مشروع تخرج أُعِدَّ لنيل درجة الإجازة في الهندسة الكهربائية

تصميم وتحليل أداء منظومة طاقة شمسية مرتبطة بالشبكة

الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة حلب
كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية
قسم نظم القدرة الكهربائية

1448 هـ
2026 م

إعداد الطالب:
محمد علي قطان
الرقم الجامعي: 207047

إشراف:
د. كريمة سكر

أهمية المشروع وأهدافه

أهمية المشروع

- **معالجة التناقض الفني:** حل الإشكالية التقنية بين متطلبات موثوقية التغذية العالية للمنشآت المصرفية وبين «المحدودية المكانية» والقيود الإنشائية للأسطح الحضرية.
- **الابتكار الإنشائي:** تبني منهجية «التثبيت المتدرج» (Terraced Mounting) لرفع عامل استغلال المساحة (LUF) وتحييد فواقد التظليل المتبادل.
- **الاستدامة الاقتصادية:** خفض تكلفة الوحدة الطاقية (LCOE) وتحقيق الاستقلال الطاقي المستدام والآمن للمنشأة المصرفية.
- **مرجع تصميمي:** تقديم دليل هندسي تطبيقي ونموذجي لتصميم المنظومات المرتبطة بالشبكة في البيئات المعقدة والمقيدة مساحياً.

أهداف المشروع

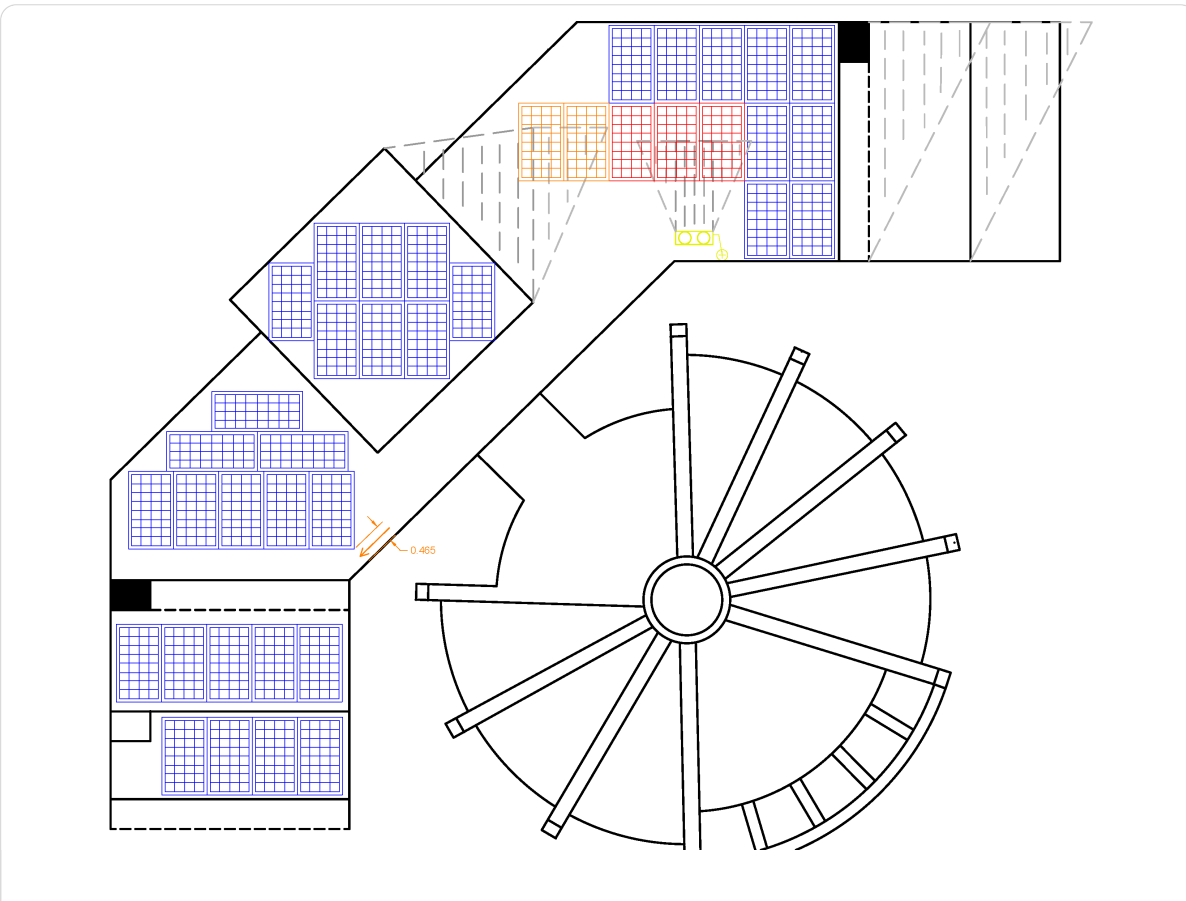
- **التصميم والاستمثال:** بناء وتصميم منظومة كهرضوئية مرتبطة بالشبكة بقدرة **23.4 kWp** لتغطية كامل الاحتياجات الطاقية الحرجة للبنك.
- **تعظيم كثافة القدرة:** الوصول إلى كثافة استطاعة مساحية قياسية بلغت **119.59 W/m²** كفاءةً، رغم وجود عوائق إنشائية وظلال حرجة بالموقع.
- **المواءمة الرقمية:** بناء «توأم رقمي» (Digital Twin) متكامل عبر برنامج **PVsyst** للتنبؤ الدقيق بمؤشرات الجدارة الطاقية (PR & Specific Yield) قبل البدء بالتنفيذ الفعلي.

مشكلة البحث (Research Problem)

التحدي الجوهري: معالجة التناقض البنيوي بين المتطلبات العالية لموثوقية التغذية الكهربائية للمنشآت المصرفية الحيوية، وبين «المحدودية المكانية» والقيود الإنشائية المعقدة لسطح المنشأة.

الأبعاد التقنية للمشكلة

1. **القيد المساحي:** خسارة **40%-50%** من القدرة المركبة عند اتباع أنماط التباعد التقليدية لتجنب التظليل المتبادل.
2. **العوائق المعمارية الحرجة:** تأثير «غرفة الدرج» و«وحدات التكييف» في نشوء فواقد **عدم التطابق (Mismatch)** وخطر **البقع الساخنة (Hotspots)**.
3. **فجوة اليقين الرقمي:** قصور الحسابات اليدوية الساكنة عن التنبؤ الدقيق بمؤشرات الجدارة الطاقية (**PR**) تحت وطأة الظلال المتغيرة.



الشكل 1 تمثيل الظلال لوحدة التكييف وغرفة الدرج على المخطط المعماري للبنك في AutoCAD

منهجية العمل (Work Methodology)

تبنى البحث منهجية تحليلية وتطبيقية رصينة تتألف من خمس مراحل متسلسلة ومتكاملة هندسياً:

أولاً: التوصيف المعرفي والهندسة المكانية

1. بناء الإطار المعرفي:
توصيف تكنولوجيا الألواح المتقدمة المتطورة (N-Type HPBC) وتحليل طوبولوجيا العواكس متعددة المتعقبات (Multi-MPPT).

2. التقييم الجيومناخي:
استخلاص المورد الإشعاعي الدقيق الخاص بموقع الدراسة وحساب ساعات الذروة الشمسية (PSH) لضمان دقة المدخلات.

3. الهندسة المكانية والظلال:
اعتماد حل «التثبيت المتدرج» (Terraced Mounting) المبتكر وإجراء تحليل مثلثي صارم للظلال الموضعية والجانبية للأسطح.

ثانياً: المواءمة الكهربائية والتوأم الرقمي

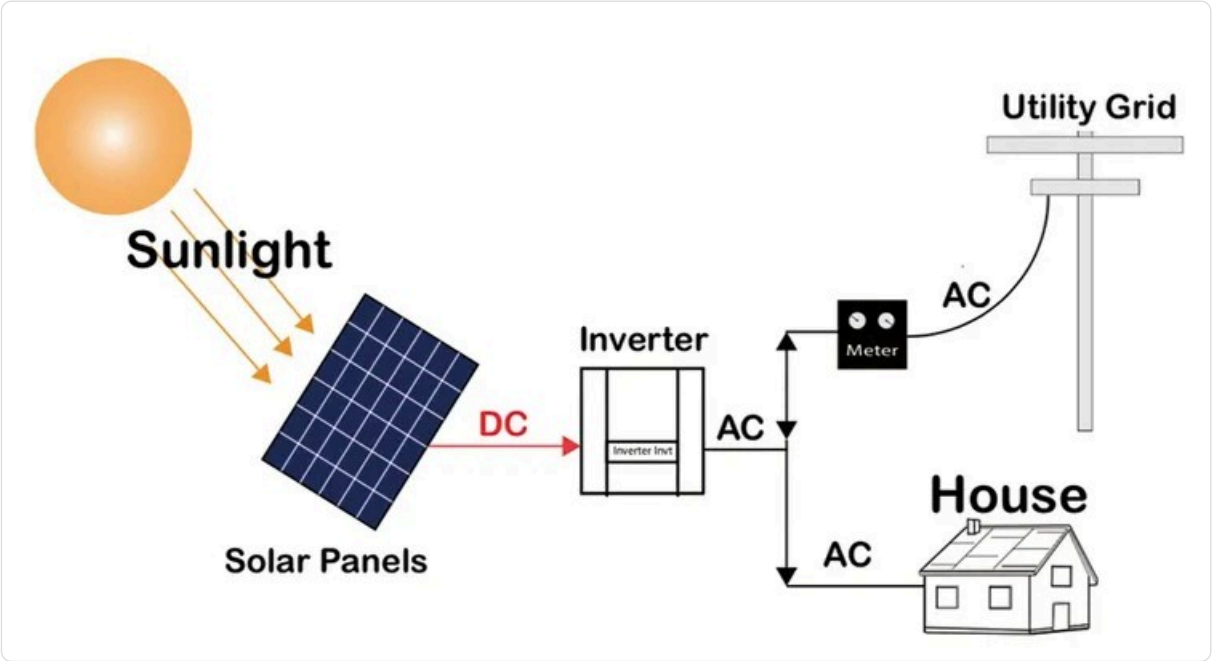
4. المواءمة الكهربائية والحماية:
دراسة حالات الجهد والتيار الحرجة تحت وطأة التغيرات الحرارية، وتصميم شبكة **الموصلات** ونظم تفريغ الأخطاء والحماية وفق مبدأ **«الانتقائية الصارمة»**.

5. بناء التوأم الرقمي (Digital Twin):
النمذجة الديناميكية والمحاكاة الشاملة عبر برنامج **PVsyst** للتنبؤ بمؤشرات الجدارة الطاقية وعامل الإنتاجية السنوي للمنظومة (PR & Specific Yield).

التصنيف الفني للمنظومة (On-Grid System)

الفلسفة التشغيلية ومسارات التغذية

- **التكامل مع الشبكة:** اعتماد الشبكة كبيئة تبادلية مرجعية (Virtual Storage) لاستقبال فائض القدرة نهاراً وتغطية العجز ليلاً، مما يلغي الحاجة للتخزين الكيميائي.
- **الديناميكية اللحظية:** مواءمة مستمرة بين المورد الإشعاعي واستهلاك الأحمال الذاتية، مع حقن الفائض تلقائياً في الشبكة.



الشكل 2 مخطط تدفق هندسي يوضح المكونات التشغيلية لمنظومة كهرضوئية متصلة بالشبكة بالتوازي مع أحمال المبنى وتحديد نقاط الفصل الكهربائي

المكونات البنيوية الأساسية للمنظومة

- **المصفوفة الكهروضوئية (PV Array):** المصدر الأساسي لتوليد التيار المستمر (DC) من الطاقة الشمسية.
- **العاكس المتفاعل (Grid-interactive Inverter):** المسؤول عن تحويل القدرة ومزامنة الجهد والتردد وزاوية الطور مع الشبكة، والمدمج به خوارزميات MPPT.
- **نظام القياس التبادلي (Net Metering):** عداد ذكي لمعايرة تدفق الطاقة ثنائي الاتجاه واحتساب المحصلة الطاقية للبنك.
- **بروتوكول الأمان :** ميزة «منع التجزير» لضمان الفصل الفوري للمنظومة عند انقطاع تيار الشبكة العامة لحماية أطقم الصيانة.

التقييم الجيوماخي للموقع

المورد الإشعاعي والمحددات الجغرافية

- **توصيف الموقع:** مدينة حلب (خط عرض **37° شمالاً**، وارتفاع **377 م** عن سطح البحر).
- **منصة البيانات:** الاعتماد على المنصة العالمية المعتمدة Global Solar Atlas لاستخلاص السلاسل الزمنية الإشعاعية والحرارية لموقع الدراسة.

تحليل مؤشرات الإشعاع والطاقة

- **الإشعاع الأفقي الكلي (GHI):** بلغ **1930.4 kWh/m²** سنوياً.
- **الإشعاع المائل الكلي (GTI):** بلغ **2184.8 kWh/m²** سنوياً عند زاوية الميل المثلى (**31°**).
- **الجدارة الطاقية للموقع:** أدى التوجيه الصحيح والميل الأمثل إلى زيادة في الطاقة المستلمة بنسبة **13%** مقارنة بالسطح الأفقي.
- **ساعات الذروة الشمسية (PSH):** متوسط سنوي مرجعي قدره **5.98 ساعة/يوم**.

Map data — Per year

Specific photovoltaic power output	PVOUT specific	1730.0	kWh/kWp
Direct normal irradiation	DNI	2198.6	kWh/m²
Global horizontal irradiation	GHI	1930.4	kWh/m²
Diffuse horizontal irradiation	DIF	573.5	kWh/m²
Global tilted irradiation at optimum angle	GTI opta	2184.8	kWh/m²
Optimum tilt of PV modules	OPTA	31 / 180	°
Air temperature	TEMP	18.3	°C
Terrain elevation	ELE	377	m

الشكل 3 لقطة شاشة لبيانات ومعطيات المورد الشمسي والمؤشرات الجغرافية والمناخية لموقع الدراسة في مدينة حلب عبر منصة Global Solar Atlas

اختيار المكون الأساسي (PV Module)

المواصفات المرجعية للّوح الكهروضوئي

- **الطراز المعتمد:** لوح LONGi Hi-MO 6 Scientist (طراز LR5-72HTH-600M) بقدرة اسمية بلغت **600 Wp**.
- **التكنولوجيا:** خلايا HPBC (Hybrid Passivated Back Contact) المتقدمة.

مبررات الاختيار (Selection Justifications)

- **تعظيم كثافة الاستطاعة (Power Density):** كفاءة تحويل رائدة تصل إلى 23.2%، وهي ضرورية جداً لتجاوز المحدودية المكانية لسطح البنك وتحقيق أقصى توليد من المتر المربع الواحد.
- **الأداء في المناخات الحارة:** معامل حراري منخفض جداً للاستطاعة ($-0.290\%/°C$)، مما يضمن استقرار الإنتاجية في بيئة حلب الحرارية المتطرفة صيفاً وكبح فواقد الارتفاع الحراري.
- **تكنولوجيا الامتصاص الخلفي:** تساهم تقنية HPBC في تحسين الامتصاص الضوئي وتقليل فواقد التظليل الأمامي للموصلات، مع منح اللوح مظهراً معمارياً متناسقاً وثابتاً.
- **الموثوقية الطويلة الأمد:** ضمان أداء خطي لمدة **25 عاماً** مع معدل تدهور سنوي ضئيل (0.40%)، مما يعزز الاستدامة والجدوى الاقتصادية طويلة الأجل للمشروع.

المعامل الفني والكهربائي (Parameter)	القيمة الفنية (Value)
الاستطاعة الاسمية القصوى (P_{max})	$600\ W$
جهد الدارة المفتوحة (V_{oc})	$52.81\ V$
جهد نقطة القدرة القصوى (V_{mp})	$44.66\ V$
تيار نقطة القدرة القصوى (I_{mp})	$13.44\ A$
كفاءة اللوح الكلية (Module Efficiency)	23.2%
درجة حماية علبة التوصيل (Junction Box)	IP68
الأبعاد الفيزيائية للموديول (Dimensions)	$2218 \times 1134 \times 30\ mm$

الشكل 1 المواصفات الفنية والكهربائية التفصيلية للوح الشمسي LONGi Hi-MO 6 عند شروط الاختبار القياسية (STC)

توزيع الألواح الشمسية

تحييد العقبة المساحية

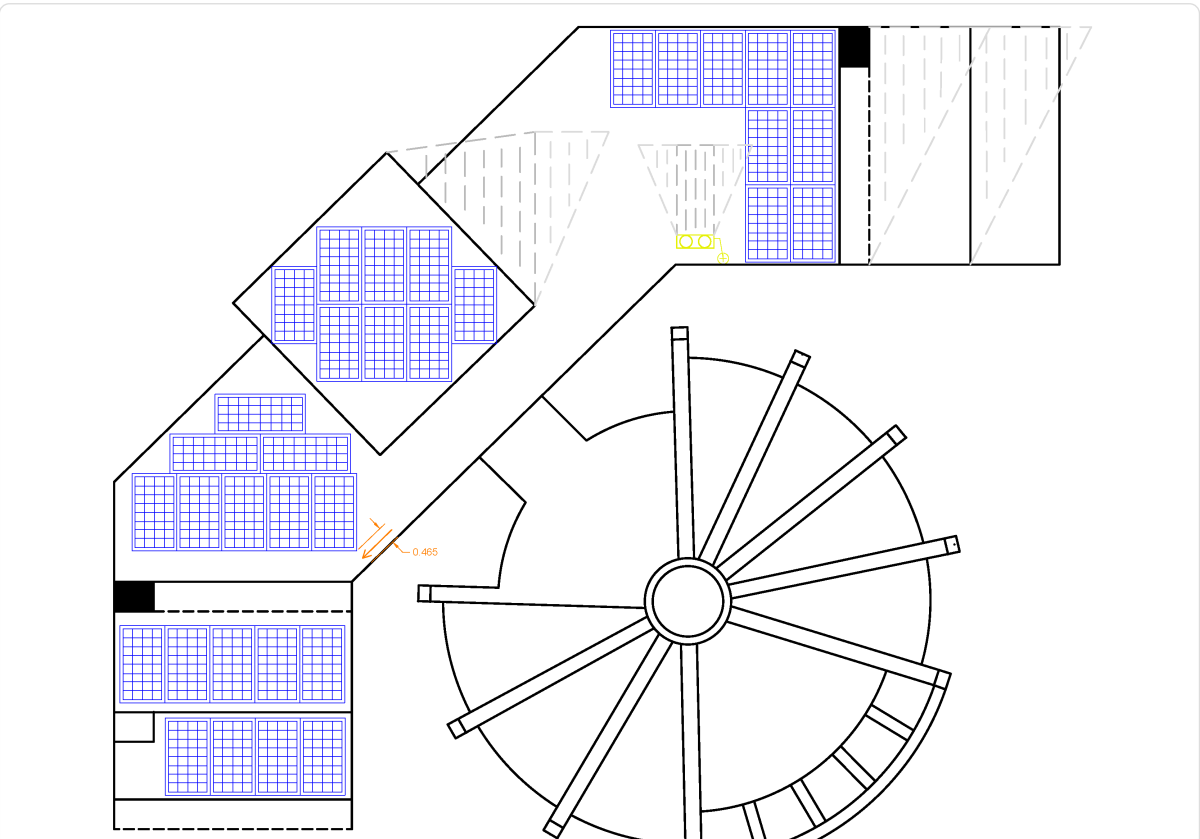
نهج التثبيت المتدرج: الانتقال من نمط التثبيت التقليدي بمسافات بينية واسعة (التي تهدر **40-50%** من المساحة) إلى نمط **«درجات السلم» (Staircase)** لتقليص المسافة البينية (D) إلى **الصفر**.

النتيجة :

- الوصول بالكثافة الطاقية إلى $119.59W/m^2$ عبر السماح بتلاقي الحواف العلوية والسفلية للصفوف المتتالية.
- يضمن التصميم الإنشائي عدم إلقاء الصف الأمامي أي ظلال على الصف الذي يليه.
- تحسين **التحميل الحراري الطبيعي (Natural Convection)** لتبريد الخلايا.

المحددات الفنية والتنفيذية للمصفوفة

1. ضبط زاوية السمت عند الصفر ($\text{Azimuth} = 0°$) والمال المتساوي عند **31°** لضمان استمرارية الكتلة الميكانيكية حيال الزوايا الجانبية للشمس.
2. تأمين ممرات صيانة فنية بعرض **40 cm** واستبدال الحواف الإسمنتية بهياكل حديدية رقيقة لرفع كفاءة الاستغلال الفراغي.

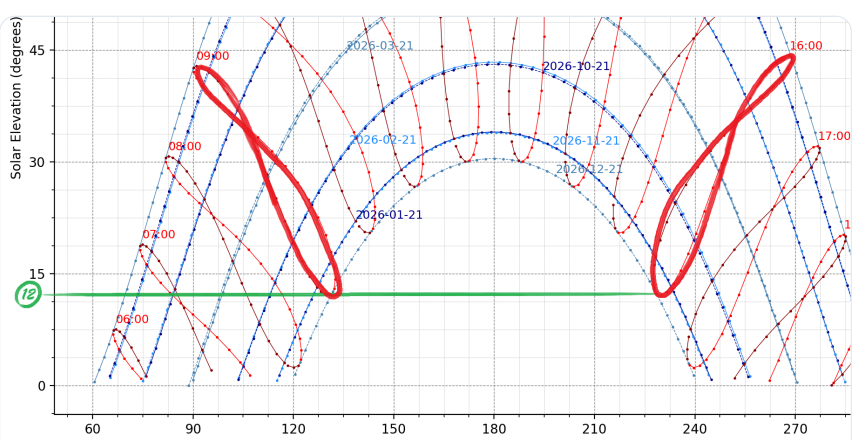


الشكل 4 مخطط توجيه وتوزيع مصفوفات الألواح الشمسية على السطح باتجاه الجنوب تماماً وفق محاكاة التوزيع والتثبيت المتدرج

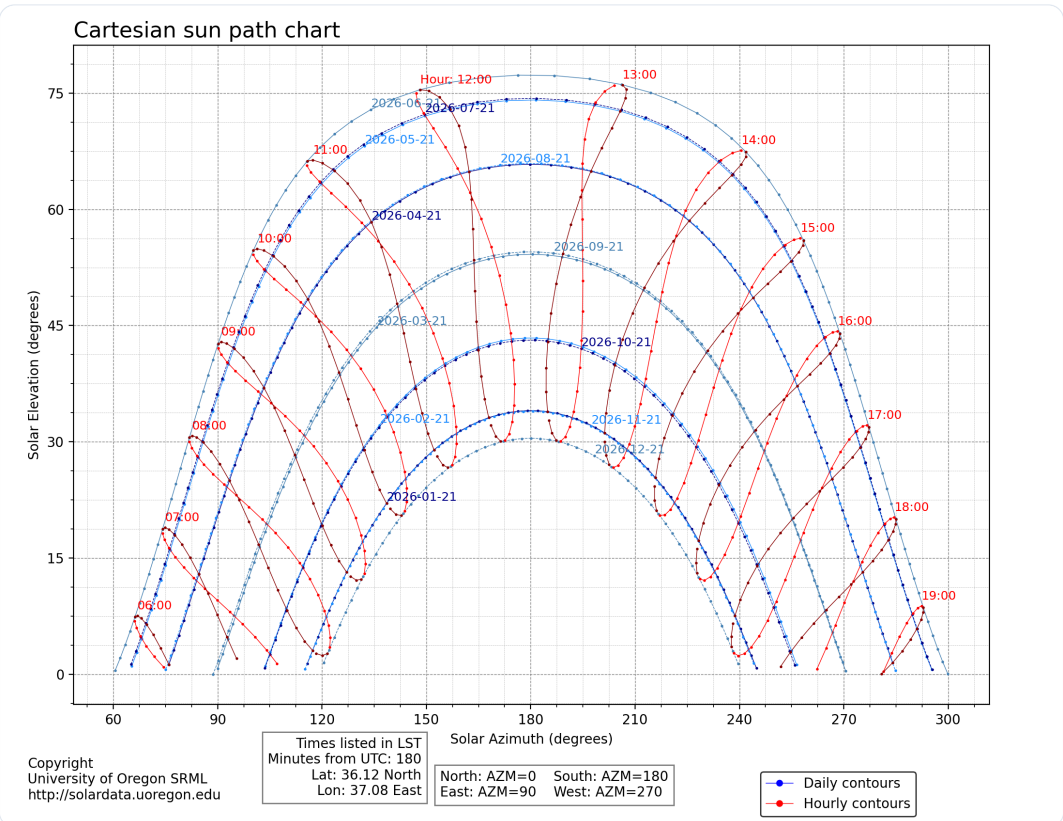
تحليل الظلال الهندسية

فلسفة الحساب والتحقق والأثر الهندسي

- **يوم التصميم (Design Day):** اعتماد يوم «الانقلاب الشتوي» (21 كانون الأول) كمرجعية حسابية لكونه يمثل أطول مسقط ظل خلال العام.
- **النافذة الزمنية:** ضمان انعدام التظليل المتبادل خلال ساعات الذروة الإشعاعية الفعالة (9:00 AM - 3:00 PM).
- **الأثر الهندسي:** أدى تطبيق معامل التصحيح إلى تحييد «العقوبة المساحية» (Spatial Penalty) ومنع التباعد غير المبرر بين الصفوف، مما رفع كثافة الألواح المركبة.



الشكل 5 رسم يوضح الاسقاط عند الساعة 9:00 صباحة على محور زاوية الظل (θ)



الشكل 6 رسم يوضح زاوية السمت وزاوية السمت المصححة هندسياً

تحليل الظلال الهندسية

النمذجة الرياضية للمسافات البينية

- **الارتفاع الشاقولي الحرِج (H):** يُحسب بدلالة طول اللوح (L) وزاوية الميل (β):

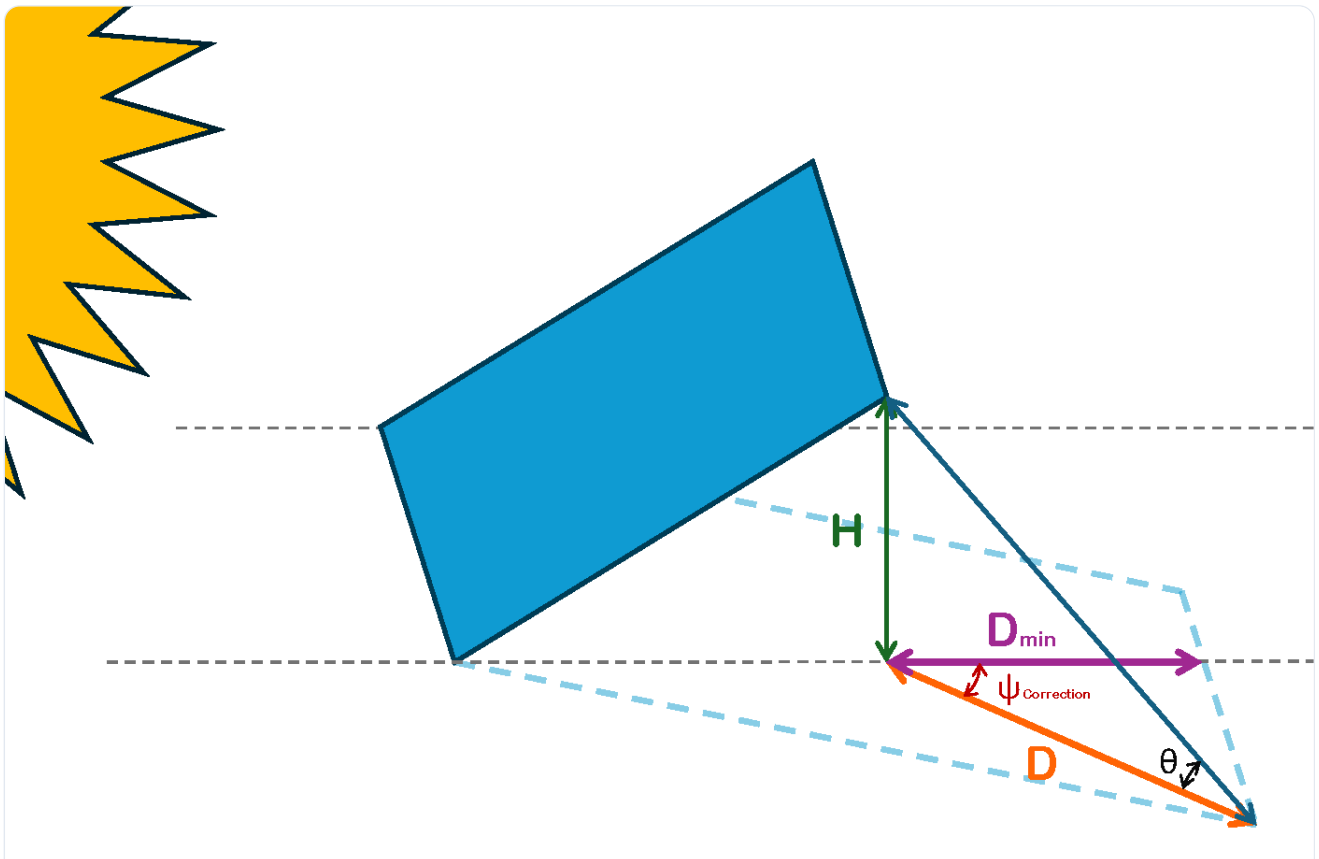
$$H = L \times \sin(\beta)$$

- **المسافة البينية النظرية (D):** تُشتق من زاوية ارتفاع الشمس (θ) عند الساعة 9:00 صباحاً:

$$D = \frac{H}{\tan(\theta)}$$

- **معامل تصحيح السمت ($\psi_{\text{Correction}}$):** الحل الابتكاري لتقليص المساحات المهدورة عبر حساب الفارق بين زاوية سمت الشمس وخط الجنوب الجغرافي.
- **المسافة الدنيا المصححة (D_{min}):** القيمة النهائية المعتمدة تنفيذيّاً:

$$D_{\text{min}} = D \times \cos(\psi_{\text{Correction}})$$

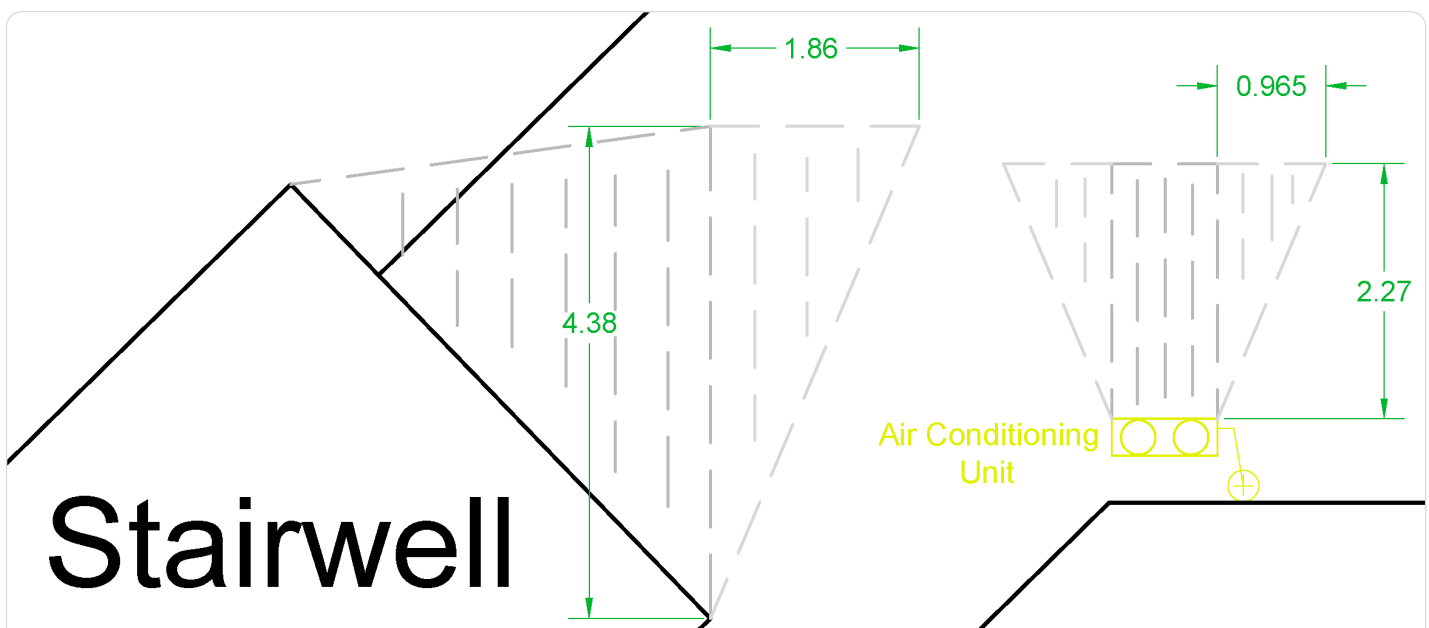


الشكل 7 رسم يوضح زاوية السمت وزاوية السمت المصححة هندسياً

تحليل التظليل الموضعي والجانبي

تجاوز المنهجية التقليدية

- **الانتقال النوعي:** تجاوز الممارسات الهندسية الشائعة التي تقتصر على حساب التظليل البيني الأفقي، نحو دراسة «حرم الظل» المعقد للعوائق الإنشائية الثابتة.
- **تشخيص العوائق:** تحليل الأثر الجيومكاني لغرفة الدرج ووحدات التكييف المركزية نظراً لارتفاعها النسبي الذي يفرض تظليلاً عرضياً حرجاً في ساعات معينة.



الشكل 8 تمثيل الظلال لوحدة التكييف وغرفة الدرج على المخطط المعماري للبنك في AutoCAD

المعايير التقنية للتصميم والربط الكهربائي

- **النمذجة الرياضية (D_{Lat}):** حساب المسافة الجانبية للظل الجانبي (Lateral Shading) بدقة لضمان ابتعاد المصفوفة عن مسقط الظل القطري:

$$D_{\text{Lat}} = D \times \sin(\psi_{\text{Correction}})$$

- **استراتيجية النافذة الزمنية:** تبني نافذة إشعاعية فعالة للعوائق (11:00 AM - 2:00 PM) في يوم التصميم لتجنب «العقوبة المساحية» المفرطة، مع قبول فواقد شتوية طفيفة جداً مقابل تعظيم الإنتاج الصيفي السنوي.
- **العزل الكهربائي:** توظيف نتائج دراسة الظلال في «التوزيع الفعال» عبر عزل السلاسل (Strings) المتأثرة في مداخل مستقلة للعاكس لتجنب فواقد عدم الموائمة (Mismatch Losses).

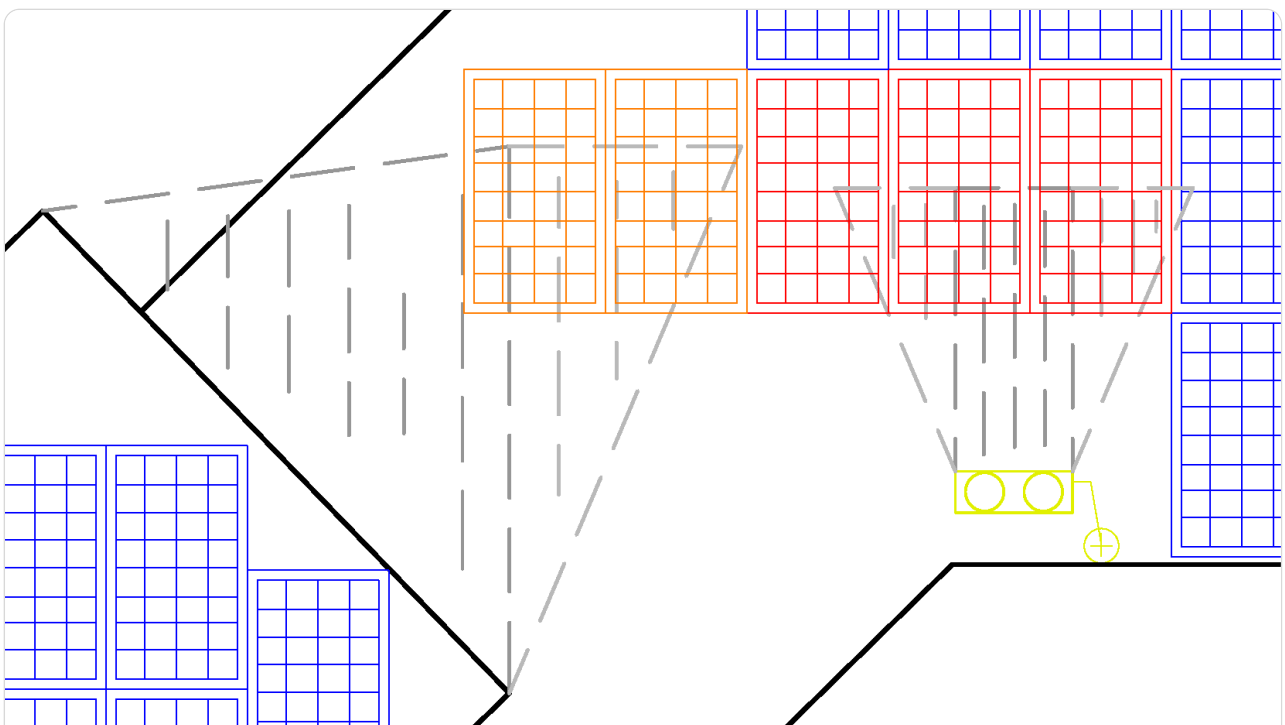
استغلال المساحات المظللة جزئياً

الفلسفة التصميمية للاستمثال المساحي

- تجاوز المنهجية التقليدية غير الاقتصادية التي تستبعد المساحات المظللة جزئياً، والتحول نحو «الاستغلال الهندسي المشروط» لتعظيم القدرة المركبة الإجمالية.
- استغلال السلوك الهندسي المتغير للظل؛ حيث ينخفض ارتفاع مسقط الظل شاقولياً كلما ابتعدنا عن العائق الإنشائي المسبب له.

المعايير التقنية والتحقق والمخرجات

- **تحييد أثر التظليل الجزئي (البقعي):** ضمان مرور المسار الفراغي للظل بالكامل تحت مستوى الخلايا الفعالة للألواح، مما يلغي فواقد التظليل اللحظية تماماً ويحمي المصفوفة من ظاهرة البقع الساخنة (Hotspots).
- **المخرجات الرقمية:** أتاحت هذه المناورة الهندسية دمج **5 ألواح إضافية** في المنظومة، مما ساهم في الوصول إلى كثافة الاستطاعة المستهدفة للبنك دون التضحية بالموثوقية التشغيلية.

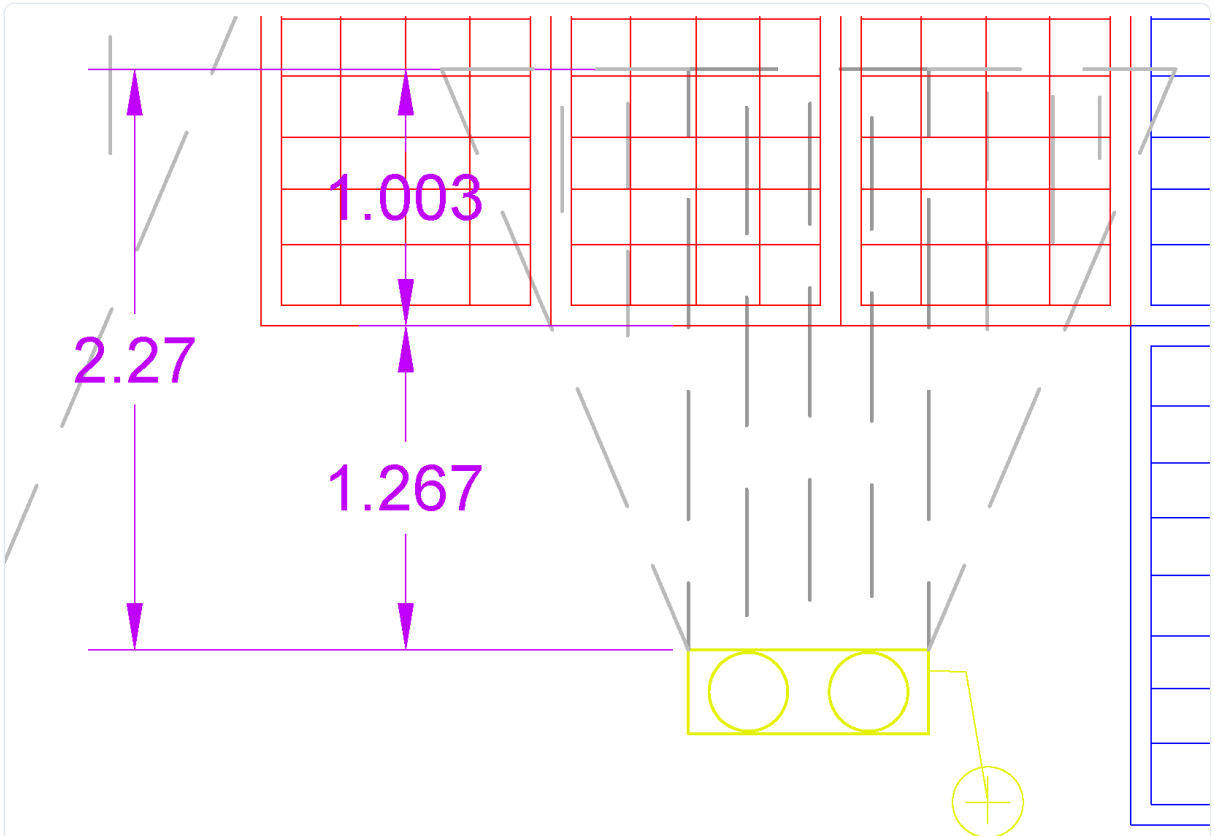


الشكل 9 محاكاة ثلاثية الأبعاد تظهر مساقط وتأثير الظلال الحرجة المتشكلة من غرفة الدرج ووحدة التكييف على الألواح المضافة

التحقق الرياضي للظلال

منهجية إثبات الأمان الطاقي والاستنتاج الفني

- **الهدف:** التحقق الرقمي من أن المسار الفراغي ثلاثي الأبعاد للظل يمر بالكامل تحت مستوى الخلايا الفعالة للألواح الإضافية المستغلة.
- **نقطة التقاطع الحرجة:** تحليل أداء المنظومة في «الحالة الأكثر سوءاً» بتاريخ **21 كانون الأول** (أطول مسقط ظل).
- **الاستنتاج الفني:** تؤكد الحسابات المثلثية تحييد مفاقيد التظليل اللحظية تماماً، مما سمح بزيادة القدرة المركبة دون نشوء فواقد «عدم تطابق» (Mismatch) أو تشكل «بقع ساخنة» (Hotspots).



الشكل 10 مخطط تفصيلي يوضح المسافات والأبعاد الهندسية الفاصلة بين وحدة التكييف ومقدمة الهيكل الحامل لصف الألواح الثاني.

التحقق الرياضي للظلال

النمذجة الرياضية ونتائج الامتثال الهندسي

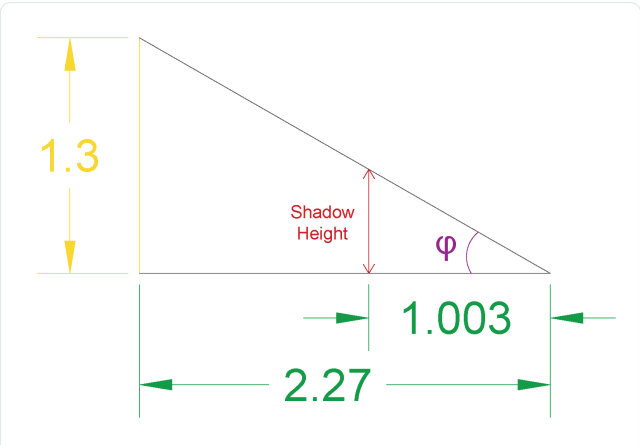
- **زاوية ميل الأشعة الشاقولية (φ):** تُحسب استناداً إلى أبعاد العائق والمسافة البينية الدنيا المعتمدة:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{H_{\text{Obstacle}}}{D_{\min}}\right)$$

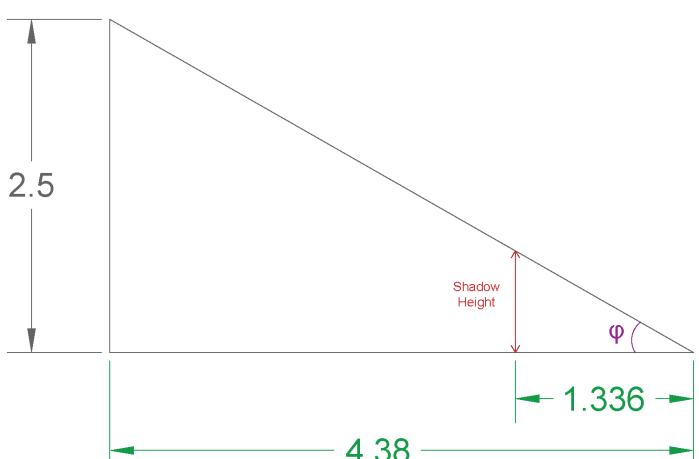
- **ارتفاع الظل عند خط المقابلة:** يُحسب عند نقطة التلاقي الشاقولي مع الهيكل الحامل:

$$\text{Shadow Height} = l \times \tan(\varphi)$$

- **شرط الامتثال والتحقق الرقمي المعتمد:**
  - **وحدة التكييف:** ارتفاع الظل $(0.574\ \text{m})$ < ارتفاع الهيكل $(1.173\ \text{m})$ ← **آمن تماماً.**
  - **غرفة الدرج:** ارتفاع الظل $(0.763\ \text{m})$ < ارتفاع الهيكل $(1.173\ \text{m})$ ← **آمن تماماً.**



الشكل 11 منظور ثلاثي الأبعاد يوضح محاكاة زاوية سقوط الإشعاع الشمسي ومسار الظل المتشكل من وحدة التكييف على الهيكل المتدرج.



الشكل 12 محاكاة فراغية ثلاثية الأبعاد تظهر سلوك ومسقط الظل الحرج لغرفة الدرج مقارنة بالهيكل الحامل للألواح

تقييم كثافة الاستطاعة المساحية

التحجيم الرقمي وحساب كثافة الاستطاعة

- **القدرة المركبة المستهدفة (P_{total}):**

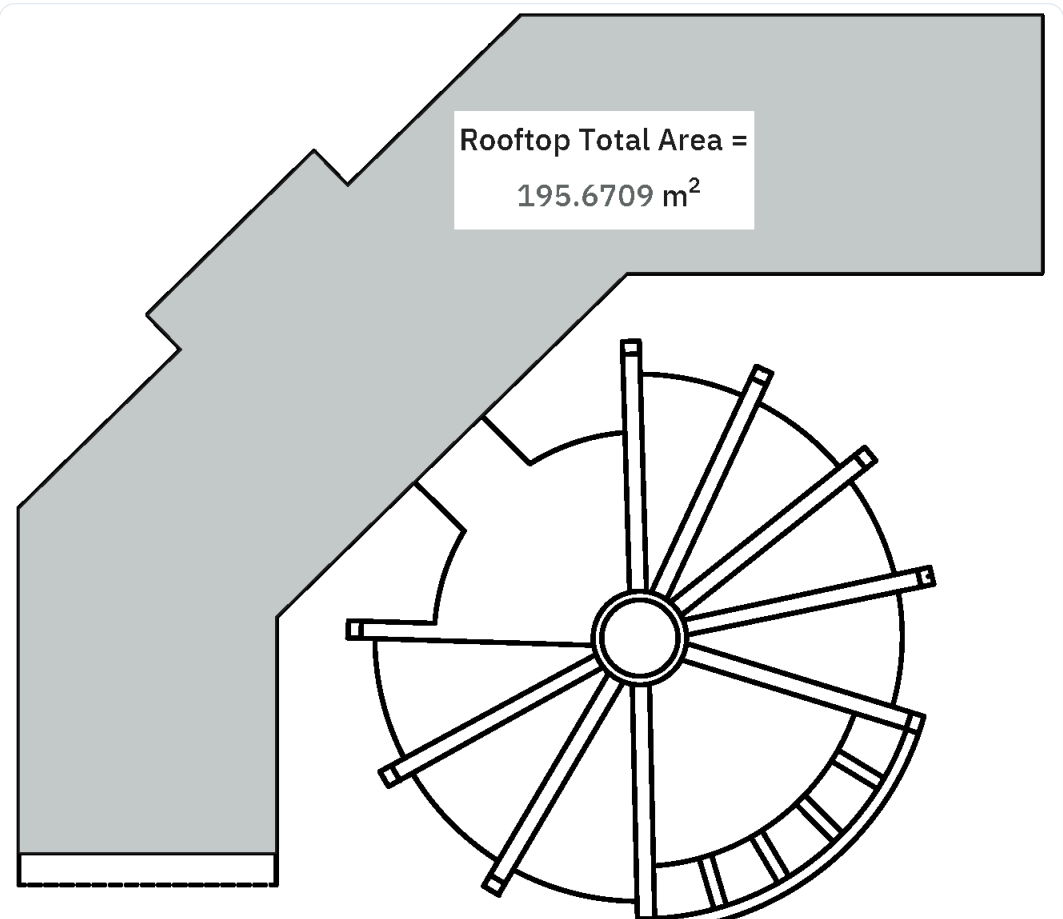
$$P_{\text{total}} = 39 \text{ Panels } \times 600 \text{ W } = 23,400 \text{ W } = 23.4 \text{ kWp}$$

- **إجمالي المساحة التصميمية (Area):** بلغت المساحة الصافية المستغلة فعلياً فوق السطح المصرفي 195.67m^2.
- **كثافة الاستطاعة المساحية:** تُحسب الجدارة المكانية للمنظومة وفق التعويض التالي:

$$\text{Power Density} = \frac{P_{\text{total}}}{\text{Area}} = \frac{23,400 \text{ W}}{195.67\text{m}^2} \approx \mathbf{119.59 W/m^2}$$

خلاصة الجدارة والتفوق التصميمي

- نجاح منهجية «التصميم القائم على المساحة» في استعادة **40% - 50%** من رقعة السطح التي كانت ستُفقد حتماً عند اتباع أنماط التباعد التقليدية.
- سمحت تقنية «التثبيت المتدرج» بدمج **5 ألواح إضافية** في المناطق الحرجة المجاورة للعوائق، مما رفع كثافة التوليد إلى حدها الأقصى دون نشوء أي تظليل متبادل.



الشكل 13 المخطط الهندسي النهائي ثنائي الأبعاد لمصفوفات الألواح الكهروضوئية وتوزيعها على المساحة السطحية الكلية للمبنى المصرفي

المواءمة والتحجيم الكهربائي

توصيف وحدة التحويل ونمذجة نسبة التحميل (DC/AC)

- **الطراز المعتمد:** عاكس ذكي ثلاثي الأطوار من طراز Huawei SUN2000-25KTL-M5.
- **الاستطاعة الاسمية المترددة (P_{AC}):** تبلغ $25\ \text{kW}$.
- **الكفاءة التشغيلية:** كفاءة قصوى 98.4% وكفاءة أوروبية موزونة 98.2%.
- **حساب معامل التصميم ونسبة التحميل (R):** لضمان استقرار العمل ضمن نوافذ الكفاءة المثلى:

$$R = \frac{P_{\text{DC(Nominal)}}}{P_{\text{AC(Nominal)}}} = \frac{23.4\ \text{kWp}}{25\ \text{kW}} = \mathbf{0.936}$$

مبررات الاستمثال الكهربائي والجدارة التشغيلية

- **نطاق التشغيل المثالي:** تضمن النسبة (0.936) تشغيل العاكس في النطاق المحصور بين **40%** و**80%** من حمله الاسمي لأطول فترة زمنية، وهي منطقة ذروة الأداء التشغيلي المحسنة.
- **تحييد كبح القدرة (Clipping):** تفادي ظاهرة «قص التيار» صيفاً عند ذروة الإشعاع، مع السماح بهامش مرن لأي توسعة مستقبلية في المنظومة دون تغيير البنية التحتية.
- **الحماية الذكية والاستباقية:** العاكس مزود بنظام حماية AFCI المتقدمة القائمة على تقنيات الذكاء الاصطناعي للاكتشاف الفوري والآمن للقوس الكهربائي الحراري.

الميزة الفنية	التوصيف والقيمة
الطراز القياسي (Model)	Huawei SUN2000-25KTL-M5
الاستطاعة الاسمية المترددة (Rated AC Power)	$25,000W$
أقصى كفاءة تحويل (Max. Efficiency)	98.4%
الكفاءة الأوروبية الموزونة (Euro. Efficiency)	98.2%
أقصى جهد دخل مستمر (Max. Input Voltage)	$1,100V$
الجهد الاسمي لدخل التيار المستمر (Rated Input Voltage)	$600V$
نطاق جهد تشغيل الـ MPPT	$200V - 1000V$
عدد متتبعات الاستطاعة العظمى (No. of MPPTs)	2
أقصى عدد لمداخل التيار المستمر (Max. Inputs)	4 (مدخلان لكل MPPT)
أقصى تيار دخل لكل MPPT	$30A$ (لمدخلين متوازيين) / $20A$ (لمدخل منفرد)
أقصى تيار قصر للمتتبع (Max. Short-Circuit Current)	$40A$
حماية القوس الكهربائي (Arc Fault Protection)	متوفرة ومدمجة (Yes / AI-Powered)
حماية الارتفاع المفاجئ للجهد (Surge Arrester)	Type II لجهتي AC و DC
نوع التبريد ودرجة الحماية البيئية	تبريد هوائي ذكي (Smart Air Cooling) / IP66

الشكل 2 ملخص الخصائص الفنية والكهربائية للعاكس الكهروضوئي الذكي المعتمد Huawei SUN2000-25KTL-M5

طوبولوجيا السلاسل وضبط نافذة الجهد

الهدف الهندسي والتحجيم الرياضي

- **الهدف:** مواءمة الجهد التشغيلي للمصفوفة مع نقطة الاستقرار المثلى للعاكس (Rated Input Voltage) البالغة $600V$، لتحقيق أعلى كفاءة تحويل داخلية وتجنب فواقد التبديل الكهرومغناطيسي.
- **1. العدد المثالي للألواح في السلسلة (N_{ideal}):** يُحسب بالتمركز حول الجهد الاسمي للعاكس بدلاً من الحدود الدنيا/العليا التقليدية:

$$N_{\text{ideal}} = V_{\text{rated}} \frac{\text{Inverter}}{V_{\text{mp}}} (\text{at STC}) = \frac{600 \text{ V}}{44.66 \text{ V}} \approx 13.43 \rightarrow \textbf{Panels 13}$$

- **2. تحديد عدد السلاسل الكلي (N_{strings}):**

$$N_{\text{strings}} = \frac{N_{\text{modules}}}{N_{\text{series}}} = \frac{39}{13} = \textbf{Strings 3}$$

التحقق من المواءمة التشغيلية واستقرار المنظومة

- **جهد السلسلة المصمّم ($V_{\text{string_STC}}$):**

$$V_{\text{string_STC}} = 13 \times 44.66 \text{ V} = \mathbf{580.58 \text{ V}}$$

يحقق هذا التصميم انحرافاً طفيفاً بنسبة **3% فقط** عن الـ $600V$ المثالية، وهي نقطة ذروة الأداء التشغيلي للعاكس.

- **شرط الأمان الهيكلي والتأرجح الحراري:** الرقم المعتمد (13) يقع بدقة في منتصف النطاق المسموح به كهربائياً لمتتبع الاستطاعة العظمى:

$$6 \leq 13 \leq 19$$

مما يضمن استقراراً تاماً لخوارزمية الـ MPPT ويمنع خروج الجهد عن النافذة التشغيلية تحت أقسى الظروف المناخية صيفاً وشتاءً.

التحليل الحراري الحرج لجهود الألواح

النمذجة الرياضية لتصحيح الجهد الحراري

- **حساب التصحيح الفولتّي:** حساب الاستجابة اللحظية لجهد الألواح عند تغير درجات الحرارة المتطرفة وفق الآتي:

$$V_{\text{new}} = V_{\text{STC}} + \left[V_{\text{STC}} \times \frac{\beta_{V_{\text{oc}}}}{100} \times (T_{\text{actual}} - 25) \right]$$

- **معامل التصحيح:** تبلغ قيمة المعامل الحراري لجهد الدارة المفتوحة لوحدة LONGi المعتمدة:

$$\beta_{V_{\text{oc}}} = -0.290\%/°C$$

الحالة التشغيلية (للوح الواحد)	شتاءً ($0°C$)	صيفاً ($60°C$)
جهد الدارة المفتوحة (V_{oc})	56.64 V	47.45 V
جهد تتبع الاستطاعة (V_{mp})	47.89 V	40.12 V

الاستنتاج الهندسي للمطابقة والأمان

- **الأمان الكهربائي المطلق حرجياً:**
  - **صيفاً ($60°C$):** يظل جهد السلسلة المصمم ($13 \times 40.12\ \text{V} = \mathbf{521.56\ V}$) أعلى بكثير من جهد بدء تشغيل العاكس (200 V) لضمان استيقاظ النظام مبكراً وعدم انقطاعه.
  - **شتاءً ($0°C$):** يظل جهد الدارة المفتوحة الأقصى للسلسلة ($13 \times 56.64\ \text{V} = \mathbf{736.32\ V}$) تحت الحد الأقصى الحرج للعاكس (1100 V)، مما يوفر هامش أمان ممتاز يحمي المكونات.
- **كفاءة تتبع الاستطاعة العظمى:** تؤكد الحسابات وقوع جميع القيم الحرارية التشغيلية بدقة ضمن «نافذة العمل» المثالية لمداخل الـ MPPT للعاكس، مما يضمن استقرار الإنتاجية السنوية للبنك.

استراتيجية التوزيع الفعال (Multi-MPPT Distribution)

الهدف الهندسي وآلية التوزيع الكهربائي

- **الهدف الهندسي:** عزل أثر «العقوبة الطاقية» (Energy Penalty) الناتجة عن التظليل الموضعي الحرِج لغرفة الدرج، ومنع انتقال أثر هبوط الجهد اللحظي إلى السلاسل المستقرة إشعاعياً في بقية أنحاء السطح.
- **آلية التوزيع الكهربائي للمصفوفة (String Mapping):**
  - **المتعقب الأول (MPPT_1):** يضم السلسلتين (1 & 2) بإجمالي **26 لوحاً**؛ تغطي المناطق «الآمنة والمشمسة تماماً» (وسط وغرب السطح المصرفي).
  - **المتعقب الثاني (MPPT_2):** يضم السلسلة الثالثة (3) بمفردها بمجموع **13 لوحاً**؛ وهي السلسلة القريبة من غرفة الدرج والمعرضة للظلال الجانبية اللحظية والديناميكية.

المخرجات التقنية ومؤشرات كفاءة الأداء

- **تحييد فواقد عدم التطابق (Mismatch Losses):** نجحت الاستراتيجية في حصر تراجع القدرة في مدخل واحد فقط (MPPT_2)، مما حمى **66%** من إجمالي المصفوفة الكهرضوئية من الانهيار الطاقي التبعي.
- **الاستمثال الديناميكي اللحظي:** السماح لخوارزمية العاكس بالبحث عن نقطة الاستطاعة العظمى لكل زمرة بشكل مستقل تماماً، مما يضمن أقصى إنتاجية ممكنة لكل جزء من السطح.
- **معامل أداء المنظومة الكلي (Performance Ratio):** ساهم هذا الفصل الكهربائي الذكي في رفع معامل الأداء الإجمالي (PR) للمنظومة إلى قيمة متميزة بلغت:

$$\mathbf{PR} = \mathbf{89.3\%}$$

حسابات الناقل والتحقق الكهربائي (DC Side Sizing)

التحجيم الحراري للموصل (Thermal Ampacity)

- **المواصفة المعتمدة:** كابل طاقة شمسية متخصص من الفئة الحرجية (EN 50618) بمقطع قدره 4mm^2.
- **تيار التصميم الأقصى ($I_{\text{dc_max}}$):** يُحسب بتطبيق معامل أمان قدره 1.25 لتيار القصر لضمان عدم الفصل الحراري اللحظي:

$$I_{\text{dc_max}} = 14.46\ \text{A}\ \times 1.25 = \mathbf{18.075\ A}$$

- **السعة المصححة حرارياً ($I_{\text{allowable}}$):** عند درجة حرارة سطح الكابل المتوقعة $45°C$ (معامل تصحيح 0.71):

$$I_{\text{allowable}} = 47\ \text{A} \times 0.71 = \mathbf{33.37\ A}$$

- **شرط الامتثال الكهربائي والأمان:** بما أن السعة المصححة ($33.37A$) أعلى بكثير من تيار التصميم الأقصى ($18.075A$)، فإن الكابل **آمن حرارياً** بنسبة أمان ممتازة.

تنسيق الحماية الموضعية (Protection)

- **مصهر السلسلة (String Fuse):** اعتماد سعة $25A$ من الفئة المتخصصة gPV لحماية الخلايا الكهرضوئية من تيارات التغذية العكسية.
- **قاطع الفصل (DC Isolator):** مفتاح عزل ميكانيكي ثنائي الأقطاب بسعة $32A$ يضمن العزل الآمن والموثوق أثناء عمليات الصيانة.

التحقق من هبوط الجهد (Voltage Drop)

- **المحدد الأكاديمي والتصميمي:** يجب ألا يتجاوز هبوط الجهد الكلي نسبة 1% الصارمة لضمان استقرار واستيقاظ خوارزمية الـ MPPT.
- **النمذجة الرياضية لهبوط الجهد (ΔV):** باستعمال المقاومة النوعية للنحاس 0.0220 المصححة حرارياً عند $70°C$ والبالغة ($\Omega \cdot \text{mm}^2/m$):

$$\Delta V = \frac{2 \times L \times I_{\text{mp}} \times \rho}{A}$$

$$\Delta V = \frac{2 \times 30\ \text{m}\ \times 13.44\ \text{A}\ \times 0.022}{4} = \mathbf{4.435\ V}$$

- **حساب النسبة المئوية لهبوط الجهد الكهربائي:**

$$\%\ \text{Voltage Drop} = \left(4.435 \frac{\text{V}}{580.58\ \text{V}}\right) \times 100 = \mathbf{0.763\%}$$

- **خلاصة التحقق والقبول الهندسي:** النتيجة المحسوبة (0.763%) تحقق بدقة الشرط القياسي المسموح به ($\leq 1\%$)، مما يضمن كفاءة النقل الطاقي العالية للمنظومة المصرفية.

التحقق الهندسي لجانب التيار المتردد (AC Side Engineering)

النمذجة الرياضية والمفاضلة لهبوط الجهد (AC)

- **الهدف التصميمي:** ضمان استقرار جهد مخرج العاكس الذكي ومنع الفصل الفجائي المنظومي المترتب على ارتفاع الجهد (Overvoltage Tripping)، بتطبيق القيد الأكاديمي الصارم:

$$\Delta V \leq 1\%$$

- **القانون الرياضي المعتمد للشبكات ثلاثية الأطوار:**

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \times I_{\text{AC-max}} \times L \times R_{\text{AC}}}{1000}$$

- **نتائج المفاضلة الهندسية للمقاطع النحاسية:**
  - **عند استخدام مقطع 10mm^2:** بلغت النسبة **%1.13** (تم استبعاده فوراً لتجاوزه الحد الأكاديمي القياسي).
  - **عند استخدام مقطع 16mm^2:** بلغت النسبة **%0.717** (خيار ناجح ومطابق تماماً للمواصفات الهندسية).

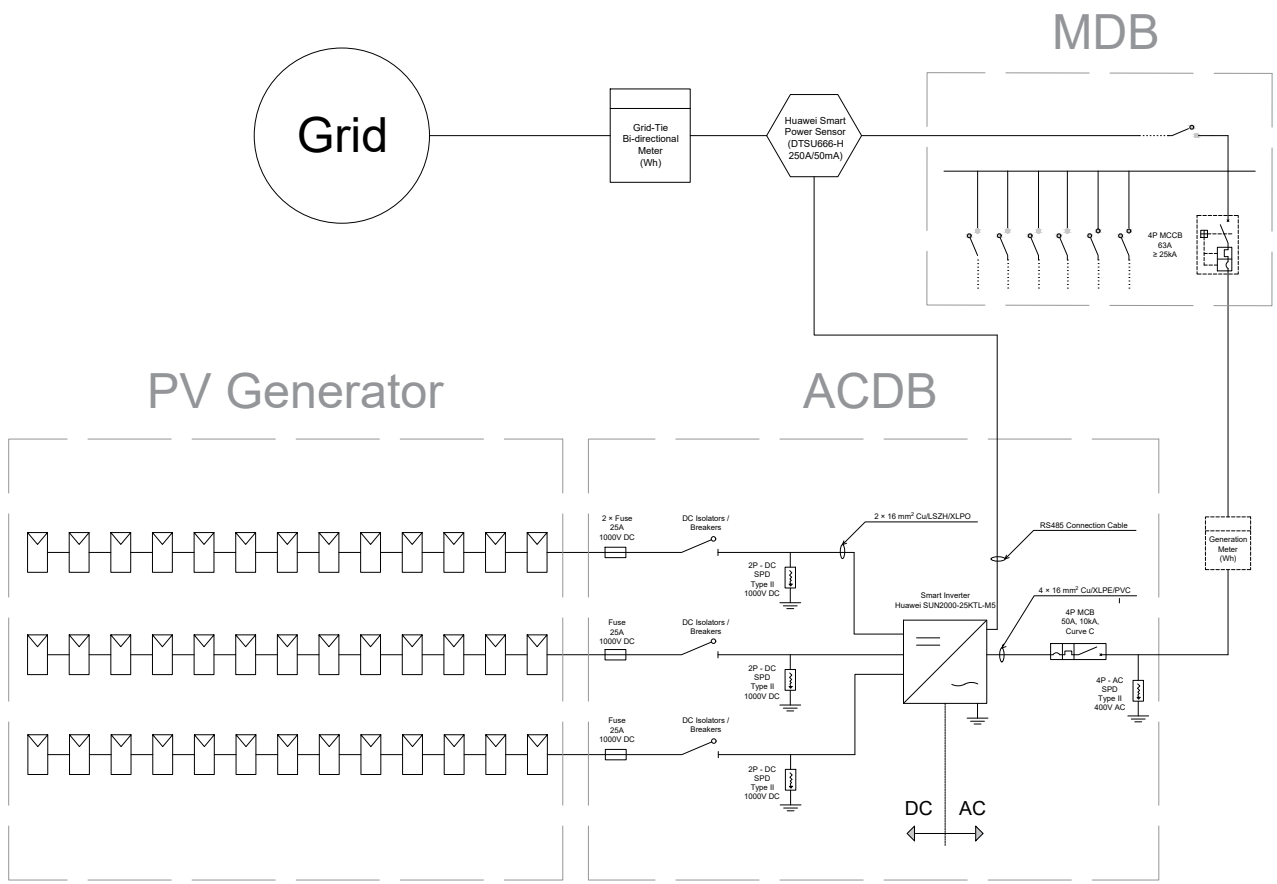
التحجيم الكهربائي للنواقل وتنسيق الحماية

- **التحجيم الفني للموصل المعتمد:** كابل نحاسي رباعي النوى ($4 \times 16\text{mm}^2$) معزول بمادة XLPE عالية التحمل الحراري.
- **السعة الأمبيرية المصححة (I'_z):** بلغت $85.26A$ عند حرارة سطح تبلغ $45°C$، وهي تحقق «القاعدة الذهبية» للتنسيق الانتقائي:

$$I'_z \geq I_n \geq I_{\text{AC-max}}$$

- **تنسيق الحماية المترددة (Protection Coordination):**
  - **قاطع مخرج العاكس (MCB):** سعة $50A$، بمنحنى فصل حراري مغناطيسي من الفئة (Curve C)، وقدرة قطع تبلغ 10kA.
  - **القاطع الرئيسي للمنشأة المصرفية (MCCB):** سعة $63A$ وقدرة قطع عالية $\geq 25\text{kA}$ لضمان الصمود أمام تيارات القصر العنيفة للشبكة العامة.

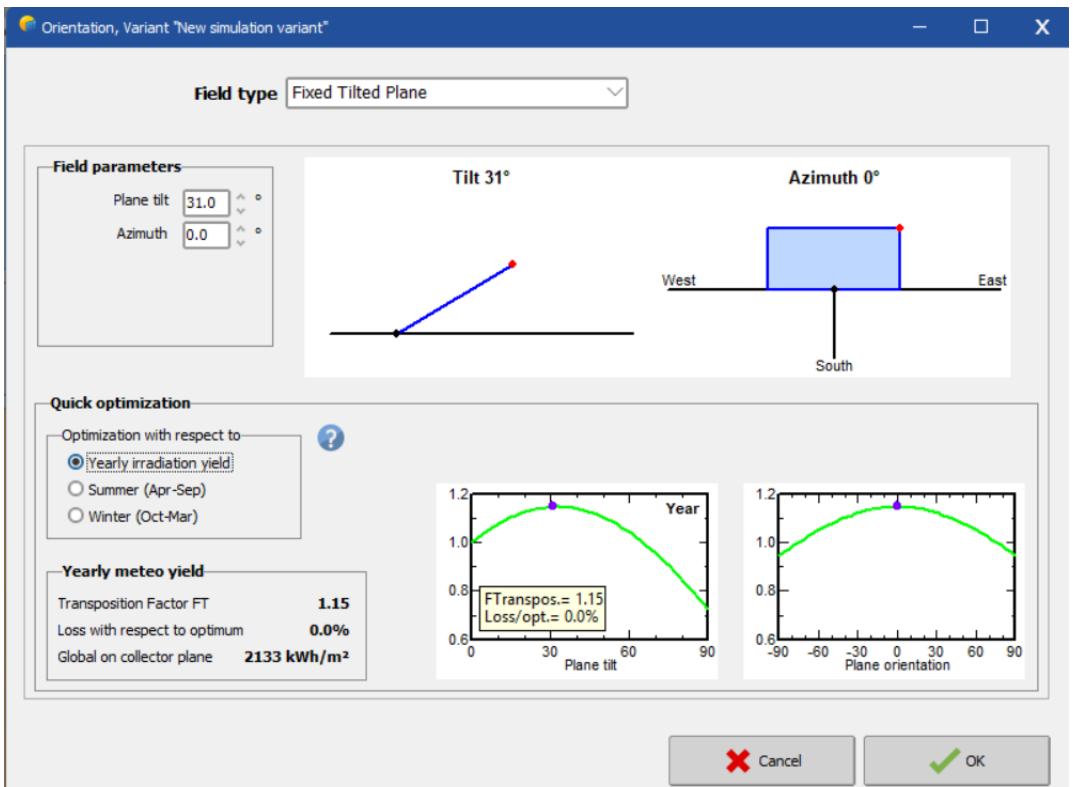
المخطط أحادي الخط التفصيلي للمنظومة



بناء التوأم الرقمي (Digital Twin) والمورد الجيومناخي

فلسفة النمذجة الرقمية والمعايير الجيومناخية للموقع

- **التوأم الرقمي (Digital Twin):** بناء نموذج حاسوبي ديناميكي متكامل في بيئة PVsyst لمحاكاة السلوك الفيزيائي الفعلي للمنظومة تحت وطأة الظروف المناخية المتغيرة والمحدودية المكانية لسطح البنك.
- **الهدف التصميمي الحرج:** الانتقال من التقديرات الساكنة التقليدية إلى التنبؤات الديناميكية الدقيقة للإنتاجية السنوية الإجمالية (E_{sys}) وتحليل تفصيلي لشجرة المفاقيد التشغيلية.
- **الإحداثيات الجغرافية للموقع:** تحديد موقع المنشأة المصرفية بدقة عالية ($36.20°$ شمالاً، $37.14°$ شرقاً) بارتفاع يبلغ $379\ \text{m}$ فوق سطح البحر.
- **محرك الأرصاد الجوية المعتمد:** استيراد البيانات القياسية من قاعدة Meteonorm 8.0 لتوليد جداول الإشعاع الكلي والانتشاري (Global & Diffuse Irradiance) ومخططات درجات الحرارة الساعية المتوقعة للموقع.
- **الاستمثال الهندسي للمصفوفة (Quick Optimization):** تأكيد مطابقة زاوية الميل ($31°$) وزاوية السمت ($0°$) مع القيم المثالية النظرية، مما يضمن تحقيق مفقودات توجيه انعدامية تماماً (0.0% loss).



الشكل 15 واجهة ضبط وتأكيد معطيات توجيه وزاوية ميل المصفوفة الكهروضوئية ($\beta = 31°$) في برنامج PVsyst.

مؤشرات الجدارة الطاقية (Energy Merit Indicators)

Results summary

Produced Energy	44.02 MWh/year	Specific production	1881 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	89.30 %

الشكل 16 ملخص نتائج المحاكاة يبرز قيمة الإنتاجية النوعية للمنظومة كمعيار للأداء الطاقي السنوي ومطابقتها لمعدل ساعات الذروة ومعامل الأداء.

حصاد الطاقة السنوي والإنتاجية النوعية (Specific Yield)

- **حصاد الطاقة السنوي (E_{Grid}):** تؤكد نتائج النمذجة الديناميكية قدرة المنظومة الكهرضوئية على ضخ إجمالي طاقة صافية ومستقرة للشبكة العامة تقدر بـ 44.02MWh/year.
- **الإنتاجية النوعية (Specific Yield - SY):** تُعبر عن «الساعات التشغيلية الفعالة» للمنظومة سنوياً تحت الإشعاع الحقيقي، وتُحسب وفق الآتي:

$$\text{SY} = \frac{E_{\text{Grid}}}{P_{\text{array-STC}}} = \frac{44020\ \text{kWh}}{23.4\ \text{kWp}} = \mathbf{1881\ kWh/kWp/year}$$

- **الدلالة الهندسية والجدوى:** كل 1kWp مركب من الألواح سينتج قرابة 1.9MWh سنوياً، وهي كفاءة إنتاجية مرتفعة تساهم بشكل مباشر في تقليص «فترة استرداد رأس المال» (Payback Period).

معامل الأداء والتحقق من الاتساق الرياضي للمنظومة

- **معامل الأداء (Performance Ratio - PR):** يُمثل المعيار العالمي الحاسم لجودة التصميم الهندسي للموقع المصرفي وتقليص المفاقيد الكلية:

$$\text{PR} = \frac{\text{SY}}{\text{PSH}_{\text{tilted}}} = \frac{1881}{2106.4} = \mathbf{89.3\%}$$

- **التقييم الفني الدقيق:** تُعد هذه القيمة (89.3%) «رقماً قياسياً» (Benchmark) يتجاوز النطاق التقليدي للمنظومات ($75\% - 85\%$)، مما يوثق علمياً نجاح هندسة التثبيت وعزل الظلال الديناميكية.
- **التحقق من الاتساق الرياضي للمحاكاة:** تطابق المخرجات الرقمية يثبت بدقة متناهية صحة العلاقة البنيوية الحاكمة:

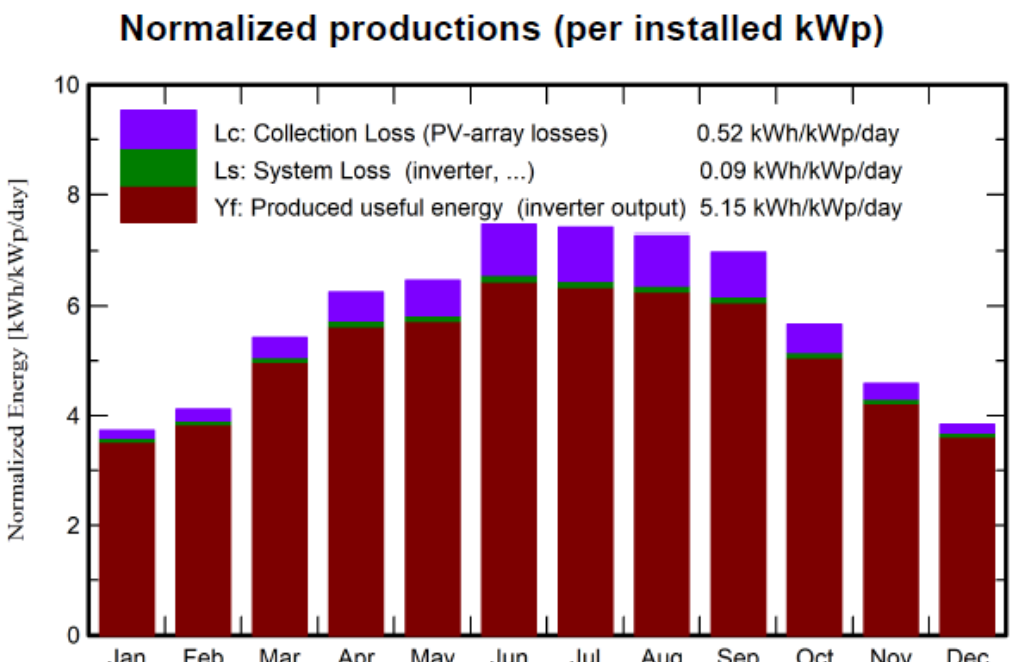
$$\text{Specific Yield} = \text{PSH}_{\text{tilted}} \times \text{PR}$$

مما يمنح نتائج الدراسة موثوقية أكاديمية وهندسية كاملة غير قابلة للطعن.

تحليل الإنتاجية المعايرة والمفاقيد اليومية

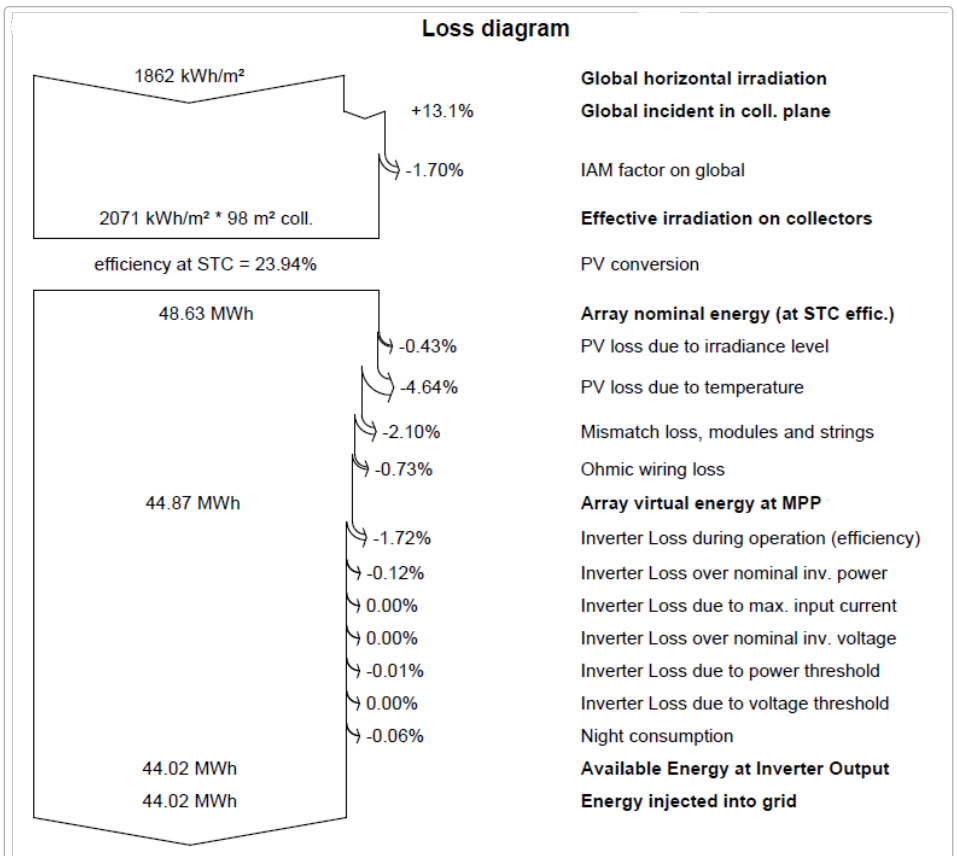
فلسفة المعايرة ومكونات الأداء التشغيلي السنوي

- **فلسفة المعايرة (Normalization):** نَسب مخرجات المنظومة الكلية والضياعات إلى «الكيلوواط الذروي الواحد» (1k Wp) لتبسيط رصد الكفاءة التشغيلية اليومية وتسهيل المقارنة المعيارية العالمية.
- **تفكيك مكونات الأداء اليومي (المعدلات السنوية للمنظومة):**
  - **الإنتاجية المفيدة (Y_f):** سجلت المنظومة متوسطاً متميزاً قدره 5.15kWh/kWp/day محقوناً بالكامل في الشبكة الكهربائية للمبنى المصرفي.
  - **الدلالة الهندسية:** كل 1k Wp مركب من الألواح ساهم بإنتاج ما يزيد عن خمس ساعات تشغيل كاملة من الطاقة الصافية يومياً.
  - **مفاقيد المصفوفة (L_c):** ضياعات جانب التيار المستمر الكلية الناتجة عن التأثير الحراري والاتساخ ومقاومة التمديدات، وبلغت 0.52kWh/kWp/day.
  - **مفاقيد النظام (L_s):** ضياعات التحويل الطاقي الديناميكي داخل العاكس (DC to AC) وحافظت على قيمتها الدنيا البالغة 0.09kWh/kWp/day.
- **الاستنتاج الفني الاستشاري:** تؤكد النتائج الموثقة أن «الطاقة المفيدة الصافية» هي المكون المهيمن والمسيطر بالكامل في ميزان الطاقة اليومي، مما يثبت هندسياً نجاح التصميم في تحييد المفاقيد واسترداد أقصى قدر ممكن من الفوتونات الساقطة.



الشكل 17 مخطط الإنتاجية المعايرة اليومية يوضح توزيع الطاقة المفيدة Y_f مقابل مفاقيد المصفوفة L_c ومفاقيد النظام L_s لكل كيلوواط ذروة مركب.

مخطط تدفق المفاقيد السنوي (Annual Loss Diagram)



الشكل 18 مخطط تدفق المفاقيد السنوي يوضح الميزان الطاقي من الإشعاع الشمسي الخام وصولاً إلى الطاقة الصافية المحقونة في الشبكة وقدرها {44.02MWh.

التحليل الهرمي وتفكيك المفاقيد السنوية للمنظومة

- **التحليل الهرمي لتحولات الطاقة:**
  - **المورد الخام:** تبدأ السلسلة بإشعاع أفقي كلي يبلغ $1862 kWh/m^2$، يرتفع بفعل زاوية التوجيه المثالية ($31°$) لتعظيم التقاط المورد الشمسي على مستوى الألواح.
  - **المحرك الفيزيائي:** تنتج المصفوفة طاقة اسمية عند الشروط المعيارية (STC) قدرها {48.63MWh، تخضع بعدها مباشرة لسلسلة المفاقيد الديناميكية.
- **تفكيك المفاقيد التشغيلية الفعليّة (Loss Breakdown):**
  - **المفاقيد الحرارية (-4.64%):** الفقد المهيمن تقنياً الناتج عن ارتفاع حرارة الخلايا، وهي نسبة ممتازة تعكس جدارة اختيار ألواح LONGi ذات المعامل الحراري المنخفض.
  - **مفاقيد عدم التطابق (-2.10%):** تم تحجيمها ببراعة بفضل استراتيجية التوزيع الفعال للمتعقبات (Multi-MPPT) التي عزلت السلاسل المظللة بالكامل.
  - **المفاقيد الأومية في الكابلات (-0.73%):** البرهان الرقمي الحاسم على صحة ودقة التحجيم اليدوي للنواقل، حيث بقيت الضياعات بأمان تحت عتبة الـ 1% الأكاديمية الصارمة.
  - **مفاقيد تحويل العاكس (-1.72%):** تُثبت كفاءة التحويل العالية جداً لجسور الـ IGBT الإلكترونية في عاكس هواوي المعتمد.
- **الحصاد الطاقي النهائي:** استقرار الميزان الطاقي الإجمالي للمشروع عند طاقة صافية محقونة في الشبكة قدرها {44.02MWh/year، مع الحفاظ على معامل الأداء القياسي المنظومي الحاسم (89.3%).

الاستنتاجات الفنية والجدارة التصميمية

1. كفاءة الاستغلال المكاني والميكانيكي

- **تقنية التثبيت المتدرج (Terraced Mounting):** أثبتت نجاعتها المطلقة والعملية في تجاوز قيود السطح المعمارية الحادة للمبنى المصرفي.
- **تعظيم كثافة الاستطاعة:** حققت المنظومة كثافة قياسية بلغت $119.59\mathrm{W/m^2}$ مع تحييد كامل للمفاقيد البصرية والفيزيائية الناتجة عن التظليل المتبادل بين المصفوفات.

2. الجدارة الكهربائية والتحكم الرقمي

- **استراتيجية التوزيع الفعال (Multi-MPPT):** نجحت تماماً في عزل «العقوبة الطاقية» للظلال الموضعية الناشئة عن جدران المبنى لحماية السلاسل.
- **كبح مفاقيد عدم التطابق (Mismatch Losses):** تم حصرها عند عتبة دنيا بلغت 2.10% فقط، مما منع انهيار أداء المصفوفة الإجمالي وضمن استمرارية التدفق الطاقي.

3. مؤشرات الأداء القياسية والجدوى

- **التحقق عبر التوأم الرقمي:** أكد بناء النموذج الحاسوبي جدارة التصميم بتحقيق معامل أداء استثنائي وعالمي ($\mathrm{PR} = 89.3\%$).
- **الإنتاجية النوعية المرتفعة:** بلغت $1881\mathrm{kWh/kWp/year}$، وهي أرقام تتجاوز المعدلات النمطية للمشاريع المماثلة، مما يساهم مباشرة في تقليص «فترة استرداد رأس المال» (Payback Period).

4. الموثوقية المناخية والتحمل الحراري

- **صمود المكونات الحرجية:** أثبت التحليل الحراري المتقدم استقرار جهود المصفوفة وصمود المعدات المعتمدة (ألواح LONGi وعاكس Huawei) أمام الظروف المناخية المتطرفة لمدينة حلب.
- **المفاقيد الحرارية المنظومية:** حافظت على مستويات منخفضة وآمنة هندسياً بلغت 4.64% بالرغم من قساوة ذروة البيئة التشغيلية الصيفية.

شكر وتقدير

نتقدم بخالص الشكر والامتنان إلى جميع المشرفين على رمايتهم العلمية وتوجيهاتهم القيمة وشكر خاص إلى **الدكتورة كريمة سكر** على إشرافها المباشر على المشروع وتقديمها الدعم الفني والإرشاد العلمي

شكراً لكم على حسن استماعكم وإصغائكم