

دراسة تحليلية قياسية للعلاقة الديناميكية بين الكهرباء المتجددة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون واثارها على انتاج الهيدروجين الأخضر في جمهورية جنوب افريقيا

Econometric analysis of the dynamic relationship between renewable electricity and carbon dioxide emissions and its impact on green hydrogen production in the Republic of South Africa

مروة عادل الحسين

استاذ مساعد بكلية الدراسات الافريقية العليا – جامعة القاهرة

المستخلص

هدفت هذه الدراسة إلى التعرف على تطور الهيدروجين الأخضر في جمهورية جنوب أفريقيا، وإجراء دراسة قياسية ديناميكية توضح إمكانية الاعتماد على الهيدروجين الأخضر المنتج من الكهرباء المتجددة للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتعزيز أمن الطاقة في جنوب أفريقيا. اعتمدت الورقة البحثية على المنهج الاستقرائي، بالإضافة إلى أسلوب التحليل القياسي من خلال اختبار التكامل المشترك لجوهانسن، ونموذج تصحيح الخطأ المتجهي VECM، واختبار السببية لجرانجر لاستكشاف العلاقة بين إنتاج الكهرباء المتجددة لتعبير عن الهيدروجين الأخضر وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال الفترة (١٩٩٠-٢٠٢٢). توصلت الدراسة إلى أن جمهورية جنوب أفريقيا قد اتخذت بالفعل عدة خطوات مهمة لتعزيز اقتصاد الهيدروجين الأخضر لديها بداية من عام ٢٠٠٧ الذي يمثل بداية اقتصاد الهيدروجين، وصولاً لخريطة طريق مجتمع الهيدروجين في جنوب أفريقيا عام ٢٠٢٢. وعند دراسة وتحليل العلاقة الديناميكية بين متغيرات النموذج اتضح أن إنتاج الكهرباء المتجددة التي تعبر عن الهيدروجين الأخضر هي المتغير الأكثر أهمية في تفسير التقلبات المستقبلية لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، أي أن مقدار الصدمات في متغير إنتاج الكهرباء المتجددة لها دور كبير في تفسير مقدار الصدمات في متغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وبالتالي فإن التوسع في إنتاج الهيدروجين الأخضر المعتمد بشكل أساسي على الكهرباء المنتجة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح سيكون له تأثير كبير في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وتعزيز أمن الطاقة في جمهورية جنوب أفريقيا.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجين الأخضر، الكهرباء المتجددة، انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، نموذج VECM، جمهورية جنوب أفريقيا

Abstract

This study aimed at identifying the development of green hydrogen in South Africa, as well as conducting a dynamic econometric study that illustrates the potential of green hydrogen produced from renewable electricity in order to reduce CO₂ emissions and enhance energy security in South Africa. The research paper relied on the inductive approach, in addition to the econometric analysis method through Johansen Cointegration Test, the vector error correction model (VECM) and the Granger causality test to explore the relationship between renewable electricity production to represent green hydrogen and carbon dioxide emissions during the period (1990-2022). The study concluded that South Africa has already taken a number of important steps to advance its green hydrogen economy, starting in 2007 which represent the start of the hydrogen economy, and ending with the South African Hydrogen Society Roadmap in 2022. When dynamic relationship between the model variables has been studied and analyzed, it has become strongly evident that the production of renewable electricity, which expresses green hydrogen, is considered the most important variable in explaining the future fluctuations in carbon dioxide emissions, meaning that the amount of shocks in the renewable electricity production variable has a major role in explaining the amount of shocks in the carbon dioxide emissions variable. That is, expanding the production of green hydrogen, which relies primarily on electricity generated from solar and wind energy, will have a significant impact on reducing carbon dioxide emissions and enhancing energy security in Republic of South Africa.

Keywords: Green hydrogen, renewable electricity, CO₂ emissions, VECM model, Republic of South Africa

مقدمة

يعرف الهيدروجين أنه أبسط وأخف عنصر كيميائي في الكون، وهو ناقل للطاقة وليس مصدرًا لها. وتم تخصيص رموز لونية له تختلف باختلاف مصدر الطاقة وعملية الإنتاج المستخدمة وكذلك الأثر البيئي الذي ينتج عنه (IRENA 2021). وهناك ستة أنواع من الهيدروجين مصنفة حسب اللون وطريقة الإنتاج المستخدمة، وهي: الهيدروجين الرمادي المنتج باستخدام الغاز الطبيعي، والهيدروجين الأسود المنتج باستخدام الفحم، والهيدروجين الأزرق وهو نفسه الرمادي ولكن يضم عملية إضافية للتخلص من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المصاحبة لإنتاجه، والهيدروجين الأصفر وهو الهيدروجين الذي يتم إنتاجه عبر التحليل الكهربائي للماء باستخدام الطاقة النووية، والهيدروجين الأخضر وهو ينتج من التحليل الكهربائي للماء باستخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية ولا ينتج عنه أي انبعاثات كربونية ضارة، والهيدروجين الفيروزي الذي يتم إنتاجه من الغاز الطبيعي أو الكتلة الحيوية باستخدام التحلل الحراري اللاهوائي (عبد المعطي، ٢٠٢١).

يتمتع الهيدروجين الأخضر بإمكانات هائلة ويمكن استخدامه في إحداث تحول الطاقة العالمي، حيث يمكن استخدامه لتشغيل المركبات في قطاع النقل كبديل عن الوقود الأحفوري، وسيكون له دور مؤثر في تقليل الانبعاثات الناتجة من الصناعات كثيفة الكربون مثل الفولاذ والأسمنت والكيماويات. ويمكن أن يكون في صورة مادة خام أولية في المنتجات الكيميائية الأخرى، مثل الأمونيا وهي مدخل رئيسي في الأسمدة والميثانول الذي يستخدم في إنتاج البلاستيك (غراف، ٢٠٢٢). كذلك يمكن بعد إجراء عملية التحليل الكهربائي من مصادر طاقة متجددة لإنتاج الهيدروجين الأخضر من الماء القيام بنقله في السفن أو الأنابيب لمسافات طويلة واستخدامه في أماكن أخرى (جباله، حملاوي، ٢٠٢٣).

تنبثق أهمية الدراسة من خلال السعي للبحث عن بدائل للوقود الأحفوري التقليدي في جمهورية جنوب أفريقيا، للمساهمة في تعزيز أمن الطاقة ومعالجة التدهور البيئي وتقليل الانبعاثات الضارة والارتفاع المستمر في أسعار الطاقة. خاصة مع توقعات وكالة الطاقة الدولية أن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون سوف تزداد بحوالي ٣٥٪ بحلول عام ٢٠٥٠ (IRENA 2022). وفي هذا السياق تظهر أهمية إحلال الهيدروجين الأخضر محل الوقود الأحفوري في جميع الاستخدامات حيث أنه يتسم بأنه نظيف وخال من الكربون. وتتوقع الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أن يلبي الهيدروجين الأخضر من ١٢٪ - ١٣٪ من الطلب النهائي على الطاقة بحلول عام ٢٠٥٠ (IRENA 2023).

تهدف هذه الدراسة إلى التعرف على تطور الهيدروجين الأخضر في جمهورية جنوب أفريقيا، وإجراء دراسة قياسية ديناميكية توضح إمكانية الاعتماد على الهيدروجين الأخضر المنتج من الكهرباء المتجددة للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتعزيز أمن الطاقة في جمهورية جنوب أفريقيا.

تتمثل إشكالية الدراسة في أنه على الرغم من توافق الآراء العالمية حول أهمية الاتجاه إلى الهيدروجين الأخضر، وضرورة التحول إلى الطاقة الخضراء المتجددة خصوصًا بعد حدوث ارتفاع أسعار الوقود الأحفوري بسبب النقص في سلاسل الإمداد منذ بداية الحرب الروسية الأوكرانية في فبراير ٢٠٢٢، إلا أنه لا تزال هناك عوائق تواجه جمهورية جنوب أفريقيا تحول دون تحقيق ذلك الانتقال خصوصًا الافتقار إلى البنية التحتية المطلوبة اللازمة لانتشار هذه التقنية والمتضمنة إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة، بالإضافة إلى ارتفاع تكلفتها. ومن ثم يبرز التساؤل التاليان: ما مدى قدرة جنوب أفريقيا على إنتاج الكهرباء المتجددة التي تمكنها من توفير الهيدروجين الأخضر؟ وهل يمكن لجنوب أفريقيا الاعتماد على الهيدروجين الأخضر في تعزيز أمن الطاقة لديها؟

تتمثل فرضية الدراسة في أنه تساهم الكهرباء المتجددة ومن ثم الهيدروجين الأخضر في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في جمهورية جنوب أفريقيا. تعتمد الورقة البحثية على المنهج الاستقرائي، بالإضافة إلى أسلوب التحليل القياسي من خلال اختبار التكامل المشترك لجوهانسن، ونموذج تصحيح الخطأ المتجهي VECM، واختبار السببية

لجرانجر لاستكشاف العلاقة بين إنتاج الكهرباء المتجددة التي تعبر عن الهيدروجين الأخضر وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال الفترة (١٩٩٠-٢٠٢٢).

تنقسم الورقة البحثية إلى خمسة أقسام بخلاف المقدمة وهي: تطور الهيدروجين الأخضر في جمهورية جنوب أفريقيا، والدراسات التطبيقية السابقة، وصياغة النموذج، ونتائج النموذج القياسي، والنتائج والتوصيات.

القسم الأول: تطور الهيدروجين الأخضر في جمهورية جنوب أفريقيا

تعد جنوب أفريقيا سابع منتج للفحم على مستوى العالم، وحوالي ٧٧٪ من الكهرباء المنتجة بجنوب أفريقيا تعتمد على الفحم، وهي أكبر مصدر للغازات المسببة للاحتباس الحراري في أفريقيا، (Jain, 2017) وهذا يعد دافع رئيسي للتحويل إلى الهيدروجين الأخضر لتقليل كثافة الكربون في قطاعاتها المسببة لانبعاثات عالية، إلى جانب مخاطر انخفاض القدرة على الوصول إلى الأسواق أمام شركاء تجاريين رئيسيين مثل الاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة والصين حيث تضع هذه الدول مجموعة واسعة من السياسات، والقيود الصناعية، والتجارية، التي تركز على المناخ (Andreoni, et al, 2023)

وبالتالي، فجنوب أفريقيا تحتاج إلى إزالة الكربون، والطريق الأمثل أمامها هو إنتاج الهيدروجين الأخضر، ويُظهر تحليل الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أن استثمارًا بقيمة ٥٦٣ مليار دولار أمريكي حتى عام ٢٠٤٠ من شأنه أن يدمج حصصًا أعلى من الكهرباء المتجددة في جنوب أفريقيا ويخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بأكثر من الثلثين (IRENA 2020). ولدى جنوب أفريقيا فرصة لتعظيم إنتاجها من الهيدروجين الأخضر حيث أنها تتمتع بثروة من موارد الطاقة المتجددة، وخاصة طاقة الرياح والطاقة الشمسية، ويجري تطوير مرافق التحليل الكهربائي التي تعمل بمصادر الطاقة المتجددة لإنتاج الهيدروجين الأخضر من الماء، مما يدعم انتقال البلاد إلى اقتصاد منخفض الكربون. (Metcalf, 2020)، وهي أيضًا موطن لنحو ٧٥٪ من احتياطات العالم من معادن مجموعة البلاتين مثل البلاتين والروثينيوم والإيريديوم والتي تعد مكونات رئيسية في محفزات خلايا الوقود وأجهزة التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين الأخضر، مما يمنح جنوب أفريقيا ميزة نسبية في تصنيع الهيدروجين الأخضر وبالتالي، تمتلك الأساس لاقتصاد هيدروجين أخضر مزدهر (Pinto, Chege, 2024).

وعلى الصعيد الأفريقي فقد أنشئ التحالف الأفريقي للهيدروجين الأخضر The Africa Green Hydrogen Alliance (AGHA) في مايو ٢٠٢٢ من ست دول أفريقية؛ هي مصر، وكينيا، وموريتانيا، والمغرب، وناميبيا، وجنوب أفريقيا، وفي سبتمبر ٢٠٢٣ تم الاعلان عن إنضمام أثيوبيا، وأنجولا، وجيبوتي، ونيجيريا. وأيضًا في سبتمبر ٢٠٢٣ تسلمت جنوب أفريقيا رئاسة التحالف الأفريقي للهيدروجين الأخضر. ويتولى هذا التحالف تشجيع التعاون بين البلدان الأفريقية لتطوير مشروعات الهيدروجين الأخضر في القارة، ويركز على السياسات العامة والتنظيمية، وبناء

القدرات والتمويل، واحتياجات إصدار الشهادات لتعبئة إنتاج الهيدروجين الأخضر للإستخدام المحلي والتصدير. (The Africa Green Hydrogen Alliance, 2024)

ويمكن تتبع تطور اقتصاد الهيدروجين الأخضر، وأهم ملامح المسار الذي انتهجته جنوب أفريقيا لتعزيز اقتصاد الهيدروجين الأخضر لديها خلال الفترة (٢٠٠٧-٢٠٢٤) وفق الجدول التالي.

جدول رقم (١): تطور اقتصاد الهيدروجين الأخضر في جنوب أفريقيا خلال الفترة (٢٠٠٧-٢٠٢٤)

م	التاريخ	الحدث
١	٢٠٠٧	بداية اقتصاد الهيدروجين في جنوب أفريقيا مع الموافقة على استراتيجية البحث والتطوير والابتكار الوطنية للهيدروجين وخلايا الوقود. تم تنفيذ الاستراتيجية من قبل وزارة العلوم والابتكار من خلال برنامج الهيدروجين في جنوب أفريقيا لمدة ١٥ عام حتى اعتماد خريطة طريق مجتمع الهيدروجين في ٢٠٢٢. قدمت الاستراتيجية مساهمات في إنشاء اقتصاد الهيدروجين في جنوب أفريقيا من خلال المعرفة والخبرة التكنولوجية وتنمية الموارد البشرية.
٢	٢٠٠٨	تم إطلاق مبادرة هيدروجين جنوب أفريقيا (Hy-SA) Hydrogen South Africa والتي أظهرت التزامًا بالاستثمار في تقنيات الهيدروجين.
٣	٢٠١٠	تم وضع خطة الطاقة المتكاملة Integrated Energy Plan. والتي هدفت إلى تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتحفيز الابتكار، وخلق فرص العمل. حددت هدفًا بتوفير نحو ١٧,٨ جيجاوات من الطاقة المتجددة، منها ٨,٤ جيجاوات يجب أن تكون من الرياح.
٤	٢٠١٦	تم نشر مسودة محدثة لخطة الطاقة المتكاملة Integrated Energy Plan. تم ذكر الهيدروجين كمصدر بديل للطاقة وكناقل للطاقة، حيث ذكرت خطة الطاقة المتكاملة أن اقتصاد الهيدروجين يخضع لدراسة جادة في جنوب أفريقيا في محاولة لتطوير مصادر طاقة بديلة آمنة ونظيفة وموثوقة للوقود الأحفوري.
٥	٢٠١٩	تم اعتماد خطة الموارد المتكاملة Integrated Resource Plan والتي أشارت إلى أن تركيز جنوب أفريقيا على اقتصاد الهيدروجين والتقدم الذي أحرزته مبادرة الهيدروجين (Hy-SA)، ينبغي دعمه بمزيد من البحث والتطبيق العملي داخل نظام الطاقة.
٦	يوليو ٢٠٢١	تم توقيع اتفاقية بين شركة ساسول ومؤسسة التنمية الصناعية، حيث تم الالتزام بالعمل معًا لخلق الظروف المناسبة لاقتصاد الهيدروجين الأخضر في جنوب أفريقيا.
٧	أكتوبر ٢٠٢١	تم إطلاق دراسة جدوى وادى الهيدروجين Hydrogen Valley Feasibility Study ، وتم تحديد ثلاثة مراكز للهيدروجين الأخضر، وتسعة مشاريع تجريبية في مختلف القطاعات.
٨	نوفمبر ٢٠٢١	حصلت جنوب أفريقيا على ٨,٥ مليار دولار أمريكي من الولايات المتحدة الأمريكية والمملكة المتحدة وفرنسا وألمانيا والاتحاد الأوروبي في مؤتمر المناخ ٢٦ COP26 لاستخدامها في انتقال البلاد إلى الاقتصاد الأخضر، ودعم مشاريع الهيدروجين الأخضر.

م	التاريخ	الحدث
٩	فبراير ٢٠٢٢	تم اعتماد خريطة طريق مجتمع الهيدروجين في جنوب أفريقيا South African Hydrogen Society Roadmap (HSRM) باعتبارها تحدد المسار نحو تنفيذ تطوير الهيدروجين. تستهدف خريطة الطريق أربع نتائج رئيسية وهي: إنشاء سوق تصدير للهيدروجين الأخضر والأمونيا في جنوب أفريقيا، تخضير قطاع توليد الطاقة، إزالة الكربون من قطاع النقل والصناعات الثقيلة، تصنيع مكونات سلسلة توريد الهيدروجين الأخضر محليًا. تقدم خريطة الطريق الإطار اللازم لتطوير ودمج تكنولوجيا الهيدروجين عبر قطاعات اقتصادية متعددة بحلول عام ٢٠٥٠. كما توضح كيف يمكن لتكنولوجيا خلايا الوقود والهيدروجين إحداث ثورة في قطاع الطاقة في البلاد ومساعدتها على تحقيق أهدافها المحلية والدولية للتخفيف من آثار تغير المناخ. ويتمثل هدفها الثانوي في تعزيز النمو الاقتصادي وفقًا لخطة إعادة الإعمار والتعافي الاقتصادي في البلاد. من المتوقع إذا نفذت جنوب أفريقيا الخريطة بالكامل، سيتم توفير ٣٠ ألف فرصة عمل سنويًا بحلول عام ٢٠٤٠، وإنتاج ٥٠٠ كيلو طن من الهيدروجين الأخضر بحلول عام ٢٠٣٠، وتشغيل ١٠٠ حافلة وشاحنة بالهيدروجين بحلول عام ٢٠٢٥، ويرتفع العدد إلى ٥٠٠ بحلول عام ٢٠٣٠.
١٠	مايو ٢٠٢٢	تم تأسيس تحالف الهيدروجين الأخضر الأفريقي Africa Green Hydrogen Alliance (AGHA) في مايو ٢٠٢٢ من قبل ست دول أفريقية، منها جنوب أفريقيا. وتتمثل الأهداف الأساسية للتحالف في دعم أنشطة الهيدروجين عبر الدول الأعضاء.
١١	نوفمبر ٢٠٢٢	استضافة القمة الأولى للهيدروجين الأخضر في جنوب أفريقيا South African Green Hydrogen Summit (SAGHS) في كيب تاون. أكدت القمة أن جنوب أفريقيا هي مركز عالمي منخفض التكلفة ووجهة استثمارية لإنتاج الهيدروجين الأخضر.
١٢	ديسمبر ٢٠٢٢	تم إصدار مسودة استراتيجية تسويق الهيدروجين الأخضر Green Hydrogen Commercialization Strategy (GHCS) وكان من المقرر تقديم التعليقات عليها حتى فبراير ٢٠٢٣، واعتمادها النهائي مهم من أجل ضمان قدرة اقتصاد الهيدروجين على التقدم.
١٣	ديسمبر ٢٠٢٢	تم الإعلان عن تحويل دور منظومة التعليم والتدريب المهني والتقني Technical Vocational Education and Training (TVET) لتتواءم مع احتياجات صناعة الهيدروجين لتحسين استيعاب العمالة لمعالجة احتياجات تنمية المهارات للغالبية العظمى من السكان، حيث يتم التخفيف من خسائر الوظائف المحتملة في صناعة تعدين الفحم من خلال رفع المهارات وإعادة التدريب في إنتاج وقود الطاقة والنقل المرتبطة بالهيدروجين الأخضر.
١٤	يونيو ٢٠٢٣	وفرت هولندا والدنمارك تمويلًا للهيدروجين الأخضر بقيمة مليار دولار في جنوب أفريقيا. وفي اتفاقية منفصلة، وافقت ألمانيا وجنوب أفريقيا على التعاون بين المطورين والمشتريين.
١٥	سبتمبر ٢٠٢٣	حصلت جنوب أفريقيا على رئاسة التحالف الأفريقي للهيدروجين الأخضر

م	التاريخ	الحدث
١٦	أكتوبر ٢٠٢٣	تم عقد القمة الثانية للهيدروجين الأخضر في جنوب أفريقيا، بعد أن أعلنت القمة الأولى عن سياسة الهيدروجين الأخضر في جنوب أفريقيا، استندت عليها القمة الثانية وأعلنت اعتماد مجلس الوزراء لاستراتيجية تسويق الهيدروجين الأخضر (GHCS)، وتطوير خطة للهيدروجين الأخضر في مقاطعتي كيب الشمالية وكيب الغربية، وموافقة مجلس الوزراء على استراتيجية الاستثمار بالهيدروجين الأخضر باعتباره قطاع ناشئ له إمكانات نمو واستثمار كبيرة.
١٧	مايو ٢٠٢٤	تم دعم مشروع الهيدروجين الأخضر والأمنيا الخضراء في جنوب أفريقيا من خلال تسعة مشاريع للطاقة الشمسية بقيمة ١٠٥ مليار راند في كيب الشرقية، وكذلك تم توقيع اتفاقية لتنفيذ ٣٧٢ ميجاوات من طاقة الرياح في كيب الغربية.
١٨	سبتمبر ٢٠٢٤	من المنتظر عقد القمة العالمية للهيدروجين الأفريقي في ناميبيا بمشاركة جنوب أفريقيا، التي تلعب دورًا محوريًا في تحالف الهيدروجين الأخضر الأفريقي، وتتعاون مع الدول الأخرى لتطوير مشاريع الهيدروجين الأخضر، وزيادة فرصه الاستثمارية في جميع أنحاء القارة.
١٩	أكتوبر ٢٠٢٤	من المتوقع عقد مؤتمر ومعرض هيدروجين أفريقيا ٢٠٢٤ Hydrogen Africa Conference & Expo 2024 (HACE2024) في جنوب أفريقيا وهو الحدث الأفريقي الأكبر والأكثر تأثيرًا في مجال الهيدروجين الأخضر، ويشمل المشاركون متخصصين وممثلين من العديد من المجالات المهمة في صناعة الهيدروجين، بالإضافة إلى المستثمرين الدوليين حيث يجمع سلسلة قيمة الهيدروجين الأفريقية بالكامل لتسريع اقتصاد الهيدروجين بما يضمن حل تحديات صناعة الهيدروجين التي تواجهها القارة الأفريقية.

المصدر: من إعداد الباحثة بالإعتماد على مجموعة من الدراسات السابقة والتقارير الدولية والمواقع الإلكترونية.

يوضح جدول رقم (١) أهم ملامح المسار الذي انتهجته جنوب أفريقيا لتعزيز اقتصاد الهيدروجين الأخضر لديها، وأبرز هذه الملامح هي أن عام ٢٠٠٧ يعتبر بداية اقتصاد الهيدروجين في جمهورية جنوب أفريقيا من خلال استراتيجية البحث والتطوير والابتكار الوطنية للهيدروجين وخلايا الوقود، ثم في عام ٢٠١٠ تم وضع خطة الطاقة المتكاملة والتي تم تحديثها عام ٢٠١٦، واعتمادها في عام ٢٠١٩ ومفادها أن تطوير اقتصاد الهيدروجين يعد أداة مهمة لتطوير مصادر طاقة بديلة ونظيفة للوقود الأحفوري لتعزيز أمن الطاقة بجنوب أفريقيا. وفي عام ٢٠٢٢ تم اعتماد خريطة طريق مجتمع الهيدروجين في جمهورية جنوب أفريقيا. وفي ذات العام تم تأسيس تحالف الهيدروجين الأخضر الأفريقي، وكانت جنوب أفريقيا واحدة من الرواد الست في تأسيسه، وحصلت على رئاسته عام ٢٠٢٣.

القسم الثاني: الدراسات التطبيقية السابقة

تم تقسيم الدراسات التطبيقية السابقة إلى ثلاث مجموعات وذلك كما يلي:

أولاً: الدراسات التطبيقية السابقة التي تناولت الهيدروجين الأخضر في جمهورية جنوب أفريقيا

ناقشت دراسة (Pinto, Chege, 2024) إمكانات الهيدروجين الأخضر وفرص استعادة جنوب أفريقيا منه. وركزت دراسة (Andreoni, et al, 2023) أنه على جنوب أفريقيا التحول إلى مسار أقل في الانبعاثات الكربونية وذلك للاحتفاظ بالقدرة على الوصول إلى أسواق التصدير. وحللت دراسة (Stamm, et al, 2023) فوائد التعاون الدولي لتعزيز إنتاج الهيدروجين الأخضر مثل التعاون الألماني- الجنوب أفريقي واستعرضت دراسة (Imasiku, et al, 2021) موارد الطاقة المتجددة وسياسات تعزيز إنتاج الهيدروجين الأخضر في جنوب أفريقيا. وأوضحت دراسة (Munda, 2019) أهمية الهيدروجين الأخضر المنتج من مصادر الطاقة المتجددة في جنوب أفريقيا، وإمكانات موارد الطاقة المتجددة التي يمكن أن تدعم إنتاجه، وأظهرت النتائج أن موارد الطاقة المتجددة في جنوب أفريقيا مشجعة لإنتاج الهيدروجين الأخضر، حيث يبلغ متوسط سطوع الشمس ٢٥٠٠ ساعة سنوياً، ويبلغ إجمالي الإشعاع الشمسي اليومي ما بين ٤ و٦,٥ كيلووات ساعة/م^٢ يومياً. ويتراوح متوسط سرعة الرياح السنوية من ٥,٦ إلى ٨,٧ متر/ثانية.

ثانياً: الدراسات التطبيقية السابقة التي تناولت الهيدروجين الأخضر في دول مختلفة

أبرزت دراسة (Elzamar, et al, 2024) أن الهيدروجين الأخضر كمصدر طاقة واعد لمستقبل أكثر نظافة واستدامة بسبب طبيعته النظيفة وتعدد استخداماته وقدرته على استبدال الوقود الأحفوري كمصدر للطاقة في مختلف الصناعات. واستكشفت دراسة (Marouani, et al, 2023) مفهوم الهيدروجين الأخضر وعملية إنتاجه باستخدام مصادر الطاقة المتجددة في العديد من البلدان حول العالم، بما في ذلك أستراليا والاتحاد الأوروبي والهند وكندا والصين وروسيا والولايات المتحدة وكوريا الجنوبية واليابان ودول في شمال أفريقيا. كذلك دراسة (Aravindan, Praveen, 2023) التي أوضحت طرقاً متنوعة لإنتاج الهيدروجين الأخضر، مع التركيز الأساسي على الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية وتقنيات تقسيم المياه مثل التحليل الكهربائي والتحليل الحراري والتحليل الضوئي والعمليات المرتبطة بالكتلة الحيوية. وهدفت دراسة (Raouf, 2023) بيان الارتباط بين إنتاج الهيدروجين الأخضر، معبراً عنه بإنتاج الكهرباء المتجددة، والإنفاق على الصحة العامة للفرد. وطبقت بيانات البائل على عينة من ٦٧ دولة مصدرة للهيدروجين خلال الفترة من ٢٠٠٠ إلى ٢٠٢١، وكشفت أنه على صناع السياسات تشجيع استخدام وإنتاج الهيدروجين لتقليل العواقب السلبية لاستخدام الطاقة التي ينبعث منها ثاني أكسيد الكربون. وسعت دراسة (عبد الجليل، ٢٠٢٣) إلى البحث في إمكانات الهيدروجين الأخضر ودوره في تعزيز أمن الطاقة منخفضة الانبعاثات خصوصاً في قطاع النقل. وتناولت دراسة (Alzoubi, 2023) تأثير إنتاج الهيدروجين الأخضر على الحد من انبعاثات الكربون، من خلال تقييم التأثير

البيئي وكفاءة تقنيات الإنتاج. وطورت دراسة (Matias , Sebastian, 2023) نموذجًا يدرس تكاليف إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام نظام طاقة هجين من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في أربعة مواقع في شيلي. تشير النتائج إلى أنه يمكن إنتاج الهيدروجين الأخضر بأسعار تنافسية تتراوح من ٢,٠٩ إلى ٣,٢٨ دولار أمريكي / كجم. كما قامت دراسة (Awaleh, et al, 2022) ببيان الجدوى الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر عن طريق التحليل الكهربائي للمياه باستخدام طاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية في جيبوتي، من خلال مقارنة التكلفة لكل كيلوجرام من الهيدروجين الأخضر المنتج بواسطة طاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية من موقع واحد. وتوصلت إلى أنه تتراوح تكلفة إنتاج الهيدروجين باستخدام محلل كهربائي يعمل بطاقة الرياح من ٠,٦٧٢ إلى ١,٠٦٣ دولار/كجم من الهيدروجين، بينما تتراوح التكلفة المنتجة بواسطة المحلل الكهربائي عالي الحرارة الذي يعمل بالطاقة الحرارية الأرضية من ٣,٣١ إلى ٤,٧٨ دولار/كجم من الهيدروجين. وبالتالي، يمكن إنتاج الكهرباء والهيدروجين الأخضر بتكلفة منخفضة باستخدام طاقة الرياح مقارنة بالطاقة الحرارية الأرضية. وسعت دراسة (Lynda, 2021) للتعرف على فرص إنتاج الهيدروجين الأخضر في الجزائر، وخلصت إلى أن البنية التحتية الحالية للنفط والغاز في الجزائر وإمكانات طاقة الرياح والطاقة الشمسية والقرب من الأسواق الأوروبية تجعل الجزائر منتجة للهيدروجين الأخضر.

ثالثاً: الدراسات التطبيقية السابقة التي تناولت العلاقة القياسية الديناميكية بين الكهرباء المتجددة أو الطاقة

المتجددة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون وطبقت نموذج VECM

كان الغرض من دراسة (Papaioannou, et al, 2018) هو التعرف على العلاقات الديناميكية قصيرة وطويلة الأجل بين أسعار الكهرباء في اليونان ونفط برنت والكربون باستخدام بيانات يومية من عام ٢٠٠٧ إلى عام ٢٠١٤، بتطبيق نموذج VECM، واختبار تكامل جوهانسن، وسببية جرانجر، وتم استخدام دوال الاستجابة وتحليل تجزئة التباين لبيان الاستجابة الديناميكية لأسعار الكهرباء. تشير النتائج إلى وجود علاقة طويلة الأجل بين أسعار الكهرباء في اليونان والكربون. وسعت دراسة (السيد، عبد الحلیم، ٢٠٢٣) إلى البحث في العلاقة بين استهلاك الطاقة الجديدة والمتجددة في مصر والتحول إلى الاقتصاد الأخضر خلال الفترة (١٩٩٠-٢٠٢٠)، من خلال نموذج VECM وعلاقة التكامل المشترك والسببية بين استهلاك الطاقة المتجددة، ومؤشر تنمية الاقتصاد الأخضر ومن مكوناته انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وأبرزت النتائج تأثير استهلاك الطاقة الجديدة والمتجددة على مؤشر تنمية الاقتصاد الأخضر بشكل إيجابي. وكان الهدف من دراسة (Jian, et al, 2019) هو التعرف على آثار النمو الاقتصادي والتنمية المالية واستهلاك الطاقة على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الصين من عام ١٩٨٢ إلى عام ٢٠١٧، طبقت الدراسة اختبار التكامل المشترك لجوهانسن وعلاقة السببية، ونموذج VECM في الأجل القصير والطويل. تُظهر

النتائج وجود علاقة التكامل المشترك طويلة الأجل. وعلى المدى الطويل يمكن للنمو الاقتصادي الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

بعد عرض الدراسات التطبيقية السابقة يمكن القول أن الدراسة المزمع إجرائها تختلف عن تلك الدراسات في أنها تناولت أدوات التحليل القياسي لدراسة العلاقة الديناميكية بين الهيدروجين الأخضر معبراً عنه بإنتاج الكهرباء المتجددة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون وهو- على حد علم الباحثة- لم يطبق من قبل في جنوب أفريقيا.

القسم الثالث: صياغة النموذج

أولاً: البناء النظري لنموذج تصحيح الخطأ المتجهي (VECM)

يمكن استخدام نموذج الانحدار التلقائي (Vector Autoregressive Approach (VAR) ونموذج تصحيح الخطأ المتجهي (Vector Error Correction Model (VECM) في نمذجة الديناميكيات المشتركة، والعلاقات السببية بين مجموعة من المتغيرات الاقتصادية الكلية، مثل الناتج المحلي الإجمالي والتضخم والبطالة وسعر الفائدة وسعر الصرف. وعلاوة على ذلك، يمكن استخدامها لدراسة التغيرات البيئية مثل استهلاك الطاقة، وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون (Suharsono, et al, 2017).

عند الاختيار بين نموذجي VAR وVECM، يتم أخذ خصائص البيانات في الاعتبار. فيجب استخدام اختبارات جذر الوحدة، مثل ديكي فولى الموسع (Augmented Dickey-Fuller (ADF) أو فيليب-بيرون (Phillips-Perron (PP)، للتحقق من استقرار المتغيرات، إذا كانت جميع المتغيرات مستقرة عند المستوى، يمكن استخدام نموذج VAR. أما إذا كانت بعض المتغيرات أو كلها غير مستقرة واستقرت عند أخذ الفرق الأول، فيجب استخدام اختبارات التكامل المشترك مثل اختبار جوهانسن (Johansen Cointegration Test) للتحقق من التكامل المشترك. إذا كان هناك تكامل مشترك، فيمكن استخدام نموذج VECM وإذا لم يكن هناك تكامل مشترك، فيمكن استخدام نموذج VAR على الفروق الأولى للمتغيرات (Baum, 2013). أى أنه لا يمكن تقدير نموذج VAR إلا عندما تكون المتغيرات مستقرة عند المستوى، أو لم يكن هناك تكامل مشترك. مع مراعاة في حالة السلاسل المتكاملة، أن الطريقة التقليدية لإزالة الجذر الحدودي وهي أخذ الفرق الأول بين السلاسل سيؤدي إلى الإفراط في التمييز وفقدان المعلومات التي تنقلها الحركة المشتركة طويلة المدى لمستويات المتغيرات (Winarno, et al, 2020).

كذلك فالتكامل المشترك معناه أن يتشابه سلوك السلسلتان المتكاملتان بمرور الزمن، وهو ما يشكل علاقة توازنية في الأجل الطويل، ويجعل التركيبة الخطية بينهما ذات تباين ثابت. وهذا قد يؤدي إلى تقديرات زائفة لمعاملات الانحدار المقدر أو ما يسمى بالانحدار الزائف، بمعنى أن التغير في المتغيرات يمكن أن يكون راجع إلى الزمن الذي يؤثر فيها جميعاً مما يجعل تغيراتها متصاحبة، وبالتالي فإن العلاقة بينها اقتران أو ارتباط وليست علاقة سببية، وعليه

تظهر أهمية إضافة مقدار الخطأ إلى المعادلات في نموذج تصحيح الخطأ المتجهي VECM لتقادي الانحدار الزائف الذي ينتج بسبب وجود تكامل مشترك بين السلاسل الزمنية (شعباني، عبد الحكيم، ٢٠١٩).

ومن ثم يمكن القول أن نموذج VECM هو عبارة عن نموذج تصحيح الخطأ لدراسة العلاقة التوازنية طويلة الأجل بين المتغيرات، ويشترط لإجرائه التأكد أولاً من وجود التكامل المشترك - كما سبقت الإشارة، كما أن نموذج VECM يتميز بتقييد العلاقات طويلة الأجل للمتغيرات لتتقارب مع علاقات التكامل المشترك الخاصة بها مع السماح بديناميكيات التعديل على المدى القصير (Al-Janabi, 2020). حيث يقوم النموذج على افتراض أنه عندما يكون هناك تكامل مشترك بين المتغيرات، فإنه سيكون هناك علاقة توازنية بينها في الأجل الطويل مع إمكانية أن يكون هناك اختلال لهذا التوازن في الأجل القصير، ولذا يستخدم حد تصحيح الخطأ (Error Correction Term (ECT) ليعبر عن سرعة تعديل القيم الفعلية للمتغير التابع باتجاه قيمته التوازنية مرة أخرى، حيث يقيس نسبة اختلال التوازن في الفترة السابقة التي يتم تصحيحها في الفترة التالية، وذلك للتوفيق بين المتغيرات في كل من الأجل القصير والأجل الطويل، حيث يتم تصحيح الانحراف عن التوازن على المدى الطويل تدريجياً من خلال سلسلة من التعديلات الجزئية على المدى القصير (الناقة وأخرون، ٢٠٢١).

وقبل الشروع في تطبيق النموذج يجب اختيار التأخير الأمثل للنموذج باستخدام معايير المعلومات، مثل Akaike (AIC) أو Bayesian (BIC). وبعد تقدير النموذج يمكن تفسير النتائج وتحليل الديناميكية باستخدام دوال الاستجابة للنبضات، وتحليل تجزئة التباين، كذلك يمكن إجراء اختبار السببية لجرانجر (Baum, 2013).

يقال على النموذج القياسي أنه نموذج ديناميكي، إذا كان يمكن فيه التعبير عن المتغير التابع Y كدالة لقيمه السابقة، بالإضافة إلى القيم الحالية والمتأخرة لمتغير مستقل آخر X . أي أنه إذا تم إرجاع Y على قيمه المتأخرة k والقيم الحالية والمتأخرة k لمتغير مستقل X ، فإن النموذج الديناميكي يكون كالتالي: (Hossanin, 2024)

$$Y_t = \delta + \theta_1 Y_{t-1} + \theta_2 Y_{t-2} + \dots + \theta_k Y_{t-k} + \beta_0 X_t + \beta_1 X_{t-1} + \dots + \beta_k X_{t-k} + \varepsilon_t \quad (1)$$

حيث أنه في حالة وجود K متغير يمكن بناء نموذج تصحيح الخطأ المتجهي VECM كما يلي (Mills,

2015) :

يتم تقدير النموذج الكلاسيكي التالي:

$$y_t = \alpha_1 x_{1t} + \alpha_2 x_{2t} + \dots + \alpha_k x_{kt} + e_t \quad (2)$$

ثم يتم حساب سلسلة البواقي كما يلي:

$$e_t = y_t - \widehat{\alpha}_0 - \widehat{\alpha}_1 x_{1t} - \widehat{\alpha}_2 x_{2t} - \dots - \widehat{\alpha}_k x_{kt} \quad (3)$$

ثم يمكن بعد ذلك تقدير العلاقة الديناميكية لنموذج تصحيح الخطأ كالتالي:

$$\Delta y_t = \widehat{\beta}_1 \Delta x_{1t} + \widehat{\beta}_2 \Delta x_{2t} + \dots + \widehat{\beta}_k \Delta x_{kt} + \widehat{\gamma}_1 (y_{t-1} - \widehat{\alpha}_0 - \widehat{\alpha}_1 x_{1t-1} - \widehat{\alpha}_2 x_{2t-1} - \dots - \widehat{\alpha}_k x_{kt-1}) + \widehat{u}_t \quad (4)$$

حيث:

$\hat{\gamma}_1$: القوة الدافعة نحو التوازن

معاملات العلاقة قصيرة الأجل: $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$

معاملات العلاقة طويلة الأجل: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$

ثانياً: النموذج المستخدم ومصادر البيانات

يمكن صياغة العلاقة الديناميكية لنموذج تصحيح الخطأ المتجهي VECM المستخدم في هذه الدراسة كما

يلي:

$$\begin{aligned} \Delta co_{2t} = & \hat{\beta}_1 \Delta Green_t + \hat{\beta}_2 \Delta GDP_t + \hat{\beta}_3 \Delta Urbanization_t \\ & + \hat{\gamma}_1 (co_{2t-1} - \hat{\alpha}_0 - \hat{\alpha}_1 Green_{t-1} - \hat{\alpha}_2 GDP_{t-1} - \hat{\alpha}_3 Urbanization_{t-1}) \\ & + \hat{u}_t \end{aligned} \quad (5)$$

حيث:

CO₂: انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (كيلو طن)

Green: إنتاج الكهرباء المتجددة (كنسبة من إجمالي الكهرباء المنتجة) وهو يعبر عن قدرة الدولة على إنتاج الهيدروجين الأخضر

GDP: الناتج المحلي الإجمالي (بالأسعار الثابتة بالدولار الأمريكي لعام ٢٠١٥)

Urbanization: سكان الحضر (كنسبة من إجمالي السكان)

$\hat{\gamma}_1$: القوة الدافعة نحو التوازن

معاملات العلاقة قصيرة الأجل: $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$

معاملات العلاقة طويلة الأجل: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$

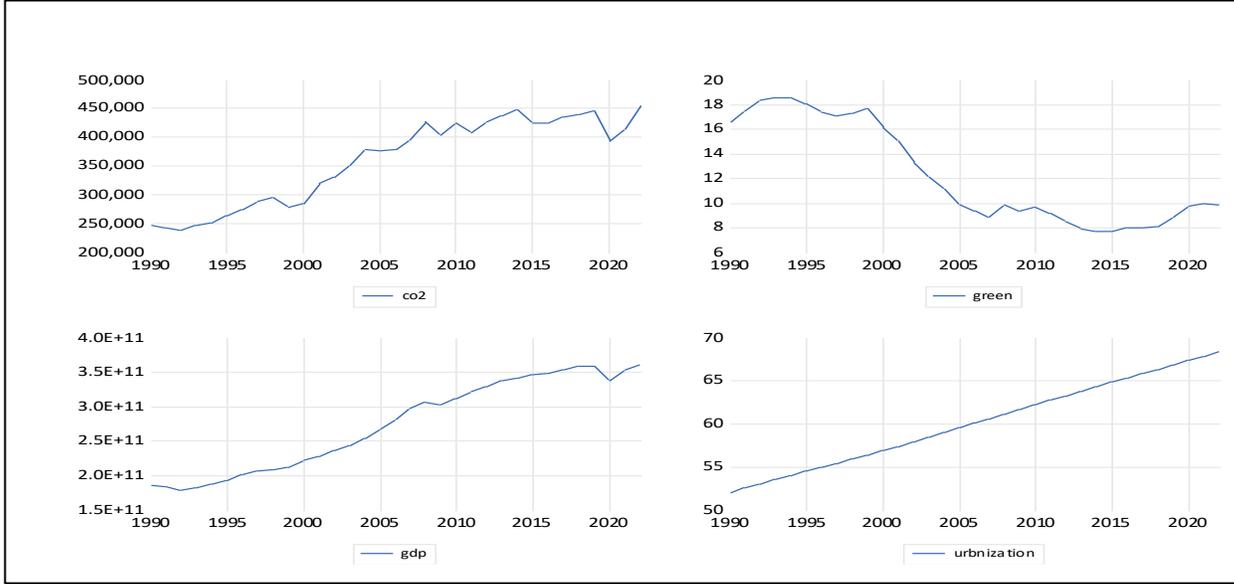
جميع البيانات المستخدمة في النموذج تم الحصول عليها من قاعدة بيانات البنك الدولي خلال الفترة

(١٩٩٠-٢٠٢٢).

القسم الرابع: نتائج تقدير النموذج القياسي

أولاً: التحليل الوصفي للمتغيرات

شكل رقم (١): الرسم البياني لمتغيرات الدراسة



المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

جدول رقم (٢): الإحصاء الوصفي لمتغيرات الدراسة

	CO ₂	GREEN	GDP	URBNIZATION
Mean	359670.8	1.312842	2.74E+11	60.12636
Median	379939.8	0.899711	2.83E+11	60.07700
Maximum	456712.6	3.659874	3.61E+11	68.33500
Minimum	238780.6	0.084217	1.79E+11	52.03700
Std. Dev.	75381.22	1.111369	6.63E+10	4.982972
Skewness	-0.370753	1.155082	-0.092533	0.026269
Kurtosis	1.552061	2.833440	1.417717	1.758590
Jarque-Bera	3.638745	7.376328	3.489570	2.122804
Probability	0.162127	0.025018	0.174683	0.345970
Sum	11869136	43.32379	9.04E+12	1984.170
Sum Sq. Dev.	1.82E+11	39.52450	1.41E+23	794.5603
Observations	33	33	33	33

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

من خلال الشكل البياني رقم (١) والجدول رقم (٢) يتضح أنه بالنسبة لمتغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون فقد اتخذ اتجاهًا متزايدًا متذبذبًا، ووصل متوسطه خلال سنوات الدراسة إلى 359670.8، وكان الحد الأعلى 456712.6 والحد الأدنى 238780.6. أما بالنسبة لمتغير إنتاج الكهرباء المتجددة

فقد اتخذ اتجاهًا متذبذبًا بين الارتفاع والانخفاض، وبلغ متوسط إنتاج الكهرباء المتجددة 1.312842، وكان الحد الأعلى 3.659874 والحد الأدنى 0.084217. أما متغيري الناتج المحلي الإجمالي والتحضر فقد اتخذوا اتجاهًا متزايدًا مطردًا خلال الفترة محل الدراسة. بالنسبة لمتغير الناتج المحلي الإجمالي فقد بلغ متوسطه 2.74E+11، وكان

الحد الأعلى $3.61E+11$ والحد الأدنى $1.79E+11$. وكان متوسط متغير التحضر هو 60.12636 وكان الحد الأعلى 68.33500 والحد الأدنى 52.03700.

ثانياً: فحص مستوى استقرار متغيرات النموذج

من أشهر الاختبارات التي تستخدم لاختبار جذر الوحدة للاستقرار هي: اختبار ديكي- فولر الموسع Phillip- Perron Test Augmented Dickey Fuller Test (ADF) (Dickey & Fuller, 1981)، واختبار فيليب- بيرون Phillip- Perron Test (PP) (Phillips, Perron, 1987)، يفترض اختبار ديكي فولر الموسع أن البيانات متجانسة ومعلمية وتتضمن تأخرًا إضافيًا للمتغيرات التابعة للاستغناء عن الارتباط الذاتي، أما اختبار فيليب بيرون فهو يفترض عدم معلية البيانات، كما يأخذ بعين الاعتبار الأخطاء ذات التباين غير المتجانس فهو يقوم بإجراء تصحيح غير معلمي لإحصائيات اختبار t (Afriyie, et al, 2020).

جدول رقم (٣): نتائج اختبار ديكي فولر الموسع

المتغير	المستوى	الفرق الأول	القرار
CO ₂	-0.907182 (0)	-5.863666 (0) *	I (1)
Green	-0.122157 (0)	-5.796904 (0) *	I (1)
GDP	-0.364050 (0)	-4.861457 (0) *	I (1)
Urbanization	0.019168 (1)	-1.770697 (1) *	I (1)

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

*: معنوية عند مستوى ١٪ حسب القيم الجدولية من MacKinnon (1996)

** : معنوية عند مستوى ٥٪ حسب القيم الجدولية من MacKinnon (1996)

(): طول فترة الإبطاء المناسبة آلياً وفق معيار Schwarz Info Criterion بعد أقصى ٤ فترات

يشير جدول رقم (٣)، إلى أنه نظرًا لأن القيمة المحسوبة المطلقة المقدرة للاختبار أقل من القيمة الجدولية المطلقة، فإنه لا يمكن رفض فرض جذر الوحدة، أي أن السلاسل غير ساكنة، ومن ثم تم اختبار سكون الفرق الأول للسلاسل والذي جاءت قيمته أكبر من القيمة الجدولية عند مستوى معنوية ١٪ بالنسبة للمتغيرات الأربعة، أي أن تلك السلاسل الزمنية الأربعة هي ساكنة عند الفرق الأول.

جدول رقم (٤): نتائج اختبار فيليب- بيرون

المتغير	المستوى	الفرق الأول	القرار
CO ₂	-0.760550 (14)	-6.003377 (9) *	I (1)
Green	0.084118 (5)	-5.808203 (4) *	I (1)
GDP	-0.382502 (2)	-4.861457 (0) *	I (1)
Urbanization	0.813482 (4)	-1.524810 (2) *	I (1)

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

*: معنوية عند مستوى ١٪ حسب القيم الجدولية من MacKinnon (1996)

** : معنوية عند مستوى ٥٪ حسب القيم الجدولية من MacKinnon (1996)

(): العدد الأمثل لفترات الارتباط التسلسلي في اختبار فيليب بيرون وفق الاختيار الآلي Newey-West Automatic باستخدام طريقة

Bartlett kernel

يوضح جدول رقم (٤)، نتائج اختبار فيليب-بيرون وقد تشابهت مع نتائج اختبار ديكي فولر الموسع حيث كانت كل السلاسل الزمنية للمتغيرات الأربعة ساكنة عند الفرق الأول.

ثالثاً: دراسة علاقة التكامل المشترك بين المتغيرات

بعد إجراء اختبارة الاستقرار، ومع وجود متغيرات غير مستقرة ومتكاملة من الدرجة نفسها، من المهم إجراء اختبار علاقات التكامل المشترك بين هذه المتغيرات باستخدام اختبار تكامل جوهانسن Johansen Cointegration Test، والذي يركز على اختبارات جذر الوحدة للبقاقي المقدرة. ويمتاز هذا الاختبار بأنه يمكن تطبيقه في حالة وجود أكثر من متغيرين. وهناك اختباران لتحديد عدد متجهات التكامل المشترك، وهما: اختبار الأثر Trace Test، واختبار القيمة الكامنة العظمى Maximal Eigen Value، إذا كانت القيمة المحسوبة لإحصاء الاختبارين أكبر من القيمة الجدولية يتم رفض الفرض العدمي بعدم وجود أي متجه للتكامل المشترك، وقبول الفرض البديل بوجود متجه تكامل مشترك. (العبدلي، ٢٠٠٧)

جدول رقم (٥): نتائج اختبار تكامل جوهانسن
Unrestricted Cointegration Rank Test (Trace)

Hypothesized No. of CE(s)	Eigenvalue	Trace Statistic	0.05 Critical Value	Prob.** Critical Value
None *	0.633663	69.28661	47.85613	0.0002
At most 1 *	0.526824	38.15633	29.79707	0.0043
At most 2	0.359018	14.95940	15.49471	0.0601
At most 3	0.037102	1.172045	3.841465	0.2790

Trace test indicates 2 cointegrating equation(s) at the 0.05 level
* denotes rejection of the hypothesis at the 0.05 level
**MacKinnon-Haug-Michelis (1999) p-values

Unrestricted Cointegration Rank Test (Max-eigenvalue)

Hypothesized No. of CE(s)	Eigenvalue	Max-Eigen Statistic	0.05 Critical Value	Prob.** Critical Value
None *	0.633663	31.13027	27.58434	0.0168
At most 1 *	0.526824	23.19693	21.13162	0.0253
At most 2	0.359018	13.78736	14.26460	0.0594
At most 3	0.037102	1.172045	3.841465	0.2790

Max-eigenvalue test indicates 2 cointegrating equation(s) at the 0.05 level
* denotes rejection of the hypothesis at the 0.05 level
**MacKinnon-Haug-Michelis (1999) p-values

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

*: رفض الفرض العدمي عند مستوى ٥٪

تشير النتائج الواردة في جدول رقم (٥) إلى أن القيمة المحسوبة لإحصاء اختبار الأثر واختبار القيمة الكامنة العظمى أكبر من القيمة الجدولية الحرجة، لذا يتم رفض الفرض العدمي القائل بعدم وجود أى متجه للتكامل المشترك، وقبول الفرض البديل القائل بوجود علاقة تكامل مشترك واحدة بين متغيرات النموذج. وهذا يشير إلى وجود علاقة طويلة الأجل بين المتغيرات محل الدراسة. ومن ثم سيتم الاعتماد على نموذج VECM لتقدير العلاقة بين المتغيرات.

رابعاً: تحديد درجة تأخير النموذج

قبل تقدير النموذج ينبغي تحديد عدد درجات التأخر له بالاستعانة بخمسة معايير وذلك عن طريق اختيار القيم الصغرى لتلك المعايير الخمسة.

جدول رقم (٦): نتائج معايير اختيار فترة الإبطاء

VAR Lag Order Selection Criteria
Endogenous variables: CO₂ GREEN GDP URBNIZATION
Exogenous variables: C
Sample: 1990 2022
Included observations: 30

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	-1174.356	NA	1.54e+29	78.55706	78.74389	78.61683
1	-954.6769	366.1316	1.97e+23	64.97846	65.91259*	65.27730
2	-934.0593	28.86471*	1.55e+23*	64.67062*	66.35205	65.20852*
3	-919.0514	17.00897	1.96e+23	64.73676	67.16550	65.51373

* indicates lag order selected by the criterion

LR: sequential modified LR test statistic (each test at 5% level)

FPE: Final prediction error

AIC: Akaike information criterion

SC: Schwarz information criterion

HQ: Hannan-Quinn information criterion

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

يتضح من النتائج المعروضة في الجدول رقم (٦) أن درجة التأخير المثلى في النموذج هي ٢، حيث جاءت معلمة اختبار كل من (LR, FPC, AIC, HQ) معنوية عند ٢ ومن ثم تكون فترة الإبطاء المناسبة المعبرة عن درجة التأخير المثلى هي ٢.

خامساً: تقدير نموذج تصحيح الخطأ المتجهى VECM

جدول رقم (٧): نتائج نموذج VECM في الأجل الطويل

Vector Error Correction Estimates
Sample (adjusted): 1993 2022
Included observations: 30 after adjustments
Standard errors in () & t-statistics in []
Lags interval (in first differences): 1 to 2
Endogenous variables: CO₂ GREEN GDP URBNIZATION
Deterministic assumptions: Case 3 (Johansen-Hendry-Juselius): Cointegrating

Cointegrating Eq: CointEq1

CO ₂ (-1)	1.000000
GREEN(-1)	-21.89425 (3425.46)
	[-6.39162]
GDP(-1)	6.09E-08 (1.9E-07)
	[0.32700]
URBNIZATION(-1)	17.70914 (2939.10)
	[6.02535]
C	66.05990

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

يتضح من الجدول رقم (٧) أن كل من متغيري الناتج المحلي الإجمالي والتحضر يؤثران إيجابياً على متغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في حين يؤثر متغير إنتاج الكهرباء المتجددة سلباً على متغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وجاءت هذه النتيجة متوافقة لما هو متوقع ولما جاء في النظرية الاقتصادية، وقد يرجع ذلك إلى ارتباط النمو الاقتصادي والتحضر بالأنشطة الإنتاجية في الاقتصاد القومي، وتعتبر الانبعاثات الكربونية منتج ثانوي لإنتاج السلع والخدمات يزداد مع زيادة النمو الاقتصادي والتحضر، وذلك على النقيض من إنتاج الكهرباء المتجددة والتي يؤدي زيادة إنتاجها إلى تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الأجل الطويل.

جدول رقم (٨): نتائج نموذج VECM في الأجل القصير

Vector Error Correction Estimates
Sample (adjusted): 1993 2022
Included observations: 30 after adjustments
Standard errors in () & t-statistics in []
Lags interval (in first differences): 1 to 2
Endogenous variables: CO₂ GREEN GDP URBNIZATION
Deterministic assumptions: Case 3 (Johansen-Hendry-Juselius): Cointegrating relationship includes a constant. Short-run dynamics include a constant.

Error Correction:	D(CO ₂)	D(GREEN)	D(GDP)	D(URBNIZATION)
COINTEQ1	-0.791786 (0.00056)	-6.80E-06 (0.03654)	-607596.2 (0.04871)	-4.34E-07 (0.03748)
	[-4.83534]	[-0.52916]	[-3.76490]	[-1.62266]
D(CO ₂ (-1))	0.702045 (0.33474)	7.58E-06 (1.2E-05)	281646.3 (145783.)	6.41E-07 (2.4E-07)
	[2.09729]	[0.65325]	[1.93195]	[2.64891]
D(CO ₂ (-2))	0.204548 (0.24832)	4.95E-07 (8.6E-06)	152285.7 (108145.)	3.00E-07 (1.8E-07)
	[0.82374]	[0.05749]	[1.40816]	[1.67061]
D(GREEN(-1))	-21397.26 (8793.47)	0.161257 (0.30501)	9.60E+09 (3.8E+09)	0.011058 (0.00635)
	[-2.43331]	[0.52869]	[2.50683]	[1.74068]
D(GREEN(-2))	-21285.96 (7502.13)	-0.099948 (0.26022)	5.12E+09 (3.3E+09)	0.011016 (0.00542)
	[-2.83732]	[-0.38409]	[1.56741]	[2.03241]
D(GDP(-1))	3.08E-07 (5.3E-07)	-7.91E-12 (1.8E-11)	-0.048247 (0.22987)	-4.59E-13 (3.8E-13)
	[0.58350]	[-0.43180]	[-0.20989]	[-1.20498]
D(GDP(-2))	3.32E-07 (5.3E-07)	4.13E-12 (1.8E-11)	0.013118 (0.23024)	1.84E-13 (3.8E-13)

	[0.62735]	[0.22528]	[0.05698]	[0.48157]
D(URBNIZATION(-1))	663726.7 (244778.)	-7.450824 (8.49037)	2.20E+11 (1.1E+11)	1.067793 (0.17684)
D(URBNIZATION(-2))	[2.71154] 217165.6 (277015.)	[-0.87756] 11.69502 (9.60853)	[2.06712] 1.78E+11 (1.2E+11)	[6.03813] 0.006372 (0.20013)
C	[0.78395] -454327.7 (123112.)	[1.21715] -2.091045 (4.27027)	[1.47462] -2.01E+11 (5.4E+10)	[0.03184] -0.043164 (0.08894)
R-squared	[-3.69035] 0.676066	[-0.48967] 0.142350	[-3.74077] 0.518745	[-0.48530] 0.895173
Adj. R-squared	0.530296	-0.243593	0.302181	0.848000
F-statistic	4.637892	0.368836	2.395338	18.97665
Log likelihood	-321.0348	-12.95956	-710.5632	103.1834
Akaike AIC	22.06899	1.530637	48.03755	-6.212229
Schwarz SC	22.53605	1.997703	48.50462	-5.745163

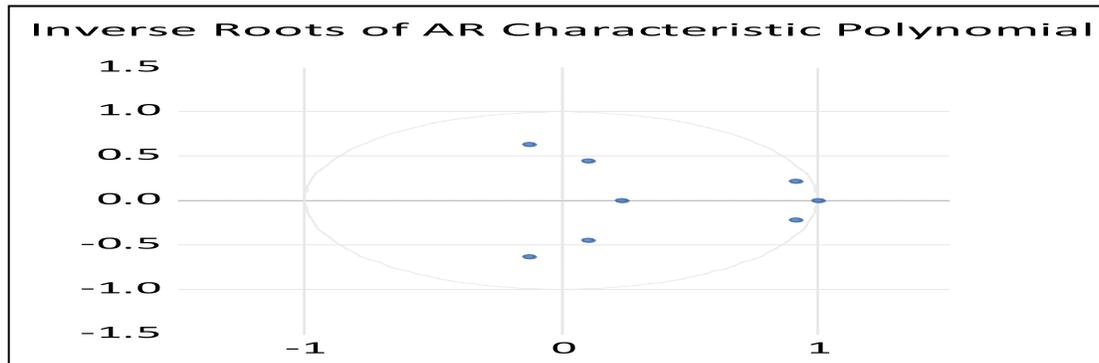
المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

يتضح من الجدول السابق رقم (٨) أن معامل تصحيح الخطأ أو معامل سرعة التعديل COINTEQ1 قد جاء سلبياً ومعنوياً (-٠,٧٩) وهذا المعامل يمثل نسبة اختلال التوازن في الفترة السابقة والتي يتم تعديلها في الفترة الحالية، وتوضح قيمة معامل التصحيح أن حوالي ٧٩٪ من اختلال التوازن في الأجل القصير يتم تصحيحه بفترة زمنية لاحقة، حيث تستغرق انبعاثات ثاني أكسيد الكربون حوالي ١,٢ عام (مقلوب معامل التصحيح) للرجوع إلى الوضع التوازني بعد أثر صدمة في النموذج في الأجل القصير نتيجة للتغيرات في المتغيرات المستقلة الواردة بالنموذج. كذلك يلاحظ تأثر انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بقيمته السابقة (t-1) في العام السابق إيجاباً وأيضاً في العام السابق له كان هناك نفس التأثير الإيجابي (t-2). يؤثر إنتاج الكهرباء المتجددة سلباً على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال العام السابق، والعام السابق له. في حين يؤثر كل من النمو الاقتصادي والتحضر إيجاباً على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال العام السابق، والعام السابق له.

سادساً: اختبارات جودة النموذج

١. اختبار جذر الوحدة (استقرار) النموذج

شكل رقم (٢): نتائج اختبار جذر الوحدة للنموذج AR Root Graph



المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

يوضح الشكل رقم (٢) أن النموذج يعد مستقر، حيث أن جميع النقاط تقع داخل الدائرة.

٢. دراسة وتحليل بواقي النموذج

يتم فيما يلي دراسة وتحليل بواقي النموذج من خلال ثلاثة طرق وهي: اختبار الارتباط الذاتي للبواقي LM

Test، والتمثيل البياني لدوال الارتباط الذاتي للبواقي، واختبار ثبات تباين البواقي Heteroskedasticity Test.

١.٢ اختبار الارتباط الذاتي للبواقي LM Test

يستخدم اختبار Lagrange multiplier (LM) Test بغرض تحليل الارتباط الذاتي للأخطاء، حيث أنه يختبر

إمكانية وجود ارتباط ذاتي متسلسل للبواقي، من خلال فرضية العدم القائلة بعدم وجود ارتباط ذاتي متسلسل للبواقي

(Guastadisegni, et al, 2022).

جدول رقم (٩): نتائج اختبار الارتباط الذاتي للبواقي LM Test

VEC Residual Serial Correlation LM Tests

Sample: 1990 2022

Included observations: 30

Null hypothesis: No serial correlation at lag h						
Lag	LRE* stat	df	Prob.	Rao F-stat	df	Prob.
1	10.07932	9	0.3441	1.159710	(9, 39.1)	0.3468
2	9.346074	9	0.4060	1.065779	(9, 39.1)	0.4087
3	4.583608	9	0.8690	0.493517	(9, 39.1)	0.8699
Null hypothesis: No serial correlation at lags 1 to h						
Lag	LRE* stat	df	Prob.	Rao F-stat	df	Prob.
1	10.07932	9	0.3441	1.159710	(9, 39.1)	0.3468
2	12.15827	18	0.8390	0.637913	(18, 37.3)	0.8457
3	15.48004	27	0.9621	0.487845	(27, 29.8)	0.9684

*Edgeworth expansion corrected likelihood ratio statistic.

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

يوضح الجدول رقم (٩) نتائج اختبار LM Test ويتضح أن في جميعها جاءت قيمة الاحتمالية prob أكبر

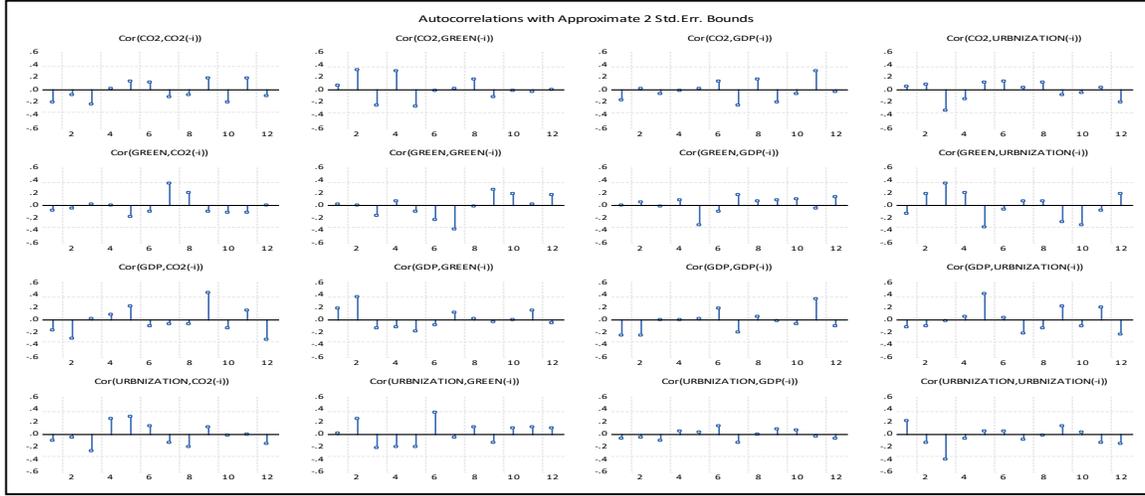
من 0.05 عند تأخير قدره ثلاث فترات $h=3$ ، لذا لا يتم رفض الفرضين العدميين وهما الفرض العدمي الأول No

serial correlation at lag h والفرض العدمي الثاني No serial correlation at lags 1 to h ومن ثم فإنه لا يوجد ارتباط

ذاتي بين البواقي.

٢.٢ التمثيل البياني لدوال الارتباط الذاتي للبواقى Correlograms

شكل رقم (٣) التمثيل البياني لدوال الارتباط الذاتي للبواقى Correlograms



المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

يوضح الشكل رقم (٣) التمثيل البياني لدوال الارتباط الذاتي للبواقى، والذي يشير إلى أن معظمها يقع داخل مجال الثقة مما يدعم صحة الاختبار السابق ويؤكد على عدم وجود ارتباط ذاتي للبواقى.

٣.٢ اختبار ثبات تباين البواقى

يستخدم اختبار Heteroskedasticity Test لاختبار فرضية ثبات تباين البواقى من خلال فرضية العدم لهذا الاختبار وهى ثبات تباين البواقى (ERGÜN, GÖKSU, 2013). ونتائج هذا الاختبار موضحة في الجدول التالي رقم (١٠) والتي تشير إلى قبول الفرض العدمي عند مستوى معنوية ٥٪ ومن ثم فإن تباين البواقى ثابت لكل بواقى النموذج.

جدول رقم (١٠): نتائج اختبار ثبات تباين سلسلة بواقى النموذج

VEC Residual Heteroskedasticity Tests (Levels and Squares)

Sample: 1990 2022

Included observations: 30

Joint test:					
Chi-sq	df	Prob.			
100.4520	96	0.3578			
Individual components:					
Dependent	R-squared	F(16,13)	Prob.	Chi-sq(16)	Prob.
res1*res1	0.512914	0.855583	0.6215	15.38741	0.4965
res2*res2	0.616794	1.307769	0.3163	18.50382	0.2952
res3*res3	0.714839	2.036766	0.1008	21.44517	0.1620

res2*res1	0.576316	1.105203	0.4335	17.28948	0.3671
res3*res1	0.653499	1.532369	0.2214	19.60496	0.2385
res3*res2	0.670571	1.653891	0.1826	20.11714	0.2150

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

سابعًا: دراسة وتحليل السلوك الديناميكي للنموذج

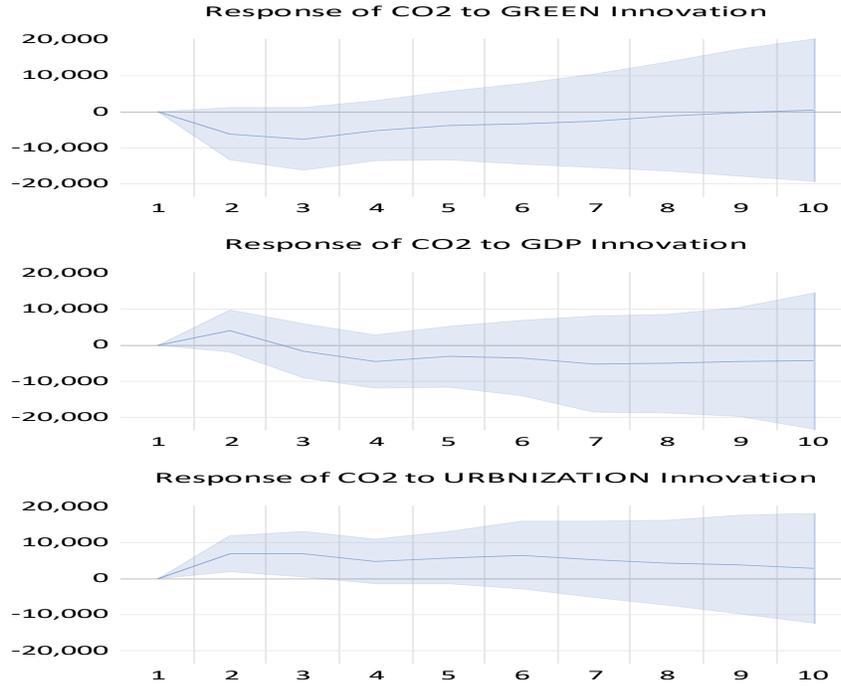
يعد دراسة وتحليل العلاقات الديناميكية بين متغيرات النموذج من بين الأهداف الرئيسية التي تسعى هذه الدراسة إلى تحقيقها، وذلك لأنه من خلال تحليل السلوك الديناميكي للنموذج يمكن التعرف على مسار الاستجابة الديناميكية للمتغير التابع بعد تأثره بمتغيرات أخرى، وكذلك معرفة معدلات مساهمة المتغيرات المختلفة في الاستجابة النبضية للمتغير التابع. ويتم ذلك من خلال تحليل استجابة المتغيرات لصددمات النموذج، عن طريق دالة الاستجابة النبضية وتحليل تجزئة التباين (Wang, et al, 2021).

١. دالة الاستجابة النبضية

توضح دالة الاستجابة النبضية Impulse response function (IRF) تحليل التأثيرات الديناميكية للنموذج حين يستجيب للصددمات. حيث تستخدم دالة الاستجابة النبضية لبيان المسار الزمني للمتغير التابع في نموذج VECM للصددمات من جميع المتغيرات التفسيرية، حيث يعبر المحور الأفقي عن الزمن الذي مر بعد حدوث الصدمة معبراً عنه بالسنوات، في حين يقيس المحور الرأسي مقدار استجابة المتغير مقاساً بنسبة مئوية. تشير الخطوط العلوية والسفلية في كل رسم بياني إلى درجة الثقة بنسبة ٩٥٪، وتمثل الخطوط بينهما قيم الاستجابة النبضية (Badr, 2015). وفي هذه الدراسة يتم توضيح السلوك الديناميكي لمتغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، حيث تقيس هذه الدوال تأثير صدمة مقدارها انحراف معيارى واحد لمتغيرات النموذج على القيم الحالية والمستقبلية لمتغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

شكل رقم (٤): دوال الاستجابة النبضية

Response to Cholesky One S.D. (d.f. adjusted) Innovations
95% CI using Monte Carlo S.E.s with 100 replications



المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

يتبين من الشكل السابق رقم (٤) أن استجابة متغير ثاني أكسيد الكربون لمتغير إنتاج الكهرباء المتجددة كانت سالبة طوال الفترات الزمنية، في حين كانت الاستجابة للنمو الاقتصادي موجبة حتى الفترة الثالثة ثم أصبحت سالبة، أما الاستجابة بالنسبة لمتغير التحضر فقد ظلت موجبة خلال فترات الاستجابة بأكملها. أي أنه يمكن القول أن حدوث صدمة في إنتاج الكهرباء المتجددة أثرت بشكل كبير في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال باقي السنوات.

٢. تحليل تجزئة التباين

تقيس تجزئة التباين النسبة من تباين خطأ التنبؤ للمتغير محل الدراسة الناتجة عن الصدمات غير المتنبأ بها لكل متغير من متغيرات النموذج خلال فترة التنبؤ، أي أنها تقيس مساهمة الصدمات العشوائية لمتغيرات النموذج في التقلبات المستقبلية لمتغير ما (العقاب، صديق، ٢٠١٩). وقد تم الاعتماد على تجزئة التباين من خلال تجزئة تشولسكي (Decomposition of Cholesky) وذلك من أجل عزل أي صدمة ناشئة للنموذج لمتغير محدد. وتقوم تجزئة تشولسكي على أن أي متغير يتأثر بشكل متزامن فقط بالمتغيرات التي تسبقه في الترتيب. Alaba, et al, (2013)

وفي هذه الدراسة تم الاعتماد على الترتيب التالي للمتغيرات:

Cholesky ordering: URBANIZATION, GDP, GREEN, CO₂

بمعنى أنه يفترض أن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون تتأثر بشكل متزامن بكل المتغيرات.

جدول رقم (١١): تجزئة تباين خطأ التنبؤ لمتغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون

Variance Decomposition of CO₂:

Period	S.E.	CO ₂	GREEN	GDP	URBNIZATION
1	0.010983	54.03452 (12.8152)	22.51421 (12.4076)	22.79328 (12.7114)	0.657980 (3.34251)
2	0.023749	32.21642 (9.36849)	40.91992 (13.4036)	19.57484 (11.8683)	7.288832 (6.48424)
3	0.039299	24.92184 (7.86523)	44.73674 (13.3538)	15.85478 (10.2797)	14.48664 (8.86820)
4	0.056240	24.21629 (8.22172)	46.70623 (13.7648)	12.94045 (9.01714)	16.13703 (10.1201)
5	0.074110	23.23627 (8.73775)	50.89251 (14.0933)	10.72184 (8.44825)	15.14938 (10.4062)
6	0.092470	21.46871 (9.02106)	53.96078 (14.3684)	10.14426 (8.03467)	14.42625 (10.7037)
7	0.110633	20.93369 (9.23968)	54.62567 (14.9540)	10.71385 (8.42942)	13.72680 (10.7834)
8	0.128078	21.18213 (9.64225)	54.64630 (15.9943)	11.20567 (8.73779)	12.96590 (10.0815)
9	0.144478	21.21073 (9.75676)	54.47617 (15.0139)	11.90912 (9.30267)	12.40399 (11.2434)
10	0.159564	21.17990 (9.78652)	53.84791 (15.1226)	12.89827 (9.60314)	12.07392 (11.4229)

Cholesky One S.D. (d.f. adjusted) Innovations
Cholesky ordering: URBNIZATION GDP GREEN CO₂

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

يشير جدول رقم (١١) إلى تجزئة تباين خطأ التنبؤ لمتغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال عشرة سنوات مستقبلية، ويتضح أنه عند حدوث صدمة في متغيري إنتاج الكهرباء المتجددة والنمو الاقتصادي فهما يساهمان بنسبة حوالي ٢٣٪ في تقلبات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، في حين يساهم متغير التحضر بنسبة ضعيفة قدرها حوالي ١٪. ويلاحظ تغير ذلك في الأجل الطويل بنهاية الفترة حيث تساهم إنتاج الكهرباء المتجددة بنسبة حوالي ٥٤٪ لتكون هي المساهمة الأكثر أهمية في تفسير تقلبات تباين خطأ التنبؤ لمتغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، يليها متغير النمو الاقتصادي بنسبة حوالي ١٣٪ ثم التحضر بنسبة ١٢٪ وتظل نسبة مساهمة التحضر هي الأقل. أما بالنسبة لصدمة متغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون فتتراجع مساهمتها في تفسير نفس المتغير في الأجل الطويل لتبلغ ٢١٪ في نهاية الفترة بعد أن كانت ٥٤٪ في أول الفترة.

وتشير هذه النتيجة إلى أن إنتاج الكهرباء المتجددة يعد هو المتغير الأكثر أهمية في تفسير التقلبات المستقبلية لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وتوافقت هذه النتيجة مع التحليل الديناميكي لدوال الاستجابة. أي أن مقدار الصدمات في متغير إنتاج الكهرباء المتجددة لها دور كبير في تفسير مقدار الصدمات في متغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وتتفق هذه النتيجة مع النظرية الاقتصادية.

ثامناً: دراسة علاقة السببية بين المتغيرات

يمكن إجراء اختبار سببية جرانجر في نموذج تصحيح الخطأ المتجهي VECM، في حال وجود تكامل المشترك بطريقة جوهانسن، وتوضح العلاقة السببية قدرة أحد المتغيرات على التسبب في المتغير الآخر، ومن ثم يمكن من خلال هذا الاختبار تحديد العلاقة السببية بين المتغيرات من حيث كونها أحادية الاتجاه أو ثنائية الاتجاه. (Toda, Phillips, 1993)

جدول رقم (١٢): نتائج اختبار سببية جرانجر

Pairwise Granger Causality Tests
Sample: 1990 2022
Lags: 2

Null Hypothesis:	Obs	F-Statistic	Prob.
GREEN does not Granger Cause CO ₂ CO ₂ does not Granger Cause GREEN	31	0.56829 1.92193	0.5734 0.1665
GDP does not Granger Cause CO ₂ CO ₂ does not Granger Cause GDP	31	2.91990 3.00116	*0.0718 *0.0672
URBNIZATION does not Granger Cause CO ₂ CO ₂ does not Granger Cause URBNIZATION	31	4.45398 2.40589	**0.0217 0.1100
GDP does not Granger Cause GREEN GREEN does not Granger Cause GDP	31	2.62206 0.74373	*0.0918 0.4852
URBNIZATION does not Granger Cause GREEN GREEN does not Granger Cause URBNIZATION	31	8.76981 0.82061	***0.0012 0.4512
URBNIZATION does not Granger Cause GDP GDP does not Granger Cause URBNIZATION	31	4.17201 1.27054	**0.0268 0.2975

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على برنامج EViews 13

***Significant at 0.01

**Significant at 0.05

*Significant at 0.1

من الجدول السابق رقم (١٢) يتضح أنه لا توجد علاقة سببية بين انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والكهرباء المتجددة عند درجة معنوية ١٠٪. في حين توجد علاقة سببية ثنائية الاتجاه بين انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والنمو الاقتصادي عند درجة معنوية ١٠٪. وتوجد علاقة سببية أحادية الاتجاه بين انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والتحضر عند درجة معنوية ٥٪.

القسم الخامس: النتائج والتوصيات

هدفت هذه الدراسة إلى التعرف على تطور الهيدروجين الأخضر في جمهورية جنوب أفريقيا، وإجراء دراسة قياسية ديناميكية توضح إمكانية الاعتماد على الهيدروجين الأخضر المنتج من الكهرباء المتجددة للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتعزيز أمن الطاقة في جنوب أفريقيا.

واعتمدت الورقة البحثية على المنهج الاستقرائي، بالإضافة إلى أسلوب التحليل القياسي من خلال اختبار التكامل المشترك لجوهانسن ونموذج تصحيح الخطأ المتجهي VECM واختبار السببية لجرانجر لاستكشاف العلاقة بين إنتاج الكهرباء المتجددة لتعبر عن الهيدروجين الأخضر وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال الفترة (١٩٩٠-٢٠٢٢).

توصلت الدراسة إلى مجموعة من النتائج من بينها ما يلي:

الهيدروجين هو حامل للطاقة، وليس مصدرًا للطاقة في حد ذاته. ويحتاج إلى الإنتاج من خلال أشكال أخرى من الطاقة، وبالنسبة للهيدروجين الأخضر فهو يحتاج إلى الطاقة المتجددة من خلال عملية التحليل الكهربائي، وهي تقنية تستخدم الكهرباء لتقسيم الماء إلى هيدروجين وأكسجين. وهذه العملية خالية من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون إذا كانت الكهرباء تأتي من مصادر متجددة مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح. لذلك، فإن الهيدروجين ليس بالضرورة متجددًا دائمًا، بل يعتمد هذا على مصدر الطاقة الأساسي المستخدم.

ويعد الهيدروجين الأخضر وما يرتبط به من إنتاج الطاقة المتجددة عنصر أساسي في مزيج تعزيز أمن الطاقة المستقبلي ومكون أساسي نحو الالتزام العالمي بإزالة الكربون في جمهورية جنوب أفريقيا. وخصوصًا أن حوالي ٧٧٪ من الكهرباء المنتجة بجنوب أفريقيا تعتمد على الفحم، وتعد جمهورية جنوب أفريقيا أكبر مصدر للغازات المسببة للاحتباس الحراري في أفريقيا، وهذا يعتبر دافعًا رئيسيًا للتحويل إلى الهيدروجين الأخضر لتقليل كثافة الكربون في قطاعاتها المسببة لانبعاثات عالية، إلى جانب مخاطر انخفاض القدرة على الوصول إلى الأسواق أمام شركاء تجاريين رئيسيين مثل الاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة والصين حيث تضع هذه الدول مجموعة واسعة من السياسات، والقيود الصناعية، والتجارية. ولدى جنوب أفريقيا فرصة لتعظيم إنتاجها من الهيدروجين الأخضر حيث أنها تتمتع بثروة من موارد الطاقة المتجددة، وخاصة طاقة الرياح والطاقة الشمسية، وهي أيضًا موطن لنحو ٧٥٪ من احتياطات العالم من معادن مجموعة البلاتين والتي تعد مكونات رئيسية في محفزات خلايا الوقود وأجهزة التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين الأخضر، مما يمنح جنوب أفريقيا ميزة نسبية في تصنيع الهيدروجين الأخضر وبالتالي، تمتلك الأساس لاقتصاد هيدروجين أخضر مزدهر.

وقد اتخذت جمهورية جنوب أفريقيا بالفعل عددًا من الخطوات المهمة لتعزيز اقتصاد الهيدروجين الأخضر لديها بداية من استراتيجية البحث والتطوير والابتكار الوطنية للهيدروجين وخلايا الوقود عام ٢٠٠٧ وصولاً لخريطة طريق مجتمع الهيدروجين في جنوب أفريقيا عام ٢٠٢٢، واستراتيجية تسويق الهيدروجين الأخضر عام ٢٠٢٣، والمشاركة في تنظيم قمم ومؤتمرات عالمية لتطوير مشاريع الهيدروجين الأخضر، وزيادة الفرص الاستثمارية بتلك المشاريع في جنوب أفريقيا والقارة الأفريقية.

وبالنسبة للدراسة القياسية فإنه عند اختبار استقرار السلاسل الزمنية، فقد تشابهت نتائج اختبار ديكي فولر الموسع وفيليب-بيرون وكانت كل السلاسل الزمنية للمتغيرات الأربعة ساكنة عند الفرق الأول. وعند دراسة علاقة التكامل المشترك بين المتغيرات تبين وجود علاقة تكامل مشترك واحدة بين متغيرات النموذج، ووجود علاقة طويلة الأجل بين المتغيرات. ومن ثم تم الاعتماد على نموذج VECM لتقدير العلاقة بين المتغيرات، وكانت درجة التأخير المثلى هي ٢. وأوضحت نتائج نموذج VECM بالأجل الطويل أن كل من متغيري الناتج المحلي الإجمالي والتحضر يؤثران إيجابياً على متغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في حين يؤثر متغير إنتاج الكهرباء المتجددة سلباً على متغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وفي الأجل القصير أوضحت نتائج نموذج VECM أن حوالي ٧٩٪ من اختلال التوازن في الأجل القصير يتم تصحيحه بفترة زمنية لاحقة. واجتاز النموذج كافة اختبارات الجودة التي تم إجرائها. وعند دراسة علاقة سببية لجرانجر عدم وجود علاقة سببية بين انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وإنتاج الكهرباء المتجددة. وعند دراسة وتحليل العلاقات الديناميكية بين متغيرات النموذج من خلال دالة الاستجابة النبضية وتحليل تجزئة التباين اتضح أن الكهرباء المتجددة هو المتغير الأكثر أهمية في تفسير التقلبات المستقبلية لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، أي أن مقدار الصدمات في متغير الكهرباء المتجددة لها دور كبير في تفسير مقدار الصدمات في متغير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وبالتالي يمكن القول أن التوسع في إنتاج الهيدروجين الأخضر المعتمد بشكل أساسي على الكهرباء المنتجة من مصادر متجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح سيكون له تأثير إيجابي وملاموس في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وتعزيز أمن الطاقة، وتحسين الأوضاع الاقتصادية في جمهورية جنوب أفريقيا.

وبناء على النتائج التي تم التوصل إليها يمكن تقديم التوصيات التالية:

- **زيادة الاستثمار في مشروعات الهيدروجين الأخضر:** وذلك من خلال توسيع مشاركة جنوب أفريقيا مع مؤسسات التمويل المحلية والأجنبية الداعمة لمشروعات الهيدروجين الأخضر.
- **توفير إطار تشريعي للهيدروجين الأخضر:** وذلك من خلال توفير الإطار التشريعي والقانوني لتنظيم مشروعات إنتاج الهيدروجين الأخضر واستخداماته المختلفة لتسهيل جذب الاستثمارات في الهيدروجين الأخضر وإزالة كافة العقبات التي تواجهها.
- **تطوير البنية التحتية والتكنولوجيا المستخدمة في توليد الطاقة المتجددة:** وذلك لارتباطها بإنتاج الهيدروجين الأخضر، حيث إن زيادة الاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح يساعد في إنتاج وتخزين ونقل وتنشيط اقتصاد الهيدروجين الأخضر بجمهورية جنوب أفريقيا، وتصدير الطاقة الخضراء أو منخفضة الكربون.
- **تطوير المهارات البشرية لاقتصاد الهيدروجين الأخضر:** من خلال توسيع نطاق برامج التدريب وإعادة التأهيل في جميع أنحاء جمهورية جنوب أفريقيا لضمان توفر المناهج والمحاضرين اللازمين لتتقيف الجيل القادم من الموظفين والمشاركين في اقتصاد الهيدروجين الأخضر.

- **تذليل الصعاب المتعلقة بإصدار شهادة للهيدروجين الأخضر:** فائدة إصدار هذه الشهادة هو بيان أن ما تم إنتاجه ونقله وتسليمه يتمتع بخصائص استدامة تجعله أخضر. قد لا يخلو نظام الشهادات من تحديات بما في ذلك التكاليف والمهارات اللازمة للامتثال للقوانين وأنظمة الشهادات الوطنية في البلدان الأخرى. ومن طرق التغلب على هذه التحديات زيادة التعاون مع الاتحاد الأوروبي وشركات الدول الأخرى التي لديها الخبرة والتخصص في هذا الشأن.
- **تحسين وتطوير سياسات لخفض الانبعاثات الكربونية :** يمكن أن تشمل هذه السياسة فرض ضرائب على الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة عند استخدامها الوقود الأحفوري وفي المقابل تقديم حوافز مالية لها من أجل التحول إلى استخدام الهيدروجين الأخضر، ودعم الاستثمار في الطاقة الخضراء وتشجيع ترشيد استهلاك الطاقة.

قائمة المراجع

- السيد، هانى محمد، عبد الحليم، فاطمة إبراهيم. (٢٠٢٣)، أثر استخدام الطاقة الجديدة والمتجددة في التحول إلى الاقتصاد الأخضر بالتطبيق على مصر، مجلة كلية الاقتصاد والعلوم السياسية، ٤٩ (١): ٨٩-١٢٢.
- العبدلى، عابد بن عابد. (٢٠٠٧)، محددات الطلب على واردات المملكة العربية السعودية في إطار التكامل المشترك وتصحيح الخطأ، مجلة مركز صالح كامل للاقتصاد الإسلامى، ٣٢، ١-٥٦.
- العقاب، محمد، صديق، حمايدي (٢٠١٩)، محددات الإنفاق العام في الجزائر: دراسة قياسية باستخدام نموذج متجه الانحدار الذاتي (VAR) خلال الفترة ١٩٨٠-٢٠١٧، مجلة المنتدى للدراسات والأبحاث الاقتصادية، ٣، ٧٥-٩٣.
- الناقبة، أحمد أبو الفتوح، عبده، عبير شعبان، الشرقاوي، رانيا أنيس، العلاقة بين الطاقة المستهلكة والنمو الاقتصادي والبيئة في مصر خلال افترة (١٩٨٠-٢٠١٧) "دراسة تحليلية قياسية"، المجلة العلمية لكلية الدراسات الاقتصادية والعلوم السياسية، ٦ (١٢)، ٥٢-٩٤.
- جغبالة، عبد الغني، حملاوي، سكينه، (٢٠٢٣)، الهيدروجين الأخضر كبديل استراتيجي لموارد الطاقة غير المتجددة، مجلة التنمية الاقتصادية، ٨(١)، ١-٢٠.
- شعباني، مجيد، عبد الحكيم، سعيح. (٢٠١٩)، نماذج تصحيح الخطأ والمحافظة على خصائص الأجل الطويل تطبيق على العلاقة بين الإيرادات العامة وكل من التضخم والنفقات العامة في الجزائر للفترة (١٩٨٥-٢٠١٧)، مجلة الأكاديمية العربية في الدنمارك، ٢٢، ٦٥-٨٦.
- عبد الجليل، هدايا عبد الستار عبد المنعم، (٢٠٢٣)، اقتصاديات الهيدروجين الأخضر ودورها في تعزيز أمن الطاقة وتحقيق النقل المستدام، المجلة العلمية للبحوث التجارية، ١٠(٤)، ٣٦٣-٣٩٧.
- عبد المعطي، وائل حامد، (٢٠٢١)، إنتاج الهيدروجين ودوره في عملية تحول الطاقة، مجلة النفط والتعاون العربي، ٤٧ (١٧٩)، ٧-٢١.
- غراف، تاييس فان دي (٢٠٢٢)، عقد الهيدروجين، التمويل والتنمية، ٢١-٢٣.

- Afriyie, Jonathan Kwaku, Twumasi-Ankrah, Sampson, Gyamfi, Kwasi Baah, Arthur, Doris, Pels, Wilhemina Adoma. (2020), Evaluating the Performance of Unit Root Tests in Single Time Series Processes, **Mathematics and Statistics**, 8(6), 656-664.
- Alaba, O.O., Olubusoye, O.E. and Oyebisi, O. (2013), Cholesky Decomposition of Variance-Covariance Matrix Effect on the Estimators of Seemingly Unrelated Regression Model, **Journal of Science Research**, 12, 361-370.
- Al-Janabi, Nabeel Mahdi. (2020), Time series analysis using E-views program, **Workshop on: Time series analysis Using the E-views.9 program**, University of Al-Qadisiyah, 1-27, available at: https://www.researchgate.net/publication/342165890_Time_series_analysis_using_E-views_program
- Alzoubi, Asem H., (2023), Assessing the Impact of Green Hydrogen Production on Carbon Emission Reduction: A Comprehensive Analysis, **International Journal on Engineering Energy and Electronics**, 1(1), 24-36.
- Aravindan, M., Praveen, Kumar G., (2023), Hydrogen towards sustainable transition: A review of production, economic, environmental impact and scaling factors, **Results in Engineering**, 20, 1-22.
- Andreoni, Antonio, Bell, Jason F., Roberts, Simon, (2023), Green hydrogen for sustainable (re) industrialisation in South Africa: Industrial policy for hard-to-abate industries and linkages development, **CCRED Working Paper 2023/08**.
- Awaleh, Mohamed Osman, Abdi-Basid Adan, Dabar, Omar Assowe, Jalludin, Mohamed, Ahmed, Moussa Mahdi, Guirreh, Ismael Abdillahi, (2022), Economic Feasibility of Green Hydrogen Production by Water Electrolysis Using Wind and Geothermal Energy Resources in Asal-Ghoubbet Rift (Republic of Djibouti): A Comparative Evaluation, **Energies**, 15(138), 1-23.
- Badr, Osama M. (2015), Stock Market Development and Economic Growth: Evidence from Egypt, **International Journal of Trade, Economics and Finance**, 6(2), 96-101.
- Baum, Christopher F, (2013), VAR, SVAR and VECM models, Boston College.
- ERGÜN , Uğur ,GÖKSU, Ali. (2013), **Applied Econometrics with Eviews Applications**, Sarajevo, International Burch University.
- Department of Higher Education and Training, Department of Science and Innovation, (2022), **The South African Green Hydrogen TVET Ecosystem Just Transition Strategic Framework**, Available at: https://saiia.org.za/wp-content/uploads/2022/06/SAIIA_SR_GreenHydrogenTVet.pdf
- Department of Science and Innovation, (2024), Green Hydrogen Commercialization Strategy, Available at: <https://www.idc.co.za/key-policies/>
- Dickey, D. A., and Fuller, W. A. (1981), likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root, **Econometrica** , 49 (4),1057-1072.
- Global African Hydrogen Summit (GAH2S), (2024), Available at: <https://www.globalafricanhydrogensummit.com/conference/south-africa-spotlight/>
- Green hydrogen Organization, (2024), **GH₂ Country Portal – South Africa**, Available at: <https://gh2.org/countries/south-africa>
- Guastadisegni, Lucia, Cagnone, Silvia, Moustaki, Irini and Vasdekis, Vassilis, (2022), Use of the Lagrange multiplier test for assessing measurement invariance under model misspecification. **Educational and Psychological Measurement**, 82 (2), 254 – 280.
- Hossain, Sharif, (2024), **Econometric Analysis: An Applied Approach to Business and Economics**, Cambridge Scholars Publishing.
- Hydrogen Africa Conference & Expo 2024 (HACE2024), Available at: <https://hydrogen-africa.com/Conferences/989619/>

- International Renewable Energy Agency (IRENA), (2020), **The Renewable Energy Transition in Africa**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Imasiku, Katundu, Farirai, Fortunato, Olwoch, Jane, Agbo, Solomon Nwabueze, (2021), A Policy Review of Green Hydrogen Economy in Southern Africa, **Sustainability**, 1-17.
- IRENA, (2021), **Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA, (2022), **Global hydrogen trade to meet the 1.5 ° C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA, (2023), **Creating a global hydrogen market: Certification to enable trade**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi; and RMI, Colorado.
- Jain, Shilpi, Jain, P. K. (2017), The rise of Renewable Energy implication in South Africa, **Energy Procedia**, 143, 721-726.
- Jian, Jianhui, Fan, Xiaojie, He, Pinglin, Xiong, Hao, Shen, Huayu, (2019), The Effects of Energy Consumption, Economic Growth and Financial Development on CO₂ Emissions in China: A VECM Approach, **Sustainability**, 11, 1-16.
- Lynda, Ait Bachir, (2021), Algerian Green Hydrogen Production Opportunities and Challenges in Light of a sustainable energy system, **International Journal of Economic Performance**, 4, 13-34.
- Marouani, Ismail, Guesmi, Tawfik, Alshammari, Badr M., Alqunun, Khalid, Alzamil, Ahmed, Alturki, Mansoor, Abdallah, Hsan Hadj, (2023), Integration of Renewable-Energy-Based Green Hydrogen into the Energy Future, **Processes**, 11(9), 1-29.
- Matias, Garcia G., Sebastian, Oliva H., (2023), Technical, economic, and CO₂ emissions assessment of green hydrogen production from solar/wind energy: The case of Chile, **Energy**, 278, 12-25.
- Metcalfe, Jonathan, Burger, Le Riche, Mackay, James, (2020), **Unlocking South Africa's hydrogen potential**, Strategy & part of the PwC network.
- Mills, Terence C., (2015), **Time Series Econometrics: A Concise Introduction**, Palgrave Macmillan.
- Mukonza, Chipso, Nhamo, Godwell, (2018), Wind energy in South Africa: A review of policies, institutions and programmes, **Journal of Energy in Southern Africa**, 29(2), 21–28.
- Munda, J. L. (2019), The potential role of green hydrogen production in the South Africa energy mix, **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 11(4):1-22
- Nzimande, Blade, (2022), Launch of Hydrogen Society Roadmap, South African Government, available at: <https://www.gov.za/node/811734>
- Papaioannou, George P., Dikaiakos, Christos, Stratigakos, Akylas, Dramountanis, Anargyros, Alexandridis, Antonio T. (2018), Using a Rolling Vector Error Correction Model to Model Static and Dynamic Causal Relations between Electricity Spot Price and Related Fundamental Factors: The Case of Greek Electricity Market, **International Journal of Energy Economics and Policy**, 8(1), 38-54.
- Peter, C. B. Phillips, Pierre Perron, (1987), Testing for a Unit Root in Time Series Regression, **Cowles Foundation Discussion Paper No. 795-R**, Yale University, 1-29
- Pinto, Jaqueline, Chege, Kennedy, (2024), Regulating Green and Low-Carbon Hydrogen in Africa: A Case Study of South Africa, **Advances in Science and Technology**, 142, 15-24.
- Raouf, Engy, (2023), Green Hydrogen Production and Public Health Expenditure in Hydrogen-Exporting Countries, **International Journal of Energy Economics and Policy**, 2023, 13(6), 36-44.
- Reda, Bassma, Elzamar, Amr A., AlFazzani, Shehab, Ezzat, Shahira M., (2024), Green hydrogen as a source of renewable energy: a step towards sustainability, an overview, **Environment Development and Sustainability**, DOI:10.1007/s10668-024-04892-z

- South African Department of Science and Innovation (2022) , **Hydrogen Society Roadmap for South Africa 2021**, Available at: https://www.dst.gov.za/images/South_African_Hydrogen_Society_RoadmapV1.pdf
- South Africa Green Hydrogen Summit, (2024), available at: <https://greenhydrogensummit.org.za/resources/>
- South Africa's R105bn green hydrogen project to be energised by hot De Aar sunshine , (2024) , Available at: <https://www.miningweekly.com/article/south-africas-r105bn-green-hydrogen-project-to-be-energised-by-hot-de-aar-sunshine-2024-05-21>
- Stamm, Andreas, Altenburg, Tilman, Strohmaier, Rita, Oyan, Ece, Thoms, Katharina, (2023), Green Hydrogen: Implications for International Cooperation With Special Reference to South Africa, German Institute of Development and Sustainability (IDOS), **IDOS DISCUSSION PAPER 9/2023**.
- Suharsono, Agus, Aziza, Auliya, Pramesti, Wara, (2017), Comparison of vector autoregressive (VAR) and vector error correction models (VECM) for index of ASEAN stock price, **Conference: International Conference and Workshop on Mathematical Analysis and its Applications**.
- The Africa Green Hydrogen Alliance (AGHA), (2024), Available at: <https://gh2.org/agma>
- Toda, Hiro Y., Phillips, Peter C. B. (1993), Vector Autoregressions and Causality, **Econometrica** , 61 (6), 1367-1393.
- Wang, Yang-Chao, Tsai, Jui-Jung, Dong, Yueying, (2021), Research on impulse response and variance decomposition analysis of co-integrated systems, **Journal of Physics: Conference Series**, 1941, 1-11.
- Winarno, S., Usman, M. Warsono, Kurniasarri, D. and Widiarti, (2020), Application of Vector Error Correction Model (VECM) and Impulse Response Function for Daily Stock Prices, **Journal of Physics: Conference Series**, 1751, 1-18.