University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology (UZJEST)
Volume 4, Issue 1, (2026), pp 24-36, ISSN 3006-2764

# Integration of Photovoltaic Systems in Benghazi Buildings: Digital Analysis Using PVGIS to Support Design Decision-Making

Ahmed Elsharif

Architecture and Urban Planning Department, Faculty of Engineering, University of Benghazi, Benghazi, Libya
Corresponding author email: ahmed.sharif@uob.edu.ly

Received: 23-03-2026 | Accepted: 16-05-2026 | Available online: 13-06-2026 | DOI:10.26629/uzjest.2026.02

**ABSTRACT**

Energy generation using photovoltaic (PV) systems is one of the most important sustainable solutions in cities with high solar potential, such as Benghazi. However, challenges remain regarding the efficient use of this technology under local conditions, especially in the absence of clear design frameworks for integrating it into buildings. Based on this, the study assumes that determining the orientation and tilt angle of solar panels is an important design decision that directly affects system performance, as it depends on local climate conditions. The study aims to determine the optimal installation characteristics of solar panels in order to maximize annual energy production using digital analysis with the PVGIS tool. Two orientation scenarios (south and southwest) were tested, and several tilt angles were examined for each orientation. The results show that the south-facing orientation achieves the highest annual energy production at an optimal tilt angle of about 29°, while the southwest orientation provides satisfactory and acceptable performance levels. This result reflects a level of design flexibility that allows adaptation to architectural constraints without significantly affecting system efficiency. This study provides a digital reference that can support early design decisions for integrating photovoltaic systems into buildings at the study location. It also helps to improve the understanding of the relationship between installation parameters and energy production efficiency, supporting more sustainable architectural design that is compatible with the local context.

**Keywords:** Solar Energy, Photovoltaic Systems, Sustainable Architecture, Tilt Angle, Solar Panel Orientation.

# دمج الأنظمة الكهروضوئية في مباني مدينة بنغازي: تحليل رقمي باستخدام PVGIS لدعم القرار التصميمي

أحمد الشريف

قسم العمارة وتخطيط المدن، كلية الهندسة، جامعة بنغازي، بنغازي، ليبيا

**ملخـــــــص البحـــــــث**

يعد توليد الطاقة باستخدام الأنظمة الكهروضوئية أحد أبرز الحلول المستدامة في المدن ذات الإمكانات الشمسية المرتفعة، مثل مدينة بنغازي. ومع ذلك، تبرز تحديات تتعلق بكيفية توظيف هذه التقنية بكفاءة ضمن البيئة العمرانية المحلية، لا سيما في ظل غياب أطر تصميمية واضحة لدمجها في المباني. بناء على ذلك، تفترض هذه الدراسة أن تحديد التوجيه وزاوية

ميل الألواح الشمسية يمثل أحد أهم القرارات التصميمية المؤثرة مباشرة في كفاءة النظام، نظرا لاعتمادهما على طبيعة الظروف المناخية السياقية. تهدف الدراسة إلى تحديد خصائص التثبيت المثلى للألواح الشمسية، اعتمادا على تحليل رقمي باستخدام أداة PVGIS، وذلك بهدف تعظيم الأداء الطاقي. ولتحقيق ذلك، جرى اختبار سيناريوهين للتوجيه (الجنوب والجنوب الغربي)، إلى جانب مجموعة من زوايا الميل المختلفة لكل منهما. يتبين من البيانات أن التوجيه الجنوبي يحقق أعلى إنتاجية سنوية للطاقة عند زاوية ميل تقارب **29°**، في حين يوفر التوجيه الجنوب الغربي مستويات أداء جيدة ومقبولة، مما يتيح قدرا من المرونة التصميمية للتكيف مع القيود المعمارية دون تأثير كبير في كفاءة النظام. وتقدم الدراسة مرجعا رقميا يمكن الاستفادة منه في دعم القرارات التصميمية المبكرة لدمج النظام الشمسي في المباني بموقع الدراسة، كما تسهم في تعزيز فهم العلاقة بين متغيرات التركيب وكفاءة إنتاج الطاقة، بما يدعم تحقيق تصميم معماري أكثر استدامة.

**الكلمات الدالة:** الطاقة الشمسية، الأنظمة الكهروضوئية، العمارة المستدامة، زاوية الميل، توجيه الألواح الشمسية.

## 1. المقدمة

يتجه العالم بشكل متزايد نحو مصادر الطاقة البديلة في ظل تفاقم المشكلات البيئية واستنزاف الموارد الطبيعية، لما لذلك من تأثير على استدامة الحياة ومستقبل الأجيال القادمة. وفي هذا السياق، تعد الشمس موردا طبيعيا متجددا متاحا على نطاق واسع [1]، إذ توفر مصدرا مهما لتوليد الطاقة النظيفة.

أدى التوسع العمراني وارتفاع عدد السكان إلى زيادة استهلاك الطاقة، مما يبرز الحاجة إلى حلول تصميمية أكثر كفاءة، بحيث يدمج البعد الطاقي ضمن القرارات المعمارية. وفي هذا الإطار تبرز الأنظمة الشمسية كأحد الحلول المهمة لتعزيز كفاءة استخدام الطاقة في المباني. إلا أن كفاءة هذه الأنظمة لا تعتمد على التقنية نفسها فقط، بل تتأثر بعدة عوامل تصميمية، من أهمها اتجاه المبنى وزاوية ميل الألواح الشمسية، لما لهما من تأثير مباشر في كمية الطاقة المنتجة سنويا.

تعد ليبيا من الدول ذات الإمكانات الشمسية العالية [2,3]، وهو ما يجعلها بيئة مناسبة لدراسة استخدام الألواح الشمسية الكهروضوئية. إلا أنه، في حدود اطلاع الباحث، لا يتوفر دليل تصميمي محلي واضح، يمكن للمعماري الاستناد إليه عند تحديد اتجاه الكتلة المعمارية، ودرجة ميل الألواح، بما يحقق أداء مرتفعا وفق المعطيات المكانية. تقع مدينة بنغازي في شرق ليبيا بمحاذاة البحر المتوسط، وتتميز بمستويات إشعاع شمسي مرتفعة، مما يجعلها بيئة مناسبة لدراسة أداء الأنظمة الشمسية عند تطبيقها على المباني. كما يؤثر تحديد نطاق الانحراف وزاوية الميل بشكل مباشر على تشكيل الكتلة المعمارية وتوجيهها.

تهدف هذه الدراسة إلى الإجابة عن السؤال التالي: كيف يؤثر كل من اتجاه الألواح الشمسية وزاوية ميلها على الإنتاج السنوي في منطقة الدراسة، وما النطاق التصميمي الذي يحقق أعلى كفاءة ممكنة ضمن الظروف المناخية للمدينة؟ تسهم هذه الدراسة في تقييم إمكانية استخدام هذه الأنظمة في المدينة، ومقارنة التوجيه الجنوبي بالتوجيه الجنوب الغربي بوصفه خيارا بديلا قد تفرضه بعض القيود التخطيطية، كما تقدم مرجعا تصميميا عمليا للمعماريين والمهندسين عند تحديد اتجاه وزاوية ميل الألواح، بما يتيح تحقيق إنتاج طاقة مرتفع وفق خصائص المنطقة الجغرافية. كما توفر قاعدة لدعم القرارات التصميمية المتعلقة بدمج الأنظمة الشمسية في المباني، بما يضمن تكامل الحلول البيئية المستدامة مع المتطلبات المعمارية والتخطيطية.

## 2. الدراسات السابقة

تعد زاوية ميل الألواح وتوجيهها من العوامل الأساسية التي تؤثر مباشرة على إنتاجية الطاقة الشمسية، وتختلف تبعا لطبيعة الموقع الجغرافي. تمثل هذه العوامل جزءا من القرار التصميمي المعماري منذ المراحل الأولى، ويجب مراعاة أن الظروف

المناخية والجغرافية والمادية لكل موقع تختلف اختلافا متباينا، مثل صفاء السماء، الرطوبة، القرب من المسطحات المائية وموقعه ضمن خط العرض، مما يجعل المقارنة الظاهرية المباشرة بين المدن المختلفة أقل دقة وفائدة علمية. لذا، تعتمد هذه الدراسة على بيانات مخصصة لموقع الدراسة، وذلك لتقديم نطاق تصميمي عملي قابل للتطبيق في المنطقة المعنية.

### 1.2. زاوية الميل المثلى

تشير العديد من الدراسات إلى أن الزاوية المثلى للألواح غالبا ما ترتبط بخط العرض الجغرافي للموقع، مع اختلافات طفيفة تبعا للموسم والمتغيرات المناخية. ففي ليبيا، أظهرت إحدى الدراسات أن زاوية الميل المثلى تزداد في الشتاء وتنخفض في الصيف، مما يعكس تأثير خط العرض على الحصيلة السنوية للطاقة [4]. وفي تونس، تم تحليل مجموعة من زوايا الميل والتوجيهات المختلفة لمقارنة الأداء اللحظي للألواح وتحديد الزاوية الأكثر إنتاجية اعتمادا على حصيلة البيانات الإشعاعية [5]. كما أظهرت دراسة أجريت في اليونان، ضمن نطاق خطوط عرض يقارب 35°-41° شمالا، أن الزوايا المثلى تقع عادة بين 25° و30° لتحقيق أعلى إنتاج سنوي للطاقة [6]. وخلصت دراسة أخرى في الصين إلى نتائج متقاربة تؤكد ارتباط زاوية الميل المثلى بخط العرض، مع تأثر الأداء النهائي للنظام بالظروف السياقية [7].

هذا يؤكد تقارب النتائج عند هذه الدراسات، ولكن برغم ذلك، فإن تعميم هذه القاعدة فورا قد لا يكون دقيقا تماما نظرا لاختلاف الطبيعة المكانية لكل منطقة. كما أن معظم هذه الدراسات ركزت على تعظيم الحصيلة الإشعاعية من منظور طاقي بحت، دون ربط النتائج بالقيود التشكيلية والمعمارية المتعلقة بتوجيه الكتلة أو طبيعة الأسطح في المباني.

### 2.2. التوجيه (الأزيموث) الأمثل

أشارت الدراسات إلى أن التوجيه نحو الجنوب غالبا ما يكون الأمثل في نصف الكرة الشمالي، حيث تقل كتلة الهواء عند الظهيرة، مما يزيد شدة الإشعاع الساقط على الألواح [8]. كما بينت بعض الدراسات أن الانحرافات الصغيرة عن الجنوب لا تؤدي إلى فروقات إنتاجية كبيرة مقارنة بالانحرافات الأكبر قيمة [9]، وهو ما يبرز أهمية تحديد التوجيه ضمن مدى تصميمي عملي دون التأثير على المرونة المعمارية .

رغم تأكيد الدراسات على أفضلية التوجيه الجنوبي، فإنها غالبا ما تعالج المسألة من منظور كفاءة رقمية فقط، دون تحليل مدى المرونة التصميمية الممكنة عند الانحراف عن هذا الاتجاه أو قياس الفارق الكمي المقبول الذي يسمح بالتكيف مع القيود المعمارية الوظيفية والجمالية.

### 3.2. دور التحليل الرقمي

تلعب أدوات التحليل الرقمي، مثل PVGIS، دورا أساسيا في دعم القرار التصميمي، إذ تتيح تقييم تأثير معطيات تركيب الألواح على مقدار إنتاجية النظام قبل التنفيذ على أرض الواقع [10،11].

تمكن هذه الأدوات المصمم من مقارنة عدة سيناريوهات وتحليل النتائج بشكل موضوعي بعيدا عن التقديرات الفردية، مما يساعد على اختيار الحل الأمثل وفق الخصائص المناخية والمكانية. كما تتيح استخدام بيانات إشعاعية للموقع طويلة المدى، مما يجعل تعيين كمية الطاقة المولدة مبنيا على بيانات رقمية بدلا من تقديرات عامة، وهو ما يعزز موثوقيتها في تحديد الاتجاه وزاوية الميل المناسبة عند التصميم .

### 4.2. فجوة البحث

على الرغم من وفرة الدراسات التي تناولت هذا الموضوع في مناطق مختلفة من العالم، فإن معظمها ركز على تحسين الإنتاج الطاقي من منظور تقني، دون ربط النتائج بشكل مباشر بالقرارات التصميمية المعمارية أو تقديم نطاقات تطبيقية يمكن للمعماريين الاستفادة منها عند تصميم المباني.

بناء على ذلك، تبرز الحاجة إلى دراسة رقمية تقيس الفروقات بين سيناريوهات التوجيه، وتحدد حدود المرونة التصميمية ضمن السياق المناخي المحلي، بما يدعم اتخاذ القرار المعماري استنادا إلى بيانات كمية واضحة، مع الأخذ في الاعتبار أن ظروف كل موقع قد تؤثر على الأداء العام للأنظمة الكهروضوئية، مما يجعل المقارنة بين المواقع المختلفة غير مجدية عمليا.

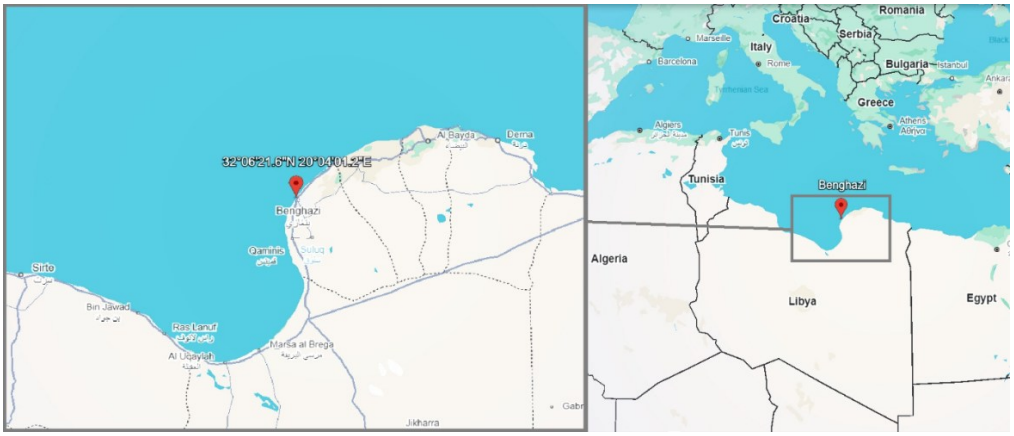
## 3. منهجية البحث

### *1.3. تصميم الدراسة*

اعتمدت هذه الدراسة على منهجية التحليل الرقمي لقياس كفاءة استخدام الألواح الشمسية في المنطقة المدروسة. شمل التحليل اختبار المجال المناسب لتركيب الألواح، بهدف استخراج بيانات محلية توضح التوجيه الأفضل والزاوية المثلى ومدى المنتوج السنوي المتوقع، إضافة إلى تقدير درجة المرونة التصميمية الممكنة. تم تثبيت جميع المتغيرات الأساسية للنظام الكهروضوئي أثناء التحليل، مع تغيير متغيري التوجيه وزاوية الميل فقط، لضمان أن الفروقات في النتائج ناتجة عن هذين المتغيرين.

### *2.3. منطقة الدراسة*

استهدفت الدراسة مدينة بنغازي، نظرا لخصوصية خصائصها المناخية. وبرغم أن المنطقة الجغرافية الأوسع تمتلك فعلا إمكانات داعمة لمشروعات الطاقة الشمسية، إلا إن استخراج بيانات مرجعية تخص المدينة نفسها يوفر قيمة تطبيقية عالية. تم تحديد موقع الدراسة عند الإحداثيات (32.106°N, 20.067°E)، بما يمثل مركز المدينة تقريبا، كما هو موضح في الشكل رقم 1، أما الارتفاع عن سطح البحر فتم اعتماده وفق القيمة التي توفرها أداة التحليل تلقائيا استنادا إلى نموذج الارتفاعات الرقمية المدمج بها، يقع الموقع عند خط عرض يقارب 32° شمالا، وهو مرتبط بتحديد زاوية الميل المثلى سنويا.




الشكل رقم 1. موقع مدينة بنغازي

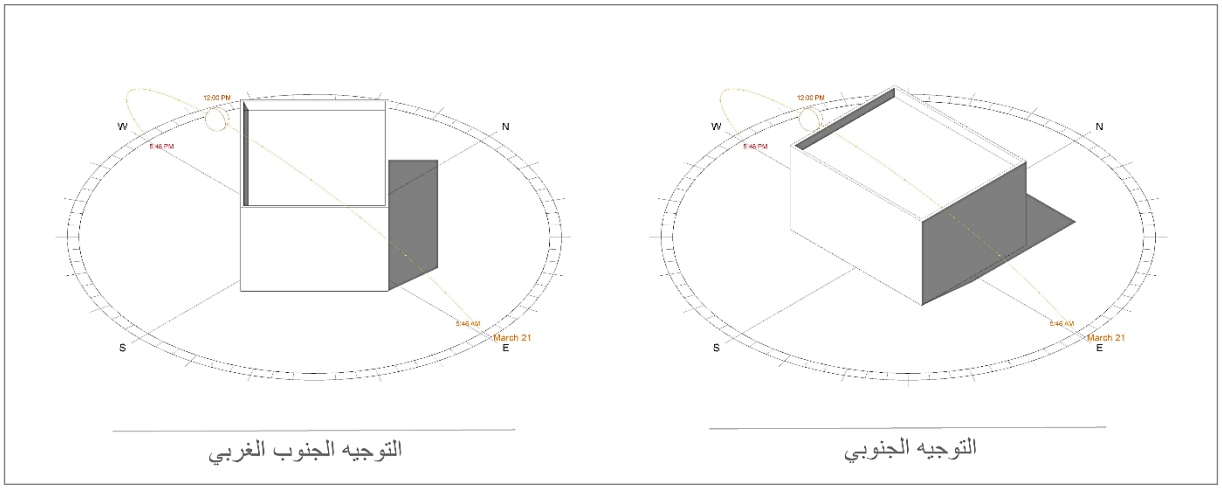
### *3.3. حدود الدراسة*

تقتصر هذه الدراسة على تحليل تأثير تموضع الألواح على إنتاج الطاقة، وذلك في ظروف غير مظللة، حيث لم يتم احتساب تأثير التظليل الحضري الناتج عن المباني المجاورة أو العوائق المحيطة، كما لم يتم تحليل الجوانب الاقتصادية أو تأثير الأداء الحراري لغلاف المبنى على استهلاك الطاقة. تمثل هذه الأمور مجالا لبحوث مستقبلية يمكن أن تكمل النتائج الحالية،

وتوسع فهم دمج النظام الشمسي ضمن المباني في سياق عام متكامل. لذلك يمكن اعتبار النتائج مرجعا تصميميا أوليا، بينما قد تختلف القيم الفعلية في البيئات العمرانية الكثيفة تبعا لظروف التظليل المحلية.

### 4.3. النموذج المعماري

تم اعتماد نموذج مبسط يمثل كتلة مبنى سكني منفصل، تم إنشاؤه باستخدام برنامج Autodesk Revit. يهدف النموذج إلى تمثيل العلاقة الهندسية بين مسار الشمس وتوجيه المبنى، ومقارنة تأثير ذلك على حالتي التوجيه الجنوبي والجنوب الغربي كما يظهر بالشكل رقم 2، تم اعتماد نموذج مبسط يمثل مبنى سكنيا مكونا من طابقين، حيث تبلغ مساحة كل طابق حوالي 114م²، بإجمالي مساحة بناء تقارب 228م². وتم افتراض أن السقف العلوي مستو ومناسب لتركيب الألواح الشمسية. كما تم افتراض أن زاوية ميل الألواح يمكن تغييرها بشكل مستقل عن السقف، حتى تعكس النتائج تأثير الميل بصورة محددة.




الشكل رقم 2. نموذج ثلاثي الأبعاد يوضح علاقة توجيه المبنى بمسار الشمس (21 مارس الساعة 12 ظهرا)

### 5.3. أداة التحليل

أُجري التحليل الطاقي باستخدام أداة PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)، وهي منصة تحليل طاقة شمسية طورتها المفوضية الأوروبية (Joint Research Centre)، وتتيح إجراء تحليل رقمي للإنتاج السنوي للطاقة الكهربائية وفق مدخلات يحددها المستخدم، مثل التوجيه وزاوية الميل والقدرة المركبة .

تم اعتماد قاعدة بيانات SARAH-3 ضمن الأداة، والتي تغطي الفترة 2005–2023، وذلك بالاستناد إلى بيانات طويلة المدى تمثل خصائص الإشعاع الشمسي في الموقع المدروس. تم ضمن اعدادات الأداة افتراض أن النظام ثابت، وفي ظروف يكون السطح فيه غير مظلل، لذلك تمثل النتائج حالة مثالية وقد تختلف في البيئات الحضرية الفعلية نتيجة التظليل والعوائق العمرانية.

### 6.3. سيناريوهات التوجيه

يشير التوجيه إلى درجة الانحراف عن الاتجاه الجنوبي ضمن الاتجاهات الجغرافية، وهو مرتبط بتوجيه سطح تركيب الألواح، مع افتراض توافقه مع توجيه السطح المعماري للمبنى، دون دوران مستقل للألواح . تم اعتماد حالتين:

- التوجيه الجنوبي :يمثل الحالة المرجعية .
- التوجيه الجنوب الغربي :يمثل حالة بديلة قد تفرضها بعض القيود التخطيطية.

تهدف الحالة الثانية إلى قياس مدى تغير القيم السنوية للطاقة عند الابتعاد عن الاتجاه الجنوبي، حيث تمثل الأداة الزاوية 0° على أنها الانحراف الصفري عن الجنوب، بينما تمثل الزاوية +45° الانحراف نحو الجنوب الغربي .

### 7.3. زوايا الميل

تشير زاوية الميل إلى الزاوية بين سطح اللوح الشمسي والمستوى الأفقي، وهي تؤثر في مقدار الإشعاع المستقبل على مدار العام . تم اختبار زوايا الميل ضمن نطاق 20°–35°، إعتمادا على خط العرض الجغرافي لبنغازي (~32° شمالا)، وفق القاعدة النظرية التي تشير إلى أن زاوية الميل المثلى سنويا تكون قريبة من خط العرض.

تم اختبار الزوايا 20°، 25°، 30°، و35° لكل من التوجيهين، بهدف تحليل تأثير تغير زاوية الميل، وبعد التحليل الأولي، أُجريت اختبارات إضافية لزوايا قريبة من القيم الأعلى إنتاجية لتحديد الزاوية المثلى بدقة أكبر ضمن النطاق المدروس.

### 8.3. آلية إدخال البيانات والتحليل

تم استخدام برنامج Autodesk Revit للتمثيل الهندسي، بينما أجري التحليل الطاقي باستخدام أداة PVGIS، عبر إدخال الموقع الجغرافي، والقدرة المركبة للنظام، وزوايا الميل، والتوجيه لكل حالة. تم اعتماد قدرة نظام قدرها 10 kWp، بالاستناد إلى مساحة السطح الصافية المتاحة لتركيب الألواح في النموذج المقترح، والتي تقدر بحوالي 76م$^2$، وتشير الأدبيات إلى أن كل 1 kWp، من القدرة المركبة يتطلب مساحة تقريبية تتراوح بين 6–5م$^2$ من مساحة السطح [12].

كما تم اختيار تركيب قائم بذاته على هياكل معدنية، مع الاحتفاظ بقيمة فقد النظام الافتراضية (14%) دون تغيير أي متغير آخر أثناء المقارنة. بعد الحساب، تم استخراج قيم الطاقة المولدة سنويا بوحدة kWh، بالإضافة إلى المنحنيات الشهرية، واعتمد العائد السنوي كمؤشر رئيسي للمقارنة بين السيناريوهات المختلفة .

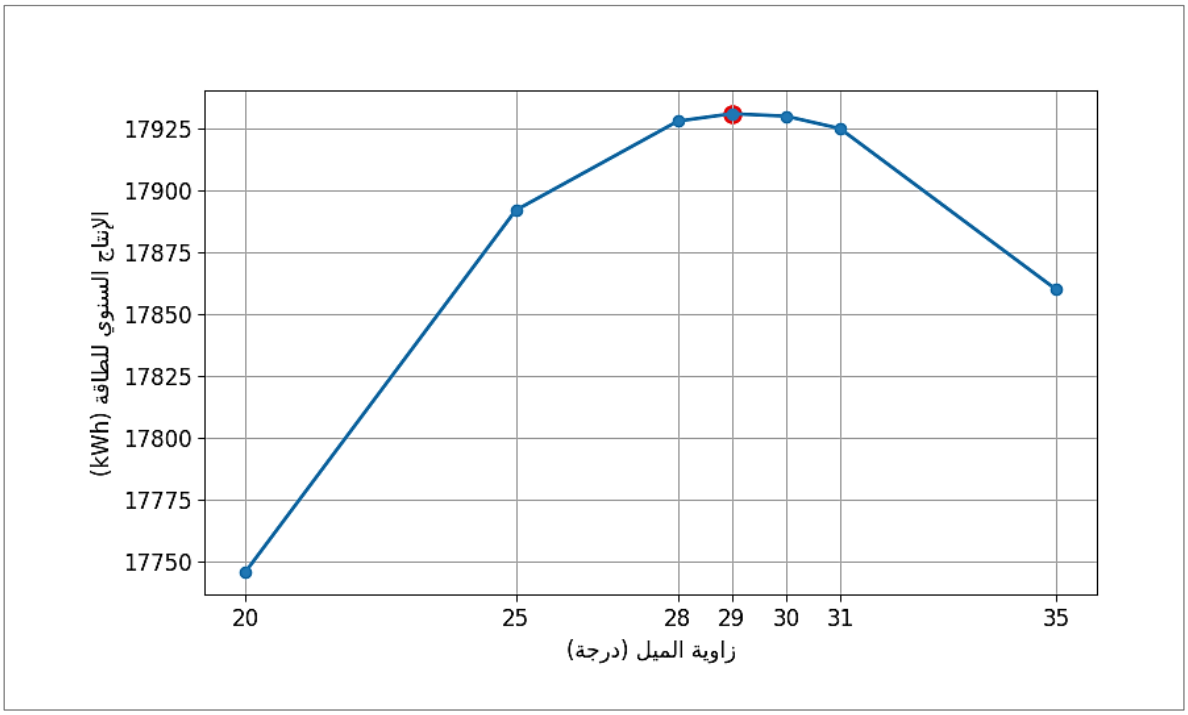
## 4. النتائج

### 1.4. تأثير زاوية الميل في حالة التوجيه الجنوبي

يوضح الجدول رقم 1 قيم إنتاج الطاقة الكهربائية المتأثرة بزاوية ميل الألواح الشمسية في حالة التوجيه الجنوبي، أظهرت نتائج التحليل بالمنطقة الخاضعة للدارسة أن أعلى إنتاجية سنوية تحققت عند زاوية ميل 29°، حيث بلغ الإنتاج حوالي 17931 kWh سنويا. كما يبين الشكل رقم 3 هذه العلاقة، حيث أن الزوايا القريبة من هذه القيمة، مثل 28° و30° و31°، هي تحقق أيضا إنتاجية سنوية مرتفعة ومتقاربة جدا. وفي المقابل، الزوايا الأقل أو الأعلى نسبيا، مثل 25°–27° و32°–35°، سجلت إنتاجا سنويا أقل قليلا، لكنها ما تزال ضمن نطاق أداء جيد.

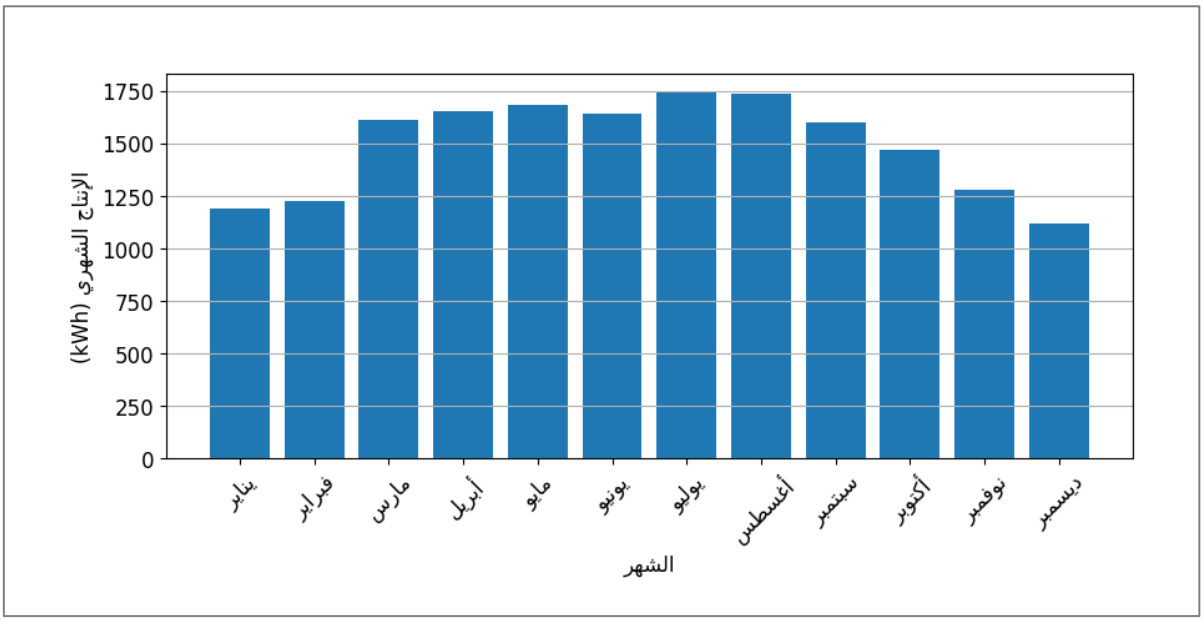
الجدول رقم 1. الإنتاج السنوي للطاقة حسب زاوية الميل عند التوجيه الجنوبي(kWh)

| زاوية الميل (°) | 20° | 25° | 28° | **29°** | 30° | 31° | 35° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| الطاقة (kWh) | 17746 | 17892 | 17928 | **17931** | 17930 | 17925 | 17860 |
| التصنيف | مقبول | مقبول | عالي الأداء | **مثالي** | عالي الأداء | عالي الأداء | مقبول |




الشكل رقم 3. الرسم البياني للإنتاج السنوي مقابل زاوية الميل عند التوجيه الجنوبي.

ولإظهار التغير الموسمي في إنتاج الطاقة، يوضح الشكل رقم 4 الإنتاج الشهري للنظام الكهروضوئي عند الحالة المثلى (توجيه جنوبي وزاوية ميل 29°)، حيث يتبين أن أعلى إنتاج للطاقة يتحقق خلال أشهر الصيف، بينما ينخفض الإنتاج خلال أشهر الشتاء.




الشكل رقم 4. التوزيع الشهري لإنتاج الطاقة للنظام الكهروضوئي عند التوجيه الجنوبي وزاوية ميل 29°

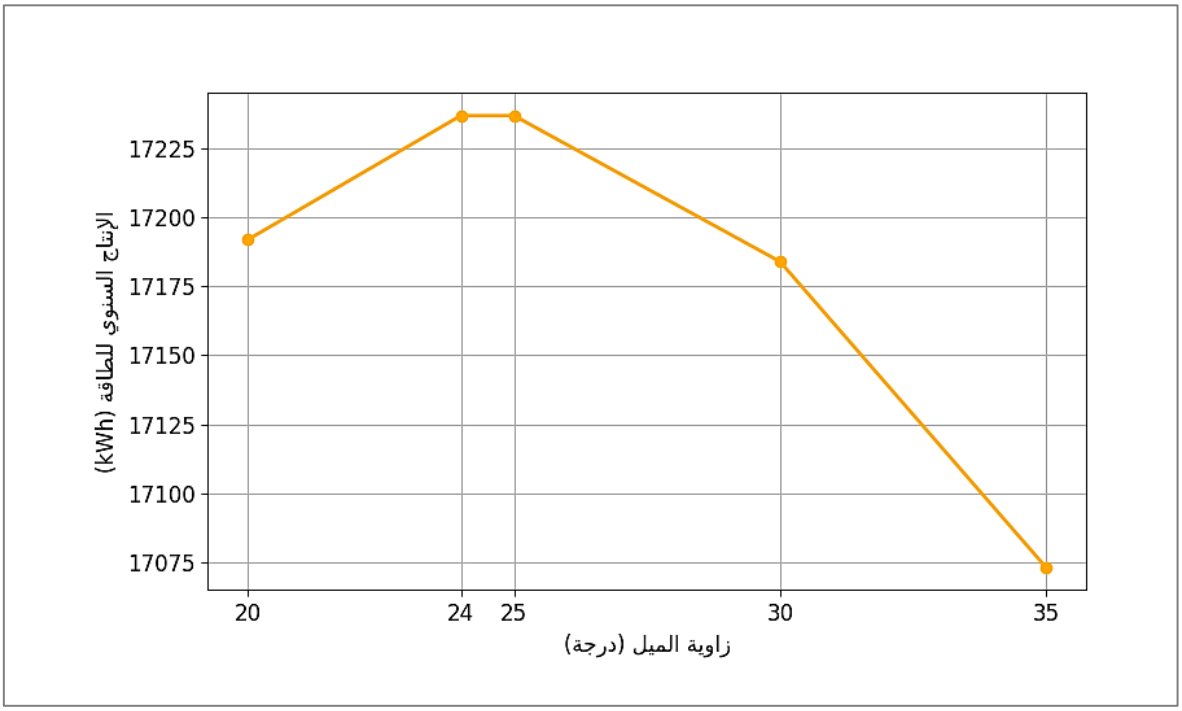
### 2.4. تأثير زاوية الميل في حالة التوجيه الجنوب الغربي

يظهر الجدول رقم 2 نتائج التوجيه الجنوب الغربي، حيث يحقق أعلى إنتاجية عند الزاويتين 24° و25°، بقيمة تقريبية تبلغ 17237 kWh سنويا لكل منهما، كما يوضح الشكل رقم 5 الاتجاه العام لتغير الأداء، فقد سجلت الزوايا الأخرى، مثل 20° و30° و35° إنتاجا أقل قليلا، لكنها بقيت ضمن نطاق قريب من أعلى قيمة مسجلة.

الجدول رقم 2. الإنتاج السنوي للطاقة حسب زاوية الميل عند التوجيه الجنوب الغربي (kWh)

| زاوية الميل (°) | °20 | °24 | °25 | °30 | °35 |
|---|---|---|---|---|---|
| الطاقة (kWh) | 17192 | 17237 | 17237 | 17184 | 17073 |
| التصنيف | مقبول | عالي الأداء | عالي الأداء | مقبول | مقبول |

ملاحظة :الأداء العالي هنا يمثل أفضل زاوية ضمن هذا التوجيه، ويختلف عن زوايا التوجيه الجنوبي المثالي.




الشكل رقم 5. الرسم البياني للإنتاج السنوي مقابل زاوية الميل عند التوجيه الجنوب الغربي.

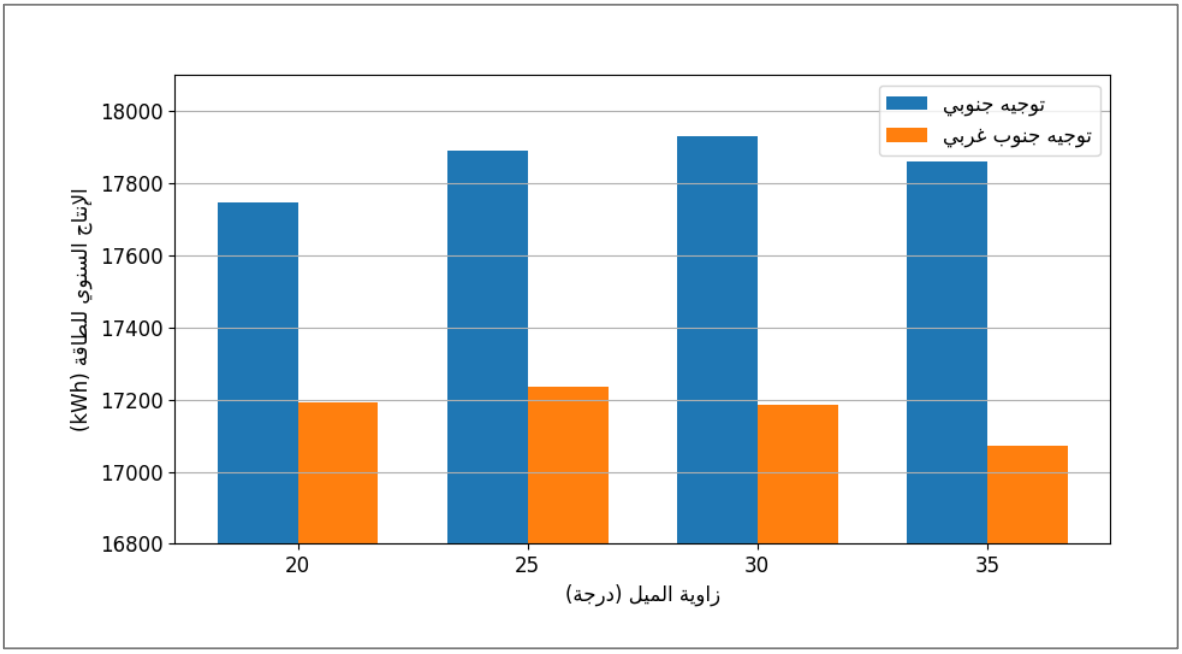
### 3.4. المقارنة بين التوجيه الجنوبي والجنوب الغربي

لغرض المقارنة المباشرة، تم اختيار أربع زوايا شائعة (20°، 25°، 30°، 35°) لكلا التوجيهين، مع حساب الفرق في المردود السنوي بين التوجيه الجنوبي والجنوب الغربي. يظهر الجدول رقم 3 الفرق الكمي، حيث بلغ الفرق في الإنتاج بين التوجيهين حوالي 694 kWh، أي ما يمثل تقريبا 3.9٪ من إجمالي إنتاج النظام، كما يبين الشكل رقم 6 الرسم البياني للمقارنة النهائية بين هذه الفروقات.

الجدول رقم 3. مقارنة الإنتاج السنوي للطاقة بين التوجيه الجنوبي والجنوب الغربي عند زوايا الميل المختارة (kWh)

| زاوية الميل (°) | °20 | °25 | °30 | 35° | الحالة المثالية |
|---|---|---|---|---|---|
| **الجنوبي (kWh)** | 17746 | 17892 | 17930 | 17860 | **17931** |
| **الجنوب الغربي(kWh)** | 17192 | 17237 | 17184 | 17073 | **17237** |
| **الفرق(kWh)** | 554 | 655 | 746 | 787 | **694** |

توضيح: الفرق = إنتاج التوجيه الجنوبي – إنتاج التوجيه الجنوب الغربي.




الشكل رقم 6. مخطط المقارنة النهائي بين التوجيهين عند زوايا الميل المختارة

## 5. مناقشة النتائج

يمكن تفسير النتائج المرتفعة للإنتاج السنوي للطاقة في المدينة، بفضل الخصائص الجغرافية والمناخية المواتية، حيث تسود السماء الصافية معظم أيام السنة في المدينة، وهو ما يزيد من شدة الإشعاع الشمسي الساقط على الألواح، كما أن موقع المدينة عند خط عرض يقارب 32° شمالا، يجعل ارتفاع الشمس مناسبا خلال معظم فصول السنة، مما يساهم في رفع كفاءة النظام.

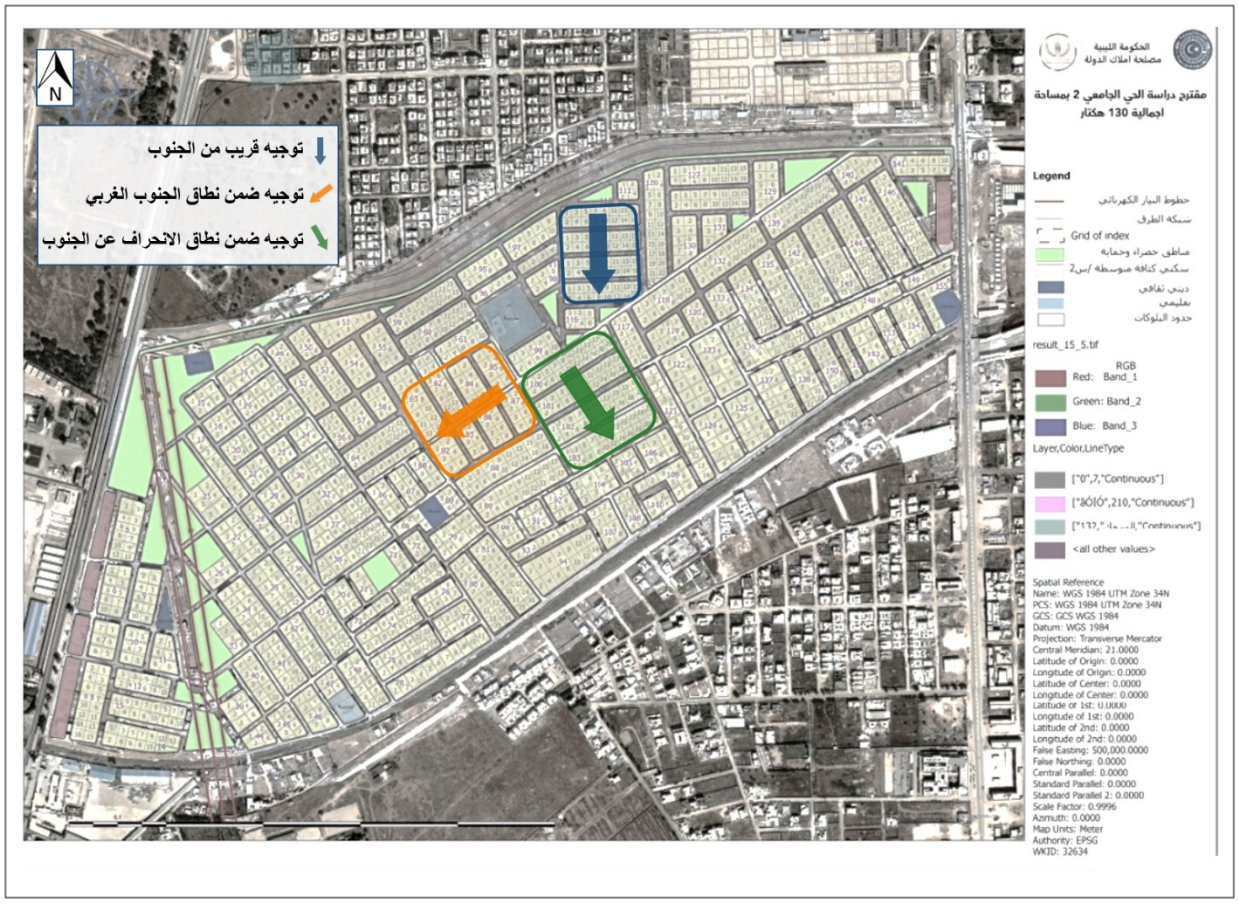
وتجدر الإشارة إلى أن زاوية الميل المثلى 29°، تم تحديدها اعتمادا على نتائج التحليل الرقمي باستخدام PVGIS، الذي يأخذ في الحسبان عدة عوامل مثل مسار الشمس الفعلي والإشعاع الشهري السنوي وزوايا الميل المختلفة، وهو يعكس الأداء النظري للنظام في ظل الافتراضات المدخلة. كما تتفق هذه النتيجة مع دراسة ليبية أشارت إلى زاوية مثلى تبلغ 28° [4].

تتحقق حالة الأداء المثالي بشكل أوضح خلال منتصف النهار، عندما تكون أشعة الشمس قادمة من الاتجاه الجنوبي وفي أعلى موضع لها من حيث الشدة والارتفاع. في هذه الحالة، تستفيد الألواح الشمسية بشكل أفضل عند توجيهها نحو الجنوب. أما في حالة ابتعاد التوجيه عن هذا الاتجاه، يقل تأثير الشمس على الإنتاج، كما يظهر في حالة التوجيه الجنوب الغربي،

حيث تكون الشمس أقل ارتفاعا ومتجهة نحو الغروب، مما يقلل كمية الإشعاع المستقبل. تمثل هذه الحالة أقل كفاءة مقارنة بالتوجيه الجنوبي، لذلك تصبح زاوية الميل عاملا أكثر تأثيرا لتحقيق أفضل أداء ممكن ضمن ظروف إشعاع أقل. ويمكن النظر إلى اختيار زاوية الميل المثلى في هذه الحالة كوسيلة لتعويض الانحراف عن التوجيه الأمثل.

تشير نتائج الدراسة إلى أن زاوية الميل المثلى تقع بين 28°–31° عند التوجيه الجنوبي، مع أداء جيد ضمن نطاق أوسع 25°–32°. يشير الفرق البسيط في الحصيلة الإنتاجية بين التوجيهين إلى أن الانحراف عن الجنوب يظل أيضا ضمن نطاق أداء مقبول. فوفق العديد من الدراسات، الانخفاضات التي تقل عن 5٪ مقارنة بالحالة المثلى يمكن اعتبارها ضمن حدود المجال المقبول في تطبيقات النظام [9]. يمثل هذا الفرق حوالي 70 kWh سنويا لكل kWp من القدرة المركبة، وهو فرق محدود نسبيا، مما يشير إلى أن الانحراف المعتدل عن التوجيه الجنوبي لا يؤدي إلى خسارة كبيرة في المحصلة السنوية. تعكس هذه النتائج إمكانية اتخاذ قرارات توجيه المبنى المتأثرة بالقيود التخطيطية والمعمارية، دون القلق من فقدان كبير في الأداء الطاقي، ضمن حدود الانحراف المدروسة (حتى +45° نحو الجنوب الغربي).

وللتحقق من قابلية تطبيق النتائج ضمن سياق تخطيطي واقعي، تم إسقاط مخرجات التحليل الرقمي على مخطط معتمد لمقترح الحي الجامعي 2 بالمدينة المدروسة، كما هو موضح في الشكل رقم 7، ويعكس تنوع التوجيه في المخطط تأثير شبكة الطرق على توجيه القطع، مما يبرز أهمية مراعاة البعد الطاقي عند تخطيط الأحياء السكنية وليس فقط على مستوى المبنى.




الشكل رقم 7. مخطط الحي الجامعي 2 بمدينة بنغازي مع إبراز اتجاهات التوجيه

يمثل الشكل رقم 7 مخططا معتمدا يوضح التكوين التخطيطي للحي، والذي ينتج عنه تنوع في اتجاهات القطع السكنية تبعا لشبكة الطرق. تم اختيار ثلاث عينات من المخطط تمثل أنماطا مختلفة من التوجيه، حيث تعكس العينة الأولى توجيها قريبا من الاتجاه الجنوبي، بينما تمثل العينة الثانية توجيها ضمن نطاق الجنوب الغربي بانحراف تقريبي عن الجنوب، في حين تمثل العينة الثالثة حالة ضمن نطاق الانحراف الجزئي عن الاتجاه الجنوبي.

وبالاستناد إلى نتائج التحليل الرقمي، تحقق العينة ذات التوجيه القريب من الجنوب الأداء الأمثل، بإنتاج سنوي يقارب 17931 kWh عند زاوية ميل 29°. أما العينة الواقعة ضمن نطاق الجنوب الغربي، فتقع ضمن فئة الأداء الجيد، مع إنتاج سنوي يقارب 17237 kWh، أي بانخفاض يقدر بحوالي 3.9٪ مقارنة بالحالة المثلى. في حين يتوقع أن تحقق العينة الثالثة إنتاجا سنويا يقع بين القيمتين السابقتين، وذلك تبعا لدرجة الانحراف عن الاتجاه الجنوبي، مما يعكس مرونة في الأداء ضمن هذا النطاق.

تمثل هذه النتائج مؤشرا تخطيطيا عاما قابلا للتعميم ضمن حدود السياق الحضري المدروس، يستخدم لدعم اتخاذ القرار في توزيع الكتل السكنية، دون أن يمتد إلى مستوى التصميم التفصيلي لكل قطعة على حدة، بل يعد أداة توجيهية لتقييم ملاءمة التوجيه من منظور إنتاج الطاقة على مستوى النسيج العمراني.

### *1.5. الدلالات المعمارية*

تظهر النتائج أن دمج المنظومة الشمسية في المباني بموقع الدراسة يمثل خيارا تصميميا فعالا ضمن السياق الجغرافي. وعلى الرغم من أن التوجيه الجنوبي يحقق أعلى إنتاج سنوي، فإن الانحراف نحو الجنوب الغربي يؤدي إلى انخفاض طفيف، مما يعكس درجة من حرية التوجيه للمبنى. كما يتبين أن زاوية الميل المثلى للتوجيه الجنوبي تقع قرب 29°، مع بقاء الأداء مرتفعا ضمن نطاق أوسع (25°–32°). ويتيح ذلك دمج الألواح ضمن أسطح المباني دون قيود هندسية صارمة، مع تحقيق توازن بين الكفاءة الطاقية والاعتبارات التشكيلية. ويمنح هذا النطاق المرن المجال أمام حلول تصميمية متنوعة، مثل الأسطح المائلة أو المنحنية، مع الحفاظ على مستويات إنتاج مرتفعة.

## 6. التوصيات

في ضوء النتائج المتحصل عليها، يمكن طرح عدد من التوصيات التصميمية لدمج الألواح الشمسية في المباني بمنطقة الدراسة:

1. **أولوية التوجيه الجنوبي**

   يفضل توجيه الضلع الأطول للمبنى نحو الجنوب لتعظيم إنتاجية الطاقة. توضح النتائج أن التوجيه الجنوبي يوفر أعلى إنتاج سنوي (~17931 kWh عند زاوية ميل 29°).

2. **زاوية الميل المثلى للتوجيه الجنوبي**

   اعتماد زاوية ميل للألواح تتراوح بين 28° و31° لتحقيق أعلى إنتاج سنوي للطاقة.

3. **مرونة التوجيه عند القيود المعمارية**

   يمكن اعتماد التوجيه الجنوب الغربي كخيار بديل مع الحفاظ على مستويات إنتاج مقبولة (~17237 kWh )، مما يعكس مرونة تصميمية حتى عند انحراف يصل إلى ±45° عن الجنوب.

4. **تعديل زاوية الميل لتعويض الانحراف عن الجنوب**

   يمكن ضبط زاوية الميل عند الانحراف عن التوجيه الأمثل لتعويض الانخفاض الطفيف في الإنتاج.

5. **دمج الألواح في المراحل التصميمية المبكرة**

يفضل تحديد وضعية الألواح منذ المراحل الأولى للتصميم لضمان تكامل معماري وطاقي أفضل، وتقليل القيود لاحقا.

6. **تكييف التصميم مع التشكيلات المعمارية المختلفة**

يمكن تركيب الألواح على أسطح مستقيمة أو منحنية، مع مرونة اختيار زاوية الميل ضمن النطاق الأمثل، مما يدعم الابتكار المعماري دون فقدان كبير لكفاءة الطاقة.

7. **دعم التوجه البيئي المستدام**

تشجيع دمج الألواح ضمن التصميم المعماري للمباني الجديدة والقائمة، مع تعزيز التوعية المجتمعية وتطوير السياسات المحلية لتسهيل التبني الفعلي لهذه التقنية.

## 8 الخاتمة

أظهرت نتائج الدراسة أن زاوية ميل 29° عند التوجيه الجنوبي تحقق أعلى إنتاج سنوي للطاقة (17931 kWh)، وتتوافق تقريبا مع خط العرض الجغرافي للمدينة (≈32° شمالا). أما في حالة التوجيه الجنوب الغربي، فقد سجلت زاويتا 24° و25° أعلى إنتاجية (17237 kWh سنويا)، بفارق يبلغ نحو 694 kWh مقارنة بالحالة المثلى. يتضح من التحليل أن الانحراف عن الاتجاه الجنوبي بزاوية تصل إلى 45° يؤدي إلى انخفاض محدود في الإنتاج، مما يعكس درجة من المرونة عند تحديد زاوية انحراف المباني. تؤكد هذه النتائج أهمية دمج الاعتبارات الطاقية في المراحل المبكرة من التصميم، وتكمن قيمة الدراسة في توفير نطاقات تصميمية كمية قابلة للاستخدام المباشر في دعم القرار المعماري دون الحاجة إلى نماذج حسابية معقدة. ركزت الدراسة على تأثير التوجيه وزاوية الميل دون احتساب التظليل أو الجوانب الاقتصادية، مما يفتح المجال لدراسات مستقبلية أكثر شمولا. تؤكد الدراسة أن دمج الأنظمة الكهروضوئية في مباني المدينة يمثل خيارا تصميميا قابلا للتطبيق وذا جدوى طاقية مرتفعة، مع إمكانية تحقيق توازن بين متطلبات التشكيل المعماري وكفاءة إنتاج الطاقة.

## المراجع:


[1] B. Aldeeb, M. Bahmi and W. Aldeeb, “The Future of Solar Energy in Libya: Reality, Challenges and Future Opportunities ”, BSJ, vol. 7, no. 20, pp. 359–365, Nov. 2025, https://journal.su.edu.ly/index.php/bayan/en/article/view/3641.

[2] Saad, M. ben Saleh and A. Al-Fellah, “EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE SOLAR ENERGY POTENTIAL IN THE GULF OF LIBYA,” International Journal of Applied Mathematics, vol. 38, no. 7s, pp. 472–487, Oct. 2025, doi: https://doi.org/10.12732/ijam.v38i7s.494.

[3] Y. Kassem, H. Camur, and O. A. M. Abughinda, “Solar Energy Potential and Feasibility Study of a 10MW Grid-connected Solar Plant in Libya,” Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 10, no. 4, pp. 5358–5366, Aug. 2020, doi: https://doi.org/10.48084/etasr.3607.

[4] Teyabeen and F. Mohamed, “Estimation of the Optimum Tilt Angle of Solar PV Panels to Maximize Incident Solar Radiation in Libya,” Energies, vol. 17, no. 23, pp. 5891–5891, Nov. 2024, doi: https://doi.org/10.3390/en17235891.

[5] H. Tlijani, A. Aissaoui, and R. B. Younes, “Optimization of tilt angle for solar panel: Case study Tunisia,” Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 8, no. 3, p. 762, Dec. 2017, doi: http://doi.org/10.11591/ijeecs.v8.i3.pp762-769.

[6] H. D. Kambezidis and B. E. Psiloglou, “Estimation of the Optimum Energy Received by Solar Energy Flat-Plate Convertors in Greece Using Typical Meteorological Years. Part I: South-Oriented Tilt Angles,” Applied Sciences, vol. 11, no. 4, p. 1547, Feb. 2021, doi: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1547.

[7] M. Guo et al., "Optimal Tilt Angle and Orientation of Photovoltaic Modules Using HS Algorithm in Different Climates of China," Applied Sciences, vol. 7, no. 10, p. 1028, Oct. 2017, doi: https://www.mdpi.com/2076-3417/7/10/1028.

[8] H. Azaioud, J. Desmet, and L. Vandevelde, "Benefit Evaluation of PV Orientation for Individual Residential Consumers," Energies, vol. 13, no. 19, p. 5122, Oct. 2020, doi: https://www.mdpi.com/1996-1073/13/19/5122.

[9] M. Božiková et al., "The Effect of Azimuth and Tilt Angle Changes on the Energy Balance of Photovoltaic System Installed in the Southern Slovakia Region," vol. 11, no. 19, pp. 8998–8998, Sep. 2021, doi: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/19/8998.

[10] European Commission, "JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission," Europa.eu, Jan. 11, 2016. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html.

[11] D.-A. Sima, E. Tudor, L.-A. El-Leathey, G. Cîrciumaru, and M.-G. Matache, "Increasing Photovoltaic Systems Efficiency Through the Implementation of Statistical Methods," Applied Sciences, vol. 15, no. 10, p. 5300, May 2025, doi: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/10/5300.

[12] P. Dobos, "PVWatts Version 5 Manual," Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2014. https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62641.pdf.