



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة  
كلية الهندسة الكهربائية  
قسم الإلكترونيك



دراسة و تصميم منظومة كهروضوئية  
بنظام تتبع شمسي

مذكرة تخرج لنيل شهادة الماستر  
تخصص: الأنظمة المضمنة

إشراف الأستاذ:

د. بوزناد خالد

إعداد الطالبان:

- سالي مريم
- عيش مكي

الجنة المكونة من السادة

الاسم و اللقب	الجامعة	الصفة
د. عرباتني خالد	جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة	رئيسا
د. بوزناد خالد	المدرسة العليا لاساتذة التعليم التكنولوجي سكيكدة	مشرفا
بروفيسور رحموني صالح	المدرسة العليا لاساتذة التعليم التكنولوجي سكيكدة	مناقشا
د. مريان ابراهيم	المدرسة العليا لاساتذة التعليم التكنولوجي سكيكدة	مناقشا

السنة الجامعية: 2026/2025

## شكر وعرافان

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه ، والصلاة والسلام على معلم البشرية وسيد المرسلين، سيدنا محمد، وعلى آله وصحبه أجمعين.

أما بعد...

فإن من نعم الله وفضله أن وفّقنا لإتمام هذا العمل، وإرساء لقيم الوفاء، نتقدم بأسمى عبارات الشكر وعظيم الامتنان إلى الأستاذ الدكتور **بوزناد خالد** ، لتفضله بالإشراف على هذه

المذكرة، وما قدمه لنا من رعاية علمية وتوجيهات سديدة، ونصائح بنّاءة، كان لها أبلغ الأثر في تقويم هذا البحث وإخراجه في صورته النهائية.

كما نتوجه بجزيل الشكر والعرافان إلى السادة الأفاضل أعضاء لجنة المناقشة الموقّرين، لقبولهم قراءة هذه المذكرة وتقييمها، وثقتنا بالغة بأن ملحوظاتهم العلمية القيمة ستثري هذا العمل وتسدد خطاه.

ويمتد شكرنا وتقديرنا إلى جميع الأساتذة الأجلاء الذين رافقونا طيلة مسيرتنا الدراسية، فأناروا عقولنا بعلمهم، وأسهموا في تكويننا المعرفي والأكاديمي. ولا يفوتنا أن نزجي ثناء عاطراً لكل من ساندنا، ويسر لنا سبل البحث، أو قدم لنا دعماً من قريب أو بعيد. وفي الختام نسأل الله العليّ القدير أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، نافعاً في سبيله، وأن يجزي كل من وضع فيه لبنة خير الجزاء.

قال الله تعالى:

(وَمَآ تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ ۗ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ)

# إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

وصلت رحلتي الجامعية إلى نهايتها بعد تعب ومشق وها أنا ذا أختم بحث تخرجي بكل همّة نشاط  
وأمتن لكل من كان له فضل في مسيرتي، وساعدني ولو باليسير

وأولى الناس بالشكر هما الأبوان لما لهما من الفضل ما يبلغ عنان السماء، فوجودهما سبب للنجاة  
والفلاح في الدنيا والآخرة

إلى زوجتي العزيزة ورفيقة الكفاح في مسيرة الحياة إلى أصدقائي الذين أشهد لهم نعم الرفقاء في جميع  
الأمر

إلى كل من شدّ على يدي وساندني، ومنحني صادق الدعم من قريب أو بعيد، وجاد بوقته وجهده  
بكثير أو قليل، فكان لصنيعهم أثرٌ لا يُنسى في تيسير هذا السبيل

أهدي هذا العمل المتواضع تعبيراً عن المحبة والامتنان والتقدير، عرفاناً بما قدمتموه لي من دعم  
ومساندة وتشجيع.

أسأل الله أن يحفظكم جميعاً وأن يجعل هذا الإنجاز سبباً لسروركم وفخركم

عيش مكي

# إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى أعز الناس على قلبي، إلى عائلتي الكريمة...

إلى روح والدي رحمه الله، الذي كان سندًا وقُدوةً ومصدر إلهام وعطاء، وأسأل الله أن يغمده بواسع رحمته ويسكنه فسيح جناته.

إلى والدتي العزيزة، التي أحاطتني بدعائها ورعايتها، وكانت خير داعم لي طوال مسيرتي الدراسية.

إلى إخوتي وأخواتي، الذين شاركوني لحظات التعب والأمل، وكانوا مصدر قوة وتحفيز دائم.

إلى كل أفراد عائلتي الذين وقفوا إلى جانبي وساهموا، كلٌّ بطريقته، في وصولي إلى هذه المرحلة.

أهدي هذا العمل المتواضع تعبيرًا عن المحبة والامتنان والتقدير، عرفانًا بما قدمتموه لي من دعم ومساندة وتشجيع.

أسأل الله أن يحفظكم جميعًا وأن يجعل هذا الإنجاز سببًا لسروركم وفخركم.

سالي مريم

## الفهرس

الصفحة	العنوان
	المقدمة العامة
01	الفصل الأول: الطاقات المتجددة
01	1.I مقدمة
01	2.I الطاقات المتجددة
02	3.I مصادر الطاقة
02	1.3.I الطاقة الشمسية
02	1.1.3. I أنظمة الكهروضوئية
03	2.1.3.I الطاقة الشمسية الحرارية
04	2.3.I طاقة الرياح
04	1.2.3. I النمذجة الرياضية لإنتاج الطاقة
05	2.2.3. I التحديات التقنية
05	3.3.I الطاقة الكهرومائية
06	1.3.3. I أنواع المحطات الكهرومائية
07	2.3.3. I المزايا والتحديات
07	4. I الأثر البيئي وحماية النظم الإيكولوجية
07	5. I الحد من الانبعاثات الكربونية
08	6. I الحفاظ على التنوع البيولوجي
08	7.I الكتلة الحيوية والطاقة الحرارية الأرضية
09	1.7. I الطاقة الحرارية الأرضية
09	8. I تحديات التكامل، التخزين والشبكات الذكية
10	9. I إشكالية التذبذب وعدم الاستقرار
10	1.9. I التنبؤ الطاقوي
10	10. I الشبكات الذكية

10	11. I تكنولوجيايات تخزين الطاقة
11	12. I الخاتمة
13	<b>الفصل الثاني: الأنظمة الكهروضوئية</b>
13	1. II مقدمة
13	2. II اللوح الشمسي الكهروضوئي
13	1.2. II مكونات اللوح الشمسي
15	2.2. II الخلية الكهروضوئية
17	1.2.2. II مبدأ عمل الخلية الكهروضوئية
18	3. II الخصائص الكهربائية و المنحنيات المميزة ( $I - V$ ) و ( $P - V$ )
19	1.3. II تأثير درجة الحرارة على الخصائص الكهربائية
20	2.3. II تأثير الإشعاع الشمسي على الخصائص الكهربائية
21	4. II طرق توصيل الألواح الشمسية
21	1.4. II التوصيل على التسلسل (Series)
22	2.4. II التوصيل على التوازي (Parallel)
22	3.4. II التوصيل المختلط
23	5. II أنواع الأنظمة الكهروضوئية
23	1.5. II الأنظمة المستقلة (Off-Grid)
24	2.5. II الأنظمة المرتبطة بالشبكة (On Grid)
24	3.5. II الأنظمة الهجينة (Hybrid)
24	6. II مكونات النظام الكهروضوئي
24	1.6. II منظمات الشحن (Charge Controllers)
25	1.1.6. II منظم الشحن (PWM)
25	2.1.6. II منظم الشحن (MPPT)
26	2.6. II بطاريات التخزين
27	3.6. II العواكس (Inverters)
27	4.6. II الكابلات وأجهزة الحماية
27	5.6. II أجهزة الحماية

27	7. II منهجية تصميم وتحديد أبعاد النظام الكهروضوئي
29	8. II الخاتمة
30	<b>III الفصل الثالث: مكونات المشروع</b>
30	1. III مقدمة
30	2. III دراسة مكونات المشروع
30	1.2. III المتحكم الدقيق
31	1.1.2. III المتحكم الدقيق (ESP32)
32	1. 1.1.2. III البنية الداخلية
33	2. 1.1.2. III الخصائص التقنية
33	3. 1.1.2. III بيانات البرمجة
33	4. 1.1.2. III مجالات الاستخدام
34	5. 1.1.2. III مزايا (ESP32)
34	2.2. III المقاومات الكهربائية
34	1. 2.2. III المقاومة الضوئية (LDR)
35	3.2. III محرك التيار المستمر (DC Motor)
36	1.3.2. III محرك SERVO
36	2.3.2. III مبدأ العمل المحرك (Servo)
37	3.3.2. III أنواع المحركات (Servo)
38	4.2. III اللوح الشمسي الكهروضوئي
39	5.2. III البطارية
40	1.2.6. III حامل البطارية
40	2.6.2. III وحدة الشحن والإدارة (TP4056)
41	7.2. III مكثف التنعيم والتثبيت
41	8.2. III منظم الجهد المستعمل في المشروع
42	9.2. III وحدة استشعار مؤشرات الطاقة (الجهد والتيار)
43	10. III الخاتمة
44	<b>IV الفصل الرابع: تجسيد وإنجاز المشروع</b>

44	1. IV مقدمة
44	2.IV التجسيد الميكانيكي لهيكل المشروع
46	3.IV محاكاة المشروع
46	1.3. IV مبدأ العمل الفيزيائي
46	2.3. IV التصنيف الهندسي لأنظمة التتبع
46	1.2.3. IV أنظمة التتبع أحادية المحور
46	2.2.3. IV أنظمة التتبع ثنائية المحاور
47	4.12. IV استراتيجيات التحكم في التتبع
48	1.4. IV التحكم بنظام الحلقة المغلقة
49	2.4. IV التحكم بنظام الحلقة المفتوحة
50	5. IV عرض المنظومة التجريبية وإعدادات النظام المنجز
51	6. IV الخاتمة

## فهرس الاشكال

الصفحة	عنوان الشكل	الشكل
02	النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة الكهربائية	1.1
03	مبدأ عمل الخلية	2.1
05	التركيب العام لتوربين الرياح ذي المحور الأفقي	3.1
09	مبدأ عمل المضخة الحرارية	4.1
15	مكونات اللوح الشمسي.	1.11
16	البنية الداخلية للخلية الشمسية	2.11
18	آلية عمل الخلية الشمسية	3.11
19	منحنى بياني يوضح تغير التيار والجهد في اللوح الشمسي بتغير درجة	4.11
20	منحنى بياني يوضح تأثير الإشعاع الشمسي على الخصائص الكهربائية	5.11
21	توصيل الألواح الشمسية على التسلسل	6.11
22	توصيل الألواح الشمسية على التوازي	7.11
23	توصيل الألواح الشمسية باستعمال التوصيل المختلط	8.11
25	منظم الشحن PWM	9.11
26	منظم الشحن MPPT	10.11
26	أنواع بطاريات التخزين الكهربائي	11.11
31	ESP32	1.111
32	منافذ الإدخال والإخراج الخاصة ESP32	2.111
35	: أنواع المقاومات الضوئية	3.111
35	محرك التيار المستمر	4.111
37	البنية الداخلية للمحرك سيرفو	5.111
39	اللوح السيليكوني احادي البلورة المستعمل	6.111
40	بطاريات الليثيوم 18650 المستعملة	7.111
40	حامل بطارية 186500	8.111
41	وحدة الشحن و الحماية TP4056	9.111
42	منظم الجهد الخطي HT7333 - A	10.111
42	حساس التيار (Voltage Sensor 0-25V) والتوتر (ACS712)	11.111

45	الهيكل الميكانيكي	1.IV
47	مجسم توضيحي لألية عمل التتبع أحادي المحو	2.IV
51	شكل النهائي لمشروع المتتبع الشمسي	4.IV

## فهرس العلاقات

الصفحة	عنوان العلاقة	رقم العلاقة
07	النمذجة الرياضية لإنتاج الطاقة	1.I
46	قانون لامبرت	1.IV

يشهد العالم خلال العقود الأخيرة تزايداً مستمراً في الطلب على الطاقة نتيجة النمو السكاني والتوسع الصناعي والتطور التكنولوجي، وهو ما أدى إلى استنزاف متسارع لمصادر الطاقة الأحفورية وارتفاع مستويات التلوث البيئي وانبعاثات الغازات الدفيئة المسببة للاحتباس الحراري. وقد دفعت هذه التحديات العديد من الدول إلى تبني استراتيجيات طاقوية جديدة تركز على استغلال مصادر الطاقة المتجددة، باعتبارها بديلاً نظيفاً ومستداماً يساهم في تحقيق الأمن الطاقوي والحد من الآثار البيئية.

وتُعد الطاقة الشمسية من أكثر مصادر الطاقة المتجددة وفرةً وانتشاراً، لما تتميز به من توفر دائم وانخفاض تكاليف استغلالها على المدى الطويل، فضلاً عن ملاءمتها لمختلف المناطق الجغرافية، خاصة تلك التي تتمتع بمعدلات إشعاع شمسي مرتفعة، كما هو الحال في الجزائر. وقد شهدت الأنظمة الكهروضوئية تطوراً ملحوظاً خلال السنوات الأخيرة، بفضل التحسن المستمر في كفاءة الخلايا الشمسية وانخفاض تكاليف تصنيعها، مما جعلها من أهم الحلول المعتمدة لإنتاج الطاقة الكهربائية النظيفة.

ورغم هذا التطور، لا تزال الألواح الشمسية المثبتة بزوايا ثابتة تعاني من انخفاض مردودها الطاقوي نتيجة التغير المستمر في الموقع الظاهري للشمس أثناء اليوم واختلاف مسارها باختلاف الفصول، وهو ما يؤدي إلى تغير زاوية سقوط الأشعة الشمسية على سطح الألواح، وبالتالي انخفاض كمية الإشعاع المستقبلية وتراجع القدرة الكهربائية المنتجة. ومن هنا برزت الحاجة إلى تطوير أنظمة تتبع شمسي قادرة على توجيه الألواح بصورة مستمرة نحو الشمس، بما يضمن تعظيم الاستفادة من الإشعاع الشمسي وتحسين كفاءة إنتاج الطاقة.

وفي هذا الإطار، تهدف هذه المذكرة إلى تصميم وإنجاز منظومة ذكية للتتبع الشمسي ثنائي المحور تعتمد على المتحكم الدقيق ESP32 ، حيث تم في البداية تطوير نموذج أولي باستخدام Arduino Uno للتحقق من صحة التصميم واختبار خوارزمية التحكم ومختلف المكونات الإلكترونية والميكانيكية، قبل الانتقال إلى النسخة النهائية المعتمدة على ESP32 لما توفره من قدرة معالجة أعلى، واستهلاك منخفض للطاقة، ودعم مدمج لتقنيات الاتصال اللاسلكي، مما يجعلها أكثر ملاءمة لتطبيقات إنترنت الأشياء وأنظمة المراقبة والتحكم عن بعد.

وقد اعتمد النظام المقترح على استراتيجية تتبع نشطة باستخدام حساسات ضوئية من نوع LDR، مع تصميم هيكل ميكانيكي ثنائي المحور يسمح بتوجيه الألواح الشمسية وفق محوري السمات والارتفاع. كما تم دمج منظومة لقياس الجهد والتيار الكهربائي لحساب القدرة المنتجة في الزمن الحقيقي،

إضافة إلى نظام تغذية ذاتية يعتمد على الألواح الشمسية وبطارية ليثيوم-أيون، الأمر الذي يجعل المنظومة مستقلة وقابلة للاستخدام في المناطق المعزولة.

وللتحقق من فعالية النظام، أُجريت سلسلة من الاختبارات الميدانية تمت خلالها مقارنة أداء منظومة التتبع بالنظام الشمسي الثابت تحت نفس الظروف التشغيلية، وقد أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في القدرة الكهربائية المنتجة، مما يؤكد جدوى اعتماد أنظمة التتبع الشمسي في رفع مردود الأنظمة الكهروضوئية وتحسين استغلال الطاقة الشمسية.

ولتحقيق الأهداف المسطرة، تم تنظيم هذه المذكرة في أربعة فصول مترابطة:

يتناول الفصل الأول المفاهيم الأساسية للطاقة الشمسية والإشعاع الشمسي، بينما يعرض الفصل الثاني المبادئ النظرية للأنظمة الكهروضوئية وخصائصها الكهربائية والعوامل المؤثرة في أدائها. أما الفصل الثالث فيخصص لدراسة مكونات المنظومة المقترحة، مع التركيز على المتحكم الدقيق ESP32 والحساسات والمحركات والعناصر الإلكترونية المعتمدة. ويعرض الفصل الرابع الجانب التطبيقي للمشروع، بدءاً من التصميم الميكانيكي والإلكتروني، مروراً بالمحاكاة والبرمجة، وانتهاءً بإنجاز النموذج التجريبي وتحليل النتائج التجريبية وتقييم أداء نظام التتبع الشمسي الذكي .

## 1. I مقدمة

تشهد المنظومة الطاقوية العالمية تحديات متزايدة نتيجة النمو المستمر في عدد السكان والتوسع الصناعي والتكنولوجي، مما أدى إلى ارتفاع الطلب على الطاقة بمعدلات تفوق قدرة المصادر التقليدية على تلبية الاحتياجات المستقبلية. وفي الوقت نفسه، تسبب الاعتماد المكثف على الوقود الأحفوري في تفاقم المشكلات البيئية، من خلال زيادة انبعاثات الغازات الدفيئة، وارتفاع معدلات التلوث، وتسارع ظاهرة الاحتباس الحراري، وهو ما يفرض البحث عن بدائل طاقوية أكثر استدامة وصدقا للبيئة.

وتعد الطاقات المتجددة من أبرز الحلول المطروحة لمواجهة هذه التحديات، لما تتميز به من وفرة وانخفاض تأثيرها البيئي مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية. وتحمل الطاقة الشمسية مكانة متميزة ضمن هذه المصادر، نظراً لتوفرها بكميات كبيرة وإمكانية تحويلها مباشرة إلى طاقة كهربائية أو حرارية باستخدام تقنيات متطورة، مما يجعلها أحد أهم الخيارات لتحقيق التنمية المستدامة وتعزيز أمن الطاقة. [5].

وانطلاقاً من ذلك، يهدف هذا الفصل إلى تقديم دراسة نظرية حول الطاقات المتجددة، مع التركيز على الطاقة الشمسية الكهروضوئية، وذلك من خلال استعراض خصائصها، ومبدأ عملها، وأهم مكوناتها، إضافة إلى إبراز دورها في إنتاج الطاقة النظيفة وتحسين كفاءة الأنظمة الطاقوية الحديثة، تمهيداً للانتقال إلى الجوانب التطبيقية المتعلقة بتصميم منظومة شمسية ذكية في الفصول اللاحقة.

## 2. I الطاقات المتجددة

الطاقات المتجددة هي مصادر طبيعية للطاقة تتجدد بصورة مستمرة، مما يجعلها غير معرضة للنفاذ على المدى المنظور، كما تتميز بتوافرها في البيئة وإمكانية استغلالها بشكل مستدام. وتعد هذه المصادر من أكثر بدائل الطاقة ملاءمةً للبيئة، إذ إن استخدامها يحد بشكل كبير من انبعاثات الملوثات والغازات المسببة للاحتباس الحراري مقارنةً بمصادر الطاقة التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري. [2].

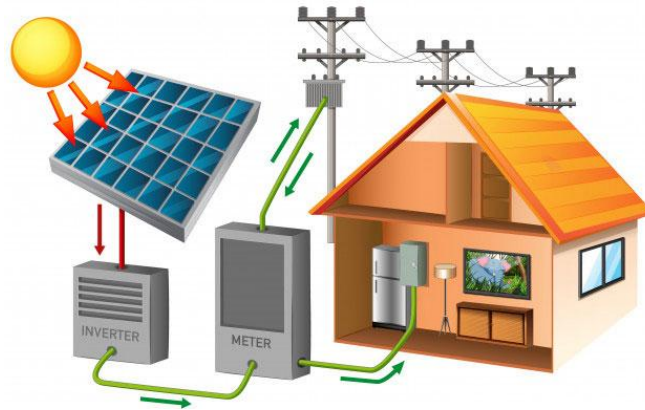
وتتنوع مصادر الطاقة المتجددة لتشمل الطاقة الشمسية، التي تعد المصدر الأساسي لمعظم أشكال الطاقة على سطح الأرض، إضافة إلى طاقة الرياح، والطاقة الكهرومائية، وطاقة المد والجزر، وطاقة الأمواج، والطاقة الحرارية الجوفية، فضلاً عن الطاقة الحيوية الناتجة عن عمليات البناء الضوئي. وتعتمد بعض هذه المصادر، مثل الطاقة الكهرومائية وطاقة الرياح وطاقة المد والجزر، على تحويل الطاقة

الميكانيكية الطبيعية إلى طاقة كهربائية قابلة للاستغلال في مختلف التطبيقات. ونظراً لأهميتها المتزايدة في تحقيق التنمية المستدامة وتعزيز أمن الطاقة، سيتم التطرق إلى هذه المصادر بإيجاز، مع التركيز بصورة خاصة على الطاقة الشمسية باعتبارها محور هذه الدراسة. [4].

### I 3. مصادر الطاقة

#### I 1.3. الطاقة الشمسية

تُعتبر الطاقة الشمسية المصدر الأكثر وفرة على كوكب الأرض، حيث تسقط على سطح الأرض في ساعة واحدة كمية من الطاقة تكفي لتغطية احتياجات البشرية لعام كامل. ويعكس هذا الرقم الإمكانيات الهائلة التي يوفرها هذا المصدر الطبيعي، خاصة في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع. غير أن التحدي الأساسي لا يكمن في توفر هذه الطاقة، بل في مسألة "كثافة الطاقة" وكيفية تجميعها وتحويلها بكفاءة إلى أشكال قابلة للاستعمال، سواء على شكل كهرباء أو حرارة، مع تقليل الفوائد المرتبطة بعمليات التحويل والتخزين. [10].

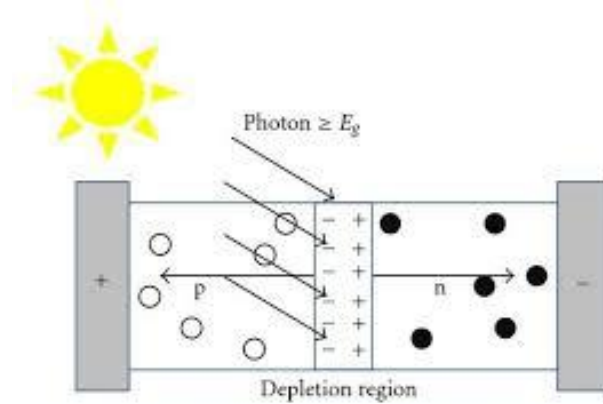


شكل 1.1 النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة الكهربائية

#### I 1.1.3. الأنظمة الكهروضوئية

تعتمد هذه التكنولوجيا على "الأثر الكهروضوئي (Effet Photovoltaïque)"، وهو ظاهرة فيزيائية تحدث داخل مادة شبه موصلة، غالباً ما تكون السيليكون، حيث تلعب البنية الإلكترونية لهذه المادة دوراً أساسياً في عملية تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية. وقد شهدت هذه التقنية تطوراً ملحوظاً في العقود الأخيرة، سواء من حيث تحسين الكفاءة أو تقليل التكاليف، مما ساهم في انتشارها على نطاق واسع في مختلف التطبيقات، من الأنظمة المنزلية الصغيرة إلى المحطات الشمسية الكبرى. [12]

أ- مبدأ العمل الفيزيائي : عند سقوط الفوتونات (جسيمات الضوء) على الخلية، فإنها تمنح طاقتها للإلكترونات في "نطاق التكافؤ"، مما يسمح لها بالانتقال إلى "نطاق التوصيل". وينتج عن هذه العملية تحرير الإلكترونات وخلق فرق في الجهد الكهربائي داخل الخلية، وهو ما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي مستمر. وتجدر الإشارة إلى أن كفاءة هذه العملية ترتبط بعدة عوامل، من بينها شدة الإشعاع الشمسي، درجة الحرارة، وطبيعة المادة شبه الموصلة المستخدمة. [14]



شكل 2.I مبدأ عمل الخلية

### ب- أنواع الخلايا

- السيليكون أحادي البلورة: (Monocrystalline) يتميز ببنية بلورية منتظمة، مما يمنحه كفاءة عالية قد تصل إلى 22%، إلا أن تكلفته تصنيعه تبقى مرتفعة نسبياً. [17]
- السيليكون متعدد البلورات: (Polycrystalline) يتم تصنيعه بطريقة أبسط، مما يجعله أقل تكلفة، لكنه يقدم كفاءة أقل مقارنة بالأنواع الأحادي [18]
- الأغشية الرقيقة: (Thin-film) تتميز بمرونتها وخفة وزنها، وتستخدم في تطبيقات خاصة، خصوصاً في المجالات المعمارية، رغم أن كفاءتها تبقى محدودة نسبياً.

### 2.1.3.I الطاقة الشمسية الحرارية

على عكس الخلايا الكهروضوئية، لا تقوم هذه الأنظمة بتوليد الكهرباء مباشرة من الضوء، بل تعتمد على تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية تُستغل لاحقاً في تطبيقات متعددة. وتُعد هذه الطريقة من أقدم أشكال استغلال الطاقة الشمسية، لكنها شهدت دورها تطورات تقنية مهمة ساهمت في رفع مردوديتها وتوسيع مجالات استخدامها [10]

• **المجمعات المسطحة:** تُستخدم غالباً في تسخين المياه للاستخدام المنزلي، حيث تقوم بامتصاص الأشعة الشمسية وتحويلها إلى حرارة تُنقل إلى سائل (غالباً الماء)، مما يوفر حلاً بسيطاً وفعالاً من حيث التكلفة في العديد من المناطق.

• **محطات الطاقة المركزة (CSP):** تعتمد على استخدام مرايا ضخمة (Heliostats) لتركيز أشعة الشمس على برج مركزي، حيث يتم تسخين مادة ناقلة للحرارة، مثل "الملح المنصهر"، إلى درجات حرارة مرتفعة جداً. وتُستخدم هذه الحرارة لإنتاج بخار عالي الضغط، يقوم بدوره بتشغيل التوربينات لتوليد الكهرباء. وتتميز هذه الأنظمة بإمكانية تخزين الطاقة الحرارية، مما يسمح بإنتاج الكهرباء حتى في غياب أشعة الشمس، وهو ما يمثل ميزة مهمة مقارنة بالأنظمة الكهروضوئية التقليدية.

### I. 2.3. طاقة الرياح

طاقة الرياح من أسرع قطاعات الطاقة نمواً في العالم، نظراً لما توفره من بديل نظيف وفعال مقارنة بالمصادر التقليدية. وتعتمد هذه التقنية في أساسها على تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة ميكانيكية عبر شفرات الدوار، والتي تقوم بدورها بتدوير مولد كهربائي لإنتاج الطاقة. وقد شهدت هذه المنظومات تطوراً ملحوظاً من حيث التصميم والكفاءة، حيث أصبحت التوربينات الحديثة قادرة على العمل في نطاقات واسعة من سرعات الرياح، مع تحقيق مردودية أعلى واستقرار أفضل في الإنتاج [09]

### I. 1.2.3. النمذجة الرياضية لإنتاج الطاقة

تخضع الطاقة المستخلصة من الرياح لمعادلة فيزيائية دقيقة تُبرز مدى ارتباط القدرة المنتجة بسرعة الرياح والعوامل الفيزيائية المحيطة:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (1.I)$$

حيث أن:

P : تمثل القدرة الناتجة عن التوربينة (بوحدة الواط).

$\rho$  : كثافة الهواء، والتي تتأثر بدرجة الحرارة والضغط الجوي.

A : المساحة الدائرية التي تغطيها الشفرات، وتُحسب انطلاقاً من طول نصف قطر الدوار.

v : سرعة الرياح، ويُلاحظ أن القدرة تتناسب مع مكعب السرعة، مما يعني أن أي زيادة طفيفة في سرعة

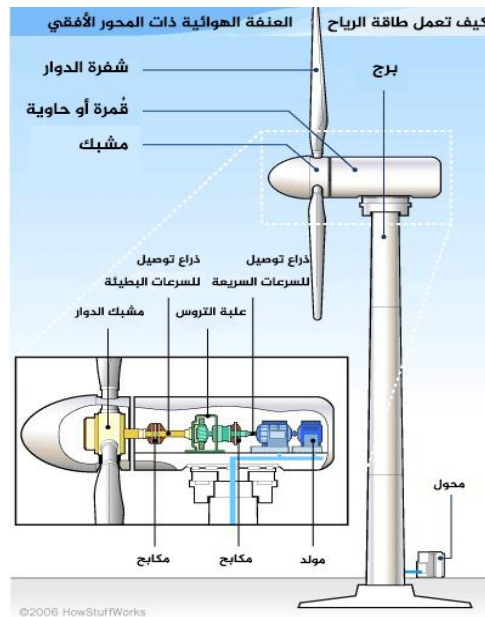
الرياح تؤدي إلى ارتفاع كبير في القدرة المنتجة.

$C_p$  : معامل القدرة، الذي يعبر عن كفاءة تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة ميكانيكية، ويخضع لما يُعرف بحد بيتز، حيث لا يمكن أن يتجاوز نظرياً نسبة 59.3%. وتجدر الإشارة إلى أن هذه المعادلة تمثل الحالة المثالية، في حين أن الأداء الفعلي للتوربينات يتأثر بعوامل إضافية مثل الخسائر الميكانيكية والكهربائية، وكذا تصميم الشفرات وظروف التشغيل.

### I 2.2.3. التحديات التقنية

من أبرز التحديات التي تواجه استغلال طاقة الرياح ظاهرة "التذبذب (Intermittency)"، حيث لا تهب الرياح بنفس الشدة أو الاتجاه بشكل مستمر، مما يؤدي إلى تقلبات في القدرة المنتجة. ويترجم هذا الأمر إشكاليات على مستوى استقرار الشبكات الكهربائية، خاصة عند الاعتماد الكبير على هذا المصدر الطاقوي.

[09]



الشكل 3.1 التركيب العام لتوربين الرياح ذي المحور الأفقي.

وللتغلب على هذه الصعوبات، تم تطوير أنظمة تحكم متقدمة قادرة على التكيف مع تغيرات سرعة الرياح، من خلال تعديل زاوية ميل الشفرات (Pitch Control)، وذلك بهدف الحفاظ على استقرار التوربينة وحمايتها من الأضرار المحتملة في حالات الرياح القوية، أو تحسين أدائها في الظروف الضعيفة. كما تلعب أنظمة التوجيه (Yaw Control) دوراً مهماً في توجيه التوربينة نحو اتجاه الرياح لتحقيق أقصى

استفادة ممكنة. وفي هذا السياق، تبرز أهمية المتحكمات الدقيقة والخوارزميات الذكية التي سيتم التطرق إليها بالتفصيل في الفصل الثاني، نظراً لدورها المحوري في تحسين كفاءة وأمان هذه الأنظمة.

### I 3.3. الطاقة الكهرومائية

تُعد الطاقة الكهرومائية من أقدم وأهم مصادر الطاقة المتجددة التي استغلها الإنسان، حيث تعتمد على تحويل الطاقة الكامنة والحركية للمياه إلى طاقة كهربائية. وقد لعبت هذه التقنية دوراً محورياً في تطوير أنظمة الطاقة منذ بداية القرن العشرين، ولا تزال إلى اليوم تمثل نسبة معتبرة من الإنتاج العالمي للكهرباء، بفضل قدرتها على توفير طاقة مستقرة وموثوقة على مدار الساعة. [06]

تعتمد فكرة عمل المحطات الكهرومائية على استغلال فرق الارتفاع بين منسوبين مائيين، حيث يتم توجيه المياه عبر قنوات أو أنابيب نحو توربينات تقوم بالدوران تحت تأثير تدفق المياه، مما يؤدي إلى تشغيل مولد كهربائي وتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية. وتتميز هذه العملية بكفاءة عالية مقارنة بباقي مصادر الطاقة، حيث يمكن أن تتجاوز 90% في بعض الأنظمة المتطورة.

#### أ- مبدأ العمل والنمذجة الفيزيائية

يمكن التعبير عن القدرة المنتجة في محطة كهرومائية بالعلاقة التالية:

$$P = \rho g Q H \eta \quad (2.1)$$

حيث أن:

P : القدرة الكهربائية المنتجة (واط).

$\rho$  : كثافة الماء.

g : تسارع الجاذبية الأرضية.

Q : معدل تدفق المياه (Debit).

H : فرق الارتفاع (Head) بين منبع ومصب المياه.

$\eta$  : الكفاءة الإجمالية للنظام (تشمل التوربين والمولد والخسائر المختلفة).

وتُبرز هذه المعادلة أن القدرة المنتجة تعتمد بشكل مباشر على كل من كمية المياه المتدفقة وفرق الارتفاع،

مما يفسر أهمية اختيار المواقع المناسبة لإنشاء السدود والمحطات الكهرومائية [06]

### I 1.3.3. أنواع المحطات الكهرومائية

يمكن تصنيف المحطات الكهرومائية إلى عدة أنواع حسب طريقة استغلال الموارد المائية:

- **محطات السدود (Reservoir Dams):** تعتمد على تخزين كميات كبيرة من المياه خلف سدود ضخمة، مما يسمح بالتحكم في تدفق المياه وإنتاج الطاقة حسب الطلب، وهو ما يجعلها مناسبة لتغطية الأحمال الأساسية (Baseload).
- **محطات الجريان النهري (Run-of-River):** تستغل التدفق الطبيعي للأنهار دون تخزين كبير للمياه، وتتميز بتأثير بيئي أقل، لكنها تعتمد بشكل أكبر على التغيرات الموسمية في تدفق المياه.
- **محطات الضخ والتخزين (Pumped Storage):** تُستخدم كوسيلة لتخزين الطاقة، حيث يتم ضخ المياه إلى مستوى مرتفع خلال فترات انخفاض الطلب، ثم إعادة استخدامها لتوليد الكهرباء عند الحاجة، مما يساهم في استقرار الشبكة الكهربائية.

### I. 2.3.3. المزايا والتحديات

تتميز الطاقة الكهرومائية بعدة مزايا، من أبرزها الكفاءة العالية، العمر الافتراضي الطويل للمحطات، وإمكانية التحكم في الإنتاج بشكل مرن. كما أنها تُعد من المصادر القليلة للطاقة المتجددة التي يمكنها توفير طاقة مستمرة ومستقرة، مما يجعلها عنصراً أساسياً في مزيج الطاقة.

في المقابل، تطرح هذه التقنية بعض التحديات، خاصة من الناحية البيئية، حيث قد يؤدي إنشاء السدود إلى تغيير النظم البيئية المحلية، وغمر مساحات واسعة من الأراضي، وتأثير على التنوع البيولوجي، خاصة الكائنات المائية. كما أن تكاليف الإنشاء الأولية تكون مرتفعة، وتتطلب دراسات دقيقة لضمان جدواها الاقتصادية والبيئية.

وعلى الرغم من هذه التحديات، تظل الطاقة الكهرومائية من الركائز الأساسية في استراتيجيات الانتقال الطاقوي، خاصة عند دمجها مع مصادر متجددة أخرى ضمن منظومة طاقيّة متكاملة ومتوازنة.

### I. 4. الأثر البيئي وحماية النظم الإيكولوجية

إن التوسع في استخدام الطاقات المتجددة يمثل حجر الزاوية في استراتيجيات "الاقتصاد الأخضر"، حيث تسعى الدول إلى تحقيق توازن بين النمو الاقتصادي والحفاظ على البيئة. ويعكس هذا التوجه وعياً متزايداً بأهمية الانتقال الطاقوي كوسيلة للحد من التأثيرات السلبية للنشاط البشري على الأنظمة الطبيعية، خاصة في ظل التحديات المناخية الراهنة. ولا يقتصر دور الطاقات المتجددة على إنتاج الطاقة فحسب، بل يمتد ليشمل المساهمة في حماية الموارد الطبيعية وضمان استدامتها للأجيال القادمة.

### I. 5. الحد من الانبعاثات الكربونية

تساهم الطاقات المتجددة في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة بشكل جذري، وذلك من خلال الاستغناء التدريجي عن الوقود الأحفوري الذي يُعد المصدر الرئيسي لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ووفقاً للدراسات المعاصرة، فإن كل كيلواط/ساعة يتم إنتاجه من طاقة الرياح يمنع انبعاث حوالي 900 غرام من  $CO_2$  مقارنة بإنتاجه عبر الفحم (Panwar et al., 2011). ويُبرز هذا الفرق الكبير الأثر الإيجابي لاعتماد هذه الطاقات على نطاق واسع، خاصة إذا ما تم دمجها ضمن سياسات طااقوية فعالة تهدف إلى تقليص البصمة الكربونية وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

### I. 6. الحفاظ على التنوع البيولوجي

يؤدي الاحتباس الحراري إلى تدهور المواطن الطبيعية للعديد من الكائنات الحية، مما يهدد استمرارية الأنظمة البيئية وتوازنها. ومن خلال استبدال المحطات التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري بمصادر طااقوية نظيفة، نساهم بشكل غير مباشر في الحد من ارتفاع درجات الحرارة العالمية، وهو ما ينعكس إيجاباً على استقرار النظم البيئية. كما يساعد ذلك في الحفاظ على الغابات، والمجاري المائية، والمناطق الرطبة، والتي تُعد عناصر أساسية لاستمرار الحياة الفطرية. ويكتسي هذا الجانب أهمية خاصة في سياق حماية التنوع البيولوجي، حيث يتقاطع بشكل مباشر مع تخصص حماية النظم الإيكولوجية.

### I. 7. الكتلة الحيوية والطاقة الحرارية الأرضية

تُعد كل من الكتلة الحيوية والطاقة الحرارية الأرضية من المصادر الطااقوية التي تلعب دوراً مهماً في ضمان "استمرارية الإمداد (Baseload Power)"، حيث تتميز بقدرتها على إنتاج الطاقة بشكل مستقر، دون التأثير المباشر بالتقلبات الجوية كما هو الحال بالنسبة للطاقة الشمسية أو طاقة الرياح. ويجعل هذا الاستقرار منها مكملاً أساسياً لباقي مصادر الطاقة المتجددة ضمن مزيج طااقوي متوازن. [06]

#### أ- تحويل الكتلة الحيوية

تعتمد طاقة الكتلة الحيوية على استغلال المواد العضوية ذات الأصل النباتي أو الحيواني، مثل المخلفات الزراعية، النفايات العضوية، وبقايا الصناعات الغذائية. ويتم تحويل هذه المواد إلى طاقة عبر عدة مسارات تقنية، تختلف باختلاف طبيعة المادة الأولية والتكنولوجيا المستخدمة:

#### 1. المسار الكيميائي الحراري: (Thermochemical)

يشمل عمليات الاحتراق المباشر، التحلل الحراري، والتغويز (Gasification)، حيث يتم تحويل المادة العضوية إلى غازات قابلة للاحتراق أو إلى طاقة حرارية تُستخدم مباشرة.

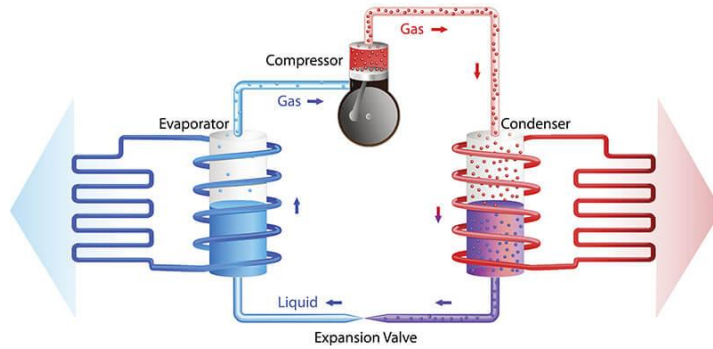
#### 2. المسار الكيميائي الحيوي: (Biochemical)

يعتمد على نشاط الكائنات الحية الدقيقة، مثل التخمر اللاهوائي (Anaerobic Digestion) لإنتاج غاز الميثان، أو التخمر الكحولي لإنتاج الوقود الحيوي مثل الإيثانول .

### 3. المسار الميكانيكي الكيميائي:

يتم من خلاله استخلاص الزيوت النباتية من بعض المحاصيل، مثل بذور الكولزا أو فول الصويا، ثم معالجتها كيميائياً لإنتاج الديزل الحيوي، الذي يمكن استخدامه كبديل للوقود التقليدي .

## HEAT PUMP



شكل 4.I مبدأ عمل المضخة الحرارية

### I 1.7 الطاقة الحرارية الأرضية

تعتمد هذه التكنولوجيا على استغلال الحرارة المخزنة في باطن الأرض، والتي تنتج أساساً عن النشاط الإشعاعي الطبيعي والتدرج الحراري الأرضي (Geothermal Gradient). وتُعد هذه الطاقة من المصادر المستقرة نسبياً، حيث لا تتأثر بالظروف المناخية السطحية، مما يجعلها خياراً مناسباً للإنتاج المستمر للطاقة.

[06]

#### - الأنظمة ذات المحتوى الحراري العالي: (High Enthalpy)

تُستخدم بشكل رئيسي في توليد الكهرباء، خاصة في المناطق النشطة بركانياً، حيث يتم استغلال البخار أو المياه الساخنة ذات الضغط العالي لتشغيل التوربينات الكهربائية.

#### - الأنظمة ذات المحتوى الحراري المنخفض:

تُستخدم في تطبيقات التدفئة والتبريد، لا سيما عبر "المضخات الحرارية الأرضية (Geothermal Heat Pumps)، والتي تتميز بكفاءة طاقة عالية (Coefficient of Performance - COP)، مما يسمح بتقليل استهلاك الطاقة مع الحفاظ على أداء حراري فعال.

**8. I تحديات التكامل، التخزين والشبكات الذكية**

يُعد هذا المحور من أهم الجوانب التي تربط بين الطاقات المتجددة والهندسة الكهربائية والإلكترونية، حيث لا تكمن المعضلة الأساسية في "توليد" الطاقة بقدر ما تتمثل في كيفية "إدارتها" وضمان استقرارها داخل الشبكات. فمع تزايد الاعتماد على مصادر متجددة متقطعة، أصبح من الضروري تطوير منظومات ذكية قادرة على التكيف مع هذا الطابع غير المنتظم للإنتاج، وذلك من خلال حلول متقدمة تشمل التنبؤ، التحكم، والتخزين.

**9. I إشكالية التذبذب وعدم الاستقرار**

بما أن إنتاج الطاقة الشمسية والريحية يرتبط بعوامل طبيعية متغيرة، فإنه يتميز بعدم الثبات، مما يؤدي إلى اختلال في "ميزان الطاقة" داخل الشبكة الكهربائية. ففي حالات فائض الإنتاج مقارنة بالطلب، قد تتعرض الشبكة إلى اضطرابات قد تصل إلى الانهيار، بينما يؤدي نقص الإنتاج إلى عجز في تلبية الطلب وانقطاعات في التيار الكهربائي. ومن هنا تبرز الحاجة إلى اعتماد آليات متقدمة للتسيير والتحكم، من بينها:

**1.9. I التنبؤ الطاقوي: (Energy Forecasting)**

يعتمد على استخدام نماذج رياضية وخوارزميات متطورة لتحليل المعطيات المناخية والتنبؤ بإنتاج الطاقة على المدى القصير والمتوسط. ويسمح هذا التوقع المسبق باتخاذ قرارات تشغيلية أكثر دقة، مثل جدولة الإنتاج أو تفعيل أنظمة التخزين.

**10. I الشبكات الذكية: (Smart Grids)**

تمثل جيلاً جديداً من الشبكات الكهربائية التي تدمج تكنولوجيا المعلومات والاتصال مع أنظمة الطاقة، حيث يتم تبادل البيانات بشكل لحظي بين المنتجين والمستهلكين. ويساهم هذا التفاعل في تحسين كفاءة توزيع الطاقة، وتقليل الفواقد، إضافة إلى تمكين إدارة الطلب (Demand Response) بشكل ديناميكي، بما يتماشى مع قدرات الإنتاج المتاحة.

**11. I تكنولوجيات تخزين الطاقة (Energy Storage Systems - ESS)**

يُعتبر تخزين الطاقة أحد أهم التحديات التي تواجه الانتقال نحو الطاقات المتجددة، بل يُوصف أحياناً بـ"الحل الحاسم" لضمان استمرارية الإمداد واستقرار الشبكات. فلا يمكن تصور نظام طاقتوي يعتمد بشكل كبير على مصادر متجددة دون وجود وسائل فعالة لتخزين الفائض واسترجاعه عند الحاجة. وفي هذا السياق، تم تطوير عدة تقنيات تختلف من حيث المبدأ والكفاءة والتكلفة: [22]

## 1. التخزين الكيميائي (البطاريات):

- بطاريات الليثيوم أيون (Li-ion) تُعد الأكثر انتشاراً حالياً، نظراً لكثافتها الطاقية العالية، وسرعة شحنها وتفريغها، إضافة إلى استخدامها الواسع في التطبيقات المحمولة وأنظمة تخزين الطاقة المنزلية والصناعية.
- بطاريات الحالة الصلبة (Solid-State) تمثل الجيل القادم من البطاريات، حيث توفر مستوى أعلى من الأمان وكثافة طاقة أكبر، مما يجعلها مرشحة بقوة لتطبيقات مستقبلية واسعة النطاق .

## 2. الهيدروجين الأخضر: (Green Hydrogen)

يتم إنتاجه عبر عملية التحليل الكهربائي للماء (Electrolysis) ، باستخدام فائض الطاقة المتجددة. ويُعد هذا الحل من الخيارات الواعدة لتخزين الطاقة على المدى الطويل، حيث يمكن نقل الهيدروجين وتخزينه بسهولة نسبية، ثم إعادة تحويله إلى طاقة كهربائية عبر خلايا الوقود (Fuel Cells) عند الحاجة، مع انبعاثات شبه معدومة .

## 3. التخزين الميكانيكي:

يشمل تقنيات مثل الضخ والتخزين المائي (Pumped Hydro Storage) ، حيث يتم ضخ المياه إلى خزانات مرتفعة أثناء فترات فائض الإنتاج، ثم استغلالها لاحقاً لتوليد الكهرباء. كما توجد تقنيات أخرى مثل تخزين الطاقة في الهواء المضغوط (Compressed Air Energy Storage - CAES) ، والتي تعتمد على ضغط الهواء في خزانات خاصة ثم تحريره لتشغيل التوربينات عند الطلب .

ومن خلال هذه الحلول المتكاملة، يتضح أن نجاح إدماج الطاقات المتجددة لا يعتمد فقط على تطوير تقنيات الإنتاج، بل يركز بشكل كبير على كفاءة أنظمة التحكم والتخزين، وهو ما يجعل هذا المجال محورياً أساسياً للبحث والتطوير في الهندسة الطاقوية الحديثة. [22]

## 12. I الخاتمة

أبرز هذا الفصل الأسس العلمية التي تقوم عليها أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية، من خلال استعراض المبادئ الفيزيائية للإشعاع الشمسي وآليات تحويله إلى طاقة كهربائية، إلى جانب التعريف بأهم مكونات المنظومة الكهروضوئية ودور كل عنصر في تحقيق الأداء الأمثل. كما بيّن أن كفاءة إنتاج الطاقة لا ترتبط فقط بخصائص الألواح الشمسية، وإنما تتأثر أيضاً بطريقة تصميم النظام وتكامل مكوناته وظروف تشغيله.

ومن خلال هذه الدراسة النظرية، يتضح أن تحسين مردودية الأنظمة الشمسية يستلزم اعتماد تصميم هندسي متوازن يراعي اختيار المكونات المناسبة وحساب أبعادها وفق متطلبات الحمل الكهربائي والظروف البيئية، بما يضمن استغلالاً أكثر كفاءة للطاقة الشمسية المتاحة.

وانطلاقاً من هذه المعطيات، سيتم في الفصل الموالي الانتقال إلى الجانب التطبيقي، حيث سيتم تصميم منظومة شمسية ذكية تعتمد على متحكم دقيق ونظام تتبع ثنائي المحور، بهدف تحسين توجيه الألواح الشمسية نحو مصدر الإشعاع وزيادة كمية الطاقة المنتجة مقارنة بالأنظمة التقليدية الثابتة. كما سيتم التطرق إلى اختيار المكونات الإلكترونية والميكانيكية، وشرح آلية عملها، وكيفية ربطها وحساب معالماتها وفق منهجية هندسية تضمن تحقيق أفضل أداء للمنظومة.

## II. 1. مقدمة

أصبحت الطاقة الكهربائية من أهم مقومات التنمية الاقتصادية والاجتماعية في العالم، حيث يزداد الطلب عليها بشكل مستمر نتيجة النمو السكاني والتطور الصناعي والتكنولوجي. ومع تزايد المخاوف المتعلقة

بمصادر الطاقة التقليدية والآثار البيئية الناتجة عن استعمال الوقود الأحفوري، اتجهت الأنظار نحو مصادر الطاقة المتجددة باعتبارها بديلاً نظيفاً ومستداماً.

تعد الطاقة الشمسية من أكثر مصادر الطاقة المتجددة وفرة وانتشاراً، إذ تستقبل الأرض كميات هائلة من الإشعاع الشمسي يمكن استغلالها لإنتاج الطاقة الكهربائية بواسطة الأنظمة الكهروضوئية (Photovoltaic Systems). تعتمد هذه الأنظمة على تحويل الطاقة الضوئية القادمة من الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية باستعمال الخلايا الشمسية، مما يجعلها حلاً فعالاً لتلبية الاحتياجات الطاقوية مع الحد من التأثيرات البيئية السلبية.

ورغم المزايا العديدة للأنظمة الكهروضوئية، فإن كفاءتها تتأثر بعدة عوامل من بينها زاوية سقوط أشعة الشمس على سطح الألواح الشمسية. لذلك تم تطوير أنظمة التتبع الشمسي التي تسمح بتوجيه الألواح باستمرار نحو الشمس خلال ساعات النهار، مما يساهم في زيادة كمية الطاقة المستقبلية وتحسين مردودية النظام.

تهدف هذه الدراسة إلى تصميم وإنجاز منظومة كهروضوئية مزودة بنظام تتبع شمسي، مع التركيز على دراسة مكونات النظام وآلية عمله واختيار العناصر الإلكترونية المناسبة للتحكم في حركة الألواح الشمسية. كما تسعى إلى تقييم أداء النظام ومقارنة مردوديته مع الأنظمة الثابتة من أجل إبراز أهمية التتبع الشمسي في تحسين إنتاج الطاقة الكهربائية.

## II. 2. اللوح الشمسي الكهروضوئي

يمثل اللوح الشمسي الكهروضوئي الوحدة الأساسية في أنظمة إنتاج الطاقة الشمسية، ويتكون من مجموعة من الخلايا الكهروضوئية المترابطة كهربائياً وفق ترتيب محدد يسمح بتوليد القدرة الكهربائية المطلوبة. وتجمع هذه الخلايا داخل هيكل واحد محكم الإغلاق يهدف إلى حمايتها من التأثيرات البيئية المختلفة، مثل الرطوبة، والأتربة، والتغيرات الحرارية، مع المحافظة على كفاءة الأداء واستمرارية التشغيل. وللتعرف بصورة أفضل على آلية عمل اللوح الشمسي، سيتم فيما يلي استعراض مكوناته الأساسية ووظيفة كل منها [16].

## II. 1.2. مكونات اللوح الشمسي

## - الزجاج الأمامي

يشكل الزجاج الأمامي الطبقة الخارجية للوح الكهروضوئي، ويؤدي دوراً أساسياً في حماية الخلايا الشمسية من الصدمات والعوامل المناخية المختلفة. ويعد الزجاج المقسى (Tempered Glass) المادة الأكثر استخداماً لهذا الغرض، لما يتميز به من صلابة ميكانيكية عالية، ومقاومة جيدة للخدوش والصدمات، إضافة إلى شفافيته المرتفعة التي تسمح بمرور أكبر قدر ممكن من الإشعاع الشمسي إلى الخلايا. كما يجب أن يمتلك قدرة عالية على نفاذ الأطوال الموجية الواقعة ضمن المجال (350-1200 نانومتر)، مع مقاومة فعالة للأشعة فوق البنفسجية وتأثيراتها طويلة المدى، مما يضمن المحافظة على أداء اللوح طوال فترة تشغيله. [16]

## - مادة التغليف (EVA)

تستخدم مادة أسيتات فينيل الإيثيل (Ethylene Vinyl Acetate – EVA) على نطاق واسع كطبقة تغليف داخل الألواح الشمسية، حيث توضع بين الخلايا الكهروضوئية والزجاج الأمامي من جهة، وبين الخلايا والطبقة الخلفية من جهة أخرى. وعند عملية التصنيع تتعرض هذه المادة لدرجات حرارة وضغط محددتين، فتذوب وتلتصق بجميع مكونات اللوح، لتشكل طبقة متجانسة تعمل على تثبيت الخلايا، وتوفير العزل الكهربائي، وحمايتها من الرطوبة والاهتزازات والصدمات الميكانيكية، مما يسهم في زيادة العمر التشغيلي للوح.

## - الطبقة الخلفية (Backsheet)

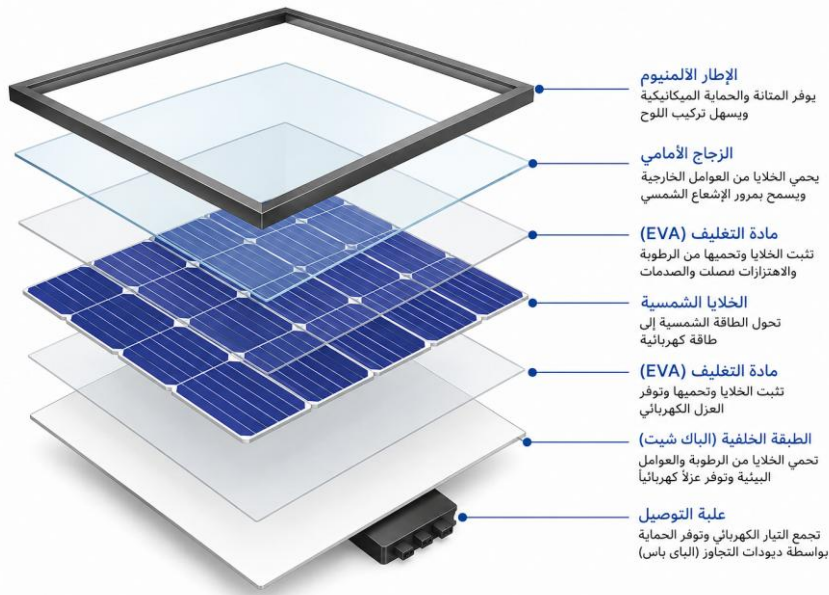
تمثل الطبقة الخلفية الغلاف الواقي للجزء السفلي من اللوح الشمسي، وتتمثل وظيفتها الأساسية في حماية الخلايا الكهروضوئية من العوامل البيئية الخارجية. لذلك يجب أن تتمتع بخصائص عزل كهربائي عالية، إضافة إلى مقاومتها للحرارة والرطوبة والأشعة فوق البنفسجية، مع قدرتها على منع تسرب الماء أو بخار الماء إلى داخل اللوح، الأمر الذي يحافظ على سلامة مكوناته ويحد من تدهور أدائه مع مرور الزمن. [16]

## - الإطار المعدني

يعد الإطار المعدني أحد العناصر الإنشائية المهمة في اللوح الكهروضوئي، ويصنع غالباً من سبائك الألمنيوم لما تتميز به من خفة الوزن ومقاومة التآكل. ويعمل الإطار على زيادة صلابة اللوح وتحسين مقاومته للإجهادات الميكانيكية، كما يسهل عمليات النقل والتركيب والتثبيت على الهياكل الداعمة. وتجدر الإشارة إلى أن بعض الألواح الحديثة تصنع دون إطار معدني (Frameless PV Modules)، أو تستخدم إطارات مصنوعة من مواد بلاستيكية خاصة تبعاً لمتطلبات التطبيق. [16]

## - علبه التوصيل (Junction Box)

تثبت علبه التوصيل في الجهة الخلفية للوح الشمسي، وتعد حلقة الوصل بين الخلايا الكهروضوئية والدارة الكهربائية الخارجية. وتحتوي عادةً على أطراف التوصيل وديودات التجاوز ( Bypass Diodes)، التي توفر مساراً بديلاً للتيار الكهربائي عند تعرض جزء من اللوح للتظليل أو حدوث خلل في إحدى الخلايا، مما يحد من ظاهرة النقاط الساخنة (Hot Spots)، ويقلل من خسائر القدرة، ويساهم في تحسين موثوقية وكفاءة النظام الكهروضوئي. [16]



الشكل II.1: مكونات اللوح الشمسي

## II 2.2. الخلية الكهروضوئية

تُعد الخلية الكهروضوئية الوحدة الأساسية في أنظمة تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية، وهي عبارة عن عنصر إلكتروني مصنوع من مادة شبه موصلة، يكون السيليكون أكثرها استخداماً. وتعتمد آلية عملها على التأثير الكهروضوئي، حيث تتحول طاقة الفوتونات الساقطة على سطح الخلية مباشرة إلى طاقة كهربائية على شكل تيار مستمر، نتيجة تحرير الإلكترونات داخل المادة شبه الموصلة وتكوين أزواج إلكترون-فجوة.

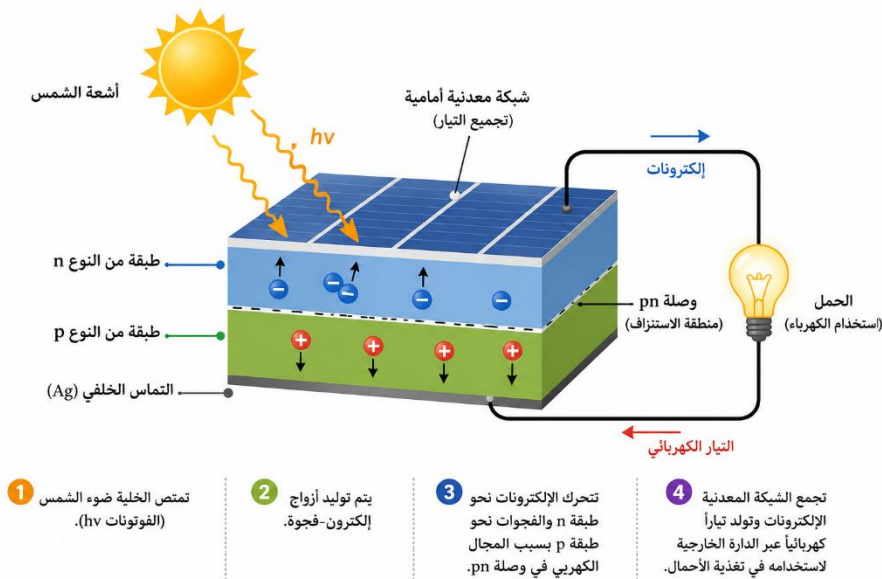
ترتكز البنية الداخلية للخلية على وصلة شبه موصلة من نوع PN تتكون من طبقتين مختلفتين التطعيم. فالطبقة الأولى من النوع N تتميز بوفرة الإلكترونات الحرة، نتيجة تطعيم السيليكون بذرات الفوسفور، في حين تتكون الطبقة الثانية من النوع P، والتي يتم الحصول عليها بتطعيم السيليكون بذرات البورون، مما يؤدي إلى ظهور فجوات إلكترونية تعمل كحوامل للشحنة الموجبة. وعند التقاء الطبقتين

تتشكل منطقة الاستنزاف، التي ينشأ فيها مجال كهربائي داخلي مسؤول عن فصل الإلكترونات والفجوات المتولدة بفعل الإشعاع الشمسي.

عند سقوط فوتونات الضوء على الخلية بطاقة تفوق فجوة الطاقة للمادة شبه الموصلة، تمتصها الذرات فتتحرر الإلكترونات من روابطها، مكونة أزواجاً من الإلكترونات والفجوات. ويعمل المجال الكهربائي الموجود في منطقة الاستنزاف على دفع الإلكترونات نحو طبقة  $N$ ، بينما تنتقل الفجوات في الاتجاه المعاكس نحو طبقة  $P$ ، مما يؤدي إلى ظهور فرق جهد بين طرفي الخلية. وعند توصيل حمل خارجي، تتحرك الإلكترونات عبر الدارة الكهربائية الخارجية، فينشأ تيار كهربائي مستمر يمكن الاستفادة منه لتغذية مختلف الأحمال الكهربائية.

ولجمع الطاقة الكهربائية المتولدة بكفاءة، تزود الخلية بشبكة من الموصلات المعدنية الدقيقة على سطحها الأمامي تعمل على التقاط التيار مع تقليل مساحة التظليل، في حين يغطي الوجه الخلفي قطب معدني كامل يضمن تجميع الشحنات ونقلها إلى الدارة الخارجية.

وللحد من فقدان جزء من الإشعاع الشمسي بسبب الانعكاس، يغطي السطح الأمامي بطبقة مضادة للانعكاس (Anti-Reflection Coating)، تسمح بزيادة كمية الضوء الممتص داخل الخلية وتحسين مردودها. كما تُحمى الخلية بطبقة من الزجاج المقسى عالي الشفافية، توفر لها مقاومة ميكانيكية جيدة وتحافظ على مكوناتها من تأثيرات الرطوبة والعوامل المناخية المختلفة، رغم أن سماكة الخلية نفسها لا تتجاوز عادة بضعة أعشار المليمتر، بينما يبلغ سمك اللوح الشمسي بعد تجميع جميع طبقاته عدة مليمترات. ويسهم هذا التصميم المتكامل في رفع كفاءة التحويل الكهروضوئي وإطالة العمر التشغيلي للمنظومة الشمسية. [17]



الشكل II.2: البنية الداخلية للخلية الشمسية

## II 2.2.2. مبدأ عمل الخلية الكهروضوئية

تعتمد الخلية الكهروضوئية في تشغيلها على التأثير الكهروضوئي الداخلي الذي يحدث داخل المواد شبه الموصلة، حيث يتم تحويل الطاقة التي تحملها أشعة الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية على شكل تيار مستمر. وتُصنع معظم الخلايا الكهروضوئية من السيليكون، لما يتمتع به من خصائص كهربائية تجعله مناسباً لهذا النوع من التطبيقات.

عندما تسقط فوتونات الإشعاع الشمسي على الخلية بطاقة تساوي أو تتجاوز قيمة فجوة الطاقة (Band Gap) للمادة شبه الموصلة، تنتقل بعض الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، تاركةً وراءها فجوات موجبة، وبذلك تتكون أزواج من الإلكترونات والفجوات القادرة على نقل الشحنة الكهربائية.

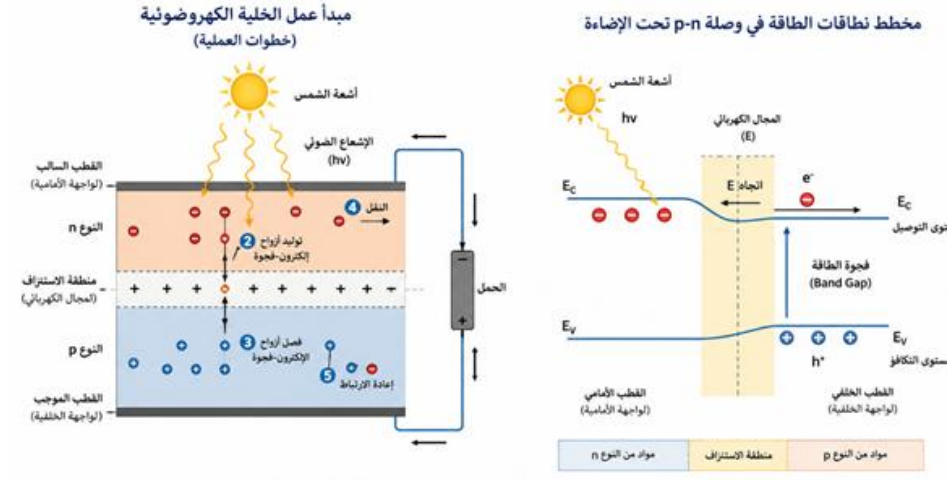
يساهم المجال الكهربائي الداخلي المتشكل في منطقة الاستنزاف عند وصلة PN في فصل هذه الحوامل ومنع إعادة اتحادها، إذ يدفع الإلكترونات نحو المنطقة من النوع N، بينما تتجه الفجوات نحو المنطقة من النوع P، مما يؤدي إلى تكوين فرق جهد كهربائي بين قطبي الخلية يمكن الاستفادة منه عند ربطها بدارة خارجية.

وتختلف آلية انتقال حوامل الشحنة باختلاف موقع تولدها داخل الخلية. فإذا نشأت الأزواج الإلكترونية في المناطق المتعادلة، فإن انتقالها يتم أساساً بواسطة الانتشار (Diffusion) نتيجة فرق التركيز، وقد تصل هذه الحوامل إلى منطقة الاستنزاف حيث يؤثر فيها المجال الكهربائي الداخلي، فتتجرّف نحو أطراف الوصلة وتسهم في توليد تيار الانتشار الضوئي. أما إذا تكونت أزواج الإلكترونات والفجوات داخل منطقة الاستنزاف نفسها، فإن المجال الكهربائي يفصلها مباشرة دون الحاجة إلى الانتشار، وهو ما يؤدي إلى توليد.

ويُعرف التيار الضوئي الكلي  $I_{ph}$  بأنه مجموع مساهمتي تيار الانتشار و تيار الانجراف، ولذلك ترتبط قيمته ارتباطاً مباشراً بشدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الخلية، حيث يزداد بزيادة كمية الطاقة الضوئية الممتصة.

وعند توصيل قطبي الخلية بحمل كهربائي خارجي، تتحرك الإلكترونات عبر الدارة الخارجية من القطب السالب إلى القطب الموجب، فينشأ تيار كهربائي مستمر يمكن استغلاله لتغذية مختلف الأجهزة الكهربائية. وللحصول على قيم أعلى من الجهد أو التيار، تُجمع الخلايا الكهروضوئية داخل ألواح شمسية، ثم تُربط هذه الألواح وفق التوصيل على التوالي لزيادة الجهد الكهربائي، أو على التوازي لرفع شدة

التيار، أو بالجمع بين الطريقتين للحصول على القدرة الكهربائية المطلوبة بما يتوافق مع متطلبات النظام الكهروضوئي. [18]



الشكل 3.II : آلية عمل الخلية الشمسية.

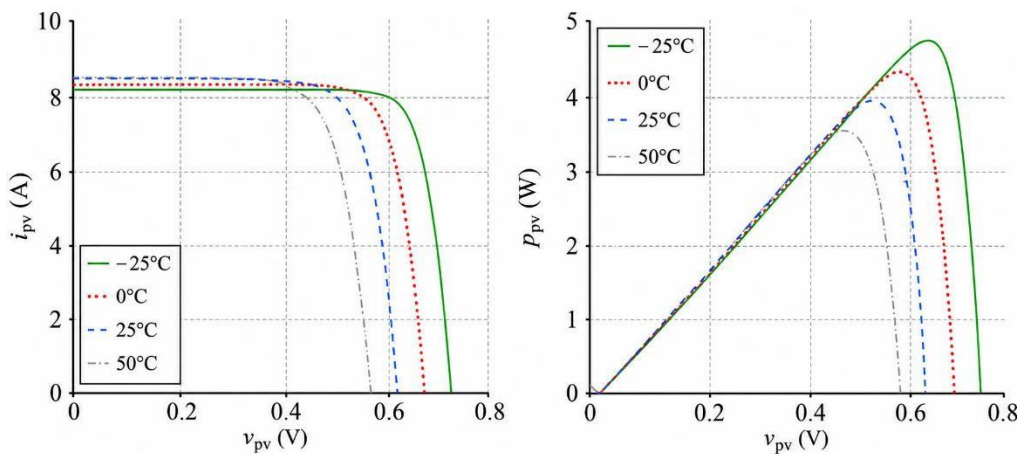
### II 3. الخصائص الكهربائية والمنحنيات المميزة (I – V) و (P – V)

تمثل الخصائص الكهربائية للوح الكهروضوئي الأساس في تقييم أدائه وتحليل سلوكه تحت مختلف ظروف التشغيل، إذ تعكس العلاقة بين المتغيرات الكهربائية الرئيسية المؤثرة في إنتاج الطاقة. ويُعتمد في دراسة هذه الخصائص على منحنيين أساسيين، هما منحنى التيار-الجهد (I-V) ومنحنى الاستطاعة-الجهد (P-V)، اللذان يقدمان وصفاً دقيقاً لاستجابة اللوح الكهروضوئي لتغيرات الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة. يُستخدم منحنى التيار-الجهد (I-V) لتوضيح العلاقة بين التيار المنتج وجهد الخرج، مما يسمح باستخلاص أهم المعلمات الكهربائية للوح، مثل تيار القصر، وجهد الدارة المفتوحة. بالإضافة إلى نقطة الاستطاعة العظمى (MPP). أما منحنى الاستطاعة-الجهد (P-V) فيبين تغير القدرة الكهربائية الناتجة بدلالة الجهد، ويُظهر بوضوح قيمة القدرة القصوى التي يمكن أن يولدها اللوح عند ظروف تشغيل محددة.

وتكتسب هذه المنحنيات أهمية كبيرة في تصميم الأنظمة الكهروضوئية، حيث تُستعمل لتحديد نقطة التشغيل المثلى التي تحقق أعلى مردود للطاقة، كما تشكل الأساس الذي تعتمد عليه خوارزميات تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracking - MPPT) من أجل تحسين كفاءة تحويل الطاقة والتكيف مع التغيرات المستمرة في الظروف المناخية، خاصة شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا. وبناءً على ذلك، تُعد دراسة منحنى (I-V) و (P-V) خطوة ضرورية لفهم السلوك الكهربائي للمنظومة الكهروضوئية وتحسين أدائها في التطبيقات العملية.

### II 1.3 تأثير درجة الحرارة على الخصائص الكهربائية

تعد درجة حرارة تشغيل الخلايا الكهروضوئية من العوامل الحرجة ذات التأثير السلبي المباشر على كفاءة التحويل الطاقوي وأداء النظام الإجمالي. ولتحديد طبيعة هذا التأثير ومدى حساسية الخصائص الكهربائية للخلية، يوضح التحليل الهندسي للمنحنيات المميزة السلوكيات والظواهر التالية:



الشكل II.4 : منحنى بياني يوضح تغير التيار والجهد في اللوح الشمسي بتغير درجة الحرارة

يُبرز الشكل (II.5) بوضوح تأثير تغير درجة حرارة الخلية الكهروضوئية في الخصائص الكهربائية للوح الشمسي عند ثبات شدة الإشعاع الشمسي. فمن خلال دراسة منحنى التيار-الجهد (I-V)، يتبين أن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة طفيفة في قيمة تيار القصر ( $I_s$ )، ويعود ذلك إلى انخفاض قيمة فجوة الطاقة للمادة شبه الموصلة، مما يسمح بتحرير عدد أكبر من حوامل الشحنة عند تعرض الخلية للإشعاع الشمسي. وعلى الرغم من هذه الزيادة المحدودة في التيار، فإنها تبقى أقل تأثيراً مقارنة بالتغيرات التي تطرأ على الجهد.

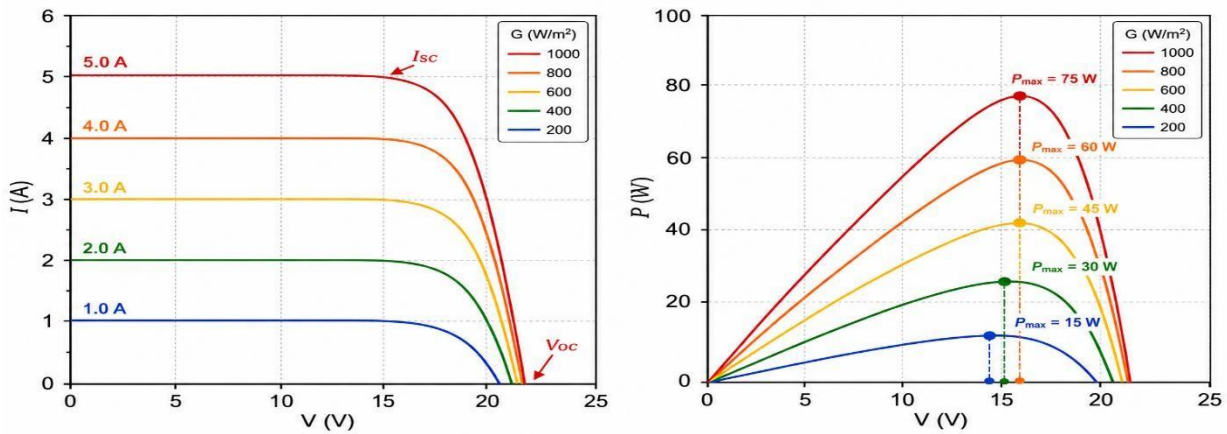
في المقابل، يُظهر جهد الدارة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) حساسية كبيرة لارتفاع درجة الحرارة، حيث تنخفض قيمته بشكل ملحوظ مع ازدياد حرارة الخلية. ويُعزى ذلك إلى الارتفاع المتزايد في تيار الإشعاع العكسي للديود، الأمر الذي يؤدي إلى تراجع فرق الجهد المتولد بين طرفي الخلية. ويزداد هذا التأثير كلما ارتفعت درجة الحرارة، مما ينعكس مباشرة على نقطة تشغيل اللوح الكهروضوئي.

أما منحنى الاستطاعة-الجهد (P-V)، فيوضح أن الانخفاض الواضح في الجهد لا يمكن تعويضه بالزيادة الطفيفة في التيار، وهو ما يؤدي إلى انخفاض القدرة الكهربائية المستخرجة من اللوح. ويتجسد

ذلك في تراجع قيمة الاستطاعة العظمى ( $P_{MPP}$ ) إضافة إلى انتقال نقطة الاستطاعة العظمى نحو جهود أقل، أي انخفاض قيمة جهد نقطة الاستطاعة العظمى  $V_{MPP}$  مع ازدياد درجة الحرارة. وتؤكد هذه النتائج أن درجة الحرارة تُعد من أكثر العوامل تأثيرًا في كفاءة الأنظمة الكهروضوئية، إذ تؤدي زيادة حرارة الخلايا إلى انخفاض القدرة المنتجة وتقليل مردود تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. ومن هذا المنطلق، يصبح التحكم في درجة حرارة الألواح الشمسية ضرورة لتحسين الأداء والمحافظة على كفاءة التشغيل، وذلك من خلال اعتماد تقنيات التبريد أو تحسين التهوية الطبيعية للألواح، إلى جانب استخدام خوارزميات تتبع نقطة الاستطاعة العظمى ( Maximum Power Point Tracking - MPPT)، التي تعمل على تعديل نقطة التشغيل بصورة مستمرة لضمان استخراج أكبر قدرة ممكنة رغم تغير الظروف المناخية.

### II 2.3 تأثير الإشعاع الشمسي على الخصائص الكهربائية

تعد شدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الخلايا الكهروضوئية من العوامل الأساسي والمحدد الرئيسي لإنتاجية الطاقة والقدرة الكهربائية المتولدة. ولتوضيح السلوك الحركي والخصائص التشغيلية للنظام تحت تأثير التغيرات الإشعاعية، يبرز التحليل الهندسي للمنحنيات المميزة السلوكيات والظواهر التالية:



الشكل II.5: منحنى بياني يوضح تأثير الإشعاع الشمسي على الخصائص الكهربائية.

يبين الشكل (II.6) أثر تغير شدة الإشعاع الشمسي في السلوك الكهربائي للوح الكهروضوئي من خلال منحنى التيار-الجهد ( $I-V$ ) والاستطاعة-الجهد ( $P-V$ )، حيث يتضح أن الإشعاع الشمسي يمثل العامل الأكثر تأثيرًا في كمية الطاقة الكهربائية المنتجة. ويظهر من منحنى ( $I-V$ ) أن تيار الدارة القصيرة

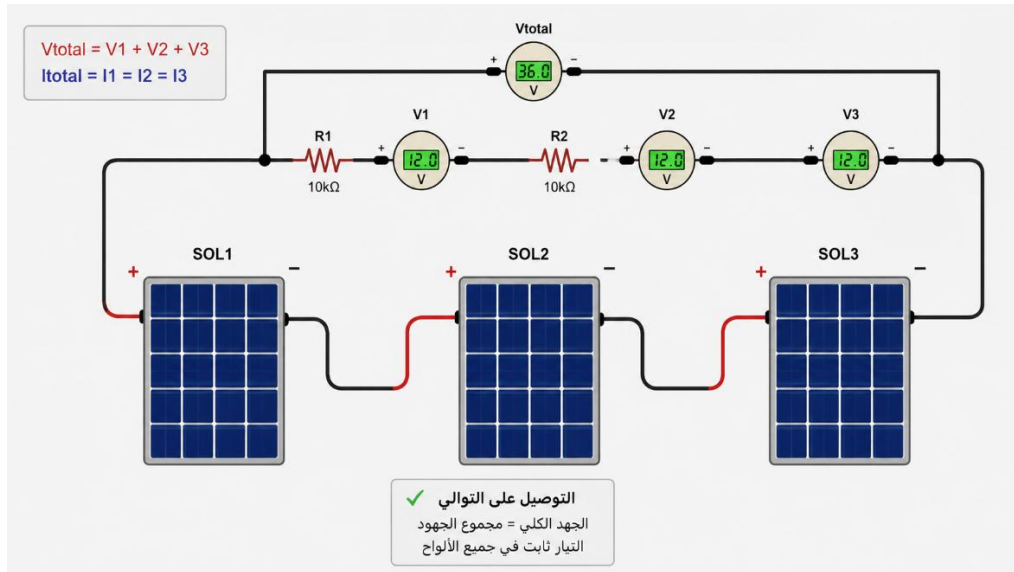
( $I_{sc}$ ) يزداد بصورة شبه خطية مع ارتفاع شدة الإشعاع، ويرجع ذلك إلى زيادة عدد الفوتونات الساقطة على سطح الخلية، مما يؤدي إلى توليد عدد أكبر من أزواج الإلكترونات والفجوات، وبالتالي ارتفاع التيار الضوئي المتولد. وفي المقابل، فإن جهد الدارة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) لا يتغير إلا بدرجة محدودة، نظراً لاعتماده اللوغاريتمي على التيار الضوئي، الأمر الذي يجعله أقل تأثراً بتغير الإشعاع مقارنة بالتيار. أما منحنى الاستطاعة-الجهد ( $P-V$ )، فيوضح أن الزيادة في شدة الإشعاع تنعكس مباشرة على قيمة القدرة الكهربائية المنتجة، حيث ترتفع الاستطاعة العظمى ( $P_{MPP}$ ) بشكل ملحوظ مع زيادة الإشعاع الشمسي، في حين يبقى جهد نقطة الاستطاعة العظمى ( $V_{MPP}$ ) قريباً من قيمته الاسمية مع تغيرات طفيفة فقط. ويؤكد هذا السلوك أن زيادة الإشعاع تؤدي أساساً إلى رفع قيمة التيار، بينما يبقى الجهد ضمن مجال تشغيل شبه ثابت.

وتبرز الأهمية العملية لهذه النتائج في تصميم وتشغيل الأنظمة الكهروضوئية، إذ إن الاستقرار النسبي لجهد التشغيل يسهل عمل خوارزميات تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracking - MPPT)، ويزيد من سرعة استجابتها ودقتها في تحديد نقطة التشغيل المثلى. كما تؤكد هذه النتائج فعالية استخدام أنظمة التتبع الشمسي (Solar Tracking Systems)، التي تعمل على توجيه الألواح باستمرار نحو الشمس لزيادة كمية الإشعاع المستقبل، وبالتالي رفع القدرة المنتجة وتحسين الكفاءة الكلية للمنظومة الكهروضوئية، خاصة في التطبيقات التي تتطلب أعلى مردود طاقي ممكن. [17]

## II 4. طرق توصيل الألواح الشمسية

### II.4.1 التوصيل على التسلسل (Series)

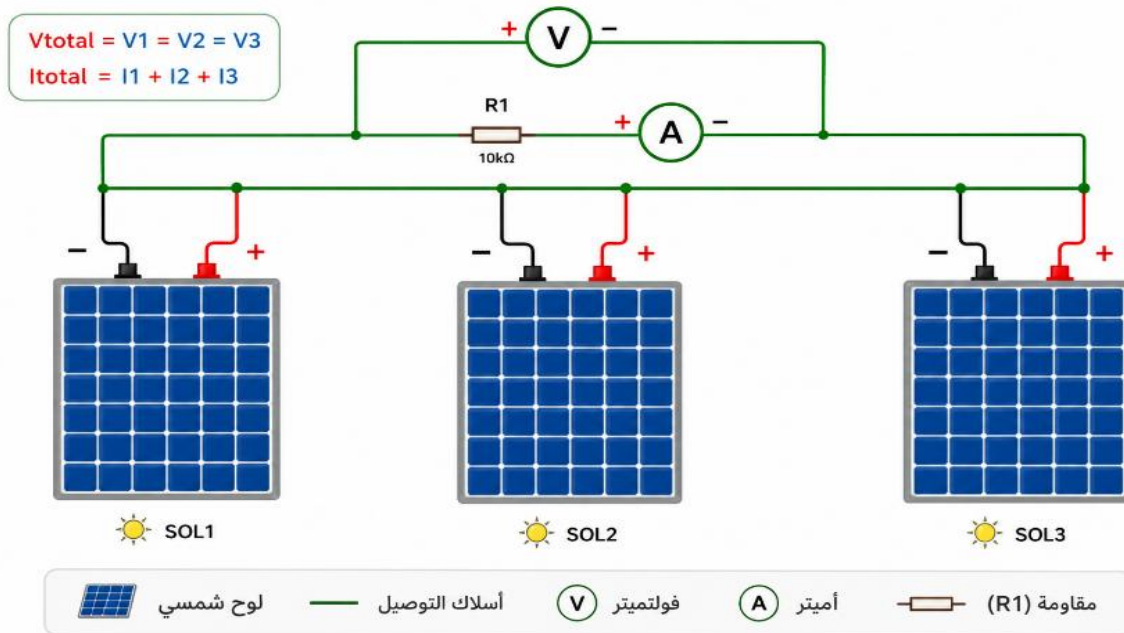
يتم بربط الأقطاب المتعاكسة (الموجب مع السالب)، وذلك للمحافظة على قيمة التيار ثابتة، مع زيادة الجهد الكلي نتيجة جمع جهود الخلايا. [14]



الشكل 6.II : توصيل الألواح الشمسية على التسلسل.

## 2.4.II التوصيل على التوازي (Parallel)

يتم تحقيق الربط على التوازي (Parallel Connection) من خلال تجميع الأقطاب ذات القطبية المتماثلة، حيث تربط الأطراف الموجبة للألواح بنقطة تجمع واحدة، والأطراف السالبة بنقطة أخرى. تكمن الغاية التقنية من هذا النمط في مضاعفة التيار كحاصل جمع تيارات الألواح المتصلة، مع الحفاظ على استقرار الجهد عند قيمة جهد اللوح الواحد، وهو ما يتناسب مع الأنظمة التي تتطلب تيارا عاليا وجهدا منخفضا. [14]

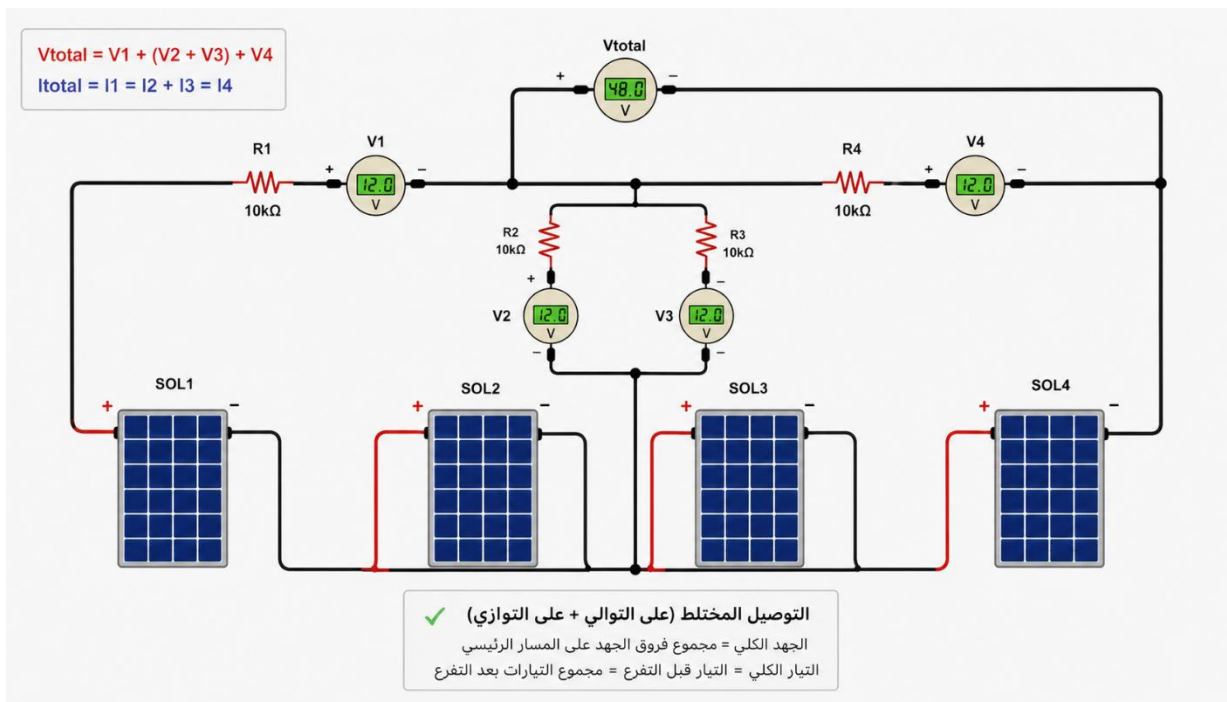


الشكل 7.II: توصيل الألواح الشمسية على التوازي.

### II 3.4 التوصيل المختلط

هو نمط هندسي يدمج بين تقنيتي التوصيل على التوالي (Series) والتوصيل على التوازي (Parallel) ضمن شبكة واحدة. يعتمد هذا النموذج في الأنظمة الهندسية والكهربائية المعقدة بهدف موازنة المتغيرات الفيزيائية (الجهد والشدة)، مما يتيح استغلال المزايا التشغيلية لكلا الطريقتين وتجاوز

القيود التقنية لكل منهما على حدة. [14]



الشكل 8.II: توصيل الألواح الشمسية باستعمال التوصيل المختلط.

### II 5 أنواع الأنظمة الكهروضوئية

تشكل الأنظمة الكهروضوئية إحدى أهم تقنيات استغلال الطاقة الشمسية، حيث تعتمد على تحويل الإشعاع الشمسي مباشرة إلى طاقة كهربائية يمكن استخدامها لتغذية مختلف الأحمال الكهربائية. وتتميز هذه الأنظمة بتنوع تطبيقاتها، إذ تُستخدم في المجالات السكنية والصناعية والزراعية، بالإضافة إلى تطبيقات الإنارة والاتصالات والأنظمة المستقلة. ونظرًا لاختلاف بيئات التشغيل ومتطلبات التغذية الكهربائية، فقد تم تطوير عدة تكوينات للأنظمة الكهروضوئية، تُصنف بصورة عامة إلى ثلاثة أنواع رئيسية، يختلف كل منها من حيث أسلوب الربط بالشبكة الكهربائية، وآلية تخزين الطاقة، وطريقة إدارة وتوزيع القدرة المنتجة. [19]

### 1.5.II الأنظمة المستقلة (Off-Grid)

الأنظمة الكهروضوئية المستقلة هي منظومات تعمل دون اتصال بالشبكة الكهربائية، وتعتمد كلياً على الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء. وتتكون من ألواح شمسية، ومنظم شحن، وبطاريات لتخزين الطاقة، بالإضافة إلى عاكس يحول التيار المستمر إلى تيار متردد لتغذية الأحمال الكهربائية. ويهدف هذا النظام إلى ضمان توفير الطاقة بصورة مستمرة من خلال الموازنة بين إنتاج الكهرباء وتخزينها واستهلاكها، مما يجعله مناسباً للمناطق النائية والمواقع غير المرتبطة بالشبكة الكهربائية. [19]

### 2.5.II الأنظمة المرتبطة بالشبكة (On Grid)

الأنظمة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة هي منظومات تعمل بالتزامن مع شبكة التوزيع الكهربائية، حيث تُحوّل الطاقة المنتجة من الألواح الشمسية من تيار مستمر إلى تيار متردد بواسطة عاكس متصل بالشبكة، مع مطابقة خصائصه الكهربائية لخصائصها. ولا يعتمد هذا النوع من الأنظمة على بطاريات التخزين، إذ تُستخدم الشبكة الكهربائية لتغطية العجز في الإنتاج أو لاستقبال فائض الطاقة المولدة. كما يزود النظام بألية حماية (Anti-Islanding) التي تفصل المنظومة تلقائياً عند انقطاع التغذية من الشبكة، حفاظاً على سلامة المستخدمين واستقرار الشبكة الكهربائية. [19]

### 3.5.II الأنظمة الهجينة (Hybrid)

تجمع الأنظمة الكهروضوئية الهجينة بين الطاقة الشمسية ومصدر أو أكثر من مصادر الطاقة الاحتياطية، مثل الشبكة الكهربائية أو المولدات، بهدف ضمان استمرارية التغذية الكهربائية وتحسين موثوقية النظام. وتتكون هذه المنظومات من ألواح شمسية، وبطاريات لتخزين الطاقة، وعاكس هجين (Hybrid Inverter) يتولى إدارة تدفق الطاقة بين مختلف المصادر والأحمال وفقاً لظروف التشغيل. ويعتمد هذا النوع من الأنظمة على استراتيجيات تحكم ذكية لتحقيق التوازن بين الإنتاج والاستهلاك، مما يضمن كفاءة [19]

بالتأكيد. فيما يلي إعادة صياغة أكاديمية \*كليه\* للنص، مع الحفاظ على الترتيب العلمي، وتقليل التشابه مع النص الأصلي، بأسلوب يتناسب مع رسائل الماستر.

### II 6. مكونات النظام الكهروضوئي

إلى جانب الألواح الكهروضوئية، يعتمد النظام الشمسي على مجموعة من المكونات المساعدة التي تضمن كفاءة تشغيله وسلامته واستمرارية عمله. وتشمل هذه العناصر منظمات الشحن، وبطاريات التخزين، والعاكس، والكابلات الكهربائية، إضافة إلى أجهزة الحماية المختلفة.

## II 1.6.1.6 منظمات الشحن (Charge Controllers)

يُعد منظم الشحن أحد المكونات الأساسية في الأنظمة الكهروضوئية، إذ يتولى تنظيم انتقال الطاقة الكهربائية من الألواح الشمسية إلى البطاريات، مع مراقبة قيم الجهد والتيار بصورة مستمرة لضمان شحن البطاريات ضمن الحدود المسموح بها. كما يمنع مرور التيار العكسي من البطارية نحو الألواح خلال فترات انخفاض أو انعدام الإشعاع الشمسي، مما يحافظ على سلامة الخلايا الشمسية ويُحسن من موثوقية النظام.

### II 1.1.6.1.6 منظم الشحن PWM

يعتمد منظم الشحن (PWM (Pulse Width Modulation على تقنية تعديل عرض النبضة للتحكم في عملية شحن البطاريات. ويعمل على تقليل تيار الشحن تدريجيًا كلما اقتربت البطارية من الامتلاء، مع فصل التغذية عند الوصول إلى الحد الأقصى للشحن أو عند حدوث تفريغ مفرط. ويُستخدم هذا النوع غالبًا في الأنظمة الشمسية الصغيرة ذات القدرة المحدودة، ويتميز بانخفاض تكلفته وسهولة تشغيله، إلا أن كفاءته تكون أقل مقارنة بمنظمات الشحن الحديثة. [21]



الشكل II. 9: منظم الشحن PWM

### II 2.1.6.1.6 منظم الشحن MPPT

يعتمد منظم الشحن (MPPT (Maximum Power Point Tracking على تقنية تتبع نقطة الاستطاعة العظمى، حيث يعمل باستمرار على ضبط جهد التشغيل لاستخلاص أكبر قدرة ممكنة من الألواح الشمسية قبل نقلها إلى البطاريات أو أحمال التيار المستمر. ويتميز هذا المنظم بكفاءة مرتفعة، إذ

يمكنه زيادة الطاقة المستخرجة بنسبة تتراوح بين 15 % و 30 % مقارنة بمنظم PWM، كما يوفر وظائف حماية متقدمة تشمل منع الشحن الزائد، والتفريغ العميق، وعكس التيار، مما يساهم في إطالة العمر التشغيلي للبطاريات. ورغم أدائه العالي، فإن تكلفته تعد أكبر من تكلفة منظمات PWM. [21]



الشكل 10.II: منظم الشحن MPPT

## II 2.6. بطاريات التخزين

نظرًا للطبيعة المتغيرة للطاقة الشمسية نتيجة تعاقب الليل والنهار وتغير الظروف المناخية، تُستخدم بطاريات التخزين لتوفير الطاقة خلال فترات انخفاض أو انعدام الإنتاج. وتتمثل وظيفتها في تخزين فائض الطاقة الكهربائية المنتجة وإعادة استخدامها عند الحاجة، مما يضمن استمرارية تغذية الأحمال الكهربائية ويزيد من استقلالية النظام.

ويرتبط نظام البطاريات بمنظم الشحن الذي يتحكم في عمليتي الشحن والتفريغ، ويحمي البطاريات من ظروف التشغيل غير المناسبة. ويمكن توصيل البطاريات بطريقتين رئيسيتين؛ التوصيل على التوالي لرفع جهد النظام، والتوصيل على التوازي لزيادة السعة التخزينية وإطالة مدة التشغيل. ويُحدد عدد البطاريات وجهدها الاسمي وفقًا لمتطلبات النظام وسعة التخزين المطلوبة، مع مراعاة عمق التفريغ المسموح به لضمان أفضل أداء وعمر تشغيلي أطول.

## أنواع بطاريات الطاقة الشمسية



بطارية الليثيوم

بطارية  
الرصاص الجافةبطارية  
الرصاص السائلة

الشكل 11.11: أنواع بطاريات التخزين الكهربائي

### II 3.6 العواكس (Inverters)

يمثل العاكس العنصر المسؤول عن تحويل التيار المستمر (DC) الناتج عن الألواح الشمسية أو البطاريات إلى تيار متناوب (AC) يتوافق مع متطلبات الأحمال الكهربائية أو مع مواصفات شبكة التوزيع الكهربائية. ويختلف نوع العاكس باختلاف طبيعة النظام، حيث تُستخدم العواكس المستقلة في الأنظمة المعزولة، بينما تعتمد الأنظمة المرتبطة بالشبكة على عواكس متزامنة معها.

### II 4.6 الكابلات وأجهزة الحماية

تؤدي الكابلات الكهربائية وأجهزة الحماية دورًا أساسيًا في ضمان التشغيل الآمن والموثوق للأنظمة الكهروضوئية، حيث تضمن نقل الطاقة الكهربائية بكفاءة بين مختلف مكونات النظام، مع حماية التجهيزات من الأعطال الكهربائية والاضطرابات التشغيلية.

يُعد اختيار الكابلات المناسبة عاملاً مهماً في رفع كفاءة النظام الكهروضوئي، إذ يؤثر المقطع العرضي وطول الكابل بصورة مباشرة في قيمة الفوائد الكهربائية والهبوط في الجهد، خاصة في دوائر التيار المستمر. لذلك تُستخدم كابلات شمسية مصنوعة من النحاس المطلي بالقصدير، تتميز بمقاومة عالية للأشعة فوق البنفسجية والرطوبة والعوامل المناخية المختلفة، بما يضمن استقرار الأداء وإطالة العمر التشغيلي للمنظومة.

### II 5.6 أجهزة الحماية

تُستخدم أجهزة الحماية للمحافظة على سلامة النظام الكهروضوئي ومكوناته من الأخطار الكهربائية المختلفة. وتشمل هذه الأجهزة القواطع الكهربائية والمنصهرات التي تعمل على فصل التغذية

تلقائيًا عند حدوث تيار زائد أو قصر كهربائي، بالإضافة إلى مانعات الصواعق (SPD) التي تحمي المعدات الإلكترونية من الارتفاعات المفاجئة في الجهد الناتجة عن الصواعق أو اضطرابات الشبكة. كما يُعد نظام التأريض عنصرًا أساسيًا لتصريف تيارات الأعطال إلى الأرض، مما يحد من مخاطر الصعق الكهربائي ويحافظ على سلامة المستخدمين والمعدات.

## II 7. منهجية تصميم وتحديد أبعاد النظام الكهروضوئي

تمثل عملية تحديد أبعاد النظام الكهروضوئي المرحلة الأساسية في تصميم أي منظومة شمسية، إذ تهدف إلى اختيار المكونات المناسبة وضبط مواصفاتها بما يحقق التوازن بين الطاقة المنتجة والطلب المتوقع، مع ضمان كفاءة التشغيل وموثوقية النظام. وتعتمد هذه العملية على مجموعة من الحسابات الهندسية التي تُنجز وفق تسلسل منطقي يبدأ بتحديد الحمل الكهربائي وينتهي باختيار معدات التحكم والتحويل، كما هو موضح فيما يلي. [21]

1. حساب الاستهلاك اليومي للطاقة الكهربائية:

تبدأ عملية التصميم بتقدير الطاقة الكهربائية التي تستهلكها الأحمال خلال يوم واحد، ويُعبر عنها بالواط الساعي (Wh/day). ويتم ذلك بالاعتماد على القدرة الاسمية لكل جهاز وعدد ساعات تشغيله اليومية، مع التمييز بين الأحمال العاملة بالتيار المستمر والأحمال العاملة بالتيار المتناوب. وعند حساب استهلاك أحمال التيار المتناوب، تؤخذ كفاءة العاكس بعين الاعتبار للحصول على القيمة الفعلية للطاقة المطلوبة.

2. تحديد الإشعاع الشمسي المرجعي:

بعد تقدير الاستهلاك، يتم تحديد قيمة الإشعاع الشمسي اليومية الخاصة بموقع التركيب، وذلك بالاعتماد على القياسات الميدانية أو قواعد البيانات المناخية وخرائط الإشعاع الشمسي. ولضمان استمرارية التغذية الكهربائية طوال العام، تُعتمد قيمة الإشعاع الخاصة بالشهر الأقل إشعاعًا كأساس لجميع الحسابات التصميمية.

3. اختيار الجهد الاسمي للنظام :

يُحدد الجهد الاسمي للمنظومة وفق القدرة الكلية المطلوبة، ويكون عادة:

- 12V للأنظمة الصغيرة (أقل من 150 Wp).

- 24V للأنظمة المتوسطة (من 150 إلى 1000 Wp).

- 48V للأنظمة ذات القدرات الكبيرة (أكثر من 1000 Wp).

ويؤدي اختيار جهد أعلى إلى تقليل شدة التيار، وبالتالي خفض الفواقد الأومية وتقليل مقاطع

الكابلات وتحسين كفاءة التشغيل.

4. تحديد عدد الألواح الشمسية :

يحسب عدد الألواح الموصولة على التوازي/التسلسل للحصول على الجهد المطلوب

5. تصميم بنك البطاريات :

تهدف هذه المرحلة إلى تحديد سعة التخزين الكافية لضمان تغذية الأحمال خلال فترات غياب الإشعاع الشمسي، مع الأخذ بعين الاعتبار عدد أيام الاستقلالية وعمق التفريغ المسموح به وكفاءة البطاريات.

6. تصميم الكابلات الكهربائية:

يهدف اختيار الكابلات إلى تقليل ضياعات الطاقة وضمان أن يبقى هبوط الجهد ضمن الحدود المسموح بها، والتي لا ينبغي أن تتجاوز 3 % من الجهد الاسمي للنظام.

7. اختيار منظم الشحن والعاكس :

يعتمد اختيار منظم الشحن على توافقه مع خصائص المصفوفة الشمسية، ويجب أن يحقق الشروط التالية:

أ- أن تكون استطاعته أكبر من القدرة الذروية للمصفوفة.

ب- أن يساوي جهده الجهد الاسمي للنظام.

ت- أن يتحمل تيارًا أكبر من تيار القصر أو التيار الأعظمي للألواح.

- أما اختيار العاكس:

يُختار العاكس وفق القدرة الإجمالية للأحمال الكهربائية، بحيث تكون استطاعته مساوية أو أكبر من مجموع قدرات الأجهزة التي تعمل في الوقت نفسه. كما يفضل اختيار عاكس ذي كفاءة مرتفعة تتراوح عادة بين 90 % و 95 % للحد من ضياعات التحويل. ويجب كذلك أن يمتلك قدرة مناسبة لتحمل تيارات الإقلاع المرتفعة للأحمال الحثية، مثل المضخات والمحركات وأجهزة التكييف، لضمان تشغيلها بصورة آمنة ومستقرة.

## II 8. الخاتمة

أتاح هذا الفصل بناء قاعدة علمية وتقنية متكاملة لفهم مكونات الأنظمة الكهروضوئية وآليات عملها، مما شكل خطوة أساسية للانتقال من الجوانب النظرية إلى مرحلة التصميم والتطوير العملي للمنظومة المقترحة. وقد أبرزت الدراسة أن كفاءة النظام الكهروضوئي لا تعتمد فقط على جودة الألواح الشمسية، وإنما ترتبط أيضاً بحسن اختيار وتكامل مكوناته، مثل منظمات الشحن، وبطاريات التخزين، والعواكس، ووسائل الحماية، بما يضمن استقرار التشغيل ورفع موثوقية المنظومة.

كما أظهر تحليل الخصائص الكهربائية للألواح الشمسية أن أداءها يتأثر بشكل مباشر بتغير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، وأن الأنظمة ذات التثبيت الثابت لا تستغل الطاقة الشمسية المتاحة بالكفاءة المطلوبة نتيجة تغير زاوية سقوط أشعة الشمس خلال ساعات النهار، وهو ما يؤدي إلى انخفاض القدرة المنتجة مقارنة بالإمكانات الحقيقية للمنظومة.

وانطلاقاً من هذه النتائج، سيتم تخصيص الفصل الأخير لتصميم وإنجاز نظام تتبع شمسي ذكي ثنائي المحاور يعتمد على متحكم دقيق، يهدف إلى توجيه الألواح الكهروضوئية بصورة آلية نحو أفضل زاوية استقبال للإشعاع الشمسي. وسيتناول الفصل مراحل تصميم النظام الميكانيكي والإلكتروني، وآلية التحكم والبرمجة، بما يضمن تحسين استخلاص الطاقة وزيادة المردود الكلي للمنظومة الكهروضوئية في مختلف ظروف التشغيل.

## 1.111 مقدمة

بعد دراسة مكونات المنظومة الكهروضوئية وخصائصها التقنية في الفصل السابق، أصبح من الضروري التطرق إلى العنصر المسؤول عن التحكم والإدارة الذكية لهذه المنظومة، والمتمثل في المتحكمات الدقيقة. فقد شهدت الأنظمة الإلكترونية الحديثة تطورًا كبيرًا بفضل هذه الوحدات القادرة على معالجة البيانات واتخاذ القرارات في الزمن الحقيقي، مما جعلها أساسًا للعديد من تطبيقات الأنظمة والتحكم.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم دراسة شاملة حول المتحكمات الدقيقة من خلال التعرف على بنيتها الداخلية ومبدأ عملها، إضافة إلى استعراض أهم أنواعها وخصائصها التقنية. كما سيتم التطرق إلى المداخل والمخارج المختلفة وطرق برمجتها والتعامل معها، مع إبراز دورها في جمع المعلومات من الحساسات وإرسال أوامر التحكم إلى مختلف عناصر النظام.

وتكتسي هذه الدراسة أهمية خاصة في مشروعنا، إذ يمثل المتحكم الدقيق القلب النابض لنظام التتبع الشمسي، حيث يتولى معالجة إشارات الحساسات وتحديد الاتجاه الأمثل للألواح الشمسية من أجل تعظيم كمية الإشعاع المستقبلية وتحسين مردود إنتاج الطاقة الكهربائية. وعليه، فإن فهم خصائص هذه المتحكمات وآليات عملها يعد خطوة أساسية قبل الانتقال إلى مرحلة تصميم وإنجاز نظام التتبع الشمسي الذكي.

## 1.112 2 دراسة مكونات المشروع

## 1.2. III المتحكم الدقيق

المتحكم الدقيق هو دائرة متكاملة تجمع العناصر الأساسية للحاسوب: المعالج، والذاكرة (ذاكرة الحية أو العشوائية والميتة أو القراءة فقط)، والوحدات الطرفية، ووحدات الإدخال/الإخراج. بالإضافة إلى هذا التكوين الأساسي، يجهز المتحكم الدقيق بواجهات أخرى حسب طرازه، مثل المؤقت، ومحول الإشارة التناظرية/الرقمية (ADC) المدمج، وإدارة الاتصالات التسلسلية أو المتوازية، وحدة المراقبة (مراقبة البرنامج)، ومخرج تعديل عرض النبضة (PWM) وغيرها. أتاحت التطورات في تقنية التكامل إمكانية وضع جميع مكونات المتحكم الدقيق على شريحة سيليكون لا تتجاوز مساحتها بضعة مليمترات مربعة. يتكون الهيكل الأساسي للمتحكم الدقيق من ثلاثة أجزاء: الذاكرة، المعالج والوحدات الطرفية، تتولى الذاكرة مهمة تخزين البرنامج الذي سيتم تنفيذه، بالإضافة إلى البيانات الضرورية ونتائج المعالجة.

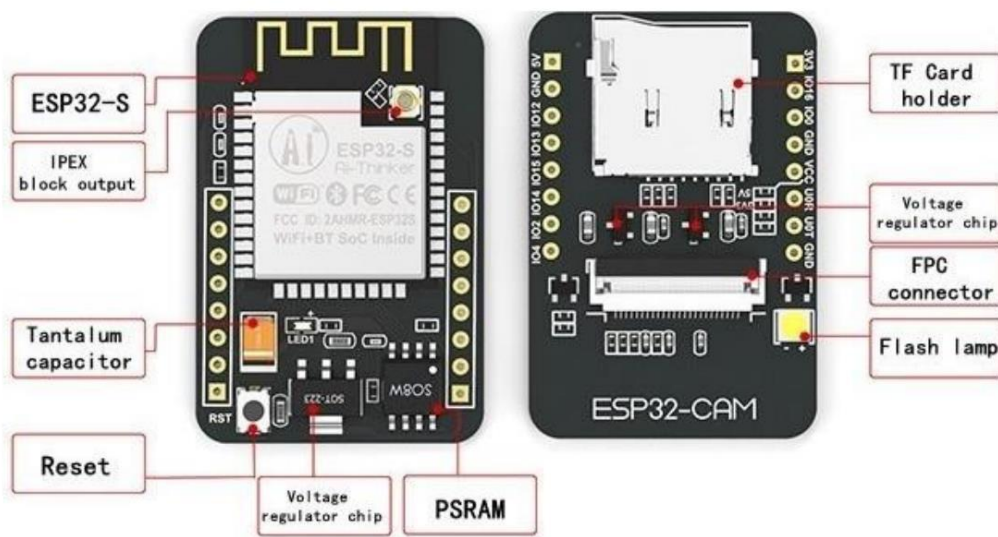
أما المعالج فيعد القلب الأساسي للنظام حيث يتكفل بتفسير تعليمات البرنامج الجاري تنفيذه، وتنفيذ العمليات التي تتضمنها هذه التعليمات، في حين تتمثل مهمة الوحدات الطرفية في ربط المعالج بالوسط المحيط بالنظام في كلا الاتجاهين، سواء عبر وحدات الإدخال أو وحدات الإخراج. [24]

### III 1.1.2 المتحكم الدقيق ESP32

تُعد شريحة ESP32 إحدى أشهر منصات المتحكمات الدقيقة (Microcontrollers) والأنظمة على شريحة (System on Chip - SoC) المستخدمة في تطبيقات إنترنت الأشياء (IoT) والأنظمة المدمجة الذكية. وقد طورتها شركة Espressif Systems ، وأعلن عنها خلال الربع الأخير من سنة 2016 باعتبارها الجيل المطور والخليفة المباشر للمتحكم الدقيق ESP8266 .

تتميز منصة ESP32 بانخفاض تكلفتها واستهلاكها المحدود للطاقة، إضافة إلى دمجها لوحدات الاتصال اللاسلكي Wi-Fi و Bluetooth و Bluetooth Classic ثنائي النمط ( Low Energy - BLE ) داخل الشريحة نفسها، مما يجعلها خيارًا مثاليًا لتطبيقات المراقبة والتحكم عن بعد والأنظمة الذكية التي تعتمد على الاتصال اللاسلكي. [26]

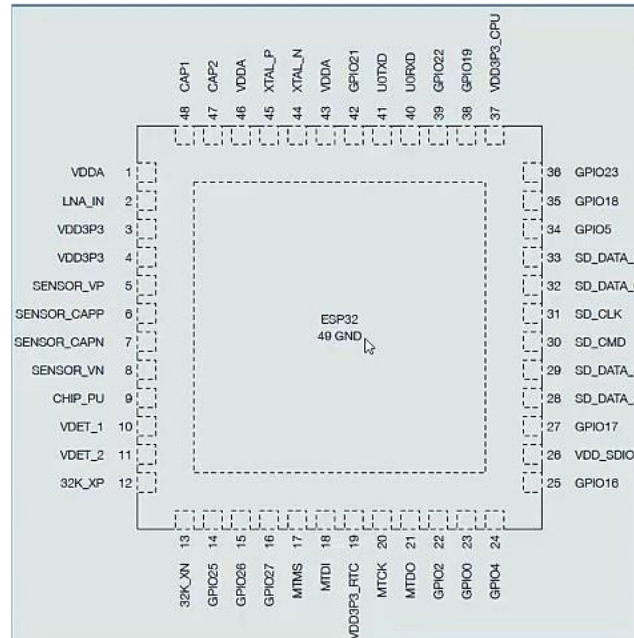
تعتمد النسخة القياسية من ESP32 على معالج ثنائي النواة من نوع Xtensa LX6 بمعمارية 32 بت ، ويعمل بتردد يصل إلى 240 MHz ، كما تزود بذاكرة داخلية من نوع SRAM بسعة 520 KB ، مع إمكانية ربطها بذاكرة وميضية خارجية ( Flash Memory ) وفقاً لتصميم لوحة التطوير المستخدمة.



شكل 1.III ESP32

ومن الناحية البرمجية، تدعم منصة ESP32 عدة بيئات تطوير، أبرزها بيئة Arduino IDE ، حيث تتم برمجتها باستخدام لغة ++C . كما توفر ما يقارب 34 منفذاً من منافذ الإدخال والإخراج العامة ( GPIO ) القابلة للتهيئة كمدخل أو مخرج رقمية وتماثلية، بالإضافة إلى دعم بروتوكولات الاتصال التسلسلي القياسية مثل UART و SPI و I2C . وتضم كذلك مجموعة من الوحدات العتادية المتقدمة، من بينها مولدات تعديل عرض النبضة ( PWM )، والمحولات التناظرية إلى رقمية ( ADC ) ( والرقمية إلى تناظرية ( DAC )، الأمر الذي يمنحها مرونة كبيرة في التعامل مع مختلف الحساسات والمحركات والأجهزة الإلكترونية. [26]

وتتدرج ضمن هذه المنصة عدة عائلات ووحدات تطوير، من أبرزها الوحدة القياسية -ESP32-WROOM-32 ، إلى جانب العائلة المتقدمة ESP32-S3 التي توفر أداءً أعلى وإمكانات إضافية تناسب التطبيقات المتقدمة في مجالات الذكاء الاصطناعي والأنظمة المدمجة.



شكل 2.III.2 منافذ الإدخال والإخراج الخاصة بـ ESP32

### III. 1.1.2. البنية الداخلية

يعتمد ESP32 على معالج Xtensa LX6 ثنائي النواة يعمل بتردد يصل إلى 240 MHz ،

ويحتوي على:

- ذاكرة SRAM داخلية.
- ذاكرة Flash خارجية.
- وحدة Wi-Fi بمعياري IEEE 802.11 b/g/n .
- وحدة Bluetooth Classic و Bluetooth Low Energy (BLE).

- محولات تناظرية ورقمية ADC و DAC.
  - مؤقتات Timer عالية الدقة.
  - مولدات PWM.
  - واجهات اتصال UART و SPI و I<sup>2</sup>C و CAN و I<sup>2</sup>S.
- تسمح هذه المكونات بتنفيذ التطبيقات المعقدة دون الحاجة إلى دوائر إضافية.

### III 2. 1.1.2 الخصائص التقنية

- يمتاز ESP32 بعدد كبير من الخصائص، أهمها:
- معالج ثنائي النواة بسرعة تصل إلى 240 MHz.
- دعم الاتصال اللاسلكي Wi-Fi و Bluetooth.
- استهلاك منخفض للطاقة مع أوضاع Sleep المختلفة.
- أكثر من 30 منفذ GPIO قابل للبرمجة.
- دعم اللمس السعوي Touch Sensor.
- دعم أنظمة الملفات الداخلية.
- إمكانية تحديث البرامج عن بعد (OTA). [29]

### III 3. 1.1.2 بيئات البرمجة

- يمكن برمجة ESP32 باستخدام عدة بيئات تطوير أشهرها:
- Arduino IDE
- ESP-IDF
- PlatformIO
- MicroPython

وتعد منصة Arduino IDE الأكثر استخدامًا بسبب بساطتها وتوفر عدد كبير من المكتبات البرمجية.

[28]

### III 4. 1.1.2 مجالات الاستخدام

- يستخدم ESP32 في العديد من التطبيقات الحديثة، منها:
- أنظمة إنترنت الأشياء (IoT).
- المنازل الذكية.
- الروبوتات.
- أنظمة المراقبة والكاميرات الذكية.

- أنظمة التتبع الشمسي.
- شبكات الاستشعار اللاسلكية.
- التحكم الصناعي.
- محطات الأرصاد الجوية.
- السيارات الذكية.

### III 5. 1.1.2. مزايا ESP32

من أهم مزاياه:

- انخفاض التكلفة مقارنة بالإمكانات التي يوفرها.
- أداء معالجة مرتفع.
- دعم مدمج للاتصال اللاسلكي.
- استهلاك اقتصادي للطاقة.
- سهولة البرمجة.
- دعم مجتمعي واسع وتوفر مكتبات جاهزة.
- توافق مع معظم الحساسات والمحركات الإلكترونية.

### III 2.2. المقاومات الكهربائية

هي عنصر إلكتروني غير نشط وظيفته الأساسية هي إعاقة أو ممانعة تدفق التيار الكهربائي في الدائرة، تستخدم المقاومة بشكل أساسي للتحكم في قيم التيار والجهد وحماية المكونات الحساسة (مثل المستشعرات والمتحكمات) من التلف، تقاس بوحدة الأوم ( $\Omega$ ). [30]

### III 1. 2.2. المقاومة الضوئية LDR

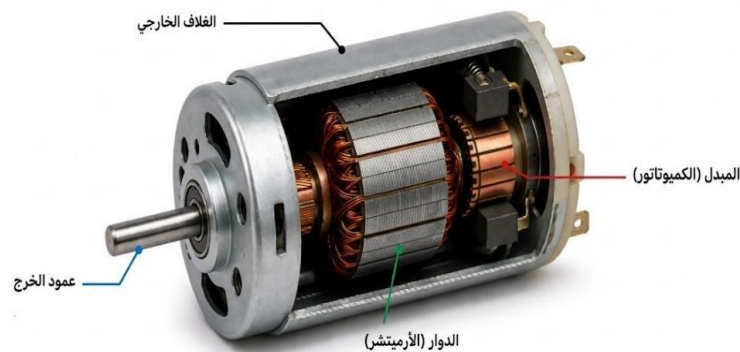
هي مقاومة تتغير قيمتها الكهربائية عكسيا تبعا لشدة الضوء الساقط عليها يرمز لها بالرمز (LDR)، وتتكون غالبا من مادة كبريتيد الكاديوم (CdS). فعند تعرضها للضوء تقل مقاومتها الكهربائية بشكل ملحوظ نتيجة لتحرر الإلكترونات وزيادة ناقليتها، بينما تزداد قيمتها لتصل إلى أعلى مستوياتها في الظلام. بناء على هذه الخصائص، تستخدم هذه الحساسات في الدارات والأنظمة الإلكترونية التي تعتمد على استشعار شدة الإضاءة والتحكم التلقائي، مثل منظومات التتبع الشمسي. [31]



الشكل 3.III: أنواع المقاومات الضوئية

### III 3.2. محرك التيار المستمر (DC Motor)

تعد محركات التيار المستمر آلات كهرو ميكانيكية تحول الطاقة الكهربائية المستمرة إلى طاقة ميكانيكية دورانية لتحريك حمولة معينة. وتتكون هذه الآلة أساساً من جزأين رئيسيين هما: العضو الثابت (Stator) والعضو الدوار (Rotor). وتتميز هذه المحركات بمرونة عالية، حيث يعتمد اتجاه دورانها على قطبية الجهد المغذي، بينما تعتمد سرعتها على قيمة الجهد المطبق. ونظراً لحاجتها إلى تيار تشغيل مرتفع يفوق قدرة مخارج المتحكمات الدقيقة، يتم التحكم في تشغيلها وعكس اتجاه حركتها في المشروع بالاستعانة بدارة قيادة مساعدة (Motor Driver) تعتمد على جسر ترانزستوري من نوع (H-Bridge) [32].



الشكل 4.III: محرك التيار المستمر

## III 1.3.2. SERVO محرك

محرك السيرفو هو جهاز كهروميكانيكي يستخدم للتحكم الدقيق في الموضع والسرعة وعزم الدوران، ويعمل ضمن نظام تحكم ذي حلقة مغلقة يعتمد على التغذية الراجعة لمراقبة الأداء وتصحيحه. تستخدم محركات السيرفو في تطبيقات عديدة تتطلب دقة عالية مثل الروبوتات والأنظمة الصناعية وآلات التحكم الآلي. وتنقسم محركات السيرفو إلى نوعين رئيسيين: محركات سيرفو التيار المستمر ( DC Servo ) ومحركات سيرفو التيار المتردد ( AC Servo ) حسب نوع مصدر التغذية الكهربائية المستخدم [33].

## III 2.3.2. مبدأ العمل المحرك Servo

يتم التحكم في المحرك بواسطة إشارات كهربائية تماثلية أو رقمية تحدد الحركة المطلوبة للمحور، حيث تستقبل الدارة الإلكترونية المدمجة فيه إشارات تعديل عرض النبضة (PWM) الرقمية أو التماثلية القادمة من نظام التحكم لتحويلها إلى زاوية مستهدفة. ويتم تحديد موضع عمود محرك السيرفو باستخدام حساس داخلي مثل المقاومة المتغيرة أو الحساسات الإلكترونية الحديثة، حيث يقوم الحساس بتحويل الموضع الحالي للمحرك إلى إشارة كهربائية تقارن مع الإشارة المطلوبة التي تمثل الموضع المراد الوصول إليه. عند وجود فرق بين الموضع الحالي والموضع المطلوب، تتولد إشارة خطأ ترسل عبر دائرة التحكم ليقوم جسر التيار (H-Bridge) الداخلي بتحريك المحرك نحو الموضع الصحيح، وتزداد سرعة دوران المحرك كلما كان الفرق أكبر بين الموضع الحالي والموضع المطلوب، وعندما يصل المحرك إلى الموضع المطلوب تماماً تنعدم إشارة الخطأ فيتوقف المحرك ويحافظ على ثباته واستقراره في ذلك الموضع [33].



الشكل 5.III: البنية الداخلية للمحرك سيرفو

### III 3.3.2. أنواع المحركات Servo

تتواجد محركات السيرفو بأشكال وأحجام مختلفة تلبى متطلبات الأنظمة الآلية، وتنقسم من حيث طبيعة الحركة الميكانيكية إلى ثلاثة أنواع رئيسية: [33]

- **محركات الدوران الموضعية:** يعتبر هذا النوع الأكثر انتشاراً، حيث يتحرك عمود المحرك ضمن زاوية محددة تصل غالباً إلى 180 درجة، وذلك بفضل وجود عائق ميكانيكي ونظام تروس يمنع الدوران الزائد ويحافظ على دقة الموضع.
- **محركات الدوران المستمر:** تشبه المحركات الموضعية في بنيتها، لكنها تمتلك القدرة على الدوران بشكل كامل ومستمر بزاوية 360 درجة دون قيود ميكانيكية، مع إمكانية التحكم في سرعة واتجاه الدوران.
- **المحركات الخطية:** تعمل بطريقة مشابهة لمحركات السيرفو العادية، ولكن يتم فيها تحويل الحركة الدورانية الداخلية إلى حركة مستقيمة (ذهاباً وإياباً) باستخدام آلية ميكانيكية خاصة.

ان المحرك الذي قمنا باختباره واعتماده في كلا النسختين الهندسيتين هو المحرك التجاري من نوع SG90 Servo لتوجيه الألواح الشمسية بدقة ضمن نظام التتبع ثنائي المحور، يزن هذا المحرك 9 غرامات، ويعمل بجهد يتراوح بين 4.8V إلى 6V مع تيار تشغيل يمتص ما بين 100mA إلى 250mA ، كما يوفر زاوية دوران تصل إلى 180° بسرعة تقدر بـ 0.1 ثانية لكل 60°، ويتحكم فيه بسلسلة عبر إشارات PWM بواسطة لوحات ESP32.

ومن الناحية التطبيقية واجهنا عيوباً مصنعية وبعض المشاكل عند اقتناء هذه المحركات، حيث وجدت بعض الوحدات تالفة تماماً ولا تستجيب برمجياً عند أول تشغيل، في حين عانت وحدات أخرى من مشكلة الدوران في الفراغ دون نقل الحركة نتيجة تلف أو تآكل التروس البلاستيكية الداخلية، مما استدعى استبدالها عدة مرات لضمان استقرار حركية المنظومة. ويعزى هذا الخلل الميكانيكي والبرمجي جزئياً إلى تحديات التحقق من الجودة عند التوريد، لا سيما وأن هذا المحرك يطرح في الأسواق بإصدارين وظيفيين مختلفين (التحكم الزاوي والدوران المستمر) بالرغم من تطابقهما التام في التصميم الهيكلي والمسمى التجاري، مما يستوجب إرساء بروتوكول فحص دقيق ومسبق قبل الشراء والتركيب لتفادي القصور التشغيلي في بيئة العمل.

### III 4.2. اللوح الشمسي الكهروضوئي

اللوحة الشمسية الكهروضوئية هي وحدة تتكون من مجموعة من الخلايا الشمسية الكهروضوئية المترابطة كهربائياً، تجمع داخل إطار واحد وتغلف لحمايتها وحماية التوصيلات الكهربائية من العوامل والظروف الجوية الخارجية، ومن أجل فهم أفضل لبنية اللوح الشمسي وآلية تركيبه، تم التطرق إلى مكوناته الأساسية ودورها في تحقيق الكفاءة والأداء المطلوبين [16]. في الفصل الثاني

#### الالواح الشمسية التجارية المستعمل في المشروع

في هذا المشروع تم الاعتماد على الواح شمسية صغيرة بأبعاد  $107 \times 61$  مم، وهي من النوع السليكوني احادي البلورة، تتميز بكفاءة جيدة في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية مقارنة بحجمها الصغير، حيث يوفر اللوح الواحد جهداً تشغيلياً يقارب (5V) وتصل قيمته القصوى في حالة الإشعاع الأقوى إلى (7V)، وتيار يصل إلى حوالي 150mA باستطاعة تقارب  $I_W$ ، مما يجعلها مناسبة لتغذية المشاريع الإلكترونية الصغيرة، ميدانياً من توظيف الالواح بمرحلتين متكاملتين:

- **النسخة الأولى:** تم ربط الألواح الشمسية على التسلسل ووصلت بمستشعرت الجهد والتيار للتحقق من كفاءة الطاقة الناتجة عن النظام المتحرك، وأثبتت الاختبارت تقديم مردود طاقتوي ممتاز بفضل الدقة العالية لنظام التتبع.
- **النسخة الثانية:** بناء على نتائج المرحلة الأولى، تم توظيف طاقة الالواح في شحن نظام البطاريات المدمج، لتحويل المشروع إلى نظام مستقل قادر على تخزين الطاقة، وقد تم اعتماد طريقة ربط الالواح على التوازي، وذلك للحفاظ على جهد ثابت ومناسب يعادل 5 فولت، مع مضاعفة شدة التيار لتسريع عملية الشحن وضمان الكفاءة العالية للنظام.

وقد ساهم خفة وزن الألواح في تقليل الحمل الميكانيكي، مما ضمن حركة انسيابية لمحركات السيرفو (SG90) دون إجهاد تروسها الداخلية.



الشكل 6.III: اللوح السيليكوني احادي البلورة المستعمل

### III 5.2 البطارية

في هذا المشروع تم الاعتماد على خلايا الليثيوم-أيون الأسطوانية من طراز (18650) بسعة اسمية تبلغ 2500 مللي أمبير/ساعة (2500mAh) لتكون عصب منظومة التغذية المستقلة في النسخة المتقدمة للمشروع، نظرا لكثافتها الطاقية العالية، وبجهد اسمي يبلغ 7.3 فولت (يصل إلى 2.4 فولت عند الشحن الكامل). ويتراوح تيار التفريغ الأقصى المستمر لهذه الخلايا القياسية حول 5.2 أمبير، مما يمنح المنظومة قدرة عالية على تلبية قف ازت التيار المفاجئة التي تتطلبها المحركات والأجزاء الديناميكية دون انهيار في الجهد.



الشكل 7.III: بطاريات الليثيوم 18650 المستعملة

### III 1.6.2 حامل البطارية

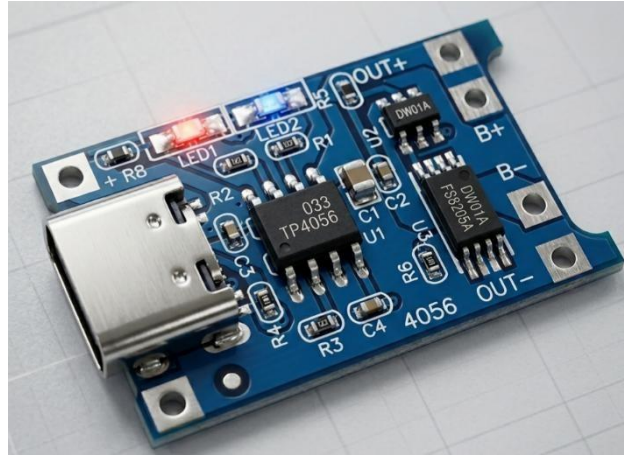
يستخدم هذا الحامل المصنوع من البولييمر العازل لتأمين التثبيت الميكانيكي والربط الكهربائي المستقر لخلايا الليثيوم داخل النظام، وقد اعتمد خياار هندسيا لتفادي اللحام الحار المباشر على أقطاب البطارية والذي يهدد استقرارها الكيميائي. كما يضمن هذا الجزء حماية البطاريات ومنع انفصال التغذية الكهربائية أثناء الحركة الديناميكية المستمرة للمحاور (الأفقية والعمودية) الخاصة بمنظومة التتبع الشمسي، فضلا عن تسهيل عمليات الصيانة والاستبدال السريع للخلايا في الحقول الشمسية المعزولة.



الشكل 8.III: حامل بطارية 186500

### III 2.6.2 وحدة الشحن والإدارة TP4056

تعد هذه الوحدة منظومة إلكترونية مخصصة لشحن وحماية بطاريات الليثيوم-أيون والليثيوم-بوليمر، حيث تكمن وظيفتها التقنية في تنظيم عملية الشحن بكفاءة تشغيلية عالية وتوفير تيار مستقر وآمن مع دعم الخلايا بجهد 7.3 فولط، وقد وقع الاختيار على هذه الوحدة لاعتمادها المباشر على المتحكم المتقدم (TP4056) الذي ينظم تدفق الطاقة بدقة، بالإضافة إلى مي ازتها في الحماية المدمجة التي تقي الخلايا من مخاطر الشحن الزائد، والتفريغ المفرط، وعكس القطبية، وقصر الدائرة، مما يساهم بشكل محوري في تحسين الأداء العام لحزمة الطاقة، وإطالة عمرها التشغيلي، وضمان استدامة النظام الذكي في الميدان.



الشكل III.9: وحدة الشحن و الحماية TP4056

### III 7.2 مكثف التنعيم والتثبيت

تتمثل الوظيفة التقنية لهذا المكون في ترشيح الجهد، وتنعيم التذبذبات، وتأمين حماية المنظومة من الهبوط اللحظي في تيار التغذية. وقد دمج هذا المكثف ذو السعة العالية (2200 $\mu$ F) على التوازي بين قطبي حزمة البطاريات ليعمل كمخزن طاقة فوري ومحلي، حيث يكمن المبرر الأساسي من هذا الاختيار الهندسي في تخميد هبوط الجهد المفاجئ الناتج عن قفزات التيار الحادة التي تطلبها وحدة الاتصال الخلو ي (SIM800L) ومحركات التوجيه (Servo Motors) أثناء الإقلاع وبدء الحركة، يضمن هذا التدعيم الحفاظ على استقرار التغذية الكهربائية للدوائر الإلكترونية، ويمنع بشكل قطعي حدوث أي إعادة تشغيل عشوائية (Reset) للمتحكم الدقيق (ESP32 S3)، مما يعزز اعتمادية المنظومة في الميدان.

### III 8.2 منظم الجهد المستعمل في المشروع

بهدف تأمين التغذية الكهربائية للمتحكم الدقيق (ESP32 - S3)، تم دمج منظم الجهد الخطي HT7333 من فئة منظمات الجهد ذات الهبوط المنخفض، تكمن الوظيفة الأساسية لهذا المركب في خفض جهد بطارية الليثيوم-أيون المتغير وتثبيتته بدقة عند عتبة 3.3V مستقرة ونقية. وقد استند اختيار هذا المنظم بالذات إلى معيارين هنديين حاسمين لضمان نجاح المنظومة المعزولة، أولهما امتلاكه لتيار ساكن ضئيل جدا لا يتعدى 4 $\mu$ A مما يحمي طاقة البطارية من الاستنزاف أثناء أطوار خمول النظام، وثانيهما ميزته في خفض جهد الهبوط، مما يضمن استمرارية إمداد المعالج بجهد تشغيل ثابت حتى عند اقتراب خلايا البطارية من عتبات تفريغها الدنيا.



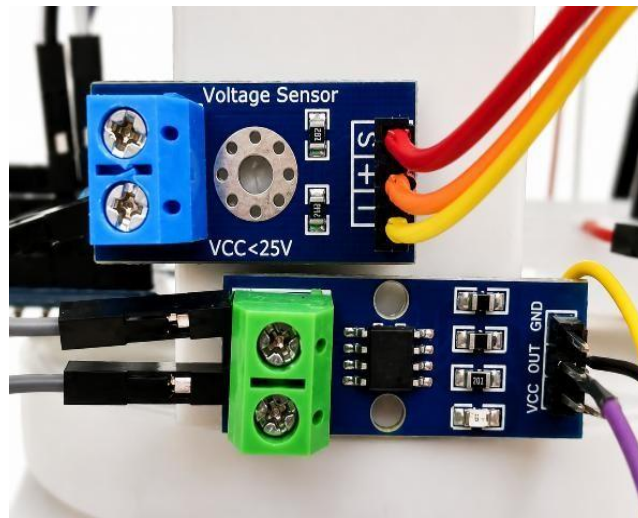
الشكل 10.III: منظم الجهد الخطي HT7333 - A

### III 9.2 وحدة استشعار مؤشرات الطاقة (الجهد والتيار)

تتولى هذه الوحدة الرصد اللحظي للجهد والتيار المستخرجين من اللوح الشمسي لحساب القدرة الكهربائية المتولدة وتحليل كفاءة التتبع، وقد تم تنفيذها عبر عنصرين أساسيين:

حساس الجهد (**Voltage Sensor 0-25V**) يعمل وفق مبدأ مقسم الجهد لتخفيض قيم الجهد العالية المستخرجة من اللوح الشمسي إلى مستويات تماثلية منخفضة وأمنة، مما يتيح للمحول التماثلي الرقمي الخاص بمعالج (ESP32 - S3) قراءتها بدقة وتحويلها لبيانات رقمية دون تجاوز عتبة الجهد الآمنة للمنافذ.

حساس التيار (**ACS712**) يتولى قياس شدة التيار المتولد من اللوح الشمسي استناداً إلى مبدأ تأثير هول، حيث يقوم بتحويل قيمة التيار المتدفق عبره إلى إشارة تماثلية (Analog Signal) متناسبة خطياً، ليقرأها ويعالجها المتحكم الدقيق (ESP32 - S3) في حساب الاستطاعة الكهربائية اللحظية للمنظومة. [35]



الشكل 11.III: حساس التيار (ACS712) والتوتر (Voltage Sensor 0-25V)

## III. 10. الخاتمة

في ختام هذا الفصل، تم التطرق إلى العناصر الضرورية المستعملة في تجسيد هذا المشروع و منها المتحكمات الدقيقة باعتبارها العنصر الأساسي في أنظمة التحكم الحديثة، مع إبراز دورها في قيادة منظومات التتبع الشمسي وتحسين أدائها. كما تم استعراض أهم أنواع المتحكمات الدقيقة ومجالات استخدامها، مع التركيز على المتحكم المختار للمشروع وخصائصه التقنية التي جعلته مناسباً لتطبيقات الطاقة الشمسية.

وتناول الفصل أيضاً مكونات البطاقة الإلكترونية ووظيفة كل عنصر داخل منظومة التتبع، بدءاً من الحساسات ووصولاً إلى دوائر القيادة والمحركات، مع توضيح آلية التكامل بين هذه المكونات لضمان تتبع مستمر ودقيق لمسار الشمس. وقد ساهم هذا العرض في بناء قاعدة تقنية متينة لفهم كيفية تنفيذ النظام عملياً.

وُعدت المعارف المكتسبة في هذا الفصل أساساً للانتقال إلى الفصل الرابع، الذي سيتم فيه عرض الجانب التطبيقي للمشروع، من خلال تصميم وإنجاز المنظومة، ومحاكاتها واختبار أدائها، ثم تحليل النتائج المحصل عليها وتقييم مدى تحقيقها للأهداف المرجوة.

## 1.IV مقدمة

بعد استعراض المبادئ النظرية للأنظمة الكهروضوئية ودراسة مكوناتها الأساسية، إلى جانب منهجية تصميمها وتحديد أبعادها في الفصل السابق، يأتي هذا الفصل لتجسيد الجانب التطبيقي للمشروع من خلال تصميم وإنجاز نظام تتبع شمسي ذكي ثنائي المحاور يعتمد على متحكم دقيق. ويهدف هذا النظام إلى تحسين توجيه اللوح الكهروضوئي نحو الشمس بصورة آلية، بما يسمح برفع كفاءة استغلال الإشعاع الشمسي وزيادة الطاقة الكهربائية المنتجة مقارنة بالأنظمة ذات التثبيت الثابت.

يتناول هذا الفصل مختلف مراحل إنجاز المشروع، بدءًا بتصميم الهيكل الميكانيكي وتطوير نموذجين يتوافقان مع منصتي Arduino و ESP32، مرورًا بتجسيد الدوائر الإلكترونية واختيار المكونات المناسبة، ثم برمجة خوارزمية التحكم ومحاكاة النظام للتحقق من صحة التصميم قبل مرحلة التنفيذ الفعلي. كما يتطرق إلى المبادئ الفيزيائية التي يقوم عليها نظام التتبع الشمسي، والتصنيف الهندسي لأنظمة التتبع، بالإضافة إلى استراتيجيات التحكم المعتمدة، سواء بالحلقة المغلقة باستخدام الحساسات الضوئية أو بالحلقة المفتوحة القائمة على الحسابات الفلكية. [35]

ويهدف هذا الفصل إلى إبراز التكامل بين التصميم الميكانيكي، والبرمجة، والإلكترونيات، وتقنيات التحكم، من أجل تطوير منظومة تتبع شمسية تتميز بالدقة والموثوقية، وقادرة على تحسين مردود النظام الكهروضوئي في مختلف ظروف التشغيل.

## 2.IV التجسيد الميكانيكي لهيكل المشروع

يعتبر الهيكل الميكانيكي الركيزة الأساسية في نظام تتبع الشمس ثنائي المحور، إذ يوفر الثبات والدعم اللازمين لحركة التوجيه الديناميكي من خلال قاعدة سفلية تضمن الاستقرار، وجزء وسطي يوجه الحركة أفقياً (شرق-غرب)، وجزء علوي يتحكم في المحور العمودي (أعلى-أسفل) لتوجيه اللوح الشمسي باستمرار نحو ذروة الإشعاع وتحسين كفاءة الطاقة، وقد تم تصميم نموذجين من هذا الهيكل وتصديرهما بصيغة (STL) ليتم طباعتها بتقنية (FDM) ثلاثية الأبعاد بمدينة سطيف، حيث خصص الهيكل الأول ليعمل بالتكامل مع متحكم أردوينو و ESP32.



الهيكل مجمع



القطعة 1 : القاعدة



القطعة 2 : الحاملة



القطعة 3 : حاملة الألواح الشمسية

الشكل IV .1 : الهيكل الميكانيكي

## 3. IV محاكاة المشروع

يهدف التحقق من سلامة التصميم واختبار كفاءة الكود البرمجي هندسيا قبل الانتقال إلى مرحلة التركيب المادي، اعتمد في هذا المشروع على برنامج ومنصة متكاملتين للمحاكاة:

## 1.3. IV مبدأ العمل الفيزيائي

يعد نظام التتبع الشمسي منظومة ميكاترونية تدمج بين الهيكل الميكانيكي، والدوائر الإلكترونية، والتحكم البرمجي، صممت لغرض توجيه الألواح الكهروضوئية (PV) أو المركبات الشمسية (CSP) بشكل مباشر نحو قرص الشمس طوال ساعات النهار. يهدف هذا النظام إلى رفع كفاءة امتصاص الإشعاع الشمسي المباشر عبر تقليل زاوية السقوط ( $\theta$ ) إلى أدنى قيمة ممكنة.

تستند الأهمية النظرية والعملية لهذه الأنظمة إلى القوانين الفيزيائية التالية:

قانون لامبرت للجيب تمام (Lambert's Cosine Law): ينص القانون على أن القدرة الإشعاعية الممتصة من قبل السطح تتناسب طرديا مع جيب تمام زاوية السقوط.

$$E = E_n \times \cos(\theta) \quad 1.IV$$

حيث تتحقق أقصى كفاءة طاوقية في حالة التعامد المطلق أي  $\cos(\theta) = 1 \leftrightarrow \theta = 0^\circ$  ، مما يؤدي إلى تركيز كامل الطاقة الإشعاعية على وحدة المساحة دون تشتت، ومنه ترتفع الكفاءة التشغيلية للنظام بنسبة كبيرة مقارنة بالأنظمة الثابتة.

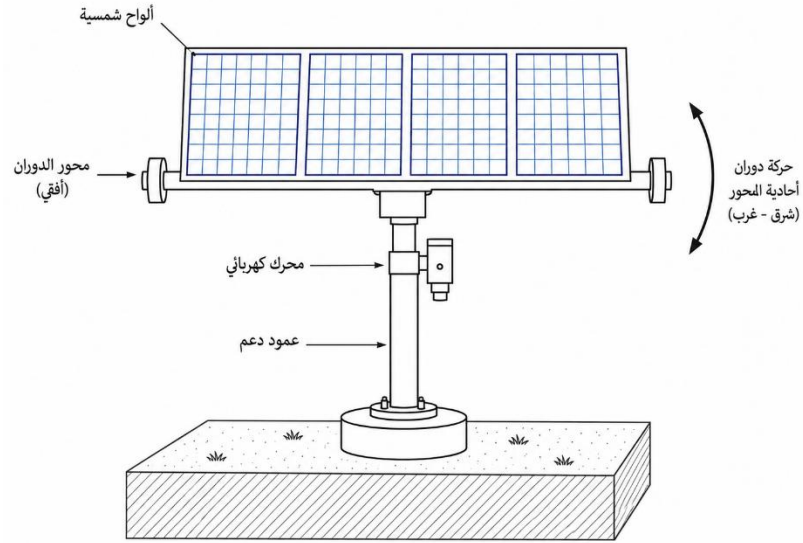
## 2.3. IV التصنيف الهندسي لأنظمة التتبع

تصنف أنظمة التتبع وفقا لعدد درجات الحرية (Degrees of Freedom) والقدرة على المناورة

الحركية إلى نوعين رئيسيين:

## 1.2.3. IV أنظمة التتبع أحادية المحور

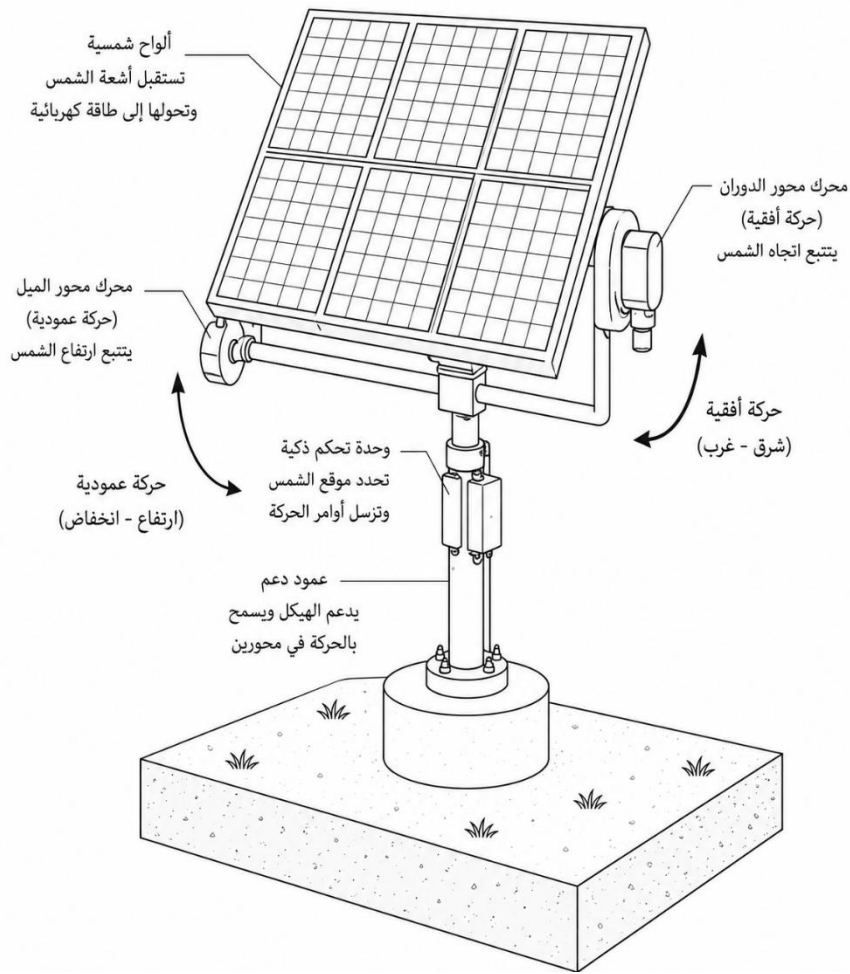
تعتمد هذه الأنظمة على محور دوران وحيد، حيث تتبع الشمس في مسارها اليومي من الشرق إلى الغرب. تمتاز هذه الأنظمة بتكلفتها الاقتصادية المنخفضة، وبساطة التصميم الميكانيكي، وسهولة الصيانة، وهي الخيار الأكثر شيوعا في المحطات الكهروضوئية الكبرى.



الشكل 2.IV : مجسم توضيحي لألية عمل التتبع أحادي المحو

#### IV 2.2.3 أنظمة التتبع ثنائية المحاور

تتميز هذه الأنظمة بامتلاكها لدرجتي حرية، مما يتيح لها المناورة المت ازمنة في اتجاهين متعامدين (السمت والارتفاع). ويسمح هذا التصميم الهندسي بملاحظة دقيقة لموقع الشمس مع التكيف التام مع الانحرافات الم وسمية للمسار الشمسي. علاوة على ذلك، يمتلك النظام قدرة على المناورة التكيفية مع التغيرات الجوية، حيث يمكنه التعامل مع حالات الحجب الجزئي الناتجة عن السحب عبر البحث عن النقطة ذات الكثافة الإشعاعية القصوى، أو اتخاذ وضعيات استراتيجية لتقليل استهلاك المحركات عند غياب الإشعاع المباشر، مما يضمن استق رار الأداء الطاقوي في مختلف الظروف المناخية.



الشكل 3.IV : مجسم توضيحي لآلية عمل التتبع ثنائي المحاور

#### IV. 4.12 استراتيجيات التحكم في التتبع

يتم إدارة حركة المحركات في نظام التتبع من خلال استراتيجيتين أساسيتين:

#### IV. 1.4. التحكم بنظام الحلقة المغلقة (Closed Loop Sensor Control)

تعتمد استراتيجية التحكم النشط (Active Tracking) على مبدأ التغذية الراجعة المغلقة (Closed-Loop Feedback)، حيث تُستخدم أزواج من المقاومات الضوئية (Light Dependent Resistors - LDRs) يفصل بينها حاجز معتم لضمان استقبال غير متساوٍ للإشعاع عند حدوث أي انحراف في اتجاه اللوح الشمسي. فعندما يبتعد اللوح عن الوضعية المثلى المواجهة لأشعة الشمس، تختلف شدة الإضاءة الساقطة على كل مقاومة ضوئية، مما يؤدي إلى توليد فرق في الجهد الكهربائي بين الحساسين. [35]

يقوم المتحكم الدقيق (Microcontroller) بقراءة هذا الفرق وتحليله بصورة مستمرة، ثم يقارن القيم المقاسة بالمرجع المطلوب، ليصدر أوامر تحكم مناسبة إلى محركات التتبع بهدف تصحيح زاوية ميل

اللوح أو زاوية دورانه. وتستمر هذه العملية حتى يصبح فرق الإضاءة بين الحساسات في حده الأدنى، وهو ما يدل على أن اللوح أصبح عمودياً تقريباً على أشعة الشمس، وبذلك تتحقق أعلى كفاءة ممكنة في استقبال الإشعاع الشمسي وزيادة إنتاج الطاقة الكهربائية.

وتتميز هذه الاستراتيجية بسرعة الاستجابة للتغيرات الأنية في موقع الشمس وشدة الإشعاع، كما تمتاز ببساطة تنفيذها وانخفاض تكلفتها مقارنة بالأنظمة المعتمدة على النماذج الفلكية. إلا أن كفاءتها قد تتراجع في بعض الظروف البيئية، مثل الغيوم الكثيفة، أو الضباب، أو تراكم الغبار والأتربة على الحساسات، إضافة إلى تأثير الظلال الجزئية، مما قد يؤدي إلى انخفاض دقة التتبع وحدوث انحراف في توجيه الألواح الشمسية. لذلك، تُدمج هذه الاستراتيجية في العديد من الأنظمة الحديثة مع خوارزميات تتبع فلكية لتكوين نظام تحكم هجين يجمع بين سرعة الاستجابة والدقة والموثوقية. تمتاز هذه الاستراتيجية بدقة عالية وسرعة استجابة للتغيرات الأنية في موقع الشمس وشدة الإشعاع الشمسي، مما يساهم في تحسين كفاءة التقاط الطاقة وزيادة إنتاجية المنظومة الكهروضوئية. ومع ذلك، فإن أداؤها قد يتأثر في بعض الظروف التشغيلية، مثل السماء الملبدة بالغيوم، أو الضباب، أو تراكم الغبار والأتربة على سطح الحساسات، إضافة إلى تأثير الظلال الجزئية، وهو ما قد يؤدي إلى انخفاض دقة التتبع وحدوث انحرافات في توجيه الألواح الشمسية.

وللتغلب على هذه القيود، تُدمج أنظمة التتبع الحديثة في كثير من الأحيان بين استراتيجية التحكم النشط وخوارزميات حسابية تعتمد على النماذج الفلكية أو البيانات الزمنية والمكانية، فيما يعرف بالتحكم الهجين (Hybrid Tracking)، بهدف ضمان استمرارية التتبع بدقة عالية حتى في الظروف الجوية غير الملائمة.

#### 4. IV التحكم بنظام الحلقة المفتوحة (Open Loop Chronological Control)

تعتمد استراتيجية التحكم بالحلقة المفتوحة (Open-Loop Control) على الحسابات الفلكية لتحديد موقع الشمس، دون الاعتماد على حساسات ضوئية أو تغذية راجعة من البيئة المحيطة. ويستند هذا الأسلوب إلى دمج خوارزميات رياضية وفلكية دقيقة داخل ذاكرة المتحكم الدقيق، حيث تُحسب إحداثيات الشمس اعتماداً على الموقع الجغرافي للمنظومة (خط العرض وخط الطول) والتوقيت الفعلي المستمد من وحدة الساعة الحقيقية (Real-Time Clock - RTC). وبناءً على هذه الحسابات، تُرسل أوامر التحكم إلى المحركات لتوجيه الألواح الشمسية نحو الموقع المتوقع للشمس على مدار اليوم.

وتتميز هذه الاستراتيجية بدرجة عالية من الاستقرار والموثوقية، نظرًا لعدم تأثرها بالتغيرات البيئية مثل الغيوم، والضباب، وتراكم الأتربة، أو اختلاف شدة الإشعاع الشمسي، مما يضمن استمرارية

عملية التتبع في مختلف الظروف الجوية. لذلك، تُعد من أكثر تقنيات التتبع ملائمةً لمحطات الطاقة الشمسية الكبيرة والتطبيقات الصناعية التي تتطلب دقة تشغيلية عالية واستمرارية في الأداء. ومع ذلك، فإن دقة هذه الطريقة تعتمد بصورة أساسية على صحة البيانات الزمنية والجغرافية المستخدمة، إضافة إلى دقة معايرة النظام الميكانيكي أثناء التركيب، إذ إن أي خطأ في هذه المعطيات قد يؤدي إلى انحراف تدريجي في توجيه الألواح وانخفاض كفاءة التتبع.

#### IV. 5 عرض المنظومة التجريبية وإعدادات النظام المنجز

في هذه المرحلة، تم تصميم وإنجاز منظومة تجريبية تمثل نموذجًا أوليًا (Prototype) لنظام تتبع شمسي ثنائي المحور، بهدف تجسيد الجانب التطبيقي للمنظومة المقترحة والتحقق من كفاءتها التشغيلية في الظروف الحقيقية. وقد تم اعتماد منهجية تطوير تدريجية، حيث استُخدم المتحكم الدقيق Arduino Uno في المرحلة الأولية بوصفه منصة اختبار، وذلك للتحقق من سلامة تصميم الدوائر الإلكترونية، واختبار خوارزمية التتبع، ومعايرة الحساسات والمحركات، والتأكد من الأداء العام للمنظومة قبل الانتقال إلى مرحلة التنفيذ النهائي.

وبعد نجاح الاختبارات الأولية، تم استبدال Arduino Uno بالمتحكم الدقيق ESP32 ليكون المنصة الأساسية للنظام المنجز، نظرًا لما يتميز به من قدرة معالجة أعلى، وسعة ذاكرة أكبر، وانخفاض في استهلاك الطاقة، إضافة إلى دعمه المدمج لتقنيتي Wi-Fi و Bluetooth، مما يجعله أكثر ملاءمة لتطبيقات إنترنت الأشياء (IoT) وأنظمة المراقبة والتحكم عن بعد. [33]

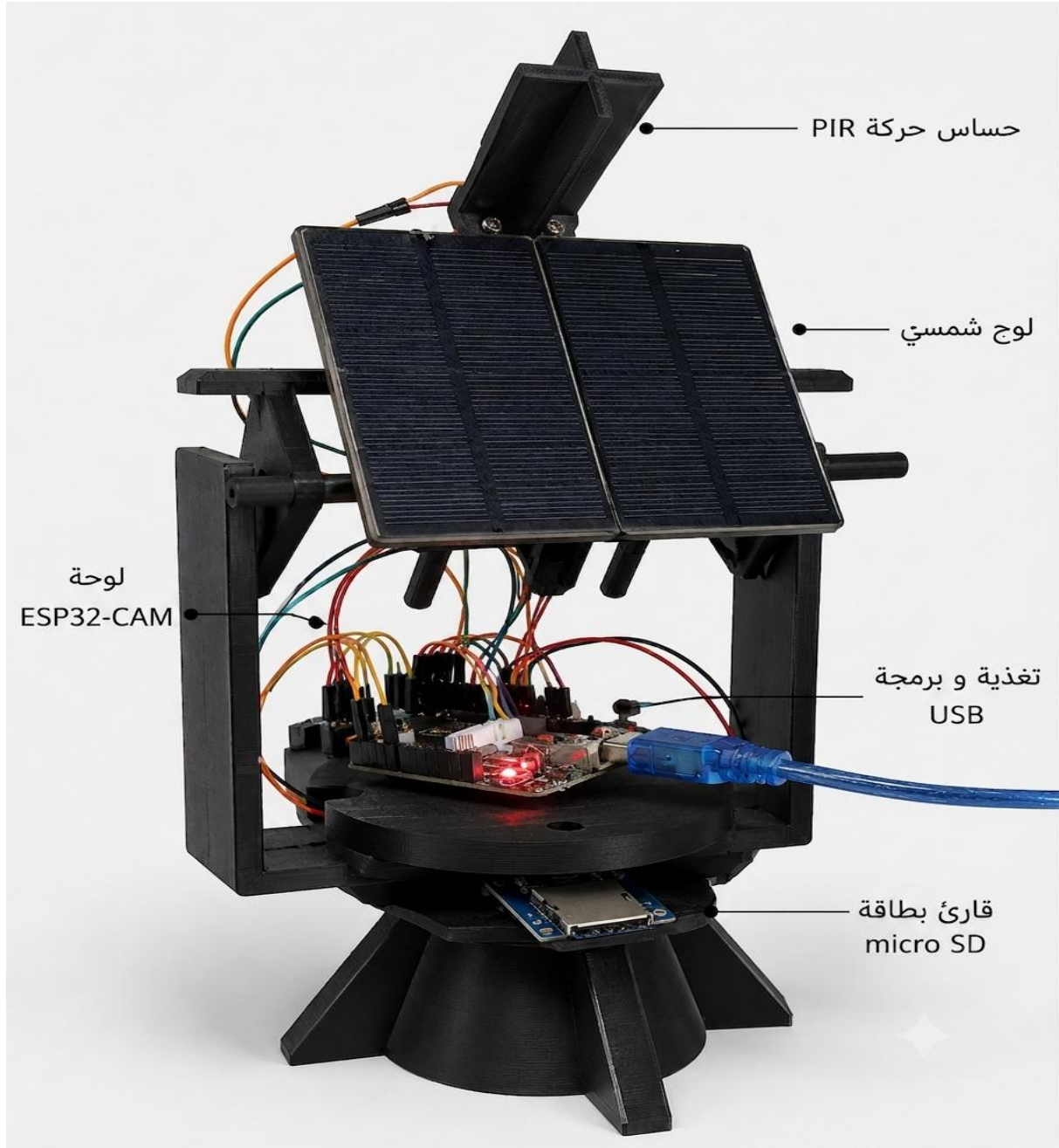
يتولى المتحكم ESP32 استقبال الإشارات القادمة من الحساسات الضوئية، ومعالجتها وفق خوارزمية التحكم المعتمدة، ثم إصدار أوامر القيادة إلى المحركات لتوجيه اللوحين الشمسيين باستمرار نحو الوضعية المثلى المواجهة لأشعة الشمس. كما يشرف على جمع البيانات التشغيلية وإدارة مختلف الوحدات الإلكترونية المدمجة داخل المنظومة.

ولمتابعة الأداء الكهربائي للنظام بصورة آنية، تم دمج وحدة لقياس الجهد والتيار الكهربائي موصولة مباشرة بالمتحكم، حيث تُستخدم لحساب القدرة الكهربائية المنتجة في الزمن الحقيقي، وإرسال بيانات القياس إلى الحاسوب عبر منفذ الاتصال التسلسلي (Serial Communication) ليتم عرضها باستخدام نافذة Serial Monitor ضمن بيئة التطوير Arduino IDE، مما أتاح تسجيل وتحليل البيانات بدقة أثناء مختلف مراحل الاختبار.

أما بالنسبة للحقل الكهروضوئي المصغر، فقد استُخدم لوحان شمسيان متماثلان بأبعاد  $107 \times 61$  mm لكل منهما، وتم ربطهما على التوالي (Series Connection) للحصول على جهد خرج مناسب لمتطلبات المنظومة التجريبية. كما صُمم الهيكل الميكانيكي بحيث يسمح بحركة اللوحين حول محوري

السمت والارتفاع، بما يحاكي آلية عمل أنظمة التتبع الشمسي ثنائية المحور المستخدمة في التطبيقات العملية.

يوضح الشكل لمظهر العام للمنظومة التجريبية بعد الانتهاء من تطويرها، مبيّنًا مكوناتها الإلكترونية والميكانيكية والتركييب النهائي للنظام من عدة زوايا، استعدادًا لإجراء التجارب العملية وتقييم أداء نظام التتبع الشمسي الذكي.



الشكل 3.IV شكل النهائي لمشروع المتتبع الشمسي

## الخاتمة

أكدت النتائج التجريبية المتحصل عليها خلال هذا الفصل الفعالية العملية والجدوى الطاقوية لنظام التتبع الشمسي ثنائي المحور المطور، حيث أظهرت المقارنة الميدانية بين النظام المقترح والمنظومة الشمسية الثابتة تفوقاً واضحاً لنظام التتبع في مختلف الفترات الزمنية من اليوم. وتؤكد النتائج الأثر الإيجابي للتوجيه المستمر للألواح الشمسية في تعظيم الاستفادة من الإشعاع الشمسي، خاصة خلال الفترات التي تنخفض فيها كفاءة الأنظمة الشمسية الثابتة.

كما أظهرت الدراسة نجاح عملية تطوير المنظومة من نموذج أولي يعتمد على المتحكم الدقيق Arduino Uno في مرحلة الاختبارات الأولية وإثبات صحة المفهوم، إلى منظومة ذكية متكاملة تعتمد على المتحكم ESP32-S3 بوصفه منصة التحكم النهائية، مستفيدةً من قدراته الحاسوبية العالية، وذاكرته الأكبر، ودعمه المدمج لتقنيات الاتصال اللاسلكي. وقد أسهم هذا الانتقال في تحسين سرعة تنفيذ خوارزمية التتبع، وزيادة مرونة النظام، وتوفير إمكانات واسعة للتطوير المستقبلي.

واعتمدت المنظومة النهائية على ثلاثة محاور تقنية متكاملة، تمثلت في منصة معالجة حديثة قائمة على ESP32-S3، ومنظومة تغذية ذاتية مستقلة تعتمد على الألواح الكهروضوئية وبطارية ليثيوم-أيون، بما يضمن استمرارية التشغيل دون الحاجة إلى مصدر طاقة خارجي، ويمنح هذا التكامل الوظيفي النظام مستوى مرتفعاً من الاعتمادية والمرونة، ويؤهله للعمل بكفاءة في المناطق النائية والتطبيقات التي يصعب فيها توفير البنية التحتية الكهربائية أو الشبكات السلكية.

وانطلاقاً من النتائج المحققة، تبرز عدة آفاق واعدة لتطوير هذا العمل، من خلال دمج تقنيات إنترنت الأشياء (IoT)، وتطبيق خوارزميات تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT)، والاستفادة من تقنيات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالإشعاع الشمسي وتحسين قرارات التتبع وإدارة الطاقة. ومن شأن هذه التطويرات أن تسهم في الارتقاء بالمنظومة من نموذج تجريبي إلى نظام ذكي متكامل قابل للتطبيق في محطات الطاقة الشمسية وأنظمة الطاقة المتجددة واسعة النطاق، بما يعزز كفاءة إنتاج الطاقة وموثوقية التشغيل في البيئات المختلفة. [33]

## خاتمة عامة

## خاتمة عامة

تناولت هذه المذكرة دراسة وتصميم وإنجاز نظام تتبع شمسي ذكي ثنائي المحور، انطلاقاً من الإشكالية المتمثلة في انخفاض مردود الأنظمة الكهروضوئية الثابتة نتيجة التغير المستمر في الموقع الظاهري للشمس، وما يترتب عنه من انخفاض كمية الإشعاع الشمسي المستقبلية وتراجع القدرة الكهربائية المنتجة. وقد سعت هذه الدراسة إلى تقديم حل عملي يعتمد على التوجيه الآلي للألواح الشمسية بهدف تعظيم الاستفادة من الطاقة الشمسية وتحسين كفاءة المنظومة الكهروضوئية.

في الجانب النظري، تم التطرق إلى المبادئ الأساسية للطاقة الشمسية، وخصائص الأنظمة الكهروضوئية، والعوامل المؤثرة في أدائها، مع إبراز أهمية أنظمة التتبع الشمسي في رفع كمية الإشعاع الساقط على الألواح وتحسين إنتاجيتها. كما تمت دراسة مختلف أنواع أنظمة التتبع واستراتيجيات التحكم المستخدمة فيها، سواء المعتمدة على الحساسات الضوئية أو القائمة على الحسابات الفلكية، مع تحليل مزايا كل منها وحدود استخدامها.

أما في الجانب التطبيقي، فقد تم اعتماد منهجية تطوير تدريجية، حيث أنجز نموذج أولي باستخدام المتحكم الدقيق Arduino Uno للتحقق من سلامة الدوائر الإلكترونية واختبار خوارزمية التحكم ومعايرة الحساسات والمحركات، قبل الانتقال إلى النسخة النهائية المعتمدة على المتحكم ESP32-S3، الذي وفر قدرة معالجة أعلى، واستهلاكاً منخفضاً للطاقة، ودعمًا مدمجًا لتقنيات الاتصال اللاسلكي، الأمر الذي أتاح تطوير منظومة أكثر مرونة وقابلية للتوسع.

كما تم تصميم الهيكل الميكانيكي للمنظومة وإنجازه باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، إلى جانب تطوير الدوائر الإلكترونية وبرمجة خوارزمية التتبع للنشط المعتمدة على حساسات LDR، مع دمج منظومة لقياس الجهد والتيار الكهربائي لحساب القدرة المنتجة بصورة آنية.

وأثبتت النتائج التجريبية نجاح المنظومة المقترحة في تحقيق أهداف الدراسة، حيث أظهرت المقارنة مع النظام الشمسي الثابت تحسناً ملحوظاً في القدرة الكهربائية المنتجة خلال مختلف فترات اليوم، مما يؤكد فعالية نظام التتبع ثنائي المحور في زيادة كمية الإشعاع الشمسي المستقبلية وتحسين مردود المنظومة الكهروضوئية، خاصة خلال ساعات الصباح والمساء التي تشهد عادةً انخفاضاً كبيراً في إنتاجية الأنظمة الثابتة.

وتبرز أهمية هذا العمل في كونه يجمع بين التصميم الميكانيكي، والإلكترونيات، والأنظمة المدمجة، وتقنيات التحكم، والاتصالات اللاسلكية، ضمن منظومة واحدة منخفضة التكلفة وقابلة للتطوير، وهو ما

يجعلها مناسبة للتطبيق في المناطق النائية والمنشآت التي تعتمد على الطاقة الشمسية كمصدر رئيس للطاقة.

ورغم النتائج المشجعة التي تم التوصل إليها، فإن هذا العمل يمثل خطوة أولى يمكن البناء عليها لتطوير منظومات أكثر ذكاءً وكفاءة. ومن أبرز الآفاق المستقبلية المقترحة:

- \*دمج خوارزميات تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT) لرفع كفاءة استخلاص الطاقة الكهربائية.
- تطوير نظام تتبع هجين يجمع بين الحساسات الضوئية والحسابات الفلكية لضمان استمرارية التتبع في مختلف الظروف الجوية.
- \*توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالإشعاع الشمسي وتحسين قرارات التوجيه وإدارة الطاقة.
- \*دمج تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) ومنصات الحوسبة السحابية لمراقبة المنظومة والتحكم فيها عن بعد في الزمن الحقيقي [33].
- دراسة إمكانية استخدام محركات أكثر كفاءة وذات استهلاك منخفض للطاقة، مع تحسين التصميم الميكانيكي لزيادة الدقة وتقليل استهلاك الطاقة أثناء عملية التتبع.
- تقييم أداء النظام على مدار الفصول الأربعة وفي ظروف مناخية مختلفة، تمهيداً لتطبيقه في محطات الطاقة الشمسية متوسطة وكبيرة القدرة.

وفي الختام، يمكن القول إن المنظومة المقترحة أثبتت قدرتها على تحسين كفاءة استغلال الطاقة الشمسية من خلال التوجيه الذكي للألواح الكهروضوئية، كما بينت النتائج أن توظيف المتحكمات الدقيقة الحديثة، وفي مقدمتها ESP32-S3 ، يفتح آفاقاً واسعة لتطوير أنظمة تتبع شمسية أكثر ذكاءً واعتمادية، بما يواكب التوجه العالمي نحو التحول الطاقوي واستغلال مصادر الطاقة المتجددة بصورة أكثر كفاءة واستدامة.

هذه الخاتمة مكتوبة وفق الأسلوب المتبع في رسائل الماجستير، وتنسجم مع المقدمة والفصول التي أعدتها، كما تُبرز مساهمتك العلمية وتترك للقارئ رؤية واضحة حول القيمة التطبيقية للمشروع وآفاق تطويره المستقبلية.

## المصادر والمراجع

### أولاً. المراجع العربية

[1]	زواوية، أ. (2013). دور اقتصاديات الطاقات المتجددة في تحقيق التنمية الاقتصادية المستدامة في الدول المغاربية: دراسة مقارنة بين الجزائر والمغرب وتونس (رسالة ماجستير، جامعة فرحات عباس، سطيف، الجزائر).
[4]	الجبوري، ع. خ. أ.، & الجبوري، أ. ح. أ. (2010). مبادئ الطاقات المتجددة.
[5]	تريكي، ع. (2014) مكانة الطاقة المتجددة ودورها في تحقيق التنمية المستدامة: حالة الجزائر (مذكرة ماجستير، جامعة الجزائر 3، الجزائر).
[27]	ق ا ر مي، س (2017) برمجة الاردوينو
[29]	بليد، و. كتاب العناصر الإلكترونية: البنية، الفحص، التركيب. ق ا ر مي، س. (2017) برمجة الأردوينو

### ثانياً. المراجع الأجنبية

[2]	Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., et al. (2012). Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press
[3]	International Energy Agency. (2024). World energy outlook 2024. International Energy Agency.
[6]	Boyle, G. (2012). Renewable energy: Power for a sustainable future (3rd ed.). Oxford University Press.
[7]	Hansen, J.-P., Percebois, J., & Janssens, A. (2019). Énergie, économie et politiques (3e éd.). De Boeck Supérieur.
[8]	International Energy Agency. (2025). Renewables 2025: Renewable electricity. International Energy Agency.

[9]	Tietenberg, T., & Lewis, L. (2016). Économie de l'environnement et développement durable (6e éd.). Nouveaux Horizons.
[10]	Foster, R., Ghassemi, M., & Cota, A. (2010). Solar energy: Renewable energy and the environment. CRC Press.
[11]	Boxwell, M. (2013). Solar electricity handbook: A simple, practical guide to solar energy. Greenstream Publishing.
[12]	Bernard, J. (2004). Énergie solaire : Calcul et optimisation (1re éd.). Paris, France : Ellipses.
[13]	Bensalem, S. E. (2011). Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires (Mémoire de magister). Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.
[14]	Labouret, A., & Viloz, M. (2019). Installations photovoltaïques : Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau (5e éd.). Paris, France : Dunod.
[15]	World Bank Group & Solargis. (n.d.). Global Solar Atlas. Consulté le 23 avril 2026, à l'adresse <a href="https://globalsolaratlas.info">https://globalsolaratlas.info</a>
[16]	The Solarest. (n.d.). Site spécialisé dans l'énergie solaire et les énergies renouvelables. Consulté le 23 avril 2026, à l'adresse <a href="https://thesolarest.com/">https://thesolarest.com/</a>
[17]	Oussidhoum, S. (2015). Étude comparative des performances des cellules solaires à jonction simple et multiple (Mémoire de magister). Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie.
[18]	Abderrezek, M. (2015). Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement (Thèse de doctorat). Université Sétif 1, Algérie.
[19]	Ricaud, A. (1997). Photopiles solaires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Collection « Cahiers de Chimie ».
[20]	Benmohammadi, Z. (2013). Étude, conception et réalisation d'une commande d'un suiveur solaire (Mémoire de master). Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc.
[21]	Boukhelifa, H. (2017). Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque de 300 kW (Mémoire de master en génie électrique). Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, Algérie.

[22]	Yotto, H. C. S. (2011). Étude et conception d'une mini centrale photovoltaïque (Mémoire de master 2). Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Bénin.
[23]	Brahami, M. (2021). Réalisation et automatisation d'un tracker solaire en vue d'une production optimale de l'énergie photovoltaïque.
[24]	Tourtchine, V. (2009). Microcontrôleur de la famille PIC. Université de Boumerdès.
[25]	Espressif Systems. (n.d.). ESP32 Series Datasheet. Consulté le 21 avril 2026, à l'adresse <a href="https://www.espressif.com/">https://www.espressif.com/</a>
[26]	STMicroelectronics. (n.d.). STM32 32-bit Arm Cortex MCUs datasheet and reference manual. Consulté le 21 avril 2026, à l'adresse <a href="https://www.st.com/">https://www.st.com/</a>
[28]	Espressif Systems. (n.d.). ESP32-S3-DevKitC-1 datasheet. Consulté le 21 avril 2026, à l'adresse <a href="https://www.espressif.com/">https://www.espressif.com/</a>
[30]	Kahraba4u. (n.d.). Consulté le 4 mai 2026, à l'adresse <a href="https://kahraba4u.com/">https://kahraba4u.com/</a>
[31]	Guérin, D. (n.d.). Cours conversion électromécanique : Machine à courant continu (Chapitre 13). Consulté le 4 mai 2026, à l'adresse <a href="http://www.elec.jbd.free.fr">http://www.elec.jbd.free.fr</a>
[32]	Science Sky. (n.d.). Science Sky. Consulté le 4 mai 2026, à l'adresse <a href="https://sciencsky.net/">https://sciencsky.net/</a>
[33]	Maier, A., Sharp, A., & Vagapov, Y. (2017). Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. <i>2017 Internet Technologies and Applications (ITA)</i> , 143-148. IEEE. <a href="https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926">https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926</a>
[34]	Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 15(3), 1513-1524.
[35]	Allegro MicroSystems. (2021). ACS712 Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC. Datasheet.