إطار مقترح لاستخدام الهيدروجين الأخضر في محطات إنتاج الكهرباء بالتطبيق على قطاع الكهرباء والطاقة المتجددة لتحقيق الاستدامة البيئية

حسن عصام الدين حسن[1] – يحيى محمد أبو طالب[2] – هدى إبراهيم هلال[1] – محمد موسى عمران[3]
1) كلية الدراسات العليا والبحوث البيئية، جامعة عين شمس 2) كلية التجارة، جامعة عين شمس 3) جهاز تنظيم مرفق الكهرباء وحماية المستهلك المصري.

المستخلص

يهدف البحث إلى حساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر من عملية التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة الشمسية، وتقييم استخدام الهيدروجين الأخضر بنسب مختلفة مع الغاز الطبيعي في محطات توليد الكهرباء القائمة ودراسة المردود الاقتصادي والفني والبيئي، **حيث يعتمد منهج البحث** زيارة بعض محطات إنتاج الكهرباء والحصول على بيانات تختص بمجال البحث وتحليلها وذلك للوصول إلى معادلات رياضية تم من خلالها حساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر من عملية التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة الشمسية وكذا حساب المردود الاقتصادي والفني والبيئي لاستخدام الهيدروجين في محطات إنتاج الكهرباء **حيث توصل البحث إلى بعض النتائج أهمها** أن القيمة المضافة من تطبيق التكنولوجيا مجال البحث هي خفض الانبعاثات البيئية الضارة ثانى أكسيد الكربون حيث تنخفض بنسبة 10 % فقط وتعتبر هذه النسبة وعائدها المادي صغير مقارنة بالتكلفة المالية الكبيرة التي سيتم صرفها لتعديل أنظمة الحرق في محطات الكهرباء القائمة وكذا تكلفة إنتاج الهيدروجين واستخدامه في عملية الحرق، كما أن تطبيق تكنولوجيا الإشعال باستخدام خليط من الهيدروجين مع الغاز الطبيعي على المحطات القائمة ذو تكلفة عالية وذلك بسبب ارتفاع تكلفة إنتاج الهيدروجين أخذا في الاعتبار تكلفة الإنشاء والتشغيل والصيانة بالإضافة إلي التكلفة الأولية لمحطة إنتاج الهيدروجين أي أنه يمثل 2.5 – 5 أضعاف تكلفة إنتاج الغاز الطبيعي بالإضافة إلي التعديلات اللازمة لغرف الإشعال ومراحل التربينة، **حيث خلص البحث إلى عدة توصيات أهمها** التوسع في إنشاء محطات الطاقة الجديدة والمتجددة (شمسي–رياح)، إنتاج الهيدروجين بالطاقة النظيفة الخالي من الانبعاثات الكربونية المؤثرة على البيئة له مردود اجتماعي واقتصادي نحو الاستدامة البيئة، العمل على خفض منحنى تكلفة إنتاج الهيدروجين والوصول إلى القدرة التنافسية لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة في عملية إنتاج الهيدروجين، قيام الشركة القابضة لكهرباء مصر بالتوسع في إنشاء محطات تحلية مياه البحر وتوطين تكنولوجيا تحلية مياه البحر باستخدام التقنيات الحديثة والتي تلعب دوراً مهماً في خفض تكلفة إنتاج الهيدروجين، قيام الشركة القابضة لكهرباء مصر عند التعاقد على محطات إنتاج كهرباء جديدة يجب أن تشتمل على منظومة استخدام الهيدروجين الأخضر مع الغاز الطبيعي في عملية الحرق.
الكلمات الافتتاحية: إنتاج الهيدروجين، التحليل الكهربائي باستخدام الطاقة الشمسية، المردود الاقتصادي والفني والبيئي لاستخدام الهيدروجين في محطات الكهرباء.

المقدمة

يشكل أمن الطاقة واستدامتها أمراً ضرورياً تفرضه الظروف الاقتصادية العالمية المعاصرة خاصة في ظل ما يمر به العالم من أزمات كجائحة كورونا والحرب الأوكرانية الروسية ,والأزمات في الشرق الأوسط حيث نتج عنهم الارتفاع الحاد لأسعار الطاقة والنقص في إمداداتها والقلق بشأن أمنها هذا بالإضافة إلى تأثير هيمنة الطاقة الأحفورية التقليدية السلبي الملموس على البيئة والمناخ، وجدير بالذكر أن مصادر الطاقة الخالية من الكربون والطاقة المتجددة قد حظيت باهتمام متزايد خلال السنوات الماضية وذلك باعتبارها بمثابة الحل الأمثل لمعظم التحديات الرئيسة التي تواجه دول العالم خاصة في كيفية تلبية احتياجاته المتزايدة من الطاقة والحفاظ على النمو الاقتصادي دون التأثير السلبى على المناخ، هذا ويعتبر الهيدروجين الأخضر أحد أهم المنتجات التي تعتمد استخدام هذه المصادر وتعتبر الطاقة الناتجة عنه أحد أهم عناصر الطاقة التي تلعب دوراً محورياً في التحول العالمي نحو اقتصاد خالي من الكربون ولاسيما في

قطاع الكهرباء الذي يعد المسؤول عن إنتاج الطاقات المتجددة (رياح / شمسي)، لذا يركز هذا البحث على دراسة فنية اقتصادية بيئية لإنتاج الهيدروجين الأخضر من عملية التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة الشمسية والمردود الاقتصادي والبيئي لاستخدام الهيدروجين الأخضر في محطات إنتاج الكهرباء.

مشكلة البحث

تتمثل مشكلة البحث في أن مصر ليست دولة غنية بمصادر الطاقة الأحفورية ليست دولة بترولية، كما أن الطاقة الأحفوري هي طاقة ناضبة بطبيعتها وتتسبب في الانبعاثات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري، من أجل الاستدامة وترشيد الاستهلاك للأجيال القادمة كان لابد من البحث عن تقنيات جديدة ومستدامة لتقليل الفجوة المتوقعة في الأعوام القادمة لمصر ونظراً لتمتع مصر بثراء واضح في مصادر الطاقات الجديدة والمتجددة على الأخص الطاقة الشمسية تم البحث عن حلول لتخزين هذه الطاقة واستخدامها وقت الحاجة فتم الاتجاه إلى استخدام تكنولوجيات إنتاج الهيدروجين الأخضر كمخزون للطاقة الناتجة من المصادر المتجددة لحين الحاجة إليها وكذا استخدام الهيدروجين الأخضر فى توليد الكهرباء واقتراح سيناريوهات لنسب الخليط الامثل مع الغاز الطبيعي للوصول إلى أقل نسبة من عادم هذه المحطات خالي من الكربون.

أسئلة البحث

1- كيف يؤثر استخدام الهيدروجين الأخضر على التكلفة التشغيلية لمحطات الكهرباء مقارنة بالاعتماد على الوقود الأحفوري؟
2- ما التأثير البيئي لكل سيناريو من السيناريوهات المفروضة من حيث تقليل انبعاثات الكربون مقارنة باستخدام الغاز الطبيعي فقط؟
3- كيف يؤثر تغيير نسب خلط الهيدروجين الأخضر مع الغاز الطبيعي على كفاءة محطات توليد الكهرباء؟
4- ما الجدوى الاقتصادية للتحول إلى الهيدروجين الأخضر في محطات الكهرباء على المدى الطويل؟

فروض البحث

استناداً إلى مشكلة البحث فقد قام الباحثون بصياغة الفروض التالية بهدف اختبارها والتأكد من صحتها:

1- هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين الأخضر بمحطات توليد الكهرباء وتقليل غازات الكربون الناتجة من هذه المحطات.
2- هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين الأخضر بمحطات توليد الكهرباء والتكلفة المالية والاقتصادية لاستخدامه.
3- هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين الأخضر بمحطات توليد الكهرباء والمردود البيئي لاستخدام الهيدروجين.
4- هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين بمحطات توليد الكهرباء والأداء الفني لهذه المحطات.

أهداف البحث

يهدف البحث بصورة رئيسية إلى ما يلي:

1- فرض ثلاث سيناريوهات لاستخدام الهيدروجين الأخضر في محطات الكهرباء **السيناريو الأول** 30% هيدروجين 70% غاز طبيعي، **السيناريو الثاني** 20% هيدروجين 80% غاز طبيعي **السيناريو الثالث** 10% هيدروجين 90% غاز طبيعي وفى كل سيناريو يتم حساب كميات الخلط المطلوبة.

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 3178-2636

2- صياغة معادلات رياضية واستخدام برنامج اكسيل لحساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر من عملية التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة الشمسية.
3- حساب التأثير البيئي والمردود الاقتصادي للتأثير البيئي وحساب التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود لاستخدام الهيدروجين في محطات إنتاج الكهرباء لكل سيناريو من السيناريوهات المفروضة.
4- تقييم التكلفة الإجمالية للتحول إلى الهيدروجين وتأثيره على اقتصاديات محطات الكهرباء.

متغيرات البحث

المتغير المستقل: استخدام الهيدروجين الأخضر مع الغاز الطبيعي في محطات توليد الكهرباء.

المتغير التابع: 1–التكلفة الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين 2–كفاءة محطات الإنتاج
3– المردود البيئي والاقتصادي لاستخدام الهيدروجين.

أهمية البحث

تتمثل أهمية البحث في أنه تتناول موضوعا يرتبط بتأمين إمدادات مصر من الطاقة على المدى المتوسط والبعيد، وهو المدى الذي ينتظر أن تؤدى فيه المصادر الجديدة والمتجددة للطاقة دورا محوريًا، سيتم فيها تسليط الضوء على الاقتصاديات المستقبلية لطاقة تكنولوجيا الهيدروجين الأخضر والتي من المتوقع أن تكون هي طاقة المستقبل، ووضع تصور ومقترح لاستخدام الهيدروجين فى محطات توليد الكهرباء التقليدية وذلك عن طريق الخلط مع الغاز الطبيعي للوصول إلى أقل نسبة من عادم هذه المحطات خالي من الكربون ودراسة كافة الجوانب التي تؤثر على استخدامه سواء بالسلب أو الايجاب، وذلك للمساعدة في دعم اتخاذ القرار للسادة أصحاب المصلحة في وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة والشركة القابضة لكهرباء مصر بخصوص جدوى استخدام الهيدروجين الأخضر في محطات توليد الكهرباء.

منهجية البحث

يعتمد الباحثون في منهجية البحث على الخطوات التالية:

1. مراجعة الأبحاث المنشورة والأدبيات التي أعدت في نفس مجال الدراسة والبحوث المقارنة.
2. تجارب بعض الشركات العالمية (سيمنس الألمانية – GE الأمريكية– ميتسوبيشي اليابانية) العاملة في نفس المجال
3. زيارة بعض محطات إنتاج الكهرباء التابعة للشركة القابضة لكهرباء مصر والحصول على بيانات تختص بمجال البحث وتحليلها ومراجعة التكنولوجيا المستخدمة فيها لمعرفة مدى قابليتها للتحول إلى الهيدروجين وذلك لدراسة إمكانيات تشغيلها باستخدام مزيج من الهيدروجين والغاز الطبيعي.
4. فرض ثلاث سيناريوهات لاستخدام الهيدروجين الأخضر في محطات الكهرباء السيناريو الأول 30% هيدروجين 70% غاز طبيعي، السيناريو الثاني 20% هيدروجين 80% غاز طبيعي السيناريو الثالث 10% هيدروجين 90% غاز طبيعي وفى كل سيناريو يتم حساب كميات الخلط المطلوبة.
5. صياغة معادلات رياضية واستخدام برنامج اكسيل تم من خلالها حساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر من عملية التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة الشمسية وكذا حساب التأثير البيئي والمردود الاقتصادي للتأثير البيئي وحساب التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود لاستخدام الهيدروجين في محطات إنتاج الكهرباء لكل سيناريو من السيناريوهات المفروضة.

6. تقييم التكلفة الإجمالية للتحول إلى الهيدروجين وتأثيره على اقتصاديات محطات الكهرباء.

الدراسات والتجارب السابقة

من خلال مراجعة الدراسات وتجارب بعض الشركات العالمية مثل سيمنس الألمانية وجنرال الكتريك الامريكية وميتسوبيشي اليابانية السابقة في مجال تكنولوجيات الهيدروجين الأخضر، وتقييم مدى التقدم في هذا المجال، وتحديد أوجه التشابه والاختلاف بين الأبحاث، والاستفادة من النتائج السابقة لتجنب التكرار غير الضروري وذلك لوضع أسس علمية قوية لدعم الفرضيات وتوجيه البحث نحو تحقيق أهدافه بفعالية فقد تم الاطلاع على الدراسات التالية:

1. رجب حمدي وآخرون 2024 (نظام مُحسن للإنتاج المُشترك للكهرباء/الهيدروجين الأخضر لمسارات طاقة متعددة: دراسة حالة لمصر)

تهدف الدراسة إلى تطوير نظام متكامل لإنتاج الكهرباء والهيدروجين الأخضر بطريقة مثلى، مع مراعاة المسارات المختلفة للطاقة في مصر، بهدف تحقيق كفاءة أعلى وتقليل الانبعاثات الكربونية.

ما تناولته الدراسة:

- تحليل إمكانيات دمج إنتاج الهيدروجين الأخضر مع توليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة.
- تقييم جدوى الأنظمة الهجينة التي تجمع بين الطاقة الشمسية وطاقة الرياح لإنتاج الهيدروجين.
- دراسة السيناريوهات المختلفة لاستخدام الهيدروجين في قطاعي الطاقة والنقل.
- تطبيق نماذج رياضية لتحليل كفاءة النظام المقترح.

النتائج:

- تبين أن دمج إنتاج الكهرباء والهيدروجين الأخضر يمكن أن يعزز أمن الطاقة في مصر.
- الأنظمة الهجينة تحقق كفاءة أعلى مقارنة بالأنظمة التقليدية.
- يمكن أن يسهم الهيدروجين الأخضر في تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وخفض الانبعاثات الكربونية.
- ضرورة تطوير سياسات داعمة لتوسيع استخدام الهيدروجين الأخضر في مصر.

2. سوون جامعة سونغكيونكوان جمهورية كوريا 2023 (التحليل التقني والاقتصادي لوقود الهيدروجين الممزوج بالغاز الطبيعي لمحطات الطاقة ذات الدورة المركبة بقدرة 400 ميجاوات)

تهدف الدراسة إلى تحليل الجدوى التقنية والاقتصادية لاستخدام خليط من الهيدروجين والغاز الطبيعي كوقود في محطات الدورة المركبة بقدرة 400 ميجاوات بكوريا، بهدف تقليل الانبعاثات الكربونية وتحسين كفاءة توليد الطاقة.

ما تناولته الدراسة:

- تقييم تأثير نسب مختلفة من خلط الهيدروجين مع الغاز الطبيعي على أداء محطات الدورة المركبة.
- تحليل الجدوى الاقتصادية من خلال مقارنة تكلفة الوقود وكفاءة التشغيل.
- دراسة تأثير استخدام الهيدروجين على مكونات المحطة، مثل التوربينات وأنظمة الاحتراق.
- تقييم الفوائد البيئية من حيث تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وأكاسيد النيتروجين.

النتائج:

- زيادة نسبة الهيدروجين في الوقود تؤدي إلى تحسين كفاءة الاحتراق وخفض الانبعاثات الكربونية.
- التكاليف التشغيلية تتغير وفقًا لسعر الهيدروجين ومدى توفره.

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 3178-2636

- المحطات تحتاج إلى تعديلات تقنية عند رفع نسبة الهيدروجين في الوقود.
- اعتماد خليط الهيدروجين مع الغاز الطبيعي يمكن أن يكون حلاً مستدامًا إذا توفرت البنية التحتية المناسبة.

3. محمد المدني، جامعة الملك عبد العزيز، المملكة العربية السعودية، 2023 (التحسين الأمثل من الناحيتين التقنية والاقتصادية والبيئية لدورة مركبة من توربينات غاز مُجدَّدة ودورة ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج بالاعتماد على خليط الميثان والهيدروجين كوقود لمعالجة البيئة)

تهدف الدراسة إلى تحليل وتحسين الأداء التقني والاقتصادي والبيئي لنظام يجمع بين توربين غازي متجدد ودورة ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج، باستخدام خليط من الميثان والهيدروجين كوقود، بهدف تقليل الانبعاثات وتعزيز كفاءة الطاقة.

ما تناولته الدراسة:

- دراسة تأثير خلط الهيدروجين مع الميثان على أداء التوربينات الغازية وكفاءة النظام.
- تحليل الجدوى الاقتصادية للنظام المقترح مقارنة بالأنظمة التقليدية.
- تقييم الفوائد البيئية، خاصة فيما يتعلق بخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.
- تطبيق نماذج رياضية لتحسين كفاءة التشغيل وتقليل الأثر البيئي.

النتائج:

- دمج الهيدروجين مع الميثان يحسن كفاءة الاحتراق ويقلل الانبعاثات الكربونية.
- النظام المقترح يقلل استهلاك الوقود مقارنة بالتوربينات الغازية التقليدية.
- استخدام دورة ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج يعزز استرداد الطاقة ويخفض التأثير البيئي.
- الاستثمار في مثل هذه الأنظمة يحتاج إلى سياسات دعم لضمان الجدوى الاقتصادية على المدى الطويل.

4. على حبيب وآخرون 2021 (آفاق تطوير الهيدروجين منخفض الكربون في مصر)

تهدف الدراسة إلى تقييم فرص تطوير الهيدروجين منخفض الكربون في مصر، مع التركيز على إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، حيث تسعى الحكومة المصرية لتطوير استراتيجية وطنية للهيدروجين منخفض الكربون، مع التركيز على الهيدروجين الأخضر بسبب الإمكانيات الكبيرة للطاقة الشمسية والرياح في البلاد.

ما تناولته الدراسة: تم تحليل تكاليف إنتاج الهيدروجين بأنواعه المختلفة (الرمادي، الأزرق، والأخضر)، والتحديات المرتبطة بتطوير صناعة الهيدروجين في مصر.

النتائج: توصلت الدراسة إلى تعزيز استثمارات الطاقة المتجددة لخفض تكلفة الكهرباء المستخدمة في إنتاج الهيدروجين الأخضر وتطوير البنية التحتية للنقل والتخزين لدعم اقتصاد الهيدروجين واستخدام الهيدروجين الأزرق كمرحلة انتقالية لتقليل الانبعاثات قبل التوسع في الهيدروجين الأخضر.

5. لمياء عبد الله وآخرين 2020 (تقييم انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من محطات توليد الطاقة المستقبلية في مصر)

الهدف من الدراسة تقييم انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2) من محطات الطاقة المستقبلية في مصر، ومقارنة سيناريوهات الطاقة المختلفة حتى عام 2030 حيث تعتمد مصر بشكل كبير على الوقود الأحفوري (الغاز والنفط)، مما يسبب انبعاثات كربونية مرتفعة.

ما تناولته الدراسة: تم اقتراح ثلاث سيناريوهات السيناريو المتنوع مزيج من الغاز، النفط، الفحم، الطاقة النووية، والطاقة المتجددة، سيناريو الوقود الأحفوري زيادة الاعتماد على الغاز والفحم، مع نسبة أقل للطاقة المتجددة والنووية السيناريو الأخضر تقليل الفحم نهائيًا، وزيادة الاعتماد على الطاقة المتجددة، النووية، والغاز الطبيعي.

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 3178-2636

النتائج: تم التوصل إلى أن السيناريو المتنوع سيرفع انبعاثات CO_2 إلى 307 مليون طن سنويًا، سيناريو الوقود الأحفوري سيؤدي إلى 330مليون طن سنويًا، السيناريو الأخضر سيؤدي إلى 128 مليون طن سنويًا فقط، والأفضل بيئيًا السيناريو الأخضر حيث يحد من ارتفاع الانبعاثات.

6. محمد عثمان وآخرون2021 (الجدوى الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر عن طريق التحليل الكهربائي للماء باستخدام موارد طاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية في منطقة صدع أسال بجمهورية جيبوتي)

الهدف من الدراسة تقييم الجدوى الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام التحليل الكهربائي للمياه، معتمداً على طاقتي الرياح والطاقة الحرارية الجوفية في منطقة صدع أسال في جيبوتي.

ما تناولته الدراسة:

- تحليل إمكانات طاقة الرياح والطاقة الحرارية الجوفية كمصادر مستدامة لإنتاج الكهرباء اللازمة للتحليل الكهربائي.
- دراسة تكاليف الإنتاج ومقارنتها بتكاليف إنتاج الهيدروجين من مصادر أخرى.
- تقييم الفوائد البيئية من خلال تقليل الانبعاثات الكربونية مقارنة بالوقود الأحفوري.
- تحليل العوامل الاقتصادية مثل تكلفة الاستثمار، التشغيل، وأسعار الهيدروجين المحتملة في السوق.

النتائج:

- الطاقة الحرارية الجوفية والرياح في جيبوتي توفر إمكانات كبيرة لإنتاج الهيدروجين الأخضر بتكاليف تنافسية.
- تكلفة الإنتاج تعتمد على كفاءة التحليل الكهربائي وتوافر البنية التحتية لنقل الهيدروجين.
- الهيدروجين الأخضر المنتج يمكن أن يصبح مصدراً رئيسياً للطاقة النظيفة محلياً وإقليمياً إذا تم تطوير السياسات الداعمة.
- تكلفة إنتاج الوحدة من الكهرباء المولدة باستخدام توربينات الرياح تساوى 0.042 دولار/ كيلو وات في الساعة، بينما تمثل نحو 0.086 دولار / كيلو وات في الساعة إذا تم الإنتاج باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية الجوفية.

7. جوزيبي سدانغي وآخرون جامعة لورين، فرنسا 2020 (نحو ضغط هيدروجين هجين غير ميكانيكي لمحطات الهيدروجين اللامركزية)

الهدف من الدراسة تطوير وتقييم تقنية جديدة لضغط الهيدروجين بطريقة غير ميكانيكية، بهدف تحسين كفاءة التخزين والنقل في المنشآت اللامركزية لإنتاج الهيدروجين.

ما تناولته الدراسة:

- استكشاف بدائل للضواغط الميكانيكية التقليدية التي تستهلك طاقة كبيرة وتتطلب صيانة دورية.
- دراسة نظام هجين لضغط الهيدروجين بفعالية وتحليل الأداء التقني والاقتصادي للنظام المقترح مقارنة بالطرق التقليدية.
- تقييم مدى قابلية تطبيق هذه التقنية في منشآت الهيدروجين الصغيرة واللامركزية.

النتائج:

- تقنية الضغط غير الميكانيكي تقلل من استهلاك الطاقة وتكاليف التشغيل مقارنة بالضواغط التقليدية.
- النظام المقترح يتمتع بعمر تشغيلي أطول ويقلل الحاجة إلى الصيانة الدورية.
- التعرف على الفوائد المحتملة للهيدروجين كوقود عن طريق تحسين طرق التخزين وتوفير بنية تحتية للتوزيع فعالة وآمنة كما تم التطرق فيها إلى أنواع ضواغط الهيدروجين وتكلفتها.

التعليق على الدراسات: تتناول هذه الدراسات جوانب متعددة من إنتاج واستخدام الهيدروجين الأخضر وتقنيات الطاقة النظيفة، مما يوفر قاعدة معرفية متكاملة لتطوير استراتيجيات مستدامة في مجال الطاقة.

الدراسات (1،2،3) تركز على تحسين إنتاج الكهرباء والهيدروجين الأخضر من خلال أنظمة هجينة واستخدام مزيج الهيدروجين مع الوقود الأحفوري، يمكن الاستفادة منها في تطوير نماذج تشغيلية لمحطات الطاقة في مصر والدول المجاورة، وتحليل الجدوى الاقتصادية والفنية لهذا التحول.

الدراسات (4،5) تقدم رؤية مستقبلية حول تقليل الانبعاثات الكربونية في قطاع الطاقة في مصر، مما يساعد في وضع سياسات لدعم الطاقة النظيفة وتقليل البصمة الكربونية للمحطات التقليدية.

الدراسة (6) تتناول إمكانية إنتاج الهيدروجين الأخضر من مصادر غير تقليدية مثل الطاقة الحرارية الأرضية، مما يفتح المجال أمام تنويع مصادر الطاقة النظيفة خاصة في المناطق الغنية بهذه الموارد.

الدراسة (7) تطرح حلاً مبتكرًا لضغط الهيدروجين بطريقة غير ميكانيكية، وهو ما يمكن أن يحسن كفاءة التخزين والنقل لمحطات إنتاج الهيدروجين اللامركزية.

وقد استفادت الدراسة الحالية من الدراسات السابقة كالآتي:

- وضع حلول عملية لدمج الهيدروجين مع الغاز الطبيعي في محطات إنتاج الكهرباء.
- صياغة معادلات رياضية بأسلوب علمي لحساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر وحساب التأثير البيئي والاقتصادي على محطات إنتاج الكهرباء.
- التعرف على الاستراتيجيات الحديثة في عمليات إنتاج وتخزين ونقل الهيدروجين الأخضر لتحقيق الجدوى الاقتصادية.
- دعم القرارات السياسية والاقتصادية بشأن مستقبل الهيدروجين منخفض الكربون في مصر.
- توظيف التقنيات الحديثة في تحسين كفاءة أنظمة الطاقة وتقليل التكاليف والانبعاثات.

إجراءات البحث

1. مقارنة بين غاز الهيدروجين والغاز الطبيعي.
2. العلاقة بين تدفق الكتلة وتدفق الحجم لخلط وقود الغاز الطبيعي/الهيدروجين.
3. حساب كميات الخلط المطلوبة طبقا للسيناريوهات المفروضة **السيناريو الأول** 30% هيدروجين 70% غاز طبيعي، **السيناريو الثاني** 20% هيدروجين 80% غاز طبيعي **السيناريو الثالث** 10% هيدروجين 90% غاز طبيعي على محطة لإنتاج الكهرباء قدرة198 ميجاوات.
4. حساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر من عملية التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة الشمسية عن طريق المحلل الكهربي (Alkaline Electrolysis)
5. حساب التأثير البيئي والمردود الاقتصادي للتأثير البيئي وحساب التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود لاستخدام الهيدروجين في محطات إنتاج الكهرباء لكل سيناريو من السيناريوهات المفروضة.
6. اختبار فروض الدراسة في ضوء النتائج.
7. النتائج والتوصيات.

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 2636-3178

1. مقارنة بين غاز الهيدروجين والغاز الطبيعي

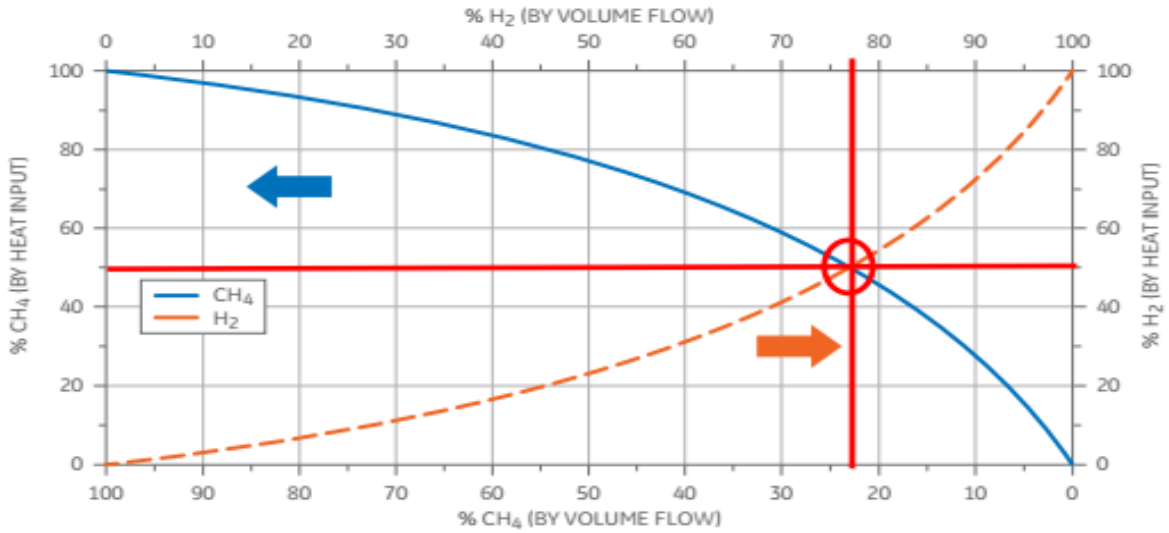
جدول (1): مقارنة بين خصائص الغاز الطبيعي وغاز الهيدروجين

Property	Units	Natural gas	Hydrogen
Molecular Weight	gram/mol	16–20	2
LHV (per volume)	MJ/Nm3	35.8	10.8
	BTU/scf	1028	274.7
LHV (per mass)	MJ/kg	50	120
	BTU/lb	21.515	51.593

SOURCE: 1- General Electric Company, power to gas report 2019, P8.

يبين الجدول رقم (1) مقارنة بين غاز الهيدروجين والغاز الطبيعي حيث يكون غاز الهيدروجين قيمته الحرارية ضعف القيمة الحرارية للغاز الطبيعي على أساس الكتلة، وعلى أساس الحجم يكون غاز الهيدروجين قيمته الحرارية ثلث القيمة الخاصة للغاز الطبيعي بمعني أنه ثلاثة أضعاف حجم غاز الهيدروجين مطلوب للحصول على نفس القيمة الحرارية للغاز الطبيعي المستخدم، من ذلك فان تشغيل التوربينات الغازية على أساس مزج الغاز الطبيعي بالهيدروجين يتطلب وملاءمتها لمعدلات التدفق المطلوبة.

2. العلاقة بين تدفق الكتلة وتدفق الحجم لخلط وقود الغاز الطبيعي/الهيدروجين



شكل رقم (1): العلاقة بين تدفق الكتلة وتدفق الحجم لخلط وقود الغاز الطبيعي والهيدروجين

SOURCE:1- General Electric Company, power to gas report 2019, P9.

يوضح الشكل رقم (1) العلاقة بين المحتوى الحراري والحجم للغاز الطبيعي والمحتوى الحراري والحجم للهيدروجين الأخضر والتي من خلاله يتم حساب نسب الخلط المختلفة بين الغاز الطبيعي وغاز الهيدروجين واستخدامها في محطات الكهرباء للوصول إلى أقل نسبة من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون ،على سبيل المثال، لو أن هناك تربينه غازيه يتطلب تحويلها للعمل بوقود عبارة عن مزيج بنسبة 5% / 95% (حسب الحجم) من الهيدروجين والغاز الطبيعي، نظرًا للاختلاف بين الكتلة وكثافة الطاقة الحجمية للهيدروجين، تصبح نسبة المزيج 0.65% / 99.35% من الهيدروجين والميثان على أساس المحتوى الحرارى.

3. حساب كميات الخلط طبقاً للسيناريوهات المفروضة على محطة لإنتاج الكهرباء قدرة 198 ميجاوات

تم اختيار محطة إنتاج كهرباء قائمة وفى الخدمة قدرتها 198 ميجاوات تابعة للشركة القابضة لكهرباء مصر لحساب كميات الخلط طبقاً للسيناريوهات المفروضة حيث تم الحصول على بعض البيانات من المحطة كما يلي:

-كمية الغاز الطبيعي الكلية للمحطة 44678 م^3/ ساعة.

-القيمة الحرارية للغاز الطبيعي 8280.9 كيلو كلوري/ م^3

-القيمة الحرارية لغاز الهيدروجين 10800 كيلو جول/ م3

-القيمة الحرارية للغاز الطبيعي بالكيلو جول= 8280.9× 4.184 (معامل تحويل) = 34647.286 كيلو جول/م3

-القيمة الحرارية لكمية الغاز الطبيعي الكلية للمحطة= 44678 × 34647.286 = 1547971426.03 كيلو جول/ساعة

باستخدام الشكل رقم (1) قام الباحثون بحساب كميات الغاز الطبيعي والهيدروجين المطلوبة طبقاً للسيناريوهات المفروضة كما يلي:

السيناريو الأول: سيناريو70 % غاز طبيعي (90% قيمة حرارية) ـ 30% هيدروجين (10% قيمة حرارية)

كمية الغاز الطبيعي المطلوبة = (القيمة الحرارية لكمية الغاز الطبيعي الكلية للمحطة × النسبة المقترحة للسيناريو غاز طبيعي) ÷ القيمة الحرارية للغاز الطبيعي.

1547971426.03 × 0.9= 1393174283.433 كيلو جول.

1393174283.433 ÷ 34647.286 = 40210.2l م^3/ساعة غاز طبيعي.

كمية غاز الهيدروجين المطلوبة = (القيمة الحرارية لكمية الغاز الطبيعي الكلية للمحطة × النسبة المقترحة للسيناريو هيدروجين) ÷ القيمة الحرارية لغاز الهيدروجين.

1547971426.03×0.1= 154797142.6 كيلو جول.

154797142.6 ÷ 10800 = 14333 م^3/ساعة هيدروجين.

السيناريو الثاني: سيناريو 80% غاز طبيعي (93% قيمة حرارية) ـ 20% هيدروجين (7% قيمة حرارية)

قام الباحثون باستخدام نفس المنهجية كما في السيناريو السابق

1547971426×0.93 = 1439613426.21 كيلو جول

1439613426 ÷ 34647.286 = 41550.54 م^3/ساعة غاز الطبيعي

1547971426.03×0.07 = 108357999.822 كيلو جول

108357999.82÷10800= 10033.15 م^3/ساعة هيدروجين

السيناريو الثالث: سيناريو 90% غاز طبيعي (97% قيمة حرارية) ـ 10% هيدروجين (3% قيمة حرارية)

1547971426.03×0.97 = 1501532283.25 كيلو جول

1501532283.25÷34647.286 = 4337.66 م^3/ساعة غاز طبيعي

1547971426.03 × 0.03= 46439142.78 كيلو جول

46439142.78÷10800= 4299.92 م^3/ساعة هيدروجين

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 3178-2636

تم تفريغ نتائج نسب الخلط في جدول كالتالي:

جدول (2): يوضح نسب وكميات الخلط طبقاً للسيناريوهات الافتراضية المختلفة

تكنولوجيا الخلط			**الكمية الكلية لوقود الخلط**
النسبة	70% غاز طبيعي	30% هيدروجين	
الحجم (م^3 /ساعة)	**40210.20**	**14333.07**	**54543027**
النسبة	80% غاز طبيعي	20% هيدروجين	
الحجم (م^3 /ساعة)	**41550.54**	**10033.15**	**51583.69**
النسبة	**90% غاز طبيعي**	**10% هيدروجين**	
الحجم (م^3 /ساعة)	**43337.66**	**4299.92**	**47637.58**

على الرغم من أن استخدام الهيدروجين كوقود يمكن أن يؤدي إلى انخفاض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، إلا أن هناك العديد من الاختلافات بين الهيدروجين والغاز الطبيعي من حيث خصائصهما وهناك أيضاً بعض التحديات في استخدام الهيدروجين منها:

التحدي الأول: القيمة الحرارية حيث إن غاز الهيدروجين قيمته الحرارية ضعف القيمة الحرارية للغاز الطبيعي على أساس الكتلة، وعلى أساس الحجم فإن غاز الهيدروجين قيمته الحرارية ثلث القيمة الخاصة للغاز الطبيعي، إذاً لو أن هناك تربينه غازية ونريد توفير نفس كمية الطاقة مثل الغاز الطبيعي، فإنها تحتاج إلى تدفق حجمي أكبر بثلاث مرات من الهيدروجين كما يبينه الجدول رقم (1)، لذلك ستكون هناك حاجة إلى نظام إضافي لتوفير معدلات التدفق المطلوبة.

التحدي الثاني: هو سرعة اللهب في الاحتراق، تشير سرعة اللهب إلى سرعة انتشار الغاز غير المحترق في حالة استخدام الهيدروجين تكون سرعة اللهب أسرع كثيرًا مقارنة بأنواع الوقود الهيدروكربونية الأخرى وإذا كانت سرعة اللهب للوقود سريعة جدًا، فسوف ينتشر اللهب في اتجاه المنبع من منطقة الاحتراق إلى منطقة الخلط المسبقة، والتي تكون قريبة من الفوهة وقد تتسبب في وقوع حوادث.

التحدي الثالث درجة حرارة الاحتراق عند زيادة كمية غاز الهيدروجين في عملية الحرق مع الغاز الطبيعي تتولد درجة حرارة عالية جدا والتي تؤدى إلى ارتفاع في نسبة أكاسيد النتروجين في عملية الحريق.

4. حساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر من عملية التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة الشمسية عن طريق المحلل الكهربي (Alkaline Electrolysis)

يتم إنتاج الهيدروجين داخل محطات إنتاج الكهرباء في مصر عن طريق المحلل الكهربي Alkaline Electrolysis نظراً لتوافر قطع الغيار وسهولة صيانته.

جدول (3): خصائص المحلل الكهربائي من النوع القلوي

CHARACTERISTICS	ALKALINE	NOTES
Electricity Consumption (KWh / Kg-H2)	50 - 73	Electrolysis system only. Excluding storage, compression.
System efficiency (LHV) %	45 - 67	
System lifetime (Year)	20	
Raw Material	Deionized water + Alkali	
(Water consumption) L/ Kg H2 (Electrolyzer)	10	
CAPEX ($/Kg H2) Compressor Diaphram	**2300**	
OPEX (Electrolyzer) annually	**(1-3)** % CAPEX Electrolyzer	
OPEX (Compressor Diaphrm) annually	≤ **5**% CAPEX Compressor	
CAPEX ($/Kg H2) Compressor Diaphram	**7% HHV H2**	

SOURCE

1- National Renewable Energy Laboratory 2017 & IRENA 2018.

2 -Towards Non-Mechanical Hybrid Hydrogen Compression for Decentralized Hydrogen Facilities University of Lorraine Nancy, France Published: 17 June 2020.

جدول 4: بعض البيانات الخاصة بالبحث

البند	المرجع	عام 2020	عام 2024
تكلفة الكيلو وات ساعة قرش /ك.و. س	الشركة القابضة لكهرباء مصر	60	76.44
تكلفة م3 من الغاز الطبيعي جنية/م		1.799	5.2
الدولار مقابل الجنية	البنك المركزي المصري	17	48
اليورو مقابل الدولار		1.876	1.09
الرسوم الكربونية دولار /طن co2	International renewable Energy Agency	50	50
تكلفة ك.و.س طاقة شمسية دولار	هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة	0.035	0.02
تكلفة المتر المكعب من المياه دولار	National Renewable Energy Laboratory 2018.	2.5	2.5
الكيلو جرام هيدروجين= لتر مياه		10	
كفاءة محطة الهيدروجين		% 67	

قام الباحثون بصياغة المعادلات الرياضية التالية لحساب تكلفة وحدة إنتاج الهيدروجين الأخضر كما يلي:

التكاليف الرأسمالية

1-تكلفة المحلل الكهربائي:

C Electrolyzer Capex = C Electrolyzer ($/kw) X P Electrolyzer (kw)

$$C\ Electrolyzer\ Capex\ H2 = \frac{C\ Electrolyzer\ Capex}{H2 \times Nd \times Ny \times t} \quad (\$/kg)$$

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 2636-3178

2-تكلفة الضاغط:

C Compressor Capex = C Compressor x H2 x t

$$\text{C Compressor Capex H2} = \frac{\text{C Compressor Capex}}{\text{H2 x Nd x Ny x t}} \quad (\$/kg)$$

التكاليف التشغيلية السنوية

3-تكلفة تشغيل المحلل الكهربائي:

C Electrolyzer opex = C Electrolyzer Capex x r Electrolyzer

$$\text{C Electrolyzer opex H2} = \frac{\text{C Electrolyzer opex}}{\text{H2 x Nd x Ny x t}} \quad (\$/kg)$$

4-تكلفة استهلاك الطاقة للمحلل الكهربائي:

C power opex = P Electrolyzer (kw) x C power ($/kwh)

5-تكلفة تشغيل الضاغط:

C Compressor opex = C Compressor x r Compressor

$$\text{C Compressor opex H2} = \frac{\text{C Compressor opex}}{\text{H2 x Nd x Ny x t}} \quad (\$/kg)$$

6-تكلفة استهلاك الطاقة لضغط الهيدروجين عند 200 بار:

C Compressor opex = P Compression (kwh/ kg) X C power ($/kwh)

7-تكلفة المياه:

C water opex = Q water (L/ kg) X C water ($/L)

8-إجمالي تكلفة إنتاج الهيدروجين:

C total Capex H2 = C Electrolyzer Capex H2 + C Compressor Capex H2

C total opex H2 = C Electrolyzer opex H2 + C power opex
+ C Compressor opex H2 + C Compressor opex + C power opex

C total H2 = C total Capex H2 + C total opex H2 ($/kg)

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 2636-3178

الرمز	التوضيح
C Electrolyzer	تكلفة الوحدة للمحلل الكهربائي (دولار/كيلووات)

year		2020	2024	2030
EUR/KW	Alkaline	370 – 900	370 – 850	370 – 800

P Electrolyzer	القدرة الكهربائية المطلوبة للمحلل الكهربائي (كيلووات) power Electrolyzer = المعادل للقيمة الحرارية العليا للهيدروجين/الكفاءة =58.81=0.67/39.4 كيلو وات /كجم هيدروجين
H2	كمية الهيدروجين المنتجة يوميا (كجم)
Nd	عدد الأيام في السنة
Ny	عدد السنوات
t	عدد الساعات
C Compressor	تكلفة وحدة الضاغط (دولار/كجم)
r Electrolyzer	نسبة تكلفة الصيانة السنوية للمحلل الكهربائي
r Compressor	نسبة تكلفة الصيانة السنوية للضاغط
C power	تكلفة الكهرباء لكل كيلو وات ساعة
P Compression	استهلاك الطاقة لضغط الهيدروجين (كيلووات /كجم) تتطلب عملية التحليل الكهربائي طاقة كهربائية لتقسيم جزيئات الماء يتم تحديد كمية الطاقة المطلوبة من خلال القيمة الحرارية الأعلى (HHV للهيدروجين مقسومة على كفاءة نظام التحليل الكهربائي القيمة الحرارية الأعلى للهيدروجين هي (141829.6 كيلوجول/كجم) وهذا يعادل (39.39 كيلووات ساعة/كجم)
Q water	كمية المياه المستهلك لكل كيلوجرام من الهيدروجين
C water	تكلفة المياه لكل لتر

قام الباحثون باستخدام الجداول أرقام (2–3–4) ونتائج كميات الخلط في السيناريو الأول 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين والمعادلات التي تم صياغتها لحساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر

كمية الهيدروجين بالكيلو جرام =14333.07×0.089(كثافة الهيدروجين)= 1275.64 كجم

الطاقة الكهربائية اللازمة لإنتاج كمية الهيدروجين=1275.64×58.81=75020 كيلو وات

CAPEX

CAPEX Electrolyzer= الطاقة الكهربائية اللازمة لإنتاج كمية الهيدروجين × CAPEX System $=

=75020 ×1688$ = 126686060 $ =(126686060 ÷(1275.64×20×365×24)= 0.5668 $/kg.H

CAPEX Compression= CAPEX Compressor Diaphram × كمية الهيدروجين بالكيلو جرام × عدد ساعات اليوم =2300 × 1275.64 × 24= 70415500$= 70415500 ÷(1275.64×20×365×24) = 0.32$/kg.H

OPEX

OPEX Electrolyzer annually= CAPEX Electrolyzer × (**1–3**) % CAPEX Electrolyzer= 126686060× 0.02=2533721.205 $= 2533721.205 ÷ (1275.64×20×365×24) = 0.2267 $/kg.H

OPEX power consumption= Electrolyzer power × (2020) تكلفة ك.و.س طاقة شمسية دولار 58.81× 0.035=2.06 $/kg.H

OPEX compressor annually = CAPEX Compression× **3-5%** CAPEX Compressor= 70415500.2× 0.04=2816620.008$= 2816620.008÷ (1275.64×20×365×24) = 0.252 $/kg.H

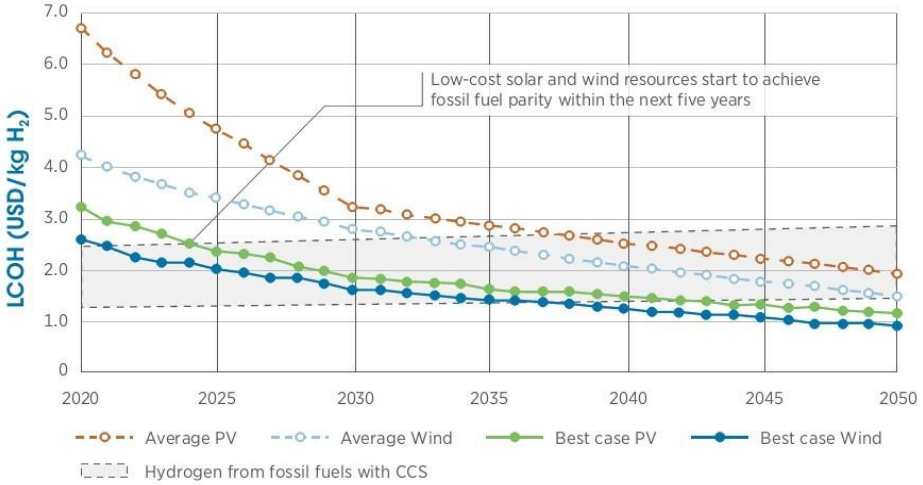
OPEX 200 bar power consumption=39.4× 0.07=2.758 k.w/kg.H=0.0965 $/kg.H

OPEX water=2.5× 0.010=0.025 $/kg.H

Levelized cost of hydrogen (2020) =3.549 $/Kg

قام الباحثون باستخدام نفس الطريقة السابقة لحساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر لعام 2024 حيث كانت

Levelized cost of hydrogen (2024) =2.3 $/Kg



شكل (2): تكاليف إنتاج الهيدروجين من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح مقارنة بالوقود الأحفوري

SOURCE: IRENA (2019): Hydrogen: A renewable energy perspective, p34.

IRENA considers the "best case" scenario to truly be the "global best". This graph also assumes that carbon prices will impact the price of traditional H, production from fossil fuels, IRENA assumes carbon prices of 50/ton (2030), $100/ton (2040), and 200/ton (2050). These carbon prices increase the cost of traditional H production and help make H, production from renewable electricity generators more economically viable.

تم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها لحساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر من الطاقة الشمسية مع السيناريو الأفضل لوكالة الطاقة الدولية كما بالشكل رقم 2 تبين أن هناك حيود بسيط جدا بين تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر (9% في عام 2020 بالزيادة، 4% في عام 2024 بالنقص) والذي تبين معه صحت البيانات والنتائج المحسوبة بواسطة الباحثون.

5. حساب التأثير البيئي (عام 2020): قام الباحثون باستخدام النتائج التي تم الحصول عليها لحساب التأثير البيئي كما يلي:

كمية الهيدروجين بالكيلو جرام =14333.07×0.089(كثافة الهيدروجين)= 1275.64 كجم

الطاقة الكهربائية اللازمة لإنتاج كمية الهيدروجين=1275.64×58.81=75020 كيلو وات

المتر مكعب من الغاز الطبيعي ينتج 2.75 كيلو جرام من ثاني أكسيد الكربون

حساب كمية ثاني أكسيد الكربون في حالة الإشعال 100% غاز طبيعي

=44678(كمية الغاز الطبيعي) ×0.72 (كثافة الغاز الطبيعي) =32168.16 كجم

32168.16 × 2.75=88462.44 كيلو جرام ثاني أكسيد الكربون/ساعة

=88462.44/ (198×1000) =0.44678 جرام ثاني أكسيد الكربون/كيلو وات ساعة.

السيناريو الأول: حساب كمية ثاني أكسيد الكربون في حالة الإشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين

=40210.2×0.72 (كثافة الغاز الطبيعي) =28951.344 كجم

28951.344 × 2.75=79616.1 كيلو جرام ثاني أكسيد الكربون/ساعة

=79616.19/ (198×1000) =0.402102 جرام ثاني أكسيد الكربون/كيلو وات ساعة.

السيناريو الثاني: حساب كمية ثاني أكسيد الكربون في حالة الإشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين

=41550.54×0.72 (كثافة الغاز الطبيعي) =29916.39 كجم

29916.39 × 2.75=82270.0692 كيلو جرام ثاني أكسيد الكربون/ساعة

=82270.0692/ (198×1000) =0.4155054 جرام ثاني أكسيد الكربون/كيلو وات ساعة.

السيناريو الثالث: حساب كمية ثاني أكسيد الكربون في حالة الإشعال 90% غاز طبيعي 10% هيدروجين

=43337.66×0.72 (كثافة الغاز الطبيعي) =31203.115 كجم

31203.115 × 2.75=85808.5668 كيلو جرام ثاني أكسيد الكربون/ساعة

=85808.5668/ (198×1000) =0.4333766 جرام ثاني أكسيد الكربون/كيلو وات ساعة.

تم تفريغ نتائج حساب كميات ثاني أكسيد الكربون للسيناريوهات المقترحة

السيناريوهات المقترحة	كميات ثاني أكسيد الكربون (جرام/كيلو وات ساعة)
السيناريو الأول	0.402102
السيناريو الثاني	0.4155054
السيناريو الثالث	0.4333766

حساب المردود الاقتصادي للتأثير البيئي (عام 2020)

قام الباحثون بحساب المردود الاقتصادي للتأثير البيئي باستخدام النتائج التي تم الحصول عليها من حساب التأثير البيئي كما يلي:

السيناريو الأول: المردود الاقتصادي للتأثير البيئي في حالة الإشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين

الرسوم الكربونية 50 دولار لكل طن ثاني أكسيد الكربون حتى عام 2030 =50×17 (سعر الدولار) =850 جنية مصري

المردود الاقتصادي= (0.44678–0.402102) ×1000/850=0.037978 جنية /ساعة

=0.037978 ×198×1000= 7519.307 جنيه/ ك.و.س

7519.307 × 24×365= 66 مليون جنيه =17/66= 4 مليون دولار

السيناريو الثاني: المردود الاقتصادي للتأثير البيئي في حالة الإشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين

الرسوم الكربونية 50 دولار لكل طن ثاني أكسيد الكربون حتى عام 2030 =50×17 (سعر الدولار) =850 جنية مصري

المردود الاقتصادي= (0.44678–0.4155054) ×1000/850= 0.0265834 جنية /ساعة

=0.0265834 ×198×1000= 5263.51 جنيه/ ك.و.س

5263.51 × 24×365= 46 مليون جنيه =17/46=2.7 مليون دولار

الترقيم الدولي ISSN 1110–0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 3178–2636

السيناريو الثالث: المردود الاقتصادي للتأثير البيئي في حالة الإشعال 90% غاز طبيعي 10% هيدروجين

الرسوم الكربونية 50 دولار لكل طن ثاني أكسيد الكربون حتى عام 2030 =50×17 (سعر الدولار) =850 جنية مصري

المردود الاقتصادي= (0.4333766–0.44678) ×1000/850= 0.01139289 جنية /ساعة

=0.01139289 ×198×1000= 2255.792 جنيه/ ك.و.س

2255.792× 24×365= 20 مليون جنيه =17/20=1.2 مليون دولار

تم تفريغ نتائج المردود الاقتصادي للتأثير البيئي للسيناريوهات المقترحة

السيناريوهات المقترحة	المردود الاقتصادي للتأثير البيئى بالمليون دولار
السيناريو الأول	4
السيناريو الثاني	2.7
السيناريو الثالث	1.2

حساب التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود (عام 2020):

قام الباحثون باستخدام النتائج التي حصل عليها لحساب التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود كما يلي:

التكلفة الكلية للوقود عند الاشعال 100% غاز طبيعي= 44678 (كمية الغاز الطبيعي بالمتر المكعب/ساعة) ×1.799 (سعر المتر المكعب من الغاز الطبيعي عام 2020) ×198000/100 (كمية الطاقة بالكيلووات) = **40.59379899 قرش/ ك.و.س**

السيناريو الأول: في حالة الإشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين

تكلفة وقود الإنتاج عند الاشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين

=40210.2 (كمية الغاز الطبيعي) ×1.794 (سعر متر الغاز الطبيعي) ×100 /198000 +14333.07(كمية الهيدروجين) ×4.8 (سعر متر الهيدروجين) ×198000/100=**71.28125545 قرش/ ك.و.س**

الزيادة في تكلفة الوقود نتيجة استخدام تكنولوجيا الاشعال بخليط 70–30 مليون دولا سنويا

= (تكلفة وقود الإنتاج عند الاشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين – التكلفة الكلية للوقود عند الاشعال 100% غاز طبيعي) /100 × (198000 ×24 ×365) /1000000= **71.28125545 – 40.59379899** /100 × 365 ×24 ×198000 /1000000= **532 مليون جنية مصري = 31 مليون دولار** (سعر الدولار مقابل الجنية المصري 17)

السيناريو الثاني: في حالة الإشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين

تكلفة وقود الإنتاج عند الاشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين =**62.07497975 قرش/ ك.و.س**

الزيادة في تكلفة الوقود نتيجة استخدام تكنولوجيا الاشعال بخليط 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين

= 372.6 مليون جنية مصري = 22 مليون دولار (سعر الدولار مقابل الجنية المصري 17)

السيناريو الثالث: في حالة الإشعال 90% غاز طبيعي 10% هيدروجين

تكلفة وقود الإنتاج عند الاشعال 90% غاز طبيعي 10% هيدروجين =**49.80003503 قرش/ ك.و.س**

الزيادة في تكلفة الوقود نتيجة استخدام تكنولوجيا الاشعال بخليط 90–10مليون دولا سنويا

= 159.7 مليون جنية مصري = 9.4 مليون دولار (سعر الدولار مقابل الجنية المصري 17)

الترقيم الدولي ISSN 1110–0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 3178–2636

تم تفريغ نتائج حساب التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود للسيناريوهات المقترحة

السيناريوهات المقترحة	التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود بالمليون دولار
السيناريو الأول	31
السيناريو الثاني	22
السيناريو الثالث	9.4

حساب المردود الاقتصادي للتأثير البيئي (عام 2024): قام الباحثون باستخدام نفس المنهجية لحساب التأثير البيئي والمردود الاقتصادي للتأثير البيئي والتأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود لعام 2024 وذلك للمقارنة بنتائج عام 2020 واختبار فروض الدراسة كما يلي:

السيناريو الأول: المردود الاقتصادي للتأثير البيئي في حالة الإشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين

الرسوم الكربونية 50 دولار لكل طن ثاني أكسيد الكربون حتى عام 2030 =50×48 (سعر الدولار) =2400 جنية مصري

المردود الاقتصادي= (0.44678−0.402102) ×1000/2400=0.10723 جنية /ساعة

=0.10723 ×198×1000= 21231 جنيه/ ك.و.س

21231 × 24×365=186 مليون جنيه =48/186= 3.9 مليون دولار

السيناريو الثاني: المردود الاقتصادي للتأثير البيئي في حالة الإشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين

المردود الاقتصادي= (0.44678−0.4155054) ×1000/2400= 0.07505904 جنية /ساعة

=0.07505904 ×198×1000= 14861.7 جنيه/ ك.و.س

14861.7× 24×365= 130 مليون جنيه =48/46 =2.7 مليون دولار

السيناريو الثالث: المردود الاقتصادي للتأثير البيئي في حالة الإشعال 90% غاز طبيعي 10% هيدروجين

المردود الاقتصادي= (0.44678−0.4333766) 1000/2400=0.32168 جنية /ساعة

=0.32168 ×198×1000= 6369 جنيه/ ك.و.س

6369 × 24×365= 56 مليون جنيه =48/20 =1.2 مليون دولار

تم تفريغ نتائج المردود الاقتصادي للتأثير البيئي للسيناريوهات المقترحة

السيناريوهات المقترحة	المردود الاقتصادي للتأثير البيئى بالمليون دولار
السيناريو الأول	3.9
السيناريو الثاني	2.7
السيناريو الثالث	1.2

حساب التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود (عام 2024): قام الباحثون باستخدام نفس المنهجية لحساب التأثير البيئي والمردود الاقتصادي للتأثير البيئي والتأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود لعام 2024 وذلك للمقارنة بنتائج عام 2020 واختبار فروض الدراسة كما يلي:

التكلفة الكلية للوقود عند الإشعال 100% غاز طبيعي= 44678 (كمية الغاز الطبيعي بالمتر المكعب) ×5.2 (سعر المتر المكعب من الغاز الطبيعي عام 2024) ×198000/100 (كمية الطاقة بالكيلووات) = **117.34 قرش/ ك.و.س**

السيناريو الأول: في حالة الإشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين

تكلفة وقود الإنتاج عند الاشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين

=40210.2 (كمية الغاز الطبيعي) ×5.2 (سعر متر الغاز الطبيعي) ×100 /198000 +14333.07(كمية الهيدروجين) ×9.8 (سعر متر الهيدروجين) ×198000/100=**176.54 قرش/ ك.و.س**

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 3178-2636

الزيادة في تكلفة الوقود نتيجة استخدام تكنولوجيا الاشعال بخليط 70–30 مليون دولا سنويا

= (تكلفة وقود الإنتاج عند الاشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين – التكلفة الكلية للوقود عند الاشعال 100% غاز طبيعي) /100 × (198000 ×24 ×365) /1000000= **176.54 – 117.34** /100 × 365 ×24 ×198000 /1000000= **1026.9 مليون جنية مصري = 21.4 مليون دولار** (سعر الدولار مقابل الجنية المصري 48)

السيناريو الثاني: في حالة الإشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين

تكلفة وقود الإنتاج عند الاشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين =**158.8 قرش/ ك.و.س**

الزيادة في تكلفة الوقود نتيجة استخدام تكنولوجيا الاشعال بخليط 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين

= **719 مليون جنية مصري = 15 مليون دولار** (سعر الدولار مقابل الجنية المصري 48)

السيناريو الثالث: في حالة الإشعال 90% غاز طبيعي 10% هيدروجين

تكلفة وقود الإنتاج عند الاشعال 90% غاز طبيعي 10% هيدروجين =**135 قرش/ ك.و.س**

الزيادة في تكلفة الوقود نتيجة استخدام تكنولوجيا الاشعال بخليط 90–10مليون دولا سنويا

= **308 مليون جنية مصري =6.4 مليون دولار** (سعر الدولار مقابل الجنية المصري 48)

تم تفريغ نتائج حساب التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود للسيناريوهات المقترحة

السيناريوهات المقترحة	التأثير الاقتصادى على تكلفة الوقود بالمليون دولار
السيناريو الأول	21.4
السيناريو الثانى	15
السيناريو الثالث	6.4

6. اختبار فروض البحث في ضوء النتائج

الفرض الأول: هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين الأخضر بمحطات توليد الكهرباء وتقليل غازات الكربون الناتجة من هذه المحطات.

في ضوء نتائج حساب كميات انبعاثات غاز ثانى أكسيد الكربون نجد أنه في حالة الاشعال 100% غاز طبيعي كمية انبعاثات ثاني أكسد الكربون تساوى تقريبا 88462.44 كيلو جرام / ساعة بينما في حالة الإشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين كمية انبعاثات ثانى أكسيد الكربون تساوى تقريبا 79616.1 كيلو جرام /ساعة وفي حالة الإشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين تساوى تقريبا 82270.0692 كيلو جرام /ساعة وفي حالة الإشعال 90% غاز طبيعي 10% هيدروجين تساوى تقريبا 85808.5668 كيلو جرام ثاني أكسيد الكربون/ساعة أي كلما زادت نسبة الهيدروجين الأخضر في خليط الاشعال تقل انبعاثات غاز ثانى أكسيد الكربون **ولذلك مما سبق يتضح لنا جليا صحة الفرض الأول من فروض البحث وهو هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين الأخضر بمحطات توليد الكهرباء وتقليل غازات الكربون الناتجة من هذه المحطات.**

الفرض الثاني: هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين الأخضر بمحطات توليد الكهرباء والمردود البيئى لاستخدام الهيدروجين.

في ضوء نتائج حساب المردود الاقتصادي للتأثير البيئي (عام2020 ، 2024) نجد أنه في حالة الإشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين هناك عائد مادى للتأثير البيئي عام 2020 يساوى تقريبا 4 مليون دولار بينما عام 2024 يساوى تقريبا 3.9 مليون دولار وفي حالة الإشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين هناك عائد مادى للتأثير البيئي عام 2020 يساوى تقريبا 2.7 مليون دولار بينما عام 2024 يساوى تقريبا 2.7 مليون دولار و في حالة الإشعال 90% غاز

الترقيم الدولي ISSN 1110–0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 3178–2636

طبيعي 10% هيدروجين هناك عائد مادى للتأثير البيئي عام 2020 يساوى تقريبا 1.2 مليون دولار بينما عام 2024 يساوى تقريبا 1.2 مليون دولار أي كلما زادت نسبة الهيدروجين الأخضر في خليط الاشعال يزيد العائد المادي البيئي **ولذلك مما سبق يتضح لنا جليا صحة الفرض الثاني من فروض البحث وهو هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين الأخضر بمحطات توليد الكهرباء والمردود البيئي لاستخدام الهيدروجين.**

الفرض الثالث: هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين الأخضر بمحطات توليد الكهرباء والتكلفة المالية والاقتصادية لاستخدامه.

في ضوء نتائج حساب التأثير الاقتصادي على تكلفة الوقود (عام2020 ، 2024) نجد أنه في حالة الإشعال 70% غاز طبيعي 30% هيدروجين هناك زيادة في تكلفة الوقود عام 2020 تساوى تقريبا 31 مليون دولار بينما عام 2024 يساوى تقريبا 21.4 مليون دولار وفي حالة الإشعال 80% غاز طبيعي 20% هيدروجين هناك زيادة في تكلفة الوقود عام 2020 يساوى تقريبا 22 مليون دولار بينما عام 2024 تساوى تقريبا 15 مليون دولار و في حالة الإشعال 90% غاز طبيعي 10% هيدروجين هناك زيادة في تكلفة الوقود عام 2020 يساوى تقريبا 9.4 مليون دولار بينما عام 2024 يساوى تقريبا 6.4 مليون دولار أي كلما زادت نسبة الهيدروجين الأخضر في خليط الاشعال يزيد من التكلفة المالية والاقتصادية للاستخدامه **ولذلك مما سبق يتضح لنا جليا صحة الفرض الثالث من فروض البحث وهوهناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين الأخضر بمحطات توليد الكهرباء والتكلفة المالية والاقتصادية لاستخدامه.**

الفرض الرابع: هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين بمحطات توليد الكهرباء والأداء الفني لهذه المحطات.

يركز البحث على تحليل كفاءة استخدام الهيدروجين "الأخضر" كوقود لأنظمة توليد الطاقة حيث تم النظر في ثلاث مراحل رئيسية من العملية إنتاج الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي، وضغط الهيدروجين، واستخدام الهيدروجين كوقود في محطة طاقة دورة مركبة قائمة حيث إن الكفاءة الكلية للنظام تساوى مجموع كفاءة المراحل الثلاث وهو ما يصعب معه التحكم في النسبة الكلية للنظام وهو ما تم مناقشة في دراسة بعنوان

Green hydrogen as a power plant fuel: What is Energy efficiency fromproduction to utilization? Dmitry Pashchenko,2024.

حيث ثبت أن كفاءة LHV للمياه القلوية والتحليل الكهربائي لغشاء البروتون تصل إلى 70٪ و 85٪ على التوالي كما أن التحليل الديناميكي الحراري لضغط الهيدروجين أن استهلاك الطاقة لكل 1 كجم من الهيدروجين للضغط من 20 بار إلى 600 بار هو 1.51 كيلو واط في الساعة مع الاستفادة من الحرارة المهدرة في دورة رانكين العضوية (ORC)، و 1.77 كيلو واط في الساعة بدون (ORC) يتوافق استهلاك الطاقة هذا مع خسائر بنسبة 4.5٪ و 5.3٪ من LHV للهيدروجين على التوالي تم إجراء تحليل الطاقة لاستخدام الهيدروجين كوقود لمزيج الهيدروجين النقي والهيدروجين والميثان من تركيبات مختلفة تؤدي زيادة نسبة حجم الهيدروجين في الوقود إلى زيادة كفاءة الطاقة المنخفضة وخفض كفاءة الطاقة العالية وعند استخدام وقود يحتوي على 100% من الهيدروجين، تكون كفاءة الطاقة العالية والطاقة المنخفضة 48.7% و57.5% على التوالي وتبلغ الكفاءة الحقيقية لتحويل الطاقة المتجددة عبر الهيدروجين كحامل للطاقة إلى كهرباء في محطات الطاقة ذات الدورة المركبة حوالي 38%.

كما تم التطرق لنفس النقطة في دراسة أجريت على محطة دورة مركبة قدرة 400 ميجاوات بدولة كوريا بعنوان

Techno–Economic Analysis of Hydrogen–Natural Gas Blended Fuels for 400 MW Combined

Cycle Power Plants (CCPPs) Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Republic of Korea Correspondence,2023.

تناولت هذه الدراسة الجدوى الاقتصادية لاستخدام وقود الهيدروجين من خلال محاكاة عملية لمحطة توليد طاقة مركبة والتي تستخدم مزيج الغاز الطبيعي والهيدروجين وحساب تكلفة الطاقة المستوية حيث تم زيادة نسبة الهيدروجين في الغاز الطبيعي وتم تحليل تكلفة الطاقة المستوية وفقًا للتغير في قيم المتغيرات، مثل تكلفة الوقود وعامل السعة وCAPEX وتوليد الطاقة حيث توصلت إلى أن زيادة نسبة الهيدروجين مع الغاز الطبيعي ووصولها إلى 50% ممن المتوقع أن يؤدي إلى توليد طاقة كهربائية بقدرة 406.53 ميجاوات أي بزيادة قدرها 6.5 ميجاوات حيث يمكن تحقيق نفس الزيادة عند تشغيل المحطة بالغاز الطبيعي فقط وذلك من خلال تحسين الظروف التشغيلية للمحطة وعمل الصيانات الدورية بشكل منتظم والتي تؤدى إلى تحسين العملية وزيادة الكفاءة.

كما أن تجارب بعض الشركات العالمية مثل شركة جنرال الكتريك الامريكية وشركة سيمنس الألمانية أثبت أن هناك تحديات كبيرة في عملية استخدام الهيدروجين الأخضر مع الغاز الطبيعي في المحطات القائمة منها على سبيل المثال ظاهرة Flashback هذه الظاهرة من التحديات الفنية التي من الضروري مراعاتها في التربينات الغازية تفاديا للتأثير الحراري من combustion zone إلى منطقة premixing zone وهي منطقة غير مصممة لدخول اللهب فيها مما يؤدي إلى حدوث انفجار فى burners وكذا أيضا ارتفاع نسبة NOx نتيجة درجة حرارة الاحتراق العالية للهيدروجين والتى تستلزم عمل تصميم و تعديل لنظام premixing القائم للتحكم في هذه النسبة حتى لا تؤثر على ريش التربينة **ولذلك مما سبق يتضح لنا جليا صحة الفرض الرابع من فروض البحث وهو هناك علاقة جوهرية ذات دلالة معنوية بين استخدام الهيدروجين بمحطات توليد الكهرباء والأداء الفني لهذه المحطات.**

النتائج

1- القيمة المضافة من تطبيق التكنولوجيا مجال البحث هي خفض الانبعاثات البيئية الضارة ثاني أكسيد الكربون حيث تنخفض بنسبة 10 % فقط وتعتبر هذه النسبة وعائدها المادي صغير مقارنة بالتكلفة المالية الكبيرة التي سيتم صرفها لتعديل أنظمة الحرق في محطات الكهرباء القائمة وكذا تكلفة إنتاج الهيدروجين واستخدامه في عملية الحرق.

2- تطبيق تكنولوجيا الإشعال باستخدام خليط من الهيدروجين مع الغاز الطبيعي على المحطات القائمة ذو تكلفة عالية وذلك بسبب ارتفاع تكلفة إنتاج الهيدروجين أخذا في الاعتبار تكلفة OPEX & CAPEX بالإضافة إلى Initial Cost لمحطة إنتاج الهيدروجين أي أنه يمثل 2.5 – 5 أضعاف تكلفة إنتاج الغاز الطبيعي بالإضافة إلى التعديلات اللازمة لغرف الإشعال ومراحل التربينة.

3- في حالة تطبيق تكنولوجيا نسب الخلط المختلفة على بعض محطات إنتاج الكهرباء القائمة بالشركة القابضة لكهرباء مصر يمكن الاستفادة من كميات الغاز الطبيعي التي يتم توفيرها لتصديرها بالأسعار العالمية لتوفير العملة الصعبة.

4- من العيوب الفنية التي تظهر عند مزج الهيدروجين بالغاز الطبيعي بمحطات توليد الكهرباء القائمة هي ظاهرة Flashback هذه الظاهرة من التحديات الفنية التي من الضروري مراعاتها في التربينات الغازية تفاديا للتأثير الحراري من combustion zone إلى منطقة premixing zone وهي منطقة غير مصممة لدخول اللهب فيها مما يؤدي إلى حدوث انفجار في burners مما يستلزم تكلفة مالية عالية لتعديل نظام الحرق لتفادى هذه الظاهرة.

5- عند زيادة نسبة استخدام غاز الهيدروجين مع الغاز الطبيعي يؤدي إلى ارتفاع نسبة NOx نتيجة درجة حرارة الاحتراق العالية للهيدروجين والتي تستلزم عمل تصميم وتعديل لنظام premixing القائم للتحكم في هذه النسبة حتى لا تؤثر على ريش التربينة.

6- التكلفة الإنشائية لمحطة إنتاج الهيدروجين عن طريق Alkaline electrolyzer أقل من التكلفة الإنشائية لمحطة إنتاج الهيدروجين عن طريق PEM electrolyzer وإتاحة الصيانة لمحطة إنتاج الهيدروجين بطريقة alkaline عن الصيانة لمحطات الإنتاج بطريقة PEM وذلك لقلة تكلفتها وإتاحة سابقة الخبرة في التشغيل والصيانة مما يرجح انتشارها في معظم محطات إنتاج الكهرباء بالشركة القابضة لكهرباء مصر.

خلاصة البحث

يهدف البحث إلى حساب تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر من عملية التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقة الشمسية، وتقييم استخدام الهيدروجين الأخضر عن طريق الخلط بنسب مختلفة مع الغاز الطبيعي في محطات توليد الكهرباء القائمة ودراسة المردود الاقتصادي والفني والبيئي، **حيث توصل البحث إلى بعض النتائج أهمها** أن القيمة المضافة من تطبيق التكنولوجيا مجال البحث هي خفض الانبعاثات البيئية الضارة ثانى أكسيد الكربون حيث تنخفض بنسبة 10 % فقط وتعتبر هذه النسبة وعائدها المادي صغير مقارنة بالتكلفة المالية الكبيرة التي سيتم صرفها لتعديل أنظمة الحرق في محطات الكهرباء القائمة وكذا تكلفة إنتاج الهيدروجين واستخدامه في عملية الحرق، كما أن تطبيق تكنولوجيا الإشعال باستخدام خليط من الهيدروجين مع الغاز الطبيعي على المحطات القائمة ذو تكلفة عالية وذلك بسبب ارتفاع تكلفة إنتاج الهيدروجين أخذا في الاعتبار تكلفة OPEX & CAPEX بالإضافة إلى Initial Cost لمحطة إنتاج الهيدروجين أي أنه يمثل 2.5 – 5 أضعاف تكلفة إنتاج الغاز الطبيعي بالإضافة إلى التعديلات اللازمة لغرف الإشعال ومراحل التربينة، **حيث خلص البحث إلى عدة توصيات أهمها** التوسع في إنشاء محطات الطاقة الجديدة والمتجددة (شمسي–رياح) ،إنتاج الهيدروجين بالطاقة النظيفة الخالي من الانبعاثات الكربونية المؤثرة على البيئة له مردود اجتماعي واقتصادي نحو الاستدامة البيئة، العمل على خفض منحنى تكلفة إنتاج الهيدروجين والوصول إلى القدرة التنافسية لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة في عملية إنتاج الهيدروجين، قيام الشركة القابضة لكهرباء مصر بالتوسع في إنشاء محطات تحلية مياه البحر وتوطين تكنولوجيا تحلية مياه البحر باستخدام التقنيات الحديثة والتي تلعب دوراً مهم في خفض تكلفة إنتاج الهيدروجين، قيام الشركة القابضة لكهرباء مصر عند التعاقد على محطات إنتاج كهرباء جديدة يجب أن تشتمل على منظومة استخدام الهيدروجين الأخضر مع الغاز الطبيعي في عملية الحرق.

التوصيات

1- التوسع في إنشاء محطات الطاقة الجديدة والمتجددة (شمسي–رياح) حيث:

- تقع مصر في قلب الحزام الشمسي العالمي وهو بين خطي 31.5 و22 عرض شمالاً، وتتمتع معظم مساحة مصر بإشعاع شمسي مباشر ما بين 2000 و3200 كيلووات ساعة/ متر^2 سنوياً بمتوسط ساعات سطوع 10 ساعات يوميا (3600 ساعة سنويا).

- تتمتع منطقة غرب خليج السويس وعلى جانبي النيل وبعض المناطق بسيناء بسرعات رياح عالية بما يؤهل لإقامة مشروعات كبرى لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح حيث يبلغ متوسط السرعات في خليج السويس حوالي 10.5 م/ث على ارتفاع ٥٠ مترا، ومتوسط السرعات في مناطق شرق وغرب النيل تبلغ حوالي 7.5 م/ث على ارتفاع 80 متر.

مما يجعلها منجما للطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح اللتين تعدان أساسيتين في إنتاج الهيدروجين الأخضر منخفض التكلفة.

2- إنتاج الهيدروجين بالطاقة النظيفة الخالي من الانبعاثات الكربونية المؤثرة على البيئة له مردود اجتماعي واقتصادي نحو الاستدامة البيئة.

3- قيام الشركة القابضة لكهرباء مصر بالتوسع في إنشاء محطات تحلية مياه البحر وتوطين تكنولوجيا تحلية مياه البحر باستخدام التقنيات الحديثة والتي تلعب دوراً مهم في خفض تكلفة إنتاج الهيدروجين.

4- قيام الشركة القابضة لكهرباء مصر عند التعاقد على محطات إنتاج كهرباء جديدة يجب أن تشتمل على منظومة استخدام الهيدروجين الأخضر مع الغاز الطبيعي في عملية الحرق.

5- قيام الشركة القابضة لكهرباء مصر بتطبيق Blending بنسبة خلط حتى 10 % غاز هيدروجين مع الغاز الطبيعي وذلك بالمحطات ذات القدرات الصغيرة كما حدث بمحطة شرم الشيخ قدرة 48 ميغاوات حيث إن هذه العملية لا تحتاج إلى تعديلات ميكانيكية في أنظمة الحريق.

6- أهمية الاطلاع وتوطين أحدث التقنيات الحديثة في عملية تصنيع المحللات الكهربائية خاصة التي تستخدم مياه البحر مباشرة في عملية إنتاج الهيدروجين الأخضر وذلك للحد من استخدام المياه العذبة في عملية الإنتاج حيث إن زيادة إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام المياه العذبة يؤدى إلى تفاقم النقص العالمي في المياه العذبة.

المراجع

أبو الخير، محمد هاشم، (2015). تخزين الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة جامعة دمشق.

حسن، إبراهيم، (2020). الهيدروجين وتقنيات خلايا الوقود.

رجب حمدي، (2024). نظام مُحسن للإنتاج المُشترك للكهرباء/الهيدروجين الأخضر لمسارات طاقة متعددة: دراسة حالة لمصر .

الشركة القابضة لكهرباء مصر ، التقارير الإحصائية السنوية، القاهرة، (2020-2023).

علي حبيب، (2021). آفاق تطوير الهيدروجين منخفض الكربون في مصر .

عمران، محمد موسى، (2014). استراتيجية مقترحة لإمكانية استخدام الطاقة الشمسية فى توليد الكهرباء فى مصر، جامعة عين شمس، معهد البحوث والدراسات البيئية سابقاً.

فريدريش إيبرت، (نوفمبر 2020). تحديات وفرص إنتاج الهيدروجين الأخضر وتصديره من منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا إلى أوروبا.

لمياء عبد الله، (2020). تقييم انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من محطات توليد الطاقة المستقبلية في مصر.

مركز المعلومات ودعم اتخاذ القرار التابع لمجلس الوزراء المصري، (2022). توطين مشروعات إنتاج الهيدروجين الأخضر الفرص والتحديات والتوصيات.

مركز المعلومات ودعم اتخاذ القرار التابع لمجلس الوزراء المصري، (2023). بوصلة السياسات "الأطر التشريعية لتشجيع مشروعات الهيدروجين الأخضر ".

منى سامي، أماني حلمي الريس، وآخرون. (2024). إطار مقترح لعمل سوق الكربون في مصر .

وزارة التخطيط والمتابعة والإصلاح الإداري. (2017). استراتيجية التنمية المستدامة رؤية مصر 2030.

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 3178-2636

Abdallah, L., & El-Shennawy, T. (2020). Evaluation of CO2 emission from Egypt's future power plants. Euro-Mediterranean journal for environmental integration, 5(3), 49.

Almadani, M. (2023). Techno-economic and environmental optimization of a combined regenerated gas turbine and supercritical CO2 cycle based on methane and hydrogen mixture as fuel for environmental remediation. Chemosphere, 338, 139527.

De Blasio, Nicola. "The role of clean hydrogen for a sustainable mobility." Environment and Natural Resources Program Papers (2021).

Hydrogen council. (2023). "Optimizing Global Hydrogen Trade Flows Accelerates Energy Transition and Reduces Investment Costs by US$6 Trillion Across Supply Chain | Hydrogen Council".

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY Global Hydrogen Review (2021-2023).

Jin, Yonghao. "Using Hydrogen in Modern Combustor." (2021).

Onorati, A., Payri, R., Vaglieco, B. M., Agarwal, A. K., Bae, C., Bruneaux, G., & Zhao, H. (2022). The role of hydrogen for future internal combustion engines. International Journal of Engine Research, 23(4), 529-540.

Osman, M. (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.

Pashchenko, D. (2024). Green hydrogen as a power plant fuel: What is energy efficiency from production to utilization? Renewable Energy, 120033.

Ragab, R., Hamdi, M., El Salmawy, H. A., & Ismail, M. A. (2024). Optimized system for combined production of electricity/green hydrogen for multiple energy pathways: a case study of Egypt. Clean Energy, 8(4), 219-236.

Siemens, (2017). The Role of "Green" Ammonia in Decarbonising Energy Systems.

van Haersma Buma, B. N., Peretto, M., Matar, Z. M., & van de Kaa, G. (2023). Towards renewable hydrogen-based electrolysis: Alkaline vs Proton Exchange Membrane.

A PROPOSED FRAMEWORK FOR THE USE OF GREEN HYDROGEN IN POWER GENERATION STATIONS, APPLIED TO THE ELECTRICITY AND RENEWABLE ENERGY SECTOR, TO ACHIEVE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY

Hassan E. Hassan [(1)]; Yahya M. Abu Talib [(2)]; Hoda I. Hilal [(1)]
Mohamed M. Omran [(3)]

1) Faculty of Environmental Studies and Research, Ain Shams University 2) Faculty of Commerce, Ain Shams University 3) Electricity Regulatory Authority and Consumer Protection Egypt.

ABSTRACT

The research aims to calculate the cost of producing green hydrogen from the process of electrolysis of water using solar energy, and to evaluate the use of green hydrogen by mixing in different proportions with natural gas in existing power generation stations and

الترقيم الدولي ISSN 1110-0826
الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني 2636-3178

to study the economic, technical and environmental returns, **as the research methodology is based** on a number of literature prepared in the same field of study and comparative research., and the experiences of some international companies (Siemens, Germany - GE, America - Mitsubishi, Japan) working in the same field, and visiting some power generation stations and obtaining data related to the research field and analyzing them in order to reach mathematical equations through which the cost of producing green hydrogen from the process of electrolysis of water using solar energy was calculated, as well as calculating the economic, technical and environmental returns of using hydrogen in power generation stations, **as the research reached some results**, the most important of which is that the added value of applying the technology in the research field is reducing harmful environmental emissions of carbon dioxide, as it decreases by only 10%. This percentage and its material return are small compared to the large financial cost that will be spent to modify the combustion systems in existing power plants, as well as the cost of producing hydrogen And its use in the combustion process, as well as the application of ignition technology using a mixture of hydrogen with natural gas on existing stations is expensive due to the high cost of hydrogen production taking into account the cost of OPEX & CAPEX in addition to the Initial Cost of the hydrogen production station, which represents 2.5 - 5 times the cost of natural gas production in addition to the necessary modifications to the ignition chambers and turbine stages, as the research concluded with several recommendations, the most important of which is expanding the establishment of new and renewable energy stations (solar-wind), producing hydrogen with clean energy free of carbon emissions affecting the environment has a social and economic return towards environmental sustainability, working to reduce the cost curve of hydrogen production and reaching competitiveness to reduce greenhouse gas emissions in the hydrogen production process, the Egyptian Electricity Holding Company expanding the establishment of seawater desalination stations and localizing seawater desalination technology using modern technologies that play an important role in reducing the cost of hydrogen production, the Egyptian Electricity Holding Company, when contracting for new electricity production stations, must include a system for using green hydrogen with natural gas in the combustion process.

Keywords: Hydrogen production, solar electrolysis, economic, technical and environmental benefits of hydrogen use in power plants.