
- Shahnazi, R., & Dehghan Shabani, Z. (2019). The effects of spatial spillover information and communications technology on carbon dioxide emissions in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(23), 24198-24212.
- Shahnazi, R. (2021). Do information and communications technology spillovers affect labor productivity?. *Structural Change and Economic Dynamics*, 59, 342-359.
- Wen, Y., Shabbir, M. S., Haseeb, M., Kamal, M., Anwar, A., Khan, M. F., & Malik, S. (2022). The dynamic effect of information and communication technology and renewable energy on CO₂ emission: Fresh evidence from panel quantile regression. *Frontiers in Environmental Science*, 1123.
- World Bank. (2013). *ICT Sector-Results Profile*. The World Bank. <https://www.worldbank.org/en/results/2013/04/13/ict-results-profile>
- Worldometer. (n.d.). *Iran CO₂ emissions*. Retrieved April 24, 2025, from: <https://www.worldometers.info/co2-emissions/iran-co2-emissions/>
- Ulucak, R., & Khan, S. U. D. (2020). Does information and communication technology affect CO₂ mitigation under the pathway of sustainable development during the mode of globalization?. *Sustainable Development*, 28(4), 857-867.
- Yu, P. (2020). Carbon tax/subsidy policy choice and its effects in the presence of interest groups. *Energy Policy*, 147, 111886.
- Yuyin, Y., & Jinxi, L. (2018). The effect of governmental policies of carbon taxes and energy-saving subsidies on enterprise decisions in a two-echelon supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 181, 675-691.
- Zhang, J., Wang, B., & Latif, Z. (2019). Towards cross-regional sustainable development: The nexus between information and communication technology, energy consumption, and CO₂ emissions. *Sustainable Development*, 27(5), 990-1000.
- Zhu, G., Pan, G., & Zhang, W. (2018). Evolutionary game theoretic analysis of low carbon investment in supply chains under governmental subsidies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 2465.