Engineering Research Journal
journal homepage: https://erj.journals.ekb.eg/

تطبيقات العمارة المستدامة في المطارات لإنتاج طاقة كهربائية نظيفة (دراسة حالة مطار القاهرة الدولي)

Sustainable Architecture Applications in Airports To Produce Clean Electric Energy(Case Study of Cairo International Airport)

Ashraf Almahdawy[1], Mohamed A. Elnawawy[1,*]

[1] Architecture Department, Faculty of Engineering Mataria, Helwan University
[*]Corresponding author E-mail: m.a.elnawawy@m-eng.helwan.edu.eg

الملخص

في ظل التسارع المستمر للعولمة والتطور التكنولوجي، تزداد أهمية الطاقة يوماً بعد يوم. ومع الاستنزاف السريع لمصادر الطاقة الأحفورية وما تسببه من أضرار بيئية، برزت حاجة ملحة إلى البحث عن بدائل نظيفة ومستدامة. ويُنظر إلى انبعاثات هذه المصادر كعامل رئيسي في تغير المناخ والظواهر الطبيعية المتطرفة التي باتت أكثر تكراراً، ما جعل قضية الاحتباس الحراري تحظى باهتمام عالمي واسع. وقد بات واضحاً أن المؤسسات تولي اهتماماً متزايداً بإدارة الطاقة وتحقيق الاستدامة، لما لذلك من أثر إيجابي في تعزيز صورتها أمام العملاء والمجتمع. ونظراً لأن المطارات تُعد من المنشآت ذات الاستهلاك المرتفع للطاقة، فقد تناول هذا البحث دراسة إمكانية استخدام مصادر الطاقة المتجددة في هذا القطاع الحيوي.

تم اختيار مطار القاهرة الدولي كدراسة حالة افتراضية ، وذلك نظراً لمساحته الكبيرة(37 كيلومتر مربع،) وتعدد صالاته(يضم ما لا يقل عن 5 مبانٍ رئيسية للركاب، وكل مبنى يحتوي على عدة صالات، ليصل عدد الصالات الإجمالي إلى أكثر من 10 صالات بين سفر ووصول موزعة على المباني المختلفة) ومدارجه (ثلاثة مدارج رئيسية لإقلاع وهبوط الطائرات)، مما يؤدي إلى إهدار كميات كبيرة من الطاقة الحركية غير المستغلة. يهدف البحث إلى استكشاف سبل الاستفادة من هذه الطاقة وتحويلها إلى طاقة نظيفة تساهم في دعم مبادئ الاستدامة في المباني العامة. كما يستعرض البحث التحديات المتعلقة بهدر الطاقة، ويقترح حلولاً وتقنيات لتقليل الاستهلاك وتحقيق إنتاج كهرباء نظيفة، إلى جانب تقليل التكاليف والانبعاثات الكربونية.

خلصت الدراسة إلى ضرورة التوسع في استخدام نظم الطاقة المتجددة في المطارات كخطوة أساسية نحو تحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية.

Abstract

In the context of accelerating globalization and technological advancement, the role of energy has become increasingly critical. The rapid depletion of fossil fuel resources and their detrimental environmental impacts have underscored the urgent need for clean and sustainable energy alternatives. Emissions resulting from the use of fossil fuels are considered a major contributor to climate change and the growing frequency of extreme

DOI: 10.21608/erj.2025.362646.1211
Received 04 March 2025; Received in revised form 03 August 2025; Accepted 09 August 2025
Available online 01 September 2025

natural phenomena. Consequently, global attention has increasingly focused on addressing the issue of global warming. Institutions worldwide are placing greater emphasis on energy management and sustainability, recognizing their importance in enhancing institutional reputation and fulfilling environmental responsibilities. Given their high levels of energy consumption, airports represent a key sector in which sustainable practices can have a significant impact. This research explores the potential for integrating renewable energy systems within airport infrastructure.

Cairo International Airport was selected as a hypothetical case study due to its extensive area—approximately 37 square kilometers—its numerous terminals (comprising at least five main passenger buildings, each housing multiple halls for arrivals and departures, totaling more than ten halls), and its three primary runways for aircraft operations. These features contribute to the loss of substantial quantities of unutilized kinetic energy. The objective of this study is to investigate viable methods for capturing and converting such energy into clean electricity, thereby supporting sustainable development goals in public infrastructure. The study also addresses the challenges associated with energy waste and proposes innovative technologies and strategies aimed at reducing consumption, generating clean power, lowering operational costs, and minimizing carbon emissions.

The findings highlight the necessity of expanding the implementation of renewable energy systems in airports as a foundational step toward achieving both environmental and economic sustainability.

Keywords: المطارات , الطاقة الشمسية , طاقة الرياح , الطاقة الحركية المفقودة , البلاطات الكهروضغطية

1 فرضية البحث Research Hypothesis

أن المطارات تشغل مساحات واسعة من الأراضي، وتُعد من أكبر المنشآت التي تستوعب أعدادًا هائلة من المسافرين يوميًا، فضلاً عن احتوائها على مجموعة كبيرة من الخدمات المتنوعة. ونتيجة لذلك، فهي بيئة غنية بالطاقة الحركية، سواء الناتجة عن حركة الأفراد أو حركة المركبات وحركة الطائرات على المدارج أثناء الإقلاع والهبوط، إضافة إلى المساحات الكبيرة غير المستغلة علي جانبي مدارج الطائرات بما لايتعارض مع حدود الرؤية لها .

إذا تم توجيه هذه الطاقات الحركية واستثمارها بشكل فعّال لتحويلها إلى طاقة كهربائية، فسيكون لدينا مصدر ضخم لتوليد الطاقة النظيفة والمتجددة، مما يفتح آفاقًا واسعة نحو تحقيق الاستدامة في هذه المنشآت الحيوية.

2 منهجية البحث Research Methodology

1 .دراسة نظرية لتوضيح حجم الطاقات الحركية المفقودة في المطارات.
2 .دراسة تحليلية لمجالات توليد الكهرباء و مبادئ العمارة المستدامة.
3 .دراسة تطبيقية لتوظيف مبادئ العمارة المستدامة على الفراغات المختلفة للمطارات لخفض استهلاك الطاقة و إنتاج الطاقة الكهربائية النظيفة المتجددة.

3 مقدمة البحث Introduction

من حيث حجم البناء و (megaprojects) المطارات من المنشآت المعمارية بالغة الضخامة المساحة الأرضية المستغلة, و ذلك باعتبار تعدد العناصر المعمارية بتعدد وظائفها و مقدار الخصوصية الإدارية والأمنية التي تتطلبها كل وظيفة [1] , إلى جانب العدد الهائل اللانهائي من الأفراد المستخدمين لها ما بين مسافرين مغادرين و مسافرين قادمين, الى جانب ما يتطلبه ذلك من خدمات خاصة براحة المستخدمين و خدمات تخص احمالهم و خدمات من جهات أمنية تعمل على أمنهم و أمن الدولة التي يقام بها المطار, و خدمات إدارية

تخص إدارة الجنسية والجوازات, و كذلك كل مايخص مجال الرعاية و الحماية الصحية و الحجر الصحي, و غيرها من خدمات تجارية و أسواق حره لمختلف السلع.
و بالتالي فهي من أكبر المشروعات المعمارية إستهلاكا للطاقة باعتبار ما سبق توصيفه الى جانب كونها منشآت مستمرة في العمل طوال ال 24 ساعة في اليوم على مدار العام طوال دورة حياتها و هنا تكمن المشكلة في العبئ الإقتصادي الناتج من تشغيلها و قد أصبح لا غنى عن وجودها في كافة البلدان سواء كانت بلدانا ذات اقتصاد قوي أو بلدانا ذات اقتصاد ضعيف[2].

4 أولآ: الدراسة النظرية - الطاقات المفقودة داخل المطارات

في هذا الجزء سوف يتم دراسة حالة مطار القاهره الدولي انظر شكل (1) لتحليل الطاقات الحركية والمفقوده واستغلالها في توليد طاقة كهربائية متجددة.
اسباب اختيار مطار القاهرة الدولي ليكون نموذجاً لدراسة الحالة، وذلك لما يتميز به من وجود مساحات شاسعة وتنوع في الصالات والمدارج، الأمر الذي ينتج عنه كميات كبيرة من الطاقة الحركية المهدرة وغير المستغلة والتي سوف توضح من حلال الدراسات في البحث كدراسة افتراضية .

شكل 1 . مطار القاهره الدولي مبني ركاب 2 الجديد.
المصدر: https://www.cairo-airport.com/en-us/، تاريخ الدخول: 2 يناير 2025.

4.1 مراحل إنشاء مطار القاهرة الدولي

يبدأ تاريخ مطار القاهرة الدولي في الأربعينات من القرن الماضي عندما تم تأسيس قاعدة القوات الجوية الأمريكية على بعد خمسة كيلومترات من مطار الماظة لخدمة التحالف خلال الحرب العالمية الثانية, ثم غادرت القوات الأمريكية القاعدة بنهاية الحرب, و في عام 1945 استحوذت هيئة الطيران المدني على القاعدة وخصصتها للطيران المدني الدولي و تم تخصيص مطار ألماظة للرحلات الداخلية.
جدير بالذكر أن حركة الملاحة الجوية خلال تلك الفترة ، وخاصة في عام 1946 ، كانت 200.000 راكب سنوياً. وبلغت قدرة المطار ساعة الذروة 200 راكب في الساعة, أما في عام 1955 تم اختيار موقع المبنى الجديد بين المدرجين ، شرق القاهرة، ثم بدأت .أعمال البناء في عام 1957 وتم افتتاحها في 18 مارس 1963 مع ارتفاع معدلات النقل الجوي إلى 55 ٪ في السبعينيات ، تم بناء قاعة ثانية في 1977 1979 .وثالثة أضيفت في عام 1980 في الثمانينيات ، ارتفعت معدلات النقل الجوي مرة أخرى وأصبح المبنى الثاني ضرورة. [3]
تم بناء مبنى الركاب رقم 2 مع قاعتي الوصول والمغادرة وقاعة عبور ومدرج لخدمة 5 مليون مسافر في السنة.. مع زيادة حركة النقل الجوي تم العمل على تطوير مرافق المطار, وبالتالي بدأت شركة مطار القاهرة في مبني رقم 3. تنفيذ خطة رئيسية للتجديد والتطوير في قاعة الترانزيت في المبنى رقم 1 .وقد تم الانتهاء منها بحلول نهاية عام 2003 بتكلفة بلغت 12 مليون دولار أمريكي انظر شكل(2). [4]

شكل 2 . الشكل يوضح الموقع العام لمطار القاهرة الدولي و الذي يظهر مدارج الطائرات و الكتل البنائية و المسطحات الشاسعه الغير مستغلة التي تحيط بالمطار و تتخلله

المصدر : https://sciencephotogallery.com/featured/cairo-international-airport-geoeyescience-photo-library.html?product=wood-print
تاريخ الدخول: 5 يناير 2025.

4.2 احصائيات مساحية هندسية لمطار القاهره الدولي

تبلغ مساحته حوالي 40 مليون متر مربع،خدم المطار سنة 2008 م حوالي 14,360,175 راكبًا وأكثر من 138,000 رحلة جوية ، يضم المطار ثلاثة مبانٍ للركاب مبنى رقم 1، ومبنى رقم 2، ومبنى رقم 3، ومقر ومركز عمليات الشركة القابضة لمصر للطيران والشركات التابعة لها، ومقر وزارة الطيران المدني المصرية، ومقر الشركة المصرية القابضة للمطارات والملاحة الجوية والشركات التابعة لها، ويضم المطار أيضا مقر السرب الرابع التابع للقوات الجوية المصرية.

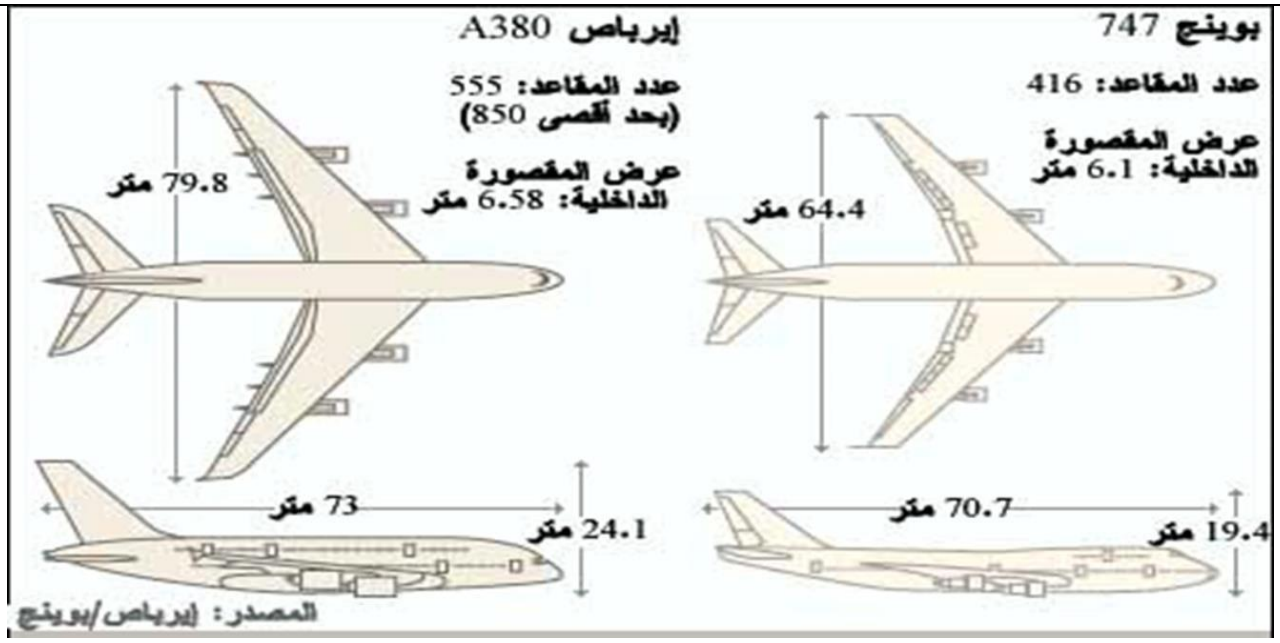
و المطار به ثلاثة مدارج لإقلاع وهبوط الطائرات :

- المدرج الأول طوله 3300 متر وعرضه 60 متر اً في الاتجاه الشمالي للمطار .
- المدرج الثاني طوله 4000 متر وعرضه 60 مترا في الاتجاه الجنوبي للمطار .
- المدرج الثالث طوله 4000 مترا وعرضه 65 مترا في الاتجاه الجنوبي للمطار .

وعادة ما تتراوح أبعاد المدارج في المطارات بشكل عام بحيث يبدأ طولها من 245 م804 قدم وعرضها 8 م (26 قدم) للمطارات الصغيرة ذات الطيران العام إلى مدارج ذات طول 5,500 م (18,045 قدم) وعرضها80 م (general aviation) (262 قدم) للمطارات الدولية التي تستوعب الطائرات المدنية الضخمة.

و بعمل عملية حسابية مبدأية بسيطة للمسطحات التي ذكرناها نجد أنه لدينا ما يقرب من11300 متر طولي من مدارج الطائرات, و بنظرة تحليلية من الخرائط نجد ان المدرج يحتاج مساحة حماية بعرض حوالي 300 م من يمين و يسار المدرج, و هذا يعني أنه لدينا مساحة تقريبية في حدود 6,780,000 م 2 من المسطحات المفتوحة الغير مستغلة . 8 كم 2 و قد تصل في بعض المطارات إلى 8,000,000 م 2 . والتي تكون علي جانبي المدرج مما لا تمنع الرؤية للطائرات ويمكن استغلالها جيدا في توليد الطاقة الكهربائيه .

شكل 3 . الشكل يوضح المساحات الشاسعة علي جانبي مدارج الطائرات بشكل عام وهي حتمية لتأمين حركة الهبوط و الإقلاع.
المصدر : https://photos.com/featured/airport-runway-on-approach-groveb.html، تاريخ الدخول: 5 يناير 2025.



شكل 4 . الشكل يوضح ان اقصى عرض للطائرة يصل إلى 80 م (262 قدم), والبعد الصافي أسفل جناح الطائرة عند طرف الجناح يكون في حدود 5م و تختلف باختلاف أنواع الطائرات و أحجامها و لكنها لا تقل عن 3م
المصدر : http://news.bbc.co.uk/hi/arabic/world_news/newsid_4489000/4489315.stm، تاريخ الدخول: 20 يناير 2025.

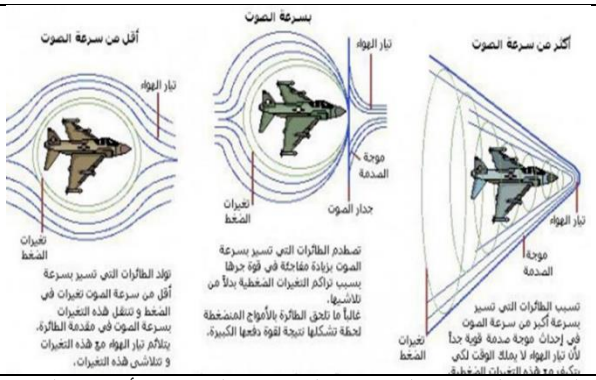
4.3 الطاقة الحركية المفقوده داخل المطارات

تُعد المطارات بيئة غنية بالطاقة الحركية المهدرة على نطاق واسع، وذلك بالنظر إلى الأعداد الهائلة من المسافرين والعاملين الذين يتنقلون بشكل مستمر داخل مرافقها. ويضاف إلى ذلك الحركة الكثيفة للطائرات خلال الإقلاع والهبوط على المدارج، إلى جانب حركة المركبات والحافلات التي تُستخدم لدعم عمليات الطيران. وتتميز هذه الأنشطة الحركية بالاستمرارية على مدار الساعة وطوال أيام الأسبوع والسنة، ما يجعلها مصدرًا ثابتًا للطاقة غير المستغلة[5].

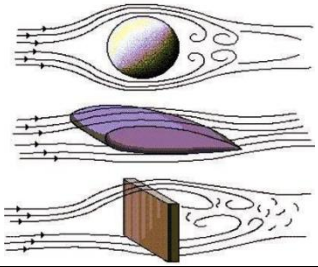
وتُبذل هذه الطاقة الحركية في سياق مهام يومية بسيطة في ظاهرها لكنها أساسية في وظيفتها، مثل إجراءات التفتيش الأولي للمسافرين وأمتعتهم، وإبراز جوازات السفر، وحجز مقاعد الطائرة، ووزن وتسليم الحقائب، والتنقل إلى مناطق الانتظار ثم إلى بوابات الصعود للطائرة. ورغم بساطة هذه العمليات من الناحية الإجرائية، فإنها تتطلب كميات كبيرة من الطاقة الحركية التي لا يتم استثمارها، مما يسلط الضوء على الحاجة إلى آليات مبتكرة لتحويل هذه الطاقة إلى مصادر مفيدة وفعالة.[6]

شكل 5 . الشكل يوضح الفراغات الخارجية و الداخلية و توضح المسطحات الشاسعة من الأرضيات الداخلية و الخارجية و كذلك حركة المركبات و الأفراد.
المصدر : https://www.mid-day.com/news/world-news/article/egypt-denies-allegations-it-shut-airspace-23344413، تاريخ الدخول: 12 يناير 2025.

أن حركة الطائرة أثناء الإقلاع أو الهبوط تتطلب السير على أرضية المدرج لمسافات قد تصل إلى خمسة كيلومترات أو أكثر، تليها مسافات إضافية للوصول إلى مناطق إنزال الركاب خارج نطاق المدرج، مما يضيف مزيدًا من استهلاك الطاقة الحركية ضمن عمليات التشغيل اليومية للمطار.
و قد تكون هذه الطاقات استنزافية استهلاكية لطاقة الإنسان و كذلك طاقة الوقود المحرك لكل هذه الحركات الميكانيكية للطائرات وأجهزة تشغيل المطارمن إنارة و بوابات إلكترونية و أجهزة تدقيق و تفتيش و أنظمة تكييف هواء, الى جانب المسطحات الشاسعة لإستيعاب هذه الطاقات الحركية سواء في الفراغات الداخلية لمبنى المطار أو الفراغات الخارجية. و إذا كنا نستطيع الإستفادة من كل هذه الطاقة الحركية الناتجة من حركة الأفراد و السيارات و الطائرات لإنتاج الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل اجهزة المطار, فإن عدم الإستفادة منها يجعلها طاقة حركية مفقودة[7].



شكل 6 . الشكل يوضح ان حجم الكتلة الهوائية المندفعة على سطح المدرج و المساحة الأرضية التي يغطيها هذا الهواء المندفع بنفس السرعة التي تندفع بها الطائرة (طاقة حركية مفقودة)
المصدر : https://www.aiaa.org/detail/lesson/aerospace-micro-lesson-71، تاريخ الدخول: 12 يناير 2025.



شكل 7 . الشكل يوضح تيارات الهواء ذات السرعات العالية و الإتجاه الثابت نتيجة اندفاع الطائرة على المدرج
المصدر : https://ca.pinterest.com/pin/458170962062676275، تاريخ الدخول: 12 يناير 2025.

5 ثانياً: الدراسة التحليلية – مبادئ العمارة المستدامة **principles of sustainable architecture**

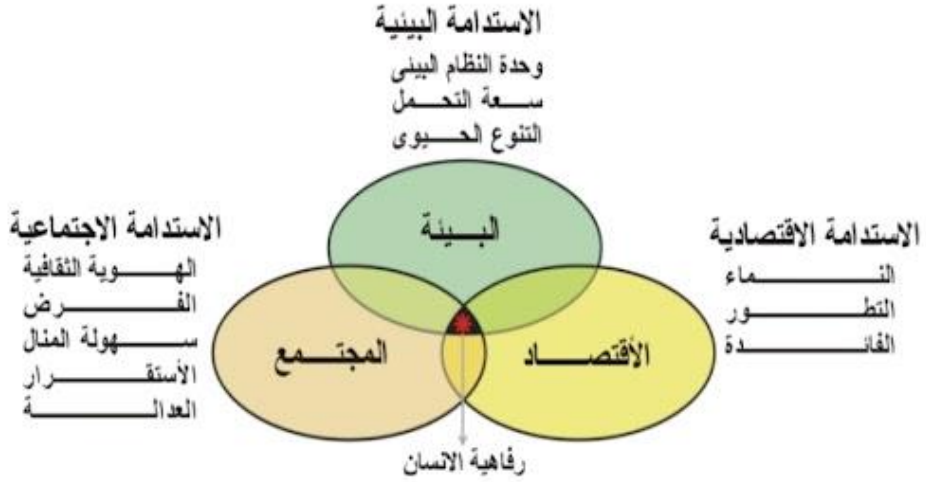
من خلال دراسات وأبحاث تمت سابقا نجد أن المبدأ العام الذي تقوم عليه العمارة المستدامة هو الحفاظ على موارد اليوم لأجيال الغد, ومن أهم هذه الموارد هي الموارد الحفرية لإنتاج الطاقة، فالمبني يجب أن يصمم ويشيد بأسلوب يتم فية تقليل الاحتياج للوقود بشكل عام,

و تقليل او منع استخدام الموارد الحفريه لإنتاج الطاقة الغيرمتجددة والاعتماد بصورة أكبر علي الموارد الطبيعية لإنتاج الطاقة المتجددة[8].
أشار تقرير المختبر الوطني للطاقة المتجددة في كولورادو إلى أنّ اعتماد تصميمات معمارية تراعي الخصائص المناخية المحلية، مع توظيف التقنيات المتاحة، يمكن أن يخفض استهلاك الطاقة بنحو 70 ٪ في المباني السكنية، و60 ٪ في المباني التجارية.
في تقرير صادر عن قسم الطاقة في المملكة المتحدة (إنجلترا) عام 1988، تم اقتراح أن تعتمد المملكة بنسبة 50% في استهلاكها للكهرباء على مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، والأمواج، والمياه الجارية، والكتلة الحيوية. كما أشار التقرير إلى إمكانية تقليل استهلاك الكهرباء من خلال استخدام الخلايا الشمسية الكهروضوئية، التي تولد الكهرباء مباشرة من ضوء الشمس. وبفضل التقدم التكنولوجي والاتجاه نحو الإنتاج الكبير، انخفضت تكلفة الكهرباء المولدة من الخلايا الشمسية بأكثر من 90% منذ عام 1980 وحتى تاريخ صدور التقرير.[2]
و بما أن الطاقة الحركية (نتيجة قوة الكهرباء أو قوة المواد البترولية) مستخدمة في كل مراحل البناء بداية من استخراج المواد الخام من الأرض مرورا بتجهيزها و اعدادها للبناء و حتى هدمها و اعادة تدويرها و إعادة استخدامها ثم أثناء دورة حياة المبنى, و بالتالي فإن من أهم مبادئ العمارة المستدامة هو (الحفاظ على الطاقة) و العمل على تقليل استخدام الوقود الإحفوري و الإعتماد بصورة أكبر على إنتاج الطاقة المتجددة.
ومع التوسع في تصنيع ألواح الخلايا الشمسية و إستمرار إنخفاض أسعارها, فإن دمجها مباشرة في واجهات و أسقف المبني بدلا من لصقها منفصلة أصبح من الممكن تعميمة ، من دمج الخلايا الشمسية في النوافذ الزجاجية (flachglas (فقد استطاعت شركة ألمانية (نصف الشفافة والتي تمد المكان بالضوء المفلتر أثناء توليدها للكهرباء[9]).

و مما سبق نستنتج أن مبادئ العمارة المستدامة تعتمد على:

- خفض إستهلاك الطاقة الكهربائية بشكل عام و ذلك من خلال
- خفض الإعتماد على الطاقة الكهربائية أثناء ساعات النهارو استخدام المعالجات المعمارية للغلاف الخارجي للمبنى من خامات تساعد على عدم نفاذية درجات الحرارة للتقليل من الجهد الكهربي لأجهزة تكييف الهواء, و الإعتماد على الإضاءة الطبيعية و التهوية الطبيعية.
- توليد و إنتاج الكهرباء من الطاقات المتجددة,أي أننا نبتعد عن الطاقات الأحفورية و نعتمد في انتاج الكهرباء من طاقة الشمس و كذلك من الطاقة الحركية الناتجة من الرياح و المجاري المائية و الأنشطة الحركية للإنسان.

- تفعيل مبدأ إعادة الإستخدام للعناصر المعمارية قد يكون هناك جهاز ما تخطى الفترة الزمنية لتشغيله و حان الوقت للإستغناء عنه في موقعه و لكن يمكن الإستفاده منه في موقع آخر يحتاج لقوة أقل أو أن يتم تفكيكه إلى أجزاء و إستخدام أجزاؤه في مهام أخرى, فعلى سبيل المثال فإن إطارات عجلات الطائرات يتم تبديلها بعد عدد بسيط من الرحلات و تستخدم الإطارات المستبدلة في بعض المعدات البنائية مثل اللوادر و الجرارات.
- تفعيل مبدأ إعادة التدوير لناتج هدم المنشآت يعتمد هذا المبدأ على استخدام العناصر التي انتهت فترة صلاحيتة استخدامها على شكلها الحالي بتحويلها إلى مواد أولية يتم إدخالها في خطوط انتاج لإعادة تشكيلها أودمجها مع عناصر أوليه أخري لإستحداث منتج جديد[5].



شكل 8 . الشكل يوضح انه تعتمد فكرة العمارة المستدامة على مبدأ إعادة التدوير
المصدر : https://www.archdiwanya.com/2022/01/blog-post_25.html، تاريخ الدخول: 18 يناير 2025.

6 ثالثا: الدراسة التطبيقية - تطبيق مبادئ العمارة المستدامة لإنتاج الطاقة الكهربائية

Applying the principles of sustainable architecture to produce electrical energy

تم ذكر في الجزء التحليلي لهذه الورقة البحثية أن مبادئ العمارة المستدامة تتلخص في النقاط التالية:

- خفض إستهلاك الطاقة الكهربائية بشكل عام .
- توليد و إنتاج الكهرباء من الطاقات المتجددة .
- تفعيل مبدأ إعادة الإستخدام للعناصر المعمارية .
- تفعيل مبدأ إعادة التدوير لناتج هدم المنشآت .

و حيث أن الورقة البحثية تهتم بإنتاج طاقة كهربائية نظيفة, فسوف نستعرض تطبيقات مبادئ العمارة المستدامة من خلال النقطة الثانية:

من الممكن توليد و إنتاج طاقة الكهرباء النظيفة (المتجددة) بإستخدام أربعة طرق:

- إستخدام ألواح الطاقة الشمسية .
- إستخدام التوربينات الهوائية .
- إستخدام حركة المياه .
- إستخدام حركة الإنسان.

و في الفقرات التالية سوف نستعرض كيفية الإستفادة من ثلاث طاقات و هي, الطاقة الشمسية و الطاقة الهوائية و طاقة حركة الإنسان, و تطبيقها على المطارات لإنتاج طاقة كهربائية نظيفة متجددة, حتى لا تكون المطارات عبئآ على محطات توليد الكهرباء.

6.1 إستخدام ألواح الطاقة الشمسية

- استخدام المسطحات الاراضي المحيطة بالمدرج وتغطيتها بالاواح الشمسية

نجد ان محطة "بنبان" لإنتاج الطاقة الكهربائية في أسوان في جنوب جمهورية مصر العربية أنها تحتل مساحة قدرها 37 كيلومتر مربع، و تضم40 وحدة لإنتاج الكهرباء، قدرة الوحدة الواحدة 50 ميجاوات، وعدد الألواح الشمسية المستخدمة فى الوحدة الواحدة 200 ألف لوحة، أى أن اللوح الشمسى الواحد قدرته 250 وات (* 7) إذن فإن المحطة تستطيع انتاج 2000 ميجاوات

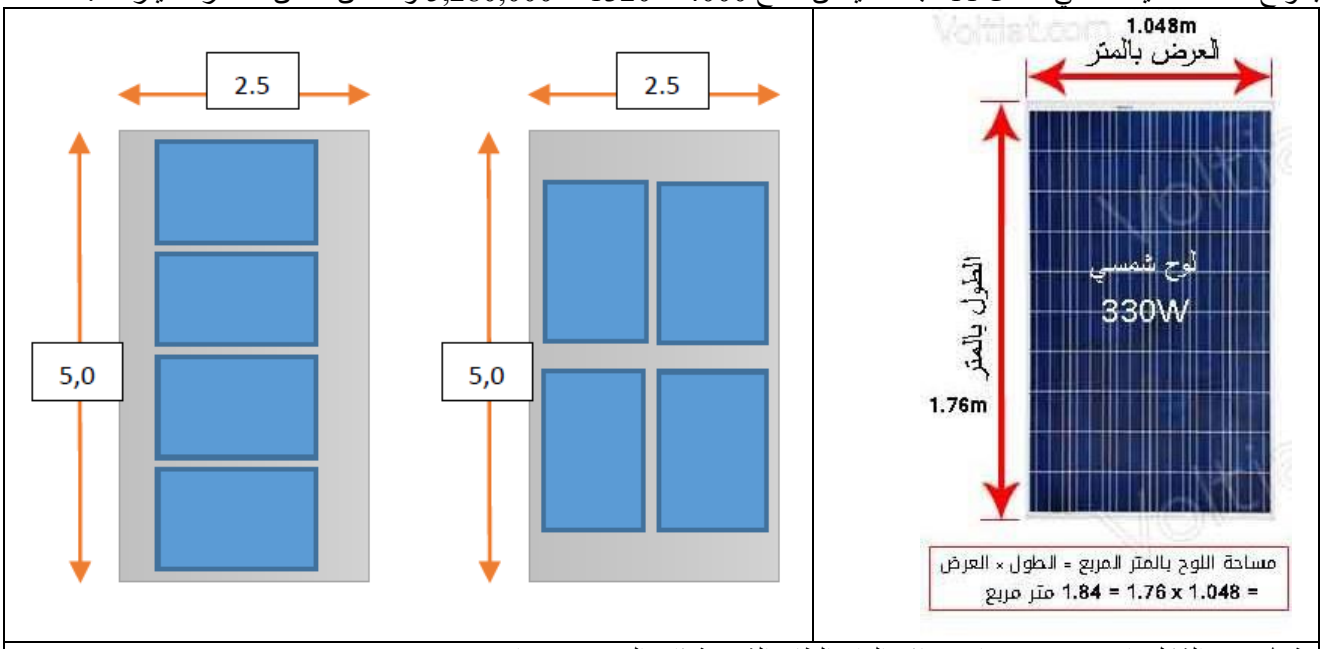
شكل 9 . الشكل يوضح محطة بنيان لتوليد الطاقة الكهربائية بواقع 2000 ميجاوات من الطاقة الشمسية
المصدر : https://www.presidency.eg/media/75370/8070 -image-2019-05-07-at-33132-pm-2-jpeg.jpeg، تاريخ الدخول: 18 يناير 2025.

وبالتالي فان الكم2 الواحد يستطيع انتاج 2000 ميجاوات / 37 كم2 = 54 ميجاوات تقريبا واذا رجعنا الي الدراسة النظرية نجد اننا ذكرنا ان المطار الواحد قد يوفر مساحات من الاراضي الغير مستغله تصل الي 8 كم2 اذن فان المطار الواحد يستطيع انتاج حوالي 54*8 = 432 ميجاوات اذا ما استغلينا مسطحات الاراضي المحيطه بمدراج الطائرات فقط , واذا نظرنا الي الكتبه المبنيه وأخذنا في دمج الالواح الشمسيه ضمن تصميم الكتله المعمارية فكم نستطيع انتاجه من الميجاوات حيث ان اللوح الواحد ينتج 250 وات .

شكل 10 . الشكل يوضح إذا تخيلنا المساحات الشاسعه الخالية من أي بناء و المحيطة بمدارج الطائرات و إذا تم إستغلالها و تغطيتها بألواح الطاقة الشمسية ف سوف نتخيل كمية الطاقة الهائلة التي نستطيع إنتاجها.
المصدر : https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/2014-GreenTechnology/6_Barrett_HMMH.pdf، تاريخ الدخول: 18 يناير 2025.

- استخدام مظلات السيارات وتغطيتها بألواح الطاقة الشمسية

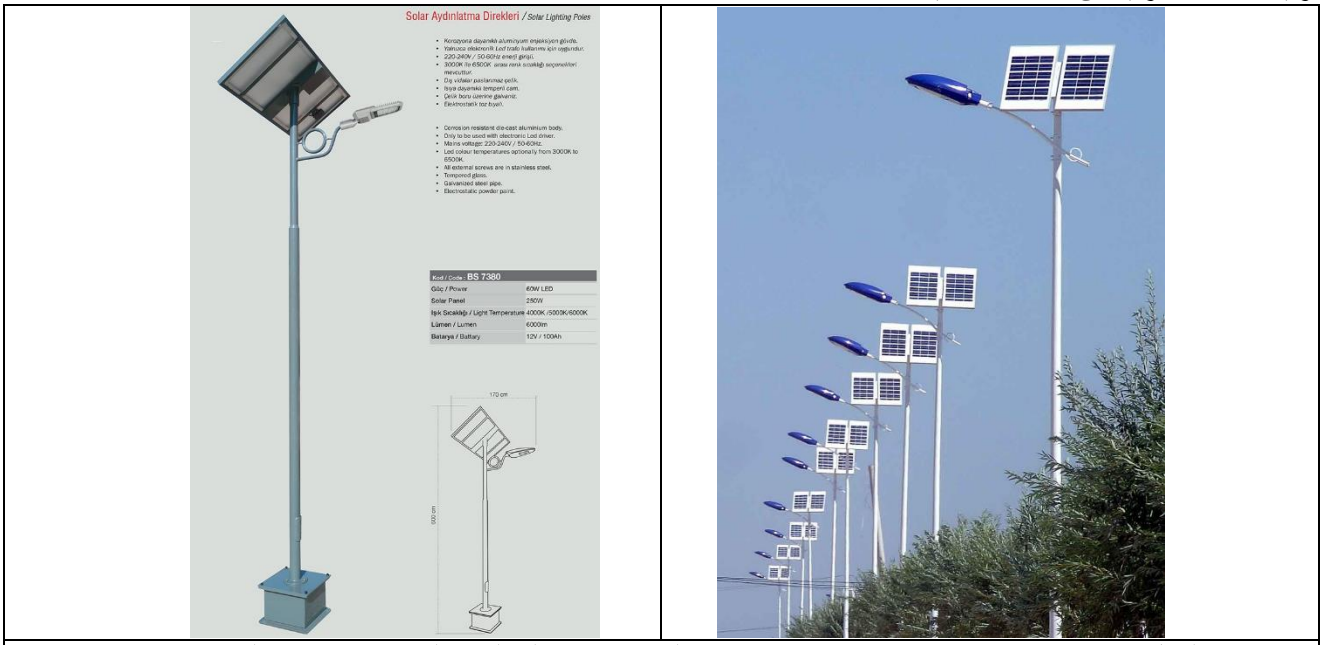
واذا تم تصميم مظلات من الالواح الشمسية لاماكن انتظار السيارات التي لا تقل عن 4000 مكان انتظار بمساحة 2.5م * 5م وتغطيتها بالواح طاقة شمسية كما في الشكل 11 نجد انه يمكن انتاج 4000 * 1320 = 5,280,000 وات من اماكن انتظار السيارات .



شكل 11 . الشكل (الايمن) يوضح احد نماذج الواح الطاقه الشمسية ذات القدره 300 وات
الشكل (الايسر) يوضح طريقتان لتغطية مكان انتظار سيارة واحدة بعدد اربعة الواح طاقة شمسية لانتاج 1320 وات (رؤية الباحث)
المصدر : من اعداد الباحث، 2025

- اعمدة الانارة

وهناك عنصر اخر هام جدا وهو أعمدة الاناره علي جانبي طرق السيارات داخل المطارات والتي يمكن استغلالها في الاعتماد علي توليد الطاقة الكهربية من الطاقة الشمسية .



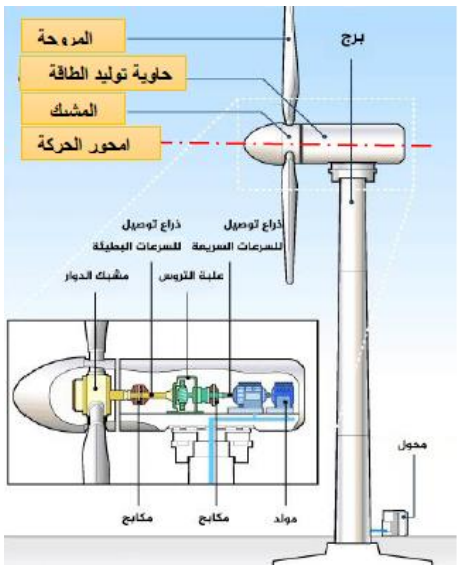
شكل 12 . الشكل (الايمن) يوضح استخدام اعمدة الاناره في طرق المطارات في توليد الطاقة الكهربائية من اشعة الشمس
الشكل (الايسر) يوضح احد امثلة اعمدة الاناره ذات الواح الطاقة الشمسية منتجة 250 وات من الطاقة الكهربائية
المصدر :https://turkeyana.com/wp-content/uploads/2017/05/solar-2.jpg ، تاريخ الدخول: 20 يناير 2025.

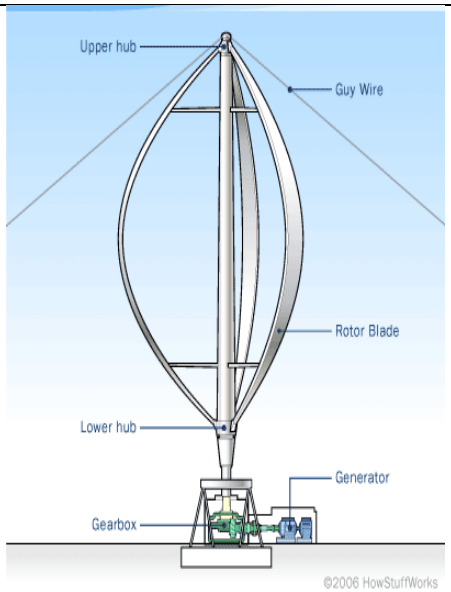
6.2 إستخدام التوربينات الهوائية

إن الهواء كغيره من المواد السائلة و الصلبة تتكون من جزيئات و لكنه ماده غازية غير مرئية, و تتحرك هذه الجزيئات سريعًا عندما يتحرك الهواء بسرعةٍ، على شكل رياحٍ, ونعني بالحركة الطاقة الحركية التي يُمكن التقاطها، تمامًا كالطاقة الكامنة وراء حركة المياه حيث يمكن التقاطها بواسطة التوربين في السد الكهرومائي Hydroelectric dam أما في حالة التوربين الهوائي wind-electric turbine فيتم تصميمه لالتقاط الطاقة الحركية للرياح .
و قد تختلف التوربينات في احجامها و إرتفاعاتها بل و في مكوناتها الداخلية لتسمح بسرعة دوران معينة لمروحة التوربين, و المروحة هي الجزء الذي يستقبل طاقة الرياح و يتحرك في حركة دائرية ناقلا هذه الحركة الى داخل أجزاء التوربين لتعمل على تحويل الطاقة الحركية الى طاقة كهربائية, و هناك التوربينات الرأسية و التوربينات الأفقية, و منها توربينات صغيرة الحجم مصممة لتكون مدمجة مع المنشآت بأحجام متناسبة و بها موانع ضوضاء, و كذلك هناك التوربينات الضخمة التي يتم تركيبها مستقلة في الأراضي الفضاء لتكون مزارع انتاج الطاقة.

الجدول (1) يوضح العلاقة بين قطر مروحة نقل الحركة مع حجم الطاقة المنتجة
المصدر: الباحث

الطاقة المنتجة (وات)	قطر المروحة (متر)
25	10
200	17
225	27
300	33
500	40
600	44
750	48
1000	54
1500	64
2000	72
2500	80





شكل 13 . الشكل (الايمن) يوضح التوربين الهوائي الافقي لتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح
الشكل (الايسر) يوضح التوربين الهوائي الرأسي لتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح
المصدر: https://anuchem.weebly.com/uploads/2/8/3/8/28382117/anueees_notes.pdf، تاريخ الدخول: 21 يناير 2025.

شكل 14 . الشكل (الايمن) يوضح توربين هوائي ذو محور تشغيل أفقي و مزود بزعنفه خلفيه تعمل على توجيه المروحة في مواجهة الهواء دائما مع اختلاف اتجاه مساراته.
الشكل (الايسر) يوضح مثالين لتوربينين هوائيين ذو محور تشغيل رأسي مع اختلاف في شكل و مساحة الريشة الدوارة بما يؤثر طرديا على سرعة الدوران و من ثم تختلف كمية الطاقة المنتجة.
المصدر :https://anuchem.weebly.com/uploads/2/8/3/8/28382117/anueees_notes.pdf، تاريخ الدخول: 21 يناير 2025.

تعتمد الفكرة المطروحه على استخدام التوربينات الهوائية صغيرة الحجم و المستخدمة فوق اسطح المنازل لتثبيتها على جانبي مدرج الطائرات لما سوف تتعرض له من تيارات هواء سريعة جدا نتيجة اندفاع الطائرات على المدرج هبوطا و إقلاعا. و إذا تخيلنا أن أطوال المدارج تتراوح ما بين 245 م إلى 5500 م فإننا نتخيل كم توربين يمكن تثبيته و كم من الطاقة يمكن إنتاجها[1].

شكل 15 . الشكلين يوضحان توربينات افقية ورأسية تعمل علي توليد الطاقة الكهربيه من الرياح وكذلك الطاقة الشمسية من الواح الطاقة الشمسية المثبته بها وهوا ما يؤكد علي ضرورة التكامل في الانظمة لتوليد اكبر قدر ممكن من الطاقات المفقوده داخل المطارات و بالتالي تكون مستغلة ليلا و نهارا و في كل الأحوال و الظروف المناخية .
المصدر: https://ar.bswlight.com/street-light/wind-solar-hybrid-power-system-solar-lamp.html ، تاريخ الدخول: 21 يناير 2025.

6.3 إستخدام حركة الإنسان (الحركة الانضغاطية علي البلاطات)

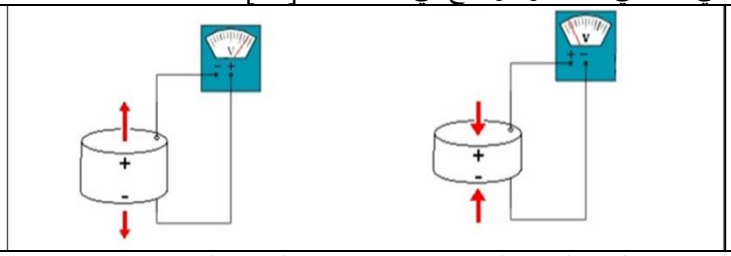
توليد الكهرباء من الطاقة الحركية، حيث تحول الاهتزازات إلى طاقة قابلة للاستخدام, ومن بين تطبيقات شركة ساوندباور ،أرضيات منتجة للطاقة من خلال حركة المشاة فوقها وخلايا طاقة تلتقط الطاقة الحركية عندما يتم الضغط على زر مثبت أسفلها. وتشكل اهتزازات الأرض والأزرار المضغوطة جزءا صغيرا فقط من الطاقة، ولكن شركة ساوندباور نجحت في ترجمتها إلى توليد فعال للطاقة بواسطة عناصر كهروضغطية (الكهرباء الانضغاطية) تحول الضغط الواقع عليها إلى جهد كهربائي.
يقول هاياميزو كوهيي المدير التنفيذي في شركة ساوندباور إن العالم يهدر طاقة كل يوم يمكن استغلالها بطريقة جيدة. وقد طور هاياميزو وشركته التي تتخذ من محافظة كاناغاوا مقرا لها طريقة لتوليد الكهرباء من الطاقة الحركية، حيث تحول الاهتزازات إلى طاقة قابلة للاستخدام. ومن بين تطبيقات شركة ساوندباور، أرضيات منتجة للطاقة من خلال حركة المشاة فوقها وخلايا طاقة تلتقط الطاقة الحركية عندما يتم الضغط على زر. وتشكل اهتزازات الأرض والأزرار المضغوطة جزءا صغيرا فقط من الطاقة، ولكن شركة ساوندباور نجحت في ترجمتها إلى توليد فعال للطاقة بواسطة عناصر كهروضغطية (الكهرباء الانضغاطية) تحول الضغط المطبق عليها إلى جهد كهربائي. وهذه العناصر تُستخدم بالفعل على نطاق واسع في منتجات مثل القداحات، ومشعلات مواقد الغاز، ومكبرات الصوت.

شكل 16 . الاشكال توضح بعض الأشكال من الأرضيات المنتجة للطاقة الكهربائية من خلال ممرات المشاة.
المصدر : https://sustainable-nano.com/tag/solar-cells/ ، تاريخ الدخول: 25 يناير 2025.

طريقه عمل كهرباء البيزو للحركة الانضغاطية PIEZOELECTRICICITY

التأثير الكهرضغطـي يُشير إلى قدرة بعض المواد على توليد شحنات كهربائية عند تعرضها لإجهاد ميكانيكي. ويعود أصل مصطلح "كهرضغطية" إلى الكلمة اليونانية "peizin"، التي تعني الضغط أو الإجهاد. وتُعرف المواد التي تُظهر هذا التأثير باسم "المواد الكهرضغطية".[10]

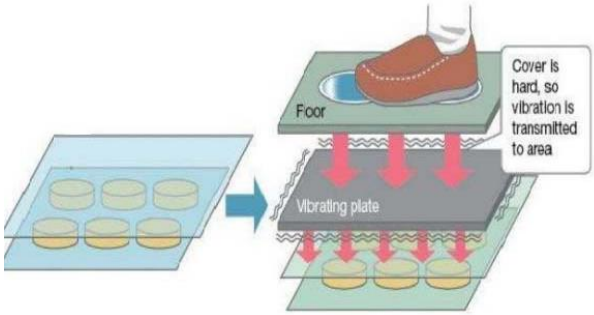
عندما لا يُطبّق أي ضغط على المادة، فإنها تكون متعادلة كهربائيًا، حيث تتوازن الشحنات الموجبة مع الشحنات السالبة. ولكن عند تطبيق ضغط ميكانيكي، يختل هذا التوازن، وتبدأ الشحنات داخل المادة بالتحرك، مما يؤدي إلى توليد مجال كهربائي خارجي. ويُعد العكس أيضًا صحيحًا؛ فعند تطبيق مجال كهربائي خارجي على مادة كهرضغطية، فإنها تتعرض لتغير ميكانيكي مثل الانضغاط أو التمدد. ويُعرف هذا بالتأثير الكهرضغطـي العكسي، كما هو موضح في الشكل 17.[10]



شكل 17 . الشكل (الايمن) يوضح إذا كان الجهد المطبق له قطبية معاكسة ، فإن المادة تتقلص.
الشكل (الايسر) يوضح إذا كان الجهد المطبق له نفس القطبية ، فإن المادة تتمدد.
المصدر : 'The power and potential of piezoelectric energy harvesting | Engineer Live' ، https://www.engineerlive.com/node/6962 ، تاريخ الدخول: 17 يناير 2025.

طريقة التنفيذ البلاطات الانضغاطية (الكهروضغطية)

حيث كانت دراسة الحالة المختارة هي مطار القاهره الدولي وخاصة الصالات الداخلية المزدحمة دائما بحركة الاشخاص ،يمكن حساب مساحة المداخل وانتاج عدد البلاطات المطلوبة ،يمكن تركيب الألواح الكهروضغطية كما هو موضح بالشكل 18



شكل 18 . الشكل يوضح قطاع في البلاطات الكهروضغطية pizoslabs والتي تعمل علي تحويل الطاقة الحركية الي طاقة كهربية بفعل الانضغاط للمشاه دخل صالات مطار القاهره الدولي ، والمقترح تكون بابعاد 60*60 ويتم تغطيتها باي خامه اخري لحمايتها .
المصدر : 'The power and potential of piezoelectric energy harvesting | Engineer Live'.. [Online]. ، https://www.engineerlive.com/node/6962 ، تاريخ الدخول: 17 يناير 2025.

حساب كم الطاقة المنتجة من البلاطات الكهروضغطية

متوسط القوة التي يمارسها الشخص على الأرض أثناء المشي حوالي 1 - 1.5 ضعف كتلة الشخص بسبب قوى رد الفعل الأرضية. إذا اعتبرنا متوسط وزن الشخص 60 كجم، فإن متوسط القوة التي يمارسها الشخص [11]

$F = 1.3 \times mg$
بسبب قوى رد الفعل الأرضي
$F = 1.3 \times 60 \times 9.81 =$ **765.2 N**
بفرض ان 30,000 شخص يزورون صالة رجال الاعمال في اليوم الواحد ، فإنهم يدخلون ويخرجون من المطار. هذا يعني أنهم يخطون على بلاط PZT مرتين. لذلك، ستكون القوة الإجمالية المبذولة = 765.2 × 30,000 × 2 = 45.9 × 10^6 نيوتن

تقدير إجمالي الكهرباء المنتجة
باستخدام طريقة أويلر-برنولي، اكتشفت بريندا أن خطوتين لشخص وزنه 60 كجم ستنتجان 0.1 وات من الكهرباء في ثانية واحدة [12]. كما نعلم، هذه كمية صغيرة جداً من الكهرباء. ولكن مع تطبيق قوة 45.9 × 10^6 نيوتن كل يوم، ستكون الكهرباء المجمعة مرتفعة جداً.
يمكن استخدام القوة اليومية المبذولة لإيجاد إجمالي الكهرباء. إذا كانت إحدى الخطوات تسبب إجهاداً يبلغ حوالي 0.05 متر، فإن الطاقة الناتجة حوالي 7.65 جول

$$45.9 \times 10^6 \times 0.05 = 2.295 \times 10^6$$

بما أن البلاطة الواحدة طولها 60 سم، يمكننا القول إن 3 خطوات قادرة على عبور بلاطة واحدة. طول المدخل متوسط 100 م. لذلك، هناك 10 بلاطات PZT في الطول. وهذا يعني أيضًا أن الشخص سيأخذ 30 خطوة لعبور ألواح .PZT لذلك،

$$2.295 \times 10^6 \times 3 \times 10\ J \times \frac{1\ kwh}{3.6 \times 10^6 J} = 19.125\ \text{kWh}$$

6.4 التقنيات الهيدروليكية والوحدات المنفوخة للمطبات الصناعية

أنشأ بليز باسكال قدرة نقل الطاقة في نظام مغلق في عام 1647. وفقًا لهذا القانون، من الممكن مضاعفة القوى، وهي ظاهرة تحيط بنا يوميًا حيث يستخدم نظام الكبح في المركبات التكنولوجيا الهيدروليكية. عندما يضغط السائق على دواسة الفرامل، يتم دفع السائل المتداول في الخطوط الهيدروليكية إلى وسادة الفرامل لتقليل سرعة السيارة. تستخدم المركبات الثقيلة أنظمة المكابح الهوائية، وعندما يضغط السائق على دواسة الفرامل، فإنه يخفف من ضغط الهواء مما يتسبب في عمل الفرامل.
فيما يتعلق بحصاد الطاقة باستخدام هذه التقنية، تم تناول ممتصات الصدمات في السيارة أولاً. تم تصميم ممتصات الصدمات لتوفير الاستقرار لتعليق السيارة. ومع ذلك، فإن التأثيرات التي تتعرض لها، وهي الطاقة الحركية، تضيع بواسطة ممتص الصدمات. يميل التعليق المتجدد، الذي يتضمن أنظمة حصاد الطاقة، إلى استغلال الطاقة الحركية التي كانت تُهدر سابقًا لتحويلها إلى طاقة كهربائية[13]. ممتصات الصدمات المتجددة الهيدروليكية، التي تحصد طاقة الحركة من الممتصات الهيدروليكية لتشغيل المولد الكهربائي، درسها بعض الباحثين الذين نفذوا حصادات الطاقة الهيدروليكية في أنظمة تعليق المركبات ودرسوا أدائها نظريًا وتجريبيًا [14] [15]
طور الأخوين هوريانوبولوس (Stefanos وDimitri) جهازًا هيدروليكيًا لجني الطاقة من خلال أرصفة الطرق. يصف المؤلفون القدرة على توليد مئات الكيلووات إلى أكثر من 10 ميغاوات دون أي دليل ملموس على الرغم من عرض اختبار النموذج الأولي. هناك العديد من المنتجات لأرصفة الطرق مثل KinergyCarpetTM و KinerBumpTM. [16]وذلك يمكن استغلاله جيدا في ارصفه المطارات واماكن انتظار السيارات دخل مطار القاهره الدولي.

شكل 19 . الشكل يوضح المطبات الصناعية الهوائية التي تحول الطاقة الانضغاطية الي طاقة كهربائية تخزن في بطاريات لاعاده الاستخدام،وهذه التقنية هامة جدا في مداخل المطارات وساحات الانتظار والتي بامكانها تعمل علي توليد العديد من الطاقات المفقوده .
المصدر : https://www.mdpi.com/sustainability/sustainability-13-05893/article_deploy/html/images/sustainability-13-05893-g007-550.jpg ، تاريخ الدخول: 28 يناير 2025.

6.5 توليد الطاقة الشمسية من الأرصفة الكهروضوئية

توليد الرصيف الكهروضوئي (PV) هو تقنية مبتكرة تدمج الألواح الشمسية في أسطح الطرق والأرصفة لتوليد الطاقة المتجددة. يهدف هذا المفهوم إلى تعظيم استخدام الأراضي من خلال تحويل البنية التحتية الحالية إلى أسطح منتجة للطاقة.
يتكون الرصيف الكهروضوئي من خلايا شمسية مدمجة في مواد متينة مصممة خصيصًا يمكنها تحمل حركة مرور المركبات والظروف البيئية.
يتضمن النظام عادةً:

- الزجاج المقسى أو الأغطية المركبة - يحمي الخلايا الشمسية مع السماح لأشعة الشمس بالوصول إليها.
- الخلايا الكهروضوئية - تحول ضوء الشمس إلى كهرباء.
- الهياكل الداعمة - طبقة أساسية توفر القوة الميكانيكية.
- الأسلاك ومحولات الطاقة - تنقل الكهرباء المولدة إلى الشبكة أو المرافق القريبة.
- الطلاءات المضادة للانزلاق - تضمن الجر الآمن للمركبات والمشاة.

حساب كم توليد الطاقة من الأرصفة الشمسية لدراسة الحالة لمطار القاهره الدولي

- كفاءة الألواح الشمسية النموذجية: 15%–22%
- كفاءة الرصيف الكهروضوئي: ~10%–15% (بسبب تراكم الأوساخ، التآكل، والزوايا غير المثلى)
- إنتاج الطاقة لكل متر مربع:
  - ضوء الشمس المباشر (~1000 وات/م² إشعاع شمسي)
  - الألواح الشمسية التقليدية: ~150-220 وات/م²
  - الرصيف الكهروضوئي: ~100-150 وات/م²
  - ظروف العالم الحقيقي (الطقس، حركة المرور، الأوساخ)
  - متوسط الإنتاج: 50-100 وات/م²

الجدول (2) يوضح المقارنة بين امثلة تطبيق الارصفة الكهروضوئية حول العالم ومدي انتاجيتها للطاقة الكهربائية سنويا
المصدر: الباحث

اسم المشروع	الموقع	المساحة المغطاة (م²)	الناتج السنوي المقدر (كيلووات ساعة)	كثافة الطاقة (وات / م²)	ملاحظات
طريق Wattway الشمسي	نورماندي، فرنسا	2800	150,000	53.6~	أداء أقل من المتوقع بسبب الأوساخ والتآكل
الطريق السريع الشمسي في الصين	جينان، الصين	5875	1,000,000	114~	واحد من أكثر المشاريع كفاءة حتى الآن
مسار الدراجات SolaRoad	هولندا	70	9800	140~	نجاح مبكر؛ تم توسيعه لاحقًا
طريق The Ray الشمسي	جورجيا، الولايات المتحدة	قسم اختبار صغير	7000~	100~	مدمج مع شحن المركبات الكهربائية
رصيف Platio الشمسي	المجر	9	1100~	122~	مثبت على المداخل والأرصفة

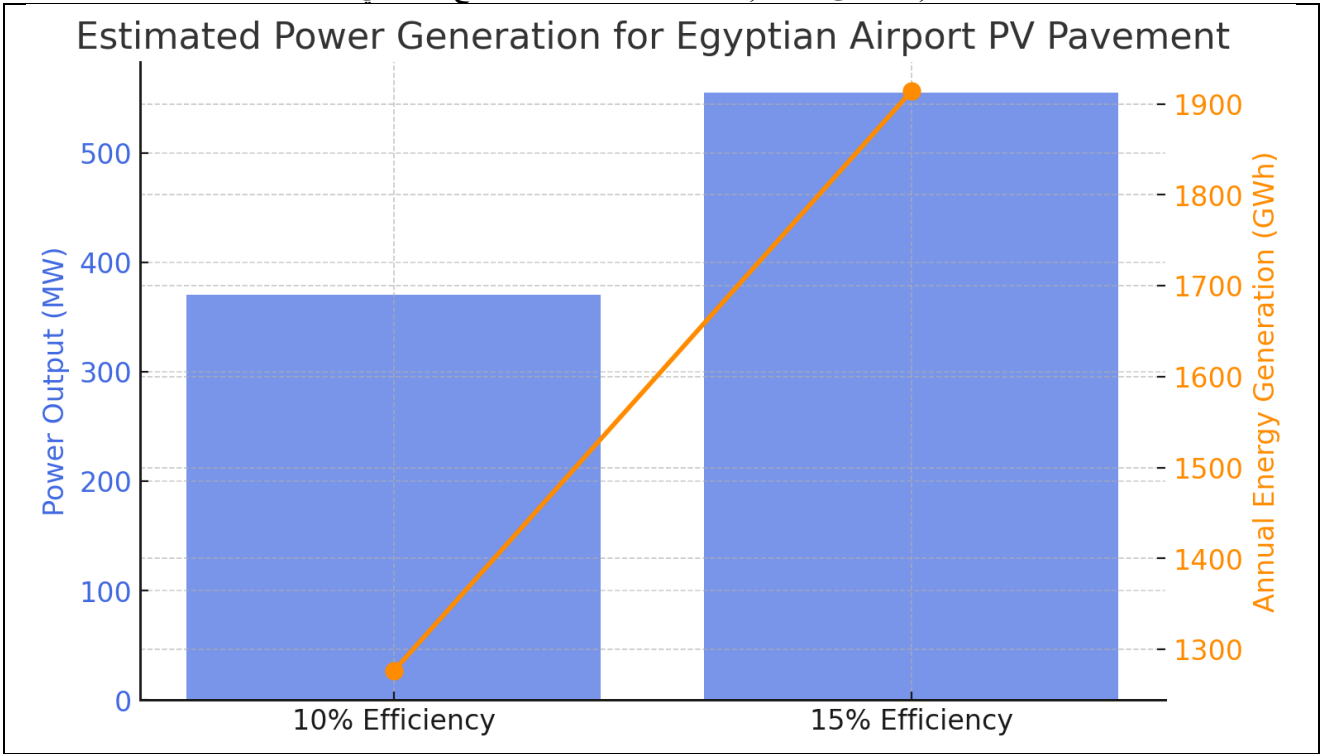
لتقدير توليد الطاقة لمنطقة مخصصة، نستخدم الصيغة:

إنتاج الطاقة= المساحة×كثافة الطاقة
إنتاج الطاقة = المساحة × كثافة الطاقة
حيث:المساحة = إجمالي سطح الرصيف الكهروضوئي بالمتر المربع (م²)
كثافة الطاقة = الطاقة المولدة لكل متر مربع، عادةً 50-150 واط/م² (حسب الكفاءة والموقع)
يمتد مطار القاهرة الدولي على مساحة تقارب 37 كيلومترًا مربعًا (37,000,000 متر مربع).
تتلقى القاهرة في المتوسط 9 ساعات و26 دقيقة من ضوء الشمس يوميًا، مما يصل إجماليه إلى حوالي 3,451 ساعة سنويًا.
بافتراض كفاءة الرصف الكهروضوئي بنسبة 10% إلى 15%، فإن تقدير توليد الطاقة سيكون:

إنتاج الطاقة الفوري:

كفاءة 10%: حوالي 370 ميجاوات
كفاءة 15%: حوالي 555 ميجاوات
توليد الطاقة السنوي:

كفاءة 10%: حوالي 1,276 جيجاوات ساعة
كفاءة 15%: حوالي 1,914 جيجاوات ساعة
يمكن لهذه الطاقة أن تزود ما بين ~255,000 إلى ~383,000 أسرة مصرية سنويًا، مع الأخذ في الاعتبار متوسط استهلاك الأسرة.



شكل 20 . الشكل يوضح كفاءة انتاج الطاقة الكهربائية عن طريق الارصفه الكهروضوئية خلال العام في دراسة حاله مطار القاهره الدولي.
تمثل الأشرطة الزرقاء خرج الطاقة الفوري.(MW)
يمثل الخط البرتقالي توليد الطاقة السنوي.(GWh)
مع زيادة الكفاءة من 10٪ إلى 15٪ ، يزداد كل من إنتاج الطاقة وتوليد الطاقة السنوي بشكل كبير.
المصدر: من اعداد الباحث،2025

7 الخلاصة :

من خلال توظيف مبادئ العمارة المستدامة التي تركز على ترشيد استهلاك الطاقة وتوليدها، واستخدام تطبيقات وتقنيات الطاقة المتجددة النظيفة، يمكن دمج هذه الحلول داخل العناصر المعمارية والتخطيطية للمباني، سواء في المساحات الداخلية أو الخارجية لمرافق المطارات ومدارج الطائرات. هذا التكامل يُسهم في توفير مصدر فعّال ومستدام للطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل هذه المنشآت الخدمية الكبرى، وذلك بالاعتماد على أحدث الطرق والتقنيات المتقدمة في إنتاج الطاقة.

8 النتائج

توصلت الدراسة إلى نتائج كمية ونوعية تؤكد أهمية دمج مبادئ العمارة المستدامة وتقنيات الطاقة المتجددة في تصميم وتشغيل المطارات. وفيما يلي أبرز ما خلصت إليه الدراسة:

1. **إمكانات هائلة لاستغلال الطاقة الشمسية في المطارات:**
   - أشارت الدراسة إلى أن المساحات غير المستغلة في محيط المدارج داخل مطار القاهرة الدولي تُقدَّر بحوالي **8كم²**.

- وبالاعتماد على بيانات محطة "بنبان" للطاقة الشمسية، فإن كل **1كم²** قادر على إنتاج **54ميجاوات** من الكهرباء عند استخدام الألواح الشمسية بكفاءة.
- عليه، يمكن لمطار القاهرة – من خلال استغلال المساحات المحيطة فقط – إنتاج **نحو 432 ميجاوات** من الكهرباء النظيفة.
- هذا الرقم يمكن أن يرتفع عند دمج الألواح الشمسية في الواجهات والأسطح المعمارية داخل المطار.

2. **الاستفادة من الطاقة الحركية عبر البلاطات الكهروضغطية:(Piezoelectric Tiles)**
   - في صالة رجال الأعمال فقط، ووفقاً لتقدير عدد الزوار بنحو **30,000شخص يوميًا**، ينتج عن خطواتهم اليومية قوة تُقدّر بـ **10^6 × 45.9نيوتن**.
   - باحتساب متوسط الإزاحة الناتجة عن الخطوة الواحدة بـ **0.05متر**، يمكن توليد طاقة مقدارها **10^6 × 2.3جول يوميًا**.
   - تعني هذه النتائج إمكانية توليد كميات معتد بها من الطاقة عبر البلاطات الكهروضغطية عند تعميمها في الصالات ذات الحركة الكثيفة.
3. **إمكانات التوربينات الهوائية في توليد الكهرباء:**
   - أفادت الدراسة أن المدارج التي تتراوح أطوالها بين **2,450متر إلى 5,500 متر**، تنتج تيارات هوائية قوية نتيجة اندفاع الطائرات، يمكن استغلالها لتشغيل توربينات هوائية رأسية أو أفقية.
   - يُمكن توزيع هذه التوربينات على جانبي المدارج دون التأثير على سلامة الرؤية الجوية، وتوليد طاقة دائمة نهارًا وليلًا.
4. **إمكانية توليد الكهرباء من الأرصفة الكهروضوئية:(Photovoltaic Pavement)**
   - يُمكن استغلال مساحات الأرصفة الطرقية والممرات داخل المطار لتوليد طاقة شمسية مباشرة.
   - وفقاً لمتوسط الكفاءة الواقعي للأرصفة الكهروضوئية **(10%–15%)**، وبمتوسط إشعاع شمسي يعادل **100–150 واط/م²** في القاهرة:
     - يمكن أن ينتج مطار القاهرة ما بين **370ميجاوات** (عند كفاءة 10%) و **555ميجاوات** (عند كفاءة 15%) من الطاقة الفورية.
     - بينما يبلغ **الإنتاج السنوي للطاقة** المتوقعة بين **1,276إلى 1,914 جيجاوات ساعة**، وهي كمية كافية لتزويد بين **255,000إلى 383,000 أسرة مصرية** بالكهرباء.
5. **دمج تقنيات متعددة لزيادة فعالية توليد الطاقة:**
   - أبرزت الدراسة أهمية الدمج بين الأنظمة المختلفة (الطاقة الشمسية + الرياح + الحركية + الهيدروليكية) لتكوين منظومة متكاملة قادرة على تغطية احتياجات المطار من الكهرباء بنسبة عالية.
   - كما أن اعتماد أنظمة هجينة مثل **أعمدة إنارة تعمل بالطاقة الشمسية والرياح** (الأنظمة المزدوجة) يمكن أن يعزز من الكفاءة والاعتمادية التشغيلية.

9 التوصيات

استناداً إلى النتائج السابقة، توصي الدراسة بما يلي:

1. **التوسع في تطبيق أنظمة الطاقة المتجددة** داخل حدود المطار، من خلال استغلال الأسطح والمسطحات المحيطة في تركيب الألواح الشمسية.
2. **تطبيق تقنيات تحويل الطاقة الحركية** إلى طاقة كهربائية في الأماكن ذات الكثافة الحركية العالية، مثل الممرات وصالات المسافرين.
3. **نشر التوربينات الهوائية** الصغيرة والمتوسطة الحجم في المناطق غير المستغلة بالمطار، خاصةً القريبة من المدارج، للاستفادة من تدفق الرياح الناتج عن حركة الطائرات.
4. **إنشاء أنظمة هجينة** تجمع بين الطاقة الشمسية وطاقة الرياح لتحقيق استمرارية واستقرار في إنتاج الكهرباء.
5. **استخدام تقنيات الحصاد الهيدروليكي** مثل المطبات الصناعية الذكية لتحويل ضغط المركبات إلى طاقة كهربائية تخزن في البطاريات.
6. **دمج مبادئ العمارة المستدامة** في التخطيط العمراني الشامل للمطارات الجديدة أو عند إعادة تأهيل المنشآت الحالية.
7. **وضع سياسات تحفيزية وتشريعية** تشجع على استخدام الطاقة النظيفة في المطارات، مع تقديم الدعم المالي والفني للمشروعات ذات الصلة.
8. **دعم البحوث والتطوير المستمر** لتقييم أداء نظم الطاقة المتجددة في بيئات المطارات، وتحديد أفضل الحلول التقنية والاقتصادية.

References

[1] M. Parhamfar, 'Towards green airports: Factors influencing greenhouse gas emissions and sustainability through renewable energy', *Res.*, vol. 1, no. 2, p. 100060, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.nexres.2024.100060.

[2] Y. Zhou, 'Low-carbon transition in smart city with sustainable airport energy ecosystems and hydrogen-based renewable-grid-storage-flexibility', *Energy Rev.*, vol. 1, no. 1, p. 100001, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.enrev.2022.100001.

[3] 'معلومات عن المطار'. Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.cairo-airport.com/ar-eg/%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%B7%D8%A7%D8%B1/%D9%85%D8%B9%D9%84%D9%88%D9%85%D8%A7%D8%AA-%D8%B9%D9%86-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%B7%D8%A7%D8%B1

[4] 'منظمة الطيران المدني الدولي'.

[5] Airport Cooperative Research Program, Transportation Research Board, and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Sustainable Airport Construction Practices*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2011, p. 22925. doi: 10.17226/22925.

[6] Stephen Barrett, Barrett Energy Resources Group, LLC, Airport Cooperative Research Program, Transportation Research Board, and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Airport Renewable Energy Projects Inventory and Case Examples*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2020, p. 25942. doi: 10.17226/25942.

[7] G. Baxter, 'Towards Carbon Neutral Airport Operations Through the Use of Renewable Energy Sources: The Case of Chhatrapati Shivaji Maharaj and Indira Gandhi International Airports, India', *Int. J. Environ. Agric. Biotechnol.*, vol. 8, no. 2, pp. 084–100, 2023, doi: 10.22161/ijeab.82.9.

[8] E. Maleviti, *Fundamentals of Sustainable Aviation*, 1st ed. London: Routledge, 2023. doi: 10.4324/9781003251231.

[9] P. Zarshenas, 'The Transformation of the Green Sustainable Airports Construction Industry Through the Innovative Applications of Green Energies in Comprehensive Energy Modality of "Venus": A Study on the Supply & Development of Renewable Energy in Airports of Country with Dry Climate by Means of Wind & Solar Energy', 2024.

[10] 'The power and potential of piezoelectric energy harvesting | Engineer Live'. Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.engineerlive.com/node/6962

[11] J. Nilsson and A. Thorstensson, 'Ground reaction forces at different speeds of human walking and running', *Acta Physiol. Scand.*, vol. 136, no. 2, pp. 217–227, Jun. 1989, doi: 10.1111/j.1748-1716.1989.tb08655.x.

[12] 'Piezoelectric Energy Harvesting'. Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/ou1/

[13] M. A. A. Abdelkareem *et al.*, 'Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review', *Appl. Energy*, vol. 229, pp. 672–699, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.030.

[14] C. Li and P. W. Tse, 'Fabrication and testing of an energy-harvesting hydraulic damper', *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 6, p. 065024, May 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/6/065024.

[15] R. Galluzzi, Y. Xu, N. Amati, and A. Tonoli, 'Optimized design and characterization of motor-pump unit for energy-regenerative shock absorbers', *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 16–27, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.100.

[16] 'Home - Kinergypower'. Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: https://kinergypower.com/