AL KUT JOURNAL OF ECONOMIC AND ADMINISTRATIVE SCIENCES
Publisher: College of Economics and Management - Wasit University

التعدين المشفر والتحول الرقمي : نحو اقتصاد شبكي مستدام دراسة مقارنة لنماذج البيتكوين والإيثيريوم

م.د مرتضى راشد علي ضعيف الدريعي

muali@uowasit.edu.iq

كلية الإدارة والاقتصاد \ جامعة واسط

المستخلص: يهدف هذا البحث إلى تحليل اقتصاديات التعدين المشفّر في إطار التحول الرقمي نحو اقتصاد شبكي مستدام، من خلال مقارنة بين نموذج البيتكوين المعتمد على آلية إثبات العمل (PoW) وتجربة الإيثيريوم بعد انتقاله إلى آلية إثبات الحصة .(PoS) وتتمحور الإشكالية البحثية حول قدرة تقنيات التعدين على تحقيق التوازن بين متطلبات اللامركزية والأمان من جهة، ومعايير الكفاءة الاقتصادية والاستدامة البيئية من جهة أخرى.

اعتمد البحث منهجًا تحليليًا مقارنًا استند إلى مضامين الأوراق الأكاديمية والتقارير الدولية المتخصصة مثل Cambridge Bitcoin Electricity Index، المنتدى الاقتصادي العالمي(WEF) ، و Crypto Carbon Ratings Institute، مع تحليل نقدي للبنية الاقتصادية والبيئية للنموذجين. أظهرت النتائج أن شبكة البيتكوين، على الرغم من تفوقها في الأمن السبراني واللامركزية، تعاني من استهلاك مرتفع للطاقة تجاوز 120 تيراواط/ساعة سنويًا، يقابله انبعاث ملايين الأطنان من ثاني أكسيد الكربون، وهو ما يقلل من استدامتها الطويلة الأجل. في المقابل، شكّل انتقال الإيثيريوم إلىPoSنقطة تحول بارزة، حيث انخفض استهلاكه للطاقة بنسبة تفوق 99.9% وجعل انبعاثاته الكربونية شبه معدومة، لكنه يثير في المقابل مخاوف تتعلق بزيادة احتمالية المركزية.

وتخلص الدراسة إلى أن اعتماد آليات توافق صديقة للبيئة مثلPoSيُعد مسارًا محوريًا لتعزيز الاستدامة في الاقتصاد الشبكي، وأن مستقبل هذا الاقتصاد—عالميًا وعربيًا—سيتوقف على صياغة أطر تنظيمية وحوكمة رشيدة تدعم الابتكار الرقمي وتقلص الأثر البيئي. كما توصي النتائج بضرورة إدماج معايير الاستدامة في استراتيجيات الاستثمار في الأصول الرقمية، وتشجيع تبني الطاقة المتجددة والتوجه نحو "التعدين الأخضر"، بما يعزز التكامل بين التحول الرقمي ومتطلبات التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية:الاقتصاد المعرفي ،التعدين المشفّر، البيتكوين، الإيثيريوم، إثبات العمل، إثبات الحصة، الاقتصاد الشبكي، الاستدامة، البلوكتشين (تكنولوجيا سلاسل الكتل) ،الاقتصاد الرقمي، اقتصاد الثقة الرقمية.

Abstract: This research aims to analyze the economics of crypto mining within the framework of the digital transformation towards a sustainable network economy, by comparing the Bitcoin model based on the Proof of Work (PoW) mechanism with the Ethereum experience after its transition to the Proof of Stake (PoS) mechanism. The research problem revolves around the ability of mining technologies to achieve a balance between the requirements of decentralization and security on the one hand, and the criteria of economic efficiency and environmental sustainability on the other. The research adopted a comparative analytical approach based on the contents of academic papers and specialized international reports such as the Cambridge Bitcoin Electricity Index, the World Economic Forum (WEF), and the Crypto Carbon Ratings Institute, along with a critical analysis of the economic and environmental structure of the two models. The results showed that the Bitcoin network, despite its superiority in cybersecurity and decentralization, suffers from high energy consumption exceeding 120 terawatt-hours annually, corresponding to the emission of millions of tons of carbon dioxide, which reduces its long-term sustainability. In contrast, Ethereum's transition to PoS represented a significant turning point, reducing its energy consumption by over 99.9% and making its carbon emissions virtually zero. However, it also raises concerns about the potential for increased centralization.

The study concludes that adopting environmentally friendly consensus mechanisms such as PoS is a pivotal path to enhancing sustainability in the network economy, and that the future of this economy—globally and regionally—will depend on formulating regulatory frameworks and sound governance that support digital innovation and reduce environmental impact. The findings also recommend integrating sustainability criteria into digital asset investment strategies, encouraging the adoption of renewable energy, and moving toward "green mining," thus enhancing the integration of digital transformation with sustainable development requirements.

المقدمة

شهد الاقتصاد العالمي خلال العقدين الأخيرين تحولات عميقة نتيجة الثورة الرقمية، حيث برزت تكنولوجيا البلوكشين (Blockchain) والعملات المشفّرة بوصفه أحد أبرز مخرجات هذا التحول. وقد شكّل ظهور البيتكوين عام 2009 نقطة انطلاق لعصر جديد من النقود الرقمية اللامركزية، التي لا تخضع للرقابة التقليدية للسلطات النقدية، مما فتح المجال أمام صناعة التعدين المشفّر لتصبح قطاعًا اقتصاديًا عالميًا مؤثرًا في أسواق المال والطاقة والبيئة.

يُعد البلوكشين، بصفته دفتر حسابات موزع قائم **(Distributed Ledger)** على التشفير وآليات التوافق، الركيزة الأساسية التي أسهمت في انتشار العملات المشفرة. فهو يوفّر مستويات عالية من الشفافية والموثوقية وعدم قابلية

التلاعب بالبيانات، ما جعله يتجاوز حدود المعاملات المالية ليجد تطبيقات واسعة في مجالات متعددة مثل سلاسل الإمداد، الرعاية الصحية، التصويت الإلكتروني، والخدمات الحكومية.

ومع ذلك، فإن التحولات التقنية الكبرى صاحَبها **جدل اقتصادي وبيئي متنامٍ**، لاسيما مع انتشار آليات التعدين المعتمدة على **نموذج إثبات العمل(Proof of Work - PoW)** ، الذي يتميز بدرجة أمان عالية مقابل **تكلفة طاقية وبيئية مرتفعة** .فقد أشارت تقديرات عدة إلى أن استهلاك الطاقة في شبكات PoW يعادل استهلاك بعض الدول، ما أثار تساؤلات جوهرية حول **مدى استدامة هذا النموذج في ظل القيود البيئية العالمية**.

في المقابل، ظهر نموذج **إثبات الحصّة (Proof of Stake - PoS)** كبديل أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة، إذ يعتمد على حيازة الأصول الرقمية بدلاً من القدرة الحاسوبية، مما جعله نموذجًا واعدًا لتحقيق **توازن بين الأمان، الكفاءة، والاستدامة**.

ورغم ما تحمله هذه الابتكارات التكنولوجية من فرص لتعزيز الكفاءة والشفافية في بيئة الاقتصاد الرقمي، إلا أنها أثارت جدلًا متصاعدًا حول تداعياتها الاقتصادية والبيئية. فقد أظهرت آليات التعدين المعتمدة على إثبات العمل معدلات مرتفعة من استهلاك الطاقة، بما يعادل في بعض التقديرات استهلاك دول بأكملها، وهو ما أثار تساؤلات جوهرية بشأن مدى توافق هذه التقنيات مع متطلبات التنمية المستدامة. وفي ظل تزايد الاهتمام العالمي بالتحول نحو نماذج اقتصادية أكثر كفاءة وصديقة للبيئة، يبرز السؤال حول كيفية التوفيق بين الابتكار التكنولوجي والاستدامة الاقتصادية والبيئية في عصر الاقتصاد الشبكي.

أهمية البحث

تنبع أهمية هذا البحث من كونه يسهم علميًا في سد فجوة معرفية ضمن الأدبيات الاقتصادية من خلال الربط بين اقتصاديات التعدين المشفّر ومتطلبات الاستدامة البيئية، وتوفّر عمليًا إطارًا يساعد صانعي السياسات والمستثمرين على صياغة قرارات أكثر وعيًا تستند إلى معايير الكفاءة والاستدامة في قطاع الأصول الرقمية، كما تكتسب بعدًا تنمويًا من خلال إبراز الفرص المتاحة أمام الدول العربية لاستغلال مواردها من الطاقة المتجددة في تبني نماذج "التعدين الأخضر"، بما يعزز من قدرتها على الاندماج الفعّال في الاقتصاد الشبكي العالمي.

مشكلة البحث

تكمن مشكلة البحث في التناقض بين نموذج إثبات العمل (PoW) في البيتكوين، الذي يتميز بالأمان واللامركزية لكنه يستهلك كميات هائلة من الطاقة، ونموذج إثبات الحصة (PoS) في الإيثيريوم، الذي خفّض استهلاك الطاقة بشكل شبه كامل لكنه يثير مخاوف تتعلق بالمركزية. وتنحصر الإشكالية البحثية في التساؤل حول مدى قدرةPoSعلى أن يكون بديلاً اقتصاديًا وبيئيًا مستدامًا لـPoW، وانعكاسات ذلك على مستقبل الاقتصاد الشبكي عالميًا وعربيًا في ظل تصاعد أهمية قضايا الطاقة والاستدامة.

فرضية البحث

ينطلق هذا البحث من مجموعة من الفرضيات التي تفترض أن نموذج إثبات الحصة (PoS) يتمتع بدرجة أعلى من الكفاءة الاقتصادية والاستدامة البيئية مقارنة بنموذج إثبات العمل(PoW) ، وأن ارتفاع استهلاك الطاقة في شبكة البيتكوين يقوّض استدامتها على المدى الطويل، كما تفترض أن التحول نحو آليات توافق أكثر صداقة للبيئة، مثلPoS، من شأنه أن يعزز ثقة المستثمرين ويقوي أسس الاقتصاد الشبكي عالميًا وعربيًا.

أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى تحليل البنية الاقتصادية لآليات التعدين المشفّر، وتقييم آثارها البيئية من خلال المقارنة بين نموذج إثبات العمل (PoW) المعتمد في شبكة البيتكوين ونموذج إثبات الحصة (PoS) الذي انتقلت إليه شبكة الإيثيريوم؛ وذلك في إطار التحول الرقمي نحو اقتصاد شبكي أكثر استدامة. كما تسعى إلى استكشاف الانعكاسات المستقبلية لهذه النماذج على بنية الاقتصاد الشبكي عالميًا وعربيًا، بما يتيح صياغة تصورات تدعم الابتكار الرقمي وتنسجم مع متطلبات الكفاءة الاقتصادية والاستدامة البيئية.

منهجية البحث

تعتمد البحث على منهج تحليلي مقارن نوعي يركز على الخصائص الاقتصادية والبيئية لنماذج البيتكوين (PoW) والإيثيريوم بعد انتقاله إلىPoS، باستخدام الأدبيات الأكاديمية والتقارير الدولية والتحليل التفسيري للبيانات النوعية لاستخلاص استنتاجات حول استدامة الاقتصاد الشبكي.

الحدود الزمكانية

تنطلق الدراسة من منظور عالمي مع التركيز على العالم العربي، وتشمل الفترة من 2009 حتى مرحلة ما بعد دمج الإيثيريوم في 2022.

الدراسات السابقة

1. **الدراسات العالمية**

ركزت الأدبيات الأجنبية على الجوانب الاقتصادية والبيئية المرتبطة بالتعدين المشفر. فقد أشار **Hayes (2019)**إلى أن القيمة السوقية للبيتكوين تعتمد بشكل مباشر على تكاليف التعدين والهامش الربحي للمعدنين، مؤكدًا أن ديناميكية السعر ترتبط ارتباطًا وثيقًا بارتفاع تكاليف الطاقة. ومن زاوية أخرى، أوضح **Krause &Tolaymat (2018)**أن التعدين يولّد أعباءً كهربائية ضخمة قد تصل قيمتها أحيانًا إلى مستوى العملة نفسها، وهو ما يثير تساؤلات حول الجدوى الاقتصادية طويلة الأجل.

أما على الصعيد البيئي، فقد خلص تقرير **Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (2022)**إلى أن استهلاك البيتكوين من الكهرباء يتجاوز استهلاك دول متوسطة الحجم مثل الأرجنتين، فيما نبّه **Mora**

et al. (2018)إلى أن استمرار هذا النمط من التعدين يمكن أن يساهم في رفع درجات الحرارة العالمية بمعدل درجتين مئويتين خلال ثلاثة عقود.

التحليل النقدي: ركزت الدراسات الأجنبية بشكل أكبر على التكاليف المباشرة والأثر البيئي الكمي، لكنها لم تدمج بشكل متوازن بين التحليل الاقتصادي والاعتبارات البيئية في إطار استدامة شاملة.

2. الدراسات العربية

تناولت بعض الأدبيات العربية موضوع التعدين والعملات المشفرة في سياق الاقتصاد الرقمي بالمنطقة. فقد ناقش **الشمري(2021)** أثر وفرة الطاقة الرخيصة في دول الخليج العربي على ازدهار أنشطة التعدين، لكنه أشار في الوقت نفسه إلى غياب تشريعات واضحة تنظم هذا القطاع. كما بيّن **خالد(2020)** أن الاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة (مثل الطاقة الشمسية والرياح) يمكن أن يشكل فرصة حقيقية لتقليل البصمة الكربونية للتعدين في الدول العربية.

التحليل النقدي: ركزت الدراسات العربية على العوامل الاقتصادية والتنظيمية بشكل أكبر، لكنها بقيت في الغالب وصفية ولم تقدم نماذج كمية أو مقارنة شاملة بين الجوانب الاقتصادية والبيئية.

3. الدراسات العراقية

في السياق العراقي، تناولت الدراسات موضوع التعدين في ضوء تحديات البنية التحتية للطاقة. حيث أشار **السعدي (2022)**إلى أن العراق يفتقر إلى قاعدة طاقة مستقرة تجعل التعدين قطاعًا واعدًا، مؤكدًا أن تبني الطاقات المتجددة شرط أساسي لفتح آفاق الاستثمار في هذا المجال. كما أوضح أن الافتقار إلى الأطر التنظيمية والقانونية يضعف فرص دمج التعدين في الاقتصاد الوطني.

التحليل النقدي: ركزت الدراسات العراقية على مشكلة الطاقة كمعوق رئيس للتعدين، لكنها لم تدخل في تحليل متكامل للعوائد الاقتصادية مقابل التكاليف البيئية.

4. الفجوة البحثية

من خلال مراجعة الدراسات السابقة على المستويات الثلاثة (العالمية، العربية، العراقية)، يمكن ملاحظة ما يلي:

أ- معظم الدراسات العالمية ركزت على إما الجانب الاقتصادي (التكاليف والعوائد) أو الجانب البيئي (البصمة الكربونية) دون ربط متكامل بينهما.

ب- الأدبيات العربية بقيت محدودة الطابع، يغلب عليها الطرح الوصفي النظري، مع غياب التحليل الكمي أو الدراسات التطبيقية المقارنة.

ت- الأدبيات العراقية ما تزال في بدايتها، وتركز بالأساس على تحديات الطاقة والبنية التحتية دون تقديم إطار اقتصادي–بيئي متوازن.

بناءً على ذلك، تسعى هذه الدراسة إلى سد الفجوة من خلال **دمج التحليل الاقتصادي مع البعد البيئي،** عبر مقارنة آليات التعدينPoW) و (PoSوربطها بمفاهيم الاستدامة والسياسات العامة، بما يعزز من فهم التوازن بين **اللامركزية، الكفاءة، والاعتبارات البيئية** في الاقتصاد الرقمي.

المبحث الاول الإطار المفاهيمي والمنظور الاقتصادي

أولا: نحو تأصيل مفاهيم التعدين المشفر

يُعدّ **الاقتصاد الشبكي** بمفهومه الواسع – الذي يدمج بين **الاقتصاد الرقمي** القائم على الابتكار التقني و**الاقتصاد المعرفي** المعتمد على إنتاج المعرفة وتوظيفها – أحد أبرز ملامح التحول البنيوي في النظام الاقتصادي العالمي المعاصر. فقد أصبح تدفق المعلومات، والقدرة على معالجة البيانات، وتوظيف التكنولوجيا الحديثة عوامل رئيسة في تحقيق النمو الاقتصادي وتعزيز الكفاءة الإنتاجية.

وفي هذا الإطار، برزت **تكنولوجيا سلاسل الكتل (Blockchain)** بوصفها أحد أهم إنجازات الثورة الرقمية، إذ تمثل نظامًا موزعًا يقوم على مبدأ الشفافية وعدم القابلية للتلاعب في المعاملات الرقمية، مما أتاح نشوء منظومات مالية جديدة أبرزها **العملات المشفّرة** .هذه التكنولوجيا لم تعد تقتصر على الجانب المالي، بل امتدت تطبيقاتها إلى مجالات اقتصادية وإدارية وخدمية متقدمة، كالتجارة الإلكترونية، وسلاسل الإمداد، والطاقة المتجددة، والإدارة الحكومية الذكية.

وقد أظهرت **مضامين الأوراق العلمية الحديثة** اهتمامًا متزايدًا بدراسة الأبعاد الاقتصادية والبيئية لتكنولوجيا سلاسل الكتل، خصوصًا ما يتعلق بأنماط التعدين وآليات التوافق مثل **إثبات العمل (PoW)** و**إثبات الحصّة(PoS)** ، لما لهما من تأثير مباشر في استهلاك الطاقة، وتوزيع الموارد، وتحقيق الاستدامة ضمن منظومات الاقتصاد الشبكي.

إذ تمثل العملات المشفّرة منذ ظهور **البيتكوين عام 2009** تحولًا جوهريًا في بنية النظام المالي العالمي، إذ قدّمت نموذجًا بديلاً عن الأنظمة النقدية التقليدية يقوم على **اللامركزية، التشفير، وإزالة الوساطة** .(Nakamoto, 2008)هذا النموذج فتح الباب أمام ما يمكن تسميته بـ"اقتصاد الثقة الرقمية"، حيث يتم تأمين المعاملات والتحقق منها عبر بروتوكولات رياضية وشبكات موزعة بدلاً من المؤسسات المالية التقليدية.

ومع تطور البنية التقنية للعملات المشفرة، تجاوزت وظيفتها حدود كونها مجرد وسيلة تبادل أو مخزن للقيمة، لتصبح **أداة اقتصادية متعددة الاستخدامات** في بيئة الاقتصاد الشبكي. فقد باتت تشكل ركيزة أساسية لقطاعات حيوية مثل:

1. **التمويل اللامركزي:(DeFi)** الذي يتيح القروض، الادخار، والتداول دون الحاجة إلى البنوك.
2. **الأصول الرقمية المبتكرة:(NFTs)** التي خلقت أسواقًا جديدة للفن الرقمي والملكية الفكرية.
3. **التجارة الإلكترونية العابرة للحدود:**من خلال تخفيض تكاليف التحويلات المالية الدولية وتسريعها.
4. **إدارة سلاسل الإمداد:**حيث يوفر البلوكشين آلية تتبع دقيقة وشفافة للمنتجات من المصدر إلى المستهلك.

الأساس التكنولوجي لهذه العملات هو **تقنية البلوكشين**، والتي تُعد دفتر حسابات موزع (Distributed Ledger Technology – DLT)يسمح بتوثيق المعاملات بطريقة شفافة وغير قابلة للتلاعب (Tapscott & Tapscott, 2016).هذه الميزة جعلت البلوكشين**أداة اقتصادية استراتيجية**، إذ ساهمت في:

(أ) خفض التكاليف التشغيلية نتيجة الاستغناء عن الوسطاء.

(ب) تعزيز الثقة في التعاملات الرقمية من خلال الشفافية.

(ج) تحفيز الابتكار عبر فتح المجال لتطبيقات اقتصادية جديدة مثل العقود الذكية.(Smart Contracts)

علاوة على ذلك، تبنت مؤسسات دولية مثل **المنتدى الاقتصادي العالمي(WEF, 2020)** البلوكشين كأداة لدعم الاقتصاد الرقمي المستدام، معتبرة أن دوره لم يعد مقتصرًا على المعاملات المالية، بل أصبح محركًا للنمو الاقتصادي من خلال إعادة تشكيل العلاقات بين **رأس المال، البيانات، والطاقة**.

وبذلك، فإن العملات المشفرة والبلوكشين لم تعد مجرد ظاهرة تقنية، بل أضحت **بنية تحتية اقتصادية** تعيد صياغة أسس النظام المالي العالمي، وتطرح في الوقت نفسه تحديات جديدة تتعلق بالاستدامة، التنظيم، والتوازن بين اللامركزية والكفاءة.

ثانيا: التعدين المشفّر كآلية اقتصادية

يُعد **التعدين المشفّر** الركيزة الاقتصادية الأساسية التي يقوم عليها عمل شبكات البلوكشين، ولا سيما في الأنظمة القائمة على إثبات العمل .(PoW) فمن خلاله يتم تأمين الشبكة والتحقق من صحة المعاملات، مقابل الحصول على مكافآت مالية بالعملة الرقمية نفسها. وبذلك فإن التعدين لا يمثل مجرد نشاط تقني، بل يشكّل **آلية اقتصادية متعددة الأبعاد** تجمع بين الاستثمار في البنية التحتية، استهلاك الطاقة، وإدارة المخاطر.

على المستوى الاقتصادي، يرتبط التعدين بثلاثة محاور رئيسية:

1. **التكاليف المباشرة :**وتشمل استهلاك الطاقة الكهربائية بكميات ضخمة، إضافة إلى الاستثمارات الرأسمالية في الأجهزة المتخصصة مثل وحدات المعالجة الرسومية (GPUs) وأجهزة التعدين المخصّصة .(ASICs) وقد أشارت بيانات **جامعة كامبريدج (Cambridge, 2022)** إلى أن استهلاك شبكة البيتكوين وحدها يعادل استهلاك دول متوسطة الحجم للطاقة.

2. **العوائد:** وتتحدد بشكل أساسي وفق سعر العملة المشفرة في الأسواق، صعوبة التعدين,(Difficulty) وكفاءة الأجهزة المستخدمة. العوائد في البيتكوين غالبًا مرتفعة لكنها شديدة التقلب، بينما في الإيثيريوم) قبل الانتقال إلى (PoSكانت متوسطة نسبيًا، أما بعد التحول فقد ارتبطت بآلية الرهن.(Staking)

3. **الحوافز الاقتصادية:** يمثّل التعدين حافزًا جذابًا للأفراد والمؤسسات للاستثمار في الشبكة مقابل المكافآت، لكنه يثير في المقابل جدلاً واسعًا حول كفاءته البيئية وتكلفته الاجتماعية، حيث يشكّل عبئًا على استدامة الطاقة ويؤدي إلى تركّز الثروة الرقمية في أيدي كيانات قليلة.(Antonopoulos, 2017)

يتضح أن التكاليف والعوائد في التعدين ليست ثابتة، بل تختلف جذريًا تبعًا لآلية التحقق المستخدمة. ففي الوقت الذي يُعد فيه إثبات العمل (PoW) نموذجًا عالي التكاليف سواء من حيث الطاقة أو الأجهزة، جاء الانتقال إلى إثبات الحصة (PoS)في الإيثيريوم ليقدّم بديلاً أكثر كفاءة على المستوى البيئي، لكن بثمن يتمثل في إدخال تحديات مرتبطة بتركيز الثروة وتقليل درجة اللامركزية، ومن أجل فهم الفوارق بين النماذج الاقتصادية لآليات التعدين.

ثالثا: آليات التحقق الاقتصادي: المقارنة بين إثبات العمل (PoW) وإثبات الحصة(PoS)

تمثل آليات التحقق العمود الفقري للبنية الاقتصادية لشبكات البلوكشين، إذ تحدد ليس فقط **درجة الأمان واللامركزية**، بل أيضًا **الكفاءة في استهلاك الموارد ومدى توافق النظام مع معايير الاستدامة البيئية** .ويُعد نموذج **إثبات العمل (PoW)**الأقدم والأكثر انتشارًا، حيث يقوم على حل مسائل رياضية معقدة تتطلب استهلاكًا ضخمًا للطاقة، مما يمنح الشبكة مستوى عالٍ من الأمان لكنه يضعها أمام تحديات بيئية كبيرة مرتبطة بالانبعاثات الكربونية. بالمقابل، جاء نموذج **إثبات الحصة(PoS)** ليقدّم مقاربة مختلفة قائمة على **رهن العملة الرقمية نفسها(Staking)** كوسيلة لضمان أمان الشبكة، وهو ما ساهم في تقليل استهلاك الطاقة بشكل جذري وزيادة الكفاءة الاقتصادية، لكنه أثار مخاوف متزايدة حول **مخاطر تركّز الملكية وتهديد مبدأ اللامركزية**(Buterin, 2021؛ Digiconomist, 2022)، تبيّن الأدبيات الاقتصادية والبيئية أن الجدل العالمي حول استدامة العملات المشفّرة يتمحور أساسًا حول **المفاضلة بينPoWو.PoS**فبينما يوفرPoWمستوى من الأمان واللامركزية يصعب اختراقه، إلا أنه يدفع ثمنًا باهظًا على صعيد استهلاك الطاقة والانبعاثات الكربونية. في المقابل، يُقدَّمPoSكخيار أكثر انسجامًا مع متطلبات **الاقتصاد الأخضر والتنمية المستدامة**، لكنه يثير تساؤلات جدّية بشأن تركّز السلطة الاقتصادية في أيدي قلة من المستثمرين ،ومن أجل توضيح الفوارق الاقتصادية والبيئية بين هذين النموذجين.

رابعا: الاقتصاد الشبكي وقيمة العملات المشفّرة: قراءة في نظرية اقتصاديات الشبكات

ترتكز **نظرية اقتصاديات الشبكات** (Network Economics)على فرضية أساسية مفادها أن **قيمة أي شبكة تتضاعف مع نمو عدد مستخدميها**، وهو ما يُعرف بقانون ميتكالف .(Metcalfe's Law) وفقًا لهذا القانون، فإن القيمة الاقتصادية للشبكة لا تُقاس بعدد المستخدمين فقط، بل بمقدار الروابط والتفاعلات الممكنة بينهم، أي أن القيمة تزداد بصورة هندسية كلما توسّعت قاعدة المشاركين.(Shapiro & Varian, 1999)

في السياق الرقمي، تُجسد العملات المشفّرة التطبيق العملي الأبرز لهذه النظرية، حيث إن **زيادة عدد المعدّنين والمستثمرين والمستخدمين** لا تؤدي فقط إلى رفع القيمة السوقية للعملة، بل أيضًا إلى **تعزيز أمان الشبكة ومتانتها ضد الهجمات** .فكل مستخدم جديد يمثل عقدة إضافية (Node) تزيد من صعوبة الاختراق، وتخلق طلبًا إضافيًا يرفع من قيمة العملة نفسها.

في حالة **البيتكوين**، انعكس هذا الأمر بوضوح؛ فكلما ازداد عدد المعدّنين وتوسّع استخدامه كوسيلة للدفع أو الادخار، ارتفعت قيمته السوقية وتعززت قوة أمانه عبر صعوبة الهجمات على الشبكة. أما **الإيثيريوم** فقد قدّم نموذجًا متطورًا للاقتصاد الشبكي، إذ لم يقتصر على التداول كعملة رقمية، بل وظّف تقنيات **العقود الذكية Smart) Contracts)**والتطبيقات المالية اللامركزية **(DeFi)**، مما جعله شبكة متعددة الاستخدامات تجذب مطورين ومؤسسات ومستثمرين. هذه البنية خلقت ما يُعرف بـ **التأثيرات الشبكية المتعددة الطبقات**(Multi-layered Network Effects)،

حيث تتعزز قيمة الإيثيريوم ليس فقط بزيادة عدد المستخدمين المباشرين، بل أيضًا بتوسع المنظومة المرتبطة به مثل منصات التمويل اللامركزي وتداول الأصول غير القابلة للاستبدال.(NFTs)

من هنا، يمكن القول: إن **اقتصاديات الشبكات** توفّر عدسة تحليلية مهمة لفهم صعود العملات المشفّرة، إذ إن نجاحها لا يتوقف على التكنولوجيا وحدها، بل على **قدرتها على خلق منظومة بيئية(Ecosystem)** تولّد قيمة متزايدة مع كل مستخدم جديد. ومن ثم، فإن البيتكوين يمثل **نموذج القيمة الأحادية** المعتمدة على عدد المعدّنين والمتعاملين، في حين يجسد الإيثيريوم **نموذج القيمة المتعددة** عبر دمج التقنيات والابتكارات الرقمية في شبكة واحدة.

خامسا: التحول الرقمي والاستدامة الاقتصادية والبيئية: قراءة في ديناميكيات الاقتصاد الشبكي

يمثل **التحول الرقمي** أحد المحركات الأساسية لإعادة تشكيل الاقتصاد العالمي في القرن الحادي والعشرين، إذ لم يعد يقتصر على تحسين الكفاءة أو تسريع المعاملات، بل أصبح إطارًا بنيويًا لإنتاج القيمة الاقتصادية وإعادة توزيعها عبر **الشبكات الرقمية** .(UN, 2015)غير أن هذا التحول، على الرغم من فرصه الواسعة للنمو والابتكار، يفرض **معادلة معقدة** بين المكاسب الاقتصادية والتكاليف البيئية.

على مستوى العملات المشفّرة، أظهر نموذج **إثبات العمل – (PoW)** كما في حالة البيتكوين – قدرة فائقة على تأمين الشبكة وضمان اللامركزية، لكنه يرتبط باستهلاك ضخم للطاقة وانبعاثات كربونية تعادل انبعاثات دول متوسطة الحجم. وهذا يجعل الابتكار الرقمي محمّلًا بتكلفة بيئية تهدد أهداف التنمية المستدامة، خصوصًا تلك المتعلقة بالعمل المناخي (SDG 13)وكفاءة الطاقة.(SDG 7)

في المقابل، يمثل الانتقال إلى **إثبات الحصة – (PoS)** كما في حالة الإيثيريوم بعد الدمج – تحوّلًا جذريًا في العلاقة بين التكنولوجيا والاستدامة. فاعتماد هذا النموذج أدى إلى خفض استهلاك الطاقة بنسبة تزيد على 99% مقارنة بـ PoW (Ethereum Foundation, 2022)، مما يعزز التوافق بين **النمو الاقتصادي الرقمي** ومتطلبات **الحفاظ على البيئة**.

لكن العلاقة بين التحول الرقمي والاستدامة ليست علاقة خطية أو تلقائية؛ فهي **علاقة مشروطة** بعوامل متعددة:

1. **التكنولوجيا المستخدمة** :حيث تختلف الأثر البيئي بحسب آلية التوافق.(Consensus Mechanism)
2. **السياسات البيئية:** إن غياب التنظيم البيئي قد يحول التحول الرقمي إلى عبء بيئي بدلًا من فرصة للتنمية المستدامة.
3. **قدرة الدول على استثمار مواردها:**ولا سيما الطاقة المتجددة كالطاقة الشمسية والرياح، التي تمثل فرصة استراتيجية للدول العربية والعراق على وجه الخصوص للاستفادة من مواردها الطبيعية وتوجيهها نحو التعدين الأخضر.

وبذلك يمكن القول: إن **الاقتصاد الشبكي المستدام** لن يتحقق إلا إذا ترافقت التحولات الرقمية مع **إصلاحات مؤسسية** وسياسات بيئية صارمة، إلى جانب **استثمارات استراتيجية** في الطاقة النظيفة والبنية التحتية الذكية. وهنا تبرز أهمية دمج مؤشرات الاستدامة ضمن معايير تقييم جدوى الشبكات الرقمية، بحيث لا يُقاس النجاح فقط بالنمو المالي، بل أيضًا بمدى توافقه مع أهداف الاستدامة العالمية.

المبحث الثاني

التحليل المقارن لاقتصاديات البيتكوينوالإيثيريوم: البنية، المزايا، التحديات

أولا:البيتكوين وإثبات العمل :(PoW) جدوى اقتصادية مقابل عبء بيئي متصاعد

تُعدّ عملة **البيتكوين** النموذج الأبرز لتطبيق خوارزمية **إثبات العمل(Proof of Work – PoW)** ، إذ تعتمد على قوة التعدين الهائلة لتأمين الشبكة والتحقق من المعاملات. هذا الأساس التكنولوجي منح البيتكوين مكانتها كأكثر العملات المشفرة أمانًا ولامركزية من حيث التوزيع الجغرافي للمعدّنين. غير أن هذا النموذج يطرح إشكالية اقتصادية وبيئية مزدوجة:

1. **الجدوى الاقتصادية :**يشير عدد من الدراسات(Hayes, 2019) ؛ (Antonopoulos, 2017 إلى أن استمرار جذب المستثمرين للبيتكوين يرتبط بقوة شبكة التعدين وقدرتها على الصمود أمام الهجمات، وهو ما يعزز ثقة الأسواق. كما أن ارتفاع السعر في بعض الفترات كان مدفوعًا بتزايد الإقبال على التعدين والندرة النسبية للعملة.

2. **العبء البيئي:**وفقًا لتقرير **Cambridge Bitcoin Electricity Index (2023)**، بلغ استهلاك شبكة البيتكوين من الطاقة مستوى يعادل استهلاك دول متوسطة الحجم مثل هولندا أو الأرجنتين. وهذه المفارقة تضع علامات استفهام حول استدامة هذا النموذج، خاصة في ظل التوجه العالمي نحو خفض الانبعاثات الكربونية وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

انطلاقًا من ذلك، يصبح من الضروري مقارنة تطور استهلاك الطاقة وأسعار البيتكوين وحجم المعاملات، لإبراز التناقض بين **النمو الاقتصادي الظاهري** و**الأثر البيئي السلبي**.

جدول (1) تطور استهلاك الطاقة في شبكة البيتكوين(2015–2023)

السنة	استهلاك الطاقة (تيراواط/ساعة)	متوسط سعر البيتكوين (دولار)	عدد المعاملات اليومية (ألف)
2015	**7**	**272**	**115**
2017	**30**	**4,001**	**335**
2019	**73**	**7,385**	**325**
2021	**143**	**45,850**	**335**
2023	**115**	**28,500**	**305**

Source: Cambridge Bitcoin Electricity Index (2023)،CoinMarketCap (2023).

يبين الجدول أن استهلاك الطاقة في شبكة البيتكوين ارتفع بشكل كبير من **7تيراواط/ساعة عام 2015** إلى ذروته عند **143تيراواط/ساعة عام 2021**، أي بزيادة تفوق **16ضعفًا** خلال ست سنوات. غير أن عدد المعاملات اليومية بقي شبه

ثابت في حدود **335–300ألف معاملة**، ما يعكس **اختلال الكفاءة البيئية والاقتصادية** للشبكة: استهلاك أكبر للطاقة لا يقابله توسع فعلي في الاستخدام.

أما من الناحية الاقتصادية، فإن متوسط السعر شهد تقلبات حادة، حيث ارتفع إلى مستويات قياسية عام 2021 ثم انخفض في 2023، ما يؤكد أن اعتماد البيتكوين على التعدين وحده لا يكفل استقرار قيمته السوقية، بل يجعله عرضة للتقلبات المرتبطة بالعرض والطلب والمضاربات.

إذن، يمكن القول إن نموذج البيتكوين (PoW) يمثل معضلة مزدوجة :**أمان مرتفع وقيمة اقتصادية معتبرة، مقابل عبء بيئي متزايد وكفاءة تشغيلية محدودة**، وهو ما يطرح تساؤلات جدية حول استدامته على المدى الطويل.

ثانيا:الإيثيريوم والتحول إلى إثبات الحصة :(PoS) مكاسب الاستدامة الاقتصادية والبيئية مقابل مخاطر التركّز

منذ انطلاقه عام 2015، تبنّى **الإيثيريوم** نفس آلية البيتكوين القائمة على **إثبات العمل(PoW)** ، وهو ما جعل الشبكة تستهلك كميات ضخمة من الطاقة مع توسعها السريع في العقود الذكية وتطبيقات التمويل اللامركزي .(DeFi) غير أن النقاشات العالمية حول البصمة الكربونية دفعت مطوري الإيثيريوم إلى إحداث تحول جذري، حيث جرى في **سبتمبر 2022** تنفيذ عملية **الدمج(The Merge)** ، والتي تم بموجبها الانتقال إلى **إثبات الحصة(PoS)** كآلية رئيسية للتوافق.

يوضّح الجدول التالي مقارنة بين البيتكوينوالإيثيريوم قبل وبعد الانتقال من إثبات العمل إلى إثبات الحصة.

جدول (2) التكاليف والعوائد الاقتصادية للتعدين المشفّر عبر آلياتPoWوPoS

العنصر	بيتكوين(PoW)	إيثيريوم) قبل(PoS	إيثيريوم) بعد(PoS
استهلاك الطاقة	مرتفع جدًا (يعادل دول متوسطة)	مرتفع لكن أقل من بيتكوين	منخفض للغاية (انخفاض ~99%)
تكاليف الأجهزة	ASICsباهظة الثمن	GPUsمتوسطة إلى مرتفعة	لا حاجة لأجهزة مكثفة
العوائد	مرتفعة نسبيًا مع تقلبات السعر	متوسطة مع تقلبات	تعتمد على الرهن (Staking)
المخاطر	تقلب الأسعار + تكاليف الطاقة	مخاطر المركزية الجزئية للتعدين	مخاطر تركّز الحصص الكبيرة

Source:Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (2022) ،Ethereum Foundation (2022).

من خلال المقارنة يظهر أن الاختيار بينPoWوPoSليس مسألة تقنية فحسب، بل قرار اقتصادي–بيئي معقد. إذ يعكسPoW**قوة اقتصادية قائمة على الإنفاق المكثف للطاقة والموارد**، مما يمنح الشبكة أمانًا عاليًا لكنه يثقل كاهلها بتكاليف بيئية جسيمة. أماPoSفقد حقق **قفزة نوعية في كفاءة الاستدامة** من خلال خفض استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى

99%، إلا أنه أدخل إشكاليات جديدة مرتبطة بزيادة مخاطر المركزية واحتكار العوائد من قبل كبار المستثمرين. ومن ثمّ، فإن تقييم فعالية آلية التعدين ينبغي أن يأخذ في الاعتبار ليس فقط المكاسب المالية الآنية، بل أيضًا **التوازن بين الأمن الاقتصادي، كفاءة استخدام الموارد، ومتطلبات الاستدامة العالمية.**

يبيّن الجدول (3) المقارنة المباشرة بينPoWوPoSوفق مجموعة من المعايير الجوهرية.

جدول (2) مقارنة اقتصادية وبيئية بين إثبات العمل وإثبات الحصة

المعيار	إثبات العمل(PoW)	إثبات الحصة(PoS)
الأمان	**مرتفع جدًا بفضل قوة التعدين وصعوبة الهجمات**	**مرتفع لكنه قد يتأثر بتركز الحصص الكبيرة**
اللامركزية	**عالية نسبيًا مع انتشار المعدنين عالميًا**	**مهددة بتركّز الملكية لدى كبار المستثمرين**
استهلاك الطاقة	**ضخم جدًا (يعادل استهلاك دول متوسطة)**	**منخفض للغاية (انخفاض يفوق 99%)**
الانبعاثات الكربونية	**مرتفعة، مساهمة واضحة في الاحتباس الحراري**	**محدودة نسبيًا بفضل انخفاض استهلاك الطاقة**
الكفاءة الاقتصادية	**مكلفة بسبب الطاقة والأجهزة**	**أكثر كفاءة وذات عوائد متوقعة عبر الرهن**

Source: Buterin (2021)؛Digiconomist (2022).

يتضح من المقارنة أنPoSيمثّل تحولًا نوعيًا في **اقتصاديات البلوكشين،** حيث نجح في خفض استهلاك الطاقة والانبعاثات إلى مستويات شبه معدومة، وهو ما يجعله أكثر توافقًا مع السياسات العالمية للحد من التغير المناخي. ومع ذلك، فإن هذا النموذج لا يخلو من التحديات، إذ يفتح الباب أمام **مخاطر احتكار الشبكة** إذا ما تراكمت الحصص الكبرى في أيدي مؤسسات أو أفراد معدودين. وهذا يعيد صياغة النقاش الاقتصادي نحو ضرورة **إيجاد توازن بين الأمان، اللامركزية، والاستدامة،** وربما الحاجة إلى أطر تنظيمية دولية تضمن منع الاحتكار وحماية مبدأ المشاركة المفتوحة. ومن ثمّ، يمكن القول: إن التحول منPoWإلىPoSلا يمثل مجرد تغيير تقني، بل يعكس **إعادة هيكلة اقتصادية–بيئية** لمستقبل الاقتصاد الشبكي العالمي.

هذا التحول لم يكن مجرد قرار تقني، بل مثل **خطوة استراتيجية في اقتصاديات الشبكات الرقمية،** إذ أدى إلى:

1. **خفض استهلاك الطاقة بنسبة تقارب 99.9%،** وهو ما جعله أكثر توافقًا مع أهداف الاستدامة العالمية (Ethereum Foundation, 2022).
2. تعزيز **الكفاءة الاقتصادية** من خلال تقليل التكاليف التشغيلية للمعدنين السابقين، وتحويل آلية المشاركة إلى نظام الرهن (Staking).
3. دعم نمو التطبيقات اللامركزية **(DApps)**والعقود الذكية، مما عزز القيمة الاقتصادية للشبكة حتى مع تقلبات الأسعار.

ولفهم هذه النقلة النوعية، يمكن النظر إلى تطور **استهلاك الطاقة، متوسط السعر، وحجم العقود الذكية** في شبكة الإيثيريوم قبل وبعد الانتقال إلى:PoS

جدول (4) تطور استهلاك الطاقة وسعر الإيثيريوم وحجم العقود الذكية قبل وبعد الانتقال إلىPoS

السنة	استهلاك الطاقة (تيراواط/ساعة)	متوسط سعر الإيثيريوم (دولار)	حجم العقود الذكية (مليون)
2018	**21**	**754**	**6.2**
2020	**32**	**540**	**9.8**
2021	**48**	**3,764**	**12.5**
2022*	**84 (قبل التحول)**	**1,800**	**13.1**
2023	**0.02 (بعدPoS)**	**1,600**	**15.7**

*سبتمبر 2022: تاريخ دمج الإيثيريوم.(The Merge)

Source: Ethereum Foundation (2023)،Digiconomist (2023) ،CoinDesk (2023).

يبين الجدول أن استهلاك الطاقة ارتفع تدريجيًا بين 2018 و2022 ليصل إلى **84تيراواط/ساعة**، وهو مستوى يوازي استهلاك دول صغيرة، قبل أن ينخفض بشكل غير مسبوق بعد الدمج إلى **0.02تيراواط/ساعة فقط**، ما يمثل قفزة نوعية في مجال **الكفاءة البيئية**.

اقتصاديًا، وعلى الرغم من تراجع السعر بعد ذروة 2021، فإن **حجم العقود الذكية** واصل النمو ليبلغ **15.7مليون عقد عام 2023**، ما يعكس متانة البنية الاقتصادية للإيثيريوم بوصفه أكثر من مجرد عملة، بل منصة لتطبيقات الاقتصاد الشبكي.

لكن في المقابل، يثير نموذجPoS**مخاطر محتملة تتعلق بالمركزية**، إذ إن كبار حاملي الإيثر (ETH) يمتلكون قدرة أكبر على المشاركة في التحقق من المعاملات، مما قد يحدّ من اللامركزية التي ميّزت العملات المشفرة تاريخيًا.

بذلك، يمكن القول: إن الانتقال إلىPoSمنح الإيثيريوم**ميزة تنافسية في الاستدامة البيئية والاقتصادية**، لكنه أدخل في الوقت نفسه تحديًا استراتيجيًا يتعلق بمدى قدرة الشبكة على الحفاظ على **توازنها بين الكفاءة واللامركزية**.

ثالثا: المقارنة التحليلية بينPoWو :PoSالأمان مقابل الاستدامة، اللامركزية مقابل الكفاءة

يُعدّ التحول من خوارزمية **إثبات العمل(Proof of Work - PoW)** إلى **إثبات الحصة - Proof of Stake) (PoS**أحد أهم التطورات في مسار شبكات البلوكشين، لما يحمله من انعكاسات اقتصادية وبيئية وهيكلية على طبيعة هذه الشبكات. تعتمدPoW، كما في حالة **البيتكوين**، على عمليات التعدين كثيفة الاستهلاك للطاقة لتأمين المعاملات والتحقق

منها، وهو ما يوفر مستوى عالٍ من **الأمان واللامركزية**، لكنه يتسبب في تكاليف بيئية واقتصادية كبيرة (Cambridge, 2023).

في المقابل، تقومPoS، كما هو الحال في **شبكة الإيثيريوم بعد تحديث "الدمج(The Merge) "**، على آلية تعتمد على رهن العملات الرقمية لتأكيد الكتل، مما يؤدي إلى خفض استهلاك الطاقة بنسبة تفوق 99% وتحقيق كفاءة تشغيلية أعلى (Ethereum Foundation, 2023).غير أن هذا النظام يثير مخاوف من **مركزية السلطة** نتيجة امتلاك عدد محدود من المشاركين حصصًا كبيرة قد تمكنهم من التأثير في آلية الإجماع.

وعليه، تهدف المقارنة التحليلية التالية إلى توضيح الفوارق الجوهرية بين النظامين من حيث **استهلاك الطاقة، الأمان، الكفاءة الاقتصادية، اللامركزية، والاستدامة البيئية**، كما يبيّن **الجدول(5)** ، لتسليط الضوء على التحدي المزدوج الذي تواجهه شبكات البلوكشين في الموازنة بين **الأمان مقابل الاستدامة**، و**اللامركزية مقابل الكفاءة**.

جدول (5): مقارنة بين خوارزميةPoW(البيتكوين) و) PoSالإيثيريوم(

المؤشر	إثبات العمل – (PoW) بيتكوين	إثبات الحصة – (PoS) إيثيريوم
استهلاك الطاقة	مرتفع جدًا (~115 تيراواط/ساعة)	منخفض جدًا (0.02 تيراواط/ساعة)
الأمان	مرتفع بفضل قوة التعدين	مرتفع لكن عرضة لمخاطر المركزية
الكفاءة الاقتصادية	منخفضة	مرتفعة بفضل خفض التكاليف
اللامركزية	واسعة بفضل التعدين المفتوح	مهددة بسيطرة الحيتان الكبرى
الاستدامة البيئية	ضعيفة	قوية

المصدر:تحليل الباحث استنادًا إلى بيانات(2023) ، Cambridge Ethereum Foundation (2023). تظهر المقارنة أنPoWيمنح **أمانًا مطلقًا لكن بتكلفة بيئية ضخمة**، في حين يقدمPoS**استدامة بيئية واقتصادية** لكن مع مخاطر تركّز السلطة بيد قلة من المستثمرين. هذا يضع صانعي القرار أمام معضلة المفاضلة بين **الأمان مقابل الاستدامة**.

رابعا: انعكاسات هذه المقارنة على ثقة المستثمرين والأسواق المالية الرقمية

تشير الدراسات إلى أن المستثمرين يزدادون ميلاً إلى العملات ذات **التوجه البيئي المستدام**، خاصة بعد صعود التمويل الأخضر .(Green Finance) فبحسب WEF (2023)، فإن صناديق استثمارية كبرى بدأت تضع معايير **ESG**عند الاستثمار في الأصول الرقمية، وهو ما يجعل الإيثيريوم بعد التحول إلىPoSأكثر جاذبية للمؤسسات المالية.

جدول (6) تطور القيمة السوقية لبيتكوينوإيثيريوم(2017–2023)

السنة	القيمة السوقية للبيتكوين (مليار	القيمة السوقية للإيثيريوم (مليار	نسبة هيمنة البيتكوين

(%)	($	($	
72	**84**	**235**	**2017**
86	**14**	**134**	**2019**
67	**403**	**880**	**2021**
68	**147**	**317**	**2022**
70	**220**	**520**	**2023**

Source: CoinMarketCap (2023).

يبين الجدول أن البيتكوين ما يزال يحتفظ بالهيمنة السوقية، لكن **الإيثيريوم يحقق نموًا نسبيًا مستمرًا** ويقترب تدريجيًا من تعزيز مكانته كأداة استثمارية مؤسسية، خصوصًا بعد التحول إلى.PoS

المبحث الثالث

السياسات المستقبلية لتحقيق الاستدامة في نظم التعدين الرقمي

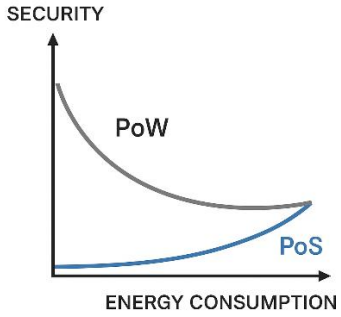
اولا: التحول من اقتصاد الطاقة إلى اقتصاد رأس المال: المقاربة النظرية والتطبيقية لآليات الإجماع في شبكات البلوكشين

بناء على ما تم تناوله فأن نموذج **إثبات العمل(PoW)** ، كما هو الحال في شبكة **البيتكوين،** يتسم بارتفاع ملحوظ في **تكاليف التعدين واستهلاك الطاقة** مقارنة بعدد المعاملات المنجزة فعليًا، ما يجعل كفاءته التشغيلية محدودة رغم متانته الأمنية. هذا الاتجاه يتطابق مع بيانات **مؤشر كامبريدج لاستهلاك كهرباء البيتكوين Cambridge Bitcoin)** **Electricity Consumption Index, 2023)**، الذي يقدّر أن الشبكة تستهلك ما يعادل استهلاك دول متوسطة الحجم من الطاقة سنويًا.

في المقابل، أثبتت تجربة **الإيثيريوم** بعد الانتقال إلى **خوارزمية إثبات الحصة(PoS)** أن التحول البنيوي في آليات الإجماع يمكن أن يخفض استهلاك الطاقة بنسبة تتجاوز (Ethereum Foundation, 2022) **99%**، وهو ما يدعم الاتجاه النظري الذي طرحه **Narayanan et al. (2016)**حول إمكانية تحقيق التوازن بين الأمن والكفاءة عبر تحسين خوارزميات الإجماع.

من المنظور الاقتصادي، يمكن القول إن **PoSيمثل تحوّلًا من اقتصاد الطاقة إلى اقتصاد رأس المال،** حيث تصبح الثقة في النظام مستمدة من "الملكية الرقمية" بدلاً من "القدرة الحاسوبية"، مما يفتح الباب أمام **نماذج استثمارية جديدة** في أسواق الأصول الرقمية.

الشكل:(1) العلاقة بين مستوى الأمان واستهلاك الطاقة في خوارزمياتPoWوPoS



المصدر: عداد الباحث استنادًا إلى بيانات Cambridge (2023) وEthereum Foundation (2022)

الشكل يوضح العلاقة بين **مستوى الأمان واستهلاك الطاقة** في نظامي **إثبات العمل(PoW)** و**إثبات الحصة(PoS)** ، وهو بالضبط ما تمت مناقشته في تلك الفقرة عند تحليل الفروق التجريبية بين النظامين ودعمها بالبيانات من Cambridge (2023)وEthereum Foundation (2022).

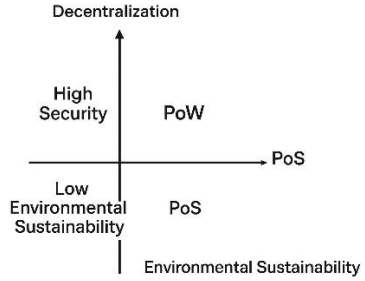
ثانيا: تحليل الاقتصاد البيئي للحوكمة الرقمية: التوازن بين الأمان واللامركزية مقابل كفاءة الطاقة في نماذج التعدين

تُبرز الأدلة الميدانية والتحليلية أن **نظامPoW**لا يزال الأكثر صلابة من حيث **الأمان واللامركزية**، إذ إن تكلفة مهاجمة الشبكة تتطلب قدرًا هائلًا من الطاقة والموارد الحاسوبية، ما يجعل احتمالية الاختراق شبه معدومة (Antonopoulos, 2017).ومع ذلك، فإن هذه القوة تأتي على حساب البيئة، إذ تشير تقديرات **Digiconomist (2022)**إلى أن انبعاثات البيتكوين الكربونية تعادل انبعاثات دول صغيرة مثل الأردن أو النرويج.

أما **نظامPoS**، فعلى الرغم من أنه يوفر كفاءة بيئية عالية وتكاليف تشغيل منخفضة، فإنه **يُثير جدلاً اقتصادياً وهيكلياً** حول مخاطر تمركز السيطرة في أيدي كبار المستثمرين الذين يمتلكون حصصًا ضخمة من العملات، ما يهدد مبدأ اللامركزية.(WEF, 2023)

من زاوية اقتصادية، يمكن تحليل المفاضلة بين النموذجين ضمن **منحنى الكفاءة الهامشية للأمان** :فكل زيادة في الأمان عبرPoWتأتي بتكلفة بيئية متزايدة، بينما كل زيادة في الكفاءة عبرPoSقد تقلل من توزيع السلطة الاقتصادية داخل الشبكة.

الشكل(2) المقارنة التحليلية بين خوارزميتيPoWوPoSمن حيث الأمان، اللامركزية، والاستدامة البيئية



المصدر: إعداد الباحث استنادًا إلى تحليل الأدبيات.(Antonopoulos, 2017; WEF, 2023)

المخطط الرباعي (4 Quadrants) يوضح **العلاقة التبادلية بين الأمان، اللامركزية، والاستدامة البيئية** في خوارزميتي **PoW**و**PoS**، وهو بالضبط ما تمت مناقشته في هذه الفقرة عند تحليل المفاضلة بين قوة الأمان فيPoWوكفاءته المنخفضة بيئيًا، مقابل استدامةPoSومخاطر مركزيته.

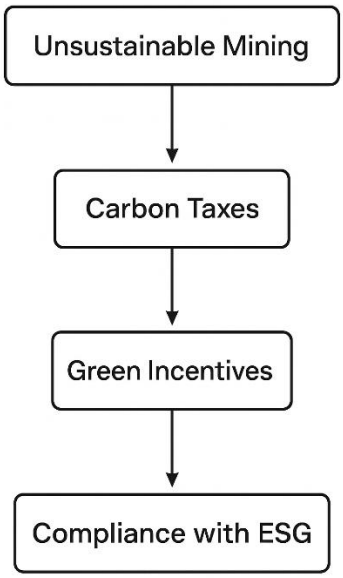
ثالثا: التداعيات الاقتصادية والبيئية للبلوكتشين على السياسات العامة: نحو أطر تنظيمية مستدامة وحوكمة رقمية فعّالة

تُشير الأدبيات إلى أن استمرار التعدين القائم على مصادر الطاقة الأحفورية أصبح يشكل تهديدًا مباشرًا لأهداف التنمية المستدامة .(Stoll et al., 2019) ومن هذا المنطلق، تبرز أهمية **التدخل السياسي والتنظيمي** لتوجيه الابتكار التقني نحو مسارات مستدامة، وذلك من خلال:

1. **فرض ضرائب كربونية** على عمليات التعدين ذات البصمة الكربونية العالية.
2. **تحفيز الاستثمار في التعدين الأخضر** باستخدام الطاقة الشمسية والرياح.
3. **تبنّي معايير دولية للحوكمة البيئية والاجتماعية(ESG)** لضمان التوافق بين الأنشطة الرقمية والسياسات المناخية.

وقد بدأ الاتحاد الأوروبي بالفعل في صياغة أطر تنظيمية تضمن توافق العملات المشفرة مع معايير الاستدامة والشفافية .(European Parliament, 2022)هذه الإجراءات تمثل انتقالاً من **اقتصاد اللامركزية غير المنظم إلى اقتصاد بلوكشين خاضع لمعايير المسؤولية البيئية والاجتماعية**، وهو تحول يُعيد تعريف مفهوم "القيمة" في الأسواق الرقمية.

الشكل:(3) تسلسل السياسات المقترحة للانتقال من التعدين غير المستدام إلى الامتثال لمعاييرESG



المصدر: إعداد الباحث استنادًا إلى تحليل Stoll et al. (2019) و.European Parliament (2022)

المخطط الانسيابي (Flowchart) يعرض **التسلسل المنطقي لتدخل السياسات العامة** الذي تناولته الفقرة، بدءًا من مشكلة **التعدين غير المستدام**، مرورًا بـ **الضرائب الكربونية** و**الحوافز الخضراء**، وصولًا إلى **الامتثال لمعايير ESG** (البيئية والاجتماعية والحوكمة).

رابعا: الاقتصاد الشبكي العالمي ومستقبل الأصول الرقمية: دمج الابتكار التكنولوجي مع الاستدامة الاقتصادية والبيئية

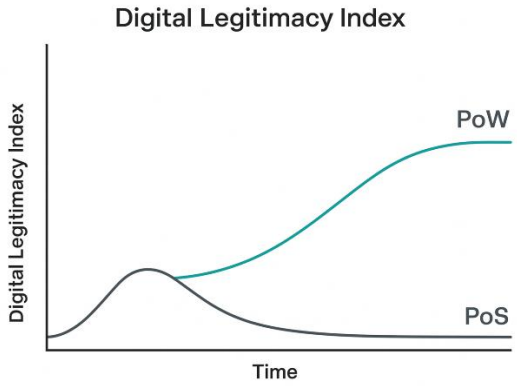
لم يعد الابتكار التكنولوجي وحده كافيًا لضمان شرعية العملات المشفرة في الاقتصاد العالمي؛ إذ أصبحت **الاستدامة البيئية والحوكمة الرشيدة** معيارين رئيسيين لتحديد مدى قبول هذه العملات في الأسواق والمؤسسات المالية (Tapscott & Tapscott, 2018). تجربة "الدمج (The Merge)" في الإيثيريوم تمثل نموذجًا لهذا التحول، حيث بات يُنظر إلى PoS ليس فقط كابتكار تقني، بل كـ **آلية اقتصادية لإعادة توزيع الموارد وتقليل الأثر البيئي**.

إن الاقتصاد الشبكي يسير نحو **ازدواج وظيفي** واضح:

- **البيتكوين** يُرسخ مكانته كـ "ذهب رقمي" ذي ندرة وقيمة تحوطية.
- **الإيثيريوم** يُمثل نموذجًا للمنصات الذكية الأكثر توافقًا مع مبادئ الاقتصاد الأخضر.

وبذلك، تتحول "الشرعية الرقمية" من كونها مستندة إلى القوة الحسابية، إلى **شرعية قائمة على الامتثال البيئي والمجتمعي**، وهو تحول يعيد رسم خريطة الاستثمار في الأصول الرقمية.

الشكل (4): تطور مؤشر الشرعية الرقمية وفق آليتي إثبات العمل (PoW) وإثبات الحصة(PoS)



المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على البيانات النظرية من الدراسات المقارنة بين آليتي إثبات العمل وإثبات الحصة (مثل Buterin, 2022؛ Nakamoto, 2008؛ Ethereum Foundation Reports, 2023).

يُوضح الشكل التطور الزمني لمؤشر الشرعية الرقمية بين نظامي إثبات العمل (PoW) وإثبات الحصة (PoS). يُلاحظ أن مؤشر الشرعية الرقمية في نموذج PoW يتسم بالتقلب نتيجة ارتفاع استهلاك الطاقة ومحدودية الكفاءة البيئية، بينما يُظهر نموذج PoS مسارًا تصاعديًا مستقرًا بمرور الزمن، مما يعكس زيادة في الاستدامة البيئية والقبول المؤسسي. يشير ذلك إلى أن التحول نحو إثبات الحصة يعزز الثقة بالنظم الرقمية ويُكسبها شرعية أكبر على المدى الطويل.

خامسا: آفاق الاقتصاد الشبكي في العالم العربي: استدامة الطاقة المتجددة وتعزيز الكفاءة الاقتصادية الرقمية

يمتلك العالم العربي **إمكانات هائلة لتطوير اقتصاد بلوكشين مستدام** بفضل وفرة مصادر الطاقة المتجددة مثل الشمس والرياح، ولا سيما في **السعودية، الإمارات، العراق، والمغرب** .(IRENA, 2022)هذه المزايا يمكن أن تؤسس لبنية **مراكز بيانات رقمية منخفضة التكلفة البيئية**، تسهم في تنويع الاقتصاد وخلق فرص استثمار جديدة في القطاع الرقمي الأخضر.

ومع ذلك، تواجه المنطقة تحديات حقيقية تتمثل في **ضعف البنية التحتية الرقمية، غياب التشريعات الموحدة، ومخاطر الاستخدامات غير المنظمة** مثل المضاربة وغسل الأموال.(Al-Omoush, 2021)
ولذلك، فإن صياغة **إطار تنظيمي عربي مشترك** يربط بين **الرقمنة، الطاقة، والسياسة المالية** تمثل أولوية لضمان التحول نحو اقتصاد شبكي مستدام وفعّال.

من الناحية الاقتصادية، يمكن أن يشكل "التعدين الأخضر العربي "**ميزة نسبية تنافسية** في الاقتصاد الرقمي العالمي، خاصة إذا ما تم توظيف عوائد الطاقة المتجددة لتقليل تكلفة الإنتاج الرقمي وتعزيز الأمن الطاقي في الوقت ذاته.

اولا: الاستنتاجات

1. يمثل البيتكوين أقوى نموذج للامركزية والأمان الرقمي، إلا أن اعتماده على آلية إثبات العمل يؤدي إلى تكاليف بيئية مرتفعة ويقلل من استدامته على المدى الطويل.
2. يقدم الإيثيريوم بعد التحول إلى آلية إثبات الحصة نموذجًا أكثر توافقًا مع معايير الاستدامة البيئية والاقتصادية، لكنه يثير نقاشات حول مخاطر تمركز السلطة وتقليل اللامركزية.
3. يشهد الاقتصاد الشبكي العالمي تحولًا نحو جعل الاستدامة البيئية والحوكمة الرشيدة معيارًا رئيسيًا لتقييم شرعية وقبول العملات المشفرة في الأسواق والمؤسسات المالية.
4. سيُحسم مستقبل العملات الرقمية بقدرة الشبكات على التكيف مع معايير البيئة والحوكمة، وليس فقط بقدرتها التقنية أو قوتها الحسابية.
5. يمتلك العالم العربي فرصًا استراتيجية في تطوير التعدين الأخضر والاستفادة من وفرة مصادر الطاقة المتجددة، إلا أن تحقيق هذه الفرص يتطلب أطرًا تنظيمية ورؤى رقمية واضحة لضمان استدامة القطاع الرقمي.

ثانيا: التوصيات

1. تبني سياسات عامة شاملة لتقليل الأثر البيئي للتعدين الرقمي، من خلال فرض ضرائب كربونية أو تسعير الانبعاثات، وتشجيع إنشاء مزارع تعدين تعتمد على الطاقة المتجددة، إلى جانب تطوير أطر تنظيمية دولية موحدة توازن بين الابتكار التكنولوجي والاستدامة البيئية.

2. إدماج معايير الاستدامة البيئية في تقييم الأصول الرقمية لضمان توافق الاستثمارات مع الاتجاهات العالمية نحو الاقتصاد الأخضر، مع تنويع المحافظ الاستثمارية بين البيتكوين كأصل مخزن للقيمةوالإيثيريوم كمنصة للتطبيقات الذكية لتحقيق توازن بين العائد والمخاطر وتعزيز الاستقرار المالي.

3. استثمار إمكانات الطاقة المتجددة في العالم العربي لتطوير مشاريع التعدين الأخضر، مع سنّ تشريعات واضحة تحفز الابتكار وتحمي البيئة، وربط تلك المشاريع بمبادرات التحول الرقمي والتنمية المستدامة لبناء اقتصاد رقمي منخفض الكربون ويعزز التنافسية الإقليمية في التكنولوجيا المالية.

4. توجيه البحوث المستقبلية لإجراء دراسات مقارنة معمقة لشبكات البلوكشين البديلة مثل Cardanoو Solana، بهدف تقييم كفاءتها البيئية والاقتصادية، إلى جانب دراسة تكامل الذكاء الاصطناعي مع البلوكشين لتحسين الأداء وتقليل استهلاك الطاقة، وتحليل الأبعاد الاجتماعية والاقتصادية لاعتماد العملات المشفرة في الاقتصادات الناشئة لتعزيز فهم شامل لتأثير هذه التقنيات على التنمية المستدامة.

المصادر

1. Abdullah, A. (2022). PoW vs PoS: A comparative study in the Arab Gulf.
2. Al-Omoush, K. (2021). Blockchain Adoption in the Arab World: Challenges and Opportunities.
3. Al-Omoush, K. (2021). Cryptocurrency Adoption in the Arab World: Opportunities and Challenges. Arab Economic Journal.
4. Antonopoulos, A. (2017). Mastering Bitcoin: Programming the Open Blockchain. O’Reilly Media.
5. Antonopoulos, A. (2017). Mastering Bitcoin: Unlocking Digital Cryptocurrencies.
6. Buterin, V. (2021). Ethereum: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform.
7. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (2023). University of Cambridge.
8. Cambridge Centre for Alternative Finance. (2022). Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index.
9. de Vries, A. (2020). Bitcoin’s growing energy problem. Joule.
10. Digiconomist (2022). Bitcoin Energy Consumption Index.
11. Digiconomist. (2022). Cryptocurrency Energy Consumption Data.

12. Ethereum Foundation (2022). The Merge: Ethereum's Transition to Proof-of-Stake.

13. European Parliament (2022). Regulation on Markets in Crypto-Assets (MiCA).

14. Hayes, A. (2019). Cryptocurrency value formation: An empirical study. Economics Letters.

15. IRENA (2022). Renewable Energy Prospects for the Middle East. International Renewable Energy Agency.

16. Krause, M., &Tolaymat, T. (2018). Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. Nature Sustainability.

17. Mora, C., et al. (2018). Bitcoin emissions alone could push global warming above 2°C. Nature Climate Change.

18. Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.

19. Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., &Goldfeder, S. (2016). Bitcoin and Cryptocurrency Technologies. Princeton University Press.

20. Shapiro, C., & Varian, H. (1999). Information Rules: A Strategic Guide to the Network Economy. Harvard Business Press.

21. Stoll, C., Klaaßen, L., &Gallersdörfer, U. (2019). The Carbon Footprint of Bitcoin. Joule, 3(7), 1647–1661.

22. Tapscott, D., & Tapscott, A. (2016). Blockchain Revolution. Penguin.

23. Tapscott, D., & Tapscott, A. (2018). Blockchain Revolution. Penguin.

24. Truby, J. (2018). Decarbonizing Bitcoin: Law and policy choices. Energy Research & Social Science.

25. United Nations. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development.

26. WEF (2020). The Future of Financial Infrastructure.

27. WEF (2023). Crypto Sustainability and Governance Report.

28. World Economic Forum (WEF). (2020). The Future of Financial Infrastructure: An Ambitious Look at How Blockchain Can Reshape Financial Services.

29. World Economic Forum (WEF). (2023). Crypto Sustainability Framework.

30. خالد، س. (2020). الطاقة المتجددة والتعدين الرقمي. مجلة الاقتصاد الأخضر.

31. العُبيدي، م. (2021). تحديات التعدين الرقمي في المنطقة العربية. مجلة العلوم البيئية.

32. علي سعد .(2022) .مستقبل التعدين الرقمي في العراق. جامعة بغداد.

33. فاضل شمران .(2021) .الاقتصاد الرقمي في الخليج العربي. مجلة الاقتصاد العربي.