ITRC
ICT Research Institute
(Iran Telecommunication Research Center)

Journal of Information and Communication Technology

Iranian Society of Information and Communication Technology

Volume 17, Issue 66-67, Autumn and Winter 2025, pp. 238-257

Analyzing the Relationship between the Digital Economy and the GDP of Iran and Malaysia Using Long Short-Term Memory Neural Networks

Mohammad Kazem Sayadi[1*]

[1] ICT Research Institute, Tehran, Iran

Received: 30 September 2025, Revised: 30 November 2025, Accepted: 24 February 2026
Paper type: Research

Abstract

With the increasing growth of digital technologies, examining the role of the digital economy in the growth and structural changes of the macroeconomics has become one of the key policy issues. The main issue of the present study is to examine the effect of digitalization of the economy on the GDP of Iran and Malaysia, and it uses machine learning algorithms, especially neural networks with Multi-Level Long Short-term Memory layers, to model the behavior of GDP in these countries. In this regard, four separate model configurations have been designed and implemented: (1) a hybrid model including classical economic variables (capital and labor) and information and communication technology (ICT) indicators, (2) a model based solely on ICT indicators, (3) a model based solely on classical economic variables, and (4) a hybrid reduced model. The models were trained independently for each country, and loss function analysis, convergence point determination, and forecast accuracy measurement with an error threshold of 0.1 were used to evaluate their performance. The results showed that digitalization, especially through infrastructure such as fixed broadband internet, mobile network coverage, and international broadband usage, is significantly associated with GDP. The hybrid model that simultaneously uses conventional and digital variables performed best in Iran and Malaysia, indicating that digitalization by itself cannot replace conventional factors of production, but plays a complementary and reinforcing role in the growth process. Accordingly, policymakers seeking to increase economic growth and productivity should pursue the development of digital economy infrastructure alongside investment in human and physical capital.

Keywords: Digital economy; Machine learning; Artificial neural networks; Long short-term memory.

[*] Corresponding Author's email: mk.sayadi@itrc.ac.ir

دوفصلنامه
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

سال هفدهم، شماره‌های ۶۶ و ۶۷، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۲۳۸ الی ۲۵۷

تحلیل ارتباط اقتصاد دیجیتال و تولید ناخالص داخلی برای کشورهای ایران و مالزی با استفاده از شبکه‌های عصبی کوتاه‌نگر بلندحافظه

محمدکاظم صیادی[1*]

[1] پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸ تاریخ بازبینی: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با رشد فزاینده فناوری‌های دیجیتال، بررسی نقش اقتصاد دیجیتال در رشد و تحولات ساختاری اقتصاد کلان به یکی از موضوعات کلیدی سیاست‌گذاری تبدیل شده است. مسئله اساسی پژوهش حاضر بررسی اثر دیجیتالی‌شدن اقتصاد بر تولید ناخالص داخلی کشورهای ایران و مالزی است و از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی با لایه‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه، برای مدل‌سازی رفتار تولید ناخالص داخلی در این دو کشور بهره گرفته است. در این راستا، چهار پیکربندی مجزای مدل طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند: (۱) مدلی ترکیبی شامل متغیرهای اقتصادی متعارف (سرمایه و نیروی کار) و شاخص‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات (فاوا)، (۲) مدلی صرفا مبتنی بر شاخص‌های فاوا، (۳) مدلی صرفا بر پایه متغیرهای اقتصادی متعارف، و (۴) مدل تقلیل‌یافته ترکیبی. آموزش مدل‌ها برای این دو کشور به‌طور مستقل انجام گرفته و از تحلیل توابع زیان، تعیین نقطه همگرایی، و سنجش دقت پیش‌بینی با آستانه خطای ۰٫۱ برای ارزیابی عملکرد آن‌ها استفاده شده است. نتایج نشان دادند که دیجیتالی‌شدن، به‌ویژه از طریق زیرساخت‌هایی مانند اینترنت پهن‌باند ثابت، پوشش شبکه‌های موبایل، و استفاده از پهنای باند بین‌المللی، با تولید ناخالص داخلی در ارتباط معناداری قرار دارد. مدل ترکیبی که همزمان از متغیرهای متعارف و دیجیتال بهره می‌برد، در ایران و مالزی بهترین عملکرد را داشت و این امر نشان داد که دیجیتالی‌شدن به‌خودی‌خود نمی‌تواند جایگزین عوامل تولید متعارف شود، اما نقشی مکمل و تقویت‌کننده در فرآیند رشد ایفا می‌کند. بر این اساس، سیاست‌گذاری که در پی افزایش رشد و بهره‌وری اقتصادی هست، باید توسعه زیرساخت‌های اقتصاد دیجیتال را در کنار سرمایه‌گذاری در سرمایه انسانی و فیزیکی دنبال کنند.

کلیدواژگان: اقتصاد دیجیتال؛ یادگیری ماشین؛ شبکه‌های عصبی مصنوعی؛ کوتاه‌نگرهای بلندحافظه.

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: mk.sayadi@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

اقتصاد دیجیتال به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابعاد تحول ساختاری اقتصاد جهانی، طی دهه‌های اخیر با شتابی بی‌سابقه توسعه یافته و نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری الگوهای جدید اقتصادی ایفا می‌کند. این تحول نه محصولی ناگهانی، بلکه نتیجه‌ی فرایند تدریجی گذار از موج‌های متوالی دیجیتالی‌شدن است که به ظهور مفاهیمی چون انقلاب صنعتی چهارم و اقتصاد پلتفرمی منجر شده است [۱]. بنا به تعریف باخت و هیکس [۲] برای اقتصاد دیجیتال سه لایه تعریف شده است: لایه هسته که شامل زیرساختهای ارتباطی و اطلاعاتی، نرم‌افزارها و سخت‌افزارهاست، لایه میانی یا دیجیتال زادها که شامل کسب و کارهایی است که به واسطه دیجیتالی شدن بوجود آمده اند، و لایه سوم یا لایه گسترده که شامل بهره گیری از فناوری اطلاعات و ارتباطات در کسب و کارهای عمودی نظیر سلامت، کشاورزی، حمل و نقل، معدن، دولت و ... است. اقتصاد دیجیتال بازتعریفی از نظریه‌های متعارف اقتصادی در شرایط جدید فناورانه است که در آن بسیاری از اصطکاک‌های سنتی بازار به‌شدت کاهش یافته‌اند [۳]

ریشه‌های تاریخی اقتصاد دیجیتال به توسعه فناوری‌های رایانه‌ای در دوران پس از جنگ جهانی دوم و پیدایش اینترنت بازمی‌گردد که به‌تدریج زمینه شکل‌گیری کسب‌وکارهای پلتفرمی و بازارهای دیجیتال امروزی را فراهم کرده است[۴ و ۵]. بررسی تجربه کشورهای مختلف در [۶] نشان می‌دهد که منافع حاصل از اقتصاد دیجیتال اثری قابل توجه بر اقتصاد آنها داشته است. [۷] در تحقیقی توصیفی، به بر بررسی اقتصاد دیجیتال و تأثیر آن بر کسب‌وکارها و کاربران و همچنین ارزیابی فرصت‌های دسترسی آسان و سریع به محصولات و خدماتی که می‌تواند منجر به افزایش کارایی و بهره‌وری شود پرداخته اند. [۸] تأیید می‌کند که دیجیتالی شدن به طور قابل توجهی توسعه اقتصادی با کیفیت بالا را افزایش می‌دهد، نه تنها از طریق بهبود مستقیم بهره‌وری، بلکه با تحریک نوآوری سبز، که به عنوان یک واسطه حیاتی در دستیابی به رشد پایدار عمل می‌کند. هرچند اقتصاد دیجیتال فرصت‌های جدیدی برای رشد پایدار مبتنی بر نوآوری [۹]، گسترش نوآوری‌های سبز[۱۰]، بهبود بهره‌وری [۱۱]، جهانی‌شدن [۱۲]، و رفاه مصرف‌کننده [۱۳] فراهم ساخته است اما همزمان نگرانی‌هایی در خصوص تمرکز بازار، تبعیض اطلاعاتی، نقض حریم خصوصی و نابرابری‌های نوظهور نیز افزایش یافته است [۱۳]. از این رو، مطالعه دقیق و بومی‌شده اثرات اقتصاد دیجیتال به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، همچنان به‌عنوان یک حوزه کلیدی پژوهشی باقی مانده است. این تحولات به نفی نظریات اقتصادی پیشین نظیر [۱۴] تا [۱۷] منجر نمی‌شوند، بلکه مستلزم بازخوانی آن‌ها در محیطی جدید می‌باشد.

با این حال، آثار اقتصاد دیجیتال در میان کشورها به‌طور یکنواخت توزیع نشده و شکاف فزاینده‌ای میان اقتصادهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه در بهره‌برداری از ظرفیت‌های این حوزه مشاهده می‌شود. به‌ویژه، کشورهایی که زیرساخت‌های ارتباطی ضعیف‌تر و نظام مهارتی کمتر انطباق‌یافته دارند، در معرض مخاطراتی چون گسترش نابرابری، حذف مشاغل کم‌مهارت و تمرکز ثروت قرار می‌گیرند [۱۸]؛ همچنین در پژوهش‌هایی چون [۱۹] رابطه منفی میان اقتصاد دیجیتال و رشد اقتصادی تایید شده است.

با وجود رشد چشمگیر فناوری‌های دیجیتال، همچنان شکاف قابل‌توجهی در شناخت جامع از چگونگی تاثیر اقتصاد دیجیتال بر عملکرد کلان اقتصادی وجود دارد؛ به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه‌ای نظیر ایران که بخش عمده‌ای از تحولات دیجیتال آن در دهه‌های اخیر به وقوع پیوسته است [۲۰ و ۲۱]. بخش قابل توجهی از ادبیات موجود پیرامون نقش فناوری‌های دیجیتال در اقتصاد، عمدتا به صورت پراکنده و ناهماهنگ بوده و در نتیجه به اجماع نظری روشن در خصوص سازوکارهای انتقال این اثرات در سطح کلان منجر نشده است [۲۲]. تعاریف معاصر اقتصاد دیجیتال بر خلق ارزش مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال در سه سطح زیرساختی، بسترهای خدمات دیجیتال و کاربردهای پیشرفته اقتصادی تأکید دارند؛ به‌گونه‌ای که اقتصاد دیجیتال‌شده به‌تدریج جایگزین بسیاری از سازوکارهای سنتی تولید، تجارت و خدمات می‌گردد [۲۲]. این روندهای تحولی، نه تنها پیامدهایی برای سیاست‌های اقتصادی در حوزه‌هایی چون سرمایه‌گذاری، تنظیم مقررات، مالکیت فکری و بازار کار دارند، بلکه موجب بازنگری در بسیاری از نظریه‌های متعارف اقتصادی نیز شده‌اند [۳]. در سطح کلان، همگرایی دیجیتال به‌طور مثبت بر رشد اقتصادی تاثیر می‌گذارد، عمدتا با رشد بهره‌وری نیروی کار فناوری‌های دیجیتال به‌عنوان یک عامل تولید جدید در نظر گرفته می‌شوند که نیروی کار جدید با بهره‌وری و کارایی بالاتر و هزینه‌های کسب‌وکار کمتر ایجاد می‌کند [۲۳]. با این حال، تاثیر تحول دیجیتال بر کشورها و بخش‌ها متفاوت است. اقتصادهای توسعه‌یافته از رشد اقتصادی بالاتر سود می‌برند، ولی اقتصادهای نوظهور از ایجاد شغل سود می‌برند [۲۴]. دلیل اصلی تاثیر متفاوت تحول دیجیتال در ساختارهای اقتصادی کشورها نهفته است. اقتصادهای توسعه‌یافته عمدتا به مصرف داخلی متکی هستند و بخش‌های غیرقابل تجارت در آن‌ها اهمیت می‌یابد. از دیگرسو، در اقتصادهای توسعه‌یافته، دیجیتالی‌شدن بهره‌وری را بهبود می‌بخشد

و تاثیر قابل اندازه‌گیری بر رشد اقتصادی دارد. همچنین، فرآیند تحول دیجیتال ارتباط نزدیکی با مفهوم کلان اقتصادی رقابت دیجیتال دارد [۲۵ و ۲۶].

در ایران نیز طی دو دهه گذشته، رشد قابل‌توجهی در شاخص‌های نفوذ فناوری اطلاعات و ارتباطات ثبت شده است؛ به‌گونه‌ای که میزان کاربران اینترنت طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ افزایشی معادل ۲۲،۵۸۰ درصد را تجربه کرده و ایران را در میان ۲۰ کشور نخست جهان از حیث تعداد کاربران اینترنت قرار داده است. این روند صعودی، همراه با تأکید سیاست‌گذاران در اسناد بالادستی مبنی بر ارتقاء سهم اقتصاد دیجیتال در تولید ناخالص داخلی کشور، ضرورت پرداختن به ابعاد اقتصادی این تحول را دوچندان ساخته است. اگرچه بخش قابل‌توجهی از ادبیات موجود به بررسی ارتباط میان اقتصاد دیجیتال و رشد اقتصادی پرداخته است، نتایج پژوهش‌ها در این زمینه همچنان ناهمگن بوده و گاه یافته‌های متضادی را گزارش می‌کنند برای نمونه [۱۸]، [۱۹] و [۲۷]. این ناهمگونی می‌تواند متأثر از تفاوت در متغیرهای مورد استفاده، روش‌شناسی‌های تحلیلی و شرایط خاص اقتصادی کشورها باشد. افزون بر این، در بسیاری از پژوهش‌های پیشین، به ابعاد نامتقارن و غیرخطی تاثیرات دیجیتالی‌شدن اقتصاد کمتر پرداخته شده است. همچنین از ابزارهای جدید مبتنی بر داده نظیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و ... در این بررسی‌ها استفاده نشده است. با توجه به این نکات می‌توان گفت که این پژوهش در تلاش برای پرکردن این گپ‌ها و باز کردن مسیر جدیدی برای پژوهش‌ها در این زمینه است.

در چنین بستری، مسئله اصلی پژوهش حاضر آن است که آیا دیجیتالی‌شدن اقتصاد در ایران می‌تواند به‌عنوان یک مؤلفه ساختاری در تبیین روندهای کلان اقتصادی ایفای نقش کند و چه میزان از تغییرات تولید ناخالص داخلی ایران را می‌توان به تحولات دیجیتال نسبت داد. به بیان دیگر، این مطالعه می‌کوشد بخشی از شکاف‌های نظری و تجربی موجود را در زمینه ارتباط میان اقتصاد دیجیتال و بازتاب کلان آن در اقتصاد ایران را پوشش دهد. با توجه به اهمیت روزافزون دیجیتالی‌شدن در سیاست‌های توسعه‌ای کشور، این پژوهش می‌تواند ضمن پر کردن بخشی از خلاهای پژوهشی موجود، شواهد تجربی معتبری برای سیاست‌گذاری اقتصادی در عصر دیجیتال فراهم سازد. بنابراین، نظر به شکاف موجود در خصوص آثار اقتصاد دیجیتال بر روندهای کلان اقتصاد ایران، هدف اصلی پژوهش کنونی پاسخ به این پرسش محوری است که آیا گسترش دیجیتالی‌شدن در بلندمدت اثری معنادار و ساختاری بر تولید ناخالص داخلی ایران داشته است؟ به‌طور خاص، این پژوهش به بررسی وجود روابط غیرخطی میان شاخص‌های اقتصاد دیجیتال و تولید ناخالص داخلی در اقتصاد ایران می‌پردازد. افزون بر این، جهت تعمیق تحلیل و مقایسه تطبیقی، کشور مالزی به‌عنوان کشور هم‌تراز منتخب وارد مطالعه شده است. انتخاب مالزی به دلیل برخورداری از شباهت‌های ساختاری اقتصادی با ایران، پیشرفت‌های شاخص در توسعه زیرساخت‌های دیجیتال، دسترسی به داده‌های آماری شفاف و همچنین توصیه‌های سیاستی نهادهای بین‌المللی در زمینه تجربیات موفق دیجیتالی‌شدن در کشورهای در حال توسعه صورت گرفته است. این مقایسه، زمینه ارزیابی جایگاه دیجیتال ایران را در قیاس با یک الگوی موفق منطقه‌ای فراهم می‌سازد.

بدین‌ترتیب پژوهش کنونی به‌صورت زیر ترتیب یافته است. نخست، مقدمه ارائه گردید، سپس به مبانی نظری پرداخته خواهد شد و در ادامه پیشینه پژوهش با در نظر گرفتن پژوهش‌های داخلی و خارجی مطرح می‌شود. در بخش بعد به روش‌شناسی اقتصادی می‌پردازیم و در پی آن برآورد مدل، یافته‌ها و نتیجه‌گیری ارائه خواهند شد.

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در ایران به بررسی نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات (فاوا) و مؤلفه‌های اقتصاد دیجیتال بر رشد اقتصادی پرداخته‌اند. نتایج این مطالعات گرچه عمدتا حاکی از اثرات مثبت دیجیتالی‌شدن بر اقتصاد ایران هستند، اما از نظر روش‌شناسی، دامنه متغیرها و سطح تحلیل تفاوت‌هایی دارند.

محققان با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم، اثر برخی شاخص‌های اقتصاد دیجیتال را بر تولید ناخالص داخلی ایران ارزیابی کرده و دریافتند که برخی سناریوهای تقویت فاوا اثر قابل توجهی بر رشد اقتصادی دارد، در حالی که سناریوهای دیگر تاثیر کمتری نشان می‌دهند [۱۹]. نویسندگان دیگری نیز با استفاده از مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی و داده‌های فصلی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۸ به این نتیجه رسیدند که متغیرهای مرتبط با توسعه اینترنت، تراکنش‌های مالی الکترونیکی، سرمایه و نیروی کار اثر مثبت معناداری بر رشد اقتصادی ایران دارند؛ در حالی که متغیر مجازی تحریم اثر منفی معناداری دارد [۲۸].

در سطح تحلیل ساختاری‌تر، محققین [۲۹] با طراحی یک مدل تکاملی، گذار اقتصاد ایران از اقتصاد منابع به اقتصاد دیجیتال را بررسی کرده و بر نقش تعیین‌کننده دولت در فراهم‌سازی زیرساخت‌های مناسب در این گذار تأکید نمودند. همچنین [۳۰] با بهره‌گیری از رویکرد حسابداری رشد برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ نشان داد که هر یک درصد افزایش سهم فاوا از تولید ناخالص داخلی

منجر به ۰٫۹۳ درصد افزایش در رشد اقتصادی ایران می‌شود و این بخش از طریق آثار سرریز دانش و شبکه می‌تواند فراتر از سهم مستقیم خود بر رشد اثرگذار باشد. از منظر بخشی، [۳۱] نشان داد که سرمایه‌گذاری در فاوا نه تنها به صورت مستقیم تولید صنایع کارخانه‌ای را افزایش می‌دهد بلکه آثار سرریز سرمایه‌گذاری بین صنایع نیز معنادار است. در همین راستا، محققین [۳۲] با استفاده از روش خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی، تاثیر مثبت و معنادار پیامدهای خارجی بخش فاوا را بر صادرات و بخش‌های غیرصادراتی اقتصاد ایران گزارش کردند. در مطالعات مقیاس گسترده‌تر، [۳۳] با تحلیل داده‌های پنل ۵۲ کشور اسلامی طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ نشان دادند که در این کشورها، سرمایه‌های غیرفاوا همچنان بیشترین اثرگذاری را بر رشد اقتصادی داشته‌اند، گرچه آثار فناوری اطلاعات نیز قابل توجه بوده است. با وجود این تلاش‌ها، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های داخلی بر روابط خطی و عمدتا کوتاه‌مدت تمرکز داشته و کمتر به ابعاد غیرخطی، پویایی‌های بلندمدت و مقایسه تطبیقی با سایر کشورهای هم‌تراز پرداخته‌اند؛ خلائی که پژوهش حاضر درصدد پوشش آن است..

در سطح کلان، [۳۴] نشان دادند که تاثیر فناوری‌های دیجیتال بر رشد اقتصادی به سطح توسعه کشورها بستگی دارد؛ به‌گونه‌ای که زیرساخت‌های اینترنتی در هر دو گروه کشور مؤثرند، اما نقش تلفن همراه و اینترنت پهن‌باند ثابت در اقتصادهای در حال گذار و نوآور متفاوت است. یافته‌های آنان بر اهمیت زمینه‌های نهادی و سیاست‌های مکمل در بهره‌برداری از ظرفیت دیجیتال تاکید دارد. به‌طور مشابه، [۳۵] در مطالعه‌ای بر استان‌های چین، با طراحی شاخص ترکیبی اقتصاد دیجیتال، دریافتند که زیرساخت و ادغام دیجیتال بیشترین تاثیر را بر بهره‌وری کل عوامل تولید داشته‌اند.

در مطالعاتی با رویکرد اقتصاد سیاسی و حکمرانی، [۱۸] بر پویایی‌های دوگانه اقتصاد دیجیتال در خلق ارزش و شکل‌گیری ریسک‌های ساختاری از جمله تمرکز بازار، نقض حریم خصوصی و تهدیدهای امنیت ملی تاکید می‌کند و خواستار مداخلات حاکمیتی هوشمند برای تنظیم این فضاست. در همین راستا، [۳۶] با تمرکز بر ۱۷۳ شهر چین طی ۲۰۱۸-۲۰۱۱ نشان دادند که توسعه دیجیتال از طریق تقویت کارآفرینی، همگرایی منطقه‌ای و اثرات سرریز می‌تواند رشد اقتصادی پایدار شهری را ارتقاء دهد، گرچه شدت این اثرات میان مناطق متغیر است.

در مطالعات کشورهای در حال توسعه، [۳۷] در آفریقا، تاثیر متفاوت انواع کاربری دیجیتال (فردی، تجاری و دولتی) را بررسی کرده و نشان دادند که استفاده فردی بیشترین اثر را بر رشد اقتصادی دارد. [۳۸] نیز با بررسی ۵۹ کشور طی ۲۰۱۰-۱۹۹۵ دریافت که سرمایه‌گذاری در فاوا در همه گروه‌های درآمدی اثر مثبت دارد؛ اما تفاوت معناداری میان کشورها یافت نشد و نقش عوامل مکمل همچون سرمایه انسانی و باز بودن تجاری پررنگ‌تر بود.

در سطح کشورهای خاص و منطقه‌ای، محققین [۳۹] در اتحادیه اروپا رابطه مثبت و معنادار میان فاوا و رشد اقتصادی را با مدل‌سازی ساختاری تایید کردند و نقش سرمایه انسانی و نوآوری را به‌عنوان کانال‌های انتقال معرفی نمودند. همچنین [۴۰] در مطالعه‌ای روی کشورهای بریکس نشان دادند که فناوری اطلاعات، سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی و جهانی‌شدن در تعامل با یکدیگر رشد اقتصادی را تقویت می‌کنند و اهمیت آزادسازی بخش فناوری را برجسته کردند.

در حوزه توسعه اجتماعی-اقتصادی، پژوهشگران [۴۱] با بهره‌گیری از رویکرد قابلیت‌ها در پاکستان، اثرات فاوا را فراتر از رشد اقتصادی، در ابعاد توانمندسازی فردی، تماس اجتماعی و تحولات فرهنگی تحلیل کرده‌اند. [۴۲] نیز نقش رسانه‌های جمعی و فاوا را در کاهش فساد، فقر و نابرابری در کشورهای در حال توسعه بررسی کرده و به دوگانگی ظرفیت‌های فناورانه در کاهش یا تعمیق شکاف‌های اجتماعی پرداخته است. در نهایت، [۴۳] با تمرکز بر صنایع ایالات متحده و هلند، نشان داد که سرمایه‌گذاری در فاوا از مسیر افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید، اثر ضدتورمی در سطح بخشی داشته و بر اهمیت ترکیب فاوا با سرمایه انسانی تأکید کرده است.

با وجود این مطالعات گسترده، همچنان چالش‌های مهمی در تحلیل روابط غیرخطی، پویایی‌های بلندمدت و شناسایی تفاوت‌های ساختاری میان کشورها و مناطق باقی مانده است. به‌ویژه برای کشورهایی نظیر ایران، پژوهش‌های تطبیقی که بتوانند این پیچیدگی‌ها را با بهره‌گیری از روش‌های نوین مدل‌سازی بررسی نمایند، بسیار محدود است؛ خلائی که پژوهش حاضر درصدد پاسخ‌گویی به آن است.

۳- روش‌شناسی

از منظر روش‌شناسی، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی نوع کوتاه‌نگر بلندحافظه، کوشیده است تا پیچیدگی‌های روابط غیرخطی میان متغیرهای اقتصادی را در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ تحلیل کند. بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق در حوزه اقتصاد کلان، با توجه به توان بالای آن‌ها در پردازش حجم عظیم داده‌های اقتصادی و استخراج الگوهای پنهان، فرصت‌های جدیدی برای تحلیل دقیق‌تر پویایی‌های اقتصاد دیجیتال فراهم می‌آورد [۴۴]. در زیربخش‌های

بعدی این موضوع دقیق تر بیان می‌گردد.

۳-۱- پایه‌های آماری

متغیرهای مورد بررسی در بازه ۱۴۰۲-۱۳۸۰ در دو دسته کلی جای می‌گیرند: (الف) شاخص‌های اقتصادی: «تولید ناخالص داخلی»، «موجودی سرمایه» و «نیروی کار»؛ (ب) شاخص‌های اقتصاد دیجیتال: «اشتراک پهن‌باند ثابت »، «اشتراک تلفن ثابت »، «خانوارهای دارای دسترسی به اینترنت در منزل »، «استفاده از پهنای باند بین‌المللی »، «اشتراک تلفن همراه » و «پوشش جمعیتی شبکه‌های موبایل ». انتخاب متغیرهای مناسب برای بازنمایی اقتصاد دیجیتال، از مراحل اساسی طراحی مدل در این پژوهش بوده است. از میان طیف گسترده‌ای از شاخص‌های فاوا، ما شش متغیر کلیدی را انتخاب کردیم که به‌لحاظ نظری، تجربی و آماری، توان تبیینی بالایی برای تاثیر اقتصاد دیجیتال بر تولید ناخالص داخلی دارند. دلایل انتخاب این متغیرها:

- شمول و پوشش فراگیر اقتصاد دیجیتال: متغیرهای انتخاب‌شده نمایانگر سه لایه اساسی اقتصاد دیجیتال- زیرساخت دسترسی، استفاده کاربران، ظرفیت فنی و تکنولوژیک- هستند. این پوشش چندلایه کمک می‌کند تا از یک‌سو وضعیت دسترسی دیجیتال و از سوی دیگر سطح بهره‌برداری فنی در مدل لحاظ شود.
- در دسترس بودن داده‌ها برای هر دو کشور: بسیاری از دیگر متغیرهای فاوا، مانند تراکنش‌های مالی دیجیتال، هوش مصنوعی، یا شاخص‌های حکمرانی دیجیتال، یا داده‌های تاریخی ندارند یا برای کشورهای در حال توسعه به‌صورت پیوسته در دسترس نیستند. بنابراین، قابلیت مقایسه بین‌کشوری و تداوم زمانی داده‌ها معیار مهمی در انتخاب بودند.
- پیشینه تحقیقاتی معتبر: مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی (مانند گزارش‌های اتحادیه بین‌المللی مخابرات، بانک جهانی و کنفرانس تجارت و توسعه سازمان ملل) از همین متغیرها برای تحلیل تاثیر فاوا بر رشد اقتصادی استفاده کرده‌اند به‌طوری که در اکثر گزارش‌ها به‌عنوان شاخص‌های موثر بر بهره‌وری و رشد معرفی شده‌اند.
- همخوانی با ساختار اقتصادی کشورهای منتخب: انتخاب ایران و مالزی با توجه به ساختار متفاوت اقتصادی‌شان بود. متغیرهای انتخاب‌شده به‌گونه‌ای طراحی شدند که هم در ساختار دیجیتال و در حال گذار (مانند ایران) و هم در اقتصادهای دیجیتال (مانند مالزی) قابلیت تبیین داشته باشند.
- پرهیز از هم‌خطی شدید میان متغیرها: از منظر آماری، متغیرهایی انتخاب شده‌اند که علی‌رغم همبستگی مفهومی، هم‌خطی شدید آماری با یکدیگر نداشته باشند تا از بروز خطای تفسیر در مدل‌سازی جلوگیری شود.

۳-۲- یادگیری ماشین به‌عنوان روش‌شناسی اقتصادی

الگوهای یادگیری ماشین می‌توانند به‌طور موثر حجم زیادی از داده‌ها را پردازش کنند، و می‌تواند به ساخت الگوهای اقتصادی پیچیده‌تر منجر شود. ادبیات نشان می‌دهد که الگوهای یادگیری ماشین می‌توانند از طریق موارد زیر در اقتصاد به ایفای نقش بپردازند:

- روابط اقتصادی اغلب غیرخطی و پویا هستند. الگوهای یادگیری ماشین می‌توانند این الگوهای پیچیده را الگوسازی کنند.
- پردازش داده‌ها برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و استخراج اطلاعات جدید.

پژوهشگران [۴۵] استدلال می‌کنند که موفقیت یادگیری ماشین عمدتا به دلیل توانایی آن در کشف ساختارهای پیچیده در داده‌هایی است که لزوما از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند. همچنین، آن‌ها پیشنهاد می‌کنند که استفاده از یادگیری ماشین در اقتصاد مستلزم یافتن وظایف مرتبط است که در آن تمرکز بر بهبود دقت پیش‌بینی‌ها یا کشف الگوهایی از مجموعه داده‌های پیچیده است که قابل تعمیم هستند.

رویکرد متعارف در اقتصاد، همانطور که در متون برجسته مانند [۴۶ و ۴۷] مثال زده شده است، مشخص کردن یک هدف یا یک برآورد احتمال است که تابعی از توزیع احتمال توام داده‌ها است. اغلب، هدف پارامتری از یک الگوی آماری است که توزیع مجموعه‌ای از متغیرها (معمولا مشروط به برخی متغیرهای دیگر) را بر حسب مجموعه‌ای از پارامترها، که می‌تواند یک مجموعه متناهی یا نامتناهی باشد، توصیف می‌کند. با توجه به یک نمونه تصادفی از جامعه مورد نظر، پارامترهای مورد نظر با استفاده از یک تابع هدف مانند مجموع مربع خطا یا تابع بیشینه درست‌نمایی برآورد می‌گردد. تمرکز، بیشتر بر روی کیفیت برآوردگرهای هدف است که به‌طور متعارف از طریق کارایی نمونه بزرگ اندازه‌گیری می‌شود. در مقابل، در ادبیات یادگیری ماشین تمرکز به‌طور معمول بر روی توسعه الگوریتم‌ها است [۴۸]. هدف الگوریتم‌ها معمولا پیش‌بینی برخی از متغیرها، یا طبقه‌بندی واحدها بر اساس اطلاعات محدود است.

۳-۳- چارچوب مدل

هدف این پژوهش الگوسازی روابط پیچیده میان تولید ناخالص داخلی و متغیرهای مختلف اقتصاد دیجیتال است. متغیرهای اقتصاد دیجیتال به‌کاررفته در این پژوهش عبارتند از اشتراک پهن‌باند ثابت، اشتراک تلفن ثابت، خانوارهای دارای دسترسی به اینترنت در منزل، استفاده از پهنای باند بین‌المللی، اشتراک تلفن همراه و پوشش جمعیتی شبکه‌های موبایل. فرض می‌شود که تابع تولید اقتصاد، با گنجاندن متغیرهای اقتصاد دیجیتال، نقطه آغاز مناسبی است. فرم عمومی تابع تولید توسعه‌یافته در این پژوهش به‌شرح زیر است:

$$GDP_t = f(L_t, K_t, ICT_t)$$
$$= f(L_t, K_t, FBS_t, FTS_t, HIAH_t, IBU_t, MCD_t, MCS_t)$$

که در آن GDP_t تولید ناخالص داخلی، L_t نهاده نیروی کار، K_t نهاده سرمایه، FBS_t اشتراک پهن‌باند ثابت[1]، FTS_t اشتراک تلفن ثابت[2]، $HIAH_t$ خانوارهای دارای دسترسی به اینترنت در منزل[3]، IBU_t استفاده از پهنای باند بین‌المللی[4]، MCD_t اشتراک تلفن همراه[5] و MCS_t پوشش جمعیتی شبکه‌های موبایل[6] می‌باشند.

گنجاندن یادگیری ماشین در این چارچوب اجازه می‌دهد تا روابط پیچیده‌تری مورد الگوسازی قرار گیرد. به‌جای فرض رابطه خطی میان این متغیرها، الگوهای یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی با کوتاه‌نگرهای بلندمدت می‌توانند روابط غیرخطی را از داده‌ها یاد بگیرند. در این راستا مدل‌های دقیق و همگرا، نه‌تنها ابزار پیش‌بینی بلکه راهنمای سیاست‌گذاری هوشمندانه در عصر اقتصاد دیجیتال هستند.

۳-۴- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی الگوهای محاسباتی هستند که برای شبیه‌سازی نحوه کارکرد شبکه‌های عصبی زیستی مغز آدم طراحی شده‌اند. شبکه‌ها از گره‌های همبند به یکدیگر (یا نورون‌ها) تشکیل شده است که در لایه‌ها گوناگون سازمان‌دهی شده‌اند. اجزای اصلی یک شبکه عصبی مصنوعی عبارتند از:

- **لایه ورودی**: داده‌های ورودی را دریافت می‌کند.
- **لایه‌های پنهان**: لایه‌هایی که ورودی‌ها را با استفاده از همبندهای وزنی پردازش می‌کنند.
- **لایه خروجی**: پیش‌بینی پایانی را تولید می‌کند.

هر نورون در یک شبکه عصبی مصنوعی یک جمع وزنی از ورودی‌ها انجام می‌دهد و سپس یک تابع فعال‌سازی[7] را برای معرفی غیرخطی بودن اعمال می‌کند. برای یک شبکه عصبی ساده با یک لایه پنهان، بیان ریاضی به‌صورت زیر است

$$y = f(W_2 f(W_1 X + b_1) + b_2)$$

که در آن، X ماتریس ورودی (مانند نیروی کار، سرمایه و متغیرهای اقتصاد دیجیتال)، W_1 و W_2 وزن‌های همبندها بین لایه‌ها هستند، b_1 و b_2 مقادیر اریب هستند، $f(\cdot)$ نیز تابع فعال‌سازی است.

آموزش شبکه عصبی مصنوعی از طریق پس‌انتشار خطا[8] انجام می‌شود. به‌طوری که الگو با کمینه‌کردن تابع خطا، وزن‌ها را بهینه می‌کند [۴۹].

۳-۵- مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه

مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه یک نوع ویژه از شبکه‌های عصبی بازگشتی[9] هستند که برای داده‌های دنباله‌ای طراحی شده‌اند و به‌ویژه برای پیش‌بینی داده‌های سری زمانی مناسب هستند. آن‌ها مشکل کاهش گرادیان که در شبکه‌های عصبی بازگشتی متعارف به‌وجود می‌آید را حل کردند و حفظ اطلاعات را در طول دنباله‌های بلند امکان‌پذیر می‌کنند.

در شبکه‌های عصبی بازگشتی، لایه‌های بازگشتی یا لایه‌های پنهان از سلول‌های بازگشتی تشکیل شده‌اند که حالات آن تحت تاثیر حالت‌های گذشته و ورودی‌های کنونی به آن با همبندها مورد بازخورد[10] قرار می‌گیرد. لایه‌های بازگشتی را می‌توان در معماری‌های مختلف سازمان‌دهی کرد تا شبکه‌های عصبی بازگشتی مختلفی را تشکیل دهد. بنابراین، شبکه‌های عصبی بازگشتی عمدتا توسط سلول‌های بازگشتی تو در تو و معماری شبکه به‌دست می‌آیند [۴۹].

هر واحد کوتاه‌نگر بلندحافظه دربرگیرنده سه دروازه اصلی است:

- دروازه فراموشی[11]: تصمیم می‌گیرد چه اطلاعاتی از گام‌های زمانی پیشین از حافظه سلولی حذف شود.

$$f_t = \sigma(W_f[h_{t-1}, x_t] + b_f)$$

[1] Fixed-broadband subscriptions
[2] Fixed-telephone subscriptions
[3] Households with internet access at home
[4] International bandwidth usage
[5] Mobile-cellular subscriptions
[6] Mobile Cellular Subscriptions
[7] Activation function
[8] backpropagation
[9] RNN: Recurrent Neural Network
[10] Feedback connections
[11] Forget gate

- دروازه ورودی[1]: کنترل می‌کند چه مقدار اطلاعات جدید باید در حافظه سلولی ذخیره شود.

$$i_t = \sigma(W_i[h_{t-1}, x_t] + b_i)$$

- دروازه خروجی[2]: تصمیم می‌گیرد خروجی واحد کوتاه‌نگر بلندحافظه بر اساس وضعیت سلول چه باشد.

$$o_t = \sigma(W_o[h_{t-1}, x_t] + b_o)$$

خروجی h_t بر اساس وضعیت سلول C_t و دروازه خروجی o_t تعیین می‌شود

$$h_t = o_t tanh(C_t)$$

وضعیت سلول بر اساس دروازه‌های فراموشی و ورودی به‌صورت زیر به‌روز می‌شود

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \hat{C}_t$$

که در آن C_t وضعیت حافظه سلول، i_t خروجی در زمان t است و $\hat{C}_t$ وضعیت کاندیدای سلول است (اطلاعات جدید).

۴- برآورد مدل

در این بخش، به تحلیل نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه چندلایه[3] در قالب چهار پیکربندی مجزا پرداخته می‌شود؛ مدل نخست ترکیبی از متغیرهای متعارف اقتصادی و شاخص‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات[4] (فاوا) به‌عنوان نمایندگان اقتصاد دیجیتال، را شامل می‌شود، مدل دوم صرفا مبتنی بر متغیرهای فاوا، یعنی اقتصاد دیجیتال است، مدل سوم صرفا بر پایه متغیرهای متعارف اقتصاد، نیروی کار وسرمایه می‌باشد و مدل چهارم تلاشی است برای بهینه‌سازی ترکیب متغیرهای ورودی از طریق کاهش تعداد متغیرهای فاوا از ۶ به ۳، بر پایه همبستگی بالای این متغیرها با تولید ناخالص داخلی. هدف اصلی این تحلیل، پاسخ به پرسش محوری پژوهش مبنی بر نقش و اثرگذاری اقتصاد دیجیتال بر عملکرد اقتصاد کلان کشور است. در همین راستا، عملکرد مدل‌ها در دو کشور ایران و مالزی با سطوح متفاوت بلوغ دیجیتال مورد واکاوی قرار گرفته است. در این فصل، ضمن تحلیل روند همگرایی توابع هزینه و ارزیابی دقت پیش‌بینی بر اساس آستانه تعیین‌شده، به مقایسه توان تبیینی هر یک از مدل‌ها پرداخته می‌شود. یافته‌های حاصل، نه تنها به اعتبارسنجی قابلیت مدل‌های یادگیری عمیق در حوزه اقتصاد کلان کمک می‌کنند، بلکه از منظر سیاست‌گذاری نیز، شواهدی معنادار برای طراحی مسیر گذار به سوی اقتصاد دیجیتال فراهم می‌آورند.

در این بخش نخست به بررسی همبستگی میان شاخص‌های اقتصادی و شاخص‌های مرتبط با فناوری اطلاعات و ارتباطات در دو کشور ایران و مالزی می‌پردازدیم. با بهره‌گیری از نمودارهای همبستگی (شکل ۱ و شکل ۲)، قدرت و جهت روابط میان متغیرهای کلیدی اقتصادی و دیجیتال به‌صورت بصری تحلیل شده است. هدف، ارزیابی میزان یکپارچگی زیرساخت‌های دیجیتال با عملکرد اقتصادی در این دو کشور و آشکارسازی نقاط قوت، ضعف و تفاوت‌های ساختاری است.

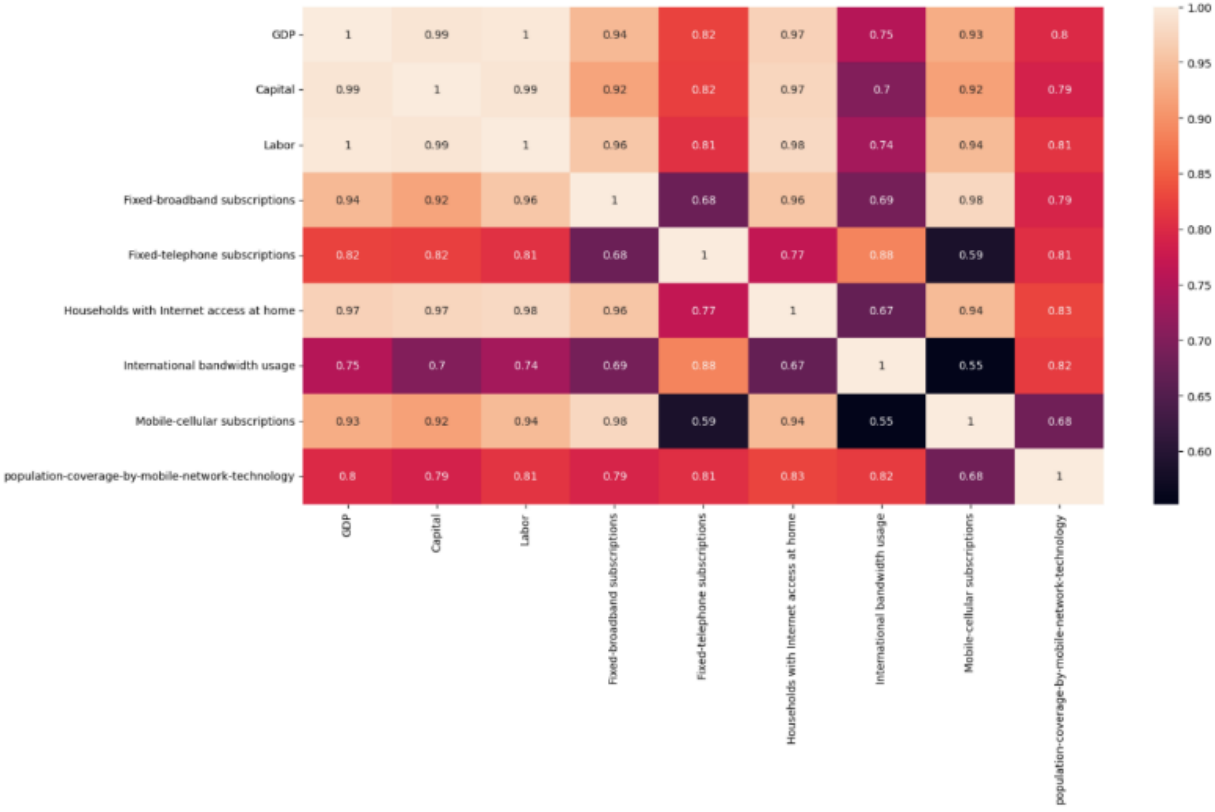
در ایران، همبستگی بین شاخص‌های اقتصادی از جمله تولید ناخالص داخلی، سرمایه و نیروی کار بسیار بالا و قابل پیش‌بینی است (۰.۹۵). از منظر زیرساخت دیجیتال، بیشترین همبستگی با شاخص‌های اقتصادی متعلق به خانوارهای دارای اینترنت در منزل (۰.۹ تا ۰.۹۲) و اشتراک پهن‌باند ثابت (۰.۸۶ تا ۰.۹۰) است. در مقابل، استفاده از پهنای باند بین‌المللی همبستگی ضعیف‌تری نشان می‌دهد (با سرمایه ۰.۶۱، با تلفن ثابت ۰.۴۴ و با پوشش جمعیتی شبکه‌های موبایل ۰.۴۲). این نتایج گویای یکپارچگی داخلی قوی اما محدودیت در تعاملات بین‌المللی دیجیتال است که ممکن است ناشی از تحریم‌ها، چالش‌های فنی یا ضعف در سرمایه‌گذاری برون‌مرزی باشد. در مالزی، همبستگی بین تولید ناخالص داخلی، سرمایه و نیروی کار نزدیک به کامل است (۰.۹۹ تا ۱.۰۰)، که نشان‌دهنده یک ساختار اقتصادی منسجم و هماهنگ است. از منظر زیرساخت دیجیتال، همبستگی بالایی بین شاخص‌های اقتصاد دیجیتال و اقتصاد مشاهده می‌شود. خانوارهای دارای اینترنت در منزل، پهن‌باند ثابت (۰.۹۴ تا ۰.۹۸) و اشتراک موبایل و نیروی کار (۰.۹۴) و پهن‌باند و نیروی کار (۰.۹۶). اگرچه همبستگی بین تلفن ثابت و استفاده از پهنای باند بین‌المللی با سایر شاخص‌ها پایین‌تر است، ساختار دیجیتال مالزی بیشتر به سمت فناوری موبایل‌محور و سیاست‌های دیجیتالی پیشرفته گرایش دارد.

نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که:

- ایران دارای زیرساخت دیجیتال با تمرکز بر ارتباطات ثابت و دسترسی خانگی به اینترنت است، اما در همگرایی بین‌المللی با چالش مواجه است.
- مالزی یک اقتصاد دیجیتال پیشروتر، موبایل‌محور و هماهنگ با رشد اقتصادی دارد که نشان‌دهنده موفقیت در پیاده‌سازی سیاست‌های تحول دیجیتال است.

[1] Input gate
[2] Output gate
[3] Multi-Level LSTM: Multi-Level Long Short-term Memory
[4] ICT: Information and Communications Technology

شکل ۱. ماتریس همبستگی متغیرهای اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال با تولید ناخالص داخلی ایران



شکل ۲. ماتریس همبستگی متغیرهای اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال با تولید ناخالص داخلی مالزی

از منظر سیاست‌گذاری، ایران می‌تواند با تقویت اتصال بین‌المللی، ارتقای شبکه‌های همراه و گذار به خدمات موبایلی، یکپارچگی دیجیتال خود را افزایش دهد و سپس با تداوم توسعه زیرساخت‌های مبتنی بر پهنای باند و گسترش دسترسی در مناطق کمتر توسعه‌یافته، مزیت‌های رقابتی خود را حفظ کند.

۴-۱- پردازش داده‌ها و یادگیری الگو

۴-۱-۱- پیش‌پردازش داده‌ها

مدیریت داده‌های گمشده: داده‌های گمشده در مجموعه‌های داده بزرگ رایج است. این داده‌ها می‌توانند با استفاده از تکنیک‌هایی مانند پر کردن پیش‌رو/عقب یا روش‌های جبرانی مدیریت شوند.

نرمال‌سازی[1]: تمام متغیرها به‌کمک رابطه زیر، نرمال‌سازی می‌شوند تا در مقیاس یکسانی قرار گیرند تا از تسلط یک متغیر بر بقیه به‌دلیل تفاوت مقیاس‌ها جلوگیری شود.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

مهندسی ویژگی‌ها[2]: ایجاد متغیرهای وقفه‌ای و میانگین‌های متحرک می‌تواند به مدل در شبیه‌سازی الگوهای زمانی کمک کند.

جدول ۱. مقایسه همبستگی متغیرهای اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال با تولید ناخالص داخلی ایران و مالزی

جفت متغیر	ایران	مالزی	تحلیل تطبیقی
تولید ناخالص داخلی و نیروی کار	٪۹۵	۱۰۰٪	ارتباط قوی‌تر در مالزی
تولید ناخالص داخلی و موجودی سرمایه	٪۹۴	۹۹٪	همبستگی کامل در مالزی
تولید ناخالص داخلی و اینترنت در منزل	٪۹۰	٪۹۷	ادغام بالاتر در مالزی
پهن‌باند و اینترنت در منزل	٪۹۹	٪۹۶	قوی در هر دو کشور
پهنای باند و سرمایه	٪۶۱	٪۷۰	اندکی بهتر در مالزی
پهنای باند و موبایل	٪۸۶	٪۵۵	یکپارچگی بهتر در ایران
تلفن ثابت و اینترنت در منزل	٪۷۸	٪۷۷	شباهت ساختاری
پوشش موبایل و پهنای باند	٪۴۲	٪۸۲	همسویی بسیار بهتر در مالزی

[1] Normalization
[2] Feature Engineering

۴-۱-۲- یادگیری الگو

فرآیند یادگیری شامل تنظیم وزن‌ها در الگو برای کمینه کردن خطای پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. الگو از طریق تکرار در مجموعه داده‌ها، آموزش داده می‌شود و وزن‌ها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تنظیم می‌شود. فرآیند به شرح زیر است:

۱. گام نخست، پیش‌نگرش[3]: داده‌های ورودی از طریق شبکه عبور کرده و پیش‌بینی‌هایی تولید می‌شود.
۲. گام دوم، محاسبه خطا[4]: الگو پیش‌بینی‌های خود را با مقادیر واقعی (رشداقتصادی) مقایسه می‌کند و از یک تابع هزینه استفاده می‌کند. در این پژوهش، به‌کارگیری تابع هزینه با معیار خطای مطلق میانگین[5]، به دلیل مقاومت آن نسبت به داده‌های پرت و سادگی تفسیر، انتخاب شده است. این تابع از لحاظ واحد، عملکرد مدل را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کند.

تابع هزینه معیاری است برای اندازه‌گیری اینکه پیش‌بینی‌های مدل چقدر با مقادیر واقعی مطابقت دارند. برای مسائل رگرسیونی (پیش‌بینی مقادیر پیوسته)، یک تابع هزینه معمول، خطای مربع میانگین[6] است. با این حال، در برخی از مسائل، خطای مطلق میانگین[7] گزینه بهتری است. خطای مطلق میانگین با محاسبه میانگین اختلافات مطلق بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |y_i - \hat{y}_i|$$

که در آن: y_i مقدار واقعی است، $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی‌شده است و n تعداد کل داده‌ها است

خطای مطلق میانگین در مسائل پیش‌بینی که در آن‌ها مقادیر پیوسته (مانند پیش‌بینی وضعیت آب و هوا) پیش‌بینی می‌شود.

۳. گام سوم، پس‌نگرش[8]: الگو گرادیان تابع هزینه را نسبت به هر وزن محاسبه کرده و وزن‌ها را با توجه آن به‌روز می‌کند. در این گام از بهینه‌ساز آدام[9] که با بهره‌گیری از ایده‌های گشتاور نخست و دوم گرادیان، نرخ یادگیری تطبیقی را برای هر پارامتر

[3] Forward pass
[4] Loss Calculation
[5] MAE: Mean Absolute Error
[6] MSE: Mean Squared Error
[7] MAE: Mean Absolute Error
[8] Backward pass
[9] ADAM: Adaptive Moment Estimation

فراهم می‌کند، استفاده خواهیم کرد. به‌روزرسانی‌های الگوریتمی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که از تغییرات شدید و ناگهانی در گرادیان‌ها جلوگیری کرده و در نتیجه همگرایی پایدارتری را در فرایند آموزش فراهم می‌سازند.

عملکرد الگو بستگی به انتخاب ابرپارامترهای گوناگون، از جمله تعداد لایه‌ها و تعداد نورون‌ها در هر لایه، نرخ یادگیری، اندازه دسته، توابع فعال‌سازی و نوع بهینه‌ساز دارد. تنظیم ابرپارامترها از طریق جست‌وجوی شبکه‌ای یا جست‌وجوی تصادفی همراه با اعتبارسنجی متقابل برای یافتن تنظیمات بهینه انجام می‌شود.

در قلب این تحلیل، بررسی رفتار توابع هزینه و به‌ویژه همگرایی آن‌ها در طول فرایند آموزش، به‌منزله معیاری بنیادین برای سنجش کیفیت یادگیری و قابلیت تعمیم مدل‌ها به داده‌های دیده‌نشده تلقی می‌شود. همگرایی تابع هزینه بدین معناست که در طول دوره‌های آموزش، مدل به‌تدریج به نقطه‌ای می‌رسد که در آن مقادیر خطای پیش‌بینی (هم در داده‌های آموزشی و هم در داده‌های اعتبارسنجی) به کمینه‌ای پایدار می‌رسند.

۴-۱-۳- مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه طراحی‌شده در پیش‌بینی تولید ناخالص داخلی

در راستای تحلیل اثر اقتصاد دیجیتال بر عملکرد اقتصاد کلان، دو مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه چندلایه طراحی شد. در مدل نخست، متغیرهای کلیدی تابع تولید متعارف شامل سرمایه فیزیکی و نیروی کار در کنار شش شاخص منتخب از زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. در مقابل، مدل دوم صرفا بر پایه شاخص‌های فاوا شکل گرفت تا اثر خالص فناوری دیجیتال بر تولید ناخالص داخلی کشورها بررسی شود. این دو مدل به‌صورت جداگانه برای ایران و مالزی اجرا شدند تا با مقایسه دو ساختار اقتصادی با سطوح متفاوت بلوغ دیجیتال، الگوی مشخصی از تاثیر فناوری در سطح کلان شناسایی شود.

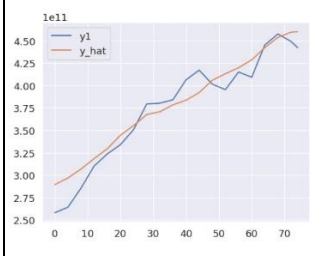
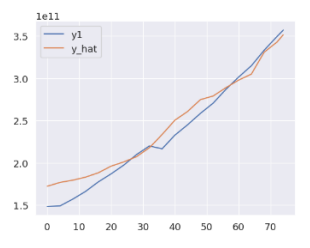
در سال‌های اخیر، ادغام روزافزون فناوری‌های دیجیتال با ساختارهای اقتصادی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، ضرورت بازنگری در مبانی نظری مدل‌سازی رشد اقتصادی را ایجاب کرده است. در این میان، مدل‌های متعارف مبتنی بر تابع تولید متعارف – متشکل از سرمایه و نیروی کار – قادر به درک پیچیدگی‌های نوظهور اقتصاد دیجیتال نیستند. در این پژوهش، به منظور پاسخ به پرسش محوری «اقتصاد دیجیتال چگونه بر اقتصاد کلان کشور اثرگذار است؟»، از الگوریتم‌های یادگیری عمیق و مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه استفاده شده است. هدف، بررسی قدرت تبیینی شاخص‌های فاوا بر تولید ناخالص داخلی و مقایسه آن با متغیرهای متعارف اقتصاد کلان است.

چهار پیکربندی مجزا از مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه طراحی و آموزش داده شد:

- مدل نخست (اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال): سرمایه، نیروی کار، و شش شاخص فاوا به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند.
- مدل دوم (فقط اقتصاد دیجیتال): صرفا شاخص‌های فاوا به‌عنوان ورودی‌ها استفاده شده‌اند تا اثر خالص دیجیتال‌سازی بر تولید بررسی شود.
- مدل سوم (فقط اقتصاد متعارف): صرفا شاخص‌های اقتصاد متعارف به‌عنوان ورودی‌ها استفاده شده‌اند تا اثر خالص متغیرهای کلیدی اقتصادی را بر تولید بررسی کند.
- مدل چهارم (اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال): مدل چهارم تلاشی است برای بهینه‌سازی ترکیب متغیرهای ورودی از طریق کاهش تعداد متغیرهای فاوا از ۶ به ۳، بر پایه همبستگی بالای این متغیرها با تولید ناخالص داخلی.

۵- یافته‌های تحلیلی مدل‌ها

مدل‌ها به‌صورت جداگانه برای ایران و مالزی، به‌عنوان دو اقتصاد با سطوح متفاوت بلوغ دیجیتال، برآورد گردیده‌اند. مدل نخست در ایران توانسته است روند صعودی بلندمدت تولید ناخالص داخلی را با دقت مناسبی بازسازی کند. مدل به‌رغم وجود نوسانات کوتاه‌مدت در داده‌های واقعی، توانسته است مسیر کلی را دنبال کرده و رفتار کلان اقتصادی کشور را شبیه‌سازی نماید. این عملکرد، اثربخشی ترکیب متغیرهای اقتصاد متعارف و اقتصاد دیجیتال را در تبیین رفتار تولید ناخالص داخلی ایران تایید می‌کند.

ایران	مالزی
	

شکل ۳. داده‌های واقعی تولید ناخالص داخلی ایران و پیش‌بینی آن به‌کمک مدل نخست

نکته مهم آن است که هموار بودن پیش‌بینی‌ها نسبت به داده‌های واقعی، ویژگی رایج مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه است و نشان از توانایی آن در فیلتر کردن نویزهای کوتاه‌مدت دارد. با این حال، از منظر اقتصادی، این مدل تاکید می‌کند که در اقتصاد ایران، فناوری اطلاعات به‌عنوان یک مکمل و نه جایگزین سرمایه و نیروی کار عمل می‌کند. در مالزی، مدل عملکردی بهتر دارد. پیش‌بینی‌های تولید ناخالص داخلی تقریبا به‌طور کامل بر داده‌های واقعی منطبق‌اند، که نشان‌دهنده کیفیت بالای داده‌ها و قدرت بالای سیگنال‌دهی شاخص‌های اقتصاد دیجیتال است. این نتیجه با ساختار اقتصادی مالزی که دیجیتال‌محورتر از ایران است، سازگار است. از منظر سیاست‌گذاری، این یافته‌ها نشان می‌دهد که در اقتصادهایی با بلوغ دیجیتال بالا، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات می‌تواند به اندازه سرمایه فیزیکی و نیروی کار در تحریک رشد اقتصادی نقش داشته باشد.

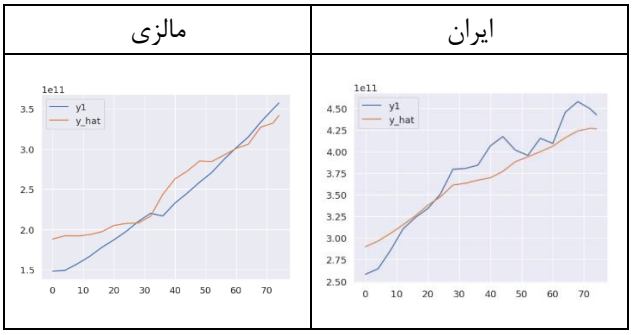
پس از اجرای موفق مدل نخست که شامل ترکیبی از متغیرهای اقتصادی (سرمایه و نیروی کار) و شاخص‌های فاوا بود، اکنون برای اینکه اثر خالص اقتصاد دیجیتال بر اقتصاد را واکاوی نماییم، به اجرای مدل دوم می‌پردازیم که تنها از شاخص‌های اقتصاد دیجیتال استفاده می‌کند. در مدل دوم، متغیرهای متعارف اقتصادی سرمایه و نیروی کار حذف شده‌اند تا تنها تاثیر متغیرهای فاوا بررسی شود. هدف این است که کارایی زیرساخت‌های دیجیتال در تبیین تغییرات تولید ناخالص داخلی مورد ارزیابی قرار گیرد و عملکرد دو مدل در دو کشور ایران و مالزی با یکدیگر مقایسه شود.

مدل دوم در ایران گرچه توانسته است روند کلی تولید ناخالص داخلی را بازتاب دهد، اما دچار کم‌برآوردی است و واکنش کندی نسبت به تغییرات شدید دارد. این یافته به وضوح نشان می‌دهد که اقتصاد دیجیتال به‌تنهایی قادر به توضیح نوسانات کلان در ایران نیست و همچنان نیازمند همراهی عوامل متعارف تولید است (شکل ۴).

از منظر سیاست‌گذاری، این پیام مهم است: تا زمانی که بسترهای فیزیکی و انسانی لازم توسعه نیافته‌اند، دیجیتال‌سازی به تنهایی قادر به خلق ارزش اقتصادی بالا نخواهد بود. در مالزی، مدل دوم عملکرد بسیار بهتری دارد و به داده‌های واقعی نزدیک می‌شود. این موضوع حاکی از آن است که در ساختار اقتصادی مالزی، اقتصاد دیجیتال توانسته جایگزینی تدریجی برای متغیرهای متعارف فراهم آورد و نقش مستقلی در تحریک تولید ناخالص داخلی ایفا کند. از منظر تحلیلی، مدل مالزی گواهی بر این است که با گذر از مراحل مقدماتی توسعه، اقتصاد دیجیتال می‌تواند به یک پیشران کلیدی رشد تبدیل شود.

در گام بعدی، عملکرد مدل سوم که تنها شامل سرمایه و نیروی کار به‌عنوان متغیرهای مستقل است، بررسی می‌شود. در این گام برای اینکه اثر خالص متغیرهای کلیدی و متعارف اثرگذار بر اقتصاد را واکاوی نماییم، به اجرای مدل سوم می‌پردازیم که تنها از متغیرهای اقتصاد متعارف استفاده می‌کند. هدف این است که کارایی زیرساخت‌های کلیدی اقتصادی را در تبیین تغییرات تولید ناخالص داخلی مورد ارزیابی قرار دهیم و عملکرد چهار مدل در دو کشور ایران و مالزی با یکدیگر مقایسه شود. این مدل به‌عنوان خط پایه‌ای برای سنجش میزان اثرگذاری اقتصاد دیجیتال، اهمیت تحلیلی بالایی دارد چرا که سقف توان تبیین متغیرهای متعارف را مشخص می‌کند.

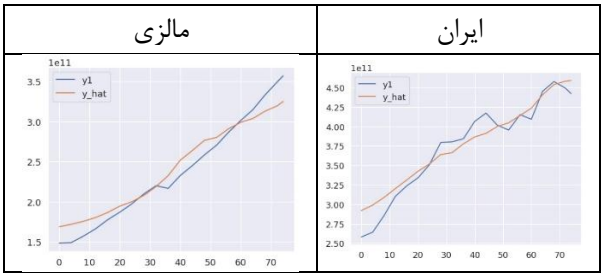
در ایران مدل سوم به‌خوبی توانسته است روند کلی و صعودی تولید ناخالص داخلی را شناسایی کند و به‌خوبی شیب و ساختار کلی تولید ناخالص داخلی را دنبال کرده است.



شکل ۴. داده‌های واقعی تولید ناخالص داخلی ایران و پیش‌بینی آن به‌کمک مدل دوم

شکل ۵. داده‌های واقعی تولید ناخالص داخلی ایران و پیش‌بینی آن به‌کمک مدل سوم

عملکرد مدل سوم در مالزی نسبت به ایران دقیق‌تر است و شکاف کمتری را میان داده‌های واقعی و برآوردی شاهد هستیم. این بدان‌معنا نیست که مدل سوم برای ایران از توضیح‌دهندگی خوبی برخوردار نیست چراکه ساختار تولید ناخالص داخلی در هر دو کشور، بنابر مدل سوم، به‌خوبی به دست آمده است. مدل چهارم تلاشی است برای بهینه‌سازی ترکیب متغیرهای ورودی از طریق کاهش تعداد متغیرهای فاوا از ۶ به ۳، بر پایه همبستگی بالای این متغیرها با تولید ناخالص داخلی. این سه متغیر عبارت‌اند از: اشتراک اینترنت پهن‌باند ثابت، درصد خانوارهای دارای اینترنت در منزل و تعداد اشتراک‌های تلفن همراه. در کنار این سه متغیر دیجیتال، دو متغیر سنتی اقتصادی یعنی سرمایه و نیروی کار نیز در مدل لحاظ شده‌اند. بنابراین، مدل چهارم ترکیبی بهینه‌شده از متغیرهای متعارف و اقتصاد دیجیتال است که با هدف کاهش پیچیدگی مدل و افزایش تمرکز بر شاخص‌های پرقدرت طراحی شده است.



شکل ۶. داده‌های واقعی تولید ناخالص داخلی ایران و پیش‌بینی آن به‌کمک مدل چهارم

مدل به‌خوبی روند کلی تولید ناخالص داخلی ایران را دنبال کرده است. اگرچه برخی نوسانات جزئی نسبت به مدل ۱ و ۳ وجود دارد، ولی فاصله بین خط پیش‌بینی‌شده و مقدار واقعی در اکثر بازه‌ها کوچک و منظم است. مدل، نقاط اوج و فرود تولید ناخالص داخلی را با درجه دقت مناسبی بازتولید کرده است. این عملکرد نسبتا قوی با استفاده از تنها سه متغیر اقتصاد دیجیتال، بیانگر سهم اندک متغیرهای اقتصاد دیجیتال در برابر متغیرهای اقتصاد متعارف بوده و همچنین از دیگرسو کیفیت بالای انتخاب متغیرهای دیجیتال و توان تبیین آن‌ها را نشان می‌دهد.

در مالزی نیز مدل چهارم عملکرد بسیار قابل قبولی دارد. روند پیش‌بینی‌شده تقریبا منطبق بر مسیر واقعی تولید ناخالص داخلی است. قدرت مدل در بازتولید رشد مداوم اقتصاد مالزی نشان می‌دهد که متغیرهای اقتصاد دیجیتال می‌توانند به‌عنوان نقش مکمل در اقتصاد به ایفای نقش بپردازند.

مدل چهارم با هدف ساده‌سازی ورودی‌ها و تمرکز بر متغیرهای دیجیتال با بیشترین همبستگی با تولید ناخالص داخلی طراحی شد؛ به این معنا که به‌جای استفاده از شش شاخص اقتصاد دیجیتال، تنها سه متغیر با بالاترین ضریب همبستگی وارد مدل شدند. با این حال، نتایج مدل چهارم تفاوت قابل توجهی با نتایج مدل نخست که از ترکیب کامل متغیرهای متعارف و دیجیتال استفاده می‌کرد، نشان نداد. دلیل این مسئله را می‌توان در سه سطح تبیین کرد:

- وجود همپوشانی اطلاعاتی میان متغیرهای اقتصاد دیجیتال: بسیاری از متغیرهای فاوا دارای همبستگی درون‌گروهی بالایی هستند؛ به‌عبارت دیگر، متغیرهایی مانند پهنای باند بین‌المللی، تلفن ثابت یا پوشش جمعیتی شبکه موبایل، اغلب همان سیگنالی را منتقل می‌کنند که متغیرهایی نظیر اشتراک اینترنت و دسترسی خانگی به اینترنت منتقل می‌کنند. در نتیجه، حذف برخی از آن‌ها منجر به از دست دادن اطلاعات متمایز نشد و مدل همچنان قدرت پیش‌بینی خود را حفظ کرد.
- قابلیت استخراج ویژگی‌ها توسط کوتاه‌نگر بلندمدت: الگوریتم‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه به‌دلیل ساختار شبکه‌ای و حافظه‌دار خود، قادرند ویژگی‌های کلیدی را حتی از ورودی‌های محدود استخراج کنند. بنابراین، اگرچه تعداد متغیرهای دیجیتال کاهش یافته است، اما مدل همچنان توانسته الگوهای دینامیک موجود در همان سه شاخص را به‌خوبی یاد بگیرد و بازتولید کند.
- انتخاب مؤثرترین متغیرها از نظر آماری و نظری: سه متغیر انتخاب‌شده در مدل چهارم نه‌تنها همبستگی بالایی با تولید ناخالص داخلی داشتند، بلکه از منظر نظری نیز نماینده ابعاد کلیدی دیجیتالی‌شدن (دسترسی، اتصال، و نفوذ) هستند. در نتیجه، حتی با کاهش ابعاد داده، مدل از هسته اصلی سیگنال اقتصادی موجود در فاوا بهره‌مند بوده است.

جدول ۲ به‌طور خلاصه عملکرد هر چهار مدل را برای دو کشور ایران و مالزی به‌خوبی تشریح می‌کند. جدول نشان می‌دهد که نقش اقتصاد دیجیتال در اقتصاد کلان، تابعی از سطح توسعه و بلوغ دیجیتال هر کشور است.

سرمایه و نیروی کار به‌تنهایی قادرند روند کلی تولید ناخالص داخلی را بازنمایی می‌کنند. در هر دو کشور، افزودن شاخص‌های فاوا، دقت مدل را افزایش می‌دهد که امری طبیعی به‌لحاظ فنی در علم داده است. این مورد به این دلیل رخ می‌دهد که متغیرهای توضیحی بیشتری به مدل افزوده شده است. ولی اگر مدل سوم و چهارم را به‌عنوان معیاری برای سنجش میزان اثرگذاری اقتصاد دیجیتال در نظر بگیریم، متوجه خواهیم شد که در هر دو کشور متغیرهای

متعارف و کلیدی اقتصاد کلان برای توضیح‌دهندگی تولید ناخالص داخلی از اهمیت درخور نگرشی برخوردارند. تحلیل جداگانه برای هر کشور نشان می‌دهد در ایران، فاوا نقش مکمل دارد و تا رسیدن به سطحی از بلوغ دیجیتال، نمی‌توان انتظار داشت که دیجیتال‌سازی به تنهایی موتور رشد اقتصادی باشد. در مقابل، مالزی نشان داده است که در اقتصادهای دیجیتالی‌شده، اقتصاد دیجیتال می‌تواند نقش اساسی در شکل‌دهی مسیر رشد ایفا کند. بنابراین، توصیه‌های سیاستی کلیدی عبارتند از:

- طراحی مدل‌های اقتصادی باید متناسب با مرحله بلوغ دیجیتال صورت گیرد. یک نسخه واحد برای همه کشورها پاسخ‌گو نیست.

جدول ۲. تحلیل تطبیقی میان چهار مدل

کشور	ویژگی	مدل نخست	مدل دوم	مدل سوم	مدل چهارم
ایران	متغیرها	اقتصاد متعارف + اقتصاد دیجیتال	اقتصاد دیجیتال	اقتصاد متعارف	اقتصاد متعارف + اقتصاد دیجیتال
	برازش مدل	برازش خوب با انحراف‌های جزئی	برازش ضعیف غیر قابل قبول	برازش خوب با انحراف‌ها ی جزئی	برازش خوب با انحراف‌های جزئی
	روند بلندمدت	به‌دقت دنبال شده است	غیر قابل قبول	به‌دقت دنبال شده است	به‌دقت دنبال شده است
	زیرساخت اقتصاد دیجیتال	تاثیر نسبتا ضعیف			
مالزی	متغیرها	اقتصاد متعارف + اقتصاد دیجیتال	اقتصاد دیجیتال	اقتصاد متعارف	اقتصاد متعارف + اقتصاد دیجیتال
	برازش مدل	برازش خوب با انحراف‌های جزئی	برازش ضعیف‌تر نسبت به مدل نخست	برازش خوب با انحراف‌ها ی جزئی	برازش خوب با انحراف‌های جزئی
	روند بلندمدت	به‌دقت دنبال شده است	با دقت ضعیف‌تر نسبت به مدل نخست	به‌دقت دنبال شده است	به‌دقت دنبال شده است
	زیرساخت اقتصاد دیجیتال	تاثیر قوی نسبت به ایران			

- از آنجا که توسعه اقتصاد دیجیتال در سیاست‌های توسعه‌ای به‌عنوان مکمل تلقی شود، نه جایگزین، ایران بایستی در فاز نخست به سرمایه‌گذاری همزمان بر زیرساخت‌های دیجیتال در کنار تقویت سرمایه انسانی/فیزیکی تمرکز کند. در فاز دوم پس از بلوغ اقتصاد دیجیتال در اقتصاد، بایستی با تداوم سیاست‌های دیجیتالی‌سازی، آن را تبدیل به پیشرانی مستقل برای رشد در نظر بگیرد. تمرکز بر کیفیت دسترسی، امنیت سایبری و نوآوری دیجیتال باید در اولویت قرار گیرد.

۵-۱-۱- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در چارچوب پاسخ به پرسش اصلی این پژوهش مبنی بر واکاوی نقش اقتصاد دیجیتال در شکل‌دهی به متغیرهای اقتصاد کلان کشور، تحلیل عملکرد مدل‌های یادگیری عمیق مورد استفاده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اکنون می‌خواهیم ببینیم آیا خطای یادگیری مدل‌های به‌کاررفته در طول زمان کاهش یافته و همگرا می‌شود یا خیر؟ اگر توابع هزینه کمینه شده و مقادیر آن‌ها همگرا شود بدان‌معناست که مدل از روند یادگیری درستی برخوردار بوده و نتایج مدل قابل اتکا می‌باشد. تحلیل روند همگرایی توابع هزینه، نه‌تنها از منظر یادگیری ماشین، بلکه به‌عنوان سنجه‌ای کلیدی برای قابلیت اتکای اقتصادی مدل‌ها تلقی می‌شود. در غیاب همگرایی، نمی‌توان به خروجی مدل‌ها اعتماد کرد، چرا که پیش‌بینی‌ها فاقد ثبات و دقت خواهند بود. از سوی دیگر، همگرایی موفق، خصوصا در داده‌های اعتبارسنجی، بیانگر توانایی مدل در تعریف روابط علی و پایدار میان متغیرهای اقتصاد دیجیتال و تولید ناخالص داخلی است.

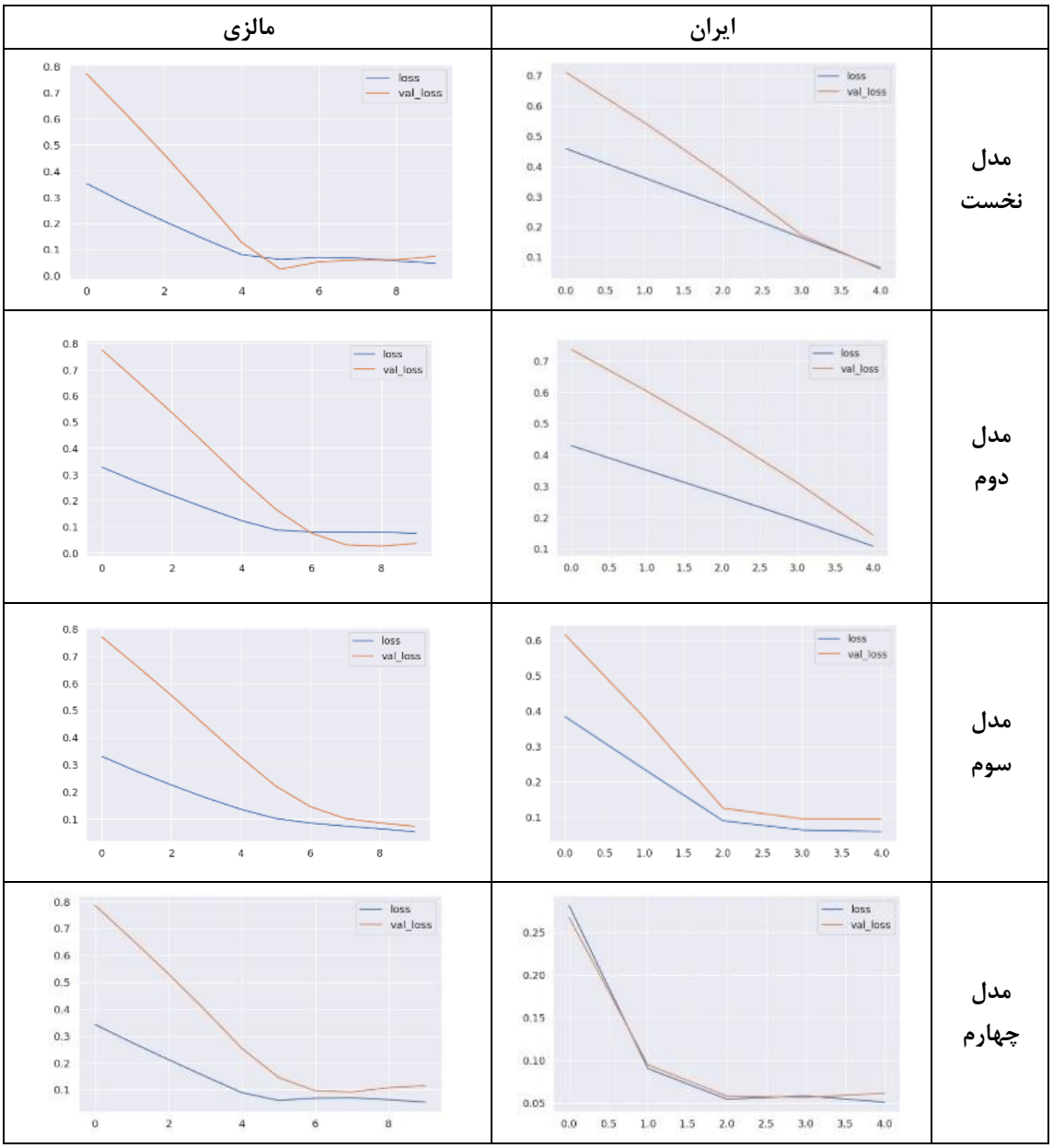
تحلیل همگرایی توابع هزینه

تحلیل همگرایی تابع زیان در مدل‌های یادگیری عمیق، به‌ویژه شبکه‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه، نه‌تنها از منظر تجربی بلکه از نظر ریاضی و نظری نیز اهمیت فراوانی دارد. هدف این بخش آن است که نشان دهد چرا همگرایی تابع زیان، صرفا یک نمودار بصری نبوده، بلکه از منظر ریاضی، مبنای معتبری برای ارزیابی کیفیت یادگیری، پایداری مدل و اتکاپذیری نتایج پیش‌بینی به شمار می‌رود. همگرایی تابع زیان، تنها یک نمودار بصری نیست، بلکه شرط بنیادی برای اتکاپذیری مدل و استفاده از آن در تحلیل‌های کلان اقتصادی است. تحلیل رفتار همگرایی نمودارهای تغییرات خطای آموزش[1] و خطای اعتبارسنجی[2] برای مدل‌های کوتاه‌نگر بلندحافظه برآوردشده در هر دو مدل حاکی از یادگیری تدریجی و پایدار ساختارهای داده‌ای بود. در مدل‌نخست، برای هر دو کشور، تابع هزینه آموزش و اعتبارسنجی

[1] Loss function

[2] Value of Loss function

کاهش یافته و به مقادیر پایینی همگرا شد که نشانه‌ای از یادگیری موثر و ساختاردهی درست مدل است. در مدل دوم، گرچه همگرایی در مالزی با سرعت و پایداری بالایی رخ داد، در ایران همگرایی رخ نداده. این نتایج تاییدمی‌کند که نقش اقتصاد دیجیتال در کشورهایی با زیرساخت‌های دیجیتال پیشرفته، قابلیت پیش‌بینی اقتصادی بالاتری دارد و می‌توان از آن در مدل‌سازی کلان استفاده کرد.



شکل ۷. تحلیل همگرایی توابع هزینه

همان‌گونه که قابل مشاهده است در ایران، به‌هنگام برازش مدل دوم، همگرایی رخ نداده که نشان می‌دهد حذف متغیرهای کلیدی متعارف باعث کاهش قدرت تبیین مدل شده است. از دیگرسو در مالزی، همگرایی تقریبا کامل و پایدار بوده است. این نتیجه حکایت از آن دارد که زیرساخت‌های دیجیتال در مالزی قادرند به‌تنهایی بخشی از پویایی تولید ناخالص داخلی را تبیین کنند. این همگرایی در مدل‌ها، از یک سو بیانگر این است که فرایند یادگیری به‌طور موثری الگوهای موجود در داده‌های اقتصادی و دیجیتال را استخراج نموده و مدل به نقطه بهینه رسیده است. از سوی دیگر، همگرایی ثابت نشان‌دهنده‌ی توانمندی مدل در کاهش احتمال بیش‌برازش بوده و به تعمیم‌پذیری آن اطمینان می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه تطبیقی همگرایی توابع هزینه

همگرایی		ایران	مالزی
مدل نخست	وضعیت همگرایی	همگرا	همگرا
	خطای اعتبارسنجی	۰٫۰۷۵	۰٫۰۵
	سرعت همگرایی	در ۳ دوره	در ۴ دوره
	پایداری روند یادگیری	پایدار	پایدار
مدل دوم	وضعیت همگرایی	ناهمگرا	همگرا
	خطای اعتبارسنجی	بالای ۱۰ درصد	۰٫۰۹
	سرعت همگرایی	-	در ۵ دوره
	پایداری روند یادگیری	ناپایدار	پایدار
مدل سوم	وضعیت همگرایی	همگرا	همگرا
	خطای اعتبارسنجی	۰٫۹۵	۰٫۰۸
	سرعت همگرایی	در ۳ دوره	در ۵ دوره
	پایداری روند یادگیری	پایدار	پایدار
مدل چهارم	وضعیت همگرایی	همگرا	همگرا
	خطای اعتبارسنجی	۰٫۰۴	۰٫۱
	سرعت همگرایی	در ۳ دوره	در ۵ دوره
	پایداری روند یادگیری	پایدار	پایدار

در مدل‌های یادگیری عمیق مانند کوتاه‌نگرهای بلندحافظه، تعیین تعداد بهینه دوره‌های آموزشی برای جلوگیری از بیش‌برازش اهمیت دارد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از الگوریتم توقف زودهنگام، برای ایران ۵ دوره و برای مالزی ۱۰ دوره بهینه تشخیص داده شد. این تفاوت ناشی از چهار عامل است: (الف) ساختار داده‌ها؛ اقتصاد ایران ساده‌تر و کمتر دیجیتالی‌شده و اقتصاد مالزی پیچیده‌تر و غنی‌تر است. (ب) نسبت سیگنال به نویز؛ داده‌های ایران به‌دلیل شوک‌های اقتصادی ناپایدارترند و مدل زودتر دچار بیش‌برازش می‌شود. (پ) عملکرد الگوریتم توقف زودهنگام که مانع ادامه آموزش پس از تثبیت زیان اعتبارسنجی می‌شود. (ت) تفاوت در رفتار الگوریتم آدام؛ مدل ایران به‌دلیل نوسانات بیشتر گرادیان، سریع‌تر ولی با ریسک بیش‌برازش همگرا می‌شود، در حالی که مدل مالزی با آهنگ یکنواخت‌تر و دقیق‌تر آموزش می‌بینند.

تحلیل دقت پیش‌بینی بر اساس آستانه خطا

برای ارزیابی عملکرد پیش‌بینی مدل کوتاه‌نگر بلندحافظه، از شاخص دقت[1] بهره می‌جوییم؛ رویکردی که به‌ویژه در کاربردهایی که انحرافات جزئی از مقادیر واقعی از نظر اقتصادی بی‌اهمیت تلقی می‌شوند، مفید است. به‌طور ویژه، با تعریف تابع یک تابع نشانگر[2]، $I_{[Error_t \le \varepsilon]}$، پیش‌بینی زمانی دقیق در نظر گرفته می‌شود که خطای قدر مطلق آن در محدوده آستانه از پیش تعیین‌شده‌ای قرار گیرد. دقت کلی مدل به‌صورت نسبت تعداد پیش‌بینی‌هایی که در این محدوده قرار دارند به کل تعداد مشاهدات تعریف می‌شود.

$$I_t = \begin{cases} 1 & if\ |\hat{y}_t - y_t| \le \varepsilon \\ 0 & o.w. \end{cases}$$

این شاخص یک معیار عملی و قابل تفسیر ارائه می‌دهد؛ به‌ویژه در پیش‌بینی‌های اقتصادی که خطاهای جزئی تاثیر معناداری بر تصمیم‌گیری یا سیاست‌گذاری ندارند. بنابراین، با تعریف یک آستانه دقت برابر با ۰٫۰۱ برای خطای مطلق پیش‌بینی، عملکرد هر مدل از منظر دقت بررسی شد، که پیش‌بینی‌هایی با خطای کمتر از آن، «دقیق» و قابل‌اعتماد در نظر گرفته می‌شوند. در مدل نخست، دقت بالای پیش‌بینی به‌ویژه در مالزی (۹۶٪) نشان‌دهنده قدرت بالای مدل است. در مدل دوم، حذف متغیرهای متعارف موجب کاهش دقت شده و در ایران (۷۰٪) نتایج حتی به‌دلیل ناهمگرایی مدل چندان قابل تفسیر نیست. مدل سوم در هر دو کشور عملکرد خوبی دارد و به مدل نخست نزدیک است. افزودن شاخص‌های فاوا موجب بهبود دقت در هر دو کشور شده که نشان می‌دهد متغیرهای متعارف همچنان اهمیت دارند، اما به تنهایی برای پیش‌بینی کافی نیستند. این نتایج اهمیت مکمل بودن فناوری دیجیتال در اقتصادهای در حال توسعه مانند ایران را تایید می‌کند.

مدل نخست در هر دو کشور از نظر همگرایی و دقت پیش‌بینی عملکرد بهتری نسبت به مدل دوم دارد. مالزی در هر دو مدل دقت بالاتری نسبت به ایران دارد که بازتاب‌دهنده بلوغ دیجیتال و کیفیت داده‌های بالاتر در آن کشور است. در ایران، دقت ۸۹٫۳٪ مدل نخست بر اهمیت متغیرهای متعارف مانند سرمایه و نیروی کار در تبیین تولید ناخالص داخلی تأکید دارد. در مالزی نیز شاخص‌های دیجیتال حتی بدون متغیرهای متعارف توان تبیینی نسبی دارند. طبق نتایج برای ارزیابی مدل‌های یادگیری عمیق، همگرایی الگوریتمی و دقت پیش‌بینی را باید همزمان در نظر گرفت. مدل نخست هر دو شرط را برآورده کرده و برای تحلیل اقتصادی در هر دو کشور قابل اعتماد است؛ ولی مدل دوم تنها در مالزی نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند.

[1] Accuracy

[2] Indicator function

جدول ۴. مقایسه تطبیقی دقت پیش‌بینی مدل‌های نخست و دوم در هر کشور

کشور	مدل	پیش‌بینی‌های دقیق	پیش‌بینی‌های بیرون از آستانه	دقت
ایران	مدل نخست	۶۷	۸	۹۰ درصد
	مدل دوم	۵۳	۲۲	۷۰ درصد
	مدل سوم	۶۵	۱۰	۸۶ درصد
	مدل چهارم	۶۷	۸	۹۰ درصد
مالزی	مدل نخست	۷۲	۳	۹۶ درصد
	مدل دوم	۶۰	۱۵	۸۰ درصد
	مدل سوم	۶۸	۷	۹۰ درصد
	مدل چهارم	۶۹	۶	۹۲ درصد

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی نقش دیجیتالی‌شدن اقتصاد بر تولید ناخالص داخلی ایران و انجام یک مقایسه تطبیقی با کشور مالزی طراحی شده است. پرسش اصلی تحقیق آن بود که آیا گسترش اقتصاد دیجیتال در ایران می‌تواند اثری معنادار بر عملکرد کلان اقتصادی داشته باشد؟ همچنین در قالب پرسش‌های فرعی، این موضوع بررسی شد که آیا دیجیتالی‌شدن می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های تغییر ساختاری اقتصاد ایران تلقی شود و چه جایگاهی در راهبردهای کلان توسعه‌ای کشور دارد.

یافته‌های پژوهش، بر پایه مدل‌سازی کوتاه‌نگرِ بلندحافظه و ارزیابی چهار مدل تحلیلی شامل مدل‌های ترکیبی، دیجیتال‌محور و متعارف، توانستند پاسخ روشنی به پرسش‌های تحقیق ارائه دهند. نتایج نشان داد که دیجیتالی‌شدن، به‌ویژه از طریق شاخص‌هایی مانند اینترنت پهن‌باند ثابت، پوشش شبکه‌های تلفن همراه و میزان استفاده از پهنای باند بین‌المللی، با تولید ناخالص داخلی رابطه‌ای معنادار دارد. در هر دو کشور، مدل ترکیبی—که هم‌زمان شامل متغیرهای متعارف و دیجیتال است—عملکرد بهتری داشت. این نتیجه تأیید می‌کند که دیجیتالی‌شدن هرچند عامل مستقلی برای رشد نیست، اما می‌تواند نقش مکمل و تقویت‌کننده‌ای در کنار عوامل تولید سنتی ایفا کند.

بررسی تطبیقی ایران و مالزی ابعاد عمیق‌تری از تحلیل را آشکار ساخت. در مالزی، مدل دیجیتال‌محور نیز از دقت بالایی برخوردار بود؛ موضوعی که نشان‌دهنده بلوغ زیرساخت‌های دیجیتال و نقش مستقل فناوری اطلاعات و ارتباطات در رشد اقتصادی این کشور است. در مقابل، در ایران مدل‌هایی که صرفاً بر متغیرهای دیجیتال استوار بودند، دقت کمتری داشتند. این امر نشان می‌دهد که زیرساخت‌های دیجیتال در ایران هنوز به مرحله‌ای نرسیده‌اند که بتوانند به‌تنهایی تبیین‌کننده تحولات کلان اقتصادی باشند و همچنان نیازمند تقویت و توسعه‌اند.

از منظر سیاست‌گذاری، نتایج بیانگر آن است که در اقتصادهایی با بلوغ دیجیتال بالا، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات می‌تواند نقشی مشابه سرمایه‌گذاری در سرمایه فیزیکی و نیروی کار در تحریک رشد داشته باشد. بنابراین، سیاست‌های توسعه‌ای باید تقویت زیرساخت‌های اقتصاد دیجیتال را هم‌پای توسعه سرمایه انسانی و فیزیکی دنبال کنند. گسترش اینترنت پهن‌باند، افزایش پوشش شبکه‌های تلفن همراه و تقویت ظرفیت پهنای باند بین‌المللی از جمله مؤلفه‌هایی هستند که می‌توانند پایه‌های اقتصاد دیجیتال ایران را تقویت کرده و مسیر گذار ساختاری آن را تسهیل نمایند. تأکید بر مکمل بودن اقتصاد دیجیتال با اقتصاد سنتی—نه جایگزینی آن—باید محور سیاست‌گذاری‌های آینده باشد.

پژوهش حاضر علاوه بر پاسخ‌دهی به پرسش‌های اصلی و آزمون فرضیات، مبنایی کاربردی برای طراحی سیاست‌های ترکیبی سازگار با شرایط اقتصاد ایران فراهم کرده و امکان بهره‌گیری از تجارب موفق بین‌المللی را نیز فراهم ساخته است. نتایج مدل دوم نشان می‌دهد که اقتصاد دیجیتال به‌تنهایی قادر به توضیح نوسانات اقتصاد کلان در ایران نیست و همچنان نیازمند همراهی عوامل متعارف تولید است. این موضوع حامل پیام مهمی برای سیاست‌گذاران است: تا زمانی که بسترهای فیزیکی و انسانی توسعه نیافته‌اند، دیجیتال‌سازی به‌تنهایی توان خلق ارزش اقتصادی قابل‌توجه را نخواهد داشت. در مقابل، الگوی مالزی نشان می‌دهد که پس از عبور از مراحل اولیه توسعه، اقتصاد دیجیتال می‌تواند به یکی از پیشران‌های اصلی رشد تبدیل شود.

بررسی مدل‌های سوم و چهارم نیز بیانگر آن است که در هر دو کشور، متغیرهای متعارف اقتصاد کلان همچنان نقش مهمی در توضیح تولید ناخالص داخلی دارند. تحلیل تفکیکی نتایج نشان می‌دهد که در ایران فناوری اطلاعات و ارتباطات بیشتر نقش مکمل دارد و تا رسیدن به مرحله بلوغ دیجیتال نمی‌توان انتظار داشت

اقتصاد دیجیتال به‌طور مستقل موتور رشد باشد. در مقابل، شواهد مربوط به مالزی نشان می‌دهد که در اقتصادهای دیجیتالی‌شده، نقش اقتصاد دیجیتال در شکل‌دهی مسیر رشد بسیار پررنگ‌تر و تعیین‌کننده‌تر است.

بر اساس نتایج پژوهش می‌توان توصیه‌های سیاستی و مدیریتی زیر را برای تصمیم گیران کشور ارائه نمود:

- توسعه‌ی زیرساخت‌های دیجیتال باید هم‌زمان با سرمایه‌گذاری در آموزش، مهارت‌آفرینی و تأمین سرمایه فیزیکی برنامه‌ریزی شود تا دیجیتال‌سازی به‌صورت مؤثر ارزش‌آفرینی کند.
- برنامه‌ریزی بودجه‌ای و ساختاری برای توسعه فیزیکی زیرساخت‌ها از طریق ترکیب سرمایه‌گذاری عمومی، مشوق‌های سرمایه‌گذاری خصوصی و مدل‌های مشارکت عمومی-خصوصی می‌تواند نقش اقتصاد دیجیتال در رشد ناخالص داخلی را پررنگ‌تر کند.
- حمایت از اکوسیستم‌های نوآوری دیجیتال، سرمایه‌گذاری در آموزش و پژوهش برای ایجاد قابلیت تولید فناوری بومی و تقویت نقش دیجیتال به‌عنوان پیشران رشد ناخالص داخلی باید در راس تصمیمات مدیران قرار گیرد.
- پژوهش تأکید می‌کند که اقتصاد دیجیتال به‌تنهایی قادر به تبیین رشد اقتصادی در ایران نیست و در حال حاضر نقش مکمل دارد.
- بنابراین، سیاست‌گذاران نباید آن را جایگزین عوامل سنتی تولید بدانند، بلکه باید راهبردی طراحی کنند که ترکیب این دو را تقویت کند. دیجیتال‌سازی ارزش بالایی دارد اما مکمل است؛ برای آنکه دیجیتال تبدیل به موتور مستقل رشد شود، باید پیش‌شرط‌های فیزیکی و انسانی فراهم گردد. بنابراین، سیاست‌گذاریِ موفق باید همزمان زیرساخت بسازد، مهارت ایجاد کند و تامین سرمایه را تقویت نماید.
- نتایج نشان می‌دهد که در نبود بسترهای انسانی و نهادی مناسب، دیجیتالی‌شدن توان خلق ارزش قابل‌توجه ندارد. از این رو لازم است ارتقای مهارت‌های مرتبط با اقتصاد دیجیتال، تقویت ظرفیت مدیریتی و حکمرانی دیجیتال، ایجاد چارچوب‌های نهادی هماهنگ برای سیاست‌گذاری و نظارت در اولویت برنامه‌های ملی قرار گیرد.
- از آنجا که مدل دیجیتال‌محور در ایران عملکرد ضعیف‌تری دارد، سیاست‌گذاران باید انتظار داشته باشند که اثرگذاری مستقل اقتصاد دیجیتال پس از طی مراحل مقدماتی توسعه نمایان شود.
- بنابراین، سیاست‌های دیجیتال باید بلندمدت، تدریجی و مرحله‌به‌مرحله طراحی شوند.
- با توجه به نتایج مدل‌ها، مناسب است چارچوب‌های سیاستی ایران اقتصاد دیجیتال را نه موتور اصلی بلکه شتاب‌دهنده رشد در کنار سایر عوامل بدانند. این نگاه سیاستی واقع‌بینانه‌تر بوده و با شرایط فعلی اقتصاد ایران سازگار است.

پژوهشگران در تحقیقات آتی می‌توانند متغیرهای بیشتری از اقتصاد دیجیتال را در بررسی‌های خود لحاظ کنند و اثر آنها بر اقتصاد کشور را بررسی کنند. همچنین در بررسی‌های دیگر می‌توانند مقایسه را بین چند کشور دیگر نیز انجام دهند.

مراجع

[1] K. Schwab, The Fourth Industrial Revolution, Penguin Books Limited, 2017.

[2] R. Bukht and R. Heeks, Defining, Conceptualising and Measuring the Digital Economy, Development Informatics Working Paper No. 68, Aug. 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3431732

[3] A. Goldfarb, C. Tucker, "Digital economics," Journal of Economic Literature, vol. 57, no. 1, pp. 3–43, 2019.

[4] K. Hafner و M. Lyon, Where Wizards Stay Up Late: The Origins of the Internet, New York: Touchstone, Simon & Schuster, 1996.

[5] S. Greenstein, How the Internet Became Commercial: Innovation, Privatization, and the Birth of a New Network, Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2015.

[6] N. Moradhassel and B. Mohebikhah, "Estimating the Value of Digital Economy Core Spillover in Iran," Journal of Information and Communication Technology, vol. 15, no. 57, pp. 111–121, 2023, doi: 10.61186/jict.44104.15.57.111.

[7] L. Xia, S. Baghaie, and S. M. Sajadi, "The digital economy: Challenges and opportunities in the new era of technology and electronic communications," Ain Shams Engineering Journal, vol. 15, no. 2, p. 102411, 2024.

[8] Z. Chen and R. Xing, *"Digital economy, green innovation and high-quality economic development,"* International Review of Economics & Finance, vol. 99, p. 104029, 2025.

[9] A. Raihan, *"A review of the potential opportunities and challenges of the digital economy for sustainability,"* Innovation and Green Development, vol. 3, no. 4, p. 100174, 2024.

[10] J. Mokyr, *"Long-term economic growth and the history of technology,"* in *Handbook of Economic Growth*, vol. 1, Part B, P. Aghion and S. N. Durlauf, Eds. Elsevier, 2005, pp. 1113–1180. doi: 10.1016/S1574-0684(05)01017-8.

[11] E. Brynjolfsson و L. M. Hitt, "Computing Productivity: Firm-Level Evidence," Review of Economics and Statistics, vol. 85, no. 4, pp. 793–808, 2003.

[12] A. Agrawal, N. Lacetera, and E. Lyons, "Does standardized information in online markets disproportionately benefit job applicants from less developed countries?," Journal of International Economics, vol. 103, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1016/j.jinteco.2016.08.003.

[13] E. Brynjolfsson, Y. Hu, و M. D. Smith, "Consumer Surplus in the Digital Economy: Estimating the Value of Increased Product

Variety at Online Booksellers," Management Science, vol. 49, no. 11, pp. 1580–1596, 2003.

[14] G. J. Stigler, "The Economics of Information," Journal of Political Economy, vol. 69, no. 3, pp. 213–225, 1961.

[15] P. A. Diamond, "A Model of Price Adjustment," Journal of Economic Theory, vol. 3, no. 2, pp. 156–168, 1971.

[16] C. Shapiro و H. R. Varian, Information Rules: A Strategic Guide to the Network Economy, Cambridge: Harvard Business School Press, 1998.

[17] H. R. Varian, Intermediate Microeconomics: A Modern Approach, 8th ed., New York: W.W. Norton & Company, 2010.

[18] M. Spence, "Government and economics in the digital economy," Journal of Government and Economics, vol. 3, 2021, Art. no. 100020.

[۱۹] م. مهرکام، م.ت. تقوی فرد، و ا. جهانگرد، "مدلی برای تحلیل نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات در رشد تولید ناخالص داخلی ایران با رویکرد پویایی سیستم"، رساله دکتری مدیریت فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، ۱۴۰۰.

[20] P. Koutroumpis, "The Economic Impact of Broadband on Growth: A Simultaneous Approach," Telecommunications Policy, vol. 33, no. 9, 2009.

[21] R. Katz و P. Koutroumpis, "Measuring Socio-Economic Digitization: A Paradigm Shift," Social Science Research Network, 2012.

[22] R. Bukht و R. Heeks, "Defining, conceptualising and measuring the digital economy," Development Informatics Working Paper, no. 68, 2017.

[23] H. Aly, "Digital transformation, development and productivity in developing countries: is artificial intelligence a curse or a blessing?," Review of Economics and Political Science, vol. 7, no. 4, pp. 238–256, 2022.

[24] L. Mićić, "Digital transformation and its influence on GDP," Economics, vol. 5, no. 2, pp. 135–147, 2017, doi: 10.1515/eoik-2017-0028.

[25] E. Roszko-Wójtowicz و M. M. Grzelak, "Macroeconomic stability and the level of competitiveness in EU member states: A comparative dynamic approach," Oeconomia Copernicana, vol. 11, no. 4, pp. 657–688, 2020, doi: 10.24136/oc.2020.027.

[26] A. Małkowska, M. Urbaniec, و M. Kosała, "The impact of digital transformation on European countries: Insights from a comparative analysis," Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy, vol. 16, no. 2, pp. 325–355, 2021, doi: 10.24136/eq.2021.012.

[27] ع. پناهی‌فرد، م. پیری، و س. کیان‌پور، "بررسی تأثیر اقتصاد دیجیتال در بازاریابی بر توسعه صادرات و رشد اقتصادی همدان: رویکرد توابع کاپیولا"، فصلنامه تخصصی رشد فناوری، دوره ۲۰، شماره ۷۸، ۱۴۰۳.

[۲۸] ف. توسلی، ف. دژپسند، و ع. عرب مازار، "بررسی اثر دیجیتالی شدن اقتصاد بر رشد اقتصادی ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم اقتصادی و سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۹.

[۲۹] م.ع. مرادی و م.رضا هدایتی، "طراحی مدل تکاملی گذار ایران به اقتصاد دیجیتال"، فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال هجدهم، شماره ۶۸، صص. ۲۱۹-۲۵۱، ۱۳۹۷.

[۳۰] ک. امامی، "آیا افزایش سهم فناوری اطلاعات و ارتباطات از تولید ناخالص داخلی در کشور ایران ضروری است؟"، فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال هجدهم، شماره ۶۸، بهار ۱۳۹۷، صص. ۴۵-۷۴، ۱۳۹۶.

[۳۱] س. مشیری، "برآورد آثار مستقیم و سرریز سرمایه‌گذاری در فناوری اطلاعات و ارتباطات بر تولید صنایع ایران با تأکید بر نقش سرمایه‌ی انسانی و ظرفیت جذب"، فصلنامه تحقیقات اقتصادی، جلد ۵۲، شماره ۲، صص. ۳۹۵-۴۲۶، ۱۳۹۶.

[۳۲] ص. معتقد، ه. رنجبر، و س. دایی کریم‌زاده، "رابطه فناوری اطلاعات و ارتباطات، بخش‌های صادراتی و غیرصادراتی و رشد اقتصادی در ایران: تعمیم مدل فدر"، مدلسازی اقتصادی، جلد ۸، شماره ۴ (پیاپی ۲۸)، صص. ۲۷-۴۴، ۱۳۹۳.

[۳۳] م.ع. مرادی، م. کبریایی، و م. گنجی، "تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر رشد اقتصادی کشورهای اسلامی منتخب"، فصلنامه اقتصاد و تجارت نوین، شماره ۲۹ و ۳۰، پاییز ۱۳۹۱، صص. ۷۹-۱۰۸، ۱۳۹۱.

[34] A. L. Gómez and S. J. López, "Innovation and transformation: Keys to the success of SMES in the digital age," Journal of Economics, Innovative Management and Entrepreneurship, vol. 2, no. 3, 2024.

[35] W. Zhang, S. Zhao, X. Wan, and Y. Yao, "Study on the effect of digital economy on high-quality economic development in China," PLOS ONE, vol. 16, no. 9, p. e0257365, 2021.

[36] Jiao S, Sun Q. Digital Economic Development and Its Impact on Economic Growth in China: Research Based on the Prespective of Sustainability. Sustainability. 2021; 13(18):10245. https://doi.org/10.3390/su131810245

[37] Solomon, E. M., & van Klyton, A. (2020). The impact of digital technology usage on economic growth in Africa. Utilities policy, 67, 101104.

[38] Niebel, T. (2018). ICT and economic growth–Comparing developing, emerging and developed countries. World development, 104, 197-211.

[39] 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.

[40] Latif, Z., Latif, S., Ximei, L., Pathan, Z. H., Salam, S., & Jianqiu, Z. (2018). The dynamics of ICT, foreign direct investment, globalization and economic growth: Panel estimation robust to heterogeneity and cross-sectional dependence. Telematics and informatics, 35(2), 318-328.

[41] Palvia, P., Baqir, N., & Nemati, H. (2018). ICT for socio-economic development: A citizens' perspective. Information & Management, 55(2), 160-176.

[42] S. Bandyopadhyay, "Knowledge-Based Economic Development: Mass Media and the Weightless Economy," STICERD, London School of Economics and Oriel College, Oxford University, 2009.

[43] L. Raffestin, "ICT Spending and Inflation at the Sectorial Level," University of Paris, 2011.

[44] M. Kabza, "Artificial intelligence in financial services–benefits and costs," in Innovation in Financial services, Routledge, 2020, pp. 183-198.

[45] S. Mullainathan و J. Spiess, "Machine learning: an applied econometric approach," Journal of Economic Perspectives, vol. 31, pp. 87–106, 2017.

[۴۶] Wooldridge JM. 2010. Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data. Cambridge, MA: MIT Press

[۴۷] Angrist JD, Pischke JS. 2008. Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press

[48] Wu X, Kumar V, Quinlan JR, Ghosh J, Yang Q, et al. 2008. Top 10 algorithms in data mining. Knowl. Inform. Syst. 14:1–37

[49] Athey, S., & Imbens, G. W. (2019). Machine learning methods that economists should know about. Annual Review of Economics, 11(1), 685-725.