پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۹، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، صص ۱۲۰-۱۵۳
نوع مقاله: پژوهشی

سیاست‌گذاری بر عملکرد اکوسیستم نوآوری سبز با کاربرد مدل‌سازی ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها

حبیب زارع احمد آبادی [*۱]، فاطمه رجایی [۲] ، سید حبیب اله میرغفوری [۱] ، فاطمه زمزم [۳]

۱. دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مدیریت کسب و کار، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۳. دانش‌آموخته دکتری مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۰۷/۲٤ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/۰۹/۲٦

چکیده

افت روزافزون کیفیت محیط‌زیست، ضرورت خلق اکوسیستم نوآوری سبز را بیش از هرزمانی مهم ساخته، در نتیجه پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اکوسیستم نوآوری‌های سبز و نحوه سیاست‌گذاری علم‌وفناوری سبز کشورهای منتخب اروپایی در راستای حصول اطمینان از اینکه اروپا به سمت حداقل‌سازی کربن، توسعه پایدار کل‌نگر و اقتصاد سبز، نوآورانه و رقابتی در حرکت است، انجام شده است. این پژوهش در تلاش است با بررسی پیشینه تحقیقات مشابه، مجموعه‌ای از شاخص‌های ورودی، میانجی و خروجی مفید را جهت تعیین مدل نشانگر مراحل تأثیرگذار بر عملکرد اکوسیستم نوآوری سبز کشورهای منتخب ارائه نماید. با جمع‌آوری داده‌های موجود از طریق بانک‌های داده و مهیاکردن زمینهٔ مدل‌سازی ریاضی، مدل ریاضی با تلفیق روش‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها با کمک نرم‌افزار Lingo طراحی گردید تا کارایی نسبی را در حوزه‌های عملکردی با هم ترکیب کرده و یک امتیاز موزون نهایی جهت ارزیابی عملکرد اکوسیستم نوآوری سبز برای کشورهای عضو اتحادیه اروپا محاسبه نماید. نتایج حاکی از آن است که باتوجه‌به مدل مفهومی چهار مرحله‌ای خلق و توسعه دانش، پیاده‌سازی دانش، تبدیلات مالی و اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست، با تغییر در عملکرد کشورها در مرحله تبدیلات مالی و اقتصادی، کارایی کل کشورها به‌صورت محسوسی بالا می‌رود؛ همچنین بعضی از متغیرها مانند ارزش کل سرمایه‌گذاری‌های مرحله اولیه سبز، پتنت سبز، انتشارات دانشگاهی مرتبط با نوآوری زیست‌محیطی، توسعه فناوری‌های مرتبط با محیط‌زیست و اندازه بازار صنعت سبز نسبت به سایر متغیرها دارای شکاف عملکردی بیشتری هستند که با بهبود آن‌ها می‌توان قدم‌های بزرگی در راستای افزایش عملکرد کشورها در بهبود وضعیت اکوسیستم نوآوری سبز برداشت.

کلیدواژه‌ها: اکوسیستم نوآوری سبز، تحلیل پوششی داده‌ها، تئوری بازی‌ها، مدل‌سازی ریاضی

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: Zarehabib@yazd.ac.ir

۱- مقدمه و بیان مسئله

امروزه تغییرات آب‌وهوایی، نابرابری‌های اجتماعی و درآمدی، چالش‌های رقابتی و در پی آن افت روزافزون کیفیت محیط‌زیست، نیاز به تغییر و احیای الگوهای تولید را بیش از هرزمانی مهم ساخته است که این تغییرات منجر به خلق اکوسیستم نوآوری زیست‌محیطی می‌گردد [۱] از طرف دیگر در طول سه دهه گذشته، با توجه به افزایش استخراج مواد و همچنین افزایش واردات نسبت به صادراتِ مواد در اتحادیه اروپا، کشورهای عضو اتحادیه اروپا به‌طور مداوم در حال تلاش جهت افزایش بهره‌وری منابع و انرژی هستند؛ بنابراین، باید ابتکارات نوآورانه زیست‌محیطی خود را برای افزایش بهره‌وری انرژی و به حداقل رساندن مصرف منابع طبیعی تقویت کنند [۲] نوآوری زیست‌محیطی یک ابزار عملیاتی برای ادغام سیستم نوآوری سازمانی با کاربردهای اکولوژیکی و اقتصادی است [۳] که بهترین متصدیان و مجریان نوآوری را به‌منظور الگوگیری شناسایی و روش‌های بهبود کارایی را از طریق روشن کردن نقاط ضعف مشخص می‌کند [٤] همچنین در سطح ملی و مقایسه بین کشورها این امکان را به ما می‌دهد تا عملکرد را محک زده و یادگیری سیاست را تقویت کرد [٥]. انتظار می‌رود که شیوه‌های نوآوری زیست‌محیطی بتوانند مصرف کمتر منابع طبیعی، روش‌های جدید تولید انرژی پایدار و شیوه‌ها و محصولات جدید محیط‌زیست را ارائه دهند [٦]. بسیاری از فعالیت‌ها مانند آموزش کارکنان در مورد نگرانی‌های زیست‌محیطی، مسائل زیست‌محیطی در بسته‌بندی محصولات، کاهش حجم بسته‌بندی مورد استفاده در محصولات عرضه‌شده، تأمین مالی فعالیت‌های زیست‌محیطی در جامعه و استفاده از مواد بازفرآوری شده در بسته‌بندی محصولات فروخته‌شده در موفقیت نوآوری‌های زیست‌محیطی ضروری هستند [۷]. دیهی است که استفاده کارآمد از منابع می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی هزینه‌های عملیاتی شرکت‌ها را کاهش دهد؛ بنابراین، شرکت‌ها می‌توانند بیشتر بر روی فعالیت‌های نوآورانه به‌ویژه نوآوری‌های زیست‌محیطی سرمایه‌گذاری کنند. چنین فعالیت‌هایی نقش حیاتی در ایجاد فرصت‌های شغلی جدید و ارائه استراتژی‌هایی برای رشد سازگار با محیط‌زیست و پایدار دارند. برای این منظور، شرکت‌ها و کشورها باید اصول نوآوری زیست‌محیطی را با بهره‌وری مواد، به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش بازیافت و به حداقل رساندن آلودگی‌ها (آب، هوا و خاک) رعایت کنند [۸]. همچنین انتظار می‌رود کشورها به‌طور قابل‌توجهی مصرف انرژی، آلودگی و ضایعات را کاهش دهند

و کارایی زیست‌محیطی خود را بهبود بخشند. ارزیابی عملکرد کشورها در پرتو نوآوری‌های زیست‌محیطی می‌تواند به آن‌ها کمک کند تا بر نقاط ضعف خود تمرکز کنند [۸]. جهت حصول اطمینان از اینکه اروپا به سمت به حداقل‌رسانی کربن، توسعه پایدار کل‌نگر، و اقتصاد سبز، نوآورانه و رقابتی حرکت می‌کند، نظارت بر پیشرفت اروپا در زمینهٔ نوآوری‌های سبز اهمیت زیادی دارد و این امر نیازمند اندازه‌گیری و ارزیابی این شاخص است. از طرف دیگر به‌دلیل پیچیدگی و چندبعدی بودن مفهوم پایداری، رویکردهای مبتنی بر روش تحلیل هزینه – سود ممکن است قادر به نمایش و بررسی کامل مسائل پایداری نباشند [۹]؛ بنابراین در این گونه مسائل ضرورت استفاده از رویکردهای کمی، مبتنی بر تابع تولید و سیستماتیک وجود دارد؛ تحلیل پوششی داده‌ها یکی از رویکردهایی است که نگاه ویژه‌ای به تکنیک‌های مبتنی بر تابع تولید دارد[۱۰, ۱۱] و یکی از رایج‌ترین تکنیک‌ها برای ارزیابی عملکرد واحدهای تصمیم‌گیری است، این روش، یک تکنیک ناپارامتریک ریاضی از شاخه‌های دانش تحقیق در عملیات است که در مسئله سنجش کارایی نسبی مجموعه‌ای از واحدهای همسان با چندین ورودی و خروجی مشابه به‌منظور ارزیابی عملکرد واحدهای تصمیم‌گیری به کار می‌رود. تحلیل پوششی داده‌ها یک روش برنامه‌ریزی خطی است که به‌طور تجربی کارایی نسبی شرکت‌ها یا نهادها (موسوم به واحدهای تصمیم‌گیری، DMUs) متعدد را اندازه‌گیری می‌کند [۱۲-۱۵]. در مدل‌های ساختار ساده تحلیل پوششی داده‌ها هر واحد تصمیم‌گیری به‌عنوان یک جعبه سیاه و بدون اطلاع از اقدامات میانی در نظر گرفته شده است، برای حل این مشکل فار و گراسکوف فار و گراسکوف[۱] (۲۰۰۰) مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای (NDEA) را معرفی کردند [۱۶] در این مدل سعی شده است تمامی فعالیت‌های میانی نیز در نظر گرفته شود [۱۷]. ساختار شبکه سری چندمرحله‌ای یکی از کاربردی‌ترین ساختارها است که با بسیاری از مشکلات واقعی مطابقت دارد. در این ساختار فرض شده است که یک واحد تصمیم‌گیری شامل مراحل تولید چندگانه است که در آن خروجی یک مرحله ورودی مراحل بعدی است [۱۸]؛ از آنجایی که در بسیاری از سیستم‌های واقعی، واحدهای تصمیم‌گیری به صورت شبکه‌ای با هم در ارتباط هستند و عملکرد هر واحد تحت تأثیر عملکرد واحدهای دیگر قرار می‌گیرد. در این حالت، استفاده از تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای (Network DEA) برای ارزیابی کارایی کل سیستم و

[۱] Färe and Grosskopf

همچنین کارایی هر یک از واحدها ضروری است. با این حال، در بسیاری از موارد، تصمیم‌گیری در مورد تخصیص منابع در چنین سیستم‌هایی به صورت توزیع‌شده و توسط چندین عامل تصمیم‌گیرنده انجام می‌شود. در این شرایط، تعاملات بین عوامل تصمیم‌گیرنده می‌تواند بر تصمیمات آن‌ها و در نتیجه بر کارایی کل سیستم تأثیر بگذارد. با ترکیب تئوری بازی‌ها و تحلیل پوششی شبکه‌ای، می‌توان مدل‌های جامع‌تری برای ارزیابی کارایی سیستم‌های شبکه‌ای و تصمیم‌گیری در مورد تخصیص منابع در این سیستم‌ها توسعه داد. در این مدل‌ها، هر واحد تصمیم‌گیری به‌عنوان یک عامل بازی‌کننده در نظر گرفته می‌شود و هدف هر عامل، بهینه‌سازی کارایی خود با توجه به تصمیمات سایر عوامل است. از اینرو در پژوهش حاضر از روش مدل‌سازی ریاضی با تلفیق روش‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای[۱] و تئوری بازی‌ها[۲] جهت ارزیابی عملکرد کشورهای منتخب از جهت اکوسیستم نوآوری سبز برای شناسایی موانع و محرک‌های عملیات سازگار با محیط‌زیست، و ارائه دیدگاهی خنثی و تحلیلی در مورد وضعیت کلی محیطی، اجتماعی و اقتصادی در کشورهای عضو اتحادیه اروپا استفاده می‌شود.

به طور خلاصه، وجه تمایز و نوآوری اصلی این پژوهش را می‌توان در ارائه یک چارچوب جامع و کمی مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و نظریه بازی‌ها برای ارزیابی عملکرد اکوسیستم‌های نوآوری سبز بیان کرد. این چارچوب با درنظرگرفتن پیچیدگی‌های ذاتی در تعاملات بین عوامل مختلف مؤثر بر عملکرد این اکوسیستم‌ها، امکان ارزیابی دقیق‌تر و همه‌جانبه‌تری را فراهم می‌آورد. به‌علاوه، با بهره‌گیری از نظریه بازی‌ها، این پژوهش به دنبال شناسایی استراتژی‌های بهینه سیاست‌گذاری است که بر اساس شاخص‌های کلیدی قابل‌اندازه‌گیری و مدیریت‌پذیر، به‌عنوان معیارهای تصمیم‌گیری در بازی‌های استراتژیک میان بازیگران مختلف اکوسیستم نوآوری سبز تعیین می‌شوند.

۲- ادبیات و پیشینه تحقیق

از مهم‌ترین عوامل افزایش بهره‌وری، توسعه و رشد اقتصادی پایدار کشورها و عامل کلیدی در ایجاد مزیت رقابتی پایدار بین کشورها، نوآوری است، به‌طوری که ماندگاری کشورها در عرصهٔ رقابت جهانی به میزان نوآوری آن‌ها بستگی دارد [۱۹, ۲۰]. نوآوری شامل تازگی است؛ تازگی به فاصله تکنولوژیکی از نوآوری‌های رقیب قدیمی و کنونی مربوط می‌شود [۲۱]. اگر

[۱] NDEA

[۲] Game Theory (GT)

فرایند نوآوری تحت مدیریت یک چارچوب نظام‌مند ملی نباشد اهداف اصلی آن که توسعه اقتصادی پایدار، کسب مهارت‌های بین‌المللی، ایجاد شغل [۱۹, ۲۲]، رقابت‌پذیری، کسب مزیت رقابتی، سطح رفاه بالاتر و امنیت ملی[۲۳] است محقق نخواهد شد؛ درنتیجه بهترین رویکرد در مورد نوآوری رویکرد نظام ملی نوآوری[۱] است[۲٤]. اصطلاح نوآوری اکو «نوآوری زیست‌محیطی» برای اولین‌بار در سال ۱۹۹٦ در کتابی توسط کلود فوسلر[۲] و پیتر جیمز[۳] با عنوان «نوآوری در محیط‌زیست[٤]» نوشته شد[۲۵]. نوآوری زیست‌محیطی یک ابزار عملیاتی برای ادغام سیستم نوآوری سازمانی با کاربردهای اکولوژیکی و اقتصادی است[۳]. برخی از شرکت‌ها به‌سادگی با جایگزینی مواد خطرناک، مصرف انرژی کمتر، مدیریت زباله و به حداقل رساندن آلاینده‌ها نوآوری می‌کنند، درحالی‌که سایر شرکت‌ها تمایل به طراحی فناوری‌هایی برای کنترل آلودگی و مدیریت زباله دارند [۲٦].

نوآوری زیست‌محیطی را می‌توان در سطوح مختلف بخشی، شرکتی، ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی اندازه‌گیری کرد. شاخص‌های ملی می‌توانند چارچوبی برای جمع‌آوری و گزارش‌دهی در داخل کشورها و برای گزارش داده‌های ملی به نهادهای بین‌المللی و سایر کشورها فراهم کنند[۲۷]. اندازه‌گیری نوآوری زیست‌محیطی در سطح ملی نشان می‌دهد که کدام کشورها رهبران جهانی هستند. به‌طور خاص، اندازه‌گیری سیاست‌های نوآوری زیست‌محیطی به‌عنوان محیط‌های حمایت‌کننده برای نوآوری‌های زیست‌محیطی، اطلاعاتی را در مورد اینکه کدام کشورها رهبر، پیرو، نشسته یا عقب‌مانده هستند، در اختیار ما قرار می‌دهد [۲۸]. جهت ارزیابی عملکرد نوآوری زیست‌محیطی روش دقیقی برای کمک به سازمان‌ها و دولت‌ها موردنیاز است؛ ارزیابی عملکرد ابزارهای گوناگونی دارد و در چند دهه گذشته، روش‌های مختلفی جهت ارزیابی عملکرد استفاده شده‌است[۲۹] تحلیل پوششی داده‌ها یک تکنیک مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی ناپارامتریک برای اندازه‌گیری کارایی و ارزیابی عملکرد واحدهای تصمیم‌گیری همگن (DMUs) است. این تکنیک به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلفی مانند تجزیه‌وتحلیل کارایی زیست‌محیطی [۳۰-۳۵] و نوآوری فناوری استفاده می‌شود [۳٦].

---

[۱] National Innovation System (NIS)
[۲] Claude Fussler
[۳] Peter James
[٤] Driving Eco-Innovation

در ادامه به خلاصه‌ای از تحقیقات در این زمینه اشاره می‌شود. کیانی ماوی و استندینگ[۱] (۲۰۱٦,۲۰۱۷) ۳٤ کشور را با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها (خروجی محور) ارزیابی و از روش اندرسن- پترسن (AP) برای رتبه‌بندی کامل آن‌ها استفاده کردند. ورودی‌های این پژوهش جمعیت و مصرف انرژی و خروجی‌ها کارکنان دانشی، پایداری اکولوژیکی و شاخص نوآوری جهانی می‌باشد [۳۷, ۳۸]. آرمان[۲] و همکاران (۲۰۲۱) یک رویکرد جدید را برای یافتن مجموعه مشترک وزن‌ها (CSWs) در تحلیل پوششی داده‌ها برای بررسی نوآوری زیست‌محیطی در حضور عوامل نامطلوب پیشنهاد کرده‌اند. نویسندگان تولید ناخالص داخلی به‌عنوان ورودی مطلوب و انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) به‌عنوان ورودی نامطلوب و محققان در تحقیق‌وتوسعه، صادرات فناوری پیشرفته، تولید برق از منابع تجدیدپذیر و تعداد گواهینامه‌های ISO ۱٤۰۰۱ را به‌عنوان خروجی در این پژوهش به‌کار گرفتند [۳۹]. ژانگ و وین[۳] (۲۰۲۱) در پژوهش خود جهت بررسی چگونگی تأثیر فعالیت‌های نوآوری خالص بر رشد بهره‌وری کل عوامل تولیدی سبز در چین با درنظر گرفتن توسعه اقتصاد و کنترل آلودگی از رویکرد DEA - Malmquiste Luenger استفاده کردند. متغیرهای اصلی این تحقیق شامل: بهره‌وری کل عوامل تولیدی سبز(GTFP)، پتنت، سرمایه‌گذاری نامشهود، کارایی نوآوری، حساسیت سرمایه‌گذاری جریان نقدی[٤]، رشد فروش صادرات، اندازه شرکت، سن شرکت، شاخص سطح تمرکز در صنعت[٥]، آلودگی، پست می‌باشد [٤۰]. کیانی ماوی و کیانی ماوی[٦] (۲۰۲۱) با هدف مطالعهٔ عملکرد نوآوری زیست‌محیطی کشورهای اتحادیه اروپا (۲۷ کشور)، متغیرهای پژوهشگران تحقیق‌وتوسعه، مخارج تحقیق‌وتوسعه را به‌عنوان ورودی، پتنت‌های زیست‌محیطی به‌عنوان متغیر میانجی و صادرات فناوری پیشرفته، بهره‌وری انرژی و بهره‌وری منابع را به‌عنوان خروجی در نظر گرفتند [٤۱]. چن[۷] و همکاران (۲۰۲۱) نوآوری سبز تحقیق‌وتوسعه صنایع پیشرفته چین را به‌عنوان سیستمی از سه مرحله پیشرفت تکنولوژی، تبدیلات اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست در نظر گرفتند. آن‌ها در ابتدا، یک مدل سه مرحله‌ای تحلیل پوششی داده‌ها با کارایی فوق‌العاده پیشنهاد کردند، سپس، با در نظر گرفتن «روابط

---

[۱] Kiani Mavi and Standing
[۲] Arman
[۳] Zhang and Vigne
[٤] ICFS
[٥] HHI
[٦] Kiani Mavi and Kiani Mavi
[۷] Chen

داخلی» و «ساختار توزیع ورودی‌های اولیه و خروجی‌های نامطلوب»، مدل فوق به یک مدل سه مرحله‌ای تحلیل پوششی داده‌ها با کارایی فوق‌العاده با یک بازی مشارکتی مبتنی بر ورودی‌های مشترک و خروجی‌های نامطلوب گسترش دادند و برای به دست آوردن مؤثر بازده بهینه منحصربه‌فرد هر مرحله، یک رویکرد تجزیه بازده پیشنهاد کردند [٤٢]. علیدریسی[١] (٢٠٢١) به‌منظور حل مشکل فقدان در نظر گرفتن جامع نگرانی‌های زیست‌محیطی در شاخص جهانی نوآوری (GII)، شاخص نوآوری تولید سبز جهانی مبتنی بر کارایی (GGMII) را با فرمول‌بندی یک مدل تحلیل پوششی داده‌های ورودی‌گرا ایجاد کرد که یک مدل ارزیابی کل‌نگر برای ١٥ کشور تولیدکننده برتر در سراسر جهان است. در این پژوهش یک رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها ورودی‌گرا با استفاده از ده معیار، تولید برحسب ارزش‌افزوده خالص به تولید ناخالص داخلی کشور، انتشار CO_2 از تمام صنایع تولیدی، نرخ بیکاری، هزینه‌های استفاده از مالکیت معنوی ازنظر دریافت، هزینه استفاده از مالکیت معنوی ازنظر دریافتی ازنظر پرداخت، ارزش صادرات فناوری پیشرفته، تعداد محققین در تحقیق‌وتوسعه، تعداد مقالات مجلات علمی و فنی منتشرشده، تعداد درخواست‌های ثبت اختراع ثبت‌شده و تعداد درخواست‌های علامت تجاری ثبت‌شده فرموله شد [٤٣]. ادرین و چاگلار[٢] (٢٠٢٣) در پژوهش خود با هدف تعیین میزان بهره‌برداری کشورهای OECD از عناصر فعال‌کننده فعالیت‌های نوآوری در تولید خروجی‌های نوآوری، کارایی نوآوری ملی کشورهای عضو OECD را با استفاده از مدل DEA مورد بررسی قرار دادند [٤٤]. در پژوهشی دیگر آنوز[٣] و همکاران (٢٠٢٤) چارچوبی تحلیلی نوین برای ارزیابی نظام نوآوری ملی (NIS) بر مبنای تحلیل پوششی داده‌ها با رویکرد شبکه‌های پویا ارائه دادند. سپس این چارچوب بر روی ٢٣ کشور تولیدکننده نفت اعمال گردید که این امر امکان تحلیل مقایسه‌ای عملکرد آنها را با ١٠ کشور برتر نوآور بر اساس شاخص جهانی نوآوری (GII) فراهم می‌نماید [٤٥]. جدول ١، فهرست کاملی از شاخص‌های بکار رفته در پژوهش حاضر و منابع استخراج داده‌های مربوط به هر یک را ارائه می‌نماید.

[١] Alidrisi
[٢] Erdin and Çağlar
[٣] Anouze

جدول ۱: شاخص‌های مورد استفاده در تحقیقات انجام‌شده در حوزه کاربرد DEA در ارزیابی عملکرد نوآوری زیست‌محیطی

نماد شاخص	شاخص	منبع	منبع استخراج داده‌ها
X_1	کل پرسنل تحقیق‌وتوسعه و محققین (٪ از کل اشتغال)	[۳۹, ٤۲, ٤٥–٥۱]	EUROSTAT
X_2	ارزش کل سرمایه‌گذاری‌های مرحله اولیه سبز (دلار آمریکا/سرانه)	[٤٦, ٤٧, ٥۲–٥٤]	Cleantech
Z_1	پتنت سبز	[٤۰, ٤۱, ٤٥–٤٧, ٥۱, ٥٥, ٥٦]	OECD
Z_2	انتشارات دانشگاهی مرتبط با نوآوری زیست‌محیطی (به‌ازای هر میلیون جمعیت)	[٤٥, ٤٦, ٥٦–٥٨]	Scopus
Z_3	آگاهی از مدیریت پایداری	[٥٩]	UNGC
Z_4	توسعه فناوری‌های مرتبط با محیط‌زیست، (٪ همه فناوری‌ها)	[٤٧, ٥٤, ٦۰]	OECD
X_3	فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	[٥٩]	IEA
Z_5	ارزش‌افزوده در فعالیت‌های حفاظت از محیط‌زیست و مدیریت منابع (٪ تولید ناخالص داخلی)	[٤٦]	EUROSTAT
Z_6	اندازه بازار صنعت سبز	[٥٩]	LCEGS
X_4	اجرای مقررات زیست‌محیطی	[٤۱, ٥٩, ٦۱–٦٤]	World Economic Forum
Y_1	شاخص عملکرد زیست‌محیطی	EPI	EPI.yale.edu

۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، جزء تحقیقات کاربردی و ماهیت نظری دارد زیرا هدف آن افزایش دانش در موضوعی است که در عمل می‌تواند قابلیت استفاده برای فعالان حوزه‌های مختلف تصمیم‌گیری کشورها و بازیگران در این حوزه داشته باشد. از نظر روش اجرا یک تحقیق توصیفی محسوب می‌شود. در این پژوهش، با کاربرد رویکرد Game-SBM-NDEA به ارزیابی اکوسیستم نوآوری سبز ۲۷ کشور عضو اتحادیهٔ اروپا پرداخته می‌شود. پس از تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، نتایج دو مدل Game-SBM-NDEA و SBM-NDEA با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در نهایت جهت رتبه‌بندی واحدهای تصمیم‌گیری از مدلی یکپارچه بر اساس تحلیل

پوششی داده‌ها و تئوری بازی‌ها استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش متغیرهای ورودی و خروجی بر اساس بررسی ادبیات و پیشینه پژوهش تعیین‌شده است و داده‌های مربوط به این متغیرها از پایگاه‌های جهانی نظیر مجمع جهانی اقتصاد[۱]، OECD. Stat[۲] و EIA[۳] و غیره مطابق جدول ۱ استخراج گردید. در ادامه مدل SBM-NDEA و رویکرد ترکیبی Game-SBM-NDEA تشریح می‌گردد.

۳-۱- مدل SBM-NDEA

تابع هدف مدل عمومی SBM-NDEA طبق مدل پیشنهادی مدعی (۱۳۹۷) به‌شرح زیر است[۶۵].

$$Minz = \frac{\sum_k w_k \ (۲)}{\sum_k w_k \left(۱ + \frac{\text{تعداد متغیرهای شعاعی از نوع خروجی یا خروجی میانجی}}{\text{تعداد متغیرهای کل خروجی و خروجی میانجی}} \times \left(\emptyset I_{kjp} - ۱\right) - \frac{۱}{\text{تعداد متغیرهای کل خروجی و خروجی میانجی}} \times \left(\sum_{im} \frac{S^{+}_{\mathrm{r}jpk}}{\mathrm{Y}_{\mathrm{r}jpk}} + \sum_{imn} \frac{S^{+}_{\mathrm{r}jpk}}{\mathrm{Y}_{\mathrm{r}jpk}} + \sum_{\mathrm{h}} \sum_{lm} \frac{S_{jp(k\mathrm{h})l}}{Z_{jp(k\mathrm{h})l}} + \sum_{\mathrm{h}} \sum_{lmn} \frac{S_{jp(k\mathrm{h})l}}{Z_{jp(\mathrm{kh})l}} \right) \right)}$$

همچنین محدودیت عمومی مدل به شرح جدول زیر است.

جدول ۲: محدودیت‌های مدل SBM-NDEA

ورودی	اختیاری	شعاعی	مطلوب	$\sum_j \lambda_{jkt} . X_{ijkt} \leq \emptyset I_{kj'} . X_{ij'kt};\ \forall_{k,i,t}$	
			نامطلوب	$\sum_j \lambda_{jkt} . X_{ijkt} \geq \emptyset I_{kj'} . X_{ij'kt};\ \forall_{k,i,t}$	
		غیرشعاعی	مطلوب	$\sum_j \lambda_{jkt} . X_{ijkt} = X_{ij'kt} - S^{-}_{ij'kt};\ \forall_{k,i,t}$	
			نامطلوب	$\sum_j \lambda_{jkt} . X_{ijkt} = X_{ij'kt} + S^{-}_{ij'kt};\ \forall_{k,i,t}$	
	غیراختیاری	$\sum_j \lambda_{jkt} . X_{ijkt} = X_{ij'kt};\ \ \forall_{k,i,t}$			
میانجی	اختیاری	ورودی	شعاعی	مطلوب	$\sum_k \lambda_{jht} . Z_{j(kh)lt} \leq \emptyset I_{hj'} . Z_{j'(kh)lt};\ \ \ \forall_{l,h,t}$

[۱] World Economic Forum
[۲] Greenhouse gas emissions (oecd.org)
[۳] Energy Information Administration

پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری ـــ

				$\sum_k \lambda_{jht} . Z_{j(kh)lt} \geq \emptyset I_{hj'} . Z_{j'(kh)lt}; \quad \forall_{l,h,t}$	نامطلوب
			غیرشعاعی	$\sum_k \lambda_{jht} . Z_{j(kh)lt} = Z_{j'(kh)lt} - SIZ_{j'(kh)lt}; \forall_{l,h,t}$	مطلوب
				$\sum_k \lambda_{jht} . Z_{j(kh)lt} = Z_{j'(hk)lt} + SIZ_{j'(kh)lt}; \forall_{l,h,t}$	نامطلوب
		خروجی	شعاعی	$\sum_h \lambda_{jkt} . Z_{j(kh)lt} \geq \emptyset o_{kj'} . Z_{j'(kh)lt}; \forall_{k,l,t}$	مطلوب
				$\sum_h \lambda_{jkt} . Z_{j(kh)lt} \leq \emptyset o_{kj'} . Z_{j'(kh)lt}; \forall_{k,l,t}$	نامطلوب
			غیرشعاعی	$\sum_h \lambda_{jkt} . Z_{j(kh)lt} = Z_{j'(kh)lt} + SOZ_{j'(kh)lt}; \forall_{k,l,t}$	مطلوب
				$\sum_h \lambda_{jkt} . Z_{j(kh)lt} = Z_{j'(kh)lt} - SOZ_{j'(kh)lt}; \forall_{k,l,t}$	نامطلوب
	غیراختیاری	$\sum_j \lambda_{jkt} . Z_{j(kh)lt} = Z_{j'(kh)lt}$ AND $\sum_j \lambda_{jht} . Z_{j(kh)lt} = Z_{j'(kh)lt}$			
خروجی	اختیاری		شعاعی	$\sum_j \lambda_{jkt} . Y_{rjkt} \geq \emptyset o_{kj'} . y_{rj'kt}; \forall_{k,r,t}$	مطلوب
				$\sum_j \lambda_{jkt} . Y_{rjkt} \leq \emptyset o_{kj'} . y_{rj'kt}; \forall_{k,r,t}$	نامطلوب
			غیرشعاعی	$\sum_j \lambda_{jkt} . Y_{rjkt} = y_{rj'kt} + S^+_{rj'kt}; \forall_{k,r,t}$	مطلوب
				$\sum_j \lambda_{jkt} . Y_{rjkt} = y_{rj'kt} - S^+_{rj'kt}; \forall_{k,r,t}$	نامطلوب
	غیراختیاری	$\sum_j \lambda_{jkt} . Y_{rjkt} = Y_{rj'kt}; \quad \forall_{k,i,t}$			

۳-۲- رویکرد ترکیبی Game-SBM-NDEA

در این پژوهش از مدل پیشنهادی محمودی و امروزنژاد[۱] (۲۰۲۲) جهت تلفیق رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها و تئوری بازی‌ها استفاده می‌شود. آن‌ها بر اساس مفاهیم EBGM و SBM، یک مدل جدید Game-SBM-NDEA برای ارزیابی عملکرد مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیری با ساختار شبکه‌ای چند مرحله ارائه کردند. ایده اصلی مدل پیشنهادی این است که شبکه به زیرشبکه‌های مختلف تقسیم شود، سپس هر شبکه به‌عنوان یک بازیگر در مفهوم EBGM در نظر گرفته شود. همچنین امتیاز کارایی SBM هر واحد تصمیم‌گیری در هر

[۱] Mahmoudi and Emrouznejad

زیرشبکه به‌عنوان سودمندی هر بازیکن در نظر گرفته شده است. ازآنجایی‌که این مطالعه بر ساختار شبکه‌ای چندمرحله‌ای تمرکز دارد، هر مرحله به‌عنوان یک شبکه فرعی در نظر گرفته شده است. باتوجه‌به توضیحات ارائه شده، مدل پیشنهادی Game-SBM-NDEA به شرح زیر است [۱۸]:

$$\text{Min } Z_o$$

s.t.

$$\frac{۱-\left(\frac{۱}{m_۱}\right)\sum_{i=۱}^{m_۱}\frac{s_i^-}{x_{io}^۱}}{۱+\left(\frac{۱}{l_۱+s_۱}\right)\left(\sum_{r=۱}^{s_۱}\frac{s_r^+}{y_{ro}^۱}+\sum_{\delta=۱}^{l_۱}\frac{s_\delta^+}{z_{\delta o}^۱}\right)} \le Z_o + d_۱$$

$$\frac{۱-\left(\frac{۱}{m_۲+l_۱}\right)\left(\sum_{i'=۱}^{m_۲}\frac{s_{i'}^-}{x_{i'o}^۲}+\sum_{\delta=۱}^{l_۱}\frac{s_\delta^-}{z_{\delta o}^۱}\right)}{۱+\left(\frac{۱}{l_۲}\right)\left(\sum_{\delta'=۱}^{l_۲}\frac{s_{\delta'}^+}{z_{\delta' o}^۲}\right)} \le Z_o + d_۲$$

$$\frac{۱-\left(\frac{۱}{m_۱}\right)\sum_{i=۱}^{m_۱}\frac{s_i^-}{x_{io}^۱}}{۱+\left(\frac{۱}{l_۱+s_۱}\right)\left(\sum_{r=۱}^{s_۱}\frac{s_r^+}{y_{ro}^۱}+\sum_{\delta=۱}^{l_۱}\frac{s_\delta^+}{z_{\delta o}^۱}\right)} \ge d_۱$$

$$\frac{۱-\left(\frac{۱}{m_۲+l_۱}\right)\left(\sum_{i'=۱}^{m_۲}\frac{s_{i'}^-}{x_{i'_o}^۲}+\sum_{\delta=۱}^{l_۱}\frac{s_\delta^-}{z_{\delta o}^۱}\right)}{۱+\left(\frac{۱}{l_۲}\right)\left(\sum_{\delta'=۱}^{l_۲}\frac{s_{\delta'}^+}{z_{\delta' o}^۲}\right)} \ge d_۲$$

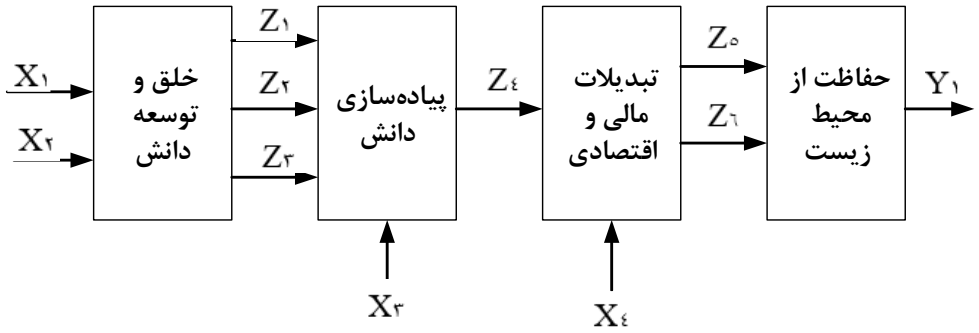
$$\sum_{j=۱}^{n}\lambda_j x_{ij}^۱ = x_{io}^۱ - s_i^-, \qquad i = ۱,\dots,m_۱$$
$$\sum_{j=۱}^{n}\lambda_j y_{rj}^۱ = y_{ro} + s_r^+, \qquad r = ۱,\dots,s_۱$$
$$\sum_{j=۱}^{n}\lambda_j z_{\delta j}^۱ = z_{\delta o}^۱ + s_\delta^+, \qquad \delta = ۱,\dots,l_۱$$
$$\sum_{j=۱}^{n}\lambda'_j x_{i'j}^۲ = x_{i'o}^۲ - s_{i'}^-, \qquad i = ۱,\dots,m_۲$$
$$\sum_{j=۱}^{n}\lambda'_j z_{\delta j}^۱ = z_{\delta o}^۱ - s_\delta^-, \qquad \delta = ۱,\dots,l_۱$$
$$\sum_{j=۱}^{n}\lambda'_j z_{\delta' j}^۲ = z_{\delta' o}^۲ + s_{\delta'}^+, \qquad \delta' = ۱,\dots,l_۲$$
$$\sum_{j=۱}^{n}\lambda_j = ۱$$
$$\sum_{j=۱}^{n}\lambda'_j = ۱$$
$$\lambda_j \ge ۰, \lambda'_j \ge ۰, \qquad \mathrm{j} = ۱,\dots,\mathrm{n}$$
$$s_i^-, s_r^+, s_\delta^+, s_{i'}^-, s_\delta^-, s_{\delta'}^+ \ge ۰, \forall i, r, \delta, i', \delta'$$

که در آن $d_۱$ و $d_۲$ به ترتیب نقاط شکست مرحله ۱ و مرحله ۲ هستند. درحالی‌که تابع هدف یک تابع هدف SBM و EBGM یکپارچه است، محدودیت‌های اول و دوم مربوط به EBGM و سایر محدودیت‌ها مربوط به SBM است [۱۸].

در این مدل x_{ij}^{1} ورودی DMU_j در مرحله ۱ است، $\delta z_{\delta j}^{1}$امین خروجی DMU_j در مرحله ۱ است که ورودی مرحله ۲ می‌شود (که می‌توان آن را ورودی میانجی نیز نامید) و $r\ y_{rj}^{1}$ امین خروجی از DMU_j در مرحله ۱ که به مرحله ۲ منتقل نمی‌شود. m_1، l_1 و s_1 به ترتیب تعداد ورودی‌ها، ورودی‌های میانجی و خروجی‌ها هستند. متغیرهای سایر مراحل را می‌توان به همین ترتیب تعریف کرد. درحالی‌که مدل در مطالعه محمودی و امروزنژاد برای یک ساختار دومرحله‌ای پیشنهاد شده است، می‌توان آن را به‌راحتی با درنظرگرفتن هر مرحله به‌عنوان یک بازیکن در مفهوم EBGM به یک ساختار چندمرحله‌ای گسترش داد. اگرچه هر زیرشبکه به‌عنوان یک بازیکن در نظر گرفته شده است، ایده EBGM، به‌عنوان یک مدل بازی مشارکتی، به حداکثر رساندن سودمندی همه بازیکنان است که مطابق با ایده NDEA است که هدف آن به حداکثر رساندن کارایی کل واحدهای تصمیم‌گیری با حداکثرکردن کارایی است[۱۸].

۳-۳- چارچوب تحلیل و مجموعه داده‌ها

در پژوهش حاضر، با انجام یک مرور جامع بر ادبیات و مطالعات پیشین، مجموعه کاملی از شاخص‌های سنجش اکوسیستم نوآوری سبز استخراج گردید. در ادامه، باتوجه‌به فراوانی و تکرارپذیری شاخص‌ها در مطالعات مختلف، جامعیت آن‌ها در پوشش ابعاد ورودی و خروجی اکوسیستم نوآوری سبز و همچنین دردسترس‌بودن داده‌های مرتبط با این شاخص‌ها در پایگاه‌های اطلاعاتی جهانی، متغیرهای کل پرسنل تحقیق‌وتوسعه و محققین و ارزش کل سرمایه‌گذاری‌های مرحله اولیه سبز به‌عنوان ورودی مرحله خلق و توسعه دانش؛ پتنت سبز، انتشارات دانشگاهی مرتبط با نوآوری زیست‌محیطی و آگاهی از مدیریت پایداری به‌عنوان متغیر میانجیگر بین مرحله خلق و توسعه دانش و پیاده‌سازی دانش؛ توسعه فناوری‌های مرتبط با محیط‌زیست به‌عنوان متغیر میانجیگر مرحله پیاده‌سازی دانش و تبدیلات مالی و اقتصادی؛ متغیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان ورودی مرحله تبدیلات مالی و اقتصادی؛ ارزش‌افزوده در فعالیت‌های حفاظت از محیط‌زیست و مدیریت منابع و اندازه بازار صنعت سبز به‌عنوان متغیر میانجیگر بین دو مرحله تبدیلات مالی و اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست و در نهایت متغیر اجرای مقررات زیست‌محیطی به‌عنوان ورودی و شاخص عملکرد زیست‌محیطی به‌عنوان خروجی مرحله حفاظت از محیط‌زیست انتخاب شدند. بر همین اساس مدل مفهومی پژوهش در شکل ۱ قابل‌مشاهده است.



شکل ۱: مدل مفهومی پژوهش

همچنین شایان ذکر است در پژوهش حاضر به دلیل دردسترس‌بودن اطلاعات و همچنین برنامه‌های جامع و مشخص اتحادیه اروپا در مسیر تحقق توسعه پایدار و دستیابی به نوآوری زیست‌محیطی، واحدهای تصمیم‌گیری (DMUs)، کشورهای عضو اتحادیه اروپا در نظر گرفته شدند. شاخص‌های آمار توصیفی داده‌ها مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳: شاخص‌های آمار توصیفی مدل مفهومی پژوهش

متغیرها	X_1	X_2	X_3	X_4	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Y_1
میانگین	۰.۰۳۷	۰.۰۳۵	۰.۰۳۷	۰.۰٤۰	۰.۰۳۸	۰.۰۳۹	۰.۰۳۷	۰.۰۳۷	۰.۰۳٦	۰.۰٤۲	۰.۰۳۷
انحراف معیار	۰.۰۰٥	۰.۰۱۲	۰.۰٥۸	۰.۰۲۱	۰.۰۲٦	۰.۰۱۷	۰.۰۱٤	۰.۰۲۳	۰.۰۱۲	۰.۰٥۷	۰.۰۱٤
MAX	۰.۰٤۷	۰.۰٥۷	۰.۲۲۸	۰.۱۰٥	۰.۰۹۹	۰.۰۹۱	۰.۰۷۰	۰.۰۹٤	۰.۰٦٤	۰.۲٦٤	۰.۰٦۰
MIN	۰.۰۳۰۳	۰.۰۱۲٥	۰.۰۰۰۱	۰.۰۱٦۲	۰.۰۰۰۲	۰.۰۱٦۷	۰.۰۱٥۱	۰.۰۰٤۲	۰.۰۱۳٤	۰.۰۰۰٤	۰.۰۱۰۲

۴- یافته‌های پژوهش

بر اساس داده‌های متغیرها، مراحل مدل‌سازی NDEA و Game-SBM-NDEA بر اساس دیدگاه محمودی و امروزنژاد (۲۰۲۱) [۱۸] در محیط نرم‌افزار لینگو کدنویسی شده و پس از رفع تمامی خطاهای مدل‌سازی نتایج به‌صورت زیر به دست آمد. سپس نتایج حاصل از دو مدل Game-SBM-NDEA و SBM-NDEA با یکدیگر مقایسه گردید. در نهایت جهت رتبه‌بندی واحدهای تصمیم‌گیری از مدلی یکپارچه بر اساس تحلیل پوششی داده‌ها و تئوری بازی‌ها استفاده می‌شود.

در ابتدا مقادیر کارایی هر یک از مراحل و کارایی نسبی کل کشورها با استفاده از مدل شبکه‌ای محاسبه شد. مقادیر کارایی در جدول زیر قابل‌مشاهده است

جدول ۴: امتیازات کارایی هر یک از کشورها در هر مرحله

کشور	کارایی نسبی	کارایی مرحله خلق و توسعه دانش	کارایی مرحله پیاده‌سازی دانش	کارایی مرحله تبدیلات مالی و اقتصادی	کارایی مرحله حفاظت از محیطزیست	کشور	کارایی نسبی	کارایی مرحله خلق و توسعه دانش	کارایی مرحله پیاده‌سازی دانش	کارایی مرحله تبدیلات مالی و اقتصادی	کارایی مرحله حفاظت از محیطزیست
اتریش	۰.۱۹	۰.۲۵	۰.۱	۰.٤۱	۰.۲٤	ایتالیا	۰.۳۷	۱	۰.۱۲	۰.۸۱	۰.۵
بلژیک	۰.۱۷	۰.۱٤	۰.۱۲	۰.۳۳	۰.٤٤	لتونی	۰.۰٦	۱	۰.۱٤	۰.۰۲	۰.۳۷
بلغارستان	۰.۱۳	۰.۳۷	۰.۱۹	۰.۰۵	۱	لیتوانی	۰.۰۷	۰.۳۵	۰.۰۹	۰.۰٤	۰.۳۵
کرواسی	۰.۱۲	۰.۳۷	۰.۰۷	۰.۱	۰.۵۱	لوکزامبورگ	۰.۱۲	۰.۱۵	۰.۱۲	۰.۰۹	۰.۳۵
قبرس	۰.۳۲	۱	۰.۰۹	۱	۰.۵۳	مالت	۰.۰۲	۰.۱۲	۱	۰.۰۰٤	۱
جمهوری چک	۰.۱۹	۰.۱٤	۰.۱٦	۰.۲۲	۰.۳۵	هلند	۰.۱۹	۰.۱٦	۰.۰۹	۱	۰.۳
دانمارک	۰.۰۸	۰.۲۲	۰.۲	۰.۰٦	۰.۳	لهستان	۰.۲۵	۰.۵۱	۰.۱۲	۰.۷	۰.۳٦
استونی	۰.۰۲	۰.۲٦	۰.٤۱	۰.۰۱	۰.۲۹	پرتغال	۰.۱۹	۰.۹۳	۰.۱۲	۰.۱۲	۰.۲۸
فنلاند	۰.۲	۰.۱٦	۰.۱۲	۰.٤۹	۰.۲۵	رومانی	۰.۲۹	۱	۰.۰۹	۱	۰.۵۷
فرانسه	۰.۲۱	۰.۱۳	۰.۱۲	۰.۹۲	۰.٤	اسلواکی	۰.۱۷	۱	۰.۲۲	۰.۰۷	۰.٤۷
آلمان	۰.۲۲	۰.۱٦	۰.۱۲	۱	۰.۳	اسلوونی	۰.۰۵	۰.۱۸	۰.۱۲	۰.۰۳	۰.٤۵
یونان	۰.۲۷	۰.٤٦	۰.۱٦	۰.۱۷	۱	اسپانیا	۰.۲۲	۰.۲۹	۰.۱	۰.۸٦	۰.٤
مجارستان	۰.۱٦	۰.۱۳	۰.۱۱	۰.۱۹	۰.۵۲	سوئد	۰.۱٤	۰.۲۲	۰.۱۱	۰.۱۲	۰.۳٦
ایرلند	۰.۱٤	۰.۱۳	۰.۰۸	۰.۱۸	۰.٤۹						

جدول فوق نشان‌دهندۀ امتیازات مرتبط به کارایی نسبی کشورهای مختلف در ٤ مرحلۀ خلق و توسعه دانش، پیاده‌سازی دانش، تبدیلات مالی و اقتصادی و حفاظت از محیطزیست در اکوسیستم نوآوری سبز می‌باشد. این جدول را می‌توان از دو منظر تحلیل کرد، نخست از جهت امتیاز کارایی که هر کشور در کل اکوسیستم نوآوری سبز داشته است.

از منظر دوم اگر به کارایی کشورهای مختلف در هریک از مراحل چهارگانه مدل پژوهش نگاهی انداخته شود مشخص می‌گردد که کدام کشورها در هریک از مراحل کارا بوده و از سوی دیگر کدام یک از مراحل کمترین امتیازات کارایی را در مقایسه با سایر مراحل داشته‌اند. همان گونه که در جدول ٤ مشاهده می‌شود، کشورهای قبرس، ایتالیا، لتونی، رومانی و اسلواکی در مرحلۀ

یک، کشور مالت در مرحلهٔ دوم، کشورهای قبرس، آلمان، هلند و رومانی در مرحلهٔ سوم و کشورهای بلغارستان، یونان و مالت در مرحلهٔ چهارم کاملاً کارا هستند. از مقادیر امتیازات کارایی نیز می‌توان برداشت کرد بیشترین امتیازات کارایی به ترتیب متعلق به مراحل چهارم، اول و سوم و کمترین امتیازات کارایی متعلق به مراحل دوم است و این نشان‌دهنده آن است که در مرحله دوم، یعنی پیاده‌سازی دانش، ضعف جدی عملکردی وجود دارد.

سپس جهت به‌کارگیری و حل مدل Game-SBM-NDEA ابتدا با تعیین تعداد خوشهٔ بهینه نقاط شکست بازی مشخص می‌شود. در تعیین تعداد خوشه بهینه لازم است فاصله بین خوشه‌ها و همگرایی درون خوشه‌ها زیاد باشد. به‌واسطهٔ خوشه‌بندی دو مرحله‌ای با معیار AIC[1] تعداد خوشه بهینه برابر با ۳ خوشه به‌دست می‌آید. در ادامه باتوجه‌به تعداد خوشه بهینه و با کمک روش خوشه‌بندی K-Means مشخص می‌گردد که هریک از کشورها به چه خوشه‌ای تعلق خواهد گرفت. جدول زیر نحوهٔ خوشه‌بندی کشورها را نشان می‌دهد.

جدول ۵: نحوه قرارگیری کشورها در خوشه‌بندی انجام شده

کشور	خوشه	کشور	خوشه	کشور	خوشه
اتریش	۳	فرانسه	۱	مالت	۲
بلژیک	۳	آلمان	۱	هلند	۱
بلغارستان	۲	یونان	۲	لهستان	۱
کرواسی	۳	مجارستان	۳	پرتغال	۳
قبرس	۱	ایرلند	۳	رومانی	۱
جمهوری چک	۳	ایتالیا	۱	اسلواکی	۳
دانمارک	۳	لتونی	۳	اسلوونی	۳
استونی	۳	لیتوانی	۳	اسپانیا	۱
فنلاند	۳	لوکزامبورگ	۳	سوئد	۳

بر اساس نتایج خوشه‌بندی در جدول فوق کشورهای قبرس، فرانسه، آلمان، ایتالیا، هلند، لهستان، رومانی و اسپانیا در خوشه یک، بلغارستان، یونان و مالت در خوشه دو و اتریش،

[1] معیار ارزیابی اطلاع آیکاکه (AIC): این شاخص به تأثیر تعداد پارامترها و تابع درست‌نمایی توجه داشته و نمایانگر میزان اطلاعاتی است که توسط مدل ازدست‌رفته است؛ در نتیجه هرچه معیار ارزیابی AIC کوچک‌تر باشد مدل موردنظر بهتر و مناسب‌تر است.

بلژیک، کرواسی، جمهوری چک، دانمارک، استونی، فنلاند، مجارستان، ایرلند، لتونی، لیتوانی، لوکزامبورگ، پرتغال، اسلواکی، اسلوونی و سوئد در خوشه سه قرار می‌گیرند.

پس از تعیین تعداد خوشه بهینه باتوجه‌به حداقل کارایی کشورها در هر خوشه و در هر مرحله نقطه شکست تعیین می‌شود. بر همین اساس نقاط شکست هر یک از خوشه‌ها در هر یک از مراحل در جداول زیر قابل‌مشاهده است.

جدول ۶: نقاط شکست خوشه‌ها

شماره خوشه	کارایی مرحله خلق و توسعه دانش	کارایی مرحله پیاده‌سازی دانش	کارایی مرحله تبدیلات مالی و اقتصادی	کارایی مرحله حفاظت از محیط‌زیست
۱	۰.۱۲۸	۰.۰۹۰۳	۰.۷۰۱	۰.۳
۲	۰.۱۱۸	۰.۱٥٦	۰.۰۰٥	۱
۳	۰.۱۲۹	۰.۰٦۹۷	۰.۰۱۲۸	۰.۲٤٥

از مزایایی که روش ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها نسبت به روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای دارد این است که محقق می‌تواند با ایجاد یک بازی رقابتی، امتیازات کارایی را بر اساس سهم یا وزن ورودی‌ها یا خروجی‌های مختلف تعیین کند؛ به بیان دیگر ورودی‌های منتخب در استراتژی بازی در رقابت با یکدیگر تلاش می‌کنند تا امتیازات کارایی یک واحد تصمیم‌گیری را به حداکثر خود برسانند. باتوجه‌به مدل شبکه‌ای در این پژوهش سیاست‌گذاری جهت تعیین استراتژی بازی، تنها در مورد ورودی‌ها قابل‌اعمال است؛ از میان ورودی‌های مدل، دو شاخص " اجرای مقررات زیست‌محیطی" و " فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر" به‌عنوان معیارهای تعیین استراتژی بازی انتخاب شدند؛ زیرا ماهیتشان از جنس سیاستی است و در واقع قابلیت کنترل، مدیریت و سیاست‌گذاری بیشتری دارند.

در جدول ۷ امتیازات کارایی با روش‌های تحلیل‌پوششی داده‌های شبکه‌ای و روش ترکیبی تحلیل‌پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها و امتیازات کارایی با تمرکز بر دو شاخص ورودی "اجرای مقررات زیست‌محیطی" و "فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر" مشاهده می‌شود. در این جدول آلفا که از تقسیم امتیازات کارایی استراتژی متمرکز بر شاخص "فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر" بر امتیازات کارایی استراتژی متمرکز بر شاخص "اجرای مقررات زیست‌محیطی" حاصل می‌شود، نشان‌دهندهٔ اثربخشی تمرکز بر هرکدام از استراتژی‌های بازی می‌باشد؛ به‌عنوان‌مثال در کشور اتریش امتیاز کارایی مدل با تمرکز بر اجرای

مقررات زیست‌محیطی ۰.٤٧٦ و امتیاز کارایی مدل با تمرکز بر فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ۰.۳۹٥ و آلفا ۰.۸۳۰ می‌باشد در نتیجه تمرکز بر اجرای مقررات زیست‌محیطی برای کشور اتریش اثربخشی بیشتری دارد؛ همچنین مثلاً ازآنجاییکه آلفای کشور بلژیک ۰.۹٦۱ و اتریش ۰.۸۳۰ است، می‌توان دریافت که اثربخشی تمرکز بر استراتژی اجرای مقررات زیست‌محیطی بالاتر از اثربخشی تمرکز بر استراتژی فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در بلژیک نسبت به اتریش است.

امتیاز کارایی یکپارچه که از ضرب امتیازات کارایی استراتژی متمرکز بر شاخص "فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر" در امتیازات کارایی استراتژی متمرکز بر شاخص "اجرای مقررات زیست‌محیطی" حاصل می‌شود، در واقع کارایی ترکیبی یا تلفیق شده بر حسب دو نوع استراتژی ورودی است؛ به عبارتی امتیاز کارایی یکپارچه نشان می‌دهد که اگر به‌صورت هم‌زمان به هر دو استراتژی توجه شود امتیاز کارایی در نهایت چه میزان است. این امتیاز به دلیل واریانس بالا، واگرایی و قدرت تفکیک و تبیین بیشتری دارد در نتیجه اختلاف را بهتر نشان می‌دهد.

جدول ۷: نتایج نهایی امتیازات کارایی اکوسیستم نوآوری سبز برای ۲۷ کشور عضو اتحادیه اروپا

کشورها	مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای	مدل NDEA-Game	تمرکز بر اجرای مقررات زیست‌محیطی	تمرکز بر فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	اثربخشی تمرکز بر هر استراتژی (α)	امتیاز کارایی یکپارچه[1]
اتریش	۰.۱۸٥	۰.۳۹٥	۰.٤٧٦	۰.۳۹٥	۰.۸۳	۰.۱۸۸
بلژیک	۰.۱۷۳	۰.۲۲۷	۰.۲۳۷	۰.۲۲۷	۰.۹٦۱	۰.۰٥٤
بلغارستان	۰.۱۳۱	۰.۲۱٤	۰.۲۱٤	۰.۲۱٤	۱	۰.۰٤٦
کرواسی	۰.۱۲	۰.۲٦۹	۰.۲٤٥	۰.۲٤٥	۱	۰.۰٦
قبرس	۰.۳۲۱	۰.۸۷۳	۰.۸۷۳	۰.۸۷۳	۱	۰.۷٦۲
چک	۰.۱۹۲	۰.۲۱۱	۰.۱۲۳	۰.۲۱۱	۱.۷۱۳	۰.۰۲٦
دانمارک	۰.۰۸٥	۰.۱۳۲	۰.۱۳۲	۰.۱۳۲	۱	۰.۰۱۷
استونی	۰.۰۲٥	۰.۳٤٥	۰.۳٤٥	۰.۳٤٥	۱	۰.۱۱۹
فنلاند	۰.۲۰۱	۰.٤۸۱	۰.٤۹۸	۰.٤۸۱	۰.۹٦٥	۰.۲۳۹
فرانسه	۰.۲۰۷	۰.۲۱٥	۰.۱۰۳	۰.۲۱٥	۲.۰۹	۰.۰۲۲
آلمان	۰.۲۲۲	۰.۲۹۹	۰.۲۹۹	۰.۲۹۹	۱	۰.۰۸۹

[1] Unified efficiency

کشورها	مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای	مدل NDEA-Game	تمرکز بر اجرای مقررات زیست‌محیطی	تمرکز بر فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	اثربخشی تمرکز بر هر استراتژی (α)	امتیاز کارایی یکپارچه[1]
یونان	۰.۲٦۹	۰.۳۲۲	۰.۳۲۲	۰.۳۲۲	۱	۰.۱۰٤
مجارستان	۰.۱۵۷	۰.۲۸	۰.۱۹۵	۰.۱۸۱	۰.۹۲۸	۰.۰۳۵
ایرلند	۰.۱۳٦	۰.۲٤۵	۰.۱۸۳	۰.۱۸۸	۱.۰۲۳	۰.۰۳٤
ایتالیا	۰.۳٦٦	۰.۸۷٤	۰.۸۷٤	۰.۸۷٤	۱	۰.۷٦۳
لتونی	۰.۰٦۲	۰.۸۷۱	۰.۸۷۱	۰.۸۷۱	۱	۰.۷۵۸
لیتوانی	۰.۰٦۹	۰.۲۲	۰.۲۲۰	۰.۲۲	۱	۰.۰٤۹
لوکزامبورگ	۰.۱۲٤	۰.۱۰۳	۰.۰۵٤	۰.۰۸۲	۱.۵۱	۰.۰۰٤
مالت	۰.۰۲۱	۰.۸٤٤	۰.۸٤٤	۰.۸٤٤	۱	۰.۷۱۲
هلند	۰.۱۹۵	۰.۲۹۹	۰.۰۳۵	۰.۲۹۹	۸.۵۸۲	۰.۰۱
لهستان	۰.۲۵۳	۰.۳۳٤	۰.۳۳٤	۰.۳۳٤	۱	۰.۱۱۲
پرتغال	۰.۱۹۲	۰.۷٤٦	۰.۷٤٦	۰.۷٤٦	۱	۰.۵۵۷
رومانی	۰.۲۸۵	۰.۸۷۲	۰.۸۷۲	۰.۸۷۲	۱	۰.۷٦۰
اسلواکی	۰.۱۷۳	۰.۸۷	۰.۸۷	۰.۸۷	۱	۰.۷۵۷
اسلوونی	۰.۰۵	۰.۲۰٦	۰.۰٤۹	۰.۰٤۹	۱	۰.۰۰۲
اسپانیا	۰.۲۲۳	۰.۱۵٦	۰.۱۵۵	۰.۱۵٦	۱.۰۱۲	۰.۰۲٤
سوئد	۰.۱۳۸	۰.۱۱۷	۰.۱٦٤	۰.۱۰۵	۰.٦۳۹	۰.۰۱۷

همان‌طور که از جدول ۷ مشخص است، در مدل تحلیل‌پوششی داده‌های شبکه‌ای بالاترین امتیاز کارایی مربوط به کشور ایتالیا با امتیاز ۰.۳٦٦ و پایین‌ترین امتیاز کارایی مربوط به کشور مالت با امتیاز ۰.۰۲۱۵ است و در مدل ترکیبی تحلیل‌پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها بالاترین امتیاز کارایی مربوط به کشور ایتالیا با امتیاز ۰.۸۷٤ و پایین‌ترین امتیاز کارایی مربوط به کشور لوکزامبورگ با امتیاز ۰.۱۰۳ است؛ همچنین بالاترین امتیاز کارایی بر مبنای تمرکز بر اجرای مقررات زیست‌محیطی مربوط به کشور ایتالیا با امتیاز ۰.۸۷٤ و پایین‌ترین امتیاز کارایی مربوط به کشور هلند با امتیاز ۰.۰۳٤۸ است و بالاترین امتیاز کارایی بر مبنای تمرکز بر فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مربوط به کشور ایتالیا با امتیاز ۰.۸۷٤ و پایین‌ترین امتیاز کارایی مربوط به کشور اسلوونی با امتیاز ۰.۰۵۰ می‌باشد.

در شکل ۲ امتیازات کارایی هر یک از کشورهای منتخب با به‌کارگیری روش‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، روش ترکیبی تحلیل‌پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها و امتیازات کارایی با تمرکز بر دو شاخص ورودی "اجرای مقررات زیست‌محیطی" و "فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر" قابل مقایسه است.

شکل ۴: مقایسه امتیازات کارایی با به‌کارگیری روش‌های متفاوت برای کشورهای عضو اتحادیه اروپا

در جدول ۸ مقادیر مازاد و کمبود، مقادیر ورودی و خروجی و درصد تغییرات جهت کارا شدن نسبت به ورودی‌ها و خروجی‌ها با به‌کارگیری دو روش تحلیل‌پوششی داده‌های شبکه‌ای و روش ترکیبی تحلیل‌پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها مشاهده می‌شود.

جدول ۸: مقایسه مقادیر مازاد و کمبود، مقادیر ورودی و خروجی و درصد تغییرات جهت کارا شدن نسبت به ورودی‌ها و خروجی‌ها با دو روش NDEA وNDEA-GAME

NDEA-GAME						NDEA										DMUs
Sr/Yr	Yr		Si/Xi	Si		Sr/Yr	Yr		Sr		Si/Xi	Xi		Si		
0.426805	0.017072	SNY(1, 1, 4)	0	0	SNX(۱, ۱, ۱)	0	0.04000	Y(1, 1, 4)	۰	SNY(1, 1, 4)	0.690031	0.053۰	X(۱, ۱, ۱)	0.036572	SNX(۱, ۱, ۱)	اتریش
			0.330223	0.02764	SNX(۱, ۱, ۳)						0.330223	0.0837	X(۱, ۱, ۳)	0.0276	SNX(۱, ۱, ۳)	
			0	0	SNX(۱, ۱, ٤)						0.473279	0.0541	X(۱, ۱, ٤)	0.0256	SNX(۱, ۱, ٤)	
			0.165921	0.001112	SNX(2, 1, 1)						0.807612	0.0067	X(2, 1, 1)	0.0054	SNX(2, 1, 1)	
0.15743	0.00551	SNY(1, 2, 4)	0	0	SNX(1, 2, 1)	0	0.03500	Y(1, 2, 4)	۰	SNY(1, 2, 4)	0	0.0544	X(1, 2, 1)	0.0000	SNX(1, 2, 1)	بلژیک
			0.074216	0.001982	SNX(1, 2, 3)						0.750983	0.0267	X(1, 2, 3)	0.0201	SNX(1, 2, 3)	
			0.39914	0.019877	SNX(1, 2, 4)						0.499325	0.0498	X(1, 2, 4)	0.0249	SNX(1, 2, 4)	
			0.03693	0.00079	SNX(2, 2, 1)						0.775701	0.0214	X(2, 2, 1)	0.0166	SNX(2, 2, 1)	
0	0	SNY(1, 3, 4)	0	0	SNX(1, 3, 1)	0	0.03120	Y(1, 3, 4)	۰	SNY(1, 3, 4)	0.328909	0.0227	X(1, 3, 1)	0.0075	SNX(1, 3, 1)	بلغارستان
			0	0	SNX(1, 3, 3)						0	0.0229	X(1, 3, 3)	0.0000	SNX(1, 3, 3)	
			0	0	SNX(1, 3, 4)						0	0.0125	X(1, 3, 4)	0.0000	SNX(1, 3, 4)	
			0.827519	0.007117	SNX(2, 3, 1)						0.843703	0.0086	X(2, 3, 1)	0.0073	SNX(2, 3, 1)	
0.023712	0.000858	SNY(1, 4, 4)	0.261074	0.006187	SNX(1, 4, 1)	0	0.03620	Y(1, 4, 4)	۰	SNY(1, 4, 4)	0.252952	0.0237	X(1, 4, 1)	0.0060	SNX(1, 4, 1)	کرواسی
			0.228555	0.007359	SNX(1, 4, 3)						0.33922	0.0322	X(1, 4, 3)	0.0109	SNX(1, 4, 3)	
			0	0	SNX(1, 4, 4)						0.023163	0.0264	X(1, 4, 4)	0.0006	SNX(1, 4, 4)	
			0.849368	0.014949	SNX(2, 4, 1)						0.912862	0.0176	X(2, 4, 1)	0.0161	SNX(2, 4, 1)	
0	0	SNY(1, 5, 4)	0	0	SNX(1, 5, 1)	0	0.03490	Y(1, 5, 4)	۰	SNY(1, 5, 4)	0	0.0125	X(1, 5, 1)	0.0000	SNX(1, 5, 1)	قبرس
			0	0	SNX(1, 5, 3)						0	0.0002	X(1, 5, 3)	0.0000	SNX(1, 5, 3)	
			0.203129	0.006338	SNX(1, 5, 4)						0.203129	0.0312	X(1, 5, 4)	0.0063	SNX(1, 5, 4)	
			0	0	SNX(2, 5, 1)						0	0.03	X(2, 5, 1)	0.0000	SNX(2, 5, 1)	
0.217823	0.007842	SNY(1, 6, 4)	0.235031	0.009777	SNX(1, 6, 1)	0	0.03600	Y(1, 6, 4)	۰	SNY(1, 6, 4)	0	0.0416	X(1, 6, 1)	0.0000	SNX(1, 6, 1)	جمهوری چک
			0	0	SNX(1, 6, 3)						0	0.0205	X(1, 6, 3)	0.0000	SNX(1, 6, 3)	
			0.127064	0.0046	SNX(1, 6, 4)						0.291547	0.0362	X(1, 6, 4)	0.0106	SNX(1, 6, 4)	
			0.109712	0.006583	SNX(2, 6, 1)						0.962319	0.06	X(2, 6, 1)	0.0577	SNX(2, 6, 1)	
0.626203	0.029369	SNY(1, 7, 4)	0	0	SNX(1, 7, 1)	0	0.04690	Y(1, 7, 4)	۰	SNY(1, 7, 4)	0.580728	0.0605	X(1, 7, 1)	0.0351	SNX(1, 7, 1)	دانمارک
			0.348746	0.023994	SNX(1, 7, 3)						0.116241	0.0688	X(1, 7, 3)	0.0080	SNX(1, 7, 3)	
			0	0	SNX(1, 7, 4)						0.415891	0.0572	X(1, 7, 4)	0.0238	SNX(1, 7, 4)	
			0.757784	0.012731	SNX(2, 7, 1)						0.88899	0.0168	X(2, 7, 1)	0.0149	SNX(2, 7, 1)	

NDEA-GAME						NDEA										DMUs
Sr/Yr	Yr		Si/Xi	Si		Sr/Yr	Yr		Sr		Si/Xi	Xi		Si		
0	0	SNY(1, 8, 4)	0	0	SNX(1, 8, 1)	0	0.03690	Y(1, 8, 4)	.	SNY(1, 8, 4)	0.578947	0.0275	X(1, 8, 1)	0.0159	SNX(1, 8, 1)	استونی
			0	0	SNX(1, 8, 3)						0	0.0401	X(1, 8, 3)	0.0000	SNX(1, 8, 3)	
			0.377081	0.015913	SNX(1, 8, 4)						0.377081	0.0422	X(1, 8, 4)	0.0159	SNX(1, 8, 4)	
			0.471352	0.059767	SNX(2, 8, 1)						0.78084	0.1268	X(2, 8, 1)	0.0990	SNX(2, 8, 1)	
0.502183	0.0231	SNY(1, 9, 4)	0.318254	0.01779	SNX(1, 9, 1)	0	0.04600	Y(1, 9, 4)	.	SNY(1, 9, 4)	0	0.0559	X(1, 9, 1)	0.0000	SNX(1, 9, 1)	فنلاند
			0.067269	0.005254	SNX(1, 9, 3)						0.067269	0.0781	X(1, 9, 3)	0.0053	SNX(1, 9, 3)	
			0	0	SNX(1, 9, 4)						0.420002	0.0565	X(1, 9, 4)	0.0237	SNX(1, 9, 4)	
			0.390143	0.02493	SNX(2, 9, 1)						0.922811	0.0639	X(2, 9, 1)	0.0590	SNX(2, 9, 1)	
0	0	SNY(1, 10, 4)	0	0	SNX(1, 10, 1)	0	0.03760	Y(1, 10, 4)	.	SNY(1, 10, 4)	0	0.0468	X(1, 10, 1)	0.0000	SNX(1, 10, 1)	فرانسه
			0	0	SNX(1, 10, 3)						0.004197	0.0229	X(1, 10, 3)	0.0001	SNX(1, 10, 3)	
			0.297356	0.011329	SNX(1, 10, 4)						0.29696	0.0381	X(1, 10, 4)	0.0113	SNX(1, 10, 4)	
			0.633768	0.017175	SNX(2, 10, 1)						0.896849	0.0271	X(2, 10, 1)	0.0243	SNX(2, 10, 1)	
0.414212	0.015533	SNY(1, 11, 4)	0.055134	0.002663	SNX(1, 11, 1)	0	0.03750	Y(1, 11, 4)	.	SNY(1, 11, 4)	0	0.0483	X(1, 11, 1)	0.0000	SNX(1, 11, 1)	آلمان
			0	0	SNX(1, 11, 3)						0	0.0306	X(1, 11, 3)	0.0000	SNX(1, 11, 3)	
			0	0	SNX(1, 11, 4)						0.508923	0.0544	X(1, 11, 4)	0.0277	SNX(1, 11, 4)	
			0.762095	0.050374	SNX(2, 11, 1)						0.95996	0.0661	X(2, 11, 1)	0.0635	SNX(2, 11, 1)	
0	0	SNY(1, 12, 4)	0	0	SNX(1, 12, 1)	0	0.03380	Y(1, 12, 4)	.	SNY(1, 12, 4)	0.53919	0.0387	X(1, 12, 1)	0.0209	SNX(1, 12, 1)	یونان
			0	0	SNX(1, 12, 3)						0	0.0239	X(1, 12, 3)	0.0000	SNX(1, 12, 3)	
			0	0	SNX(1, 12, 4)						0	0.0185	X(1, 12, 4)	0.0000	SNX(1, 12, 4)	
			0.576157	0.001152	SNX(2, 12, 1)						0.320907	0.002	X(2, 12, 1)	0.0006	SNX(2, 12, 1)	
0.106866	0.003537	SNY(1, 13, 4)	0.087379	0.003032	SNX(1, 13, 1)	0	0.03310	Y(1, 13, 4)	.	SNY(1, 13, 4)	0	0.0347	X(1, 13, 1)	0.0000	SNX(1, 13, 1)	مجارستان
			0.150493	0.003085	SNX(1, 13, 3)						0.173029	0.0205	X(1, 13, 3)	0.0035	SNX(1, 13, 3)	
			0	0	SNX(1, 13, 4)						0.096548	0.0261	X(1, 13, 4)	0.0025	SNX(1, 13, 4)	
			0.227691	0.001047	SNX(2, 13, 1)						0.590028	0.0046	X(2, 13, 1)	0.0027	SNX(2, 13, 1)	
0	0	SNY(1, 14, 4)	0.369898	0.016645	SNX(1, 14, 1)	0	0.03450	Y(1, 14, 4)	.	SNY(1, 14, 4)	0	0.045	X(1, 14, 1)	0.0000	SNX(1, 14, 1)	ایرلند
			0.413872	0.006912	SNX(1, 14, 3)						0.185285	0.0167	X(1, 14, 3)	0.0031	SNX(1, 14, 3)	
			0.396132	0.016123	SNX(1, 14, 4)						0.396132	0.0407	X(1, 14, 4)	0.0161	SNX(1, 14, 4)	
			0.543747	0.024469	SNX(2, 14, 1)						0.911765	0.045	X(2, 14, 1)	0.0410	SNX(2, 14, 1)	
0	0	SNY(1, 15, 4)	0	0	SNX(1, 15, 1)	0	0.03470	Y(1, 15, 4)	.	SNY(1, 15, 4)	0	0.0423	X(1, 15, 1)	0.0000	SNX(1, 15, 1)	ایتالیا
			0.206358	0.007305	SNX(1, 15, 3)						0.384417	0.0354	X(1, 15, 3)	0.0136	SNX(1, 15, 3)	

NDEA-GAME						NDEA										DMUs
Sr/Yr	Yr		Si/Xi	Si		Sr/Yr	Yr		Sr		Si/Xi	Xi		Si		
			0	0	SNX(1, 15, 4)						0	0.0232	X(1, 15, 4)	0.0000	SNX(1, 15, 4)	
			0	0	SNX(2, 15, 1)						0	0.0005	X(2, 15, 1)	0.0000	SNX(2, 15, 1)	
0.269853	0.009931	SNY(1, 16, 4)	0	0	SNX(1, 16, 1)	0	0.03680	Y(1, 16, 4)	۰	SNY(1, 16, 4)	0	0.0184	X(1, 16, 1)	0.0000	SNX(1, 16, 1)	لتونی
			0.597605	0.059342	SNX(1, 16, 3)						0.643366	0.0993	X(1, 16, 3)	0.0639	SNX(1, 16, 3)	
			0	0	SNX(1, 16, 4)						0.240118	0.0345	X(1, 16, 4)	0.0083	SNX(1, 16, 4)	
			0	0	SNX(2, 16, 1)						0	0.001	X(2, 16, 1)	0.0000	SNX(2, 16, 1)	
0	0	SNY(1, 17, 4)	0	0	SNX(1, 17, 1)	0	0.03360	Y(1, 17, 4)	۰	SNY(1, 17, 4)	0.227681	0.0265	X(1, 17, 1)	0.0060	SNX(1, 17, 1)	لیتوانی
			0.091168	0.003683	SNX(1,1 7, 3)						0.200527	0.0404	X(1,1 7, 3)	0.0081	SNX(1,1 7, 3)	
			0.310194	0.010764	SNX(1, 17, 4)						0.310194	0.0347	X(1, 17, 4)	0.0108	SNX(1, 17, 4)	
			0.968359	0.071562	SNX(2, 17, 1)						0.976329	0.0739	X(2, 17, 1)	0.0722	SNX(2, 17, 1)	
0.661883	0.028792	SNY(1, 18, 4)	0	0	SNX(1, 18, 1)	0	0.04350	Y(1, 18, 4)	۰	SNY(1, 18, 4)	0	0.0554	X(1, 18, 1)	0.0000	SNX(1, 18, 1)	لوکزامبورگ
			0	0	SNX(1, 18, 3)						0	0.0105	X(1, 18, 3)	0.0000	SNX(1, 18, 3)	
			0	0	SNX(1, 18, 4)						0.398273	0.0515	X(1, 18, 4)	0.0205	SNX(1, 18, 4)	
			0.515363	0.136262	SNX(2, 18, 1)						0.960094	0.2644	X(2, 18, 1)	0.2538	SNX(2, 18, 1)	
0	0	SNY(1, 19, 4)	0.00048	0.000008201347	SNX(1, 19, 1)	0	0.04520	Y(1, 19, 4)	۰	SNY(1, 19, 4)	0.693639	0.0171	X(1, 19, 1)	0.0119	SNX(1, 19, 1)	مالت
			0	0	SNX(1, 19, 3)						0	0.0034	X(1, 19, 3)	0.0000	SNX(1, 19, 3)	
			0	0	SNX(1,19, 4)						0	0.0322	X(1,19, 4)	0.0000	SNX(1,19, 4)	
			0	0	SNX(2, 19, 1)						0.987507	0.037	X(2, 19, 1)	0.0365	SNX(2, 19, 1)	
0.493177	0.018593	SNY(1, 20, 4)	0	0	SNX(1, 20, 1)	0	0.03770	Y(1, 20, 4)	۰	SNY(1, 20, 4)	0	0.0498	X(1, 20, 1)	0.0000	SNX(1, 20, 1)	هلند
			0	0	SNX(1, 20, 3)						0	0.0136	X(1, 20, 3)	0.0000	SNX(1, 20, 3)	
			0	0	SNX(1, 20, 4)						0.456334	0.0494	X(1, 20, 4)	0.0225	SNX(1, 20, 4)	
			0.665085	0.03791	SNX(2, 20, 1)						0.92291	0.057	X(2, 20, 1)	0.0526	SNX(2, 20, 1)	
0.10456	0.003179	SNY(1, 21, 4)	0	0	SNX(1, 21, 1)	0	0.03040	Y(1, 21, 4)	۰	SNY(1, 21, 4)	0.320157	0.0275	X(1, 21, 1)	0.0088	SNX(1, 21, 1)	لهستان
			0	0	SNX(1, 21, 3)						0.444092	0.0241	X(1, 21, 3)	0.0107	SNX(1, 21, 3)	
			0	0	SNX(1, 21, 4)						0.212486	0.0275	X(1, 21, 4)	0.0058	SNX(1, 21, 4)	
			0	0	SNX(2, 21, 1)						0	0.0014	X(2, 21, 1)	0.0000	SNX(2, 21, 1)	
0.048798	0.001479	SNY(1, 22, 4)	0.022597	0.000807	SNX(1, 22, 1)	0	0.03030	Y(1, 22, 4)	۰	SNY(1, 22, 4)	0.047801	0.0357	X(1, 22, 1)	0.0017	SNX(1, 22, 1)	پرتغال
			0.282178	0.015661	SNX(1, 22, 3)						0.391981	0.0555	X(1, 22, 3)	0.0218	SNX(1, 22, 3)	
			0.356285	0.014216	SNX(1, 22, 4)						0.459013	0.0399	X(1, 22, 4)	0.0183	SNX(1, 22, 4)	
			0	0	SNX(2, 22, 1)						0.026044	0.0009	X(2, 22, 1)	0.0000	SNX(2, 22, 1)	

DMUs	NDEA											NDEA-GAME					
	Si		Xi		Si/Xi	Sr		Yr		Sr/Yr	Si		Si/Xi	Yr		Sr/Yr
رومانی	0.0000	SNX(1, 23, 1)	X(1, 23, 1)	0.0102	0	SNY(1, 23, 4)	·	Y(1, 23, 4)	0.03370	0	0	SNX(1, 23, 1)	0	SNY(1, 23, 4)	0	0
	0.0000	SNX(1, 23, 3)	X(1, 23, 3)	0.0384	0						0	SNX(1, 23, 3)	0		0	
	0.0000	SNX(1, 23, 4)	X(1, 23, 4)	0.0177	0						0	SNX(1, 23, 4)	0		0	
	0.0000	SNX(2, 23, 1)	X(2, 23, 1)	0.0009	0						0	SNX(2, 23, 1)	0		0	
اسلواکی	0.0000	SNX(1, 24, 1)	X(1, 24, 1)	0.0225	0	SNY(1, 24, 4)	·	Y(1, 24, 4)	0.03610	0	0	SNX(1, 24, 1)	0	SNY(1, 24, 4)	0.00531	0.14709
	0.0000	SNX(1,24, 3)	X(1,24, 3)	0.0216	0						0	SNX(1, 24, 3)	0		0	
	0.0038	SNX(1, 24, 4)	X(1, 24, 4)	0.0295	0.128229						0	SNX(1, 24, 4)	0		0	
	0.0000	SNX(2, 24, 1)	X(2, 24, 1)	0.0004	0						0	SNX(2, 24, 1)	0		0	
اسلوونی	0.0277	SNX(1, 25, 1)	X(1, 25, 1)	0.0473	0.58644	SNY(1, 25, 4)	·	Y(1, 25, 4)	0.04050	0	0.013858	SNX(1, 25, 1)	0.292976	SNY(1, 25, 4)	0.011859	0.292815
	0.0129	SNX(1, 25, 3)	X(1, 25, 3)	0.0393	0.328562						0.007178	SNX(1, 25, 3)	0.182649		0	
	0.0084	SNX(1, 25, 4)	X(1, 25, 4)	0.0373	0.226494						0	SNX(1, 25, 4)	0		0	
	0.0288	SNX(2, 25, 1)	X(2, 25, 1)	0.0303	0.950719						0.025642	SNX(2, 25, 1)	0.846257		0	
اسپانیا	0.0077	SNX(1, 26, 1)	X(1, 26, 1)	0.0319	0.241955	SNY(1, 26, 4)	·	Y(1, 26, 4)	0.03400	0	0	SNX(1, 26, 1)	0	SNY(1, 26, 4)	0	0
	0.0094	SNX(1, 26, 3)	X(1, 26, 3)	0.0331	0.284319						0.009411	SNX(1, 26, 3)	0.284319		0	
	0.0044	SNX(1, 26, 4)	X(1, 26, 4)	0.0286	0.153104						0.004434	SNX(1, 26, 4)	0.155022		0	
	0.0148	SNX(2, 26, 1)	X(2, 26, 1)	0.0169	0.873747						0.014228	SNX(2, 26, 1)	0.841918		0	
سوئد	0.0248	SNX(1, 27, 1)	X(1, 27, 1)	0.0499	0.497941	SNY(1, 27, 4)	·	Y(1, 27, 4)	0.04370	0	0.012591	SNX(1, 27, 1)	0.252326	SNY(1, 27, 4)	0.026486	0.606095
	0.0654	SNX(1,27, 3)	X(1,27, 3)	0.0976	0.669712						0.064483	SNX(1,27, 3)	0.660685		0	
	0.0189	SNX(1, 27, 4)	X(1, 27, 4)	0.05	0.377372						0	SNX(1, 27, 4)	0		0	
	0.1439	SNX(2, 27, 1)	X(2, 27, 1)	0.1457	0.987851						0.140571	SNX(2, 27, 1)	0.9648		0	

همان‌طور که از جدول ۷ مشخص است، امتیازات کارایی در روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به‌مراتب کمتر از روش ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها می‌باشد. این جدول به‌صورت افقی و عمودی قابل‌تحلیل است؛ در تحلیل افقی امتیازات کارایی با روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند به‌عنوان‌مثال کشور اتریش لازم است بر استراتژی "اجرای مقررات زیست‌محیطی" متمرکز باشد تا بهترین نتیجه حاصل شود. برای تحلیل عمودی کشورهای مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند، مثلاً امتیاز کارایی نسبی کشورهای آلمان و اسپانیا در روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به یکدیگر بسیار نزدیک است، اما در روش ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها کارایی آلمان

حدود دو برابر اسپانیا می‌باشد. همچنین با توجه به جدول فوق مشخص می‌شود که با توجه به اینکه کشور مالت در روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای امتیاز کارایی نسبی خوبی را کسب نکرده، اما در رویکرد روش ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها توانسته با ایجاد رقابت و اعطای وزن‌های متفاوت به شاخص‌ها، امتیاز کارایی نسبی خود را تا حدود ٤۰ برابر افزایش دهد. مقادیر مربوط به سایر کشورها نیز به همین ترتیب تحلیل می‌گردد.

در آخر کشورهای عضو اتحادیه اروپا از نظر کارایی اکوسیستم نوآوری سبز بر اساس روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، رویکرد ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها، امتیازات کارایی متمرکز بر ورودی اجرای مقررات زیست‌محیطی و امتیازات کارایی متمرکز بر فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از پیشرو به ضعیف مطابق جدول زیر رتبه‌بندی می‌شوند.

جدول ۹: رتبه‌بندی کشورها بر اساس هر رویکرد

کشور	رتبه				کشور	رتبه			
	NDEA	NDEA-Game	تمرکز بر اجرای مقررات زیست‌محیطی	تمرکز بر فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر		NDEA	NDEA-Game	تمرکز بر اجرای مقررات زیست‌محیطی	تمرکز بر فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
اتریش	۱۳	۹	۹	۹	ایتالیا	۱	۱	۱	۱
بلژیک	۱۵	۱۸	۱۵	۱٦	لتونی	۲٤	٤	٤	٤
بلغارستان	۱۹	۲۱	۱۷	۱۹	لیتوانی	۲۳	۱۹	۱٦	۱۷
کرواسی	۲۱	۱٦	۱٤	۱۵	لوکزامبورگ	۲۰	۲۷	۲۵	۲٦
قبرس	۲	۲	۲	۲	مالت	۲۷	٦	٦	٦
جمهوری چک	۱۲	۲۲	۲۳	۲۰	هلند	۱۰	۱٤	۲۷	۱٤
دانمارک	۲۲	۲۵	۲۲	۲٤	لهستان	۵	۱۱	۱۱	۱۱
استونی	۲٦	۱۰	۱۰	۱۰	پرتغال	۱۱	۷	۷	۸

کشور	رتبه			کشور	رتبه			
	NDEA	NDEA-Game	تمرکز بر اجرای مقررات زیست‌محیطی		تمرکز بر فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	NDEA	NDEA-Game	تمرکز بر اجرای مقررات زیست‌محیطی	تمرکز بر فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
فنلاند	۹	۸	۸	رومانی	۸	۳	۳	۳	۳
فرانسه	۸	۲۰	۲٤	اسلواکی	۱۸	۱٤	٥	٥	٥
آلمان	۷	۱۳	۱۳	اسلوونی	۱۳	۲٥	۲۳	۲٦	۲۷
یونان	٤	۱۲	۱۲	اسپانیا	۱۲	٦	۲٤	۲۱	۲۳
مجارستان	۱٦	۱٥	۱۸	سوئد	۲۲	۱۷	۲٦	۲۰	۲٥
ایرلند	۱۸	۱۷	۱۹		۲۱				

باتوجه‌به جدول فوق سه کشور پیشرو در پژوهش حاضر بر اساس روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای به ترتیب ایتالیا، قبرس و رومانی و بر اساس رویکرد ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها، قبرس، ایتالیا و رومانی می‌باشند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر طراحی مدل مفهومی تلفیقی جدیدی به‌صورت Game-SBM-NDEA مبتنی بر ارزیابی کمبودها و مازادها برای تعیین میزان امتیازات کارایی عملکرد کشورهای منتخب در اکوسیستم نوآوری سبز می‌باشد. در این راستا بر مبنای مطالعه و بررسی پیشینه تحقیق یک چارچوب قیاسی شامل چهار مرحله برای تعریف مدل مفهومی انتخاب گردید. براین‌اساس معیارهای خلق و توسعه دانش، پیاده‌سازی دانش، تبدیلات مالی و اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست در قالب یک مدل مفهومی در برگیرنده ٤ متغیر ورودی، ٦ متغیر میانجی و ۱ متغیر خروجی طراحی گردید. در ادامه پس از استخراج داده‌های مربوط به کلیه متغیرها از پایگاه‌های جهانی و تعیین متغیرهای شعاعی و غیرشعاعی، با کاربرد رویکرد Game-SBM-NDEA به ارزیابی اکوسیستم نوآوری سبز ۲۷ کشور عضو اتحادیهٔ اروپا پرداخته می‌شود و پس از تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، نتایج دو مدل Game-SBM-NDEA و SBM-NDEA با

یکدیگر مقایسه می‌گردد. در نهایت جهت رتبه‌بندی واحدهای تصمیم‌گیری از مدلی یکپارچه بر اساس تحلیل پوششی داده‌ها و تئوری بازی‌ها استفاده می‌شود.

باتوجه‌به اینکه سیاست‌گذاری در حوزهٔ علم‌وفناوری سبز می‌تواند در کشورهای مختلف متفاوت باشد و با تمرکز بر ورودی‌ها و خروجی‌های مختلف صورت گیرد، ابتدا نوع متغیرهای ورودی و خروجی قابل‌کنترل در مدل شناسایی، سپس براین‌اساس یک مدل تلفیقی NDEA-Game طراحی و اجرا می‌گردد. بر همین اساس در پژوهش حاضر تمرکز بر دو شاخص ورودی "اجرای مقررات زیست‌محیطی" و "فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر" به دلیل قابلیت سیاست‌گذاری، کنترل و مدیریت‌پذیری به‌عنوان معیارهای تعیین استراتژی بازی انتخاب شدند. باتوجه‌به ماهیت تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، SBM و تئوری بازی‌ها مدل ریاضی مناسب تهیه گردیده و پس از جمع‌آوری داده‌ها از منابع مختلف در مورد بیست و هفت کشور منتخب مدل‌ها اجرا و نتایج آن‌ها مقایسه گردید.

به‌طورکلی در ساختار بازی امکان بهادادن به یک‌سری ورودی‌ها و تغییر سیاست‌ها و استراتژی‌های بازی وجود دارد. مدل ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها با ایجاد فضای بازی سعی کرده همه واحدها را در رقابت کاراتر کند. برای اندازه‌گیری این بها لازم است تا میزان مقادیر مازاد و کمبود تقسیم بر مقادیر ورودی و خروجی شود که درصد تغییرات جهت کارا شدن را نشان می‌دهد. آنچه که از مقایسه نتایج تحقیق می‌توان بدان دست‌یافت آن است که قدرت تبیین و تفکیک روش ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها خیلی بیشتر از روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای است؛ محمودی و امروزنژاد (۲۰۲۱) [۱۸] نیز در پژوهش خود به قدرت تبیین و تفکیک بیشتر روش ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها نسبت به روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای اشاره نمودند؛ همانطور که در جدول ۸ ملاحظه می‌کنید به‌عنوان‌مثال در روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای تمامی مقادیر کمبود صفر شده است، اما در روش ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها بسیاری از کشورها مقادیر کمبود غیرصفر پذیرفته‌اند و این امر بدین معناست که می‌توان با تغییر در مقادیر خروجی وضعیت بهتری را در مدل مشاهده کرد. همچنین باتوجه‌به جدول ۷ مدل ترکیبی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای و تئوری بازی‌ها

توانسته است شکاف عملکردی را در شاخص‌های ورودی به‌مراتب کاهش دهد و میانگین شکاف عملکردی در متغیرهای ورودی را از ۰.۳۲۵۲۱۲ به ۰.۱۸۱۳۷۸ برساند.

بر اساس یافته‌های پژوهش، برخی متغیرها از جمله «ارزش کل سرمایه‌گذاری‌های اولیه در حوزه سبز»، «پتنت‌های سبز»، «انتشارات دانشگاهی مرتبط با نوآوری زیست‌محیطی»، «توسعه فناوری‌های مرتبط با محیط‌زیست» و «اندازه بازار صنعت سبز»، در مقایسه با سایر متغیرها، دارای شکاف عملکردی بیشتری هستند و نیازمند توجه ویژه سیاست‌گذاران می‌باشند. در این راستا، کیانی و کیانی (۲۰۲۱) [٤١] و اسمال و همکاران (۲۰۱۷) [۲] نیز تحلیل پتنت را به عنوان یکی از معیارهای کلیدی نوآوری زیست‌محیطی مورد تأکید قرار داده و بیان کردند که پتنت‌ها به عنوان سنجه‌ای برای نوآوری در محصولات سبز به شمار می‌روند. همچنین، پاتا و همکاران (۲۰۲٤) [٦٦] در پژوهش خود بر اهمیت منابع مالی در پیاده‌سازی نوآوری‌های زیست‌محیطی و فرآیندهای مرتبط با آن تأکید نمودند. افزون بر این، نتایج پژوهش پورتاس و مارتی (۲۰۲۱) [٥٦] نیز نشان می‌دهد که انتشارات علمی در حوزه علوم زیست‌محیطی، یکی از شاخص‌های مهم اکوسیستم نوآوری سبز محسوب می‌شود. بنابراین، ارتقاء این متغیرها می‌تواند گام‌های مؤثری در جهت بهبود عملکرد کشورها در زمینه توسعه اکوسیستم نوآوری سبز باشد. در ادامه، پیشنهادهایی برای بهبود وضعیت اکوسیستم نوآوری سبز کشورها ارائه می‌گردد:

- در جهت بهبود ارزش سرمایه‌گذاری‌های اولیه سبز می‌توان با ایجاد صندوق‌های سرمایه‌گذاری تخصصی در حوزه نوآوری سبز، ارائه وام‌های کم‌بهره و تضمین‌های دولتی برای سرمایه‌گذاران دسترسی به منابع مالی اولیه را تسهیل نمود، همچنین می‌توان با آگاه‌سازی سرمایه‌گذاران از مزایای سرمایه‌گذاری در حوزه نوآوری سبز و ایجاد انگیزه‌های مالی برای آن‌ها فرهنگ سرمایه‌گذاری سبز را ترویج نمود.
- در جهت بهبود انتشارات دانشگاهی مرتبط با نوآوری زیست‌محیطی اقداماتی نظیر افزایش بودجه تحقیقات در حوزه نوآوری سبز، حمایت از همکاری بین دانشگاه‌ها و صنایع، ترویج انتشارات با دسترسی آزاد، گنجاندن شاخص‌های نوآوری سبز در ارزیابی عملکرد دانشگاه‌ها توصیه می‌گردد.
- جهت بهبود توسعه فناوری‌های مرتبط با محیط‌زیست، سرمایه‌گذاری در تحقیقات کاربردی برای توسعه فناوری‌های نوین در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت پسماند، تصفیه

آب‌وهوا، ایجاد زیرساخت‌های مناسب نظیر ایجاد آزمایشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی مجهز، حمایت از ایجاد شبکه‌های آزمایشگاهی و تسهیل انتقال فناوری با ایجاد مکانیزم‌های مؤثر برای انتقال فناوری از دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی به صنعت توصیه می‌گردد.

- با ایجاد تقاضا برای محصولات و خدمات سبز با تدوین سیاست‌های حمایتی از تولید و مصرف محصولات و خدمات سبز، ایجاد استانداردهای زیست‌محیطی و ترویج فرهنگ مصرف سبز از طریق آگاه‌سازی مصرف‌کنندگان از مزایای محصولات و خدمات سبز، ایجاد برچسب‌های زیست‌محیطی و حمایت از صادرات محصولات و خدمات سبز با ایجاد تسهیلات برای صادرات محصولات و خدمات سبز، شرکت در نمایشگاه‌های بین‌المللی می‌توان در راستای بهبود اندازه بازار صنعت سبز اقداماتی انجام داد.

با توجه به اینکه ایران نیز مانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه با چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی بسیاری مواجه است، استفاده از نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان یک نقشه‌راه برای طراحی و اجرای سیاست‌های مناسب در حوزه نوآوری سبز مورد استفاده قرار گیرند. با مقایسه وضعیت ایران با کشورهای پیشرو در حوزه نوآوری سبز، می‌توان نقاط ضعف و قوت اکوسیستم نوآوری سبز کشور را شناسایی کرد و برنامه‌های بهبود متناسب با آن تدوین کرد. همچنین نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی سیاست‌های هدفمند در حوزه نوآوری سبز استفاده شود. به عنوان مثال، با توجه به اهمیت سرمایه‌گذاری‌های اولیه سبز، می‌توان سیاست‌هایی برای جذب سرمایه‌گذاران در این حوزه تدوین کرد. اما توجه به این نکته نیز شایان توجه است که هر کشوری شرایط خاص خود را دارد. بنابراین، نتایج این پژوهش باید با توجه به شرایط خاص کشور ایران و سایر کشورهای در حال توسعه تطبیق داده شود و از آنجایی‌که کشورهای در حال توسعه معمولاً با محدودیت منابع مالی و انسانی مواجه هستند. بنابراین، سیاست‌های طراحی شده باید با توجه به این محدودیت‌ها قابل اجرا باشند. همچنین مدل ارائه شده در پژوهش حاضر می‌تواند برای ارزیابی اثر سیاست‌های فعلی در حوزه نوآوری سبز مورد استفاده قرار گیرد و با اعمال تغییرات در متغیرهای ورودی مانند "اجرای مقررات زیست‌محیطی" و "فعالیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر" و مشاهده تغییرات در خروجی‌ها، می‌توان اثربخشی سیاست‌ها را سنجید و در صورت نیاز، آن‌ها را اصلاح کرد.

به صورت کلی بر اساس نتایج این پژوهش و با توجه به شرایط خاص ایران، توسعه زیرساخت‌های تحقیق و توسعه از طریق افزایش سرمایه‌گذاری در مراکز تحقیقاتی، دانشگاه‌ها و پارک‌های علم و فناوری؛ حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان با ارائه تسهیلات مالی، گمرکی و مالیاتی به شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در حوزه نوآوری سبز؛ ترویج فرهنگ نوآوری با ایجاد برنامه‌های آموزشی و آگاهی‌بخشی در حوزه نوآوری سبز در مدارس، دانشگاه‌ها و جامعه و تقویت و تسهیل همکاری‌های بین‌المللی با ایجاد ارتباط با کشورهای پیشرو در حوزه نوآوری سبز برای انتقال دانش و فناوری جهت بهبود اکوسیستم نوآوری سبز در کشور پیشنهاد می‌شود.

نتایج این پژوهش از منظر تئوریک می‌تواند در توسعه ادبیات اکوسیستم‌های نوآوری سبزموثر واقع شود. به طور مشخص، این مطالعه با ارائه یک مدل مفهومی چهار مرحله‌ای برای ارزیابی عملکرد اکوسیستم نوآوری سبز، چارچوبی جامع جهت تحلیل سیاست‌های علم و فناوری سبز در اختیار سیاست‌گذاران و پژوهشگران قرار می‌دهد. این مدل، نه تنها به بررسی عناصر ورودی و خروجی سیستم می‌پردازد، بلکه مراحل میانجی و تاثیرگذار را نیز در نظر می‌گیرد که در ادبیات کنونی کمتر به آن پرداخته شده است. این امر می‌تواند به توسعه تئوری‌های مرتبط با پایداری، نوآوری و اقتصاد سبز کمک کرده و مسیرهای جدیدی برای پژوهش‌های آتی ایجاد نماید. در همین راستا به محققین توصیه می‌شود تا در پژوهش‌های آتی خود با استفاده از سایر روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها نظیر روش تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای پویا و مالم‌کوئیست اثرات دوره‌ای و پویای تغییرات داده‌ها بر روی عملکرد کشورهای مختلف را مورد بررسی قرار دهند. این امر به درک بهتر روند تغییرات و پیش‌بینی روندهای آینده کمک می‌کند. همچنین توصیه می‌گردد که با تمرکز بر شاخص‌های دیگری مانند "کل پرسنل تحقیق و توسعه و محققین" و "ارزش کل سرمایه‌گذاری‌های مرحله اولیه سبز" می‌توان ابعاد جدیدی از عملکرد اکوسیستم نوآوری سبز را آشکار کرد. افزون بر این، بررسی شاخص‌های کیفی مانند کیفیت نیروی انسانی، کیفیت زیرساخت‌های تحقیق و توسعه و فرهنگ نوآوری می‌تواند به درک جامع‌تری از وضعیت موجود منجر شود. علاوه بر این محققین حوزه ارزیابی عملکرد در تحقیقات آتی می‌توانند مدل بازی را با استراتژی‌های پیچیده‌تر و با در نظر گرفتن تعاملات بین بازیگران مختلف (مانند دولت، صنعت، دانشگاه، و جامعه) توسعه دهند. این امر می‌تواند به

شبیه‌سازی دقیق‌تر واقعیت و ارائه راهکارهای مؤثرتر منجر شود. همچنین در تحقیقات آتی، مدل ارائه شده می‌تواند با در نظر گرفتن عدم قطعیت در داده‌ها و پارامترها توسعه داد. استفاده از روش‌های تحلیل حساسیت و تحلیل سناریو می‌تواند به ارزیابی پایداری نتایج مدل در برابر تغییرات احتمالی کمک کند.

۶- منابع

[۱] J. K. Boyce, "Inequality as a cause of environmental degradation," *Ecological economics,* vol. ۱۱, no. ۳, pp. ۱٦۹-۱۷۸, ۱۹۹٤.

[۲] M. Smol, J. Kulczycka, and A. Avdiushchenko, "Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions ",*Clean Technologies and Environmental Policy,* vol. ۱۹, pp. ٦٦۹-٦۷۸, ۲۰۱۷.

[۳] J. Wu, C. Wang, J. Hong, P. Piperopoulos, and S. Zhuo, "Internationalization and innovation performance of emerging market enterprises: The role of host-country institutional development," *Journal of World Business,* vol. ٥۱, no. ۲, pp. ۲٥۱-۲٦۳, ۲۰۱٦.

[٤] A. H. Gharib, A. Azar, A. Moghbel Ba Erz, and M. Dehghan Nayeri, "Designing Organizational Innovation Measuring Model with Dynamic Network DEA (Case Study: Iranian First Level Universities)," *Journal of Industrial Management Perspective,* vol. ۹, no. ۱, pp. ۹-۲۹, ۲۰۱۹, doi: ۱۰,٥۲٥٤۷/jimp.۹,۱,۹. [in Persian]

[٥] M. S. Park, R. Bleischwitz, K. J. Han, E. K. Jang, and J. H. Joo, "Eco-innovation indices as tools for measuring eco-innovation," *Sustainability,* vol. ۹, no. ۱۲, p. ۲۲۰٦, ۲۰۱۷.

[٦] B. Lin and R. Luan, "Are government subsidies effective in improving innovation efficiency? Based on the research of China's wind power industry," *Science of the Total Environment,* vol. ۷۱۰, p. ۱۳٦۳۳۹, ۲۰۲.۰

[۷] L. Martin, T. McNeill, and I. Warren-Smith, "Exploring business growth and eco innovation in rural small firms," *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research,* vol. ۱۹, no. ٦, pp. ٥۹۲-٦۱۰, ۲۰۱۳.

[۸] N. Girouard, "The OECD Green Growth Strategy: Key lessons so far," *OECD Observer,* no. ۲۷۹, ۲۰۱۰.

[۹] G. Tsaples and J. Papathanasiou, "Data envelopment analysis and the concept of sustainability: A review and analysis of the literature," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. ۱۳۸ ,p. ۱۱۰٦٦٤, ۲۰۲۱/۰۳/۰۱/ ۲۰۲۱, doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۲۰,۱۱۰٦٦٤.

[۱۰] P. Zhou, B. W. Ang, and K. L. Poh, "Slacks-based efficiency measures for modeling environmental performance," *Ecological Economics,* vol. ٦۰, no. ۱, pp. ۱۱۱-۱۱۸, ۲۰۰٦/۱۱/۰۱ ,۲۰۰٦ /doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.ecolecon.۲۰۰٥,۱۲,۰۰۱.

[۱۱] F. Zamzam, H. Zare Ahmadabadi, A. Naser Sadrabadi, and A. Morovati Sharifabadi, "A New Hybrid Approach Based on Data Envelopment Analysis of DFM with Undesirable Output and Cluster Analysis to Evaluate the Sustainable Development of Countries," Modern Research in Decision Making, vol. ۷, no. ۲, pp. ٥۳-۸٦, ۲۰۲۲. [in Persian]

[۱۲] W. W. Cooper, L. M. Seiford, and K. Tone, *Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software*. Springer, ۲۰۰۷.

[۱۳] M. Zandieh and M. Salari Boron, Measuring the efficiency of internet shops using a multi stages Data Envelopment Analysis (DEA) model, Management Research in Iran, vol.۲۰, pp. ۱۲۷-۱۵۲, ۲۰۲۱. [in Persian]
[۱٤] X. Hu, "Data envelopment analysis for performance measurement in the construction field: a systematic review," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print, ۲۰۲٤, doi: ۱۰,۱۱۰۸/ECAM-۰۵-۲۰۲۳-۰۵۱۵.
[۱۵] K. Fotova Čiković, I. Martinčević, and J. Lozić, "Application of data envelopment analysis (DEA) in the selection of sustainable suppliers: A review and bibliometric analysis," *Sustainability*, vol. ۱٤, no. ۱۱, p. ٦٦۷۲, ۲۰۲۲.
[۱٦] a. omid, A. Azar, M. Dehghan Nayeri, and A. Moghbel, Developing a network Data Envelopment Analysis approach to compare the environmental efficiency of active industries in Tehran, Management Research in Iran, vol.۲۵, no. ۳, pp. ۱۹۳-۲۱٦, ۲۰۲۱. [in Persian]
[۱۷] R. Mahmoudi, A. Emrouznejad, H. Khosroshahi, M. Khashei ,and P. Rajabi, "Performance evaluation of thermal power plants considering CO۲ emission: A multistage PCA, clustering, game theory and data envelopment analysis," *Journal of cleaner production*, vol. ۲۲۳, pp. ٦٤۱-٦۵۰, ۲۰۱۹.
[۱۸] R. Mahmoudi and A. Emrouznejad, "A multi-period performance analysis of airlines: A game-SBM-NDEA and Malmquist Index approach," *Research in Transportation Business & Management*, vol. ٤٦, p. ۱۰۰۸۰۱, ۲۰۲۳.
[۱۹] F. Castellacci and J. M. Natera, "The dynamics of national innovation systems: A panel cointegration analysis of the coevolution between innovative capability and absorptive capacity," *Research Policy*, vol. ٤۲, no. ۳, pp. ۵۷۹-۵۹٤, ۲۰۱۳.
[۲۰] D. F. Robinson, A. Abdel-Latif, and P. Roffe, *Protecting traditional knowledge: the WIPO intergovernmental committee on intellectual property and genetic resources, traditional knowledge and folklore*. Taylor & Francis, ۲۰۱۷.
[۲۱] T. Koc and E. Bozdag, "Measuring the degree of novelty of innovation based on Porter's value chain approach ",*European Journal of Operational Research*, vol. ۲۵۷, no. ۲, pp. ۵۵۹-۵٦۷, ۲۰۱۷.
[۲۲] Y. Wang, W. Vanhaverbeke, and N. Roijakkers, "Exploring the impact of open innovation on national systems of innovation—A theoretical analysis," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. ۷۹, no. ۳, pp. ٤۱۹-٤۲۸, ۲۰۱۲.
[۲۳] J. Guan and K. Chen, "Modeling the relative efficiency of national innovation systems," *Research policy*, vol. ٤۱, no. ۱, pp. ۱۰۲-۱۱۵, ۲۰۱۲.
[۲٤] S. Nasri, H. Kazemi, and A. Khaledi, "Comparing the efficiency of Iran's national innovation system with selected countries with emphasis on opening the black box of innovation and a historical look at the situation of the National Innovation System in Iran," *Journal of Improvement Management*, vol. ۱٤, no. ۲, pp. ۳۳-٦٦, ۲۰۲۰, doi: ۱۰,۲۲۰۳٤/jmi.۲۰۲۰,۱۰۷۹٦۱. [in Persian].
[۲۵] C. Fussler and P. James, "Driving eco-innovation: a breakthrough discipline for innovation and sustainability," *(No Title)*, ۱۹۹٦.
[۲٦] J. Doran and G. Ryan, "Regulation and firm perception, eco-innovation and firm performance," *European Journal of Innovation Management*, vol. ۱۵, no. ٤, pp. ٤۲۱-٤٤۱, ۲۰۱۲.

[۲۷] A. Hammond and W. R. Institute, *Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development*. World Resources Institute Washington, DC, ۱۹۹٥.

[۲۸] E. K. Jang, M. S. Park, T. W. Roh, and K. J. Han, "Policy instruments for eco-innovation in Asian countries," *Sustainability,* vol. ۷, no. ۹, pp. ۱۲٥۸٦-۱۲٦۱٤.۲۰۱٥ ,

[۲۹] T. Sueyoshi, R. Zhang, J. Qu, and A. Li, "New concepts for environment-health measurement by data envelopment analysis and an application in China," *Journal of Cleaner Production,* vol. ۳۱۲, p. ۱۲۷٤٦۸, ۲۰۲۱/۰۸/۲۰/ ۲۰۲۱, doi: https://doi.org/۱۰/۱۰۱٦.j.jclepro.۲۰۲۱,۱۲۷٤٦۸.

[۳۰] M. Ebrahimpour and A. Fallahpoor Mobaraki, "Providing a combined model of data envelopment analysis and artificial neural network to ranking the efficiency of pharmaceutical companies," Modern Research in Decision Making, vol. ۸, no. ٤, pp. ۱۲۲-۱٤٦, ۲۰۲٤. [Online]. Available: https://journal.saim.ir/article_۷۱٤۳٤۲_۰٥٦۱aaeaa۲۷٤a٥۷c۱٥ef۱٥٤۲de۱bef٤۰.pdf. [in Persian

[۳۱] G. Egilmez, S. Gumus, M. Kucukvar, and O. Tatari, "A fuzzy data envelopment analysis framework for dealing with uncertainty impacts of input–output life cycle assessment models on eco-efficiency assessment," *Journal of cleaner production,* vol. ۱۲۹, pp. ٦۲۲-٦۳٦, ۲۰۱٦.

[۳۲] K. Masuda, "Measuring eco-efficiency of wheat production in Japan: a combined application of life cycle assessment and data envelopment analysis," *Journal of Cleaner Production,* vol. ۱۲٦, pp. ۳۷۳-۳۸۱, ۲۰۱٦.

[۳۳] M. Mahdiloo, R. F. Saen, and K.-H. Lee, "Technical, environmental and eco-efficiency measurement for supplier selection: An extension and application of data envelopment analysis," *International journal of production economics,* vol. ۱٦۸, pp. ۲۷۹-۲۸۹, ۲۰۱٥.

[۳٤] Y. Lorenzo-Toja, I. Vázquez-Rowe, S. Chenel, D. Marín-Navarro, M. T. Moreira, and G. Feijoo, "Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA+ DEA method," *Water research,* vol. ٦۸, pp. ٦٥۱-٦٦٦, ۲۰۱٥.

[۳٥] Á. Avadí, I. Vázquez-Rowe, and P. Fréon, "Eco-efficiency assessment of the Peruvian anchoveta steel and wooden fleets using the LCA+ DEA framework," *Journal of Cleaner Production* ,vol. ۷۰, pp. ۱۱۸-۱۳۱, ۲۰۱٤.

[۳٦] T. Sueyoshi and D. Wang, "Radial and non-radial approaches for environmental assessment by data envelopment analysis: Corporate sustainability and effective investment for technology innovation," *Energy Economics,* vol. ٤ ,٥pp. ٥۳۷-٥٥۱, ۲۰۱٤.

[۳۷] R. Kiani Mavi and C. Standing, "Evaluating eco-innovation of OECD countries with data envelopment analysis," ۲۰۱٦.

[۳۸] R. K. Mavi and C. Standing, "Eco-innovation analysis with DEA: an application to OECD countries," *International Journal on Computer Science and Information Systems,* vol. ۱۲, no. ۲, pp. ۱۳۳-۱٤۷, ۲۰۱۷.

[۳۹] H. Arman, A. Jamshidi, and A. Hadi-Vencheh, "Eco-innovation analysis: A data envelopment analysis methodology," *Environmental Technology & Innovation,* vol. ۲۳ , p. ۱۰۱۷۷۰, ۲۰۲۱.

[٤٠] D. Zhang and S. A. Vigne, "How does innovation efficiency contribute to green productivity? A financial constraint perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. ٢٨٠, p. ١٢٤٠٠٠, ٢٠٢١.
[٤١] R. K. Mavi and N. K. Mavi, "National eco-innovation analysis with big data: A common-weights model for dynamic DEA," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. ١٦٢, p. ١٢٠٣٦٩, ٢٠٢١.
[٤٢] C.-P. Chen, J.-L. Hu, and C.-H. Yang, "An international comparison of R&D efficiency of multiple innovative outputs: The role of the national innovation system," *Innovation*, vol. ١٣, no. ٣, pp. ٣٤١-٣٦٠, ٢٠١١.
[٤٣] H. Alidrisi, "The development of an efficiency-based global green manufacturing innovation index: An input-oriented DEA approach," *Sustainability*, vol. ١٣, no. ٢٢, p. ١٢٦٩٧, ٢٠٢١.
[٤٤] C. Erdin and M. Çağlar, "National innovation efficiency: a DEA-based measurement of OECD countries," *International Journal of Innovation Science*, Article vol. ١٥, no. ٣, pp. ٤٢٧-٤٥٦, ٢٠٢٣, doi: ١٠,١١٠٨/IJIS-٠٧-٢٠١١٨-٠٢١
[٤٥] A. L. Anouze, M. M. Al Khalifa, and O. R. Al-Jayyousi, "Reevaluating national innovation systems: An index based on dynamic-network data envelopment analysis," *Socio-Economic Planning Sciences*, Article vol. ٩٥, ٢٠٢٤, Art no. ١٠٢٠٠٣, doi: ١٠/١٠١٦.j.seps.٢٠٢٤,١٠٢٠٠٣.
[٤٦] Eco-IS, "European innovation scoreboard," ٢٠١٧ .
[٤٧] C. Sworder, L. Salge, and H. Van Soers, "The global Cleantech innovation index ٢٠١٧," *Cleantech Group and WWF*, ٢٠١٧.
[٤٨] X. Chen, X. Liu, Z. Gong, and J. Xie, "Three-stage super-efficiency DEA models based on the cooperative game and its application on the R&D green innovation of the Chinese high-tech industry," *Computers & Industrial Engineering*, vol. ١٥٦, p. ١٠٧٢٣٤, ٢٠٢١/٠٦/٠١/ ٢٠٢١, doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.cie.٢٠٢١,١٠٧٢٣٤.
[٤٩] Y.-J. Zhang, Y.-L. Peng, C.-Q. Ma, and B. Shen, "Can environmental innovation facilitate carbon emissions reduction? Evidence from China," *Energy Policy*, vol. ١٠٠, pp. ١٨-٢٨, ٢٠١٧/٠١/٠١/ ٢٠١٧, doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.enpol.٢٠١٦,١٠.٠٠٥.
[٥٠] Y. Cai, "Factors affecting the efficiency of the BRICSs' national innovation systems: A comparative study based on DEA and Panel Data Analysis," *Economics Discussion Paper*, no. ٢٠١١-٥٢, ٢٠١١.
[٥١] R. Kiani Mavi, N. Kiani Mavi, R. Farzipoor Saen ,and M. Goh, "Eco-innovation analysis of OECD countries with common weight analysis in data envelopment analysis," *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. ٢٧, no. ٢, pp. ١٦٢-١٨١, ٢٠٢٢, doi: ١٠,١١٠٨/SCM-٠١-٢٠٢١-٠٠٣٨.
[٥٢] M. E. Porter and C. v. d. Linde, "Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship," *Journal of economic perspectives*, vol. ٩, no. ٤, pp. ٩٧-١١٨, ١٩٩٥.
[٥٣] M. Vargas-Vargas and M. Meseguer-SantamarÃa, "Environmental protection expenditure for companies: A Spanish regional analysis," *International Journal of Environmental Research*, vol. ٤, no. ٣, pp. ٣٧٣-٣٧٨, ٢٠١٠.

[٥٤] E. G. Carayannis, T. D. Barth, and D. F. Campbell, "The Quintuple Helix innovation model: global warming as a challenge and driver for innovation," *Journal of innovation and entrepreneurship,* vol. ۱, pp. ۱-۱۲, ۲۰۱۲.

[٥٥] F. Gökgöz and E. Yalçın, "An environmental, energy, and economic efficiency analysis for the energy market in European Union," *Environmental Progress & Sustainable Energy,* vol. ٤۲, no. ٤, p. e۱٤۰٦۸, ۲۰۲۳.

[٥٦] R. Puertas and L. Marti, "Eco-innovation and determinants of GHG emissions in OECD countries," *Journal of Cleaner Production,* vol. ۳۱۹, p. ۱۲۸۷۳۹, ۲۰۲۱/۱۰/۱٥/ ۲۰۲۱, doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jclepro.۲۰۲۱,۱.۲۸۷۳۹

[٥۷] A. Arundel and R. Kemp, "Measuring eco-innovation," ۲۰۰۹.

[٥۸] C.-h. Wang, I.-y. Lu, and C.-b. Chen, "Evaluating firm technological innovation capability under uncertainty," *Technovation,* vol. ۲۸, no. ٦, pp. ۳٤۹-۳٦۳, ۲۰۰۸.

[٥۹] ASEIC, "ASEM SMEs Eco-Innovation Center," ۲۰۱۸ .

[٦۰] D. Jackson, "What is an innovation ecosystem. National Science Foundation, ۱–۱۳," ed, ۲۰۱۱.

[٦۱] K. H. Tsai and Y. C. Liao, "Innovation capacity and the implementation of eco-innovation: Toward a contingency perspective," *Business Strategy and the Environment,* vol. ۲٦, no. ۷, pp. ۱۰۰۰-۱۰۱۳, ۲۰۱۷.

[٦۲] M. B. Bossle, M. D. De Barcellos, and L. M. Vieira, "Why food companies go green? The determinant factors to adopt eco-innovations," *British Food Journal,* vol. ۱۱۸, no ,٦ .pp. ۱۳۱۷-۱۳۳۳, ۲۰۱٦.

[٦۳] G. Marin, A. Marzucchi, and R. Zoboli, "SMEs and barriers to Eco-innovation in the EU: exploring different firm profiles," *Journal of Evolutionary Economics,* vol. ۲٥, pp. ٦۷۱-۷۰٥, ۲۰۱٥.

[٦٤] J. Horbach, C. Rammer, and K. Rennings, "Determinants of eco-innovations by type of environmental impact—The role of regulatory push/pull, technology push and market pull," *Ecological economics,* vol. ۷۸, pp. ۱۱۲-۱۲۲, ۲۰۱۲.

[٦٥] M. Modaei, "Assessing the dynamic performance of countries in the world from the perspective of greenhouse gas emissions, environment and human health as a network; Application of Data Envelopment Analysis," Master, Economic, Management & Accounting, Yazd University, ۲۰۲۰ .

[٦٦] U. K. Pata, E. Sofuoglu, Z. Ahmed, and O. Kizilkaya, "Eco-innovation and environmental sustainability in Germany: An empirical approach with smooth structural shifts," Natural Resources Forum, Article vol. ٤۸, no. ۱, pp. ۱٥٤-۱۷۰, ۲۰۲٤, doi: ۱۰,۱۱۱۱/۱٤۷۷-۸۹٤۷,۱۲۳۱٦.