تصميم ومحاكاة لنموذج منظومة توليد الطاقة النظيفة لحي سكني لمدينة مستدامة في ليبيا

خالد عبدالقادر[1]، احمد قدور[2]، عبد اللطيف بن موسى[2]
قسم الحاسب لآلي، المعهد العالي للعلوم و التقنية-غدامس، غدامس، ليبيا
***قسم الهندسة البحرية والمنصات العائمة، كلية الهندسة، جامعة طرابلس، طرابلس، ليبيا**
Abdelkader.khalid@histg.edu.ly، a.musa@uot.du.ly

ABSTRACT

The global adoption of advanced computational tools and simulation platforms has revolutionized infrastructure planning and design. This progress has enabled the development of innovative solutions to urban sustainability challenges. Given Libya's prime location in a high solar irradiance zone, solar energy presents a strategic avenue for sustainable urban development.

This study develops, designs, and simulates an integrated model for clean energy and green hydrogen production, termed the "**Namaa Energy System**," to power a smart sustainable city in Libya. The system synergistically combines an alkaline electrolyzer, photovoltaic panels, PEM fuel cells, and an automated control unit. Tripoli and Ghadames serve as case studies to evaluate geographical impacts, using Aspen Plus and EES software for simulation and precise calibration.

Results indicate that the proposed system can achieve complete energy and fuel self-sufficiency for a smart city. Moreover, it can generate a significant surplus during peak solar months, enabling a transition to an export model and fostering sustainable economic growth. The system demonstrates high adaptability, with its application feasible across various Libyan cities. The required scale of the photovoltaic array can be efficiently tailored to local climatic conditions and solar resources at each specific site. This research underscores the technical viability and strategic value of integrated solar-hydrogen systems in advancing urban sustainability and energy independence for Libya.

الملخص

يشهد العالم في العقود الأخيرة توسعاً ملحوظاً في توظيف تقنيات الحوسبة المتقدمة وأنظمة المحاكاة الهندسية لدعم منهجيات التصميم واتخاذ القرار في مشاريع البنية التحتية. وقد ساهم هذا التطور في تمكين الباحثين من تطوير نماذج طاقة مبتكرة تُعالج التحديات التي تواجه المدن الحديثة، وخاصة تلك المرتبطة بالاستدامة وإدارة الموارد. وبالنظر إلى موقع ليبيا الجغرافي في حزام الإشعاع الشمسي ذي الكثافة العالية، فإن توظيف الطاقة الشمسية لتصميم منظومات مدن مستدامة يُعد توجهاً استراتيجياً وواعداً.

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير وتصميم ومحاكاة نموذج متكامل لتوليد الطاقة النظيفة وإنتاج الهيدروجين الأخضر، تمت تسميته **"منظومة نماء الطاقة"**، ليعمل كحل تقني لدعم نموذج لمدينة مستدامة ذكية في ليبيا. يعتمد النموذج على الدمج بين نظام التحليل الكهربائي القلوي، والألواح الشمسية الكهروضوئية، وخلايا الوقود من نوع PEM، إضافة إلى منظومة تحكم متكاملة. تم

اختيار مدينتي طرابلس وغدامس كدراسة حالة بهدف تقييم تأثير الموقع الجغرافي على أداء المنظومة، وذلك باستخدام برامج المحاكاة **Aspen Plus** و **EES** وإجراء معايرة دقيقة للنموذج.

أظهرت نتائج المحاكاة أن نموذج المنظومة المقترحة قادرة على تحقيق الاكتفاء الذاتي الكامل من الكهرباء والوقود للمدينة المستدامة الذكية، بل تتجاوز ذلك إلى إمكانية التصدير خلال أشهر ذروة الإشعاع الشمسي، مما يفتح آفاقاً اقتصادية مستدامة. كما أثبتت النتائج أن المنظومة تتمتع بمرونة عالية تسمح بتطبيقها في مختلف المدن الليبية، مع اختلاف عدد الألواح الشمسية المطلوبة وفقاً للظروف المناخية لكل منطقة.

الكلمات المفتاحية: المدن الذكية، المدن المستدامة الذكية، نموذج المحلل الكهربائي، نموذج الوح الشمسي، خلية الوقود، أنظمة المحاكاة الهندسية.

1 المقدمة

مع التطور المتسارع في تقنيات المعلومات والاتصالات خلال العقود الثلاثة الأخيرة، توسعت تطبيقات الحوسبة والنمذجة الرقمية لتشمل مختلف القطاعات الهندسية، مما أدى إلى ظهور أنماط حضرية جديدة مثل: المدينة الرقمية (Digital city)، المدينة المعلوماتية (Information city)، والمدينة الذكية (Smart cities). وفي السياق نفسه، برزت مفاهيم الاستدامة (Sustainability) وما ارتبط بها من نظم حضرية مثل المدينة الخضراء (Green city) والمدينة البيئية (Eco city) والمدينة المستدامة (Sustainable city)، والتي تُركز على إدارة الموارد بكفاءة وتحقيق التوازن بين النمو الاقتصادي والمحافظة على البيئة.

تُعرّف المدينة المستدامة بأنها مدينة تعتمد على بنية تكنولوجية قادرة على دعم النمو الاقتصادي دون استنزاف الموارد الطبيعية، وذلك من خلال تحسين كفاءة استخدام الطاقة والمياه وتقليل الانبعاثات والتوجه نحو الاقتصاد الدائري. وتُعد العلاقة بين المدن الذكية والمدن المستدامة علاقة تكاملية؛ فالبنية الرقمية للمدن الذكية تُمكّن من تحقيق أهداف الاستدامة في التشغيل والتخطيط وإدارة الموارد [1].

تعد العلاقة بين المدن المستدامة والمدن الذكية علاقة وثيقة وذات أهمية خاصة ، بحيث يمكن أن تساهم المدن الذكية في تحقيق مبادئ الاستدامة في التصميم والتشغيل وهناك إرتباط بين المدن الذكية والإستدامة في عدة جوانب مهمة (الاقتصاد، المجتمع، التخطيط والبيئة، البنية التحتية والطاقة وغيرها). و فيما يتعلق بالطاقة والذي يعتبر من ضمن الجوانب الهامة لكونه ان الهذف من المدينة المستدامة هو الوصول الى طاقة نظيفة مستدامة تساهم في تنمية المدينة وتضمن استدامتها وهو ما افرزته تطبيقات تكنولوجيا المعلومات في مجال الطاقة والوصول الى موارد جديدة مستدامة وتعتبر هذه التطبيقات من اهم مكونات المدن المستدامة. هناك عدة مبادرات في انحاء العالم لتحسين البيئة المعيشية المثمثلة في المدن المستدامة الذكية (مدينة دونجتان بالصين ، دودوما بتنزانيا، هوتشي بفيتنام ، بسدني باستراليا ، مصدر بدبي وغيرها). فعلى سبيل المثال لا الحصر ، في مدينة دونجتان بالصين إهتم المخطط لهذه المدينة المستدامة الذكية بمحاكاة البيئة وان تعتمد المدينة على أن تنتج طاقتها الخاصة من طاقة الرياح والطاقة الشمسية والوقود الحيوي ومخلفات المدن المعاد تدويرها، بحيث تعمل التكنولوجيا النظيفة مثل خلايا الوقود على تعزيز وسائل النقل العام. كما ستعتمد على شبكة للمشاه لتقليل إنبعاثات المركبات. أيضا ستعتمد الأراضي الزراعية على استخدام أساليب الزراعة العضوية لزراعة الأغذية لتحقيق الاكتفاء الذاتي [2]. إن خلاصة ما تقرر في عدة دراسات في هذا المجال أن المدينة المستدامة الذكية المتناغمة هي نموذج للمستقبل المستدام، المصمم ليكون أفضل مكان للعيش والعمل والزيارة [1-4].

تنعم منطقة الشرق الأوسط و شمال افريقيا بوفرة الرياح وأشعة الشمس مما يجعلها منجما للطاقة الكهروضوئية الشمسية وطاقة الرياح ، لذا فإن هذه المنطقة من العالم قادرة على أن تصبح مركزا لإنتاج الهيدروجين الأخضر(الوقود) لكل من أسواقها الإقليمية والعالمية. إن الهيدروجين ربما سيصبح الجسر بين أفريقيا وأوروبا والتي تهدف استراتيجيتها المستقبلية في الهيدروجين للوصول إلى مالا يقل عن 6 جيجاواط من سعة المحللات الكهربائية وذالك بحلول 2030 [5]. إن دول شمال افريقيا بصفة عامة و ليبيا بصفة خاصة، بالإمكان الحصول على الطاقة النظيفة وبتكلفة منخفضة مما يؤهلها بأن تبنى بها مدن مستدامة ذكية تكون نموذجية بكل المعايير، وإن احدى المنظومات المهمة والتي يستوجب التركيز عليها كبداية المشروع هي الاستعانة بالحاسب الالي و برمجياته الحديثة في تصميم ومحاكاة لمنظومة إنتاج الهيدروجين الأخضر و توليد الطاقة الكهربائية النظيفة التي تحتاجها المدينة المستدامة الذكية. أجريت العديد من الدراسات والأبحاث في توليد الطاقة النظيفة و إنتاج الوقود (الهيدروجين الأخضر).

ففي الدراسة [6] تم دراسة إمكانية استغلال الطاقة الشمسية في تغذية المناطق الريفية في تركيا بالطاقة الكهربائية وتخزين الطاقة الكهربائية الإضافية كوقود يتمثل في الهيدروجين الأخضر وذالك باستخدام التحليل الكهربائي للماء. إن النتائج التي استخلصها الباحث من الدراسة تبين كفاءة وفعالية النظام المقترح والذي يمكن استخدامه في مناطق متشابهة مناخيا في العالم.

في الآونه الأخيرة اثبتت الدراسات أن الهيدروجين له القدره في التقليل من أثار التغير المناخي وربما إيقافه، كما لا يمكن تجاهل دوره كحامل للطاقة المتجددة والمستدامة . مع الملاحظة بأن الهيدروجين ليس مصدرا للطاقة لكن بإمكانه إيصال و تخزين كميات كبيرة من الطاقة ولفترات طويلة من الزمن وبتكلفة أقل من تخزين الكهرباء [7]. إن الذي يميز الهيدروجين الأخضر هو انه يتم انتاجه عن طريق تحليل للماء في محلل كهربائي ، وتزود الكهرباء من مصدر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية او طاقة الرياح وغيرها وإن أكبر ميزه يتميز به الهيدروجين الأخضر عن غيره أنه لا يتنج عن عملية انتاجه أي من الغازات الدفيئه، و بعبارة اخري فالهيدروجين الأخضر غاز صديق للبيئه وينتج من مصادر الطاقة المتجددة بنسبة 100%. إن الهيدروجين ألأخضر على خلاف الأنواع الأخرى فانه يلعب دورا رئيسيا في عدة مجالات ومنها مجال نقل الطاقة فمثلا يمكن ان يكون حلا جذريا لمشاكل تخزين الطاقة في الحافلات والسيارات التي تسير على خلايا الوقود. يعتبر المحلل الكهربائي هو الجزء الرئيسي في منظومة انتاج الهيدروجين الأخضر وعن طريقه يتم تحليل الماء بواسطة الطاقة الكهربائيه الى غاز الهيدروجين الأخضر وغاز الاكسجين . أجريت العديد من الدراسات والأبحاث [7-14] في مجال إنتاج الهيدروجين الأخضر. ففي الدراسة [7] تم دراسة إمكانية إنتاج الهيدروجين من الماء وفقا لذالك قام الباحث بتجارب معملية على خلية محلل كهربائي. إن النتائج التي استخلصها من الدراسة بينت أن مقدار الجهد الكهربائي للتيار المستمر له تأثير كبير على مقدار الهيدروجين المنتج .

في هذه الورقة ثم عرض تصميم ودراسة نموذج لمنظومة متكاملة لتوليد الطاقة النظيفة (أطلق عليها اسم منظومة نماء الطاقة) تستخدم للمساهمة في تغذية مدينة مستدامة ذكية في ليبيا. بالإضافة لذالك فان منظومة نماء الطاقة تقوم بإنتاج الهيدروجين الأخضر واستخدامه كوقود للتتمكن المدينة المستدامة من سد حاجتها وأكثر من الوقود من خلال نظام تحكم آلي. ان الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إبراز أهمية الإهتمام في البحث والإستثمار في توليد الطاقة الكهربائية من مصدر الطاقة الشمسية وما يرادفها من إمكانية إنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا مما يؤهلها لإمكانية التخطيط لبناء مدن مستدامة ذكية. كما إن الريادة في البحث والتطوير وتنفيذ مشاريع في هذا المجال يعني توفير طاقة مستديمة وفرص الإستثمار للأجيال القادمة تدوم بستدامة الشمس.

2 المدن المستدامة الذكية

تُعرّف المدينة المستدامة الذكية بأنها منظومة حضرية متكاملة توظّف تقنيات المعلومات والاتصالات، والبنية التحتية الرقمية، وأنظمة التحكم الذكية لتحقيق كفاءة تشغيلية تشمل جميع القطاعات الحيوية، مع ضمان تلبية احتياجات السكان الحالية والمستقبلية من خلال إدارة رشيدة للموارد الطبيعية. وتقوم هذه المدن على مبادئ محورية تشمل:

- تحسين جودة الحياة عبر تطوير منظومة خدمات مرنة وفعّالة تشمل الطاقة، المياه، النقل، الاتصالات، والخدمات العامة.
- تعزيز النمو الاقتصادي المستدام من خلال خلق فرص عمل عالية القيمة وربط القطاعات الاقتصادية بالمنظومات الرقمية.
- تحقيق التوازن البيئي عبر خفض الانبعاثات، رفع كفاءة الطاقة، ودعم مبادئ الاقتصاد الدائري وإعادة التدوير.
- تطوير بنية تحتية ذكية تعتمد على أنظمة مراقبة وتحكم وتنبؤ تُدار بالحوسبة وأنظمة الذكاء الاصطناعي.

إن الجمع بين تقنيات المدن الذكية ومبادئ الاستدامة يُنتج نموذجاً حضرياً متكاملاً قادرًا على التكيف مع التغيرات المناخية، وفعّالاً في إدارة الموارد، وعالي الاعتمادية في تقديم خدمات الطاقة والنقل والمياه. وعلى هذا الأساس، تُعد منظومات الطاقة المتجددة، وخاصة الطاقة الشمسية والهيدروجين الأخضر، أحد أهم المكونات التقنية التي يعتمد عليها نموذج المدينة المستدامة الذكية.

3 منظومة نماء الطاقة

تم تطوير نموذج **"منظومة نماء الطاقة "**ليعمل كنظام متكامل لتوليد الطاقة النظيفة وإنتاج الهيدروجين الأخضر. و المخطط الانسيابي المبين في الشكل (1) يوضح أهم مراحل العمل المتكامل لتوليد الطاقة، بهدف دعم مدينة مستدامة ذكية تعتمد على ذاتها في الكهرباء والوقود. تتكون المنظومة من أربع وحدات أساسية:

3.1 منظومة التحليل الكهربائي القلوي (Alkaline Electrolyzer System)

تستخدم هذه الوحدة تياراً مستمراً لفصل جزيئات الماء إلى هيدروجين وأكسجين. ويُعد التحليل القلوي أحد أكثر الطرق نضجاً وكفاءة لإنتاج الهيدروجين الأخضر بسبب:

- انخفاض تكاليف التشغيل
- عمر تشغيلي مرتفع
- ملاءمته للعمل بمرونة مع مصادر الطاقة المتجددة

3.2 المنظومة الشمسية الكهروضوئية(PV Solar System)

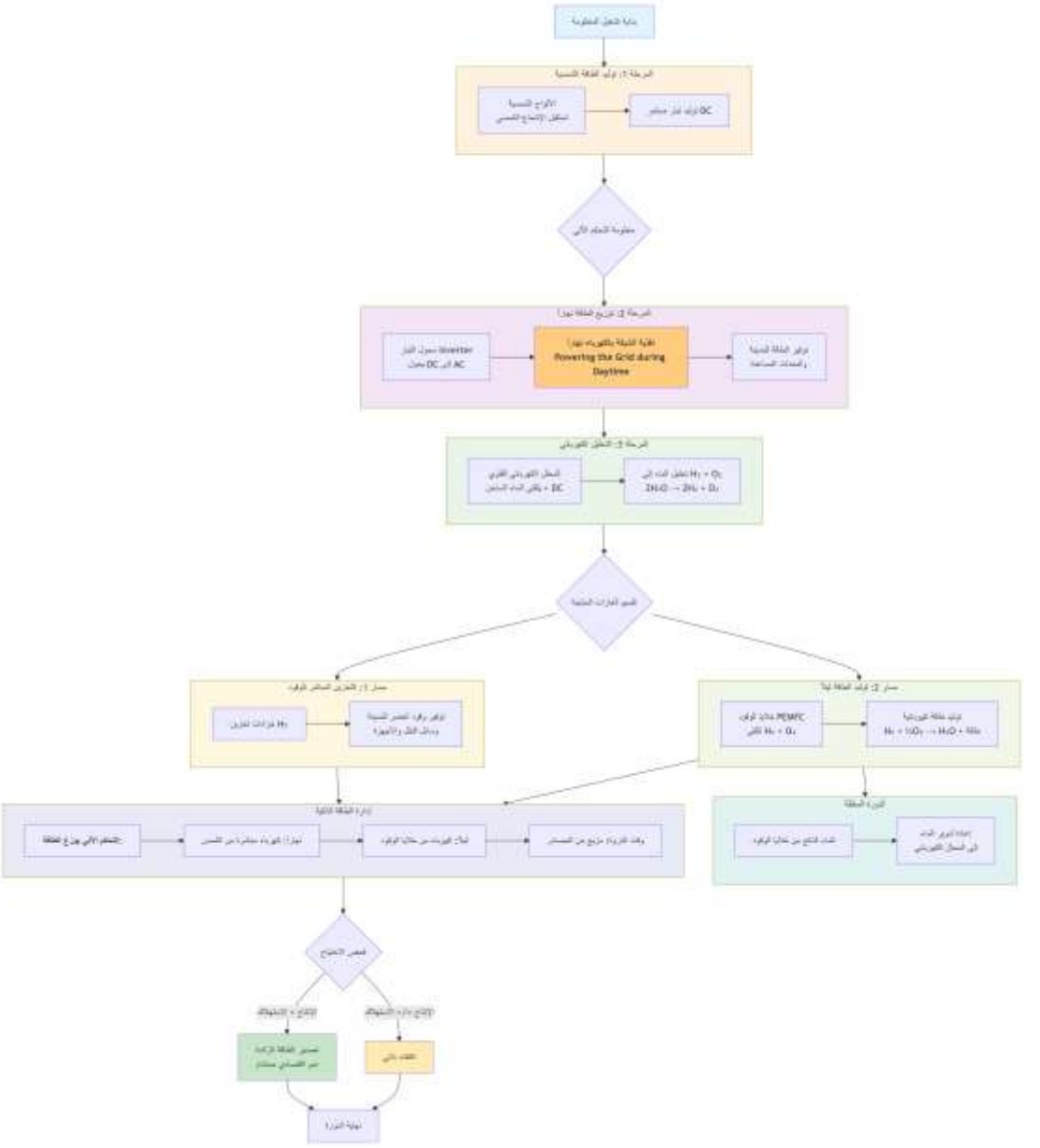
تُمثل مصدر الطاقة الرئيسي للمنظومة. تعمل الألواح الشمسية على تزويد المحلل الكهربائي ومنظومات التحكم بالطاقة اللازمة وفق تصميم دقيق يعتمد على بيانات الإشعاع الشمسي للمدينة.

3.3 منظومة خلايا الوقود(PEM (Proton Exchange Membrane Fuel Cell

تقوم هذه الوحدة بتحويل الهيدروجين المخزن والمنتج من المحلل الكهربائي إلى طاقة كهربائية بكفاءة عالية، وتعمل كاحتياطي استراتيجي أثناء انخفاض او انقطاع الإشعاع الشمسي ليلا. وبالإضافة لما سبق تُعد خلايا PEM مناسبة للمدن المستدامة لما تتميز به من:

- استجابة سريعة للتغيرات في الحمل

- درجات تشغيل منخفضة
- انعدام الانبعاثات



الشكل 1: المخطط الانسيابي لمراحل عمل منظومة "نماء الطاقة"

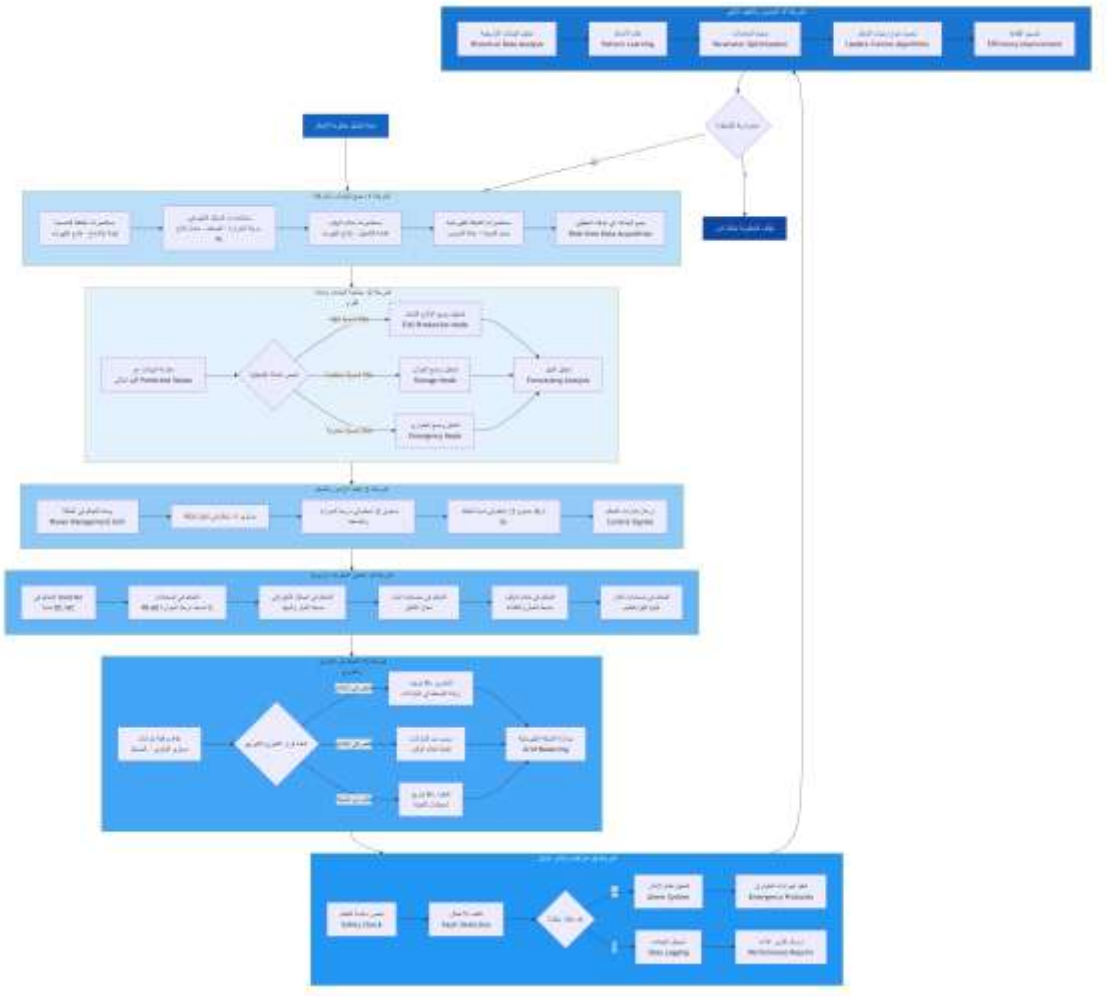
3.4 منظومة التحكم المتقدمة(Automated Control System)

تُعد منظومة التحكم قلب "منظومة نماء الطاقة"، حيث تتولى:

- إدارة تدفق الطاقة بين الوحدات

- توجيه الطاقة من الألواح الشمسية إلى الاستهلاك الفوري او الى المحلل الكهربائي لإنتاج الوقود والاكسجين لتغذي خلايا الوقود او استخدام الهيدروجين الأخضر مباشرة
- مراقبة حالات التشغيل، درجة الحرارة، وكثافة التيار
- تحسين الكفاءة وفق خوارزميات تحكم متقدمة

المخطط الانسيابي المبين في الشكل (2) يبرز اهم الوظائف للتحكم خلال 24 ساعة، بحيث يتكيف مع الظروف المحتملة لتوفير الطاقة النظيفة عندما يحتاجها المستخدم او المستهلك



الشكل 2: مراحل المخطط الانسيابي لوحدة التحكم في منظومة نماء الطاقة

3.5 مكوّنات مساعدة إضافية

تشمل مضخات المياه، سخانات ، خزان الهيدروجين، وخزان الأكسجين، إضافة إلى الأنابيب الصناعية، وأنظمة مراقبة الضغط والحرارة كما هو مبين في الشكل (1). وللربط بين كل هذه المعدات والأجهزة لتشتغل بشكل آلي تحتاج منظومة نماء الطاقة إلى منظومة تحكم آلي والتي بدورها تقوم بتوجية جزء من الطاقة الكهربائية الى محول التيار (Inverter) والذي يقوم بدوره بتحويل جزء من التيار المستمر (DC) الى تيار متردد

(AC) حتى يتم تغذية السخانات الكهربائية (والتي بدورها تقوم برفع درجة حرارة الماء المتدفق الى المحلل الكهربائي لدرجة تشغيله) وغيرها بالطاقه الكهربائية المطلوبة وبهذا تبدأ المنظومة بالعمل وإنتاج الهيدروجين ألأخضر. بمرور التيار الكهربائي المستمر في المحلل الكهربائي تبدأ عملية فك ارتباط جزيئات الماء H2O لتتحول الى غاز الهيدروجين H2 والى غاز الأكسجين O2. يعتبر التحليل الكهربائي للماء القلوي منخفض التكلفة طريقة مستدامة وثابته وذالك باستخدام مدخلات الطاقة المتجددة [8].

يتم تخزين جزء من الهيدروجين الأخضر كوقود يستخدم مباشرة في نموذج المدينة المستدامة الذكية. والجزء الآخر من الهيدروجين يتم استخدامة مع الاكسجين المنتج من المحلل الكهربائي في تغذية خلايا الوقود والتي بدورها تقوم بتوليد الطاقة الكهربائية المطلوبة لتغذية شبكة المدينة المستدامة الذكية في الفترة التي تنعدم فيها أو تنخفض الطاقة الكهروضوئية للشمس كوجود الغيوم. والجدير بالملاحظة، ان ما يتم استهلاكه من كمية من الهيدروجين والأكسجين بخلايا الوقود يتحول الى نفس الكمية من سائل ماء والذي يعاد حقنه في المحلل الكهربائي، لذا يتبن من هذا أن المنطومة (المحلل الكهربائي مع خلايا الوقود) المستخدمة لتوليد الكهرباء لاتحتاج لاي إظافة لكمية من الماء.

وتعمل المنظومة بطريقة دورية مغلقة، إذ يتم:

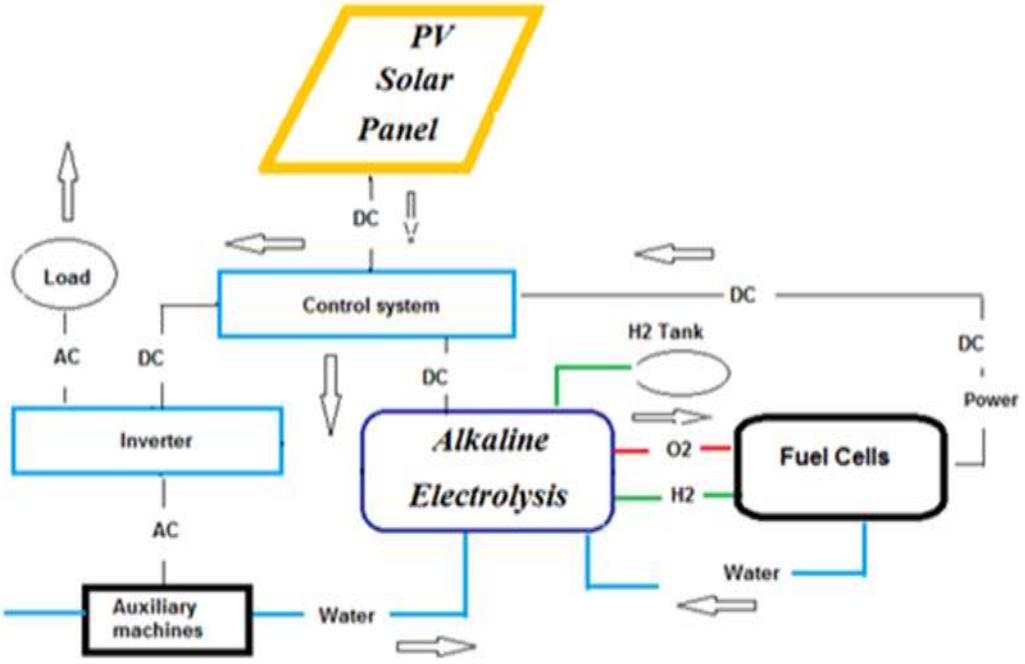
- تخزين جزء من الهيدروجين المنتج كوقود مباشر
- استخدام الجزء الآخر لتغذية خلايا الوقود لإنتاج الكهرباء
- إعادة الماء الناتج من خلايا الوقود إلى المحلل الكهربائي، مما يحقق "حلقة موارد مغلقة" عالية الكفاءة

4 النموذج الرياضي لمنظومة نماء الطاقة

في الواقع إن نمودج المحاكاة لمنظومة نماء الطاقة هو عبارة ثلاثة نماذج لأجهزة مختلفة:- وهي نموذج لمحلل كهربائي قلوي و نمودج للألواح الشمسية الكهروضوئية ونموذج لخلية وقود، ثم دمجهم جميعا (بعد التاكد من معايرتهم) ليشكل الكل منظومة واحدة يتم التحكم عن أدائها بمنظومة تحكم آلي. وظيفة منظومة نماء الطاقة هي توليد الطاقة الكهربائية النظيفة لمدينة مستدامة ذكية ويتزامن في نفس الوقت إنتاج الوقود لهذه المدينة كما في الشكل (3).

- **نموذج المحلل الكهربائي**

يتكون المحلل الكهربائي القلوي من أقطاب للانود واخرى للكاثود تفصلهما مساحة من الكتروليت. وهذا النوع من المحلل الكهربائي يعمل في درجة حرارة التشغيل من 60 -90 درجة مئوية [7]. والأكثر ملائمة حاليا لتوفير المياه الازمة لمنظومة نماء الطاقة هو توفير محطات تحلية المياه الصغيرة والتي تعمل بالتناضح العكسي والقريبة من موقع التوليد الموجودة بالقرب من البحر هذا بالنسبة للمدن الساحلية، وما يتعلق بالمدن الغير ساحلية بالإمكان الاستفادة من مياة الصرف صحي وذالك بعد معالجتها لخدمة غرضين: الأول امداد منظومة نماء الطاقة بما تحتاجة من المياة والثاني هو الاستفادة من السماد العضوي في مشاريع التنمية الزراعية في المدينة المستدامة الذكية ليمنحها مزيدا من الاستدامة في جوانب أخري مهمة. و الجدول (1) يعرض اهم البرامترات المستخدمة في النموذج. وبعد توفر ظروف التشغيل اللازمة فإن التفاعلات التي تحدث بالمحلل الكهربائي والمبينه تتم وفقا للآتي:-



شكل 3: مخطط توضيحي لمنظومة نماء الطاقة

جدول 1: مواصفات نموذج المحلل الكهربائي

المعامل	القيمة
الجهد المثالي لخلية المحلل الكهربائي	1.23 V
كثافة التيار	4000 A/m^2
مساحة المحلل الكهربائي	0.1 m^2
عدد خلايا المحلل الكهربائي	12
r1	4.45153E-05
r2	6.88874E-09
S	0.33824
t1	-0.01539
t2	2.00181
t3	15.24178

عند الآنود:

$$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_{2(g)} + H_2O + 2e^- \quad (1)$$

وعند أقطاب الكاثود:

$$H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^- \quad (2)$$

والتفاعل الكهروكيميائي الكلي:

$$H_2O_{(l)} + DC\ current \rightarrow H_{2_{(g)}} + \frac{1}{2}O_{2_{(g)}} \quad (3)$$

بالامكان إيجاد مقدار جهد خلية التحليل الكهربائي القلوي بالعلاقة الآتيه:

$$V_{cell} = V_{rev} + (r1 + r2T)i + slog[\left(t1 + \frac{t2}{T} + \frac{t3}{T*T}\right)i + 1] \quad (4)$$

حيث أن قيمة الجهد المثالي للخلية $V_{rev} = 1.23$ وأن T هي درجة حرارة التشغيل وأن i هو مقدار كثافة التيار والباقي من المجاهيل تمثل ثوابت ثم إيجادها بالتجارب المعملية [9].

إن معدل الطاقة المستهلكة في خلية المحلل الكهربائي تعتمد على مقدار التيار (I) وعدد خلايا المحلل الكهربائي (N) وفقا للمعادله التالية:-

$$W_{AE} = I \cdot N \cdot V_{cell} \quad (5)$$

$$m_{H_2} = Mn_{H_2} \quad (6)$$

$$n_{H_2} = \frac{W_{AE}}{Vcell \cdot z \cdot F} \quad (7)$$

إن العدد المولي للماء والهيدروجين متساوي بينما كتله كل منهما يعتمد على الوزن الذري (M) لكل منهما وفقا للمعادلة التالية وبالامكان ايجادة معدل إنتاج الهيدروجين ألأخضر في خلية المحلل الكهربائي بحيث أن F هوثابث فراداي وأن Z هو عدد الالكترونات المنتقلة في التفاعل الكهروكيميائي [10].

إن من المهم الاشارة هنا في أن مقدار الطاقة الكلية (Demand power) التي تحتاجها منظومة نماء الطاقة هي مجموع الطاقة التي يحتاجها المحلل الكهربائي لإنتاج كمية الهيدروجين والأكسجين لخلية الوقود و الطاقة المطلوبة لتغدية المدينة المستدامة بالوقود في صورة الهيدروجين الأخضر، وبما أن الطاقة الكلية للمنظومة يتم توليدها من منظومة الألواح الشمسية , لذا فانها الأساس في بداية تصميم ثم تشغيل نمودج منطومة نماء الطاقة.

- **نموذج الألواح الشمسية**

في هذا الدراسة تم إختيار مدينة غدامس كدراسة حالة لمدينة مستدامة ذكية، لكونها تقع في موقع جغرافي كنقطة التقاء حدودي بين ثلاثة دول وهي ليبيا وتونس والجزائر لذا فان النتائج المتحصل عليها من هذا البحث تمثل نموذج لمدن مستدامة ذكية في ثلاثة دول عربية. وبالاضافة لذالك فإن مدينة غدامس تقع بين مدن الساحل الليبي كمدينة طرابلس ومدن في الجنوب كمدينة سبها، لذا فمن السهل اجراء عملية المقارنة في أداء منظومة نماء الطاقة في مدن ليبية مختلفة في موقعها الجغرافي. اي وبعبارة اخرى فإن منظومة نماء الطاقة تمثل منظومة محلية وإقليمية في آن واحد. يحتاج تصميم نموذج الألواح الشمسية الكهروضوئية الى معلومات حول الإشعاع الشمسي الذي يتم إعتراضه بواسطة السطح المائل للوح الشمسي وبيانات الارصاد الجوية للموقع.

تم اختيار بيانات الارصاد الجوية للاشعاع الشمسي الكلي لمدينة غدامس والذي يقدر بقيمته الأدني في السنة وهو4.03 kW/m2 في شهر ديسمبر وفيمته القصوي وهو8.001 kW/m2 في شهر يوليو. و الجدول (2) يبين اهم البرامترات و قيمهاالمستخدمة في المنظومة. تستخدم

المعادلة التالية لحساب الطاقة اليومية المستهلكة في منزل بالمدينة المستدامة، حيث تم حساب الطاقة المستهلكة لمنزل تتوفر فيه كل الأجهزة وكماليات المستلزمات والمعدات المنزلية التي تحتاج للطاقة كهربائية :

$$E=\sum_{k=1}^{n} Hk * Pk * Qk \qquad (Wh) \qquad (8)$$

حيث

K = Device type indicator(مؤشر نوع الجهاز)

Hk= Hours of operation for each device(ساعات التشغيل لكل جهاز)

Pk=nominal power of devise(الطاقة الاسمية للجهاز)

Qk= The number of devices of each type(عدد الاجهزة من كل نوع)

جدول 2: مواصفات نموذج خلية الوح الشمسي

الشركة المصنعة	ميتشوبيشي
اسم المنتج	PV-MF180UD4
عدد المسطحات الشمسية	50 مسطح
الطاقة القصوى P_{max}	W 180
جهد الدائرة المفتوحة V_{oc}	V 30.4
مقدار تيار الدائرة القصيرة I_{sc}	A 8.03
اقصى جهد V_{mp}	V 24.2
أقصى تيار I_{mp}	A 7.45

لحساب عدد الوحدات اللازمة لتلبية الطاقة اليومية المطلوبة (daily energy requirement)، يجب اختيار نوع اللوح الشمسي المستخدم.

$$E_r = \frac{\text{daily average energy requirment}}{\text{overall system efficiency}} \qquad (9)$$

بالامكان حساب مقدار الطاقة الذروة للتيار المستمر من المعادلة التالية:

$$P_{peak} = \frac{\text{daily energy requirement}}{\text{minimum peak sun} - \text{hours per day}} \qquad (10)$$

إجمالي التيار المطلوب بالامكان حسابة على النحو التالي:

$$I_{DC}=\frac{Peak\ power}{system\ DC\ voltage} \quad (A) \qquad (11)$$

لمعرفة ترتيب اللواح الشمسية وعددها على التوازي أو على التوالي ، تستخدم المعادلات التالية:

$$N_p = \frac{total\ current}{rated\ current\ of\ one\ module} \qquad (12)$$

$$N_s = \frac{system\ DC\ voltage}{module\ rated\ voltage} \qquad (13)$$

إن العدد الكلي للألواح الشمسية لنموذج نماء الطاقة هو حاصل ضرب عدد الألواح على التوازي وعددها على التوالي، وفقا للمعادلة التالية:

$$N_m = N_p * N_s \qquad (14)$$

- **نموذج خلية الوقود**

تعتمد فكرة عمل خلايا الوقود على التفاعل الكيميائي الحاصل بين الهيدروجين والأكسجين لتوليد الطاقة الكهربائية في عملية لا تؤدي الى إنبعاث أي غازات بل ينتج عن هذا التفاعل ماء أو بخار الماء، وبالتالي فإن هذه الخلايا هي عبارة عن محركات صديقة للبيئة ولا تشكل أي نوع من الخطورة عليها. هناك عدة تصنيفات لخلايا الوقود أشهرها تصنيف على أساس درجة حرارة تشغيل الخلية وتصنيف آخر على أساس نوع المحلول الالكتروليتي. تصنف خلايا الوقود من حيث درجة حرارة تشغيل الخلية إلى: خلايا وقود ذات درجة حرارة تشغيل منخفضة وأخرى مرتفعة درجة الحرارة، ويندرج تحت خلايا وقود ذات درجة حرارة تشغيل منخفضة:

- خلايا الوقود القاعدية (Alkaline fuel cells)
- خلايا الوقود الحمضية الفوسفورية (phosphoric acid fuel cells)
- خلايا وقود غشاء البوليمر (Polymer electrolyte membrane fuel cells)

في خلايا وقود غشاء البوليمر (PEMFC) تستخدم غشاء بوليمر موصل بالبروتون كمحلول كهربائي، ويستخدم الهيدروجين عادة كوقود، حيث تعمل هذه الخلايا في درجات حرارة منخفضة نسبيًا ويمكنها تغيير إنتاجها بسرعة لتلبية متطلبات الطاقة المتغيرة، خلايا الوقود هي أفضل الأنواع لتشغيل السيارات كما يمكن استخدامها أيضًا لإنتاج الطاقة الكهربائية الثابتة، تتراوح درجة حرارة تشغيلها (80-100 م) [11].

أن من أهم الخطوات لفهم خلايا الوقود هو محاكاة نموذج رياضي للخلية يصف كل سلوك الخلية. ومن المهم جدا في النموذج الرياضي تطبيق كل المعادلات الرياضية والقوانين وفقا لمبادئ الديناميكا الحرارية، ليتسنى بذالك فهم آلية التفاعلات الكهروكيمائية والتي تعكس أداء خلية الوقود ايا كان نوعها، وبعد معايرة نموذج الخلية بقراءات حقيقية لخلية مصنعة من قبل.

التفاعل الكهروكيميائي لخلية الوقود:

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(liquid)} + power + heat \qquad (15)$$

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad \text{في الآنود} \qquad (16)$$

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \qquad \text{في الكاثود} \qquad (17)$$

ينقسم الجهد في خلية الوقود الى جزئين: الجزء الأول وهو الجهد المثالي ويمكن التنبؤ به من خلال قوانين ومعادلات الديناميكاالحرارية ، أما الجزء الثاني فيمثل مجموع الفواقد والتي تقلل جهد الخلية مثل (جهد التنشيط ، جهد أوم ، جهد التركيز). وبالإمكان حساب جهد الخلية بالعلاقة التالية ووفقا لما ورد في [12].

$$V_{FC} = E + V_{act} + V_{ohmic} + V_{conc} \qquad (18)$$

جهد التنشيط (The activation voltage) هو عبارة فاقد ناتج بسبب مقاومة أقطاب خلية الوقود، ويمكن حسابة وفقا الى [13]:-

$$V_{act} = -0.9514 + 3.12 \cdot 10^{-3} \cdot T_{cell} - 1.87 \cdot 10^{-4} \cdot T_{cell} \cdot \ln(I) + 7.4 \cdot 10^{-5} \cdot T_{cell} \cdot \ln(C_{O_2}) \qquad (19)$$

جهد أوم (The Ohm voltage) يمثل الفواقد أو الخسائر التي تحدث نتيجة لمقاومة نقل الإلكترونات عبر ألأقطاب الكهربائية كذالك نقل البروتونات عبر الغشاء، ويمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية [13]:-

$$V_{ohmic} = -I \cdot R_{int} \quad (20)$$

بحيث ان المقاومة الداخلية يمكن حسابها بالصيغة التالية

$$R_{int} = 1.605 \cdot 10^{-2} - 3.5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{cell} + 8 \cdot 10^{-5} \cdot I \quad (21)$$

جهد التركيز (Concentration voltage)

يحدث تركيز الجهد للخلية نتيجة للتركيز التفاعلي الزائد بالقرب من اسطح المحفز، ويمكن ايجاده بالعلاقة التالية:

$$V_{conc} = B \cdot ln(1 - \frac{I}{I_{\lim}}) \quad (22)$$

وبعد إيجاد جهد الخلية وقيمة التيار من السهل معرفة مقدار الطاقة الكهربائية المتحصل عليها من خلية وقود غشاء البوليمر وفقا لما ياتي:

$$W_{FC} = I \cdot V_{Fc} \quad (23)$$

5 النتائج والمناقشة

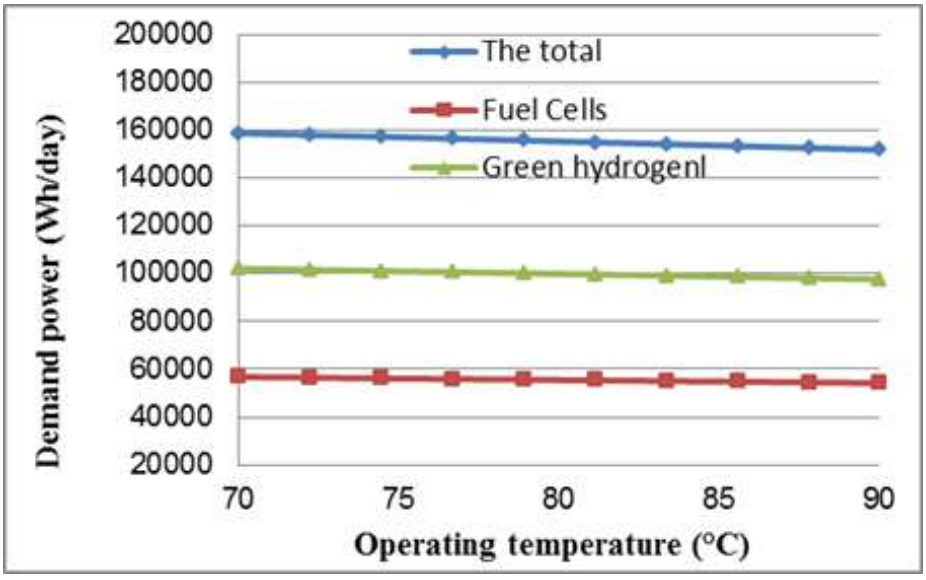
يركز هذا القسم على تحليل أداء منظومة نماء الطاقة عند تطبيقها على نموذج مدينة مستدامة ذكية، وذلك بالاعتماد على عمليات محاكاة شاملة استخدمت بيانات الإشعاع الشمسي وأحمال الطاقة ومواصفات المعدات. تم تنفيذ جميع المحاكاة باستخدام برنامجي Aspen Plus و EES بعد معايرة النموذج الرياضي لكل من المحلل الكهربائي، الألواح الشمسية، وخلايا الوقود.

بمعنى أن منظومة نماء الطاقة تقوم بتوفير الوقود (الهيدروجين الأخضر) المطلوب لتغطية ما تحتاجة المدينة المستديمة الذكية من الوقود النظيف. لقد تم اختيار مدينة غدامس كدراسة حالة ، وتم دراسة أداء منظومة نماء الطاقة فيها. بالإضافة لهذا، فقد تم مقارنة أداء منظومة نماء الطاقة عند استخدامها في مدينة طرابلس بما هو متحصل عليه من نتائج عند استخدامها في ظروف تشغيل مدينة غدامس. يجدر الإشارة هنا ، أنه عند تصميم نموذج للوحة شمسيه في أي مدينة يجب أن تؤخذ اقل قيمة لقراءات ألاشعاع الشمسي الكلي، حيث سجلت في شهر ديسمبر في غدامس بمقدار 4.03 kWh/m2 و في طرابلس 2.744 kWh/m2 [12] ، و هذا يمثل أقل متوسط لقيمة من الطاقة الكهروضوئية المنتجة من الوح الشمسي ولا يتاتى هذا إلا في فصل الشتاء حيث تسجل أقل قيمة لقراءات ألاشعاع الشمسي وأقل مدة للسطوع الشمسي وهو 6.3 ساعة في اليوم وعلى هذا الاساس تم تصميم ودراسة أداء منظومة نماء الطاقة.

الشكل (4) يبين تأثير تغير درجة حرارة تشغيل المحلل الكهربائي على مقدار الطاقة الكلية (Demand power) التي تحتاجها منظومة نماء الطاقة وعند كثافة تيار ثابته مقدارها A/m2

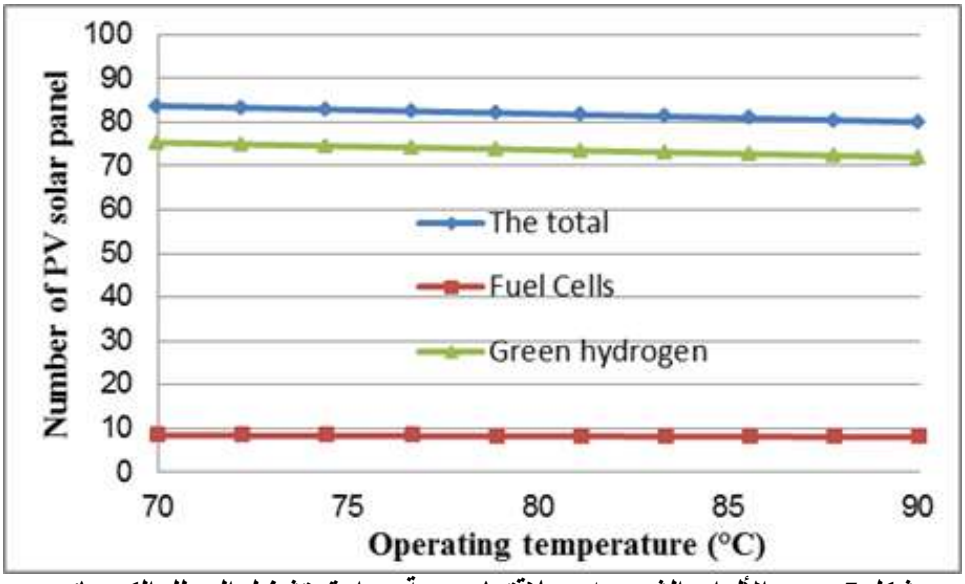
4000. كما هو موضح بالشكل (4) فكلما تزداد درجة الحرارة إرتفاعا داخل خلية المحلل الكهربائي سيتزامن هذا مع انخفاض في جهد الخلية المطلوب لإنجاز عملية تفكك جزيئات الماء الى غاز الهيدروجين والأكسجين. اي ان إرتفاع درجة حرارة الماء داخل خلية المحلل يتسبب في ان مقدار طاقة الترابط بين جزيئات الماء تكون أقل، فبالتالي بالإمكان إنفصال هذه الرابطة الايونية وتجزئة جزئ الماء H2O الواحد الى إثنان من عدد المولي للهيدروجين وواحد مول من الاكسجين (معادلة 5) بأقل جهد ممكن، وبثبات مقدار التيار في الخلية فإن هذا يعني بالتالي انخفاض مقدار الطاقة الكلية المستهلكة في خلية المحلل. وبالرغم من أن مقدار الطاقة ألازمة لرفع درجة حرارة الماء من 60 إلى 90 درجة مئوية يصاحبها في ذالك إرتفاع في مقدار الطاقة المستهلكة في المسخنات الكهربائية، إلا انه بالمقارنه بالفارق الكبير بين إرتفاع طاقة المسخانات الكهربائية نتيجة لرفع في درجة الحرارة الى الدرجة المطلوبة وإنخفاض في الطاقة المستهلكة بالمحلل الكهربائي نتيجة لإرتفاع درجة تشغيل المحلل الكهربائي، يتضح من هذا سبب هبوط منحنى الطاقة المنتجة في اليوم الواحد للألواح الشمسية بالمنظومة مما سيقلل من عدد الألواح الشمسية المستهدفه لتشغيل المنظومة كما هو مبين في الشكل (5). لذا و بتسخين الماء المتدفق الى المحلل الكهربائي الى 90 درجة مئوية فإنه بالامكان تقليص عدد الألواح الشمسية من 46 لوحة الى 43 لوحة وهذه النتيجة ستنعكس بتأثير إيجابي على المنظومة من الناحية الإقتصادية، أي بالإمكان إنتاج كمية من الهيدروجين الأخضر بأقل عدد ممكن من الألواح الشمسية كما هو موضح في شكل (6).

في هذا الجزء من المحاكاة للمنظومة تم التركيز على زيادة عدد أكوام خلايا المحلل الكهربائي و تشغيلها على درجة حرارة مئوية مقدارها 90 وكثافة التيار بمقدار 4000 A/m2 ومناقشة تأثيرها ذلك على أداء منظومة نماء الطاقة. ليتضح من الشكل (7) أن الطاقة الكلية التي يتم إنتاجها من الألواح الشمسية و التي تستهلك في المحلل الكهربائي ستتناسب طرديا مع زيادة عدد حزم خلايا المحلل الكهربائي. إن ما تحتاجه المنظومة من الطاقة الكهروضوئية من الألواح الشمسية في إنتاج الوقود والأكسجين لتغذية خلايا الوقود يكون اقل ما تحتاجه لإنتاج الهيدروجين الأخضر والذي سيكون استهلاكه على مدار اليوم تقريبا، بينما توليد الطاقة الكهربائية من خلايا الوقود يتم استهلاكها عند إنعدام أو إنخفاض الطاقة الكهروضوئية الشمسية (شكل 8). إنه من الجدير الإشارة هنا، إن الحاجة الى الطاقة الكهربائية من خلية الوقود من السهل حسابها لأي موقع وذالك من خلال معرفة مقدار الاستهلاك اليومي لذالك الموقع. بينما الحاجة الى استهلاك الوقود في صورة الهيدروجين الأخضر قد يختلف بختلاف الحاجة وكميتها من موقع الى آخر. فلقد اعتمد تصميم منظومة نماء على رؤية مستقبلية لما سيكون في المستقبل من الحاجة الماسة الى توفير الوقود النظيف للمركبات الآلية وغيرها و التي ستعتمد على خلايا الوقود كمحرك لها. يوضح الشكل (9) كيفية توزيع الألواح الشمسية في الموقع ، وبمعرفة عدد الألواح على التوازي من السهل حساب عدد صفوف الألواح الشمسية حيث أن العدد الكلي (The total) للألواح الشمسية في الموقع هو حاصل ضرب عدد الألواح بوضعية التوازي (In parallel) مع وضعيتها في حالة التوالي (معادلة 14) .

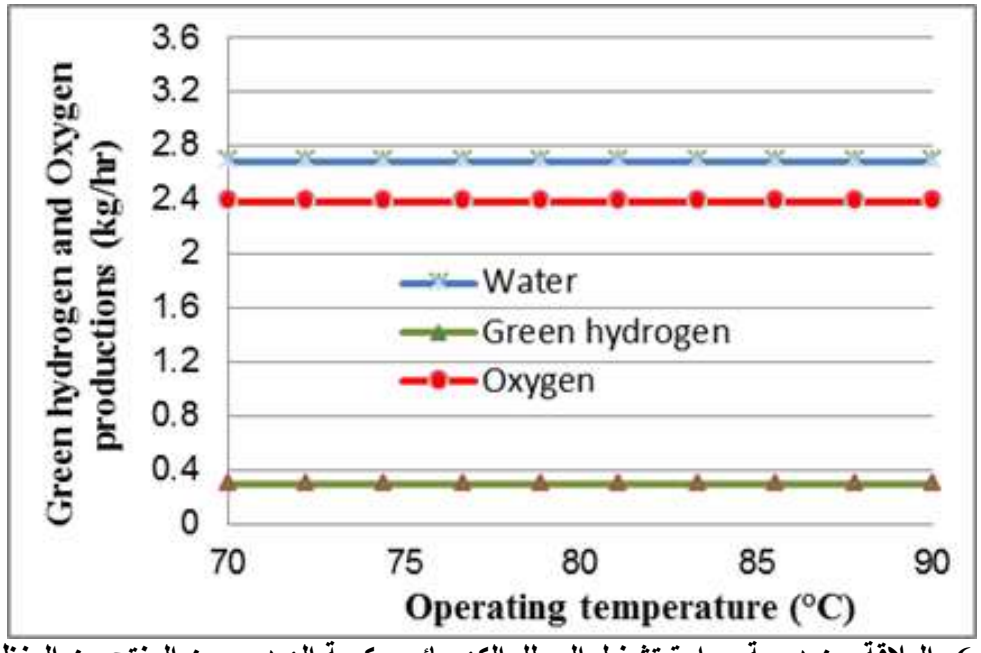


شكل 4: تأثير درجة حرارة تشغيل المحلل الكهربائي علي مقدار الطاقة الكلية

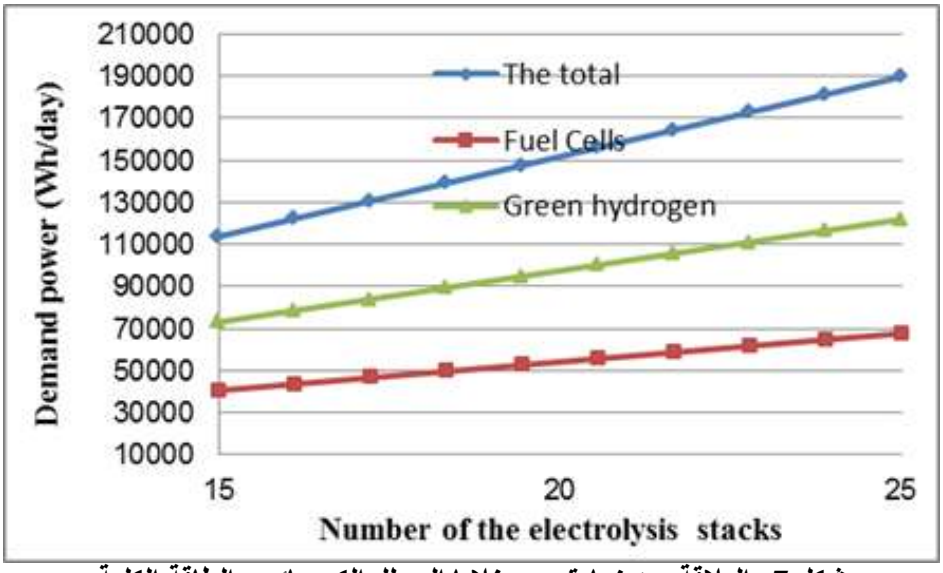
الشكل (10) يبين مقدار الطاقة المنتجة من الألواح الشمسية خلال أشهر السنة في مدينة غدامس. حيث تفيد مصادر الإرصاد الجوية أن في شهر ديسمبر يتم تسجل أدني قراءة للاشعاع الشمسي في غدامس وهي 4.03kWh/m2 وبالمقابل فإن أقصي قراءة لهذا الإشعاع تسجل في شهر يوليو وهي 8.001kWh/m2 . و يتضح من الشكل (10) أن إنتاج الطاقة الكهربائية من منظومة الألواح الشمسية ستزداد بالتزامن مع إرتفاع مقدار الإشعاع الكلي والمنتشر والمثمثل بتغير الاشهر بداية من شهر يناير لتصل الى أقصى ما يمكن إنتاجة من الطاقة الكهربائية في شهر يوليو. ونتيجه لهذا فإن منظومة نماء الطاقة ستتميز بان تكون مصدر لوفرة من الطاقة بعد شهر ديسمبر، مما يعطي إمكانية لوضع خطة بان تكون المدينة المستدامة الذكية مصدرة للطاقة ، و هذا يشكل مصدر اضافي للنمو الاقتصاد المستدام في المدينة بأن تتجاوز مرحلة الإكتفاء الذاتي من توليد الطاقة الكهربائية وانتاج الوقود الى مرحلة التصدير. وهذا مناسب لمدينة غدامس لكونها واقعة في منطقة حدودية بين تونس والجزائر مما يؤهلها بان يتم تصدير الطاقة بنوعيها الى خارج الدولة الليبية. أو أن يتم تخزين الطاقة المنتجة في اشهر ذروة توليد الطاقة في صورة وقود (الهيدروجين الأخضر) ويعاد تحويله الى طاقة كهربائية في خلايا الوقود وتستهلك في شهر ديسمبر مما يعطي إمكانية تصميم مشاريع إقتصادية بأقل عدد من المعدات في منظومة نماء الطاقة.



شكل 5: عدد الألواح الشمسيه وعلاقتها بدرجة حرارة تشغيل المحلل الكهربائي

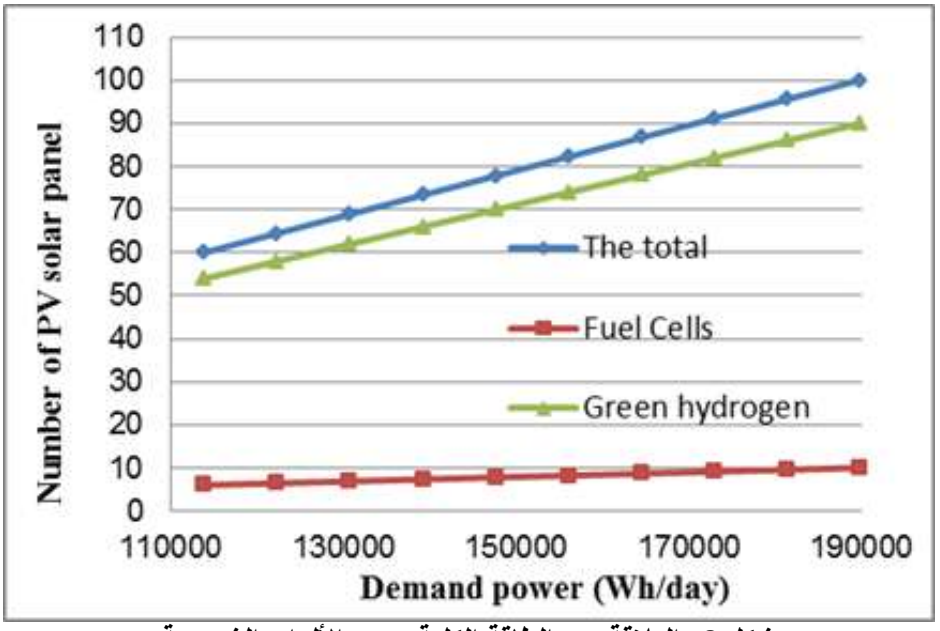


شكل 6: العلاقة بين درجة حرارة تشغيل المحلل الكهربائي وكمية الهيدروجين المنتج من المنظومة

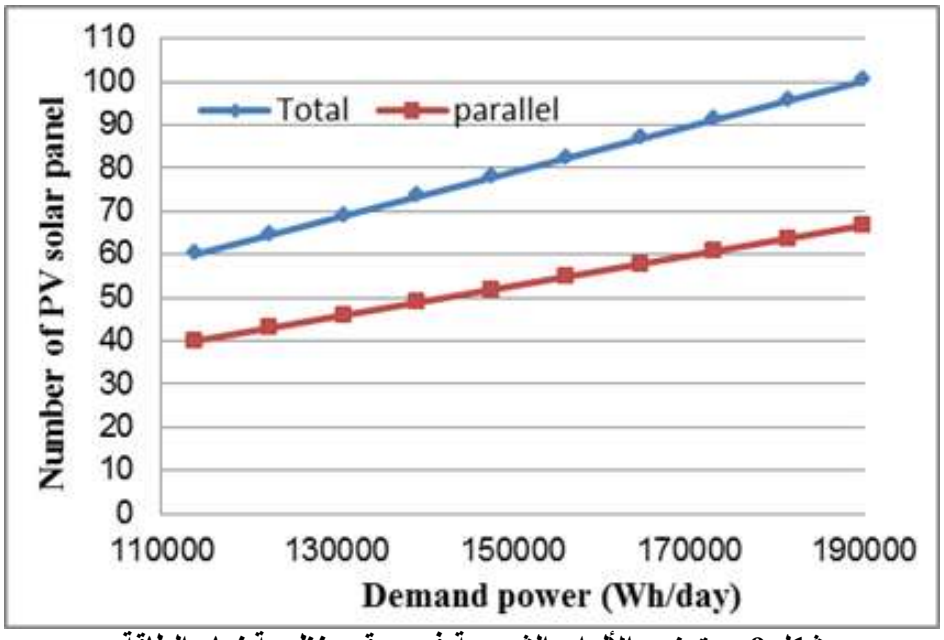


شكل 7: العلاقة بين زيادة عدد خلايا المحلل الكهربائي والطاقة الكلية

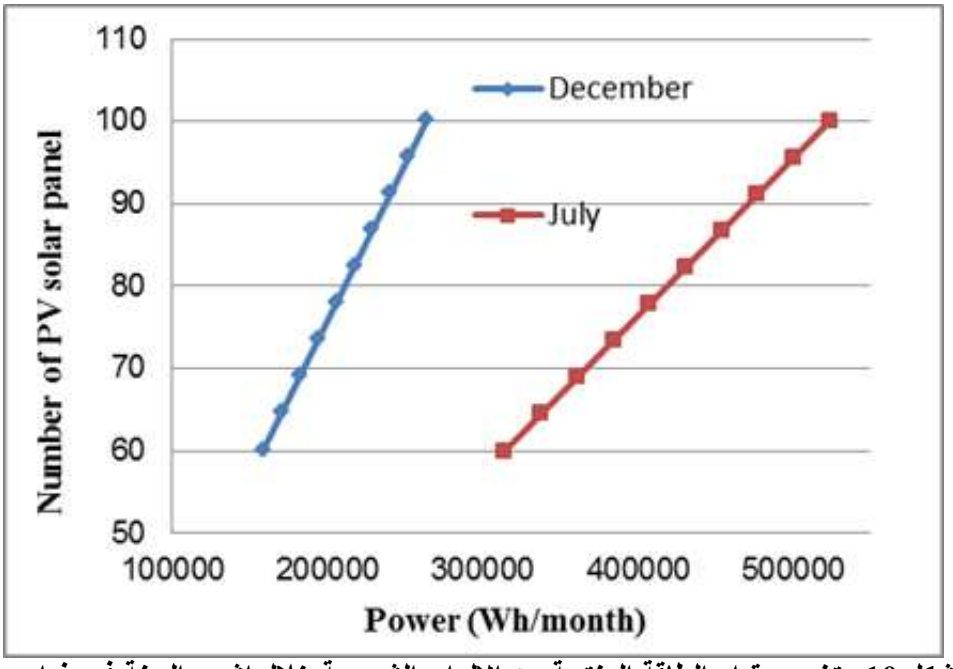
الشكل (11) يبين تأثير الموقع الجغرافي للمدينة على أداء المنظومة. إن من الاهمية بمكان بأن تكون منظومة نماء الطاقة مرنة وشاملة بحيث يمكن محاكاة أدائها في أي مدينة بليبيا وفرضية انشاء مدينة مستدامة ذكية بها. لذا فمن هذا المنطلق فقد اختيرت مدينة طرابلس كذالك لإجراء دراسة بها و ذلك من خلال محاكاة منظومة نماء الطاقة بظروف التشغيل في مدينة طرابلس والتي يتم فيها تسجل أدني قراءة للأشعاع الشمسي في شهر ديسمبر 2.744 KWh/m2 ومقارنتها بأداء المنظومة في مدينة غدامس في نفس الشهر. يتبين من الشكل (11) أن هناك فرق في ما يتعلق بعدد الألواح المستخدمة لتوليد نفس كمية من الطاقة وانتاج الوقود بين مدينة غدامس ومدينة طرابلس، فمثلا لتغطية الطاقة في النقطة ألاولى في الشكل (11)، يتطلب من المنظومة استخدام عدد 88 لوح شمسي بطرابلس. بينما في حالة إستخدامها بغدامس فلا يتجاوز عدد الألواح الشمسية عن 60 لوح شمسي، وهذا الفارق يرتفع بزيادة الطاقة المستهدف إنتاجها. أي أن موقع المدينة على الخط العرضي للكرة الأرضية وما سيترتب عليه من تسجيل لقراءة الإشعاع الكلي والاشعاع المنتشر سيؤثر تأثير مباشر على كمية الطاقة الكلية المنتجة في منظومة نماء الطاقة، بمعنى كلما يسجل الفارق إرتفاعا بين قراءة الاشعاع بين المدن في ليبيا كلما تتحسن المنظومة بانتاج نفس كمية الوقود وتوليد طاقة كهربائية و بأقل عدد من الألواح الشمسية. وهذه النتيجة تعطي إشارة بأهمية التركيز على تحديد المواقع الأفضل لانشاء محطات توليد الطاقة من الطاقة الكهروضوئية الشمسية في ليبيا.



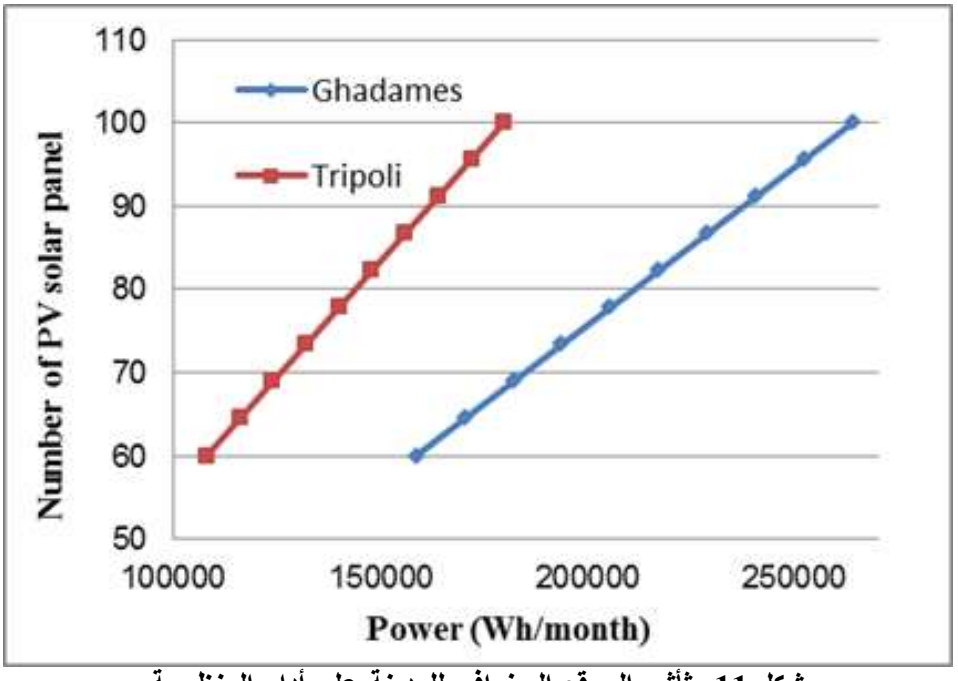
شكل 8: العلاقة بين الطاقة الكلية وعدد الألواح الشمسية



شكل 9: : توزيع الألواح الشمسية في موقع منظومة نماء الطاقة



شكل 10: تغيير مقدار الطاقة المنتجة من الالواح الشمسية خلال اشهر السنة في غدامس



شكل 11: تأثير الموقع الجغرافي للمدينة على أداء المنظومة

6 الخاتمة

تقدّم هذه الدراسة نموذجاً متكاملاً لتوليد الطاقة النظيفة وإنتاج الوقود اعتماداً على الحوسبة الهندسية وتقنيات المحاكاة المتقدمة، وذلك من خلال تطوير منظومة نماء الطاقة المصممة لدعم احتياجات مدينة مستدامة ذكية في ليبيا. وقد اعتمد النموذج على الدمج بين منظومة الألواح الشمسية الكهروضوئية، والمحلل الكهربائي القلوي، وخلايا الوقودPEM، ضمن إطار تحكم آلي يضمن التشغيل الأمثل للمنظومة، بما يتوافق مع الاتجاهات العالمية نحو المدن المستدامة الذكية [4-1].

وقد أشارت نتائج المحاكاة التي اعتمدت على بيانات الإشعاع الشمسي لمدينتي غدامس وطرابلس إلى أن القدرة الكلية المطلوبة للمنظومة تتناسب طردياً مع عدد حزم خلايا المحلل الكهربائي، وهو ما يتسق مع الدراسات السابقة في مجال إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام التحليل الكهربائي للماء [7–14]. كما أظهرت النتائج أن ارتفاع درجة حرارة التشغيل في المحلل الكهربائي من 60 °C إلى 90 °C يؤدي إلى انخفاض جوهري في الطاقة الكهربائية المطلوبة، مما يقلل من عدد الألواح الشمسية اللازمة لتشغيل المنظومة، وهذا يتوافق مع النتائج المعملية المتعلقة بتأثير درجة الحرارة على كفاءة التحليل القلوي [9,7].

وعند تقييم أداء المنظومة في مدينة غدامس، ظهر أنها قادرة على تحقيق الاكتفاء الذاتي الكامل من الطاقة الكهربائية والوقود، إضافة إلى إنتاج فائض خلال أشهر ذروة الإشعاع الشمسي. وهذا الفائض يمكن توجيهه نحو التصدير أو تخزينه في صورة هيدروجين أخضر، وهو ما يعزز الجدوى الاقتصادية للمدينة ويجعلها نموذجاً حضرياً مستداماً قابلاً للتكرار في مناطق مشابهة مناخياً [6,5].

أما في مدينة طرابلس، فقد بيّنت النتائج أن انخفاض الإشعاع الشمسي مقارنة بغدامس يؤدي إلى ضرورة زيادة عدد الألواح الشمسية لتحقيق نفس مستويات الإنتاج. وهذا يؤكد أهمية اختيار المواقع ذات الإشعاع الأعلى لإنشاء منظومات الطاقة الشمسية واسعة النطاق، كما ينسجم مع التقديرات العالمية حول أفضل مواقع إنتاج الهيدروجين الأخضر في شمال أفريقيا [3,5].

بشكل عام، تبرهن الدراسة على أن ليبيا تمتلك موارد شمسية تؤهلها لتبني استراتيجية وطنية للهيدروجين الأخضر، وتطوير مدن مستدامة ذكية تعتمد على ذاتها في الطاقة والوقود. إن تبني هذا النوع من المشاريع سيعمل على:

- دعم النمو الاقتصادي المستدام
- خلق فرص عمل جديدة
- تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري
- تمكين ليبيا من دخول سوق الطاقة النظيفة إقليمياً ودولياً

وتُعد "منظومة نماء الطاقة" نموذجاً قابلاً للتوسع يمكن تطبيقه في مختلف المدن الليبية مع تعديلات طفيفة مرتبطة بالموقع الجغرافي وبيانات الإشعاع الشمسي.

المراجع

[1] حامد، ط. يسرى، ا. رضوان، ا.(2016)، صياغة المفهوم العمراني للمدن الذكية. مجلة باحث الروبان ، مجلد 12.

[2] الواوي، ن. الأهدب، ف. (2019)، المدن الذكية المستدامة. المؤتمر الهندسي الثاني لنقابة المهن الهندسية ،الزاوية ليبيا.

[3] بفلوجمان، ف. دي بلاسيو، ن. (2020) الآثار الجيوسياسية والسوقيه للاعتمادات الجديدة للهيدروجين المتجدد في عالم الطاقة منخفض الكربون. برنامج البيئة والموارد الطبيعية في مركز بيلفر للعلوم والعلاقات الدولية ، جامعة هارفارد تقرير.
http://www.belfercenter.org/publication/geopolitical

[4] هيدروجين اوروبا . صناعة الهيدروجين.
http://www.hydrogeneurope.eu/hydrogen-industry

[5] أروفو، ك. برادو، ل. (2020). تحديات وفرص إنتاج الهيدروجين الأخضر وتصديره من منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا إلى أوروبا. دائرة المكتبة الوطنيه الاردن ، 5363 .12-

[6] Ates, A. Zendehdel, S. Sht, E. ; 2017; Solar energy supported hydrogen production: a theoretical case study. Journal of Selcuk University. 10-15317.

[7] Hakim, L. Sylvia, N. Sari, R. ; 2020; Production of hydrogen from sea water as renewable energy using the electrolysis methode. International Journal of psychosocial Rehabilitation. 1475-7192.

[8] Gondal, I. Masood, S. Khan, R. ; 2018; Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan. International Journal of hydrogen energy. 1-29.

[9] Atilhan, S. Park, S. El-Halwagi, M. Atilhan, M. Moore, M. and Nielsen, R. ; 2021; Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. Science Direct. 31-100668.

[10] Dincer, I. ; 2012; Green method for hydrogen production . International Journal of hydrogen energy. 1954-1971.

[11] Domenech, R. Santigo, O. Leo, T. 2020; Multicriteria analysis of seawater electrolysis technology for green hydrogen production at sea. Renewable and sustainable energy reviews. 133-110166.

[12] Rashid. M, Al Mesfer. M, H. Naseem, and M. Danish,. ; Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High.

[13] Musa. A, Ahmed. H, Abuojlida. K. ; 2021; Performance Evaluation of PEMFC system using hydrogen produced from solar PV panel energy. MI-STA conference, Tripoli, Libya.

[14] Abdol Rahim. A. H, Tijani. A. S, M. Fadhlullah, S. Hanapi, K. I. Sainan. .2015. Optimization of direct coupling solar PV panel and advance alkaline eletrolyzer system. Energy Procedia. 204-211.