مجلة دراسات الإنسان و المجتمع
Human and Community Studies Journal
HCSJ
www.stcrs.com.ly
العدد 25 يناير 2025
Volume 25 January 2025
مجلة دراسات الانسان و المجتمع
Human and Community Studies Journal
تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

دراسة التكاليف الاقتصادية لتوليد الكهرباء من طاقة الأمواج البحرية

د. أحمد علي احمد العويني
الهيئة الليبية للبحث العلمي– المركز الليبي لأبحاث ودراسات المياه والتربة ومكافحة التصحر
كلية العلوم جامعة صبراتة – ليبيا
ahmed1972a@yahoo.com

المستخلص:

إن طاقة الأمواج هي بلا شك واحدة من أكثر مصادر الطاقة المتجددة الواعدة. ولأنها أقل تطوراً في الوقت الحاضر من مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، فإن النماذج الحالية لتقدير تكاليف مشروع طاقة الأمواج غالباً ما تكون مبسطة للغاية، والنتيجة المترتبة على ذلك هي التشتت في التقييمات الاقتصادية التي تثقل كاهل ثقة المستثمرين، وبالتالي تشكل عائقاً أمام تطوير طاقة الأمواج. والواقع أن فهم تكاليف طاقة الأمواج يشكل أحد المجالات الرئيسية للبحث في مجال الطاقة المتجددة البحرية. وفي هذا السياق، فإن الهدف الرئيسي من هذه الورقة هو مراجعة جميع العوامل التي يجب مراعاتها في التحليل الاقتصادي لطاقة الأمواج، بما في ذلك أخذ بعض هذه المعايير في الاعتبار تكاليف دورة حياة المزرعة والطاقة المولدة. وفي هذه الورقة العملية، نقوم بتوصيف التكاليف المباشرة وغير المباشرة لمزرعة الأمواج ـ التكاليف الأولية، والبناء، والتشغيل والصيانة، وتكاليف إيقاف التشغيل. ولكل منها قيمة مرجعية، إلى جانب صيغة عامة لحسابها. علاوة على ذلك، تتم مقارنة التكلفة المستوية، أي تكلفة إنتاج وحدة طاقة (1 كيلو وات ساعة)، بين مصادر الطاقة المختلفة، وعلى هذه الأسس يتم استخلاص استنتاجات حول الربحية والقدرة التنافسية لطاقة الأمواج.

الكلمات المفتاحية: طاقة الأمواج، الطاقات المتجددة، اقتصاديات طاقة الأمواج، تكاليف الطاقة.

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

مجلة دراسات الانسان و المجتمع
Human and Community Studies Journal
www.stcrs.com.ly
العدد 25 يناير 2025
Volume 25 January 2025
مجلة دراسات الإنسان و المجتمع
Human and Community Studies Journal
HCSJ
تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

The economic study of costs to generating electricity from marine wave energy

Dr. Ahmed Ali Ahmed Al-Awini
Libyan Center for Water, Soil, and Desertification Research and Studies
Libyan Authority for Scientific Research / Faculty of Science,
Sabratha University - Libya
ahmed1972a@yahoo.com

Abstract:
Wave energy is one of the most promising renewable energy sources. While less developed than other renewable energy sources, current models for estimating wave energy project costs are often overly simplistic. This results in fragmented economic assessments that undermine investor confidence and, consequently, hinder wave energy development. Understanding wave energy costs is a key area of research in offshore renewable energy. In this context, the main objective of this paper is to review all the factors that must be considered in the economic analysis of wave energy, including the lifecycle costs of the farm and the generated energy. Also, in this practical paper, we characterize the direct and indirect costs of a wave farm—initial costs, construction, operation and maintenance, and decommissioning costs. Each has a reference value, along with a general formula for calculating it. Furthermore, the levelized cost (the cost of producing a unit of energy (1 kWh) hence, compared among different energy sources, and on this basis, conclusions are drawn about the profitability and competitiveness of wave energy.

Keywords: Wave energy, renewable energies, wave energy economics, energy costs

المقدمة:

يواجه العالم اليوم مشكلتين رئيسيتين مباشرتين تتعلقان باستهلاك الطاقة وإنتاجها. الأولى هي انخفاض الإنتاج بسبب المخزونات المحدودة من الوقود مما يتسبب في ارتفاع الأسعار. والثانية هي المشاكل البيئية المرتبطة باستهلاك الوقود غير المنظم وغير المنضبط. ويعد تنويع وإضافة مصادر جديدة للطاقة المتجددة موضوعًا ذا صلة ومناقشة متزايدة في سياق

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:22/4/2025م

سياسات الطاقة العالمية، نظرًا لتأثيراتها البيئية الضئيلة مقارنة بطاقة الوقود الأحفوري التقليدية. ويساهم استخدام مصادر الطاقة المتجددة في :تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة ويقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والغازات الضارة الأخرى. وتعزيز أمن الطاقة ودلك بتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري المستورد ويعزز أمن الطاقة للدول بتحقيق التنمية المستدامة التي تساهم في توفير الطاقة بأسعار معقولة ومستدامة للمجتمعات، ويحفز النمو الاقتصادي في المناطق الساحلية والنائية، ويقدم مزايا بيئية مقارنة بمصادر توليد الطاقة التقليدية. ومن أبرز الطاقات المتجددة التي تظهر اليوم هي طاقة الأمواج البحرية. حيث أصبح بإمكان العالم في السنوات الأخيرة إنتاج الكهرباء من أمواج البحار والمحيطات. ان الطاقة البحرية هي مصدر متاح غير محدود والتقاط هذه الطاقة من الأمواج.

تُعَد البحار والمحيطات، التي تغطي 70% من سطح الأرض، من أكبر مستودعات الطاقة الامواج. وعلى وجه الخصوص، تنتشر الأمواج على نطاق واسع في المحيط، مع تقلباتها العنيفة، مما ينتج طاقة هائلة لم يتم استغلالها بالكامل بعد. تُعرف طاقة الأمواج بأنها طاقة نظيفة ومتجددة في مجال الطاقة العالمي مع آفاق واسعة. إن انتشارها الواسع ومحتواها الهائل وجودتها العالية تمكن طاقة الأمواج من امتلاك قيمة محتملة هائلة في سوق الطاقة العالمية. ومع ذلك، تواجه طاقة الأمواج قضايا حتمية تتمثل في انخفاض الكفاءة وعدم الاستقرار نسبيًا، ولا تزال تتطلب المزيد من الأبحاث العلمية والمزيد من الاختبارات العملية قبل استغلال القيمة المحتملة بالكامل. الطاقات البحرية المتجددة مثيرة للاهتمام للتطوير في مياه البحر الأبيض المتوسط. نظرًا للخصائص الجيومورفولوجية للبحر الأبيض المتوسط والنضج التكنولوجي إلا انه يزال قطاع الطاقة المتجددة البحرية في حوض البحر الأبيض المتوسط في بدايته. ويعتمد تطوره على سلسلة من التحديات والعقبات التي يجب التغلب عليها. كما أن نقص الخبرة العملية وقلة الدراسات التي تركز على التأثيرات المحتملة في الحوض تجعل البحر الأبيض المتوسط منطقة غير مستكشفة بالكامل فيما يتعلق بقطاع الطاقة المتجددة البحرية. فالبلدان التي تستغل الطاقة البحرية المتجددة بالفعل هي مصدر قيم للمعلومات والخبرة. من بين جميع الخيارات التقنية، تعد طاقة الرياح البحرية حاليًا أكثر أنواع الطاقة البحرية المتجددة نضجًا في البحر الأبيض المتوسط. إذ أن مستوى تطورها من

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:22/4/2025م

حيث التكنولوجيا وأطر السياسات والتسويق والقاعدة المثبتة يجعلها منطقة واعدة للتنمية الاقتصادية في المنطقة.

أصبحت التقنيات والأجهزة الخاصة بتحويل طاقة الأمواج البحرية إلى كهرباء جاهزة الآن للنشر على نطاق واسع في مزارع البحر الأبيض المتوسط، مما يسمح بالانتقال من العرض إلى التشغيل ثم إلى الاستغلال التجاري (Drew et al ،2009).

بالنظر إلى استخدام طاقة أمواج البحار و المحيطات، يُقدر أن إمكانات الطاقة العالمية المتاحة تبلغ حوالي 2.11 تيراوات وفقًا للمرجع (Gur et al،2018)، فإن حوالي 0.02٪ من الطاقة الموجودة في المحيطات ستكون قادرة على تلبية الطلب العالمي الحالي على الطاقة الكهربائية. من بين إمكانيات تسخير طاقة المحيطات، تعد تقنيات طاقة الأمواج الأكثر تطورًا، وبالتالي يمكن أن تصبح قابلة للتطبيق في الأمد القريب.

لقد اقترح الباحثون والمخترعون العديد من أنواع الأجهزة المختلفة لاستخدام طاقة الأمواج لصالح الإنسان. ومع ذلك، بعد الحرب العالمية الأولى في أواخر الأربعينيات من القرن العشرين، تضاءل الاهتمام باستغلال طاقة الأمواج منذ أن أصبح البترول المصدر الحديث الأكثر أهمية للطاقة. لكن بدأ الباحثين في استعادة اهتمامهم بالدخول في هذا المجال البحثي منذ حدوث أزمة النفط في السبعينيات.(Prendergast et al, 2018) وقد قُدِّرت الإمكانات العالمية للطاقة التي تمثلها الأمواج التي ضربت جميع السواحل في جميع أنحاء العالم، بنحو 2 تيراواط/ساعة/سنة (2 تيراواط =1012 واط). وتبلغ متطلبات استهلاك العالم من الكهرباء حوالي 16 تيراواط/ساعة/سنة. ويمكن لطاقة الأمواج وحدها أن تلبي الاستهلاك العالمي وتحل القضايا الحالية بشكل أساسي فيما يتعلق باستنفاد الوقود الأحفوري وانبعاثات الكربون. وإذا تم حصاد طاقة الأمواج في المحيطات المفتوحة، فيمكن الاستفادة من الطاقة التي تُفقَد بخلاف ذلك في الاحتكاك وكسر الأمواج. ثم يُقدَّر مدخلات طاقة الأمواج العالمية بأنها أكبر بمقدار واحد من حيث الحجم (~1013 واط)، وهي كمية قابلة للمقارنة مع استهلاك الطاقة الحالي في العالم (Prendergast et al, 2018). نظرًا لأن محول طاقة الأمواج لا يزال جديدًا أو ناشئًا مقارنة بطاقة الرياح أو الطاقة الشمسية، فإنه لا يزال في طور التطوير الأولي. وقد تم تسجيل أكثر من ألف براءة اختراع بحلول عام

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

1980. وفي عام 2008، تم تركيب أول أجهزة طاقة المحيطات التجارية المسماة SeaGen وPelami في المملكة المتحدة والبرتغال تعد طاقة الرياح البحرية و محولات طاقة الأمواج و تقنيات المد و الجزر و تحويل الطاقة الحرارية للمحيطات و الطاقة الشمسية العائمة كلها طاقات تم تطويرها بشكل متزايد في السنوات الأخيرة . كما تساهم هذه الأنواع من الطاقة البحرية ب 21.1 مليار يورو في الناتج المحلي الإجمالي للاتحاد الأوروبي،كما تضم 2122 عاملًا 15. بالإضافة إلى ذلك يمكنهم توفير ما يصل إلى 10 ٪ من احتياجات أوروبا من الكهرباء بحلول عام 2020. ومع ذلك فإن تطوير مصادر الطاقة البحرية المتجددة (MRE) في إن طاقة الأمواج هي بلا شك واحدة من أكثر مصادر الطاقة المتجددة الواعدة. ولأنها أقل تطوراً في الوقت الحاضر من مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، فإن النماذج الحالية لتقدير تكاليف مشروع طاقة الأمواج غالباً ما تكون مبسطة للغاية، والنتيجة المترتبة على ذلك هي التشتت في التقييمات الاقتصادية التي تثقل كاهل ثقة المستثمرين، وبالتالي تشكل عائقاً أمام تطوير طاقة الأمواج. والواقع أن فهم تكاليف طاقة الأمواج يشكل أحد المجالات الرئيسية للبحث في مجال الطاقة المتجددة البحرية. وفي هذا السياق، فإن الهدف الرئيسي من هذه الورقة هو مراجعة جميع العوامل التي يجب مراعاتها في التحليل الاقتصادي لطاقة الأمواج، بما في ذلك عدد من العناصر التي عادة ما يتم تجاهلها. وفي هذه العملية، نقوم بتوصيف التكاليف المباشرة وغير المباشرة لمزرعة الأمواج ـ التكاليف الأولية، والبناء، والتشغيل والصيانة، وتكاليف إيقاف التشغيل ـ فضلاً عن الدخل المتوقع. ولكل منها قيمة مرجعية، إلى جانب صيغة عامة لحسابها. علاوة على ذلك، تتم مقارنة التكلفة المستوية، أي تكلفة إنتاج وحدة طاقة (1 كيلو وات ساعة)، بين مصادر الطاقة المختلفة، وعلى هذه الأسس يتم استخلاص استنتاجات حول الربحية والقدرة التنافسية لطاقة الأمواج. باختصار.

مشكلة البحث:

تسعى دول العالم إلى الحد من استخدام الطاقة الأحفورية في توليد الكهرباء، لما تسببه من تلوث بيئي. فلجأت إلى الطاقات المتجددة لتحقيق التنمية المستدامة ويرجع قلة استخدام

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:22/4/2025م

طاقة الأمواج إلى نقص الدراسات والمعوقات الفنية والمالية. حيث تكمن مشكلة هده الدراسة في التساؤلات الأتي:

– ما هي البدائل المتاحة لطاقة الوقود الاحفوري في ليبيا.

– كيف يؤثر استخدام طاقة الوقود الاحفوري على البيئة في ليبيا.

أهداف البحث:

- تناول البحث مفهوم وأهمية طاقة الأمواج.
- بينان تكلفة طاقة الأمواج ومقارنتها مع الطاقات المتجددة الأخرى.
- بيان أهمية استخدام طاقة الأمواج ومدي الاستفادة منها.
- تقديم توصيات لتعزيز استخدام الطاقات المتجددة في ليبيا

أهمية البحث:

تكمن أهمية هذا البحث في تسليط الضوء على طاقة الأمواج البحرية كمورد أساسي للطاقة، وتوعية المجتمع حول أهمية استخدام مصادر الطاقات المتجددة والحفاظ على البيئة. حيث يمكن استغلال طاقة الأمواج في تلبية احتياج الطلب على الطاقة في المدن الساحلية المكتظة بالسكان وتقليل الاعتماد على الوقود الاحفوري لتوفير بيئة نظيفة والحد من انبعاث الغازات الدفينة. تقديم معلومات قيمة لصانعي السياسات في ليبيا لتعزيز استخدام الطاقات المتجددة.

حدود المكانية: محطات توليد طاقة الأمواج في حوض البحر الأبيض المتوسط.

منهج البحث:

تم استخدام المنهج الوصفي من خلال جمع البيانات وعرضها في جداول وأشكال بيانية.

الدارسات السابقة:

ركزت العديد من الأبحاث على دراسة اقتصاديات طاقة الأمواج في منطقة محددة، استنادًا إلى البيانات المتاحة من أمواج البحر او المحيط. وحدد المرجع (Patel et al 2022,) مواقع محتملة، وقيّم الجدوى الفنية والاقتصادية لتسخير طاقة الأمواج على طول الساحل الهندي. حلل الباحثون أربع تقنيات مختلفة لتحويل طاقة الأمواج: Wave Dragon، وPelamis، وOceantec، وAquabuoy. ووجدوا أن التقنية الأكثر جدوى اقتصاديًا هي

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

جهاز Oceantec، الذي تراوحت تكلفة الطاقة المُحلية له بين 354 و505 يورو/ميغاواط/ساعة في جميع المواقع.

دراسة(Ramos et al , 2022) الفوائد المحتملة لوضع جهاز طاقة الأمواج في موقع مشترك مع مزرعة رياح عائمة بحرية تقع قبالة ساحل شمال البرتغال. وخلص الباحثون إلى أن المزرعة المشتركة ستزيد إنتاج الطاقة بنسبة 19%، وأن مستوى تكلفة الطاقة المُحلية مع مزرعة أمواج مشتركة يبلغ 105 يورو/ميغاواط/ساعة.

دراسة (Saheli et al, 2022) يدرس جدوى نظام هجين من الطاقة الكهروضوئية الموجية في ثلاثة موانئ إيرانية. ووجدوا أن أقصى إنتاج للطاقة حدث في شهر مايو وأن أدنى إنتاج للطاقة حدث في شهر نوفمبر. بالنسبة للموانئ، وجدوا قيم تكلفة الطاقة الموجية تتراوح بين 4420 يورو/ميغاواط ساعة، و5010 يورو/ ميغاواط ساعة، و5120.

دراسة (Santos et al, 2021) درس الجدوى الاقتصادية لجهازين لتحويل طاقة الأمواج على طول ساحل البرازيل: بيلاميس و ويف دراغون. ووجدوا قيمة تكلفة الطاقة الموجية لجهاز بيلاميس 149 يورو/ميغاواط ساعة و126 يورو/ميغاواط ساعة لجهاز ويف دراغون.

دراسة (Castro et al , 2020) بحث في الجدوى الاقتصادية لأجهزة بيلاميسوأكوا بوي وويف دراغون قبالة ساحل شمال إسبانيا. وجدوا أفضل قيم لجهاز Wave Dragon عند 513.17 يورو/ ميغاواط ساعة، وجهاز Pelamis عند 1710.98 يورو/ ميغاواط ساعة وجهاز AquaBuoy عند 2627.60 يورو/ ميغاواط ساعة.

في **(Castro et al , 2020)** ، بحث المؤلفون في الجدوى الاقتصادية لنفس الأجهزة. ووجدوا هنا أن قيمة تكلفة الطاقة الناتجة باستخدام جهاز Wave Dragon تبلغ 316.90 يورو/ميغاواط ساعة، و ترتفع قيمتها لجهاز Pelamis تبلغ 735.94 يورو/ميغاواط ساعة، بينما بلغت قيمة التكلفة للطاقة الناتجة 2967.85 AquaBuoy يورو/ميغاواط ساعة.

دراسة (Castro et al, 2015) بحث في الجدوى الاقتصادية لجهاز عمود الماء المتذبذب (OWC) ذي القناة المنحنية للخلف. قام المؤلفون بدراسة الجوانب الاقتصادية فيما يتعلق بثلاثة معدلات خصم مختلفة، وثلاثة مستويات مختلفة للكفاءة، واثنين من

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:22/4/2025م

تكاليف رأس المال الأولية المختلفة بوحدات يورو/كيلوواط من الطاقة المقدرة. تراوحت قيم تكلفة الطاقة المستوية من 81 يورو/ميغاواط ساعة مع انخفاض قيمة تكلفة رأس المال، وأقصى مستوى للكفاءة، وأقل معدل خصم، إلى 1335 يورو/ميغاواط ساعة مع ارتفاع تكلفة رأس المال الأولية، وأدنى مستوى للكفاءة، وأعلى معدل خصم.

في السنوات الأخيرة، كان هناك تركيز خاص على استخدام مصادر الطاقة المتجددة في المحيطات لتزويد منصات النفط والغاز من أجل تقليل استهلاك الطاقة لاستخراج النفط والغاز. حيث بينت الدراسة التي أجراها **(Oliveira et at ,2019)** لتقييم الأداء والجدوى الاقتصادية لسبعة أجهزة طاقة أمواج لموقع دراسة حالة يقع في منصة نفط وغاز في بحر الشمال. ووجدوا أن الأداء الهيدروديناميكي لجهاز طاقة الأمواج لا يرتبط بالضرورة ارتباطًا مباشرًا بالجدوى الاقتصادية. ووجدوا أن تكلفة الطاقة المستوية تتراوح من 188 يورو/ميغاواط ساعة إلى 471 يورو/ميغاواط ساعة. في دراسة أخرى قام بها**(Oliveira et at ,2020)** ، لدراسة مدى جدوى تطبيق أنظمة طاقة شمسية وأمواج مدمجة لتزويد منصات النفط والغاز البحرية بالطاقة. قيّموا أربعة محولات طاقة أمواج ونظام طاقة شمسية واحد لثلاثة سيناريوهات: طاقة الأمواج فقط، والطاقة الشمسية فقط، وكلاهما معًا. أظهرت النتائج أن الجمع بين مصادر الكهرباء زاد من إنتاج الكهرباء، وخفض التباين السنوي في إنتاج الطاقة ومشاكل الانقطاع، وزاد عوامل السعة بنسبة تصل إلى 24%، وتجنب الإفراط في القياس. تراوح مستوى تكلفة الطاقة المستوية من 131 يورو/ميغاواط/ساعة إلى 263 يورو/ميغاواط/ساعة، وقُدِّر الانخفاض في الانبعاثات بحوالي 281,915 طنًا/سنة.

توجد دراسة تتعلق بالجدوى الاقتصادية لمحولات طاقة الأمواج لجزر فارو، والتي قد تثبت، وفقًا لدراسة **(Oliveira et at ,2019)**، أنها مناسبة لأول مجتمع حقيقي يعمل بالكامل على طاقة الأمواج لتوليد الكهرباء. قد تثبت الدراسة إن إنتاج الكهرباء من طاقة الأمواج حل مثالي للجزر الصغيرة مجتمعات الجزر الصغيرة، حيث أن الطلب ليس مرتفعًا كما هو الحال في شبكة الكهرباء عبر الدول والمدن الكبرى.

تاريخ طاقة الأمواج:

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

في عام 2007، تعهد الاتحاد الأوروبي بتحويل أوروبا إلى اقتصاد عالي الكفاءة في استخدام الطاقة ومنخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، ملتزمًا بخفض 20٪ من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وخفض 20٪ من استهلاك الطاقة وتحقيق هدف 20٪ من إجمالي استهلاك الطاقة في الاتحاد الأوروبي من الطاقة المتجددة (التوجيه EC/28/2099). كان التركيز الرئيسي لهذه السياسة على طاقة الرياح والطاقة الشمسية. ومع ذلك، من أجل الوصول إلى النسب المطلوبة، من الضروري تطوير أشكال أخرى من الطاقة المتجددة الأقل تطوراً في الوقت الحاضر ولكن ذات إمكانات عالية، مثل الطاقة البحرية – التي تحملها أمواج المحيط والمد والجزر.من بين هذه البدائل المختلفة، تركز هذه الورقة على طاقة الأمواج ، والتي، على الرغم من أنها في مرحلة أولية من التطوير، تقدم إمكانيات واسعة للمستقبل بفضل إمكاناتها الهائلة لإنتاج الكهرباء، بنفس الطريقة مثل طاقة المد والجزر أو طاقة الرياح البحرية. في الواقع، تقدر موارد طاقة الأمواج العالمية بنحو 17 تيراوات ساعة / سنة (Cotten et at ,2020) ، مع أكبر قيم لمتوسط طاقة الأمواج في خطوط العرض المتوسطة (بين 30 درجة و 60 درجة) (الشكل 1). ومع ذلك، فإن الحواجز الرئيسية في تطوير الطاقات البحرية هي:

(أ) المرحلة المبكرة من تطوير التقنيات

(ب) عدم اليقين بشأن التأثيرات الساحلية والبحرية لمزارع الأمواج.

(ج) حقيقة أنها اعتبرت غير اقتصادية.

وبهذا المعنى، لا يمكن المبالغة في أهمية التقييم الاقتصادي لطاقة الأمواج في الواقع، فإن الجدوى الاقتصادية هي شرط لا غنى عنه لتطوير هذه الطاقة المتجددة الجديدة؛ فهي تنطوي على تقييم مفصل للتكاليف والأرباح الخاصة (الدخل) المرتبطة بالاستثمار في هذه التقنيات. بهذه الطريقة، فإن الغالبية العظمى من الدراسات حول هذا المجال تستند إلى هذه النقطة الأخيرة؛ في الواقع، من الممكن العثور على دراسات حول ربحية طاقة الأمواج في مواقع محددة وفقًا لنظام الشحن الحالي. على سبيل المثال، تركز (Lavidas et at) 2021, كذلك (Astariz et at ,2015)على الاقتصاد الأيرلندي، وتحلل التأثيرات على الاقتصاد الأسكتلندي لتركيب 3 جيجاوات من طاقة الأمواج: التأثير على الناتج المحلي

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

الإجمالي، وخلق فرص عمل جديدة، وما إلى ذلك. ومع ذلك، نظرًا لأن تكنولوجيا طاقة الأمواج في مرحلة أولية من البحث. ومن الصعب تقدير تكاليف وأداء الجهاز وبقية التركيب، فإن الجزء الأكبر من الدراسات الاقتصادية الحالية مبسطة للغاية، وقد يؤدي هذا إلى انعدام الأمن لدى المستثمرين. في هذا السياق، تحدد هذه الورقة التكاليف المختلفة المتكبدة في مزرعة طاقة الأمواج وقيمها المتوقعة وتطورها المستقبلي. باستخدام هذه المعلومات، يتم حساب التكلفة المستوية (€/MW h) ومقارنتها بتكلفة موارد الطاقة الأخرى؛ بالإضافة إلى ذلك، يتم تحليل الدخول المتوقعة لمزارع طاقة الأمواج (Cyprien et at) .,2014

مميزات طاقة الأمواج:

1. إنها مصدر طاقة غير تقليدي مجاني.

2. في حالة طاقة الرياح والطاقة الشمسية، تكون نقطة توليد الطاقة أو تراكمها هي نفس النقطة التي تقع فيها الاستهلاك، بينما في حالة طاقة الأمواج، يعتمد تركيز الطاقة على معلمات مثل الوقت والمكان الذي تم نقلها من خلاله حيث حدث نقل الطاقة الأولي. طاقة الشمسية وطاقة الرياح

3. تجعل محولات طاقة الموجة المياه في حالة هادئة بعد استخراج الطاقة وبالتالي لا تنتج أي تلوث أو منتجات ثانوية.

4. يمكن لأنظمة طاقة الموجة تقليل التآكل في مناطق الموانئ أو مناطق التآكل الساحلية، وبالتالي تعمل كمصد أمواج.

سلبيات طاقة الموجة:

1. طاقة الموجة متاحة للمدن القريبة من البحار والمحيطات فقط.

2. يجب تصميم هذه الأجهزة لتحمل الظروف البيئية القاسية التي يمكن أن تحدث مثل الأمواج العاتية والأعاصير وما إلى ذلك، مما سيؤثر بالتأكيد على الاستثمار الرأسمالي الأولي للنظام.

3- على الرغم من تصميم عدد من محولات طاقة الأمواج، إلا أن القليل منها فقط يستخدم تجارياً. وذلك بسبب التصميمات المعقدة المقترحة لاستخراج الطاقة.

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:22/4/2025م

4. الجوانب الاقتصادية مثل الاستثمار الرأسمالي وتكلفة الصيانة وتكلفة الاستبدال عالية ، وذلك بسبب الظروف البيئية البحرية.

ولا يزال قطاع الطاقة المتجددة البحرية في حوض البحر الأبيض المتوسط في بدايته، ويعتمد تطوره على سلسلة من التحديات والعقبات التي يجب التغلب عليها، كما أن نقص الخبرة العملية وقلة الدراسات التي تركز على التأثيرات المحتملة في الحوض تجعل البحر الأبيض المتوسط منطقة غير مستكشفة; كليا فيما يتعلق بقطاع الطاقة المتجددة البحرية، على الرغم من وجود العديد من الأبحاث والدراسات حول تكنولوجيا طاقة الأمواج ، إلا انه لا يزال هناك العديد من الدارسات التي تجرى يوميا عل طاقة الأمواج . لقد كافح العلماء لقرون من الزمان لإيجاد طريقة للاستفادة من الطاقة في البحار و المحيطات، وقد ظهرت سلسلة من الأبحاث والدراسات المختلفة لفهم طاقة الأمواج على مر السنين عقب أزمة النفط في منتصف السبعينيات، وبدأ البحث في الظهور في أوروبا في منتصف الثمانينيات، و قررت العديد من الحكومات في دول مختلفة أن تراهن على مشاريع استغلال الطاقة مع إنشاءات مصنفة بقدرة 2 جيجاوات أو أكثر (Raventosee et at ,2010). وكانت النتيجة أن العديد من المشاريع الأصغر واجهت مشاكل في التمويل واضطرت إلى التخلص التدريجي من أبحاثها ومعداتها.(Previsic et at ,2004) وبعد حوالي 15 عامًا، بدأ البحث في هذا المجال في النمو مرة أخرى، واليوم يوجد عدد من مشاريع طاقة الأمواج المختلفة الجارية مع ممثلين من جميع أنحاء العالم. في عام 2007، كان هناك ما يقرب من 75 مشروعًا مختلفًا وحوالي 16 منها قد وصلت إلى نموذج أولي كامل النطاق تم اختباره في ظروف البحر الحقيقية(Evangelos et al, 2024). هناك طرق عديدة يمكن بموجبها تصنيف التكنولوجيات المستخدمة لتحويل طاقة الأمواج ، من خلال الطريقة التي يتم بها تحويل طاقة الأمواج إلى طاقة ميكانيكية، أو عن طريق التكنولوجيا المستخدمة.

تمتلك طاقة الأمواج أيضاً القدرة على تحفيز النمو الاقتصادي، حيث يمكن لقطاع طاقة الأمواج أن يخلق وظائف في التصنيع والتركيب والصيانة، مما يساهم في الاقتصاد الأخضر، بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن توفر طاقة الأمواج مصدراً للطاقة للمجتمعات الساحلية النائية، مما يقلل من اعتمادها على الوقود المستورد باهظ الثمن.

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:22/4/2025م

الوضع الحالي في القرن الحادي والعشرين:

في القرن الحادي والعشرين، خطت تكنولوجيا طاقة الأمواج خطوة تدريجية نحو النضج، وقد نما الاهتمام الدولي الهائل بتكنولوجيا طاقة الأمواج منذ عام 2000، حيث قام المستثمرون التجاريون والحكومات في بلدان مختلفة بوضع المزيد من الاستثمارات في طاقة الأمواج. وقد أنشأت كل من اسكتلندا وكورنوال مراكز للطاقة البحرية، تقدم مرافق للباحثين لإجراء التجارب البحرية. في عام 2007، أجرت محطة طاقة الأمواج العائمة المتذبذبة Aqua Buoy في كندا تجربة بحرية على ساحل ولاية أوريجون بالولايات المتحدة الأمريكية، وقد أثبت هذا الجهاز كفاءة عالية في الالتقاط وقيمة التطبيق في الجهاز، في الوقت الحاضر، تم تصنيع العديد من الأجهزة بنجاح وتسويقها في السوق الدولية. في الوقت الحاضر، تعد مولدات Pelamis في المملكة المتحدة هي أكثر معدات طاقة الأمواج تقدمًا، والتي حققت بشكل أساسي تطبيقًا تجاريًا دوليًا. لقد أصبحت الفوائد الاقتصادية المترتبة على استخدام تقنيات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح– بالإضافة إلى فوائدها البيئية – مقنعة الآن. ونظرًا لارتفاع أسعار الوقود الأحفوري، شهدت الفترة 2021–2022 واحدة من أكبر التحسينات في القدرة التنافسية للطاقة المتجددة في العقدين الماضيين.

التكاليف الرئيسية لطاقة الأمواج:

يمكن أن يوفر حساب تكلفة الطاقة الموحدة للطاقة مقياساً مفيداً للمقارنة بين المشاريع والتقنيات أو مصادر الطاقة البديلة، وفي الآونة الأخيرة تم استخدام نهج تكلفة الطاقة الموحدة باستخدام تقنيات الخصم لتقييم تدفقات التكلفة المستقبلية وإنتاج الطاقة وتقييم أدائها الاقتصادي في مشاريع طاقة الأمواج (Bedard et al, 2007). استخدمت معظم مشاريع الطاقة الموجية تكلفة الطاقة الموحدة لتقييم خصائصها الفنية والاقتصادية. ونظرًا للكمية المحدودة من الكهرباء المولدة بواسطة محولات طاقة الأمواج حتى الآن، فإن تقنيات استخدام طاقة الأمواج لا تزال في مرحلة ما قبل التجارية. ومع ذلك من أجل جذب الاستثمار الخاص لمطوري تكنولوجيا الطاقة الموجية، من الأهمية بمكان أن يحصلوا على تقديرات واقعية لتكلفة الطاقة الموحدة. هناك بعض طرق تكلفة الطاقة الموحدة المختلفة في الأدبيات، مثل تكلفة الطاقة السنوية، ونموذج التكلفة المستوية العشوائية للطاقة ، وطرق

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

تحسين أخرى تستند إلى تكلفة الطاقة الموحدة ؛ كما تم تطبيق تكلفة الطاقة المولدة من الأمواج المعكوسة لإيجاد إمكانات خفض تكلفة طاقة الأمواج.

التكاليف الرئيسية في محطة طاقة الأمواج هي التالية:

(أ) تكلفة ما قبل التشغيل.

(ب) تكاليف البناء.

(ج) النفقات التشغيلية.

الجدوى الاقتصادية لأجهزة طاقة الأمواج:

خلال الفترة الأولى من البحث والتطوير المكثف في مجال استخراج طاقة الأمواج (1973–1976) تم التركيز على اكتساب الخبرة في تصميم وبناء أجهزة طاقة الأمواج (WPD) ولم يتم التركيز على المشاكل الاقتصادية ذات الصلة. ولكن حتى التقييمات الأولية التي أجريت في ذلك الوقت سلطت الضوء على أن تكلفة الطاقة المنتجة في مشاريع WPD الأولى هذه كانت أعلى من الطاقة المنتجة بواسطة محطات الطاقة التقليدية (خاصة عندما لم تأخذ مثل هذه الحسابات في الاعتبار الجوانب البيئية لإنتاج الطاقة). اختلفت نتائج مثل هذه التقييمات بشكل كبير، حيث تم تقديم القيم المنخفضة من قبل مؤلفي المشروع أنفسهم.

وفي عام 1975، تراوحت التكلفة المحددة المحسوبة لـ WPD في بعض المشاريع في بريطانيا العظمى من 300 دولار إلى 1200 دولار للكيلووات المركبة. في عام 1979، توقعت وحدة دعم تكنولوجيا الطاقة (بريطانيا) أرقامًا أخرى تتراوح من 8000 دولار إلى 18000 دولار للكيلووات المركبة (Aderinto et al , 2019).

كانت تكلفة الطاقة المنتجة بواسطة أول محطة طاقة موجية 0.42–1.05 دولار أمريكي لكل كيلووات ساعة، وهو ما يزيد كثيراً عن تكلفة الطاقة المنتجة بواسطة محطات الطاقة التقليدية، وعلاوة على ذلك، كانت المشاريع التي تم تطويرها في ذلك الوقت تهدف إلى توفير الطاقة لدول بأكملها أو حتى مناطق، وبالتالي تتطلب تكاليف رأسمالية باهظة، على سبيل المثال تم تقدير تكلفة المشروع الذي اقترحه س. سولتر (بريطانيا) بما يعادل عدة دولارات من الناتج المحلي الإجمالي لهذه الدولة الغنية.

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:22/4/2025م

في أواخر السبعينيات، انخفضت أسعار النفط بشكل كبير وانخفض الاهتمام بإنتاج طاقة الأمواج، وتم تقليص العديد من برامج البحث والتطوير الوطنية لطاقة الأمواج. توقع عدد قليل فقط من العلماء والمهندسين في اليابان – إحدى أوائل الدول التي بدأت في استخدام طاقة الأمواج، في عام 1976 أن تكلفة طاقة الأمواج يمكن أن تنخفض في المستقبل إلى 0.03 دولار أمريكي لكل كيلووات ساعة، وهو أقل من تكلفة الطاقة المنتجة محطات الطاقة الحرارية والنووية. اليوم اكتسبت الصناعة الخبرة ليس فقط في التصميم والبناء ولكن أيضًا في تشغيل WPD. تم تحديد أكثر أنواع المحولات الأولية والثانوية لطاقة الموجات فعالية. أدى التطور السريع لبناء WPD إلى خفض تكلفة الطاقة إلى 0.10–0.31 دولار كيلووات/ ساعة وحتى أقل لبعض الإنشاءات. على سبيل المثال في مشروع جزيرة موريشيوس كانت التكلفة المحسوبة للطاقة لـ 5 ميجاوات0.085 WPD دولار كيلووات/ ساعة ولـ 20 ميجاوات0.068 – WPD دولار كيلووات/ ساعة. (Martin et al ,2020)

إن مشروع WPD الذي تم تطويره في السويد أكثر تفاؤلاً. في هذا المشروع تقوم حوالي 30 وحدة WPD بتزويد توربين عالي الرأس بالمياه مثبت على الشاطئ. التكلفة المحسوبة للكيلووات المركبة لهذا المصنع حوالي 1260–2520 دولارًا وتكلفة الكهرباء حوالي 0.034 دولارًا كيلووات / ساعة لتكون تكلفة الكهرباء المنتجة بواسطة محطات الطاقة النووية السويدية 0.037 دولارًا كيلووات/ ساعة.

وباعتبارها أول محطة طاقة صناعية في العالم تعمل بالموجات، والتي تم بناؤها في النرويج والتي تستخدم منحدراً ينكمش باتجاه الأعلى، فقد بلغت تكلفة الكهرباء 0.084 دولار لكل كيلووات ساعة، وبالنسبة لمحطة أخرى تستخدم عموداً مائيًا متذبذباً – حوالي 0.63 دولار لكل كيلووات ساعة.

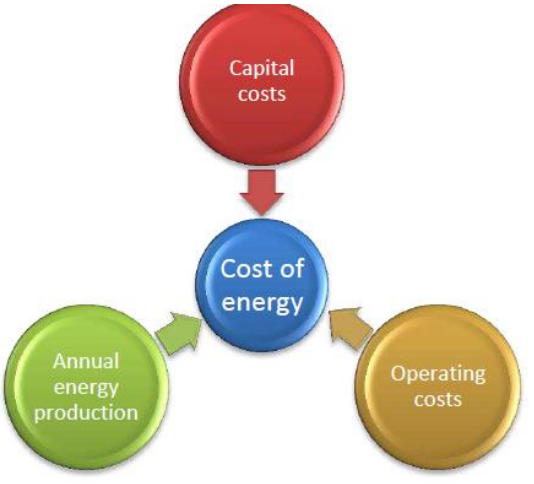
تكلفة توليد الطاقة:

تكلفة الطاقة هي مقياس لتوليد الكهرباء مع الأخذ في الاعتبار جميع تكاليف العمر الافتراضي وإنتاج الطاقة (الشكل1). يتم قياس تكلفة الطاقة من خلال معادلة إنتاج الطاقة

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

مع التكاليف المقدرة، مما يعطي تكلفة الطاقة بالدولار/ كيلووات ساعة (لجنة المرافق العامة في سان فرانسيسكو2009)



الشكل -1- العوامل المؤثرة على تكلفة الطاقة

تحليل تكلفة تحويل طاقة الأمواج:

كما ذكرنا أعلاه، فإن استخراج طاقة الأمواج مكلف للغاية حالياً بحيث لا يمكن اعتباره مصدراً ذا مغزى للطاقة المتجددة. يمكن تقسيم تكلفة استخراج طاقة الأمواج إلى أربع فئات أساسية: الإنتاج والتركيب والصيانة والاتصال بالشبكة، نظراً لأن هذه التكاليف تختلف على نطاق واسع بين المستخلصات المختلفة، فمن الصعب تقدير تكلفة إنتاج محول طاقة الأمواج، على سبيل المثال تكلفة الاتصال بالشبكة الكهربائية أقل بكثير بالنسبة للمستخرجات الساحلية مقارنة بالمستخرجات البحرية نظرًا لأنه يجب تركيب وصيانة عدد أقل من الكابلات وبالمثل تكون تكاليف التركيب والصيانة أعلى بكثير بالنسبة للأجهزة البحرية مقارنة بالأجهزة الساحلية نظرًا لأن المواقع البحرية يصعب الوصول إليها.

ومع ذلك، فمن المرجح أن تعمل الأبحاث المستقبلية على تقليل معظم هذه التكاليف بهامش كبير. ومن المرجح أن تسفر الأبحاث المستمرة عن مستخلصات أرخص وأكثر كفاءة مما يقلل من تكاليف الإنتاج. أيضًا، يتم إنتاج المستخلصات حاليًا فقط في دفعات صغيرة

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

للبحث نظراً لأنها تنتج على نطاق أوسع للاستخدام على نطاق واسع، فإن صناعة الإنتاج ستستفيد من اقتصاد الحجم الذي سيقلل أيضًا من تكاليف الإنتاج.

التكلفة المتساوية للطاقة: The Levelised-Cost-of-Energy (LCoE)

تعتبر التكلفة المتساوية للطاقة مقياسًا مهمًا عند مناقشة النشر المحتمل لأي جهاز معين لتوليد الطاقة. ومن المرجح أن تكون تكلفة إنتاج (وشراء) الطاقة هي المقياس السائد عند التخطيط للنشر المحتمل لأي نوع من محطات الطاقة – طاقة الرياح، والطاقة الشمسية، وطاقة المد والجزر، وطاقة الأمواج، والطاقة الحرارية، وما إلى ذلك. تُعرَّف التكلفة المتساوية للطاقة بأنها التكلفة الإجمالية لتشغيل وتشغيل وصيانة محطة الطاقة مقسومة على إجمالي الطاقة المنتجة على مدار عمر المحطة.

الإمكانات والأهداف والآفاق المستقبلية:

أشارت العديد من نتائج الأبحاث إلى أن طاقة الأمواج هي واحدة من أكثر مصادر الطاقة الواعدة، وفي أوروبا، من المستهدف أن تصل نسبة الطاقة المتجددة إلى 20% من إجمالي الطاقة بحلول عام 2020 (Castro et al , 2014)). وعلى المدى الطويل، من المتوقع أن تكون طاقة الأمواج على طول الساحل الأوروبي قادرة على تغطية الطلب على الكهرباء في أوروبا الغربية بالكامل. ويعمل النمو والنجاح في سلسلة من النماذج الأولية على تعزيز نشر البحث والتطوير إلى بلدان أخرى بما في ذلك البرازيل والصين وروسيا والهند وجنوب إفريقيا وبعض بلدان المنطقة الآسيوية، تتمتع طاقة الأمواج بإمكانات عالية، ومع ذلك فإن تقنيات طاقة الأمواج متخلفة كثيرًا مقارنة بتقنيات الطاقة المتجددة الأخرى، ويرجع هذا إلى الحواجز في السياسات والسوق والاقتصاد والمعرفة والتكنولوجيا والبيئة والاجتماعية.

حساب التكلفة:

يتم حساب تكلفة دورة حياة مزرعة طاقة الأمواج العائمة (Castro et al , 2014))، تكلفة دورة حياة مزرعة طاقة الأمواج العائمة البحرية (FOWF) مع مراعاة كل مرحلة من مراحل دورة حياتها، كما هو موضح في المعادلة (1) تبين كيفية حساب تكلفة دورة النظام الواحد. حيث كلفة التعريف (C1)، تكلفة التصميم (C2)، تكلفة التصنيع (C3)، تكلفة التركيب (C4)، تكلفة الاستغلال (C5)، تكلفة التفكيك ((C)

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

LCSFOWFn = C1 + C2 + C3 + C4 + C5 + C6 .....(1)

تعكس تكلفة التعريف (C1) جميع الدراسات الأولية لتطوير مزرعة طاقة الأمواج، على سبيل المثال، التوزيع المكاني والزماني لموارد الطاقة البحرية لتحديد أفضل موقع لتثبيت المزرعة والجدوى الاقتصادية لها، من بين أمور أخرى. تتكون تكلفة التعريف من: دراسة السوق (C11) والعوامل التشريعية (C12) وتصميم المزرعة (C13)، كما هو موضح في المعادلة (2):تعبر عن هذه التكلفة على النحو التالي:

C1 = C11 + C12 + C13 .....(2)

حيثC11هي تكلفة دراسة الجدوى الأولية، وC12 مرتبطة بضرائب الدولة، بينما C13 تعتمد على تكلفة الدراسة المتعلقة بتوفر موارد الطاقة، وحالة البحر، والخصائص الجيوتقنية لقاع البحر. وتحديدًا:

تحلل تكاليف التصميم والتطوير (C2) تكاليف الهندسة التفصيلية للمزرعة وإدارتها (Castro et al , 2024). وتختلف التكلفة الإجمالية للتصميم والتطوير وفقًا لتكلفة وحدة التصميم والتطوير (Cga)، وعدد وحدات توليد الطاقة (NA) وقوتها لكل وحدة (PA)، بالميجاواط، كما هو موضح في المعادلة (3):

C2 = Cga × NA × PA.....(3)

تتضمن تكاليف الأنظمة الكهربائية تكلفة الكابل وتكلفة المحطة الفرعية. كما تأخذ تكلفة التصنيع (C3) في الاعتبار تكاليف تصنيع المولدات (C31)، والمنصات العائمة (C32)، والمراسي (C33)، والمراسي (C34) والأنظمة الكهربائية (C35)، كما تبين المعادلة (4) كيفية حساب تكلفة التصنيع (Castro et al , 2024):

C3 = C31 + C32 + C33 + C34 + C35.....(4)

تتضمن تكلفة التركيب (C4) تكلفة تركيب جهاز التوليد (C41) والمنصات العائمة (C42) والمراسي (C43) والنظام الكهربائي (C44). كما تتضمن أيضًا تكلفة بدء التشغيل (C45)، كما هو موضح في المعادلة (5):

C4 = C41 + C42 + C43 + C44 + C45..... (5)

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

تتكون تكلفة الاستغلال (C5) من عدة تكاليف فرعية: التأمين (C51)، والإدارة والتنظيم (C52)، والتشغيل والصيانة (C53) (O&M)، كما هو موضح في المعادلة (6):

C5 = C51 + C52 + C53.....(6)

يجب تفكيك مزرعة الأمواج في نهاية دورة حياتها لتترك الموقع البحري كما كان في البداية. أولاً، يتم تفكيك المزرعة، ثم بيع المواد المتحصل عليها (الفولاذ والنحاس وما إلى ذلك) (باعتبارها تكلفة سلبية). لذلك، تعتمد تكلفة التفكيك (C6) وعلى تكلفة تفكيك أجهزة التوليد (C61) والمنصات العائمة (C62) وأنظمة الربط والتثبيت (C63) والنظام الكهربائي (C64). كما أنها تشمل تكلفة تنظيف المنطقة(C65) وتكلفة إزالة المواد (C66)، كما هو موضح في المعادلة (7):

C6 = C61 + C62 + C63 + C64 + C65 + C66..... (7)

تفصيل تكاليف رأس المال لمحولات طاقة الأمواج:

وتختلف التكلفة المرتبطة بمشاريع طاقة الأمواج بشكل كبير حسب الموقع، حيث يحدد الموقع البنية الأساسية وسعة الموارد. وبالنسبة لمنطقة المحيط الهادئ، هناك العديد من أوجه عدم اليقين بشأن التكلفة نظرًا لعدم تنفيذ أي مشاريع مماثلة حتى الآن. بالإضافة إلى ذلك، فإن المعلومات المتعلقة بالموارد والبنية الأساسية لمشاريع الطاقة البحرية نادرة للغاية في المنطقة لإجراء مثل هذه التقييمات. ومع ذلك، فإن العديد من مشاريع بيلاميس والدراسات المفاهيمية جارية على مستوى العالم دالتون (Dalton et al, 2010) وقد تم إجراء تحليل للتكلفة لكل مشروع. وبالتالي، يمكن استقراء تقديرات التكلفة الإرشادية المناسبة لمنطقة المحيط الهادئ والبحر الأبيض المتوسط من هذه التقارير.

ويشار إلى التكاليف الرئيسية المرتبطة بأجهزة طاقة الأمواج البحرية بمراكز التكلفة (كاربون تراست 2006). وتشمل هذه:

1. الجهاز
2. الشحن
3. الإرساء/الأساسات
4. التركيب

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

5. التشغيل والصيانة
6. إعادة التجهيز في منتصف العمر
7. إيقاف التشغيل.

توفر دراسات الجدوى الأولية لطاقة الأمواج (Waveplam 2009b) مقياسًا إرشاديًا لـ لتكلفة الأولى لـ WEC. يتم عرض تكلفة لـ WEC وفي الجدول (1). لاحظ أن تكلفة كل عنصر تنعكس كنسبة مئوية من التكلفة الأولية لجهاز الموجة نفسه. وبالتالي فإن إجمالي تكلفة رأس المال تتوافق مع 252٪ من تكلفة الجهاز.

الجدول رقم 1 تفصيل تكلفة رأس المال كنسبة مئوية من تكلفة الجهاز الأولية

Percentage of device cost نسبة تكلفة الجهاز	Capital cost تكلفة رأس المال
%100	تكلفة الاستبدال Replacement cost
%33	تركيب الجهاز والرسو Installation of device and mooring
%10	رسو Mooring
%10	الكابلات Cabling
2%	قطع غيار Spare parts
2%	الموقع والتصاريح Siting and permits

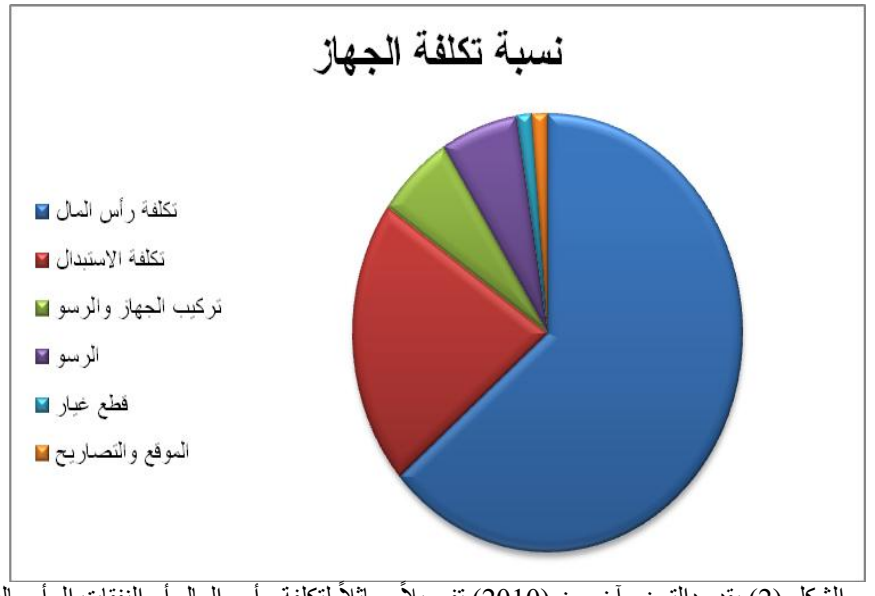
لمحولات طاقة الأمواج التي تم اعتمادها لهذه الدراسة. يمكن تجميع تكلفة رأس المال في أربع فئات:

i. تكلفة الجهاز نفسه (المواد والمكونات والعمالة)؛
ii. تكلفة الحفاظ عليه في مكانه (الرسو والأساس)؛
iii. التكلفة المرتبطة بالنشر والتركيب؛ و
iv. تكلفة توصيل الشبكة (الكابل الكهربائي، إلخ).

يوضح الشكل (2) تفصيل تكلفة رأس المال لمحول طاقة الأمواج. تستحوذ البنية والمكونات الميكانيكية/الكهربائية على الحصة الأكبر من التكلفة. تنطبق تقديرات التكلفة هذه على العديد من أجهزة طاقة الأمواج الموجودة في صناعة الطاقة البحرية والتي

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:22/4/2025م



الشكل (2) يقدم دالتون وآخرون (2010) تفصيلاً مماثلاً لتكلفة رأس المال أو النفقات الرأسمالية (CAPEX)

الجدول (2) إجمالي تكلفة عمر جهاز Pelamis الواحد

مركز التكلفة Cost centre	نطاق التكلفة Cost range
الجهاز Device	**4,000,000–3,000,000 دولار أمريكي**
الإرساء Mooring	**400,000–300,000 دولار أمريكي**
التركيب installation	**1,600,000–1,200,000 دولار أمريكي**
الشحن Shipping	**240,000–180,000 دولار أمريكي**
التشغيل والصيانة طوال العمر الافتراضي لمدة 25 سنة Lifetime operation and maintenance for 25 years	**6,800,000–1,225,000 دولار أمريكي**
الإصلاح في منتصف العمر Mid-life refit	**680,000–490,000 دولار أمريكي**
الإيقاف عن العمل Decommissioning	**1,000,000–0 دولار أمريكي**
لإجمالي Total	**14,104,000–6,318,000 دولار**

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

التكاليف الحالية وتوقعات التكاليف المستقبلية:

مع تقدير التكلفة المستوية لمزارع طاقة الأمواج (10 ميجاوات) بين 330–630 يورو/ميجاواط/ساعة (SI Ocean, 2013)، فإن هذه التكاليف أعلى بكثير من أشكال أخرى من مصادر الطاقة المتجددة، بما في ذلك تقنيات الرياح البحرية والتيارات المدية. وهذا ليس مفاجئًا، نظرًا للمرحلة المبكرة من التطوير التكنولوجي وحيث لا تزال هناك حاجة إلى إثبات مجموعات من 10 ميجاوات من إجمالي القدرة المركبة. وهذا يؤثر بشكل مباشر على اقتصاديات الحجم، بما في ذلك الافتراضات التي تم النظر فيها لتقدير التكاليف الحالية والمتوقعة. ومع ذلك، فإن إمكانات طاقة الأمواج أكبر بكثير من موارد المد عبر نفس المنطقة الجغرافية وهي أيضًا أقل تحديدًا للموقع، وبالتالي فإن التوقعات هي أن تكاليف طاقة الأمواج سوف تنخفض إلى مستويات مماثلة لتلك الخاصة بتقنيات التيارات المدية.

تشير أحدث التقديرات لمشاريع طاقة الأمواج الأوروبية إلى أن نظام نقل الطاقة يمثل 22%، والتركيب 18%، والتشغيل والصيانة 17%، والأساسات والرسو 6%، وتوصيل الشبكة 5% من إجمالي تكاليف المشروع طوال فترة تشغيله.

الجدول (3) مقارنة تكلفة رأس المال مع مصادر الطاقة المتجددة

Cost as Secondary Source لتكلفة كمصدر ثانوي (1 ميجاوات) (1MW)	Cost as Primary Source التكلفة كمصدر أساسي (100 ميجاوات)(100MW)	مصدر الطاقةEnergy Source
-	**1,500-3,500**	محطات الفحم
5,000	-	خلايا الوقود Fuel Cells
8,000	**4,000**	طاقة الرياح/الطاقة الشمسية Wind/Solar
6,200	**2,300**	طاقة الأمواجWave

Source: Viningand Muetze (2009).Not: In 2001 Dollars per Kilowatt

تأتي طاقة الأمواج بعد طاقة الرياح والطاقة الشمسية بمقارنة تكلفة التشغيل مع مصادر الطاقة على التوالي. يوضح الجدول (4) أن تكاليف طاقة الأمواج قابلة للمقارنة مع مصادر الطاقة الأخرى. ونتيجة لذلك، فإن تكلفة طاقة الأمواج تنافس المصادر الأخرى عندما يتم استخدامها كمصدر أساسي للطاقة (Astariz et al, 2015).

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

الجدول (4) مقارنة تكاليف التشغيل مع مصادر الطاقة

مصدر الطاقة Energy Source	التكلفة كمصدر أساسي (100 ميجاوات) Cost as Primary Source (100MW)	لتكلفة كمصدر ثانوي (1 ميجاوات) Cost as Secondary Source (1MW)
الطاقة الشمسية Solar	**15-10**	**50-25**
الديزل Diesel	**-**	**100-12**
طاقة الرياح Wind	**6-5**	**10**
الوقود الأحفوري Fossil Fuel	**5-3**	**6,200**
الموجة Wave	**4-3**	**10-7**

Source: Vining and Muetze (2009). Not: In 2001 Cents per Kilowatt

إن تكلفة طاقة الأمواج تنافسية مع المصادر الأخرى عندما تستخدم كمصدر أساسي للطاقة. تتمتع طاقة الأمواج بأعلى كثافة للطاقة، وتأثيرات بيئية سلبية طفيفة، ويمكن التنبؤ بها، وتلبي تغيرات الطلب على الكهرباء. ولا توجد حاجة إلى الوقود لإنتاج الكهرباء من طاقة الأمواج ولا تسبب التلوث في مرحلة إنتاج الطاقة. إن تكاليف التشغيل والصيانة منخفضة للغاية. وبالمقارنة مع الرياح، تفقد الرياح قوتها في غضون بضع دقائق، ولكن يمكن للموجة أن تتحرك آلاف الأميال. يحول نظام توليد طاقة الأمواج حركة الماء إلى كهرباء. تُعرف أجهزة توليد طاقة الأمواج بأجهزة طاقة الأمواج (WEC). بعبارة أخرى، تتمتع أجهزة طاقة الأمواج بالعديد من

المزايا. على سبيل المثال، إنها مورد مستقر؛ ولها تأثير بصري منخفض ولا تتطلب وقودًا أو انبعاثات كربونية أو تقلبات في الأسعار. تضمن طاقة الأمواج مساهمة كبيرة في أسعار الكهرباء المعقولة في الأمد البعيد. كما أن طاقة الأمواج قد تزيد من إمدادات الطاقة المحلية وقد تساعد في خفض عجز الحساب الجاري. ورغم وجود بعض المحاولات والتجارب، فلا يوجد توليد للكهرباء الصناعية من طاقة الأمواج في ليبيا. ومع ذلك، تتمتع ليبيا بإمكانات بسبب موقعها الجغرافي ولديها القدرة والخبرة في إنشاء وتطوير صناعة طاقة الأمواج. ومن المقترح أن يكون البحر الأبيض المتوسط مورد جديد للطاقة الكهربائية.

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

الخاتمة:

إن التقاط طاقة الأمواج من البحر هو شكل من أشكال الطاقة المتجددة التي تكمل مصادر شبكة الطاقة وتنوعها. وبفضل سواحل ليبيا الممتدة، فإنها تتمتع بإمكانات كبيرة لتوليد طاقة الأمواج، إن الجدوى الاقتصادية هي عامل رئيسي لمشاريع توليد الطاقة، لذا فإن الهدف من هذه الدراسة هو إجراء تقييم اقتصادي وتكلفة الطاقة المستوية (LCOE) المتضمنة في تنفيذ أجهزة تحويل طاقة الأمواج لتوليد الكهرباء في ليبيا، نظراً لعدم اليقين بمدى الاستفادة من هده الفكرة ولتحقيقها، تم حساب التكاليف المتوقعة لتوليد الكهرباء من هده الطاقة، وقد توصلت الدراسة إلى مجموعة من النتائج والتوصيات أبرزها:

النتائج:

1. أظهرت هذه الدراسة إن معدل مبيعات طاقة أمواج البحر قابله للمقارنة بالطاقة الشمسية الكهروضوئية في ليبيا.
2. زيادة الطلب على مصادر الطاقة عالمياً والحاجة إلى تخفيض انبعاثات الكربون، وتبني طرق لإنتاج الطاقة عديمة الانبعاثات جميعها عوامل تدفعنا للتفكير في التوجه إلى حلول مثل طاقة الأمواج لإنتاج الطاقة الكهربائية.
3. إن حجم الطاقة الذي يمكن توليده من الأمواج كبير جداً وواعد، مما يزيد من موثوقيتها واستقرارها.
4. لا يمكن لتكاليف طاقة الأمواج أن تكون تنافسية إلا إذا كانت تكاليف التشغيل أقل بكثير من تكاليف المحطة التقليدية.

التوصيات:

1. إن تقنيات إنتاج الطاقةِ الكهربائية من الأمواجِ مازالت بحاجة إلى تطوير لكن بما أن الاستثمار العالمي بالطاقات المتجددة بازدياد، فيجب منح هذا المصدر المزيد من الاهتمام.

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:2025/4/22م

2. لما تمتاز به ليبيا بساحل بحري طويل مكتظ نسبياً بالسكان مما يجعله أكثر احتمالية لتطبيق.
3. العمل على تحسين التصاميم لتساهم في خفض التكلفة عن مستوياتها الحالية، مما يجعلها أكثر كفاءة،
4. نوصى باستخدام طاقة الأمواج لأنها طاقة نظيفة ومتجددة وتساهم في تقليل التلوث البيئي.

المراجع:

. Andres. de, Medina-Lopez.E, Crooks. D, Roberts. O and Jeffrey. H,(2017) On the reversed LCOE calculation: design constraints for wave energy commercializationInt. J. Mar. Eng., 18, Article 88e108,

-Aderinto, T. and H. Li (2019). "Review on power performance and efficiency of wave energy converters." Energies 12(22): 4329.

Astariz a, G. Iglesias (2015), The economics of wave energy: A review, Renewable and Sustainable Energy ReviewsVolume 45, Pages 397-408,

Bedard, R., (2007). Economic and Social Benefits from Wave Energy Conversion Marine Technology, Marine Technology Society Journal, Vol. 41, No. 3, pp.44-57.

Boero, F., *CoCoNet: (2016)Towards coast to coast networks of Marine Protected Areas (from the shore to the high and deep sea), coupled with sea-based wind energy potential* Scires-It-Scientific Research and Information Technology,. 6: p. 1-95.

Castro.M, Lavidas.G , ArguilePérez.B , Carracedo.P., Gómez-Gesteira.M, (2024) Evaluating the *economic viability of near-future wave energy development along the Galician coast using LCoE analysis for multiple* wave energy devices, Journal of Cleaner ProductionVolume 463, 142740,

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

Castro-Santos, L.; Diaz-Casas, V. Life-cycle cost analysis of floating o_shore wind farms. (2014) Renew. Energy ,66, 41–48.

Castro-Santos, L.; Silva, D.; Rute Bento, A.; Salvação, N.; GuadesSoares, C.(2018) Economic Feasibility ofWave Energy Farms in Portugal. Energies , 11, 3149

Cotten, A. and D. Forehand (2020). "Maximum wave-power absorption under motion constraints associated with both controlled and uncontrolled degrees of freedom." Appl Ocean Res 100: 102194,

Cyprien, E,Bosserelle,E Sandeep. E, Reddy,E , Jens. E Krüger(2014), Cost analysis of wave energy in the Pacific, Report number: 333.7940995ISBN: 978-982-00-0944-8 .

Dalton, G.J., Alcorn, R. & Lewis, T. (2010a). Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America. Renewable Energy vol. 35, no. 2, pp. 443–455.

Dalton, G.J., Alcorn, R. & Lewis, T. (2010b). Operational expenditure costs for wave energy projects; O/M, insurance and site rent. In International Conference on Ocean Energy (ICOE), Bilbao, Spain.

Drew, B., Plummer, A. R., and Sahinkaya, M. N., (2009). A review of wave energy converter technology, Journal of power energy, Proc. IMechE, Vol. 223, Part A, pp. 887-902

Evangelos E. Pompodakis, Georgios I. Orfanoudakis, YiannisKatsigiannis and EmmanouelKarapidakis,(2024) Techno-Economic Feasibility Analysis of an Offshore Wave Power Facility in the Aegean Sea, Greece, *17*(18), 4588;

Gur, M. Kiraz, M. Goksu, M.M., Gezen, A., and Kiliçkan, A., 2018. Wave energy technology and potential in Turkey, 16th International. Conf. on Clean Energy Cyprus.9-11.

Lavidas, G. and K. Blok (2021). "Shifting wave energy perceptions: The case for wave energy converter (WEC) feasibility at milder resources." Renew Energy 170: 1143-1155,

Manasseh, R., Sannasiraj, S., McInnes, K., Sundar, V., and Jalihal, P. (2017). Integration of wave energy and other marine renewable

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع

تم استلام الورقة بتاريخ: 25/ 3/2025م وتم نشرها على الموقع بتاريخ:22/4/2025م

energy sources with the needs of coastal societies. Journal of Ocean and Climate: Science, Technology and Impacts

Martin, D., X. Li, C.-A. Chen, K. Thiagarajan, K. Ngo, R. Parker and L. Zuo (2020). "Numerical analysis and wave tank validation on the optimal design of a two-body wave energy converter." Renew Energy 145: 632-641.

Prendergast, J., Li, M., and Sheng W., (2018). A Study on the Effects of Wave Spectra on Wave Energy Conversions, IEEE Journal of Oceanic Engineering, pp. 1-13.

Previsic M (2004) System level design, performance, and costs of California Pelamis wave power plant. EPRI 204.

Raventos. A , Sarmento. A, Neumann. F, and Matos. N, Projected , (2010) , Deployment and Costs of Wave Energy in Europe, 3rd International Conference on Ocean Energy, Bilbao, dto, 1000-201, Lisboa, Portugal

Yeşilyurt, M. K., Oner, I.V., and Omeroglu, G., (2017). A scrutiny study on wave energy potential and policy in Turkey, Periodicals of Engineering and Natural Sciences, Vol.5, No.3, Nov., pp. 286-297.

Copyright © HCSJ
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة دراسات الإنسان والمجتمع