

دراسة أداء مجمعات شمسية كهروحرارية تحت الظروف المناخية لمدينة طرابلس باستخدام برنامج المحاكاة TRNSYS

د. مصطفى الطاهر العاتب
جامعة مصراتة، كلية الهندسة، قسم الهندسة الميكانيكية
مصراتة، ليبيا
mustafa.elayeb@eng.misuratau.edu.ly

د. نوري أحمد الكشيري
جامعة طرابلس، كلية الهندسة الميكانيكية والصناعية
طرابلس، ليبيا
n.alkishriwi@uot.edu.ly

وقد ارتفعت هذه الانبعاثات خلال الفترة (1990-2007) بنسبة 42.2% [4]. ويُعد القطاع المنزلي أكبر القطاعات المستهلكة للطاقة، حيث وصلت نسبة ما يستهلكه إلى 36% من إجمالي الطلب على الطاقة في ليبيا [2]. لذا فإن قطاع المباني بعامة والقطاع السكني بخاصة ينبغي أن يحظى باهتمام واسع نظراً لإمكانية ترشيد وتوليد جزء كبير من هذه الطاقة شمسياً على عين المكان دون المساس بجودة الحياة لاقطنائها. ويتمثل الاستهلاك الأساسي للطاقة في القطاع المنزلي في التدفئة والتبريد وتسخين المياه والإنارة وتشغيل المعدات الكهرومنزلية، وإجمالاً فهو طلب على الطاقة الحرارية والكهربائية الذي يمكن توفيره بتقنيات الطاقة الشمسية.

يمكن تقسيم طرق الاستفادة من الطاقة الشمسية بعامة إلى تقنيات التحويل الحراري وتقنيات التحويل الكهروضوئي، حيث تستخدم الأولى المجمعات الشمسية الحرارية المختلفة لتحويل الأشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية ينقلها مانع تشغيل، في حين تستخدم الثانية الخلايا الشمسية التي تحول الطاقة الشمسية إلى كهرباء مباشرة. بيد أن كفاءة الخلايا الشمسية تنخفض بارتفاع درجة حرارتها، الأمر الذي أدى إلى التفكير في وسيلة لتبريدها. ومن هنا ظهرت فكرة المجمعات الهجينة التي تزوج بين التحويل الحراري والكهروضوئي (Photovoltaic-Thermal Collectors) ويشار إليها اختصاراً بالأحرف (PVT أو PV/T)، وسيتم في هذه الورقة استعمال مصطلح المجمع الشمسي الكهروحراري. وتظل الأسئلة المطروحة: ما جدوى الجمع بين تقنيات التحويل الحراري والتحويل الكهروضوئي في المجمعات الكهروحرارية؟ وهل يمكن لهذا النوع من المجمعات أن يلعب دوراً في تلبية الطلب المتزايد على الطاقة في القطاع المنزلي في ليبيا؟ وما مدى ملاءمتها للمناخ الليبي والظروف المحلية؟

لا شك أن إجراء القياسات التجريبية هي أفضل طريقة للحصول على معلومات قيمة ودقيقة لسلوك أي نظام تحت الاختبار والإجابة على مثل هذه الأسئلة. ولكن كثيراً ما تتوفر للمحاكاة الرقمية العديد من المزايا، منها ما يتعلق بالتكلفة وأخرى بصعوبة إجراء القياسات للعديد من الحالات. فعند إجراء المحاكاة الرقمية يمكننا التنبؤ بسهولة وبدقة مقبولة بأداء النظام تحت الظروف المناخية المتفاوتة ومتغيرات التصميم وظروف التشغيل المختلفة في وقت قصير جداً مقارنة بالمنحى التجريبي. وبالإضافة إلى ذلك تستخدم المحاكاة الحاسوبية لإجراء التصميمات المختلفة والحصول على الأداء الأمثل للنظام، دون الحاجة إلى أجهزة الاختبار المكلفة جداً عادةً.

من هنا جاءت هذه الورقة لتختبر أداء عدد من المجمعات الشمسية الكهروحرارية تحت الظروف المناخية لمدينة طرابلس ونمط استهلاك الأسرة الليبية للمياه الساخنة، وذلك باستخدام برنامج المحاكاة (TRNSYS). من أجل ذلك تم تقسيم هذه الورقة إلى ثمانية بنود، تناول البنود الأولان نبذة عن المجمعات الكهروحرارية وبرنامج المحاكاة المستخدم، تلى ذلك التعريف بالمنهجية المتبعة ومنصة الاختبار الافتراضية ثم مدخلات عملية المحاكاة ومناقشة نتائجها، وأخيراً اختتمت الورقة بالخلاصة والتوصيات ودُيِّلت بقائمة المراجع.

المخلص - تشهد ليبيا طلباً متزايداً على الطاقة تعتمد في مجابهته على حرق المزيد من الوقود الهيدروكربوني الناضب والملوث للبيئة، في حين تتمتع بشدة إشعاع شمسي وساعات سطوح عالية تمثل مصدراً مهماً لسد العجز في الإمداد الطاقوي في البلاد والحد من التلوث البيئي. ويمثل القطاع المنزلي مستهلكاً كبيراً للطاقة في ليبيا وينبغي أن يستهدف بالترشيد والإمداد الشمسي وخصوصاً في وجود سطوح غير مستغلة لأغلب المباني. وتعد تقنيات المجمعات الشمسية الكهروحرارية واعدة في هذا المجال، لذا تتناول هذه الورقة دراسة أداء أربعة مجمعات شمسية كهروحرارية (PVT) عن طريق المحاكاة الديناميكية تحت الظروف المناخية لمدينة طرابلس ونمط الاستهلاك المحلي للمياه الساخنة، وذلك باستخدام برنامج (TRNSYS). ولمقارنة النتائج تم محاكاة خلايا شمسية (PV) ومجمعات شمسية مسطحة (FPC) بنفس مواصفات نظيراتها المستخدمة في المجمعات الكهروحرارية قيد الدراسة. تشير النتائج إلى زيادة كفاءة الخلايا الشمسية في المجمعات الكهروحرارية نتيجة التبريد، وانخفاض في كفاءة المجمعات المسطحة مع تحقيق نسب مساهمة شمسية تزيد عن 90% في المتوسط من احتياجات تسخين المياه. وأن المعدل الأمثل لتدفق المياه في منظومة الماء الساخن هو 60 كجم/ساعة للمجمعات الكهروحرارية المختبرة.

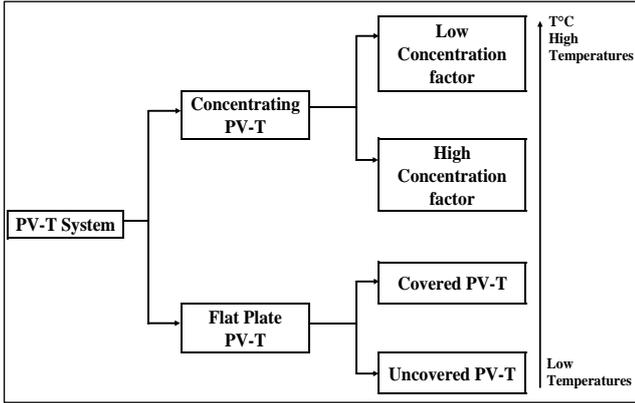
الكلمات مفتاحية: المجمعات الشمسية الكهروحرارية، المجمعات الشمسية الهجينة، TRNSYS، PVT، Photovoltaic-Thermal Collector

1. مقدمة

تصنف موارد الطاقة الشمسية في ليبيا من بين الأعلى في العالم، لكونها تتمتع بشدة إشعاع شمسي مرتفعة خلال معظم أيام السنة، حيث تتدرج ابتداءً من 1900 كيلوات/ساعة/متر مربع في السنة على ساحل البحر الأبيض المتوسط إلى ما يزيد عن 2800 كيلوات/ساعة/متر مربع في السنة في عمق الصحراء الليبية [1]. ومن المعلوم في هذا السياق، أن تكلفة إنتاج وحدة الطاقة تنخفض كلما زادت شدة الإشعاع الشمسي.

وبالرغم من ذلك، ومع اعتماد الاقتصاد الليبي بشكل رئيس على تصدير الهيدروكربونات من النفط والغاز الطبيعي، فإن الاستهلاك المحلي لهذه الموارد في ازدياد مضطرب أيضاً. فالطلب على الكهرباء في ليبيا تضاعف تقريباً خلال العقد الماضي وسببواصل النمو في المستقبل المنظور بمعدلات سنوية مرتفعة، تتراوح من سبعة إلى ثمانية في المائة حسب بيانات الشركة العامة للكهرباء. وقد وصل الطلب النهائي للطاقة الكهربائية في ليبيا سنة 2010 إلى 32.5 تيراوات ساعة، وبمتوسط نمو سنوي حوالي 7.5% عن السنة التي سبقتها [2]. هذا الاستهلاك المفرط للطاقة من المصادر التقليدية التي تستخدم الوقود الأحفوري أدى إلى ارتفاع معدلات التلوث ونسبة انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون إلى مستويات قياسية، حيث تشير بيانات البنك الدولي الصادرة سنة 2011 أن انبعاث ثاني أكسيد الكربون في ليبيا يتراوح ما بين 36-74 مليون طن سنوياً [3]، وأن 40% من هذه الانبعاثات تأتي من محطات الكهرباء التقليدية [2].

استلمت الورقة بالكامل في 19 أكتوبر 2016 وروجعت في 2 نوفمبر 2016 وقبلت للنشر في 8 نوفمبر 2016 ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 12 نوفمبر 2016 .



شكل 2. تصنيف المجمعات الكهروحرارية (PVT) [9].

4. منهجية الدراسة

استندت هذه الدراسة على بناء بيئة محاكاة باستخدام برنامج (TRNSYS) يمكن من خلالها تقييم وتحليل الأداء الحراري والكهربائي لمنظومة المجمعات الكهروحرارية المختارة. وتم استخدام الظروف المناخية للحظية لمدينة طرابلس، على مدى سنة كاملة (8760 ساعة)، ووفقاً لنمط استهلاك الماء الساخن السائد في المجتمع الليبي، ومن ثم تحليل ودراسة بعض متغيرات التشغيل؛ كمعدل تدفق ماء المنظومة ومساحة المجمع الشمسي وإيجاد تأثيرها على مردود وكفاءة المجمع الشمسي ونسبة المساهمة الشمسية في تغطية الحمل الحراري. وتم في هذا الصدد اختبار أربعة مجمعات شمسية كهروحرارية، كانت كفاءة الخلايا الشمسية في اثنين منها 6% وبمساحة 5 م² و 8 م²، وبمثل هاتين المساحتين كانت كفاءة الخلايا في الآخرين 13%. كما تم محاكاة خلايا شمسية اعتيادية ومجمعات شمسية حرارية مسطحة بذات مواصفات تلك المستخدمة في المجمعات المختبرة، لغرض مقارنة النتائج.

5. منصة الاختبار الافتراضية

لتحقيق هدف هذه الدراسة تم إنشاء منصة افتراضية لاختبار المجمع الشمسي الكهروحراري ضمن بيئة محاكاة البرنامج. تشمل المنصة على مجمع شمسي كهروحراري ومضخة وخزان ووحدة تحكم ومصدر للإشعاع الشمسي ووحدة تمثيل لحمل الماء الساخن. يبين الشكل 3 مخططاً لمكونات المنظومة والعلاقة بين هذه المكونات لمحاكاة سلوك نظام (PVT) في بيئة البرنامج. فكل مكون هو عبارة عن برنامج جزئي يسمى "نوع" (Type)، ويعرف كل نوع برقم مميز يرمز إلى وظيفة المكون، ففي الشكل المذكور يمكن ملاحظة العناصر التالية: المجمع الكهروحراري (Type563)، والخزان الحراري (Type534)، وحمل الماء الساخن (Type14)، والمضخة (Type3)، والطابعة (Type25)، ووحدة التحكم (Type2)، ومعالج البيانات الإشعاعية (Type109).

6. المدخلات

تتمثل مدخلات عملية المحاكاة في بيانات الإشعاع الشمسي الكلي اللحظي على السطح الأفقي لمدينة طرابلس، ونمط استهلاك المياه الساخنة المعتمد، ومواصفات المجمعات الشمسية قيد الاختبار. وتم الحصول على قيم الإشعاع الشمسي الكلي اللحظي الساقط على السطح الأفقي والمعطيات المناخية لثلاث مناطق ليبية (طرابلس وسبها والكفرة) باستخدام برنامج (Meteonorm) [10]، الذي يعطي قيم السنة المناخية النمطية (TMY2) والتي يمكن قراءتها من قبل برنامج (TRNSYS). يقارن الشكل 4 مقدار الطاقة الشمسية الساقطة شهرياً على سطح أفقي في مدينة طرابلس بنظيره في كل من سبها والكفرة، كما يوضح المتوسط الشهري لدرجات الحرارة لمدينة طرابلس. ويظهر بوضوح بأن الكفرة تتمتع بأعلى معدلات للإشعاع الشمسي تليها سبها ثم مدينة طرابلس.

2. المجمعات الشمسية الكهروحرارية

تتكون المجمعات الشمسية الكهروحرارية (PVT) من الخلايا الشمسية (الفوتوفولتية) والتي بالإضافة لإنتاجها للكهرباء فهي تعمل كسطح ماص يجمع الحرارة وينقلها للمجمع الشمسي الحراري الملاصق لظهر الخلية الشمسية، شكل 1.

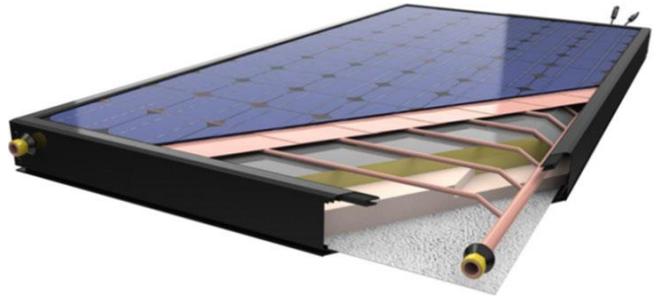
ترتفع كمية الطاقة الكهربائية المنتجة، في أنظمة الخلايا الشمسية التقليدية، كلما زادت شدة الإشعاع الشمسي الساقط على الألواح، ولكن هذا يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الخلايا الشمسية ومن ثم انخفاض كفاءتها. فإذا ما تم وضع المجمع الشمسي التقليدي خلف الخلية الشمسية فيعمل كوحدة تبريد للخلايا الشمسية، وبالتالي تحسين كفاءتها الكهربائية من ناحية ويقوم بجمع الطاقة الحرارية واستخدامها في تسخين المياه والتدفئة والتبريد -على سبيل المثال- من ناحية أخرى. كما أن التصميم الهجين يعطي مزايا إضافية للخلايا، مثل التقليل من الإجهادات الحرارية؛ ومن ثم استقرار خصائص الخلايا الشمسية وزيادة عمرها الافتراضي.

ولأجل إعطاء نظرة أفضل على تقنية المجمعات الكهروحرارية، يبين الشكل 2 التصنيف العام لهذه المجمعات. فالقئة الأولى تضم المجمعات الكهروحرارية المركزة سواء ذات معامل تركيز إشعاعي منخفض (2-3) أو معامل تركيز عالٍ (4-6). أما القئة الثانية فتشتمل على المجمعات الكهروحرارية المسطحة. يمكن تقسيم هذا النوع من المجمعات حسب وجود الغطاء الزجاجي من عدمه، أو حسب نوعية مائع التبريد المستخدم وما إذا كان هواءً أو سائلاً (ماء أو مائع تبريد مقاوم للتجمد) [5].

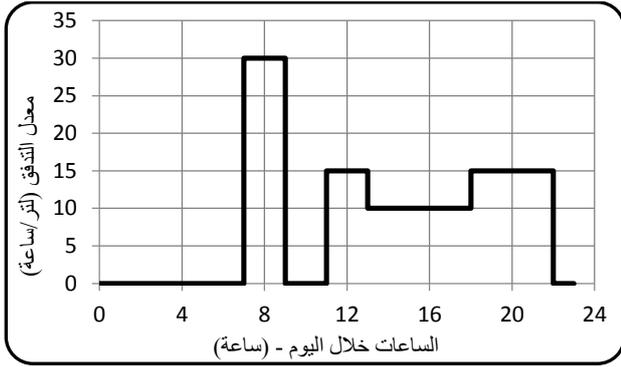
3. برنامج المحاكاة الديناميكية (TRNSYS)

شهدت العقود الأخيرة تطوراً كبيراً في صناعة الحاسبات والبرمجيات، وانعكس ذلك على كافة المجالات الهندسية. ونتيجة لذلك ظهرت العديد من البرمجيات التجارية التي تحاكي المنظومات الهندسية مما قلل الجهد والمال لتصميم واختبار تلك المنظومات. ولعل (TRNSYS) يعد من أشهر البرمجيات المستخدمة في مجال الطاقات المتجددة، كونه أداة مرنة مصممة لمحاكاة الأداء العابر للعديد من المنظومات الميكانيكية والكهربائية، ويحتوي على مكتبة إلكترونية من البرامج المساعدة والبيانات المناخية والإشعاعية لعدد كبير من المدن والمناطق حول العالم.

طور (TRNSYS) في جامعة ويسكنسون (Wisconsin) الأمريكية على مدى 35 سنة الماضية [6]، ولعل أحد عوامل نجاحه طيلة هذه الفترة هو إمكانية تعديل وتحديث مكوناته وتطويرها لتتناسب مع احتياجات المستخدم؛ فينيتها تسمح للمستخدمين والمطورين بإضافة نماذج ومكونات مخصصة بجميع لغات البرمجة الشائعة، كما يمكن ربطه بسهولة إلى العديد من التطبيقات الأخرى. لذلك يعتبر أحد أهم البرامج المعترف بها على نطاق واسع كأداة تحليل ذات موثوقية لنظم الطاقة المعقدة. وهناك العديد من الأوراق والمنشورات تقارن نتائج القياسات التجريبية المختلفة مع نتائج محاكاة البرنامج، وقد أظهرت توافقاً جيداً بينهما [7]. وتعتبر المحاكاة الديناميكية للسخانات الشمسية والخلايا الشمسية وطاقة الرياح والمجمعات الكهروحرارية من التطبيقات الأساسية للبرنامج، التي من شأنها توفير الكثير من التكاليف على المدى الطويل.



شكل 1. المجمع الشمسي الكهروحراري (PVT) [8]



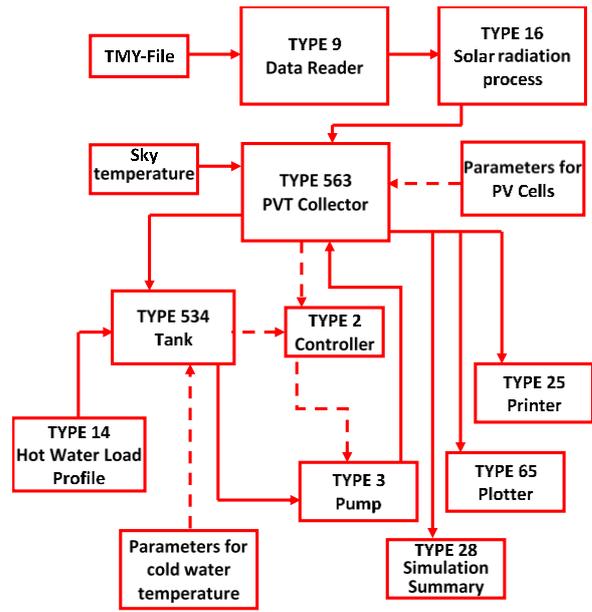
شكل 5. نمط استهلاك الماء الساخن المستخدم في المحاكاة

يتناول الشكل 6 توزيع درجات الحرارة في منظومة المجمع الكهروحراري (13%، 5 م²) وعلى مدى أربعة أيام من التشغيل (10 - 13 أبريل) كعينة من النتائج للحظية للمحاكاة، حيث يبين درجات حرارة كل من السطح السفلي للخلية الشمسية ودرجة حرارة دخول وخروج الماء للمجمع الشمسي ودرجة حرارة الهواء المحيط. وكما هو متوقع، يلاحظ أن درجة حرارة الخلية الشمسية أعلى من درجة حرارة الخروج من المجمع الشمسي، نتيجة لوجود المقاومة الحرارية بين سطح الخلية وسطح المجمع الحراري. فكلما قلت المقاومة الحرارية بينهما اقتربت درجة حرارة الخروج من المجمع من درجة حرارة الخلية، وزاد معدل انتقال الحرارة للمجمع الحراري ومعدل تبريد الخلية، وبالتالي زادت كفاءة المجمع الشمسي الكهروحراري. أما كمية الطاقة الكهربائية والحرارية المنتجة من المنظومة مقارنة بالإشعاع الشمسي الساقط على سطح المجمع، خلال نفس الفترة، فهي موضحة بالمساحة تحت المنحنيات بالشكل 7. حيث نجد أن منحنى توليد القدرة الكهربائية والحرارية يوافق منحنى الإشعاع الشمسي في الشكل بطبيعة الحال، فأقصى توليد كان عند الزوال (الظهيرة الشمسية) وأدنى قيمة له عند الصباح والمساء.

ولتحديد معدل التدفق الأمثل للمياه في المجمع الشمسي الكهروحراري، سواء من ناحية كمية الطاقة المنتجة أو كفاءة التحويل الحراري أو الكهربائي؛ تم اختبار عدّة معدّلات لتدفق الماء الداخل للمجمع عند قيم

جدول 1. مواصفات المجمعات الشمسية الكهروحرارية قيد الدراسة

العنصر	الوصف	القيمة	الوحدة
	مساحة المجمع	8 & 5	m ²
	الموصلية الحرارية للسطح الماص	200	W/m.°C
	الحرارة النوعية للمائع	4.19	kJ/kg.K
	كفاءة المجمع الشمسي - η ₀	0.567	-
	معامل الفقد من الدرجة الأولى - c ₁	3.11	kJ/(h.m ² .K)
	معامل الفقد من الدرجة الثانية - c ₂	0.12	kJ/(h.m ² .K ²)
المجمع الكهروحراري (PVT)	زاوية ميلان المجمع	45	°
Type 563	كفاءة الخلايا الشمسية عند الظروف المعملية	6% & 13%	
	الإشعاع الشمسي عند الظروف المعملية	1000	W/m ²
	درجة الحرارة المرجعية للخلية الضوئية	25	°C
	معامل درجة الحرارة لكفاءة الخلايا الشمسية	-0.0024	°C
	عامل الحزم (Packing factor): نسبة مساحة الخلايا إلى مساحة السطح الماص	1	
المضخة Type 3	معدل تدفق المائع (الماء)	4	LPM
	أقصى قدرة للمضخة	300	W
الخزان Type 534	الحجم	350	Liter
	درجة حرارة الضبط	55	°C

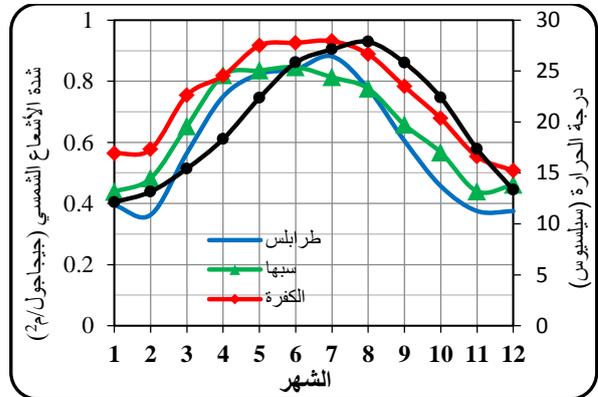


شكل 3. مخطط تدفق المعلومات في منصة المحاكاة ضمن برنامج (TRNSYS)

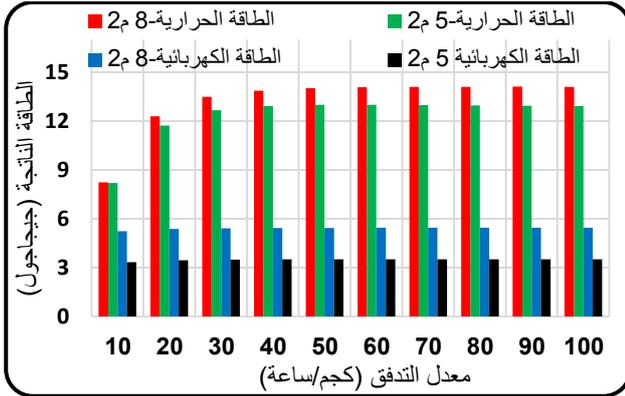
يؤثر نمط استهلاك المياه الساخنة من الخزان الحراري على نتائج المحاكاة، بطبيعة الحال، وبالتالي لا بد من اعتماد نمط مناسب لطبيعة استهلاك الأسرة الليبية. ونظرا لعدم وجود دراسة تجريبية جادة ومعتمدة لتحديد هذا النمط حتى الآن، فقد تم العودة إلى المواصفات الأوربية للمنظومات الشمسية [11]، [12] لأسرة مكونة من 4-5 أفراد وإلى بعض الدراسات المتخصصة في هذا السياق [13]، ومن ثم اختيار النمط الموضح بالشكل 5 لمعدل استهلاك يومي قدره 200 لتر من المياه الساخنة موزعة على النحو المبين وعند درجة حرارة لا تقل عن 55°C. يوضح جدول (1) المواصفات الفنية للمجمعات الشمسية الكهروحرارية التي تم إخضاعها للمحاكاة ضمن هذه الورقة.

7. النتائج والمناقشة

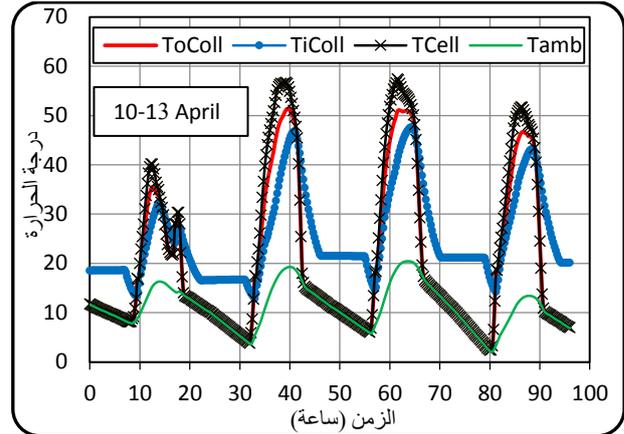
تم إجراء المحاكاة للمنظومات المختارة على مدى سنة كاملة وبخطوة زمنية قدرها 15 دقيقة. تضمنت الاختبارات نوعين من الخلايا الشمسية بكفاءة 13% و6%، وبمساحة 5 م² و8 م² وفقاً للمدخلات والمواصفات السابق ذكرها. سيتم هنا عرض عينة من النتائج ومناقشتها وإجراء بعض المقارنات، وسيشار إلى كل نوع من المجمعات بكفاءة الخلايا به ومساحته بين قوسين.



شكل 4. المعدلات الشهرية لشدة الإشعاع الشمسي في ثلاث مدن ليبية، والمتوسط الشهري لدرجة الحرارة في مدينة طرابلس [1]



شكل 8. الطاقة الحرارية والكهربائية المولدة سنوياً من المجمعين (13%، 5 م² و 8 م²) عند معدلات تدفق مختلفة للمياه.

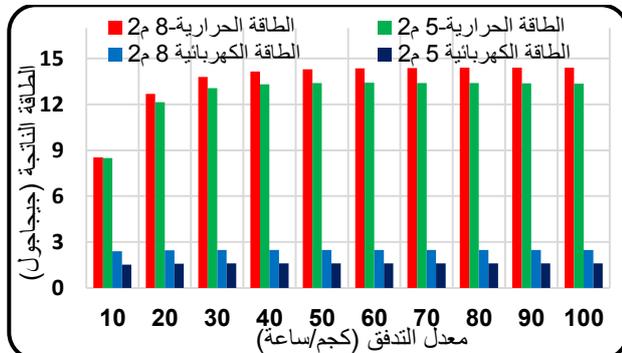


شكل 6. توزيع درجات الحرارة في المجمع الكهروحراري (13%، 5 م²) خلال أربعة أيام متتالية.

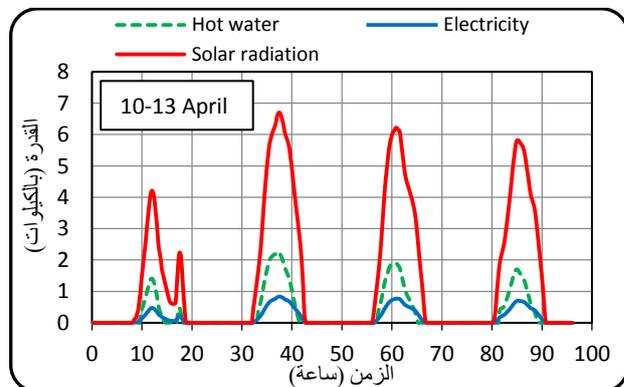
الكفاءة الكهربائية الشهرية للمجمع الشمسي الكهروحراري وألواح الخلايا الشمسية الاعتيادية، ومنه نلاحظ بوضوح أن الكفاءة الكهربائية للمجمع الكهروحراري أعلى من كفاءة الخلايا الاعتيادية، وذلك بسبب تأثير التبريد الناتج من تدفق المياه خلال المجمع الكهروحراري. ونجد من الشكل الأخير أيضاً، أن كلا الكفاءتين تصلان إلى أقصى قيمة لهما خلال فصل الشتاء بينما تصلان إلى أدنى قيمة لهما خلال فصل الصيف. ويرجع السبب في ذلك إلى انخفاض درجة الحرارة المحيطة التي تؤثر مباشرة على إنتاج الكهرباء من الألواح الكهروضوئية في فصل الشتاء.

ويمكن ملاحظة خلاصة عمليات المحاكاة للمجمعات المختلفة في القيم السنوية للطاقة المولدة والمتوسط السنوي للكفاءات، ونسب المساهمة الشمسية الموضحة في الجدول 2، ومقارنتها مع القيم المناظرة في حالة الخلايا الشمسية المعتادة والمجمعات الشمسية المسطحة (FPC) من ذات المواصفات، أو المقارنة لها. ومن الجدول يمكن ملاحظة ما يلي:

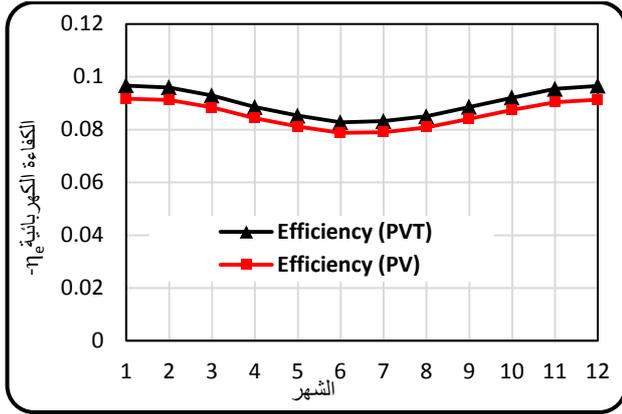
- تتراوح الزيادة في المتوسط السنوي لكفاءة الخلايا الشمسية عند استخدامها ضمن المجمع الكهروحراري من 0.3% إلى 0.94% - حسب نوع المجمع- نتيجة التبريد، ويؤدي ذلك إلى زيادة الطاقة الكهربائية المولدة سنوياً بمقدار 7-11% حسب كل حالة.
- ينخفض المتوسط السنوي لكفاءة المجمع الشمسي المسطح عند استخدامه ضمن المجمع الكهروحراري بمقدار 5-8% وينخفض بذلك المتوسط السنوي لنسبة المساهمة الشمسية للمجمعات المختبرة إلى المدى 90-98%.
- يزداد المتوسط السنوي لنسبة المساهمة الشمسية بزيادة المساحة ويقبل بزيادة كفاءة الخلايا الشمسية كما هو متوقع وسبق بيانه.
- يمكن تعويض العجز في الإمداد الحراري الناتج من انخفاض نسبة المساهمة الشمسية في المجمعات الكهروحرارية، باستخدام عنصر تسخين مساعد يعمل بالكهرباء. وسيستهلك في هذه الحالة نحو 62% و40% من الطاقة المولدة سنوياً من خلايا المجمعين الكهروحراريين



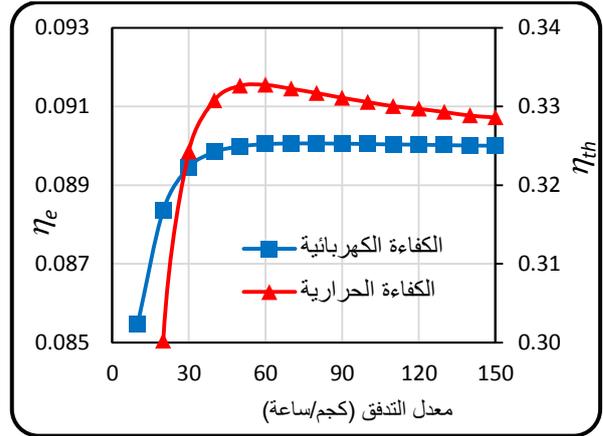
شكل 9. الطاقة الحرارية والكهربائية المولدة سنوياً من المجمعين (6%، 5 م² و 8 م²) عند معدلات تدفق مختلفة للمياه.



شكل 7. الكهرباء والحرارة المنتجتان من المجمع (13%، 5 م²) خلال أربعة أيام متتالية مقارنة بالإشعاع الشمسي الساقط عليه.



شكل 12. تحسن كفاءة الخلايا الشمسية نتيجة تبريدها في المجمع الشمسي الكهروحراري (13%، 5 م²).



شكل 10. تغير الكفاءة الكهربائية والحرارية للمجمع (13%، 5 م²) مع تغير معدل تدفق الماء

- أثبتت الدراسة الجدوى التقنية للمجمعات الكهروحرارية المختبرة في الظروف الليبية، حيث أمكن تغذية الحمل الحراري بالكامل مع فائض في الكهرباء المولدة سنوياً لجميع الحالات المدروسة، ولنفس مساحة أي من الخلايا أو المجمع المسطح منفرداً.
- وصلت نسبة الزيادة في المتوسط السنوي لكفاءة الخلايا الشمسية إلى 11% عند دمجها في المجمع الكهروحراري نتيجة لتبريدها، وهذا يعني بطبيعة الحال زيادة في الكهرباء المولدة السنوية بذات النسبة.
- انخفاض المتوسط السنوي لكفاءة المجمع المسطح عند دمجها في المجمع الكهروحراري يساعد في تلطيف درجة حرارة المياه صيفاً؛ وهذا أمر مرغوب خاصة في المناطق المعتدلة والحارة مثل ليبيا، مع إمكانية استخدام عنصر تسخين مساعد لتعويض النقص في نسبة المساهمة الشمسية كلما لزم ذلك. والجدير بالذكر أن استهلاك العنصر المساعد لم يتجاوز 62% من الكهرباء المولدة من المجمع سنوياً في أسوأ الحالات.
- تزداد الكفاءتان الكهربائيّة والحراريّة للمجمعات الكهروحرارية قيد الدراسة بزيادة معدل تدفق المياه، وتصل الذروة عند 60 كجم/ساعة وهو معدل تدفق المياه الأمثل لجميع الحالات المختبرة.

تظل هذه الورقة خطوة ينبغي أن تتبعها خطوات على الصعيدين النظري والعملي. فعلى سبيل المثال، يجب إجراء دراسة جدوى اقتصادية لهذا النوع من المنظومات وتحديد نوعية الخلايا الشمسية والمجمعات الحرارية المناسبة لها، ودراسة تأثير نمط الاستهلاك على أدائها وتحديد القيم المثلى للمساحات وعامل الحزم (Packing factor) ونسبة المساهمة الشمسية، الخ. أيضاً هناك حاجة لإجراء قياسات معملية لاختبار أداء هذه المجمعات تحت الظروف الفعلية ومقارنة الأداء النظري بالأداء العملي.

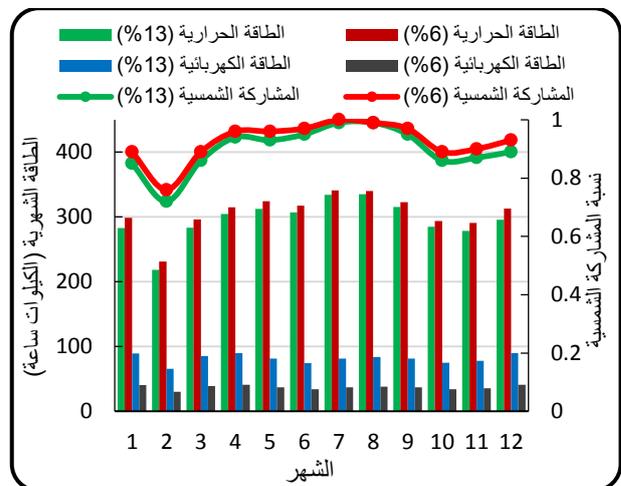
جدول 2. القيم والمتوسطات السنوية للمجمعات الكهروحرارية مقارنة بنظيراتها من الخلايا الشمسية والمجمعات المسطحة الاعتيادية

نوع المجمع	مساحة المجمع (م ²)	الكهرباء المولدة سنوياً (كيلوات ساعة)	الحرارة المولدة سنوياً (كيلوات ساعة)	المتوسط السنوي للكفاءة	
				η_{th}	η_{el}
PVT, 6%	5	446	3685	0.37	0.0446
	8	691	3993	0.25	0.0432
PVT, 13%	5	977	3553	0.36	0.0976
	8	1515	3910	0.24	0.0947
PV, 6%	5	402	0	0	0.0402
	8	643	0	0	0.0402
PV, 13%	5	882	0	0	0.0882
	8	1412	0	0	0.0882
FPC	5	0	4370	0.44	0
	8	0	4759	0.30	0

(6% و 13%، 5 م²) على الترتيب، ونحو 12% و 8% من الطاقة المولدة سنوياً من خلايا المجمعين (6% و 13%، 8 م²). فكلما زادت كفاءة الخلايا وقلّت مساحة المجمع انخفضت نسبة المساهمة الشمسية، وبالتالي زاد استهلاك عنصر التسخين المساعد، في حين تزداد الكهرباء المولدة بزيادة كفاءة الخلايا ومساحة المجمع، وبالتالي تنخفض نسبة ما يستهلكه العنصر المساعد من الكهرباء المولدة.

8. الخلاصة والتوصيات

حاولت هذه الورقة الإجابة عن أسئلة البحث الرئيسية والمتعلقة بالجدوى التقنية للمجمعات الكهروحرارية ودورها المأمول لتغذية الطلب على الطاقة في القطاع المنزلي في ليبيا. وتم دراسة وتقييم أداء أربعة مجمعات شمسية كهروحرارية تختلف من حيث كفاءة الخلايا الشمسية المستخدمة (6%)، (13%) ومن حيث المساحة (5 م²، 8 م²) عند الظروف المناخية لمدينة طرابلس ووفقاً لنمط الاستهلاك المتوقع للمياه الساخنة. واعتمدت الدراسة على محاكاة المنظومات المختلفة باستخدام برنامج المحاكاة الديناميكية (TRNSYS) على مدار العام وبخطوة زمنية قدرها 15 دقيقة. وقد قورنت النتائج بتلك المتحصل عليها من محاكاة الخلايا الشمسية والمجمعات المسطحة منفصلة وبنفس المواصفات المستخدمة في المجمعات الكهروحرارية. وبيّنت النتائج بوضوح أن أنظمة المجمعات الشمسية الكهروحرارية تعتبر تقنيات واعدة للتطبيقات السكنية، ويسرد فيما يلي أهم الاستنتاجات التي يمكن استخلاصها من هذه الدراسة:



شكل 11. نسبة المساهمة الشمسية والطاقة الكهربائية والحرارية المستفادة شهرياً من المجمعين (6% و 13%، 5 م²)

السيرة الذاتية



نوري أحمد سعيد الكشيري، مواليد يفرن 1969، حاصل على شهادة البكالوريوس في مجال الهندسة الميكانيكية والصناعية من كلية الهندسة بجامعة طرابلس سنة 1992، وعلى درجة ماجستير القوى الميكانيكية (التحليل العابر للتدفق في الأنابيب) من نفس الجامعة سنة 1997، وعلى درجة الدكتوراة في ميكانيكا الموائع (محاكاة الدوامة الكبرى في التدفقات منخفضة رقم ماخ) من جامعة آخن بألمانيا سنة 2007. عمل خبيراً بعدد من المؤسسات والشركات الليبية والألمانية وخصوصاً فيما يتعلق بالطاقات المتجددة ومنظومات التبريد والتكييف، كما عمل معيداً فعضو هيئة تدريس بجامعة طرابلس ويشغل بها حالياً درجة أستاذ مساعد بقسم الهندسة الميكانيكية والصناعية.



مصطفى الطاهر عبدالله العائيب، مواليد مصراتة 1969، حاصل على شهادة البكالوريوس في مجال الهندسة الميكانيكية والصناعية من كلية الهندسة بجامعة طرابلس سنة 1991، وعلى درجة ماجستير القوى الميكانيكية (نمذجة ومحاكاة المحطات البرجية الشمسية) من نفس الجامعة سنة 1999، وعلى درجة الدكتوراة في الطاقة وميكانيكا الموائع (الاحتراق في الأوساط المسامية) من جامعة بواتييه بفرنسا سنة 2008، ثم على ماستر البحث والتطوير في الميكانيكا من نفس الجامعة سنة 2010. عمل معيداً بجامعة طرابلس وباحثاً بمركز دراسات الطاقة الشمسية، وعضو هيئة تدريس بالمعهد العالي للصناعة، ويشغل حالياً درجة أستاذ مساعد بكلية الهندسة / جامعة مصراتة.

المراجع

- [1] نوري الكشيري و محمد ماشينه، "تحليل فني-اقتصادي لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية في ليبيا (الجزء الأول)", *ارسلت لمجلة البحوث الهندسية*, 2016.
- [2] M. R. Zaroug, "Country Energy profile (Libya)," IEA Energy Statistics Course, no. March. pp. 1-34, 2013.
- [3] "CO2 emissions - Carbon dioxide," *The World Bank*, 2011. [Online]. Available: <http://en.actualitix.com/country/wld/co2-emissions-by-country.php>. [Accessed: 01-Jan-2011].
- [4] "Energy Information Administration (EIA) (2009b) Libya energy profile. Energy Data Series US, Energy Information Administration," viewed September 2010. [Online]. Available: www.eia.doe.gov. [Accessed: 01-Jan-2010].
- [5] H. A. Zondag, "Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 4. pp. 891-959, 2008.
- [6] TRNSYS17, "A Transient Systems Simulation Program," *TRNSYS Simul. Platform, Sol. Energy Lab. Univ. Wisconsin-Madison, USA*, pp. 1-5, 2015.
- [7] I. A. Gravagne and K. Van Treuren, "On the Use of TRNSYS in a Solar Energy Technical Elective TRNSYS in Solar Energy TRNSYS in the Classroom," in *ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*, 2008.
- [8] B. Solimpeks, "PowerVolt & PowerTherm," *Data sheet*. [Online]. Available: <http://www.solarchoice.net.au/blog/wp-content/uploads/Solimpeks-Data-Sheet-PowerVolt-PowerTherm.pdf>.
- [9] P. Hofmann, P. Dupeyrat, K. Kramer, and M. Hermann, "Measurements and Benchmark of Pv-T Collectors According To En12975 and Development of a Standardized Measurement Procedure," in *Eurosun 2010 - 2nd international congress on Heating, Cooling and Buildings*, 2010.
- [10] Meteororm, "Meteororm - Global meteorological database," *Metetest*, 2012. [Online]. Available: <http://meteororm.com/>.
- [11] "EN 12976-2:2006 Thermal solar systems and components - Factory made systems - Part 2: Test methods," 2006.
- [12] "EN 12976-1:2006 Thermal solar systems and components - Factory made systems - Part 1: General requirements," 2006.
- [13] S. Bonk, "Methodology for the Assessment of the Hot Water Comfort of Factory Made Systems and Custom Built Systems," 2012.