فصلنامه‌ی اقتصاد مقداری (بررسی‌های اقتصادی سابق) تابستان ۱۴۰۵ ۲۳(۲) ۲۴۲-۲۰۷



فصلنامه‌ی اقتصاد مقداری

صفحه‌ی اصلی وب سایت مجله:
www.jqe.scu.ac.ir
شاپا الکترونیکی: ۴۲۷۱-۲۷۱۷
شاپا چاپی: ۵۸۵۰-۲۰۰۸

تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی در آلوده کننده های بزرگ آسیایی: شواهدی جدید از برآوردهای آستانه‌ای و غیر آستانه‌ای

سمیه اعظمی،* فایزه پور اکبری **، سید محمد باقر نجفی ***

* دانشیار، دانشگاه رازی، دانشکده علوم اجتماعی و تربیتی، گروه اقتصاد، کرمانشاه، ایران. (نویسنده ی مسئول)
** کارشناس ارشد اقتصاد انرژی، دانشگاه رازی، گروه اقتصاد ، کرمانشاه، ایران.
*** دانشیار، دانشگاه رازی، دانشکده علوم اجتماعی و تربیتی، گروه اقتصاد، کرمانشاه، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۸ خرداد ۱۴۰۳
تاریخ بازنگری: ۳۰ تیر ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱ آبان ۱۴۰۳

ارتباط با نویسنده مسئول:
ایمیل: s.azami@razi.ac.ir
0000-0002-7576-5820

طبقه‌بندی JEL: O30, O13,Q01,Q56

واژگان کلیدی:
دانش، کیفیت محیطزیست، مدل آستانه‌ای، کشورهای آسیایی

آدرس پستی: ***کرمانشاه، طاق بستان، خیابان دانشگاه، دانشگاه رازی، دانشکده اقتصاد، گروه اقتصاد. کدپستی:۶۷۱۴۴۱۴۹۷۱***

اطلاعات تکمیلی:
این مقاله مأخوذ از پایان‌نامه کارشناسی ارشد خانم فایزه پور اکبری با راهنمایی خانم دکتر سمیه اعظمی و مشاوره آقای دکتر سید محمد باقر نجفی است.

قدردانی: از تمامی افراد و موسساتی که در انجام این تحقیق مولف را مساعدت نمودند، قدردانی می‌شود.
تضاد منافع: نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که در انتشار مقاله ارائه شده تضاد منافعی وجود ندارد.
منابع مالی: نویسنده‌ها هیچگونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

چکیده

هدف این مطالعه بررسی تاثیر پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای منتخب آسیایی؛ چین، هند، ژاپن، کره جنوبی و ایران در فاصله زمانی ۲۰۲۱-۱۹۹۵ است. این کشورها از نظر پیچیدگی اقتصادی شرایط متفاوتی را تجربه می‌کنند و بر حسب انتشار CO_2 رتبه کمتر از ۱۰ در میان کشورهای جهان دارند. نتایج آزمون هم انباشتگی دلالت بر وجود ارتباط بلند مدت میان متغیرهای مدل دارد و این ارتباط در قالب مدل آستانه‌ای و غیر آستانه‌ای و استفاده از داده های ترکیبی(پانل) برآورد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس در این گروه از کشورها مورد تایید است. مصرف انرژی تجدید پذیر و فسیلی به ترتیب به طور معنی داری منجر به کاهش و افزایش ردپای اکولوژیکی می‌شوند. توسعه مالی در مدل ترکیبی آستانه‌ای به طور معنی داری ردپای اکولوژیکی را کاهش می‌دهد. با افزایش شاخص پیچیدگی اقتصادی تا مقدار آستانه‌ای ۱/۱۲، ردپای اکولوژیکی با نرخ ۰/۰۳ و بعد از آن با نرخ ۰/۰۸ افزایش می‌یابد. برآوردهای ترکیبی غیر آستانه‌ای حاکی از آن است که با افزایش شاخص پیچیدگی اقتصادی ردپای اکولوژیکی ابتدا در سطوح بسیار پایین دانش و پیچیدگی(شاخص پیچیدگی اقتصادی کمتر از ۱/۶) کاهش و سپس با نرخ افزایشی افزایش می‌یابد. انتظار می رود پیچیده تر شدن اقتصاد یک استراتژی برنده- بازنده برای محیطزیست منتخبین آسیایی باشد. لذا، به منظور دستیابی به توسعه پایدار همراه با افزایش سطح دانش و پیچیدگی اقتصادی استفاده از فرایندهای تولیدی و تکنولوژی های دوستدار محیطزیست، جایگزینی انرژی تجدیدپذیر به جای انرژی فسیلی و رشد بخش مالی به کشورهای مورد مطالعه توصیه می‌شود.

ارجاع به مقاله:

اعظمی، سمیه.، پور اکبری، فایزه و نجفی، سید محمد باقر. (۱۴۰۵). تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی در آلوده کننده های بزرگ آسیایی: شواهدی جدید از برآوردهای آستانه‌ای و غیر آستانه‌ای. *فصلنامه‌ی اقتصاد مقداری (بررسی‌های اقتصادی سابق)*، ۲۳(۲)، ۲۴۲-۲۰۷.

10.22055/jqe.2024.47028.2632

© 2026 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

انتشار CO_2 تقریباً ۷۶٪ از کل گازهای گلخانه ای انسانی (GHG) را تشکیل می‌دهد. لذا، اثرات زیست‌محیطی فعالیت های انسانی غالباً توسط انتشار CO_2 سنجش می‌شود. این در حالیست که انتشار CO_2 تنها بخش کوچکی از تخریب محیطزیست را نشان می‌دهد و کل فشار فعالیت های انسانی بر روی اکوسیستم را در نظر نمی‌گیرد. اخیراً، به دنبال حسابداری

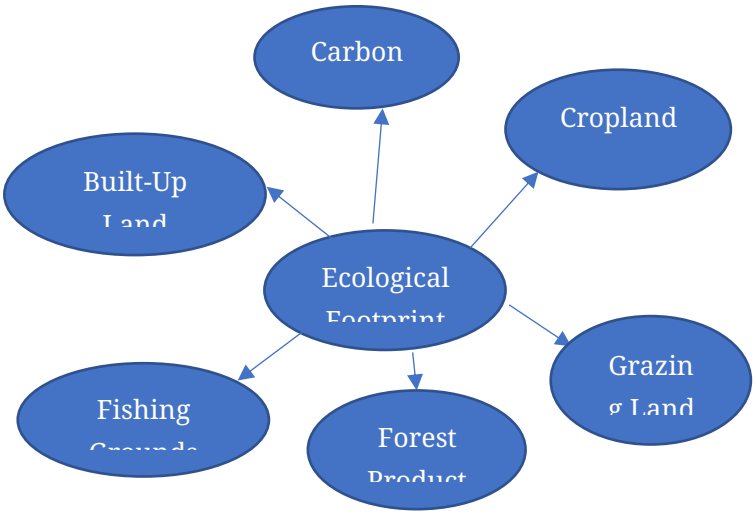
اکولوژیکی و معرفی ردپای اکولوژیکی[1] توسط واکرناگل و ریس[2] (۱۹۹۶) کیفیت زیست‌محیطی با استفاده از شاخص ردپای اکولوژیکی به طور گسترده در مطالعات زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. ردپای اکولوژیکی ابزار مفیدی است که به بررسی تأثیر فعالیت‌های انسان بر محیطزیست و زمین تکیه دارد و با استفاده از آن می‌توان، فشار وارده بر اکولوژی و محیطزیست را به اطلاع عموم جامعه رساند. به عبارت دیگر، این شاخص، ظرفیت بیولوژیکی مورد نیاز که به وسیله افراد هر کشور برای تولید کالاها و خدمات مصرف می‌شود و نیز ظرفیت مورد نیاز برای جذب آلودگی‌هایی که به وسیله این افراد ایجاد شده را اندازه می‌گیرد. همچنین، ردپای اکولوژیکی شاخصی از پایداری است و وجود ردپای اکولوژیکی، به عنوان شاخصی از کارایی اکولوژیکی نیز بشمار می‌رود (Wiedmann, Minx, Barrett, & Wackernagel, 2006).

تجزیه و تحلیل ردپای اکولوژیکی در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است زیرا عاملی اساسی در اجرای سیاست های مربوط به گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی است. در حال حاضر، بشر از معادل ۱/۷۵ زمین برای تامین منابع مورد نیاز و جذب زباله استفاده می‌کند، به این معنی که سیاره به یک سال و هشت ماه نیاز دارد تا آنچه را که در یک سال استفاده می شود، احیا کند. این موضوع نشان می‌دهد که از منابع و خدمات اکولوژیکی بیشتر از توانایی طبیعت برای بازسازی استفاده می‌شود (Global Footprint Network, 2019).

لذا، این سوال اهمیت دارد که چه عواملی بر ردپای اکولوژیکی تأثیر گذار است. تولید ناخالص داخلی، مصرف انرژی، توسعه مالی، تجارت و تکنولوژی از عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی است. یکی دیگر از عوامل مؤثر پیچیدگی اقتصادی[3] است. تفکر پایه در رابطه با شاخص پیچیدگی اقتصادی این است که مهم‌ترین عامل تعیین کننده میزان توسعه-یافتگی هر کشور، میزان دانش شکل گرفته در آن کشور است. مقدار بالای شاخص پیچیدگی اقتصادی نشان‌دهنده سطح بالای دانش و قابلیت‌های یک اقتصاد است. از یک سو، بسیاری از محققان، بر این باورند که نوآوری‌های فناورانه و استفاده از عوامل تولید همراه با تکنولوژی بالاتر، می‌تواند کارایی انرژی را بهبود ببخشد. همچنین یک ساختار پیچیده‌تر تولید، کشور را قادر می‌سازد که در فعالیت‌های تولیدی خود، بهره‌وری بالاتری را کسب نماید. در نتیجه، می‌تواند مصرف انرژی را برای مقدار معینی از تولید کاهش دهد و انتشار آلایندگی را کمتر

[1] Ecological Footprint
[2] (Wackernagel & Rees, 1998)
[3] Economic Compelexity

کند (Khan & Ahmad, 2008). انتظار می رود اقتصادهای پیچیده تر ظرفیت بیشتری برای توسعه فعالیت‌های تحقیق و توسعه خاص به منظور کاهش تخریب محیطزیست داشته باشند. از سوی دیگر، می توان ادعا نمود اقتصادهای ساده به طور کلی بر تولید محصولات کشاورزی و مواد معدنی خام تمرکز دارند و در نتیجه باعث تخریب محیطی محدودی می‌شوند. با این حال، اقتصادهای توسعه‌یافته و صنعتی شده که با تنوع در تولید پیچیده‌تر شده‌اند، باعث تخریب بیش از حد محیط می‌شوند (Swart & Brinkmann, 2020).



نمودار ۱. اجزای ردپای اکولوژیکی
مأخذ: بالسالوبره- لورنس و همکاران، ۲۰۲۳
Figure 1. Ecological Footprint Components
Source: (Balsalobre-Lorente, Nur, Topaloglu, & Evcimen, 2024)

سهم و نقش مطالعه حاضر در ادبیات آن است که تلاش می‌کند یک آشتی میان نتایج متناقض ایجاد کند ضمن آنکه به جای انتشار دی اکسید کربن از شاخص ردپای اکولوژیکی استفاده می‌شود. متدلوژی این مقاله مبتنی بر یک مدل ترکیبی آستانه‌ای[4] است ضمن آنکه به منظور راستی آزمایی نتایج از مدل ترکیبی غیر آستانه‌ای نیز بهره می‌برد. با توجه به

[4] Panel Threshold Model

متفاوت بودن نتایج در ادبیات از مدل ترکیبی آستانه‌ای بهره گرفته شد و اجازه داده شد که تاثیر پیچیدگی بر ردپای اکولوژیکی تابع موقعیت کشورها از نظر پیچیدگی اقتصادی باشد. همچنین به منظور راستی آزمایی نتایج، مدل ترکیبی غیر آستانه‌ای با لحاظ این شرایط که تاثیر پیچیدگی بر ردپای اکولوژیکی تابعی از میزان شاخص پیچیدگی است نیز برآورد می‌شود.

کشورهای مورد مطالعه منتخبین آسیایی؛ چین، ایران، ژاپن، کره جنوبی و هند و دوره زمانی مطالعه ۱۹۹۵-۲۰۲۱ است. قابل توجه است این کشورها وضعیت مناسبی از نظر کیفیت محیط‌زیست ندارند. کشورهای چین، هند، ژاپن، کره جنوبی و ایران به ترتیب حایز رتبه ۱، ۳، ٦، ۸ و ۹ در میان کشورهای جهان(۲۱۹ کشور) بر حسب انتشار دی اکسید کربن هستند. همچنین، بر اساس رتبه بندی AEC[5] کشورهای ژاپن، کره جنوبی، چین، هند و ایران به ترتیب حایز رتبه ۱، ۷، ۱۸، ۵۲ و ۷۳ در میان کشورهای جهان(۱۳۳ کشور) بر حسب پیچیدگی اقتصادی هستند. تولید ناخالص داخلی، مصرف انرژی تجدیدپذیر، مصرف انرژی فسیلی و توسعه مالی متغیرهای کنترلی مدل هستند. نتایج گویای آن است که انتظار می رود پیچیده تر شدن اقتصادها به نفع محیط‌زیست نباشد. البته، در سطوح پایین دانش و پیچیدگی اقتصادی، پیچیده تر شدن اقتصادها یا باعث کاهش ردپای اکولوژیکی می گردد و یا هزینه های زیست‌محیطی پیچیدگی کمتر از سطوح بالای پیچیدگی اقتصادی است. در برآوردهای غیر آستانه‌ای انتظار می‌رود یک رابطه U شکل میان ردپای اکولوژیکی و شاخص پیچیدگی اقتصاد باشد. این نتیجه در ادبیات قابل توجه است. توجیه این نتیجه به این صورت است که در سطوح پایین دانش و پیچیدگی اقتصادی می توان انتظار داشت افزایش دانش به نفع محیط‌زیست باشد ولی هر چه اقتصادها پیچیده تر می‌شوند آثار زیان بار زیست‌محیطی دانش بیشتر می‌شود.

سازمان‌دهی مقاله به این صورت است که در ادامه به ترتیب مبانی نظری و پیشینه پژوهش مطرح می‌شود. روش‌شناسی پژوهش و مروری بر داده ها موضوع بخش چهارم است. یافته های تجربی و بحث به بخش پنجم و نتیجه‌گیری و توصیه سیاستی به بخش ششم اختصاص دارد.

[5] Atlas Economic Compelexity

۲- مبانی نظری

در ادامه، ابتدا مروری بر مفاهیم ردپای اکولوژیکی و پیچیدگی اقتصادی داریم و سپس به مکانیزم های تأثیر گذاری پیچیدگی اقتصادی، تولید ناخالص داخلی، توسعه مالی و مصرف انرژی بر ردپای اکولوژیکی پرداخته می‌شود.

۲-۱- تعریف ردپای اکولوژیکی

واکرناگل و ریس (۱۹۹۶) یک شاخص آلودگی زیست‌محیطی جامع‌تر از آلودگی آب، خاک و هوا معرفی کردند. ردپای اکولوژیکی یک شاخص کل است که تخریب محیطی ناشی از فعالیت های انسانی را اندازه گیری می‌کند (Ulucak & Lin, 2017). ردپای اکولوژیکی کمک می‌کند تا تأثیر مستقیم و غیرمستقیم فعالیت های افراد بر کره زمین سنجش شود. ردپای اکولوژیکی معمولاً در هکتار جهانی(gha[6]) اندازه گیری می‌شود. بدین ترتیب، مقایسه کشورهای مختلف آسان می‌گردد.

ردپای اکولوژیکی تقاضای منابع طبیعی انسانی را نشان می‌دهد، در حالی که ظرفیت زیستی، عرضه منابع طبیعی را نشان می‌دهد. با مقایسه ردپای اکولوژیکی با ظرفیت زیستی، منطقه تولیدی بیولوژیکی مورد نیاز برای مصرف انسان را می‌توان اندازه‌گیری کرد. اگر تقاضا برای منابع طبیعی بیشتر از عرضه باشد، پس کسری زیست‌محیطی رخ می‌دهد، در همان حال، ردپای اکولوژیکی میزان مصرف منابع انسانی را نشان می‌دهد که فراتر از محدودیت‌های زیست‌محیطی هستند (Yilanci & Pata, 2020).

شاخص رد پای اکولوژیکی پیش درآمد برنامه ریزی و یکی از ابزارهای کارآمد آن است که به تحقق پایداری کمک می‌کند. ردپای اکولوژیکی از دو منظر می‌تواند شاخص پایداری محسوب شود. اولاً، رد پای اکولوژیکی هزینه اکولوژیکی تأمین کلیه کالاها و خدمات مصرفی انسان را محاسبه می‌کند و نشان می‌دهد که مردم نه تنها برای تولیدات کشاورزی، احداث جاده ها، ساختمان سازی و سایر فعالیتها به زمین نیاز دارند، بلکه به طور غیرمستقیم نیز کالاها و خدمات مورد نیاز انسان‌ها از زمین مهیا می شود. ثانیاً، تعبیر رد پای اکولوژیکی به عنوان شاخص پایداری به معرفی ایده ظرفیت برد منجر شده است. ظرفیت برد عبارتست از حداکثر جمعیتی که زمین می تواند نیازهای آنها را به طور نامحدود مهیا کند (Fakher, Abedi, & Shaygani, 2018).

[6] global hectares

ردپای اکولوژیکی معیار مناسبی برای تخریب محیطزیست است زیرا با این ایده که فعالیت های انسانی نباید از ظرفیت محیط برای تجدید منابع فراتر رود سازگار است و می تواند پیامدهای فعالیت های انسانی بر محیطزیست یک کشور را از نظر هوا، خاک و آب نشان دهد.

۲-۲- تعریف پیچیدگی اقتصادی

ایده معرفی شاخص پیچیدگی اقتصادی توسط گروهی از دانشمندان و محققان دانشگاه‌های هاروارد و ام آی تی آمریکا در سال ۲۰۰۶ انجام شد. در این راستا هاسمن[7] استاد اقتصاد توسعه و رئیس مرکز توسعه بین‌المللی دانشگاه هاروارد و هیدالگو[8] از دانشگاه ام. آی. تی با تشکیل گروه تحقیقاتی گسترده‌ای به مطالعه ایده پیچیدگی اقتصادی پرداختند (Shahmoradi & Sadeghi Siahkali, 2017).

این شاخص توانایی یک کشور برای تولید و صادرات محصولات پیچیده را بیان می کند و میزان دانش تولیدی موجود در آن کشور را تخمین می زند. هیدالگو و هاسمن[9](۲۰۰۹) شاخص پیچیدگی اقتصادی را با استفاده از اطلاعات تجارت خارجی کشورها طراحی کردند که سطح توسعه‌یافتگی و تجمیع ظرفیت‌های اقتصادی یک کشور را نشان می‌دهد. دو مفهوم مهم در محاسبه این شاخص مورد استفاده قرار گرفته که یکی تنوع محصولات و دیگری، فراگیربودن محصولات است. تنوع محصولات اشاره به تعداد محصولات متمایزی که یک کشور تولید می کند دارد، و میزان بیشتر آن، نشان دهنده دانش تجمیع شده و توانایی استفاده از تاکتیک‌ها و نوآوری‌های صورت گرفته در ساختار تولید یک کشور است. همچنین تعداد کشورهایی که قادر به تولید آن محصول مشابه هستند، به فراگیر بودن محصولات اشاره دارد. برای تشریح بیشتر روش ابداعی هیدالگو و هاسمن (۲۰۰۹)، ماتریس مزیت نسبی آشکار شده یا ضریب مکانی را برای دنیایی با N کشور و K محصول در نظر بگیرید (Saeedi, Moghaddasi, Nessabian, & Damanjeshideh, 2022):

[7] Hausman
[8] Hidalgo
[9] Hidalgo & Hausman

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{K1} & \cdots & r_{KN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

r_{11} مزیت نسبی آشکار شده کشور ۱ در محصول ۱ است. بر اساس شرط $RCA \succ 1$ [10]، درایه های ماتریس R به یک و در غیر اینصورت به صفر تبدیل و ماتریس M تشکیل می شود:

$$M=\begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{K1} & \cdots & m_{KN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

اگر $m_{11}=1$ باشد یعنی کشور اول محصول اول را با مزیت نسبی آشکارشده صادر کرده است ($RCA \succ 1$). جمع سطری ماتریس M ($UB_i=\sum_{c=1}^{n} m_{ic}$) درجه فراگیر بودن صادرات محصول i را نشان می‌دهد. جمع ستونی ماتریس M ($DIV_c=\sum_{i=1}^{k} m_{ic}$) درجه تنوع سبد محصولات صادراتی کشور c را نشان می‌دهد. با روابط زیر می توان این وابستگی ها را نشان داد:

$$\begin{cases} KC_{c.h}=\dfrac{1}{DIV_c}\sum_{i=1}^{K_p} m_{ic}KP_{i.h-1} \\ KP_{i.h}=\dfrac{1}{UB_i}\sum_{c=1}^{N_c} M_{ic}KC_{c.h-1} \end{cases} \quad (3)$$

در معادلات (۲) و (۳)، $KC_{c.h}$ و $KP_{i.h}$ به ترتیب درجه پیچیدگی محصول i ام و درجه پیچیدگی کشور c ام می‌باشند. در رابطه (۳) DIV_C کل تعداد محصولات صادراتی (با مزیت نسبی آشکار شده) یک کشور است. $\sum_{i=1}^{K_p} m_{ic}KP_{i.h-1}$ جمع درجه پیچیدگی محصولاتی است که کشور c آنها را با مزیت نسبی صادر می‌کند. وقتی این عبارت بر DIV_C تقسیم می‌شود، در حقیقت میانگین درجه پیچیدگی محصولات صادراتی (با مزیت نسبی)

[10] Revealed Comparative Advantages

به عنوان درجه پیچیدگی آن کشور در نظر گرفته می‌شود. با جایگذاری معادلات (۴) و (۵) در یکدیگر، تشکیل فرم ماتریسی معادلات و استفاده از عملگر انتقال مارکوف، هیدالگو و هاسمن (۲۰۰۹) شاخص پیچیدگی کشوری را متناظر با دومین و بزرگترین بردار ویژه ماتریس $\sum_{i=1}^{K} \frac{M_{ic}M_{ic'}}{UB_i}$ و شاخص پیچیدگی محصول i را متناظر با دومین و بزرگترین بردار ویژه ماتریس $\sum_{c=1}^{N} \frac{M_{ic}M_{ic'}}{DIV_c}$ به صورت زیر معرفی کردند:

$$ECI_c = \frac{\overrightarrow{KC}_c - \langle \overrightarrow{KC}_c \rangle}{stdev(\overrightarrow{KC}_c)} \quad (۴)$$

$$PCI_i = \frac{\overrightarrow{KP}_i - \langle \overrightarrow{KP}_i \rangle}{stdev(\overrightarrow{KP}_i)} \quad (۵)$$

در روابط (۶) و (۵)، ECI_C و PCI_i به ترتیب شاخص پیچیدگی کشور c ام و شاخص پیچیدگی محصول i ام می باشند. این شاخص ها با میانگین $\langle \overrightarrow{KC}_c \rangle$ و $\langle \overrightarrow{KP}_i \rangle$ و انحراف معیار $stdev(\overrightarrow{KC}_c)$ و $stdev(\overrightarrow{KP}_i)$ به صورت متغیرهای استاندارد شده هستند.

۳-۲- پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی

بسیاری از محققان، بر این باورند که نوآوری‌های فناورانه و استفاده از عوامل تولید همراه با تکنولوژی بالاتر، می‌تواند کارایی انرژی را بهبود ببخشد. همچنین یک ساختار پیچیده‌تر تولید، کشور را قادر می‌سازد که در فعالیت‌های تولیدی خود، بهره‌وری بالاتری را کسب نماید. در نتیجه، می‌تواند مصرف انرژی را برای مقدار معینی از تولید کاهش دهد و انتشار آلایندگی را کمتر کند (Khan & Ahmad, 2008).

از سوی دیگر برخی از محققین بر این باورند پیچیدگی اقتصادی به ساختار تولیدی یک کشور اشاره دارد که ساختار اقتصادی و مصرف انرژی خاصی را ایجاد می کند که تأثیر خاصی بر محیطزیست دارد. محصولات پیچیده عمدتاً نتیجه بخش‌های تولید صنعتی یا شیمیایی هستند که با سطوح بالایی از شدت انرژی کار می‌کنند. سطوح پیچیدگی بالاتر عموماً با تقاضای انرژی بالاتر همراه است. بنابراین، بدیهی است که ساختار تولیدی یک کشور (یعنی با بخش‌های صنعتی و شیمیایی انرژی‌بر) بر محیطزیست تأثیر می‌گذارد. به

عبارت دیگر، سطح پیچیدگی محصولات می تواند با ایجاد آلودگی و مصرف منابع طبیعی به محیطزیست آسیب برساند. همچنین دانش و قابلیت‌ها (دانش تولیدی)، تحقیق و نوآوریهایی را در خود جای داده است که می‌تواند به معرفی فناوری‌های سازگار با محیطزیست در فرآیند تولید و همچنین برنامه‌ریزی اثرات زیست‌محیطی محصولات پیچیده جدید در مراحل اولیه طراحی کمک کند.

همانطور که این شاخص بخشی از توسعه اقتصادی است، به آلودگی محیطزیست نیز مربوط می‌شود. اقتصادهای ساده به طور کلی بر تولید محصولات کشاورزی و مواد معدنی خام تمرکز دارند و در نتیجه باعث تخریب محیطی محدودی می‌شوند. با این حال، اقتصادهای توسعه‌یافته و صنعتی شده که با تنوع در تولید پیچیده‌تر شده‌اند، باعث تخریب بیش از حد محیط می‌شوند (Swart & Brinkmann, 2020). در نهایت، در سطوح بالای پیچیدگی اقتصادی، اقتصادها بیشتر با محیطزیست سازگار می‌شوند چون آن‌ها سطح فن‌آوری و دانش خود را توسعه می‌دهند. درچنین مرحله‌ای، کشورها می‌توانند آلودگی‌های زیست‌محیطی را با تولید محصولات پیچیده‌تر با فن‌آوری‌های تولیدی پاک، کاهش دهند.

۲-۴- تولید ناخالص داخلی و ردپای اکولوژیکی

غالباً در مورد تأثیر تولید ناخالص داخلی بر ردپای اکولوژیکی از تفکر منحنی زیست‌محیطی کوزنتس استفاده می گردد، به عبارتی دیگر بررسی این تأثیر مانند بررسی تأثیر تولید و یا رشد اقتصادی بر انتشار آلاینده ها است. همانطور که مطالعات پیشین پاسخ مشخصی به تایید فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس ندارد لذا تاثیر تولید ناخالص داخلی بر ردپای اکولوژیکی نیز می‌تواند متفاوت باشد (Destek & Sinha, 2020; Swart & Brinkmann, 2020; Ulucak & Bilgili, 2018; Yilanci & Pata, 2020).

۲-۵- توسعه مالی و ردپای اکولوژیکی

در تئوری، توسعه مالی می تواند اثرات مطلوب و نامطلوب بر محیطزیست داشته باشد. فرانکل و رومر[11] (۱۹۹۹) اشاره می‌کنند که توسعه مالی در یک کشور می تواند موجب جذب هر چه بیشتر سرمایه مستقیم خارجی (FDI) و دستیابی به سطوح بالاتری از تکنولوژی گردد که این امر به نوبه خود منجر به رشد اقتصادی و بهبود کیفیت محیطزیست می‌شود. هم چنین طبق استدلال فرانکل و روز[12] (۲۰۰۲) دستیابی به فناوری های دوست دار محیطزیست

[11] Frankel & Romer

[12] (Frankel & Rose, 2002)

در کشورهای در حال توسعه، از نتایج سیاست توسعه مالی در این کشورها می‌باشد. تکنولوژی از دو طریق بر آلودگی محیطزیست تأثیر می گذارد، اول این که با بهبود تکنولوژی و استفاده از فناوری های جدید، توابع تولید احتیاج کمتری به کالای زیست‌محیطی خواهند داشت و یا این که به عنوان کالای مکمل تولید، میزان کمتری آلودگی تولید خواهد شد که به معنی تولید کالا همراه با تخریب کمتر محیطزیست است. دوم آنکه بهبود تکنولوژی می‌تواند در صنایع نیز رخ دهد به طوریکه این صنایع به نحو کاراتری عمل کرده و با هزینه کمتری نسبت به دفع آلودگی اقدام کنند که نتیجه هر دو اثر بهبود تکنولوژی ، کاهش در آلودگی است (Pajooian & Lashkaryzadeh, 2010).

نتایج تامازیان و رائو (۲۰۱۰) نشان می‌دهد که توسعه مالی با افزایش جریان مستقیم خارجی، فعالیت های تحقیق و توسعه و همچنین ایجاد منابع مالی با هزینه پایین برای اجرای پروژه های زیست‌محیطی در بنگاه های اقتصادی، می‌تواند باعث کاهش آلودگی محیطزیست گردد (Tamazian & Rao, 2010). از سوی دیگر، جنسن (۱۹۹۶) افزایش فعالیت های صنعتی ناشی از توسعه مالی را عاملی برای افزایش آلودگی صنعتی و تخریب محیطزیست می‌داند (Jensen, 1996).

توسعه مالی بطور غیر مستقیم از طریق افزایش سرمایه گذاری و رشد اقتصادی، مصرف انرژی را افزایش می‌دهد، همچنین توسعه مالی می‌تواند با فراهم کردن منابع مالی با هزینه و ریسک پایین، مصرف کنندگان را به خرید محصولات انرژی بر مانند اتومبیل، لوازم خانگی (یخچال، سیستم تهویه، ماشین ظرف شویی و ....) متمایل کند و از این طریق مستقیما بر مصرف انرژی مؤثر باشد (Sadorsky, 2011). افزایش مصرف انرژی بخصوص مصرف انرژیهای فسیلی نیز منجر به افزایش انتشار دی اکسید کربن شده و لذا آلودگی هر چه بیشتر محیطزیست را سبب می‌گردد. از سویی، توسعه مالی می‌تواند با فراهم آوردن منابع مالی با هزینه پایین، تولید کنندگان را به اجرای پروژه های زیست‌محیطی (مانند بهبود فرآیند تولید) تشویق کند و با بهبود فرآیند تولید و سرمایه گذاری برای دستیابی به فناوری های جدید تر مصرف انرژی را کاهش دهد (Sadorsky, 2010). بنابراین توسعه مالی از این طریق می‌تواند مستقیماً، با کاهش مصرف انرژی موجب کاهش انتشار آلاینده‌ها و آلودگی زیست‌محیطی گردد.

۲-۶- مصرف انرژی و ردپای اکولوژیکی

صنعتی شدن و در نتیجه جهانی شدن، مصرف انرژی را افزایش می‌دهد. این افزایش بی‌سابقه در تقاضای انرژی، عامل ایجاد تعادل بین رشد اقتصادی و کیفیت محیطی است که مدیریت آن آسان نیست. مشکلات در مدیریت این وضعیت ناشی از استفاده از سوخت

های فسیلی برای برآوردن نیازهای انرژی انسان است. مصرف بالاي انرژي در جهان دو نگرانی عمده در مورد آینده ایجاد نموده است. نخست، در مورد پایان پذیری انرژیهای فسیلی و دوم، انتشار گازهای آلاینده ناشی از مصرف انرژی (Al-Mulali, Ozturk, & Solarin, 2016; Charfeddine & Mrabet, 2017; Dogan & Seker, 2016). ابعاد نگرانی در این دو مورد بسیار گسترده است، از این جهت که تداوم عرضه انرژهای تجدیدناپذیر، با یک بحران جدی مواجه است و بدون شک آشکار شدن واقعیتهای مربوط به عرضه انرژی، اضطراب و ناهنجاری هایی را در جوامع گوناگون ایجاد خواهد نمود. منابع فراوان انرژي و ساختار توليدي كشور كه وابستگی بسیاري به مصرف انرژی به ویژه به انرژی های فسیلی دارد؛ و هم چنین افزایش رو به رشد استخراج منابع طبیعی موجب شده است تا همواره ارتباط تنگاتنگی میان مصرف انرژي و انتشار آلاينده هاي زيست محيطی مانند دي اکسیدکربن قابل درک باشد. از این رو انتشار دي اکسیدکربنِ ناشی از مصرف انرژي، چالشی اساسی براي آينده اقتصادي كشور بشمار ميرود (Puliafito, Puliafito, & Grand, 2008).

۳- پیشینه پژوهش

با مطالعه ادبیات موضوع ملاحظه می گردد که بیشتر مطالعات انجام شده در خصوص نقش پیچیدگی اقتصادی بر کیفیت محیطزیست به بررسی تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر انتشار دی اکسید کربن پرداخته اند و مطالعات بسیار محدودی بر نقش پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی تمرکز دارند. البته، نقش دیگر عوامل مانند مصرف انرژی، تولید ناخالص داخلی، توسعه مالی و تجارت در تبیین و توضیح ردپای اکولوژیکی بررسی شده است. همچنین، نتایج پژوهش هایی که بر انتشار دی اکسید کربن متمرکز هستند با پژوهش هایی که بر ردپای اکولوژیکی متمرکز هستند متفاوت و یا بعضاً متناقض است. نکته دیگر آن که بیشتر پژوهش هایی که ردپای اکولوژیکی را متغیر زیست‌محیطی در نظر گرفته اند دیدگاه بدبینانه‌ای نسبت به اثرات زیست‌محیطی پیچیده تر شدن اقتصادها دارند.

در اولین این مطالعات، کن و کوزگور[۱۳] (۲۰۱۷) با استفاده از روش DOLS[۱۴] برای دوره ۱۹٦٤-۲۰۱٤ نشان دادند پیچیدگی اقتصادی انتشار CO2 را در فرانسه کاهش می دهد. یافته‌های این مطالعه اعتبار فرضیه EKC را برای فرانسه تأیید می کند. دوگان و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از رویکرد رگرسیون ترکیبی برای ۵۵ کشور طی دوره ۱۹۷۱-۲۰۱٤ نشان

[13] (Can & Gozgor, 2017)

[14] Dynamic Ordinary Least Squares

دادند که پیچیدگی اقتصادی باعث افزایش انتشار CO2 در کشورهای با درآمد پایین و متوسط می شود، در حالی که انتشار CO2 کشورهای با درآمد بالا را کاهش می‌دهد (Doğan, Saboori, & Can, 2019). اسوارت و برینکمن (۲۰۲۰) با استفاده از برآوردگر اثرات ثابت طی دوره زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱٤ به بررسی رابطه بین پیچیدگی اقتصادی و متغیرهای کلیدی محیطی در برزیل می پردازند. نتایج نشان می‌دهند افزایش پیچیدگی تولید زباله را کاهش می‌دهد، اما آتش‌سوزی جنگل‌ها را افزایش می‌دهد. آنها همچنین ادعا کردند که پیچیدگی با جنگل زدایی بیشتر یا آلودگی هوا مرتبط نیست (Swart & Brinkmann, 2020). بالسالوبره- لورنس و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی تاثیر پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای G7 می‌پردازند. نتایج نشان می‌دهد پیچیدگی اقتصادی منجر به کاهش ردپای اکولوژیکی می‌شود (Balsalobre-Lorente et al., 2024).

لاپاتیناس و همکاران (۲۰۱۹) برای ۸۸ کشور در حال توسعه و توسعه یافته با استفاده از روش حداقل مربعات دو مرحله ای با اثرات ثابت طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ نتیجه گرفتند پیچیدگی اقتصادی شاخص های خاص کیفیت هوا مانند CO2، انتشار و مواد خاص را افزایش می‌دهد. نتایج آنها همچنین نشان داد که فرضیه EKC معتبر است (Boleti, Garas, Kyriakou, & Lapatinas, 2021). نیگو و تئودورو (۲۰۱۹) در یک مطالعه جامع برای ۲۵ کشور اروپایی با استفاده از روش FMOLS [15] و DOLS نشان می دهند ساختار اقتصادی پیچیده و الگوی مصرف انرژی به طور قابل‌توجهی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای فشار وارد می‌کنند. به طور کلی، این مطالعه استدلال می‌کند که با بهبود پیچیدگی اقتصادی و استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر، خطر آلودگی زیست‌محیطی بالاتری وجود دارد (Neagu & Teodoru, 2019). یلنسی و پاتا (۲۰۲۰) رابطه کوتاه‌مدت و بلندمدت بین رشد اقتصادی، پیچیدگی اقتصادی، مصرف انرژی و ردپای زیست‌محیطی در چین را طی دوره ۲۰۱۶-۱۹۶۵ تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد که پیچیدگی اقتصادی، مصرف انرژی و رشد اقتصادی منجر به گسترش ردپای اکولوژیکی در چین شده است (Yilanci & Pata, 2020). نیگو (۲۰۲۰) به بررسی تاثیر پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی در ٤٨ اقتصاد با پیچیدگی بالا می پردازد. شاخص پیچیدگی اقتصادی تاثیر مثبت و معنی دار بر ردپای اکولوژیکی دارند (Neagu, 2020). شهزاد و همکاران (۲۰۲۱) رابطه بین پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی را بررسی کردند، نشان دادند که پیچیدگی اقتصادی و مصرف انرژی سوخت فسیلی به دلیل کاربرد آنها در ایالات متحده طی دوره ۱۹٦٥-۲۰۱۷، ردپای اکولوژیکی را افزایش داده است (Shahzad, Fareed, Shahzad, & Shahzad, 2021).

[15] Fully Modified Ordinary Least Squares

نیگو (۲۰۱۹) برای ۲۵ کشور منتخب اتحادیه اروپا (اتحادیه اروپا) طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ با استفاده از رگرسیون چند جمله ای همزمان، FMOLS و DOLS یک رابطه U معکوس بین پیچیدگی اقتصادی و انتشار CO2 برای کل کشورهای بلژیک، فرانسه، فنلاند، ایتالیا، سوئد و انگلیس نتیجه گرفتند (Neagu, 2019).

در خصوص تأثیر دیگر عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی، اولوکاک و بیلگیلی (۲۰۱۸) با استفاده از متغیر ردپای اکولوژیکی به عنوان شاخصی برای تخریب محیطزیست، فرضیه EKC را در کشورهای با درآمد پایین، بالا و متوسط برای سال های ۱۹۶۱-۲۰۱۳ تأیید کردند (Ulucak & Bilgili, 2018). دستک و شینها (۲۰۲۰) نشان می‌دهند که در کشورهای سازمان همکاری اقتصادی و توسعه در دوره ۱۹۸۰-۲۰۱٤ رابطه U شکل بین رشد اقتصادی و ردپای اکولوژیکی وجود دارد. علاوه بر این، نتیجه‌گیری می‌شود که افزایش مصرف انرژی تجدیدپذیر باعث کاهش ردپای اکولوژیکی و افزایش مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر باعث تخریب محیطزیست می‌شود (Destek & Sinha, 2020). اولاح و همکاران (۲۰۲۱) برای ۱۵ اقتصاد مصرف کننده انرژی تجدیدپذیر در جهان برای دوره ۱۹۹۶-۲۰۱۸ (Ullah, Ahmed, Raza, & Ali, 2021)، شارما و همکاران (۲۰۲۱) در هشت کشور در حال توسعه جنوب و جنوب شرق آسیا در دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ (Sharma, Sinha, & Kautish, 2021)، انصاری و همکاران (۲۰۲۱) در کشورهای پرمصرف انرژی تجدیدپذیر در بازه زمانی ۱۹۹۱-۲۰۱۶ (Ansari, Haider, & Masood, 2021)، میائو و همکاران (۲۰۲۲) برای نمونه ای از کشورهای تازه صنعتی شده[۱۶] برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۸ (Miao, Razzaq, Adebayo, & Awosusi, 2022)، آبید و همکاران (۲۰۲۲) برای عربستان سعودی برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۷ (Abid, Gheraia, & Abdelli, 2022) و لی و همکاران (۲۰۲۲) برای نمونه ای از ۱۲۰ کشور برای دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۴ استدلال کردند که مصرف انرژی تجدیدپذیر ردپای اکولوژیکی را کاهش می‌دهد و در نتیجه به کیفیت محیطی کمک می‌کند (Li, Wang, & Wang, 2022). اوزترک و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای جنوب آسیا می‌پردازد (Ozturk, Farooq, Majeed, & Skare, 2024). این یافته‌ها از منحنی کوزنتس زیست‌محیطی و فرضیه‌های پناهگاه آلودگی برای اقتصادهای جنوب آسیا پشتیبانی می‌کند. علاوه بر این، یافته‌های تجربی نشان می‌دهد که توسعه مالی حفظ محیطزیست را افزایش می‌دهد در حالی که مصرف انرژی به طور قابل ملاحظه ای محیطزیست کشورهای منتخب جنوب آسیا را مختل می‌کند. در مقابل، برخی مطالعات

[۱۶] این کشورها شامل، برزیل،چین، هند، مکزیک، مالزی، فیلیپین، آفریقای جنوبی، ترکیه، اندونزی و تایلند است.

نشان می‌دهند انرژی‌های تجدیدپذیر نقش کاهشی در ردپای اکولوژیکی ندارند. ناتانیل و خان (۲۰۲۰) دریافتند که انرژی‌های تجدید ناپذیر به طور قابل توجهی به تخریب محیطزیست در کشورهای آسه آن کمک می کند، در حالی که هیچ رابطه معنی داری بین انرژی‌های تجدیدپذیر و ردپای اکولوژیکی برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۶ وجود ندارد (Nathaniel & Khan, 2020). به طور مشابه، ناتانیل و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که انرژی‌های تجدیدپذیر نقش مهمی در کیفیت زیست‌محیطی در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۶ برای کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا نداشته است (Nathaniel, Anyanwu, & Shah, 2020).

در ایران نیز مطالعاتی در خصوص نقش پیچیدگی اقتصادی در کیفیت محیطزیست انجام شده است. عزیزی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر آلودگی زیست‌محیطی پرداخته اند. آنها با استفاده از داده های ۹۹ کشور در بازه زمانی ۱۹۹۲-۲۰۱۷ نشان می‌دهند پیچیدگی اقتصادی به طور معنی‌داری منجر به کاهش آلودگی می‌شود (Azizi, Daraei, & Naseri Boroujeni, 2019). سپهوند و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از داده های بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۸ و روش رگرسیون حداقل مربعات دومرحله‌ای 2SLS و EGLS، علاوه بر بررسی تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر عملکرد زیست‌محیطی ۱۸ کشور منطقه منا، به بررسی فرضیه منحنی کوزنتس در این کشورها پرداخته شده است. نتایج این پژوهش، نشان‌دهنده وجود رابطه معکوس و معنی‌دار بین شاخص پیچیدگی اقتصادی و شاخص عملکرد زیست‌محیطی است، به گونه ای که با افزایش یک واحدی شاخص پیچیدگی اقتصادی، شاخص عملکرد زیست‌محیطی بیش از ۷ واحد کاهش می یابد. همچنین نتایج این پژوهش، نشان دهنده تأثیر معنی‌دار تحصیلات، شهرنشینی و صنعتی شدن بر شاخص عملکرد زیست‌محیطی بوده، و منحنی Uوارون زیست‌محیطی کوزنتس، در این مطالعه تأیید نشده است (Sepahvand, Sayehmiri, & Shirkhani, 2021). مریدیان و همکاران(۱۴۰۰) به بررسی نقش پیچیدگی اقتصادی در ردپای بوم شناختی در ایران می پردازند. برای تجزیه و تحلیل روابط کوتاه مدت و بلند مدت میان رشد اقتصادی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، مصرف انرژی و ردپای بوم شناختی از روش Fourier ARDL و آزمون علیّت با تغییر زمان استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد مصرف انرژی و رشد اقتصادی باعث افزایش ردپای بوم شناختی در کوتاه مدت و بلندمدت می‌شود. پیچیدگی اقتصادی تاثیر کاهنده بر ردپای بوم شناختی دارد. لعل خضری و آشنا(۱۴۰۱) نشان می‌دهند نتایج حاصل از الگو حاکی از آن است که با افزایش پیچیدگی اقتصادی، انتشار دی اکسیدکربن ۲ درصد کاهش می‌یابد و با کاهش پیچیدگی اقتصادی، انتشار دی اکسیدکربن به ترتیب ۱۲ و ۱ درصد در بلندمدت و کوتاه مدت افزایش می‌یابد (Moridian, Yarmohammadian, Motalebi, & Shadmehr, 2021). محمدی و

همکاران (۱۴۰۲) نشان می‌دهند پیچیدگی اقتصادی به طور معنی‌داری منجر به کاهش انتشار دی اکسید کربن در کشورهای در حال توسعه می‌گردد (mohammadi, Sahabi, Heydari, & Sadeghi, 2023). سالاروند و حسنوند (۱۴۰۳) در کشورهای نوظهور نشان می‌دهند با توجه به متغیر حد آستانه پیچیدگی اقتصادی ارتباط منفی و معنی‌داری میان پیچیدگی اقتصادی و توسعه پایدار در رژیم اول و قبل از حد آستانه و ارتباط مثبت و معنی‌داری میان پیچیدگی اقتصادی و توسعه پایدار در رژیم دوم و قبل از حد آستانه وجود دارد (Salarvand & Hasanvand.2024)

گروهی از مطالعات به دیگر عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی می‌پردازند. مولایی و بشارت (۱۳۹۴) در بازه زمانی ۱۹۶۵-۲۰۱۱ نشان می‌دهند افزایش تولید ناخالص داخلی سرانه هم در کوتاه مدت هم در بلندمددت تاثیر مثبت بر ردپای اکولوژیکی سرانه در ایران دارد (Molaei & Basharat, 2015). پارسا شریف و همکاران (۱۳۹۹) نشان می‌دهند بین ردپای اکولوژیکی و متغیرهای مصرف انرژی و توسعه مالی رابطه مثبت و بین ردپای اکولوژیکی و متغیر تجارت رابطه منفی برقرار است (parsasharif, AMIRNEJAD, & Taslimi, 2021). اصفهانی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی اثر پویای مصرف انرژیهای تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر ردّپای اکولوژیک در کشورهای درحال توسعهٔ منتخب (رهیافت گشتاورهای تعمیم یافتهGMM) می‌پردازند. نتایج حاصل از برآورد نشان داد که مصرف انرژیهای تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر بر ردّپای اکولوژیکی کشورهای منتخب درحال توسعه به ترتیب اثر مثبت و منفی داشته اند (Esfahani, Ghobadi, & Azarbaiejani, 2022). محنت فر و همکاران(۱۴۰۲) به بررسی تأثیر توسعه فناوري و گسترش تجارت بر ردپاي اکولوژیکي در ایران پرداخته اند. در پایان، برخی مطالعات به سنجش ردپای اکولوژیکی می‌پردازند (Mehnatfar, Osmani, Cheshomi, & Argha, 2023). صادقی و همکاران(۱۳۹۳) به سنجش رد پای آب بخش های مختلف اقتصادی با روش ماتریس حسابداری اجتماعی(SAM) می‌پردازند. کل ردپاي آب داخلی و وارداتی در بخشهاي مختلف اقتصادي برابر با ۹۷/۷ میلیارد متر مکعب بوده است که ۸۸ درصد از آن داخلی و ۱۲ درصد دیگر وارداتی بوده است. تولید در زیربخشهاي اقتصادي گندم، گاو و گاومیش، گوسفند، بز و سایر حیوانات زنده بجز ماکیان، سایر نباتات صنعتی، ساخت محصولات غذایی و انواع آشامیدنیها بیشترین رد پاي داخلی و وارداتی را داشته و در مجموع ۶۶ درصد از ردپاي آب کل بخشهاي اقتصادي را به خود اختصاص داده اند. زیر بخشهاي خدمات رتبه هاي آخر را در این زمینه به خود اختصاص داده اند (Sadeghi, Karimi Tekanlou, Motafker Azad, & Andayesh, 2016). نتایج مطالعه اسکندری‌نسب و همکاران (۱۴۰۳) بیانگر اثر

منفی و معنی‌دار سرریزهای تکنولوژی از کانال سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی بر آلودگی محیطزیست کشورهای منتخب نوظهور بوده است. همچنین اثر سرریز تکنولوژی از کانال واردات کالاهای سرمایه‌ای و واسطه‌ای بر آلودگی محیطزیست طبق نتایج بدست آمده منفی و معنی‌دار می‌باشد (Eskandari Nasab, Zare Mehrijerdi, & Jalaee, 2025).

در مطالعه حاضر، تلاش شد بر کشورهای آسیایی که وضعیت مناسبی از نظر کیفیت محیطزیست در جهان ندارند تمرکز شود. با توجه به متفاوت بودن نتایج در ادبیات موضوع مورد بررسی از مدل ترکیبی آستانه‌ای بهره گرفته شد و اجازه داده شد که تاثیر پیچیدگی بر ردپای اکولوژیکی تابع موقعیت کشورها از نظر پیچیدگی باشد. همچنین به منظور راستی آزمایی نتایج مدل آستانه‌ای، مدل ترکیبی غیر آستانه‌ای با لحاظ این شرایط که تأثیر پیچیدگی بر ردپای اکولوژیکی تابعی از میزان شاخص پیچیدگی است نیز برآورد شد.

۴- روش شناسی پژوهش

در این پژوهش به منظور برآورد تأثیر شاخص پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی از مدل آستانه‌ای زیر بهره می بریم.

۴-۱- مدل ترکیبی آستانه‌ای با اثرات ثابت: مدل تک آستانه‌ای

مدل تک آستانه‌ای زیر را در نظر می گیریم:

$$y_{it} = \mu + X_{it}(q_{it} \prec \gamma)\beta_1 + X_{it}(q_{it} \geq \gamma)\beta_2 + u_i + e_{it} \quad (۶)$$

q_{it} متغیر آستانه‌ای و γ پارامتر آستانه‌ای است که معادله را به دو رژیم با ضرایب β_1 و β_2 تقسیم می‌کند. پارامتر u_i اثرات فردی را نشان می‌دهد و e_{it} جمله اختلال است. معادله (٦) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$y_{it} = \mu + X_{it}(q_{it}, \gamma)\beta + u_i + e_{it} \quad (۷)$$

که

$$X_{it}(q_{it}, \gamma) = \begin{Bmatrix} X_{it} I(q_{it} \prec \gamma) \\ X_{it} I(q_{it} \geq \gamma) \end{Bmatrix}$$

با γ مفروض، تخمین OLS از β عبارتست از:

$$\hat{\beta} = \left\{ X^*(\gamma)' X^*(\gamma) \right\}^{-1} \left\{ X^*(\gamma)' y^* \right\} \quad (۸)$$

که X^* و y^* انحراف متغیرها از میانگین هستند. مجموع مربعات پسماندها (RSS) عبارتست از $\hat{e}^{*\prime}\hat{e}^*$. به منظور برآورد γ مجموع مربعات پسماندها حداقل می‌گردد:

$$\hat{\gamma} = \arg_{\gamma} \min S_1(\gamma) \quad (۹)$$

اگر γ معلوم باشد، مدل هیچ تفاوتی با مدل مبتنی بر روش OLS ندارد. اگر γ مجهول باشد، مشکل پارامتر مزاحم وجود دارد که برآوردگر γ را با توزیع غیر استاندارد می‌سازد. هانسن(۱۹۹۹) اثبات می‌کند که $\hat{\gamma}$ تخمین زن سازگاری از γ است.

روابط (٦) و (۷) در پژوهش حاضر به صورت رابطه (۱۰) نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} LogEF_{it} = {} & \alpha_0 + \alpha_1 LogGDP_{it} + \alpha_2 (LogGDP_{it})^2 \\ & + \alpha_3 LogECI_{it}(ECI \prec \gamma) + \alpha_4 LogECI_{it}(ECI \geq \gamma) \\ & + \alpha_5 LogREC_{it} + \alpha_6 LogFEC_{it} + \alpha_7 LogFD_{it} + e_{it} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

EF رد پای اکولوژیکی، GDP تولید ناخالص داخلی سرانه، REC مصرف انرژی تجدید پذیر، FEC مصرف انرژی فسیلی، ECI شاخص پیچیدگی اقتصادی و FD شاخص توسعه مالی و ℓ جمله اختلال است. i بیانگر مقطع(کشور) و t بیانگر زمان است. در نظر گرفتن مربع تولید ناخالص داخلی به عنوان یک متغیر توضیحی امکان بررسی فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس را فراهم می‌کند. γ مقدار آستانه‌ای شاخص پیچیدگی اقتصادی است. α_3 تاثیر شاخص پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی در مقادیر کمتر از مقدار آستانه‌ای شاخص پیچیدگی اقتصادی و α_4 تاثیر شاخص پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی در مقادیر بیشتر از مقدار آستانه‌ای شاخص پیچیدگی اقتصادی است.

۲-۴- مدل ترکیبی غیر آستانه‌ای

به منظور راستی آزمایی برآوردهای آستانه‌ای، رابطه (۱۱) که در قالب یک مدل ترکیبی غیر آستانه‌ای است برآورد می‌شود.

$$y_{it} = \beta' X_{it} + \eta_i + \varepsilon_{it} \quad (۱۱)$$

y متغیر وابسته و X بردار متغیرهای توضیحی است. پارامتر η_i اثرات فردی را نشان می‌دهد و ε_{it} جمله اختلال است. رابطه (۱۱) در پژوهش حاضر به صورت رابطه

(۱۳) برآورد می‌شود. با در نظر گرفتن مربع شاخص پیچیدگی اقتصادی امکان بررسی اثرات دوگانه این شاخص بر ردپای اکولوژیکی بررسی می‌گردد.

$$LogEF_{it} = \alpha_{.} + \alpha_{1} LogGDP_{it} + \alpha_{2} (LogGDP_{it})^{2} + \alpha_{3} LogECI_{it} + \alpha_{4} (LogECI_{it})^{2} + \alpha_{5} LogREC_{it} + \alpha_{6} LogFEC_{it} + \alpha_{7} LogFD_{it} + \varepsilon_{it} \quad (۱۲)$$

اگر $\alpha_{3} = \alpha_{4} = 0$ ، بین شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی یا یک الگوی ثابت وجود خواهد داشت یا هیچ رابطه ای وجود نخواهد داشت. اگر $\alpha_{3} > 0$ و $\alpha_{4} = 0$ ، یک رابطه رو به افزایش یکنواخت بین شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی وجود دارد. اگر $\alpha_{3} < 0$ و $\alpha_{4} = 0$ ، یک رابطه کاهشی یکنواخت بین شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی وجود دارد. اگر $\alpha_{3} > 0$ و $\alpha_{4} < 0$ ، یک رابطه U شکل معکوس بین شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی وجود دارد. اگر $\alpha_{3} < 0$ و $\alpha_{4} > 0$ ، یک رابطه U شکل بین شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی وجود دارد. اگر $\alpha_{3} > 0$ و $\alpha_{4} > 0$ ، یک رابطه U شکل بین شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی وجود دارد(نقطه برگشتی در مقدار منفی شاخص پیچیدگی اقتصادی قرار دارد). اگر $\alpha_{3} < 0$ و $\alpha_{4} < 0$ ، یک رابطه U شکل معکوس بین شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی وجود دارد(نقطه برگشتی در مقدار منفی شاخص پیچیدگی اقتصادی قرار دارد).

۳-۴- داده

کشورهای مورد مطالعه چین، ایران، ژاپن، کره جنوبی و هند است. دوره زمانی مطالعه ۲۰۲۱-۱۹۹۵ است. قابل توجه است کشورهای چین، هند، ژاپن، کره جنوبی و ایران به ترتیب حایز رتبه ۱، ۳، ۶، ۸ و ۹ در میان کشورهای جهان(کشور۲۱۹) بر حسب انتشار دی اکسید کربن هستند. همچنین، بر اساس رتبه بندگی Atlas Economic of compelexity کشورهای ژاپن، کره جنوبی، چین، هند و ایران به ترتیب حایز رتبه ۱، ۷ و ۱۸، ۵۲ و ۷۳ در میان کشورهای جهان (۱۳۳ کشور) بر حسب پیچیدگی اقتصادی هستند. **جدول ۱** گزارشی از متغیرهای مدل و منبع گردآوری اطلاعات هر متغیر ارایه می‌دهد.

جدول ۱. متغیرها و منبع داده ها
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Table 1. Variables and Data Source
Source: Research Findings

متغیر	تعریف	واحد	منبع
EF	ردپای اکولوژیکی	(gha per person)	https://data.footprintnetwork.org
GDP	تولید ناخالص داخلی	GDP per capita (constant 2015 US$)	https://worldbank.org
FEC	مصرف انرژی فسیلی	Fossil fuels per capita (kWh)	https://outworldindata.org
REC	مصرف انرژی تجدید پذیر	per-capita-renewables(kWh)	https://outworldindata.org/renewable-energy
ECI	شاخص پیچیدگی اقتصادی		http://atlas.cid.harvard.edu/rankings
FD	شاخص توسعه مالی	Stock market capitalization to GDP (%)	https://worldbank.org

جدول ۲ گزارشی از توصیف آماری متغیرهای مدل ارایه می‌دهد.

جدول ۲. خلاصه آماری داده ها
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Table 2. Statistical Summary of Data
Source: Research Findings

متغیر	مشاهده	میانگین	انحراف معیار	کمترین	بیشترین
EF	۱۳۵	۳/۳٤	۱/۷۰	۰/۷۱۹۹	٦/۱۷۲
GDP	۱۳۵	۱۳۵۳۹/۱	۱۲۹۰۹/۰۹	٦۱۸/۱۳۹۳	۳٦۱۳۸/۵۳

REC	۱۳۵	۱۲۱۸/۴۴۴	۱۱۷۱/۵۶	۱۵۲/۵۷	۴۵۹۰/۱۷
FEC	۱۳۵	۲۷۴۴۹/۵۲	۱۶۶۶۳/۴۳	۲۸۱۴/۲۷	۵۹۷۰۷/۲۹
ECI	۱۳۵	۰/۹۳۴۸	۱/۱۴۷	-۱/۳۲۳۲	۲/۸۵۸۸
FD	۱۲۹	۱۱۸/۶۹	۶۸/۷۱	۳۵/۲۲	۲۸۷/۸۵

مطابق با **جدول ۲** بیشترین مقدار شاخص پیچیدگی اقتصادی ۲/۸ است که مربوط به کشور ژاپن است و کمترین مقدار آن ۱/۳۲- است که مربوط به کشور ایران است. بیشترین مقدار ردپای اکولوژیکی سرانه ۶/۱۷ است که مربوط به کشور کره جنوبی است و کمترین مقدار آن ۰/۷۱ است که مربوط به کشور هند است.

لازم به ذکر است در برآورد مدل از همه متغیرها به جز شاخص پیچیدگی اقتصادی لگاریتم گرفته شده است. دلیل اینکه از این متغیر لگاریتم گرفته نشده است منفی بودن آن برای برخی سال ها در برخی کشورها است.

۵- یافته‌های تجربی و بحث

در ادامه تلاش بر این است که مدل پژوهش، روابط رگرسیونی (۱۰) و (۱۲) برآورد شود. در مطالعه داده‌های ترکیبی، با توجه به در نظر گرفتن کشورهای مختلف می‌بایست قبل از انجام آزمون‌های پایایی متغیرهای مدل وابستگی مقطعی بررسی شود. وابستگی مقطعی مسئله مهمی در اقتصادسنجی داده‌های ترکیبی است. با وجود همبستگی مقاطع، نتایج تخمین به طور کلی ناسازگار و تورش‌دار (به سمت بالا) می‌شوند. بنابراین، آزمون وابستگی مقطعی قبل از انجام هر تجزیه و تحلیلی ضروری است.

۵-۱- آزمون وابستگی مقطعی

اگر وجود وابستگی مقطعی در داده ها تایید شود، می‌بایست از آزمون های ریشه واحد و هم انباشتگی ای که این وابستگی را لحاظ می‌کنند استفاده کرد. در غیر اینصورت، از آزمون های ریشه واحد و هم انباشتگی معمولی می‌توان استفاده کرد. در این مطالعه، آزمون وابستگی مقاطع بر اساس آزمون CD[17] پسران انجام می‌شود (پسران[18]، ۲۰۰۴). آماره CD بر اساس معادله (۷) محاسبه می‌شود:

[17]Cros-Section Dependency

[18]Pesaran

$$CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}}\left(\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\hat{\rho}_{ij}\right) \quad (13)$$

T فاصله زمانی، N تعداد مقاطع و $\hat{\rho}_{ij}$ همبستگی pair-wise میان مقاطع است.

نتایج این آزمون در **جدول ۳** گزارش شده است.

جدول ۳. آزمون وابستگی مقطعی
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Table 3. Cross-Sectional Dependence Test
Source: Research Findings

نتیجه	مقداراحتمال	آماره
عدم وجود وابستگی مقظعی	۰/۲۷۷۶	۱/۰۸۶

مطابق با مقدار احتمال، فرضیه مقابل دال بر وجود وابستگی مقطعی رد می‌شود. بنابراین بین مقاطع(کشورها) وابستگی وجود ندارد. این بدان مفهوم است که در کشورهای مورد مطالعه یک شوک که یک کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد کشور دیگر را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. بنابراین برای انجام آزمون ریشه واحد و هم انباشتگی از آزمون های نسل اول استفاده می‌شود.

۲-۵- آزمون ریشه واحد

برای بررسی ریشه واحد متغیرها از آزمون ایم، پسران و شین(IPS) و لوین، لین و چو(LLC) استفاده شده است. **جدول ٤** نتایج این آزمون را گزارش می‌دهد.

جدول ٤. آزمون ریشه واحد
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Table 4. Unit Root Test
Source: Research Findings

متغیر	آماره LLC	مقدار احتمال	نتیجه	آماره IPS	مقدار احتمال	نتیجه
LEF	-۲/۷۵	۰/۰۳۲۹	I(0)	-۱/۵۸۰۸	۰/۴۲۰۱	I(1)
LGDP	-۱/۷۹۰۱	۰/۰۶۷۳	I(0)	-۱/۵۵۳۶	۰/۴۳۹۴	I(1)
$LGDP^2$	-۱/۲۳۸۹	۰/۱۷۴۲	I(1)	-۱/۲۱۷۸	۰/۷۶۰۸	I(1)
LREC	۰/۶۵۱۳	۰/۹۶۱۶	I(1)	-۰/۱۴۹۸	۰/۹۹۹۹	I(1)
LFEC	-۲/۷۳۶۲	۰/۰۲۷۶	I(0)	-۲/۷۳۶۲	۰/۰۲۷۶	I(0)
ECI	-۲/۰۶۳۹	۰/۱۷۲۰	I(1)	-۱/۶۶۸۷	۰/۳۲۰۹	I(1)
ECI2	-۱/۷۴۶۹	۰/۲۸۴۹	I(1)	-۱/۴۶۳۵	۰/۵۴۲۰	I(1)

LFD	-۳/۱۸۱۴	۰/۰۴۱۹	I(0)	-۰/۸۲۹۰	۰/۹۷۱۸	I(1)

مطابق با **جدول ٤** بر اساس هر دو آزمون می‌باید آزمون هم انباشتگی را به منظور بررسی ارتباط بلندمدت میان متغیرهای مدل انجام داد.

۵-۳- آزمون هم انباشتگی

به منظور انجام آزمون هم انباشتگی از آزمون های کائو و فیلیپس-پرون استفاده می شود. نتایج این آزمون در **جدول ۵** گزارش می‌دهد.

جدول ۵. آزمون هم انباشتگی
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Table 5. Cointegration Test
Source: Research Findings

آزمون کائو	آماره	مقداراحتمال	آزمون فیلیپس-پرون	آماره	مقداراحتمال
Modified Dickey-Fuller t	-۵/۱۹۴۴	۰/۰۰۰	Modified Phillips-Perron t	۱/۶۱۳۱	۰/۰۵۳
Dickey-Fuller t	-۳/۷۰۲۳	۰/۰۰۰			
Augmented Dickey-Fuller t	-۲/۲۸۸۰	۰/۰۱۱	Phillips-Perron t	-۲/۷۳۳۳	۰/۰۰۳
Unadjusted modified Dickey-Fuller t	-۶/۵۷۷۱	۰/۰۰۰			
Unadjusted Dickey-Fuller t	-۳/۹۸۶۱	۰/۰۰۰	Augmented Dickey-Fuller t	-۲/۸۴۷۱	۰/۰۰۲

مطابق با آزمون هم انباشتگی کائو و فیلیپس-پرون ارتباط بلند مدت میان متغیرهای مدل تایید می‌شود.

۵-۴- برآورد مدل

در ادامه، ابتدا مدل رگرسیونی (۱۰) برآورد می‌شود. نتایج در **جدول ٦** گزارش می‌شود. مطابق با **جدول ٦**، مقدار آستانه‌ای شاخص پیچیدگی اقتصادی ۱/۱۲ برآورد شده است. در مقادیر

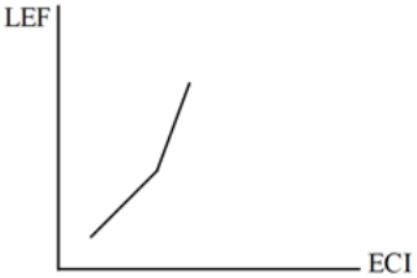
کمتر از ۱/۱۲ با افزایش پیچیدگی اقتصادی ردپای اکولوژیکی با نرخ ۰/۰۳۴ افزایش می‌یابد. این در حالیست که در مقادیر بیشتر از ۱/۱۲ با افزایش پیچیدگی اقتصادی ردپای اکولوژیکی با نرخ ۰/۰۷۶۵(بیشتر از ۰/۰۳۴) افزایش می‌یابد.

جدول ٦. برآورد مدل ترکیبی آستانه‌ای
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Table 6. Estimation of Panel Threshold Model
Source: Research Findings

متغیر	ضریب	مقدار احتمال
LGDP	۰/۳۸۱۸	۰/۰۰۹
$LGDP^2$	-۰/۰۵۵۷	۰/۰۰۹
LRE	-۰/۰۹۴	۰/۰۲٦
LFE	۰/٦۳۷۹	۰/۰۰
LFD	-۰/۰۹	۰/۰۰
ECI<Y	۰/۰۳٤	۰/۰۰۱
ECI>Y	۰/۰۷٦٥	۰/۰۰۰
تعداد مشاهدات	۱۱۰	
F (7,98) **مقدار احتمال**	۲۷۲/۷۳ ۰/۰۰	
مقدار آستانه ای شاخص پیچیدگی اقتصادی **حد بالا و پایین برآورد مقدار آستانه‌ای**	۱/۱۲۹۸ (۰/۹۸۸۲ ۱/۱۵۷۷)	

لذا، بر اساس برآورد آستانه‌ای شاخص پیچیدگی اقتصادی تاثیر نامتقارن و یا غیر خطی بر ردپای اکولوژیکی دارد. **نمودار ۲** تاثیر نامتقارن پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی را بر اساس برآوردهای آستانه‌ای نشان می‌دهد.



نمودار ۲. تغییر ردپای اکولوژیکی با شاخص پیچیدگی اقتصادی در مدل ترکیبی آستانه‌ای
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Figure 2. Change of Ecological Footprint with Economic Complexity Index in Panel Threshold Model
Source: Research Findings

مطابق با **جدول ٦**، مصرف انرژی تجدید پذیر و مصرف انرژی فسیلی به ترتیب به طور معنی داری منجر به کاهش و افزایش ردپای اکولوژیکی می شوند. توسعه مالی تاثیر منفی و معنی دار بر ردپای اکولوژیکی دارد. فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس در این گروه از کشورها مورد تایید است.

به منظور بررسی دقیق تر نقش پیچیدگی اقتصادی در ردپای اکولوژیکی، مدل رگرسیونی (۱۲) برآورد می شود. در این مدل که یک مدل غیر آستانه ای است متغیر پیچیدگی اقتصادی به صورت ECI و ECI^2 در نظر گرفته می‌شود تا بتوان تاثیر مقدار شاخص پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی را تحلیل نمود. نتایج این برآورد در **جدول ۷** گزارش می‌شود.

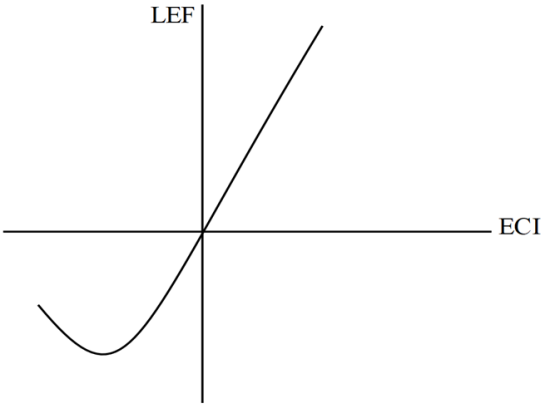
جدول ۷. برآورد مدل ترکیبی غیر آستانه‌ای
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Table 7. Estimation of Panel Non-Threshold Model
Source: Research Findings

متغیر	ضریب	مقدار احتمال
LEF (-1)	-۰/۰۲	۰/۷۷۱
LGDP	۰/۴۷۵۹	۰/۰۱۳
$LGDP^2$	-۰/۰٤٤	۰/۰۵۸
LRE	-۰/۰۷۶	۰/۰۰۰
LFE	۰/۵۰۲۱	۰/۰۰۰

LFD	-۰/۰٤٤	۰/۱۲۴
ECI	۰/۰۳۸۵	۰/۰۰۱
ECI^2	۰/۰۱۱۹	۰/۰۰۳
تعداد مشاهدات	۱۰۰	
Wald chi2(8)	۱۰۹۴/۱۲	
مقدار احتمال	۰/۰۰۰	

مطابق با **جدول ۷**، ضریب ECI و ECI^2 مثبت و معنی دار برآورد شده است. این بدان مفهوم است که در سطوح بسیار پایین دانش و پیچیدگی اقتصادی(شاخص پیچیدگی اقتصادی کمتر از $ECI = -۱/۶$)، با پیچیده ترشدن اقتصادها ردپای اکولوژیکی کاهش می‌یابد، اما بعد از آن(شاخص پیچیدگی اقتصادی بیشتر از $ECI = -۱/۶$)، با افزایش پیچیدگی اقتصادی رد پای اکولوژیکی با نرخ افزایشی افزایش می‌یابد. شیب منحنی $۰/۰۲۳۸ECI + ۰/۰۳۸۵$ است.



نمودار ۳. تغییر ردپای اکولوژیکی با شاخص پیچیدگی اقتصادی در مدل ترکیبی غیر آستانه‌ای
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Figure 3. Change of Ecological Footprint with Economic Complexity Index in Panel Non-Threshold Model
Source: Research Findings

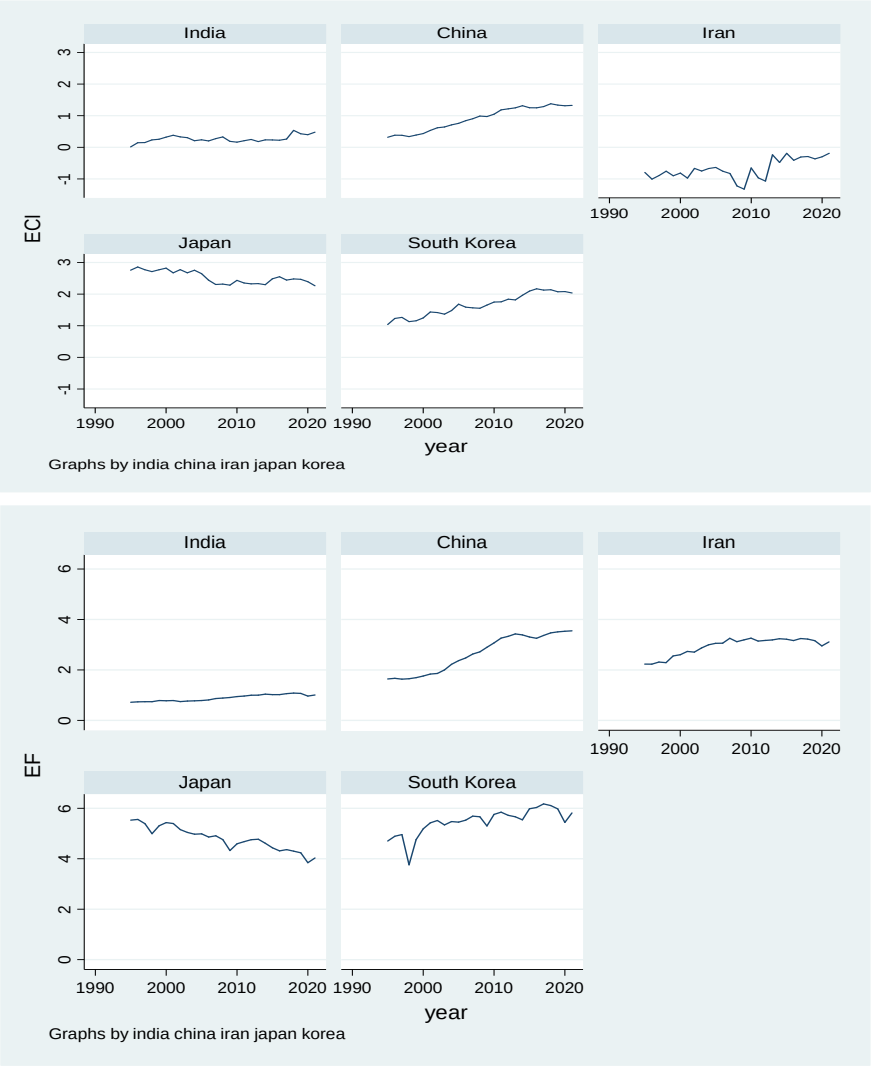
نمودار ۳ ارتباط ردپای اکولوژیکی با شاخص پیچیدگی اقتصادی در مدل ترکیبی غیر آستانه‌ای نمایش می‌دهد.

مصرف انرژی تجدید پذیر و مصرف انرژی فسیلی به ترتیب به طور معنی داری منجر به کاهش و افزایش ردپای اکولوژیکی می‌شوند. توسعه مالی تاثیر منفی و بی معنی بر ردپای اکولوژیکی دارد. فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس در این گروه از کشورها مورد تایید است. لذا، نتایج برآوردهای آستانه‌ای و غیر آستانه‌ای در خصوص نقش پیچیدگی اقتصادی در ردپای اکولوژیکی تایید کننده همدیگر است.

۵-۵- بحث

مطابق با برآوردهای ترکیبی آستانه‌ای، با افزایش شاخص پیچیدگی اقتصادی و به تعبیری با پیچیده ترشدن اقتصادهای آسیایی منتخب تا مقدار شاخص پیچیدگی اقتصادی ۱/۱۲، لگاریتم ردپای اکولوژیکی با شیب و یا نرخ ۰/۰۳ و بعد از آن با شیب ۰/۰۸ افزایش می‌یابد. بنابراین، مدل ترکیبی آستانه‌ای نشان می‌دهد پیچیدگی اقتصادی به نفع محیطزیست این کشورها نیست. از سوی دیگر، مطابق با برآوردهای ترکیبی غیر آستانه‌ای انتظار می رود در مقادیر بسیار پایین پیچیدگی اقتصادی(کمتر از ۱/۶-)، با افزایش پیچیدگی اقتصادی لگاریتم ردپای اکولوژیکی کاهش و در مقادیر پیچیدگی اقتصادی بیشتر از ۱/۶-، با افزایش پیچیدگی اقتصادی لگاریتم ردپای اکولوژیکی با نرخ افزایشی افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر، در مقادیر پایین پیچیدگی اقتصادی، پیچیده شدن اقتصادهای آسیایی می‌تواند مزایا و منافع زیست‌محیطی ایجاد کند ولی در مقادیر پیچیدگی اقتصادی بالا، پیچیده شدن اقتصادها خسارات و آسیب های زیست‌محیطی ایجاد می‌کند.

به منظور راستی آزمایی نتایج و استنباط دقیق تر در خصوص ارتباط پیچیدگی اقتصادی و کیفیت محیطزیست کشورهای آسیایی منتخب، مسیر زمانی شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی در **نمودار ٤** گزارش می‌شود.



نمودار ٤. مسیر زمانی شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی
مأخذ: یافته‌های تحقیق

Figure 4. Time Path of Economic Complexity Index and Ecological Footprint
Source: Research Findings

مقایسه دو به دو مسیر زمانی شاخص پیچیدگی اقتصادی و ردپای اکولوژیکی کشورهای مورد مطالعه؛ چین، هند، ژاپن، ایران و کره جنوبی بسیار قابل توجه است. یک هم حرکتی میان این دو متغیر می توان شاهد بود. مطابق با نمودار، شاخص پیچیدگی اقتصادی در ایران نوسانات بیشتری نسبت به بقیه کشورها تجربه می کند. مطابق با داده های شاخص پیچیدگی اقتصادی، کمترین شاخص پیچیدگی را ایران با مقدار ۱/۳- تجربه کرده است. لذا انتظار می‌رود قسمت کاهنده ردپای اکولوژیکی در برآوردهای ترکیبی غیر آستانه‌ای بسیار کوتاه و زودگذر باشد. به عبارتی انتظار می‌رود با افزایش پیچیدگی اقتصادی و پیچیده تر شدن اقتصادهای آسیایی، این کشورها باید نگران آسیب های زیست‌محیطی پیچیده گی اقتصادهایشان باشند. در واقع، پیچیدگی اقتصادی می تواند ساختار اقتصادی و مصرف انرژی خاصی را برای کشورها ایجاد کند که محیطزیست را متأثر نماید. می توان استدلال نمود با افزایش پیچیدگی اقتصادی، ساختار اقتصادی کشورهای منتخب آسیایی به سمت صنایعی متمایل بوده است که شدت انرژی بالایی را تجربه کرده اند. سطوح پیچیدگی بالاتر می تواند منجر به افزایش مصرف انرژی گردد. همچنین، در فرایند پیچیده تر شدن این اقتصادها استفاده از دیگر منابع طبیعی افزایش یافته است.

اگر بخواهیم نتایج این مطالعه را در کنار نتایج مطالعات پیشین قرار دهیم باید عنوان کرد کن و کوزگور (۲۰۱۷) در فرانسه، دوگان و همکاران (۲۰۱۹) در ۵۵ کشور و بالسالوبره- لورنس و همکاران (۲۰۲۳) در کشورهای G7 نشان می دهند پیچیده تر شدن اقتصاد به نفع محیطزیست بوده است. همچنین، در مطالعات انجام شده در ایران عزیزی و همکاران (۱۳۹۸) در ۹۹ کشور، لعل خضری و آشنا(۱۴۰۱) در ایران، محمدی و همکاران(۱۴۰۲) در کشورهای در حال توسعه و مریدیان و همکاران(۱۴۰۰) در ایران نشان می‌دهند پیچیده تر شدن اقتصاد به نفع محیطزیست بوده است. لاپاتیناس و همکاران (۲۰۱۹) برای ۸۸ کشور در حال توسعه و توسعه یافته، نیگو و تئودورو (۲۰۱۹) در یک مطالعه جامع برای ۲۵ کشور اروپایی، یلنسی و پاتا(۲۰۲۰) در چین، نیگو (۲۰۲۰) در ٤٨ اقتصاد با پیچیدگی بالا و شهزاد و همکاران (۲۰۲۱) در ایالات متحده نشان می‌دهند پیچیده تر شدن اقتصاد به زیان محیطزیست بوده است. همچنین، در مطالعات انجام شده در ایران سپهوند و همکاران(۱۴۰۰) برای ۱۸ کشور منطقه منا نشان می‌دهند پیچیدگی اقتصادی باعث کاهش عملکرد زیست‌محیطی می‌شود. لذا، در مقایسه با ادبیات، مطالعه حاضر نشان می دهد که اولاً، اقتصادها صرفاً در سطوح بسیار پایین دانش و پیچیدگی اقتصادی می توانند از مزایا و منافع زیست‌محیطی بهره مند شوند. ثانیاً، آسیب ها و خسارات زیست‌محیطی پیچیده تر شدن اقتصادها وابسته به مقدار شاخص پیچیدگی اقتصادها است. یعنی پیچیدگی اقتصادی تأثیر نامتقارن بر ردپای اکولوژیکی و یا محیطزیست دارد. به گونه ای که در مقادیر بالاتر

پیچیدگی اقتصادی، افزایش پیچیدگی می تواند ردپای اکولوژیکی را با نرخ بیشتری افزایش دهد.

۶- نتیجه‌گیری و توصیه سیاستی

هدف این مطالعه بررسی تاثیر پیچیدگی اقتصادی بر ردپای اکولوژیکی در آلوده کننده های بزرگ آسیایی؛ چین، هند، ژاپن، کره جنوبی و ایران است. مطابق با نتایج، مصرف انرژی تجدید پذیر و مصرف انرژی فسیلی به ترتیب به طور معنی داری منجر به کاهش و افزایش ردپای اکولوژیکی می شوند. توسعه مالی مطابق با مدل آستانه‌ای و غیر آستانه‌ای، به ترتیب تاثیر منفی و معنی دار و منفی و بی معنی بر ردپای اکولوژیکی دارد. فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس در این گروه از کشورها با در نظر گرفتن ردپای اکولوژیکی به عنوان شاخص کیفیت محیطزیستی مورد تایید است.

برآوردهای آستانه‌ای حاکی از آن است که با پیچیده ترشدن اقتصادهای آسیایی منتخب ردپای اکولوژیکی افزایش می‌یابد، اما نرخ این افزایش متفاوت است: تا مقدار شاخص پیچیدگی اقتصادی ۱/۱۲ لگاریتم ردپای اکولوژیکی با نرخ ۰/۰۳ و بعد از آن با نرخ ۰/۰۸ افزایش می‌یابد. در برآوردهای غیر آستانه‌ای، با پیچیده ترشدن اقتصادهای آسیایی منتخب ردپای اکولوژیکی در سطوح بسیار پایین پیچیدگی اقتصادی(کمتر از ۱/۶-) کاهش و سپس (شاخص پیچیدگی اقتصادی بیشتر از ۱/۶-) با نرخ افزایشی افزایش می یابد.

بنابراین، می‌توان انتظار داشت اقتصادهای منتخب آسیایی در سطوح بسیار پایین پیچیدگی اقتصادی(شاخص پیچیدگی اقتصادی کمتر از ۱/۶-) از مزایا و منافع زیست‌محیطی پیچیده شدن اقتصادهایشان بهره‌مند شوند و به عبارتی دیگر، پیچیده تر شدن اقتصاد یک استراتژی برنده- برنده برای محیطزیست این کشورها است. اما هر چه اقتصادهای منتخب آسیایی پیچیده تر می‌شوند و شاخص های پیچیدگی اقتصادی افزایش می‌یابد می‌توان انتظار داشت نه تنها منافع زیست‌محیطی نصیب این اقتصادها نگردد، بلکه همچنین آسیب ها و خسارات زیست‌محیطی شان افزایش یابد. به عبارتی دیگر، پیچیده تر شدن اقتصاد یک استراتژی برنده- برنده برای محیطزیست این کشورها نیست. همچنین، پیچیدگی اقتصادی تأثیر نامتقارن بر ردپای اکولوژیکی و یا محیطزیست دارد. به گونه ای که در مقادیر بالاتر پیچیدگی اقتصادی، افزایش پیچیدگی می تواند ردپای اکولوژیکی را با نرخ بیشتری افزایش دهد.

بنابراین، با توجه به آنکه هدف اصلی جوامع حصول توسعه پایدار است و از یک سو تحقق این مهم در دنیای امروز بدون ارتقای دانش و پیشرفت تکنولوژی امکان پذیر

نیست و از سوی دیگر با توجه به آنکه یکی از ابعاد پایداری بعد زیست‌محیطی است، به کشورهای مورد مطالعه توصیه می‌شود همراه با افزایش سطح دانش و پیچیدگی اقتصادی به سوی استفاده از فرایندهای تولیدی و تکنولوژی های دوستدار محیطزیست متمایل شوند. جایگزینی انرژی تجدیدپذیر به جای انرژی فسیلی و رشد بخش مالی به کشورهای مطالعه پیشنهاد می‌گردد. این کشورها باید با توجه به منابع طبیعی و فرصت‌های وارداتی خود، یک ترکیب بهینه انرژی از چندین منبع (مانند سوخت‌های فسیلی، هسته‌ای، تجدیدپذیر) ایجاد کنند.

Acknowledgments: Acknowledgments may be made to individuals or institutions that have made an important contribution.
Conflict Of Interest: The authors declare no conflict of interest.
Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Reference

Abid, M., Gheraia, Z., & Abdelli, H. (2022). Does renewable energy consumption affect ecological footprints in Saudi Arabia? A bootstrap causality test. *Renewable Energy, 189*, 813-821.

Al-Mulali, U., Ozturk, I., & Solarin, S. A. (2016). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis in seven regions: The role of renewable energy. *Ecological indicators, 67*, 267-282.

Ansari, M. A., Haider, S., & Masood, T. (2021). Do renewable energy and globalization enhance ecological footprint: an analysis of top renewable energy countries? *Environmental Science and Pollution Research, 28*(6), 6719-6732.

Azizi, Z., Daraei, F., & Naseri Boroujeni, A. (2019). The Impact of Economic Complexity on Environmental Pollution. *Iranian Economic Development Analyses, 7*(2), 201-219. doi:10.22051/edp.2020.29451.1225 [in Persian]

Balsalobre-Lorente, D., Nur, T., Topaloglu, E. E., & Evcimen, C. (2024). Assessing the impact of the economic complexity on the ecological footprint in G7 countries: Fresh evidence under human development and energy innovation processes. *Gondwana Research, 127*, 226-245.

Boleti, E., Garas, A., Kyriakou, A., & Lapatinas, A. (2021). Economic complexity and environmental performance: evidence from a world sample. *Environmental modeling & assessment*, *26*(3), 251-270.

Can, M., & Gozgor, G. (2017). The impact of economic complexity on carbon emissions: evidence from France. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 16364-16370.

Charfeddine, L., & Mrabet, Z. (2017). The impact of economic development and social-political factors on ecological footprint: A panel data analysis for 15 MENA countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 138-154.

Destek, M. A., & Sinha, A. (2020). Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: Evidence from organisation for economic Co-operation and development countries. *Journal of cleaner production*, *242*, 118537.

Doğan, B., Saboori, B., & Can, M. (2019). Does economic complexity matter for environmental degradation? An empirical analysis for different stages of development. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(31), 31900-31912.

Dogan, E., & Seker, F. (2016). The influence of real output, renewable and non-renewable energy, trade and financial development on carbon emissions in the top renewable energy countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 1074-1085.

Esfahani, A., Ghobadi, S., & Azarbaiejani, K. (2022). Dynamic Effect of Renewable and Non-Renewable Energy Consumption on Ecological Footprint in Selected Developing Countries (Generalized Method of Moments Approach). *Program and Development Research*, *3*(1), 93-119. doi:10.22034/pbr.2022.327509.1199 [in Persian]

Eskandari Nasab, A., & Zare Mehrjerdi, M. & Jalaee, A.(2025). The Effects of Technology Overflow on Life Environment Pollution with the demolition model. Quarterly Journal of Quantitative Economics, 21(4), 98-121. doi.org/10.22055/jqe.2022.38476.2402 [in Persian]

Fakher, H.-A., Abedi, Z., & Shaygani, B. (2018). Investigating the Relationship between Trade and Financial Openness with Ecological Footprint. *Economic Modeling*, *40*(11), 49-67. Retrieved from http://sanad.iau.ir/fa/Article/995482 [in persian]

Frankel, J., & Rose, A. (2002). An estimate of the effect of common currencies on trade and income. *The Quarterly Journal of Economics, 117*(2), 437-466.

Jensen, V. (1996). The pollution haven hypothesis and the industrial flight hypothesis: some perspectives on theory and empirics. *Cent Dev Environ Work Pap, 19965*.

Khan, M. A., & Ahmad, U. (2008). Energy demand in Pakistan: a disaggregate analysis. *The Pakistan Development Review*, 437-455.

Li, R., Wang, X., & Wang, Q. (2022). Does renewable energy reduce ecological footprint at the expense of economic growth? An empirical analysis of 120 countries. *Journal of cleaner production, 346*, 131207.

Mehnatfar, Y., Osmani, F., Cheshomi, M., & Argha, L. (2023). Do the Development of Technology and the Expansion of Trade Reduce the Ecological Footprint and Preserve the Environment? A Case Study: Evidence from Developing Countries in Asia. *Economic Growth and Development Research, 14*(53), 108-195. doi:10.30473/egdr.2023.68695.6758 [in persian]

Miao, Y., Razzaq, A., Adebayo, T. S., & Awosusi, A. A. (2022). Do renewable energy consumption and financial globalisation contribute to ecological sustainability in newly industrialized countries? *Renewable Energy, 187*, 688-697.

mohammadi, n., Sahabi, B., Heydari, H., & Sadeghi, H. (2023). Investigating the Impact of Economic Complexity and Renewable Energy Consumption on Environmental Pollution in Developing Countries. *The Economic Research (Sustainable Growth and Development), 23*(4), 1-24. doi:10.22034/ecor.23.4.1 [in Persian]

Molaei, M., & Basharat, E. (2015). Investigating Relationship between Gross Domestic Product and Ecological Footprint as an Environmental Degradation Index. *Journal of Economic Research (Tahghighat- E-Eghtesadi), 50*(4), 1017-1033. doi:10.22059/jte.2015.56156 [in Persian]

Moridian, A., Yarmohammadian, N., Motalebi, M., & Shadmehr, A. (2021). The Role of Economic Complexity in the Ecological Footprint: A Review of the EKC Hypothesis for Iran. *Planning and Budgeting, 26*(2), 153-179. doi:10.52547/jpbud.26.2.153 [in Persian]

Nathaniel, S., Anyanwu, O., & Shah, M. (2020). Renewable energy, urbanization, and ecological footprint in the Middle East and North

Africa region. *Environmental Science and Pollution Research, 27*(13), 14601-14613.

Nathaniel, S., & Khan, S. A. R. (2020). The nexus between urbanization, renewable energy, trade, and ecological footprint in ASEAN countries. *Journal of cleaner production, 272*, 122709.

Neagu, O. (2019). The link between economic complexity and carbon emissions in the European Union countries: a model based on the Environmental Kuznets Curve (EKC) approach. *Sustainability, 11*(17), 4753.

Neagu, O. (2020). Economic complexity and ecological footprint: evidence from the most complex economies in the world. *Sustainability, 12*(21), 9031.

Neagu, O., & Teodoru, M. C. (2019). The relationship between economic complexity, energy consumption structure and greenhouse gas emission: Heterogeneous panel evidence from the EU countries. *Sustainability, 11*(2), 497.

Ozturk, I., Farooq, S., Majeed, M. T., & Skare, M. (2024). An empirical investigation of financial development and ecological footprint in South Asia: Bridging the EKC and pollution haven hypotheses. *Geoscience Frontiers, 15*(4), 101588.

Pajooian, J., & Lashkaryzadeh, M. (2010). An Investigation of the Effective Factors on the Relationship between Economic Growth and Environmental Quality. *Iranian Journal of Economic Research, 14*(42), 169-188. Retrieved from https://ijer.atu.ac.ir/article_3962.html?lang=en [in persian]

Parsasharif, h., Amirnejad, H., & Taslimi, M. (2021). Investigating and Determining the Factors Affecting the Ecological Footprint of Selected Asian and European Countries. *Agricultural Economics Research, 13*(2), 155-172. doi:20.1001.1.20086407.1400.13.2.8.9 [in persian]

Puliafito, S. E., Puliafito, J. L., & Grand, M. C. (2008). Modeling population dynamics and economic growth as competing species: An application to CO2 global emissions. *Ecological economics, 65*(3), 602-615.

Sadeghi, S. K., Karimi Tekanlou, Z., Motafker Azad, M. A. A. G., Hossein , & Andayesh, Y. (2016). Measuring the water ecological footprint of iranian economic sectors: by emphasis on social accounting matrix(SAM) approach. *Quarterly Journal of Quantitative Economics (JQE), 11*(3), 81-111. Retrieved from

https://jqe.scu.ac.ir/article_11856_550e8f4ef334276d83cf2b358c9de98c.pdf [in Persian]

Sadorsky, P. (2010). The impact of financial development on energy consumption in emerging economies. *Energy Policy*, *38*(5), 2528-2535.

Sadorsky, P. (2011). Financial development and energy consumption in Central and Eastern European frontier economies. *Energy Policy*, *39*(2), 999-1006.

Saeedi, r., Moghaddasi, r., Nessabian, s., & Damanjeshideh, m. (2022). calculation and analysis of Economic Complexity index in Iran's Provinces. *quarterly journal of fiscal and Economic policies*, *10*(38), 147-186. doi:10.52547/qjfep.10.38.147 [in persian]

Salarvand, B., & Hasanvand, A. (2024). Investigating the Impact of Economic Complexity and International Risks on Sustainable Development in Emerging Countries: A Panel Smooth Transition Regression (PSTR) Approach. *Quarterly Journal of Quantitative Economics*, *21*(2), 75-12.doi.org/10.22055/jqe.2024.47924.2656 [in Persian]

Sepahvand, R., Sayehmiri, A., & Shirkhani, A. (2021). The Impact of Economic Complexity on Environmental Performance in the MENA Countries. *The Economic Research (Sustainable Growth and Development)*, *21*(3), 177-208. Retrieved from http://ecor.modares.ac.ir/article-18-49062-en.html [inPersian]

Shahmoradi, B., & Sadeghi Siahkali, M. (2017). Identifying the Level of Productive Knowledge in Iran 2025 using Economic Complexity Approach. *Iranian Economic Development Analyses*, *5*(3), 29-50. doi:10.22051/edp.2018.19154.1140 [in persian]

Shahzad, U., Fareed, Z., Shahzad, F., & Shahzad, K. (2021). Investigating the nexus between economic complexity, energy consumption and ecological footprint for the United States: New insights from quantile methods. *Journal of cleaner production*, *279*, 123806.

Sharma, R., Sinha, A., & Kautish, P. (2021). Does renewable energy consumption reduce ecological footprint? Evidence from eight developing countries of Asia. *Journal of cleaner production*, *285*, 124867.

Swart, J., & Brinkmann, L. (2020). *Economic complexity and the environment: evidence from Brazil*. Paper presented at the Universities and sustainable communities: meeting the goals of the agenda 2030.

Tamazian, A., & Rao, B. B. (2010). Do economic, financial and institutional developments matter for environmental degradation? Evidence from transitional economies. *Energy Economics, 32*(1), 137-145.

Ullah, A., Ahmed, M., Raza, S. A., & Ali, S. (2021). A threshold approach to sustainable development: nonlinear relationship between renewable energy consumption, natural resource rent, and ecological footprint. *Journal of environmental management, 295*, 113073.

Ulucak, R., & Bilgili, F. (2018). A reinvestigation of EKC model by ecological footprint measurement for high, middle and low income countries. *Journal of cleaner production, 188*, 144-157.

Ulucak, R., & Lin, D. (2017). Persistence of policy shocks to ecological footprint of the USA. *Ecological indicators, 80*, 337-343.

Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth* (Vol. 9): New society publishers.

Wiedmann, T., Minx, J., Barrett, J., & Wackernagel, M. (2006). Allocating ecological footprints to final consumption categories with input–output analysis. *Ecological economics, 56*(1), 28-48.

Yilanci, V., & Pata, U. K. (2020). Convergence of per capita ecological footprint among the ASEAN-5 countries: evidence from a non-linear panel unit root test. *Ecological indicators, 113*, 106178.