international DESIGN JOURNAL
Print ISSN 2090-9632
Online ISSN 2090-9640

رؤية لتحسين الإضاءة الطبيعية وتحقيق الراحة البصرية وكفاءة الطاقة في فراغات التعلم المستدامة: دراسة حالة قاعة رسم هندسي بمناطق شبه صحراوية

Envisioning How to Improve Natural Light Flow and Energy Saving in Learning Spaces: A Case Study of an Engineering Drawing Room in a Semi-Desert Area

شريف حلمي أحمد
محاضر، قسم العمارة، المعهد العالي للهندسة ـ مدينة ١٥ مايو، القاهرة، dr.sherif15may@gmail.com
إسلام محمد حامد
محاضر، قسم العمارة، المعهد العالي للهندسة ـ مدينة ١٥ مايو، القاهرة، eadalbenaa@yahoo.com

ملخص البحث

تتناول الدراسة استراتيجيات معمارية تهدف إلى تحسين كفاءة الإضاءة الطبيعية في الفضاءات التعليمية، مع التركيز على تعزيز الراحة البصرية وتقليل استهلاك الطاقة بما يتوافق مع أهداف التنمية المستدامة. ركزت الدراسة على قاعة الرسم الهندسي بالمعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥ مايو، حيث تناولت مشكلة التوزيع غير المتكافئ للضوء الطبيعي في احد قاعات الرسم ذات المخطط العميق. تم اعتماد منهج محاكاة رقمية باستخدام برنامج VELUX Daylight Visualizer لتقييم ظروف الإضاءة الحالية واختبار ثلاثة سيناريوهات: التصميم الحالي، زيادة مساحة النوافذ بنسبة ٣٠٪، ودمج نظام الإضاءة النهارية " Himawari Daylighting System" مع إزالة السقف المعلق. تم تقييم توزيع الضوء عند عشر نقاط قياس في ظل ظروف بيئية موحدة. أظهرت النتائج تفاوتًا ملحوظًا في مستويات الإضاءة ضمن التصميم القائم، مع وجود توهج مرتفع قرب النوافذ وإضاءة غير كافية في المناطق الخلفية. أدى توسيع مساحة النوافذ إلى تحسين السطوع قرب الفتحات لكنه لم يحقق توزيعًا متوازنًا للضوء. بالمقابل، أظهر نظام "هيماوري" تحسنًا كبيرًا في توفير إضاءة متجانسة عبر القاعة بمعدل سطوع وسطي بلغ ٥٠٢,١ كاندلا/م² وأدنى مستوى ١٥٠ كاندلا/م²، مع تقليل مكاسب الحرارة. تؤكد الدراسة محدودية الأساليب التقليدية للإضاءة النهارية وتدعو إلى تبني حلول متقدمة قائمة على الأداء تجمع بين التعديلات التكنولوجية والمعمارية. وتقدم هذه النتائج إطارًا عمليًا لتعزيز الأداء البيئي للمباني التعليمية، لا سيما في المنشآت المعاد تأهيلها، وتوفر إرشادات قيمة لإنشاء بيئات تعليمية مستدامة، مريحة بصريًا وموفرة للطاقة.

كلمات دالة

كفاءة الإضاءة الطبيعية، العمارة التعليمية المستدامة، تقليل استهلاك الطاقة، الألياف الضوئية، حلول الإضاءة السلبية.

Natural multi-sports, sports, energy reduction, multi-sports, educational game solutions.

Paper received April 22, 2025, Accepted July 04, 2025, Published on line September 1, 2025

المقدمة: Introduction

في سياق التصميم المعماري المستدام، تُعد الإضاءة الطبيعية من العناصر الأساسية التي تؤثر مباشرة على جودة البيئة الداخلية، خاصة في المباني التعليمية التي تتطلب معايير خاصة من الراحة البصرية والدعم الإدراكي للطلاب. فقد أظهرت العديد من الدراسات أن الإضاءة النهارية الجيدة تسهم في تعزيز تركيز الطلاب، ورفع إنتاجيتهم، وتحسين صحتهم النفسية (احمد ا.، ٢٠٢٢)؛ (سعيد، ٢٠٢١)، في حين تؤدي الإضاءة غير الكافية ولا سيما في الفراغات العميقة إلى مشكلات في الراحة البصرية وزيادة الاعتماد على الإضاءة الصناعية، وهو ما يرفع من استهلاك الطاقة والتكاليف التشغيلية (محمود ع.، ٢٠١٩).

يتزايد في هذا السياق الاهتمام بدمج استراتيجيات الإضاءة النهارية ضمن الممارسات الخضراء والأبحاث المعمارية الهادفة إلى رفع كفاءة الطاقة وتحسين جودة البيئة الداخلية (Reinhart, 2014). ، إلا أن تطبيق هذه الاستراتيجيات في المناخات شبه الصحراوية، مثل مدينة ١٥ مايو في مصر يواجه تحديات خاصة، نظرًا لارتفاع شدة الإشعاع الشمسي، ودرجات الحرارة العالية، وانخفاض نسب الرطوبة، مما يتطلب توازنًا دقيقًا بين إدخال الضوء الطبيعي وتقليل الحمل الحراري الناتج عنه. غالبًا ما تُظهر الحلول التقليدية، مثل الاعتماد على النوافذ الجانبية أو زيادة مساحتها قصورًا واضحًا في اختراق الضوء نحو أعماق الفراغات، مما يسبب اختلالات في توزيع الإضاءة وارتفاع درجات الحرارة الداخلية (Dubois, 2001) .

في ضوء هذه التحديات، تأتي هذه الدراسة لتقديم إطار تحليلي وتطبيقي لتحسين أداء الإضاءة الطبيعية في إحدى قاعات الرسم الهندسي بالمعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥ مايو، وهي قاعة معدّلة من هيكل بنائي لم يكن مخصصًا للاستخدام الأكاديمي. تعاني هذه القاعة كمثلها من القاعات ذات العمق الكبير من ضعف كفاءة توزيع الضوء الطبيعي، مما يؤدي إلى زيادة الاعتماد على الإضاءة الاصطناعية وتأثيرات سلبية على البيئة والاقتصاد وأداء المستخدمين. وفي هذا الإطار، يتم توظيف برنامج VELUX Daylight Visualizer كأداة لمحاكاة وتحليل ظروف الإضاءة داخل القاعة المختارة، بغرض تقييم الوضع الحالي وتحديد نقاط الضعف (احمد ر.، ٢٠٢٠).

تركّز الدراسة على تحليل العوامل التصميمية المؤثرة في كفاءة الإضاءة الطبيعية، مثل أبعاد الفراغ، نسبة الفتحات، واتجاه توجيه فتحات الاضاءة، بهدف تطوير حلول معمارية وتكنولوجية عملية قابلة للتطبيق. وتشمل الحلول المقترحة في توسيع مسطح الفتحات او دمج نظم إضاءة طبيعية تكنولوجية متقدمة مثل نظام "هيماوري" للألياف الضوئية (n.d.), 2025))، والذي يُتوقع أن يُسهم في تحسين توزيع الضوء وتقليل التوهج دون زيادة الحمل الحراري.

وبذلك تسعى هذه الدراسة إلى صياغة إطار شامل لتحسين الإضاءة الطبيعية في المباني التعليمية، من خلال المزج بين التحليل الكمي باستخدام أدوات المحاكاة والتكنولوجيا والتحليل النوعي للبيئة والسلوك البشري. وتصب نتائجها في دعم تطبيق مبادئ الاستدامة في التصميم المعماري، وتقليل استهلاك الطاقة، وخلق بيئة تعليمية صحية ومحفزة، بما يواكب المعايير الدولية مثل LEED وASHRAE في مجال الإضاءة الطبيعية داخل المباني الأكاديمية.

تُعتبر الإضاءة الطبيعية عنصرًا أساسيًا في التصميم المعماري المستدام خاصة في المباني التعليمية، حيث تؤثر بشكل كبير على

CITATION Sherif Ahmed, Islam Hamed (2025), Envisioning How to Improve Natural Light Flow and Energy Saving in Learning Spaces: A Case Study of an Engineering Drawing Room in a Semi-Desert Area, International Design Journal, Vol. 15 No. 5, (September 2025) pp 261-274

راحة المستخدمين، الأداء الإدراكي، واستهلاك الطاقة.
تتناول هذه الدراسة مستويات كفاءة الإضاءة الطبيعية في حالة قاعة الرسم الهندسي التي تم تعديلها من هيكل بنائي غير مخصص لهذا الغرض. تهدف إلى تقييم وتحسين أداء الإضاءة الطبيعية باستخدام طرق المحاكاة الرقمية (راضي، ٢٠٢٠)، حيث تُقيم الظروف الحالية وتختبر تدخلات لعناصر معمارية بديلة مثل توسيع مساحة النوافذ ودمج النظم التكنولوجية مثل نظام "هيماوري" للألياف الضوئية (n.d.), 2025))، مع التركيز على فعالية هذه التدخلات في تحسين توزيع الضوء والراحة البصرية دون زيادة الحمل الحراري.

مشكلة البحث: Statement of the Problem

- تعاني المباني التعليمية غالبًا من ضعف الإضاءة الطبيعية نتيجة التحدي المتمثل في موازنة دخول الضوء الطبيعي مع الراحة الحرارية للقاعات الدراسية ذات المخطط العميق، خصوصًا تلك المعدلة من منشآت غير مخصصة لهذا الغرض، فتواجه توزيعًا غير متساوٍ للضوء مع توهج مفرط قرب الفتحات وضعف الإضاءة في المناطق الداخلية، ما يؤثر سلبًا على الراحة البصرية، ويزيد من اعتماد الإضاءة الصناعية واستهلاك الطاقة. تمثل قاعة الرسم الهندسي بالمعهد العالي للهندسة في مدينة ١٥ مايو نموذجًا لهذا الواقع، فتسعى الدراسة إلى استكشاف كيفية معالجة هذه المشكلات باستخدام استراتيجيات معمارية وتقنيات تكنولوجية للإضاءة الطبيعية مدعومة بأدوات محاكاة رقمية لتحسين كفاءة الإضاءة وراحة المستخدمين بما يتوافق مع معايير التصميم المستدام الملائمة للمناخات الحارة والجافة.

أهداف البحث: Research Objectives

- يهدف البحث إلى تطوير وتقييم استراتيجيات معمارية وتكنولوجية لتحسين أداء الإضاءة الطبيعية في الفضاءات التعليمية ذات الابعاد العميقة ضمن مناخات شبه صحراوية، مع التركيز على تحسين توازن الراحة البصرية وتقليل الاعتماد على الإضاءة الصناعية وتعزيز التصميم المستدام والموفر للطاقة. استُخدم قاعة الرسم الهندسي التي تعاني من توزيع ضوء غير متساوٍ كحالة دراسية، حيث تم تقييم الظروف الحالية باستخدام أدوات محاكاة الضوء النهاري، برنامج VELUX Daylight Visualizer كأداة لمحاكاة، واختبار فعالية تدخلين رئيسيين: توسيع مساحة النوافذ الغربية الحالية ودمج تكنولوجيا الالياف الضوئية للإضاءة الطبيعية المتقدمة (نظام هيماوري). تهدف النتائج إلى تقديم توصيات تصميمية عملية لتحسين توزيع الإضاءة الطبيعية في المنشآت التعليمية الغير مؤهلة للمواصفات المهنية، بما يدعم التنمية المستدامة وراحة المستخدمين.

منهج البحث: Research Methodology

- تتبنى الدراسة منهجًا بحثيًا متعدد الأساليب يجمع بين الطرق الكمية والنوعية لتحليل وتحسين أداء الإضاءة الطبيعية في بيئة تعليمية. يستند المنهج إلى الفهم النظري لأهمية الإضاءة الطبيعية كعنصر جوهري في العمارة التعليمية، مع التركيز على الجوانب الفسيولوجية والنفسية والتربوية. تلعب الإضاءة الطبيعية دورًا رئيسيًا في تعزيز الوظائف الإدراكية، الراحة البصرية، والوعي البيئي بين الطلاب. أثبتت الأبحاث السابقة أن التعرض للضوء النهاري يعزز الأداء الأكاديمي، يقلل إجهاد العين، ويدعم الصحة النفسية في بيئات التعلم. تشمل العناصر المعمارية المؤثرة على كفاءة الضوء الطبيعي مثل: اتجاه النوافذ، أنواع الفتحات، الهندسة المكانية، مواد البناء وخصائصها الفيزيائية، والعناصر السلبية الموجهة للضوء الطبيعي مثل الأفنية، الفتحات السقفية، والنوافذ المرتفعة (Clerestory windows). تشكل هذه العناصر الأساس المفاهيمي للتدخلات التجريبية في هذه الدراسة. تم اختيار قاعة الرسم الهندسي بمعهد الهندسة العالي بمدينة ١٥ مايو لتمثيل التحديات المكانية والبيئية في مباني التعليم العالي ضمن مناخات شبه صحراوية. تتوزع منهجية البحث على أربع مراحل متكاملة:

المرحلة الأولى: جمع البيانات السياقية والتحليل المكاني
شملت تقييمًا معماريًا وبيئيًا مفصلاً للقاعة، حيث:

- **خصائص معمارية:** أبعاد القاعة ٢٢,٥×١٢,٤ متر، مع بابين رئيسيين ومخرج طوارئ، تتجه نحو الغرب مع نوافذ طولية على الجدار الغربي ونوافذ شبه مسطحة على الجانب الشمالي تطل على فناء مغطى. جميع الفتحات مزودة بزجاج شفاف بسماكة ٦ ملم مؤطر بألمنيوم منزلق.
- **التشطيبات الداخلية والأسطح العاكسة:** الأرضية بلاط خزفي لامع بلون برتقالي بني، الجدران مطلية بالبيج الفاتح، والسقف المعلق بألواح جبسية بيضاء مقاس ٦٠×٦٠ سم. تؤثر هذه الخامات على انعكاسية الضوء وسطوع الفضاء.
- **نظام الإضاءة وسلوك الضوء:** تعتمد القاعة على الإضاءة الطبيعية أثناء النهار، مع إضاءة صناعية مكملة من كشافات مدمجة في السقف. قُيس مستوى الإضاءة الطبيعي باستخدام Lux متر، واستُكملت البيانات بوثائق البناء الأصلية، وأُجريت ملاحظات غير رسمية لسلوك المستخدمين لتقييم التفاعل مع الإضاءة، مع رصد حالات الانزعاج الناتجة عن التوهج أو الظلال.

المرحلة الثانية: المحاكاة الرقمية والتحليل التشخيصي:
تم تحويل البيانات إلى نموذج رقمي باستخدام برنامج VELUX Daylight Visualizer لمحاكاة ظروف الإضاءة الداخلية. أجريت المحاكاة تحت نماذج تصميمية معيارية لتقييم:

- **مستويات الإضاءة:** مقارنة كفاية الإضاءة النهارية مع معايير دولية مثل LEED وASHRAE التي تستهدف عادة ٣٠٠-٥٠٠ Lux للصفوف الدراسية وما يعدلها من شدة الإضاءة بوحدة "شمعة لكل متر مربع(cd/m²) ".

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)
تهدف إلى تعزيز استخدام الإضاءة الطبيعية، تطلب أن تحقق 75%على الأقل من المساحات المشغولة مستوى إضاءة يتراوح بين ٣٠٠–٥٠٠ Lux لمدة 4ساعات على الأقل في اليوم

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (ASHRAE, 2019)
IES (Illuminating Engineering Society)، توصي بمستوى إضاءة يتراوح بين 300– 500 Lux للصفوف الدراسية. جدول. ١ تعتمد جداول

- توزيع السطوع: تحديد المناطق ذات اختراق ضوئي ضعيف، المناطق ذات الإضاءة المفرطة المسببة للتوهج، والتوزيع غير المتجانس للضوء الذي يؤثر على الراحة البصرية وكفاءة التعلم.
- أسهمت هذه المرحلة في تحديد الأداء الأساسي للفضاء، مع إبراز نقاط الضعف المكانية لتوجيه التدخلات التصميمية.

جدول. ١: شدة الإضاءة الإضاءة بالفصول الدراسية (ASHRAE, 2019)

شدة الإضاءة	cd/m² (تقريبًا)	Lux
الحد الأدنى	76.4	300
مستوى مناسب	102.0	400
الحد الأعلى	127.3	500

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is pr cited.

المرحلة الثالثة: التدخل التصميمي المتكامل وتقييم الأداء

بناءً على النتائج والرؤية النظرية، تم تطوير استراتيجيات إضاءة نهارية تفاعلية وتكنولوجية وتقييمها عبر إعادة المحاكاة، شملت:

- إعادة التهيئة لعناصر معمارية: تعديل حجم ومسطح النوافذ الغربية لتحسين دخول الضوء مع تقليل التوهج المباشر.
- دمج نظم إضاءة طبيعية تكنولوجية متقدمة مثل نظام "هيماوري" للألياف الضوئية (n.d.), 2025))، والذي يُتوقع أن يُسهم في تحسين توزيع الضوء وتقليل التوهج دون زيادة الحمل الحراري.

تم إعادة محاكاة النموذجين المعدلين ومقارنة النتائج مع السيناريو الأصلي، باستخدام مؤشرات تقييم رئيسية مثل:

- متوسط مستوى الإضاءة: للتحقق من تلبية معايير الإضاءة عبر كافة المناطق الوظيفية.
- نسبة التوزيع والتوهج: لتقييم توازن الإضاءة وراحة النظر كلما اتجهنا لعمق القاعة.
- محاولات تقليل الاعتماد على الإضاءة الصناعية: تقدير إمكانية تقليل استخدامها بفضل تحسين الإضاءة الطبيعية.

الإطار النظري: Theoretical Framework

١- الإضاءة الطبيعية في العمارة التعليمية: الأدوار والمكونات

١-١ فهم الضوء الطبيعي: الخصائص والأهمية المعمارية

يشير الضوء الطبيعي، أو ضوء النهار، إلى الجزء المرئي من الإشعاع الشمسي ضمن الطيف الكهرومغناطيسي، ويتراوح طوله الموجي بين ٤٠٠ و٧٠٠ نانومتر. يحظى الضوء الطبيعي بأهمية خاصة في تصميم المباني التعليمية لما له من أثر إيجابي على الراحة البصرية والصحة النفسية وتقليل الاعتماد على الإضاءة الصناعية، مما يسهم في تحسين الأداء الأكاديمي والمعرفي (Boubekri, 2008). تتحدد فعالية الضوء الطبيعي داخل الفراغات المعمارية بعدة خصائص فيزيائية، تشمل:

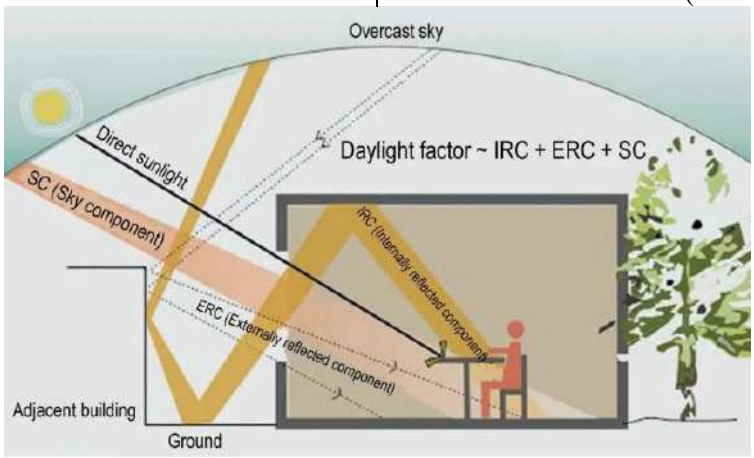
- **السطوع (Illuminance)**: يعبر عن كمية التدفق الضوئي لكل وحدة مساحة، ويُقاس بوحدة ال .(Lux) يتأثر بعوامل مثل زاوية سقوط الشمس، حالة السماء، وطبيعة الأسطح العاكسة، وتوصي المعايير التعليمية بمستويات تتراوح بين ٣٠٠ و٥٠٠ Lux لأداء المهام البصرية . (Tregenza, 2011)
- **توزيع الضوء (Light Distribution):** يشير إلى مدى توازن الإضاءة داخل الحيز الداخلي، ويتحقق باستخدام أدوات مثل الأرفف الضوئية والأسطح العاكسة لتحقيق توزيع متجانس. (Boubekri, 2008)
- **زاوية واتجاه الضوء (Angle and Direction):** تتغير تبعًا لحركة الشمس اليومية والفصلية، مما يؤثر على الوهج والظلال والحرارة، ويستدعي وضع حلول معمارية مثل التظليل الخارجي وتوجيه النوافذ خاصة في المناطق الحارة. (Edwards, 2002)
- **الجودة الطيفية (Spectral Quality):** يتميز الضوء الطبيعي باحتوائه على الطيف اللوني الكامل، مما يمنحه قدرة متميزة على إظهار الألوان ويؤثر على الإيقاع البيولوجي للمستخدمين. (Boubekri, 2008)
- **الانعكاس والانكسار والتشتت:** تُستخدم المواد المعمارية عالية الانعكاسية أو الشفافة لتوجيه الضوء إلى أعماق الفراغات المظللة، وهي تقنية فعالة في البيئات ذات السطوع العالي لتقليل الحرارة وزيادة التجانس الضوئي.(Tregenza, 2011)

إن الفهم العميق لهذه الخصائص يُعد أساساً لتصميم بيئات تعليمية مستدامة تتكامل فيها الراحة البصرية وكفاءة الطاقة، لا سيما في المناخات ذات التعرض الشمسي المكثف.

١-٢ مكونات الإضاءة الطبيعية وعامل ضوء النهار في التصميم

يتكون الضوء الطبيعي في العمارة من أربعة عناصر رئيسية: ضوء الشمس المباشر، مكون السماء(SC) ، المكون العاكس الخارجي (ERC)، والمكون العاكس الداخلي .(IRC) تُستخدم هذه المكونات لحساب "عامل ضوء النهار(Daylight Factor) "، الذي يُعد مؤشراً أساسياً لتقييم جودة الإضاءة الطبيعية داخل الفراغات. الشكل (١)

- **ضوء الشمس المباشر:** يتميز بكثافة عالية لكنه قد يسبب وهجاً وانزعاجاً حرارياً. ويُتحكم فيه باستخدام وسائل معمارية مثل الأرفف، مظلات التظليل، والزجاج منخفض النفاذية . (Tregenza, 2011)
- **مكون السماء (SC) :** يمثل الضوء المنتشر من السماء، ويُعتبر أساسياً في تقييم الأداء الضوئي خاصة في ظروف الغيوم، ويُحسّن بتوجيه النوافذ المناسب وزيادة مساحة الفتحات. (Baker, 2002)
- **المكون العاكس الخارجي (ERC):** ينتج عن انعكاس الضوء من أسطح خارجية، ويُعزز باستخدام مواد ذات لون فاتح في المحيط العمراني. (Li, 2008)
- **المكون العاكس الداخلي (IRC):** يعتمد على انعكاس الضوء من الأسطح الداخلية، ويُعزز باستخدام ألوان وتشطيبات فاتحة عالية الانعكاسية.(Tregenza, 2011)



الشكل. ١ تحليل مكونات الإاءة الطبيعية: الإضاءة المباشرة والمنعكسة. (Mohammed, 2022)

ويُحسب عامل ضوء النهار كما يلي:

$$DF = \frac{(SC+ERC+IRC)}{\text{الخارجية الإضاءة}} \times 100\%$$

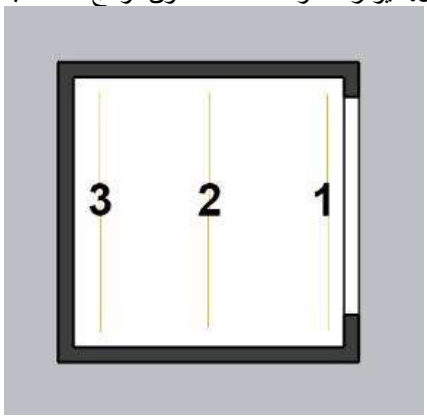
تشير القيم التي تتجاوز ٢٪ إلى إمكانية الاعتماد على الإضاءة الطبيعية للمهام اليومية دون الحاجة إلى دعم كهربائي. (Baker, 2002). في المناطق ذات الكثافة العمرانية العالية، تعيق العوائق البصرية مثل المباني المجاورة أو الأشجار المرتفعة دخول الضوء، مما يستدعي تخطيطاً لتوظيف الضوء الطبيعي بطريقة فعالة. (Li, 2008)

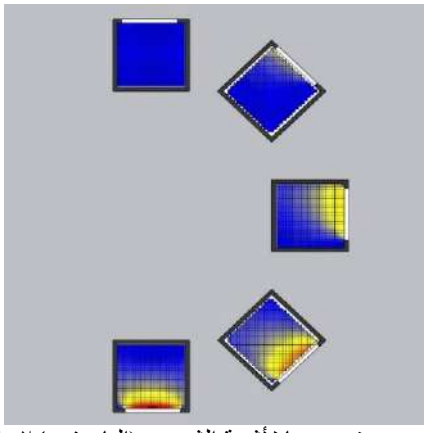
١-٣ تأثير الضوء الطبيعي على التوجيه وعمق الفضاءات التعليمية:

١-٣-١ دور التوجيه المعماري:

يُعد توجيه المبنى من العوامل الحاسمة في تحديد جودة الإضاءة الطبيعية. الاتجاهات المختلفة تؤثر على كمية ونوعية الضوء كما يلي: الشكل (٢)

- **الشمال:** يوفر ضوءًا منتظمًا دون وهج، مناسب للأنشطة الدقيقة.
- **الجنوب:** يسمح بدخول الضوء أغلب ساعات النهار، ويُفضّل معه استخدام عناصر تظليل.
- **الشرق:** يدخل ضوء صباحي ساطع يساعد على التركيز.
- **الغرب:** يتطلب حلولاً لتقليل وهج المساء(Tregenza, 2011)

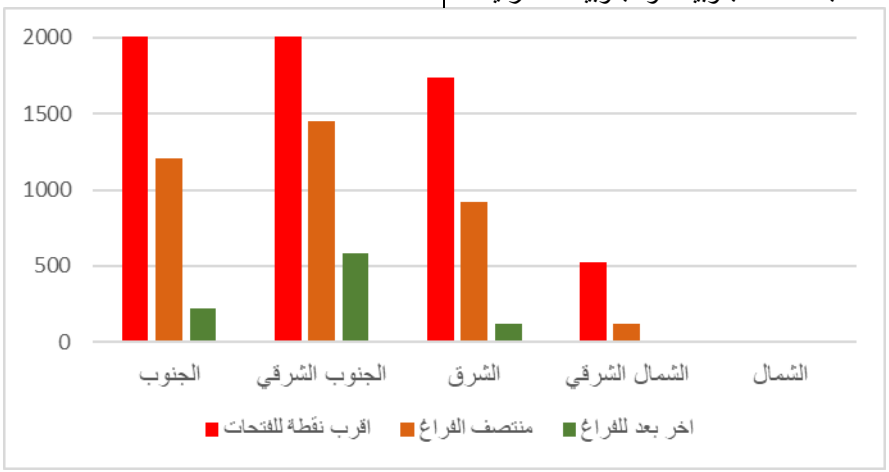




الشكل (٢) تحليل الإضاءة الطبيعية داخل الفراغات بناءً على اتجاه الفتحات ومدى تعرضها لأشعة الشمس. (الباحث، ٢٠٢٤)

في سياق تحسين الإضاءة الطبيعية داخل المباني التعليمية، يُعد فهم توزيع شدة الضوء في مختلف أجزاء الفراغ الداخلي أمرًا محوريًا لتقييم كفاءة التصميم المعماري. تختلف شدة الضوء الطبيعي باختلاف المسافة عن النوافذ، حيث تسجل المناطق القريبة من الفتحات أعلى معدلات التعرض للضوء النهاري، في حين تنخفض هذه المستويات تدريجيًا كلما تعمقنا داخل الفراغ. (Baker, 2002) ويُظهر تحليل عدد ساعات الإضاءة السنوية في قاعة الدراسة محل البحث ثلاث مناطق متمايزة من حيث شدة الإضاءة: الشكل (٣)

- **المنطقة القريبة من الفتحات (ممثلة باللون الأحمر):** تسجل أعلى مستويات التعرض، متجاوزة ٢٥٠٠ ساعة سنويًا في الاتجاهات الجنوبية والجنوبية الشرقية، وتنخفض تدريجيًا في الاتجاهات الشرقية ثم الشمالية الشرقية، وتكاد تنعدم في الاتجاه الشمالي.
- **منتصف الفراغ (باللون البرتقالي):** تأتي في المرتبة الثانية من حيث التعرض، إذ تسجل أكثر من ١٢٠٠ ساعة سنويًا في الجهات الجنوبية، لكنها تنخفض بشكل ملحوظ كلما اتجهنا شمالاً.
- **الجزء الأعمق من الفراغ (باللون الأخضر):** يعاني من أدنى معدلات التعرض، إذ تقل القيم عن ٥٠٠ ساعة سنويًا، وتكاد تنعدم في المناطق الشمالية والشمالية الشرقية.



شكل (٣) مخطط تحليل الإضاءة الطبيعية داخل الفراغات بناءً على اتجاه الفتحات. (Baker, 2002)

يشير هذا التفاوت إلى أهمية الاعتبارات التصميمية الدقيقة، ليس فقط في تحديد مواضع الفتحات واتجاهاتها، بل أيضًا في معالجة عمق الفراغات الداخلية لضمان توزيع أكثر توازنًا للإضاءة الطبيعية. وتُبرز هذه النتائج الحاجة لتدخلات تصميمية فعالة، مثل إضافة نوافذ علوية (clerestory windows)، أو إدخال نظم توجيه ضوئي كرفوف الإضاءة (light shelves)، أو الاستفادة من تقنيات الإضاءة الطبيعية المتقدمة مثل نظام Himawari Daylighting System، لتحقيق تغطية ضوئية شاملة تقلل الاعتماد على الإضاءة الصناعية وتعزز الاستدامة البيئية والبصرية للفراغ التعليمي. (محمود ي.، ٢٠١٧)

١-٣-٢ تأثير عمق الفراغ:

كلما زاد عمق الغرفة، قل وصول ضوء النهار إلى الداخل. ويمكن تحسين الانتشار الضوئي عبر:

- زيادة الإرتفاع الداخلي برفع مستوى الأسقف أثناء التصميم لزيادة مسطح النوافذ على الواجهات.
- ضبط نسبة العمق إلى ارتفاع النوافذ (لا تزيد عن ٣:١).
- استخدام أسطح داخلية فاتحة وعاكسة (Tregenza, 2011).

١-٣-٣ استراتيجيات إنارة الفراغات العميقة:

تتضمن الحلول الفعالة ما يلي:

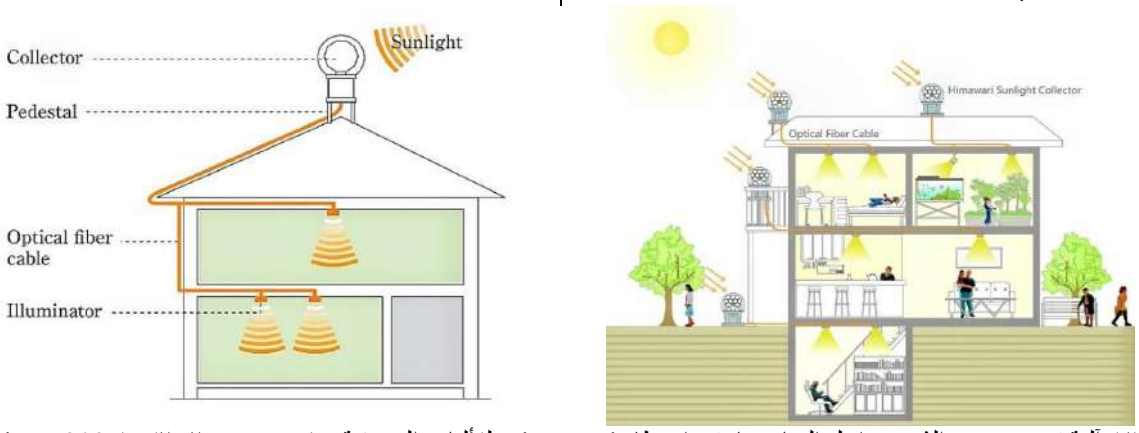
Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is pr cited.

- نوافذ السقف (Skylights) لتوفير إنارة عمودية.
- أرفف ضوئية لإعادة توجيه الإضاءة نحو العمق.
- مواد داخلية عالية الانعكاس.
- فواصل زجاجية لنقل الضوء بين المساحات. (Li, 2008)

يساهم الجمع بين استراتيجيات التوجيه السليم وتقنيات نشر الضوء في تحقيق بيئات تعليمية مريحة ومستدامة تدعم الأداء الأكاديمي وتعزز الكفاءة الطاقية.

٤-١ الإضاءة الطبيعية بالألياف الضوئية في العمارة التعليمية: التطبيقات، الأداء، والاعتبارات التصميمية

تُعد تقنيات الإضاءة الطبيعية باستخدام الألياف الضوئية من الحلول المستدامة والمبتكرة لتوفير إضاءة فعالة في المباني التعليمية، لاسيما في الفراغات التي يصعب وصول ضوء النهار إليها. الشكل ٤



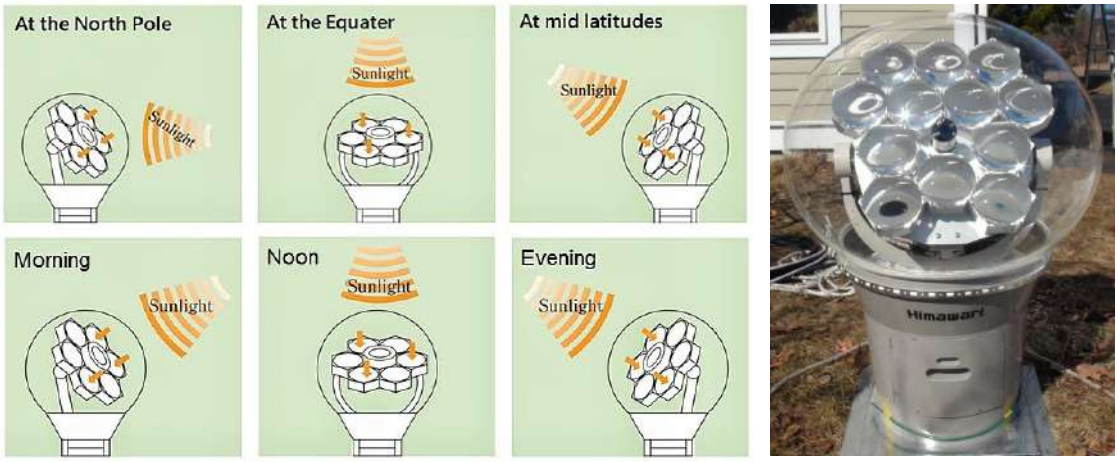
شكل (٤) آلية توزيع ضوء الشمس داخل المباني باستخدام نظام Himawari للألياف الضوئية : (Group، ٢٠٢٥)؛ (Lighting., 2025)

وتعمل هذه الأنظمة على نقل الضوء من مصادر خارجية مثل الشمس إلى داخل المبنى عبر كابلات ضوئية، ما يُسهم في تحسين جودة الإضاءة وتقليل استهلاك الطاقة، مع الحفاظ على بيئة بصرية مريحة وخالية من الوهج (احمد ا.، ٢٠٢٢)؛ (محمود ع.، ٢٠١٩).

٤-١-١ التطبيقات في العمارة التعليمية:

تتميز هذه الأنظمة بمرونتها في التوزيع، حيث يمكن لمجمّع ضوء واحد أن يخدم عدة نقاط إضاءة داخلية، وهو ما يجعلها مثالية للفصول الدراسية الداخلية، المختبرات، استوديوهات الفنون، والممرات غير المتصلة مباشرة بالخارج. كما تدعم هذه التقنية متطلبات التعليم من حيث الإضاءة الثابتة والخالية من الوميض، ما يقلل من الإجهاد البصري ويُعزز القدرة على التركيز لفترات طويلة (احمد ر.، ٢٠٢٠)؛ (مصطفى، ٢٠١٨).

وقد تم تطوير عدد من النظم التقنية لتطبيق هذه الفكرة، منها نظام "Himawari"الياباني الذي يستخدم عدسات فريزنل وتتبّع التوجه الشمسي لتوجيه الضوء إلى الألياف، شكل ٥، بقدرة تصل إلى ٣٠,٠٠٠ Lumens للوحدة، ونظام "Parans Solar Lighting" السويدي الذي يعتمد على ألواح تتبع شمسية. ((n.d.), 2025)



شكل (٥) عدسات فريزنل تتبع التوجيه الشمسي، نظام Himawari للألياف الضوئية : (Group، ٢٠٢٥)؛ (Lighting., 2025)

٤-١-٢ التجارب والسوق في مصر:

بدأت بعض الشركات المصرية في تبني هذه التقنية، ومنها "NSP Egypt" التي تقدم حلول تصميم وتنفيذ متكاملة، و "FiberTech Misr" المتخصصة في تركيب المكونات، و "Owire"المصنعة لكابلات الألياف الضوئية، بالإضافة إلى منصات بيع التجهيزات مثل "AbdoMarket" لتي تستهدف المدارس والمؤسسات التعليمية الخاصة.

٤-١-٣ الأداء والاعتبارات التصميمية:

يتطلب تطبيق أنظمة الألياف الضوئية إجراء دراسات إضاءة دقيقة تشمل قياس شدة الضوء المطلوبة لكل مساحة. فمثلاً، تحتاج قاعة دراسية بمساحة ٤٥٠ م² وارتفاع ٣ أمتار إلى شدة إضاءة تتراوح بين ٣٠٠–٥٠٠ Lux. ويمكن تحقيق ذلك باستخدام ١٨–٢٤ وحدة Himawariبقدرة إضاءة تقارب ٣٠,٠٠٠ Lumens لكل وحدة، توزع بشكل متوازن لضمان تغطية كاملة. (العظيم، ٢٠٠٩)

يعتمد نجاح النظام على جودة مكونات الألياف، دقة تصميم المسارات، وفعالية نظام التتبع الشمسي. وعلى الرغم من ارتفاع التكلفة المبدئية، فإن هذه الأنظمة توفر على المدى الطويل بيئة تعليمية صحية وتُقلل من استهلاك الطاقة، خاصة إذا دُمجت ضمن استراتيجيات المباني الخضراء. (جمال، ٢٠١٦)؛ (الرحيم، ٢٠١١).

٤-١-٤ التحديات والتوصيات:

تواجه هذه الأنظمة عدة تحديات، منها التكلفة الأولية المرتفعة، والحاجة إلى مهارات تركيب متخصصة، واعتمادها على توفر ضوء الشمس. ولضمان تطبيق فعّال، يُوصى بإجراء دراسات

جدوى مفصلة بالتعاون مع مزودي الخدمة لتحديد الأنظمة الأنسب، سواء كانت طبيعية، صناعية، أو هجينة. (سعيد، ٢٠٢١)

٤-٢ حلول الإضاءة بالألياف الضوئية للمناطق التعليمية المعتمة:

تُعد الألياف الضوئية وسيلة فعالة لنقل الضوء الطبيعي إلى الأماكن الداخلية، خصوصًا تلك التي تفتقر إلى النوافذ أو التهوية الجيدة، مثل الممرات، المختبرات، والمكتبات. وتوفر هذه التقنية إضاءة مستقرة وآمنة للعين، ما يُعد ميزة مهمة في البيئات التعليمية.

(محمود ع.، ٢٠١٩)؛ (Boyce, 2014)

تُستخدم الألياف عادة بنظام توزيع مرن يتيح توصيل الإضاءة إلى نقاط متعددة من مصدر واحد، مع إمكانية التحكم في شدة الإضاءة. وقد أثبتت الشركات العالمية مثل "Himawari" و"Parans" ريادتها في هذا المجال من خلال تطوير نظم فعالة وموجهة للمؤسسات التعليمية، كما بدأت السوق المصرية في احتضان هذه التقنيات من خلال شركات محلية تقدم خدمات متكاملة.

(n.d., 2025)، (Egypt, 2025)، (Himawari, 2025)

فنياً، يتطلب تركيب هذه الأنظمة تحديد الاحتياجات الضوئية بدقة ومطابقتها مع قدرات النظام من حيث التدفق الضوئي والانتشار، مع مراعاة الظروف المناخية والجغرافية للمنطقة المستهدفة.

(Ander, 2003)؛ (محمود ي.، ٢٠١٧)

ورغم التحديات التي تواجه هذه الأنظمة، فإن فوائدها البيئية والاقتصادية، بالإضافة إلى دعمها لأهداف التعليم المستدام، تجعل منها خيارًا واعدًا يجب تطويره وتوسيع نطاق استخدامه في المستقبل.

٢- المحاكاة الرقمية والتحليل التشخيصي:

٢-١ أدوات المحاكاة البيئية لتحليل الإضاءة الطبيعية:

في أبحاث التصميم المعماري المعاصر، أصبحت أدوات المحاكاة القائمة على الحاسوب جزءًا لا غنى عنه لتقييم الأداء البيئي ودعم القرارات التصميمية، لا سيما في مجال الإضاءة الطبيعية. تعتمد هذه الدراسة على برنامج VELUX Daylight Visualizer، وهو أداة محاكاة معترف بها وموثوقة طورتها مجموعةVELUX ، لتقييم ومقارنة أداء الإضاءة الطبيعية لمجموعة من البدائل التصميمية المعمارية.

يُعد برنامج VELUX Daylight Visualizer من البرمجيات الاحترافية المصممة لمحاكاة توزيع الضوء الطبيعي في الفضاءات المعمارية، وذلك باستخدام خوارزميات تتبع الأشعة المتقدمة والتحليل الضوئي الفوتومتري. يتيح هذا البرنامج نمذجة دقيقة لمستويات الإضاءة (illuminance) ، وعامل الضوء الطبيعي (Daylight Factor)، وشدة الوهج (glare) ، ومؤشرات الراحة البصرية، بالاعتماد على الخصائص الهندسية والمادية والمناخية. (Group.، ٢٠٢٤) ويُعتبر البرنامج مناسبًا بشكل خاص للبيئات التعليمية حيث تؤثر جودة الإضاءة الطبيعية بشكل مباشر على أداء المستخدم وراحته وكفاءة استهلاك الطاقة.

وفي سياق هذه الدراسة، التي تركز على قاعة دراسية استوديو في المعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥ مايو، تم استخدام البرنامج لإجراء مجموعة من التحليلات الحيوية، شملت ما يلي:

- **تقييم توزيع الضوء الطبيعي داخل الفراغ:** من خلال محاكاة الضوء الطبيعي المار من النوافذ في الواجهة الغربية والشمالية المطلة على الفناء الداخلي، تم قياس مستويات الإضاءة الطبيعية وتحديد ساعة التقييم وهي الساعة ١٦ مساءً يوم ٢٢ يونيو.
- **تحليل الانعكاسية المادية:** تم فحص الأسطح الداخلية– الأرضيات، الجدران، والأسقف– من حيث خصائصها العاكسة وتأثيرها على توزيع الضوء الطبيعي داخل القاعة.
- **تقييم نماذج التصميم المختلفة:** تم نمذجة وتحليل عدة بدائل تصميمية بهدف تحديد التكوين الأمثل الذي يوازن بين اختراق الضوء الطبيعي وتوزيعه المنتظم وتقليل الوهج.
- **تأثير العوامل الخارجية على الإضاءة الطبيعية:** تم محاكاة تأثير العوامل الخارجية مثل تحديد زوايا الشمس خلال توقيت الدراسة والظل الناتج عن المباني المجاورة لتقييم ظروف الإضاءة الواقعية في فصلي الشتاء والصيف.

وقد وفرت هذه المحاكاة أساسًا متينًا لإجراء تحليل تشخيصي، وأسهمت في تطوير تدخلات تصميمية تهدف إلى تحسين بيئة الإضاءة العامة في القاعة الدراسية. ويأتي استخدام برامج المحاكاة في هذا السياق متماشيًا مع أفضل الممارسات في أبحاث التصميم البيئي، مما يعزز من موثوقية النتائج وقابليتها للتكرار.

٢-٢ اختيار عينة الدراسة: قاعة الرسم الهندسي المعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥ مايو

٢-٢-١ مدينة ١٥ مايو كامتداد عمراني وموقع للدراسة:

تُعد مدينة ١٥ مايو من مدن الجيل الأول التي أُنشئت ضمن خطة الدولة للتوسع العمراني في الظهير الصحراوي لمدينة القاهرة بهدف تقليل الكثافة السكانية داخل العاصمة وتوفير بيئة عمرانية متكاملة جديدة. (العمرانية، ٢٠٢٠) . تقع المدينة جنوب القاهرة الكبرى، ويحدها من الشمال الطريق الدائري الجنوبي، ومن الجنوب محمية وادي دجلة، كما تتصل بمحيطها الحضري عبر طرق رئيسية ومحاور إقليمية. شكل (٦)

تتميز المدينة بمناخها شبه الصحراوي الذي يتسم بارتفاع درجات الحرارة نهارًا وانخفاضها ليلاً، مع قلة السحب والأمطار وزيادة معدلات الإشعاع الشمسي المباشر. هذه الخصائص المناخية تجعل منها بيئة نموذجية لدراسة استراتيجيات الإضاءة الطبيعية في العمارة التعليمية، خاصة في ظل الحاجة إلى تحقيق التوازن بين الإضاءة والراحة البصرية داخل الفراغات التعليمية. (العظيم، ٢٠٠٩)؛ (الرحيم، ٢٠١١)

٢-٢-٢ موقع المعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥ مايو:

يقع المعهد العالي للهندسة في الحي الحكومي القريب من مركز مدينة ١٥ مايو، ويُعد من المؤسسات التعليمية المحورية التي تستقطب طلابًا من جنوب القاهرة وضواحيها. يضم المعهد مبنى أكاديميًا متعدد الطوابق مصممًا بالأساليب التقليدية للبناء، ويحتوي على قاعات دراسية، معامل، واستوديوهات تطبيقية، ما يجعله بيئة مناسبة لتحليل الأداء البيئي والضوئي للفراغات التعليمية. شكل (٧، ٨).

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is pr cited.

شكل (٦) موقع مدينة ١٥مايو من القاهرة. (Earth., 2023)

شكل (٧) موقع المعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥مايو. (Earth., 2023)

شكل (٨) الموقع العام المعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥مايو. (Earth., 2023)

٢-٢-٣ اختيار قاعة الرسم الهندسي كحالة لدراسة الفراغات التعليمية الجامعية:

تُعتبر قاعات الرسم الهندسي من أكثر الفراغات التعليمية حساسية من حيث متطلبات الإضاءة، نظرًا لما تتطلبه من توزيع ضوئي منتظم وشدة إضاءة مرتفعة دون تكوين ظلال أو توهج يعيق دقة الرسم والتظليل. إذ تتطلب طبيعة النشاط داخل هذه القاعات إضاءة منتشرة أفقية لتقليل الظلال الناتجة عن حركة اليد والأدوات أثناء العمل. (Boyce, 2014)

وتُوصي الكودات الدولية مثل CIBSE بضرورة توفير شدة إضاءة لا تقل عن ٥٠٠ Lux في هذه القاعات، مع توجيه فتحات الإضاءة لتحقيق أفضل توزيع ممكن للضوء الطبيعي دون الاعتماد المفرط على الإضاءة الكهربائية. (Hopkins, 2012)كما تُعد قاعات الرسم مؤشرات فعالة لقياس جودة التصميم البيئي في المباني التعليمية، لما تتطلبه من معايير عالية تخص الإضاءة والتهوية والرؤية. (الصياد، ٢٠١٩)

وقد تم اختيار قاعة الرسم الهندسي محل الدراسة تحديدًا لأنها تقع في الطابق الثاني من مبنى المعهد، وتطل النوافذ الرئيسية على الواجهة الغربية، ما يجعلها معرضة لتغيرات ضوئية واضحة خلال اليوم. تبلغ أبعاد القاعة حوالي (٢٠م × ٢٢,٥م) بارتفاع سقف يصل إلى ٣ أمتار، ما يوفر خصائص هندسية ملائمة لتحليل ديناميكيات الإضاءة الطبيعية باستخدام أدوات المحاكاة الرقمية مثل VELUX Daylight Visualizer.

ومن الملاحظ أن هذه القاعة تعتمد بشكل كبير على الإضاءة الكهربائية خلال ساعات النهار، رغم توفر ضوء طبيعي في البيئة المحيطة، مما يشير إلى ضعف في كفاءة التوجيه والتصميم البيئي للفتحات، ويستدعي إجراء تحليل بيئي لاقتراح تحسينات فعالة. (محمود ع.، ٢٠١٩).

٢-٣ السياق المؤسسي: المعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥ مايو:

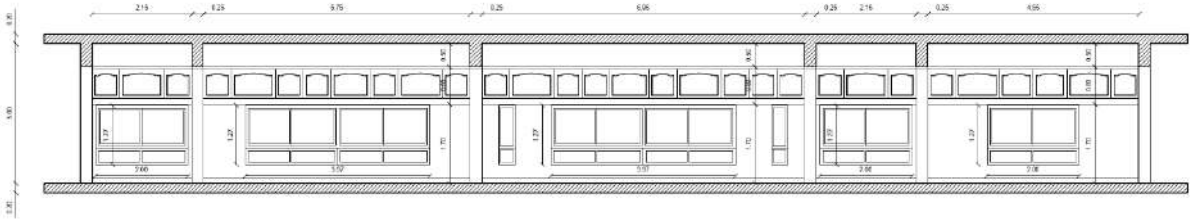
يقع المعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥ مايو ضمن محافظة القاهرة، ويُعد من مؤسسات التعليم العالي الخاصة في مصر، حيث يقدم برامج أكاديمية متعددة في تخصصات الهندسة المختلفة. ويهدف المعهد إلى إعداد كوادر فنية مؤهلة من خلال مواءمة منظومته التعليمية مع المعايير المعاصرة لسوق العمل.

٢-٣-١ الخلفية التاريخية للمبنى:

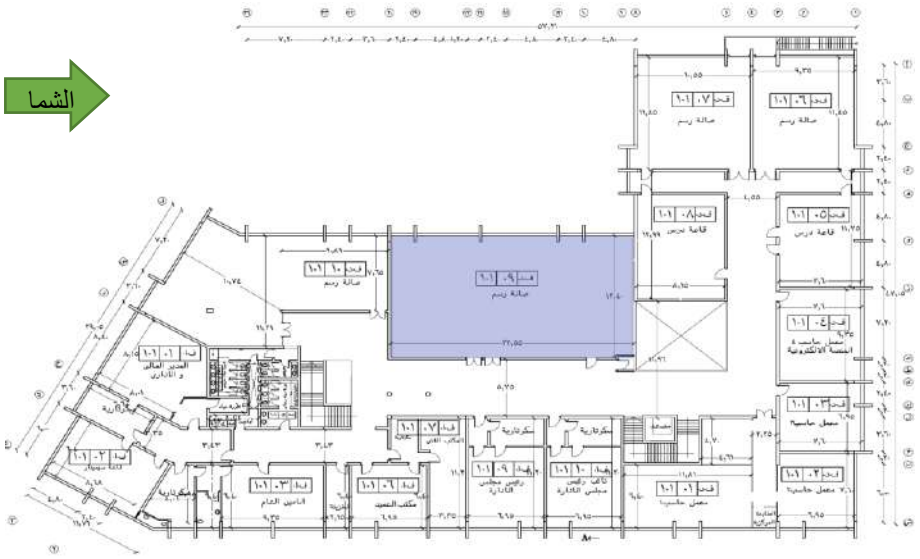
قبل أن يتم تخصيص المبنى لوظيفته التعليمية الحالية، كان قد شُيّد في الأصل كمركز تجاري (Mall). وقد نتج عن هذا التحول الوظيفي من استخدام تجاري إلى تعليمي مجموعة من التحديات المكانية والوظيفية أثّرت على مدى ملاءمته للأنشطة الأكاديمية. فالمباني التجارية عادةً ما تُصمم كوحدات مغلقة مخصصة للبيع بالتجزئة، مع اعتماد كبير على الإضاءة الاصطناعية وتهوية محدودة – وهي ظروف لا تتناسب مع متطلبات الفصول الدراسية أو المختبرات أو فضاءات الاستوديو.

٢-٣-٢ خصائص القاعة الدراسية:

- **أبعاد الفراغ:** ٢٢,٥م × ١٢,٤م، والقاعة لها بابين للدخول ومخرج للطوارئ.
- **التوجيه:** القاعة توجد في الظلع الغربي من المبنى الرئيسي بالدور الأول وان فتحات الشبابيك الرئيسية تقع على الضلع الغربي بالاتجاه الطولي للقاعة، وتوجد شبابيك بنصف مسطح الطلع الشمالي وهي تطل على فناء داخلي مسقوف. الشكل ٩؛ الشكل ١٠، الشكل ١١.
- **نوع الفتحات:** الشبابيك في الضلع الغربي والشمالي للقاعة هي شبابيك ألومنيوم منزلقة مع زجاج شفاف بسمك ٦مم.
- **المواد المستخدمة في التشطيبات الداخلية:** الارضيات سيراميك لامع باللون البني مائل للون البرتقالي، الحوائط دهانات بلاستيك من درجة اللون البيج الفاتح، الاسقف استخدام السقف المعلق من بلاطات جبسية ابعادها٦٠سم * ٦٠ سم ولونها ابيض.
- **توزيع الإضاءة:** تعتمد القاعة على الإضاءة الطبيعية من الاتجاهات المذكورة سابقا من الفتحات واستخدمت أنظمة الإضاءة الصناعية Spot Light بالسقف المعلق. الشكل ١٠



شكل (٩) قطاع تفصيلي لشكل الواجهة الغربية الداخلية للقاعة. (الباحث.، ٢٠٢٥)



شكل (١٠) المسقط الافقي للدور الأول للمعهد العالي للهندسة، وتحديد قاعة الدراسة. (الباحث، ٢٠٢٥)

٢-٣-٣ التحديات الناتجة عن التحول الوظيفي:

تطلب تحويل المبنى من مول تجاري إلى منشأة تعليمية سلسلة من التعديلات المعمارية والبُنيوية، شملت ما يلي:

- **إعادة توزيع الفضاءات:** افتقر المخطط الأصلي إلى تنظيم مكاني مناسب للاستخدام التعليمي، ما استدعى إعادة تصميم الفضاءات الداخلية لتوفير فصول دراسية، ومعامل، وبيئات استوديو مفتوحة.
- **قيود الإضاءة والتهوية:** وفرت البنية الأصلية للمبنى تعرضًا ضئيلاً للضوء الطبيعي والهواء النقي، نظرًا لطبيعته المغلقة، وهو ما شكل تحديًا خاصةً في استوديوهات التصميم التي تتطلب إضاءة طبيعية عالية الجودة. لذلك، تم تنفيذ تدخلات لزيادة نفاذية الواجهات، وتوسيع الفتحات، وتحسين تدفق الهواء.
- **إعادة هيكلة البنية التحتية:** شمل التحول أيضًا تحديثات كبيرة في أنظمة الميكانيكا والكهرباء والصرف الصحي. حيث أعيد تصميم الأحمال الكهربائية وأنظمة الإضاءة لتلائم متطلبات معامل الحاسوب والورش الفنية، إلى جانب تعديلات في أنظمة الصرف لخدمة المختبرات.
- **التكيّف الوظيفي والجمالي:** تم تنفيذ تعديلات تصميمية تدريجية لتحسين قابلية الاستخدام والبيئة البصرية، شملت التشطيبات الحديثة، تحسين الصوتيات، استراتيجيات تهوية أفضل، وإعادة تشكيل الفضاءات لتتوافق مع متطلبات العملية التعليمية.

٣-٣ المقارنة التحليلية للبدائل التصميمية:

تتضمن هذه الدراسة تحليلاً مقارنًا قائمًا على المحاكاة لتقييم فعالية استراتيجيات الإضاءة الطبيعية في بيئة استوديو تعليمي. ومن خلال استخدام برنامج VELUX Daylight Visualizer – وهو برنامج محاكاة معتمد يعتمد على تتبع الأشعة للضوء الطبيعي – تم نمذجة ثلاث سيناريوهات تجريبية لتقييم أداء الضوء الطبيعي في ظل تدخلات معمارية مختلفة. ويهدف التحليل إلى قياس وتوزيع شدة الإضاءة (luminance) وتحسين مستويات الراحة البصرية داخل الفراغ، مع تقليل الاعتماد على الإضاءة الاصطناعية.

وتُقاس شدة الإضاءة بوحدة "شمعة لكل متر مربع(cd/m^2) "، وهي وحدة توفر مؤشرًا إدراكيًا للسطوع الظاهري للأسطح الداخلية تحت تأثير الضوء الطبيعي. ويُعد هذا المؤشر بالغ الأهمية في البيئات التعليمية حيث تؤثر جودة الإضاءة على الأداء المعرفي، والتركيز، والراحة المتكاملة باستخدام الفراغ الداخلي.

وقد تم اتباع بروتوكول محاكاة مضبوط يتضمن ثلاث نماذج تجريبية مميزة، تمثل كل منها بديلاً تصميميًا يهدف إلى تحسين أداء الإضاءة الطبيعية، وجميعها تستند إلى المواصفات الهندسية والمادية لقاعة دراسية نموذجية (استوديو تصميم) بالمعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥ مايو.

شكل (١١) صور لشكل القاعة الدراسية محل الدراسة التصميمية توضح إنتشار الضوء الطبيعي . (الباحث، ٢٠٢٥)

١-٣-٣ التجربة الأولى: التكوين القائم (الظروف الحالية):

يمثل هذا السيناريو الوضع القائم للمساحة التعليمية، دون أي تعديلات على العناصر المعمارية. وتشمل المحاكاة أبعاد النوافذ واتجاهاتها الأصلية – والتي تتركز أساسًا في الواجهة الغربية – بالإضافة إلى التشطيبات الداخلية الحالية مثل الجدران المطلية باللون البيج، والأسقف المكونة من بلاطات الجبس الأبيض، والأرضيات الخزفية اللامعة. وتُستخدم هذه التجربة كنقطة مرجعية لتقييم الأداء الفعلي للإضاءة الطبيعية في الفراغ. وتشمل مؤشرات الأداء الأساسية: توزيع شدة الإضاءة، وجود مناطق مضاءة بشكل مفرط أو ضعيف، ومدى الالتزام بالمستويات الموصى بها للإضاءة في البيئات التعليمية، عادة بين ٣٠٠–١٥٠٠ cd/m^2 حسب نوع النشاط البصري.

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is pr cited.

٣-٣-٢ التجربة الثانية: تكبير مساحة التزجيج في الواجهة الغربية:

تفحص هذه التجربة تأثير زيادة مساحة النوافذ بنسبة ٣٠٪ في الواجهة الغربية، بهدف تعزيز فتحة الضوء الطبيعي الأفقية. رغم أن زيادة مساحة النوافذ تُحسّن من دخول الضوء الطبيعي، إلا أنها قد تسبب وهجًا مفرطًا، خاصةً خلال ساعات بعد الظهيرة بسبب زاوية الشمس المنخفضة. وتُحلل المحاكاة التغيرات في متوسط شدة الإضاءة، واستقلالية الإضاءة الطبيعية، والتوازن المكاني بين المناطق المضاءة والمظللة. ويُعد المفاضلة بين كمية الضوء الطبيعي ومستوى الراحة البصرية من الاعتبارات المركزية في هذا النموذج، ومدى فاعلية هذه التجربة في كفاءة الأداء الحراري.

٣-٣-٣ التجربة الثالثة: دمج نظام الإضاءة الطبيعية بالألياف الضوئية (Himawari):

يتضمن هذا السيناريو استخدام نظامHimawari ، وهو نظام إضاءة شمسية يستخدم عدسات هيليوستات وكابلات ألياف ضوئية لتتبع الضوء الشمسي وتوجيهه إلى داخل المبنى. يتيح هذا النظام توصيل الضوء الطبيعي مباشرة إلى مناطق عميقة داخل الفراغ حيث لا تصل الإضاءة التقليدية، ويُعد حلاً هجينًا بين النظامين السلبي والنشط. وقد تم في المحاكاة تحليل انتشار الضوء، وتدرجات شدته، ومستويات التحكم في الوهج لتقييم فعالية هذا التدخل التكنولوجي.

٣-٤ معايير التحليل المقارن:

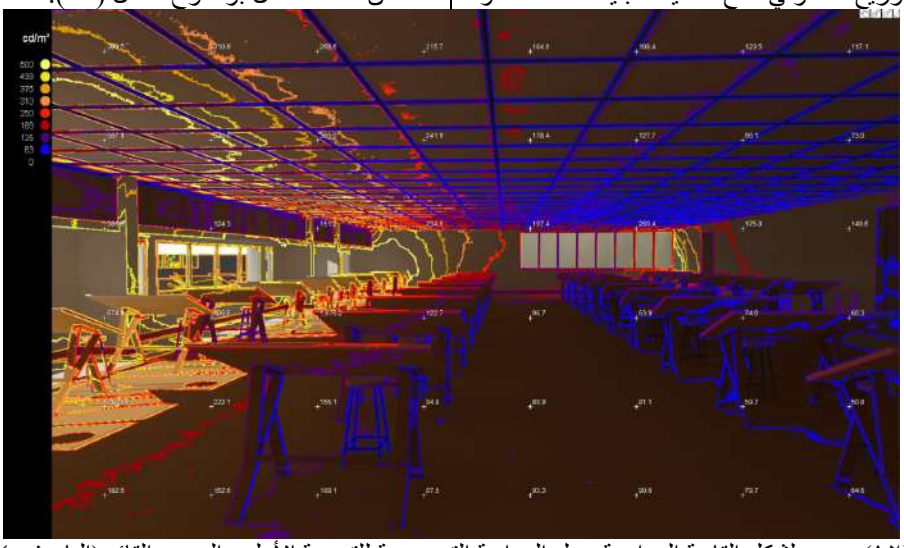
تم تقييم مخرجات المحاكاة في جميع السيناريوهات الثلاثة باستخدام مجموعة موحدة من مؤشرات الأداء:

- متوسط شدة الإضاءة في المناطق المشغولة، وخصوصًا على ارتفاع سطح المكتب (حوالي ٠,٧٥ م فوق الأرض).
- نسبة تجانس التوزيع الضوئي، مع تحديد التباينات الحادة أو المناطق المظللة.
- عتبات الراحة البصرية، مع التركيز على تجنب مستويات الإضاءة الزائدة عن ١٥٠٠ cd/m² (خطر الوهج) والمستويات الأقل من ٣٠٠ cd/m² غير كافية للمهام البصرية.
- استقلالية الإضاءة الطبيعية (sDA) والإضاءة الطبيعية المفيدة – (UDI)مستنتجة من توزيع شدة الإضاءة ومدتها خلال اليوم.

٤-٣-١ التجربة الأولى: الحالة المرجعية – ظروف الإضاءة القائمة:

تكشف المحاكاة التي أُجريت باستخدام برنامج VELUX Daylighting Visualizer عن تفاوت ملحوظ في شدة الإضاءة (luminance) داخل القاعة الدراسية. حيث تسجل مستويات السطوع بالقرب من الواجهة الغربية، لا سيما بمحاذاة النوافذ، أكثر من 680 cd/m²، ما يؤدي غالبًا إلى حدوث وهج نتيجة انعكاس الضوء على الأسطح اللامعة مثل الطاولات وأرضيات السيراميك. تتجاوز هذه القيم الحدود الموصى بها لراحة الرؤية في البيئات التعليمية.

وعند الانتقال نحو مركز القاعة، تنخفض شدة الإضاءة إلى ما بين 120 cd/m²، ٢٥٠ ، وهي تقع ضمن الحدود المقبولة، لكنها تعاني من توزيع غير متجانس. أما المناطق الخلفية والشرقية – وخصوصًا الزوايا – فتسجل مستويات منخفضة حرجة تقل عن 60 cd/m²، وتصل في بعض المواضع إلى 50 cd/m²، وهو ما يقل عن الحد الأدنى المطلوب لأداء المهام البصرية المريحة مثل القراءة والكتابة. تعكس خريطة المحاكاة اللونية – من الأبيض الساطع إلى الأزرق الداكن – هذا الخلل بوضوح، شكل (١٢).



شكل (١٢) صور لشكل القاعة الدراسية محل الدراسة التصميمية للتجربة الأولى: الوضع القائم (الباحث، ٢٠٢٤)

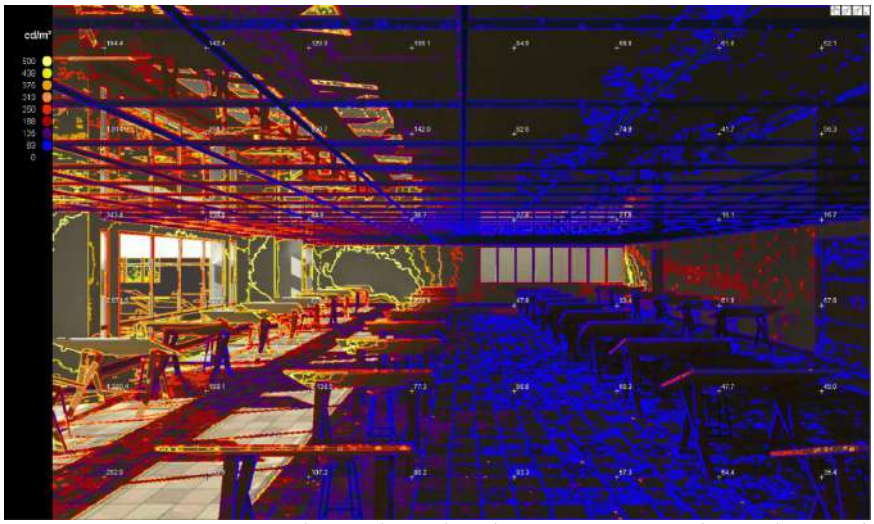
تُبرز الفجوة الكبيرة في توزيع الإضاءة داخل الفراغ. ورغم وجود نوافذ في الواجهة الشمالية، إلا أن توجيهها نحو فناء داخلي ضيق حدّ من دخول الضوء الطبيعي. وكنتيجة لذلك، تفشل البنية المعمارية الحالية في تحقيق توزيع متجانس أو كافٍ للإضاءة الطبيعية، مما يُبرز الحاجة إلى حلول بديلة للإضاءة أو تعديلات تصميمية لتحسين عدالة توزيع الإضاءة ضمن الفضاء.

٤-٣-٢ التجربة الثانية: زيادة مساحة الفتحات الغربية(+30%)

تختبر هذه التجربة تأثير زيادة مساحة النوافذ بنسبة 30% في الواجهة الغربية. وتُظهر نتائج المحاكاة ارتفاعًا في شدة الإضاءة بمحاذاة الفتحات الموسعة، حيث تصل القيم إلى 860 cd/m²، مما يُحسّن من السطوع على طول الطرف الغربي من القاعة. ومع ذلك، تظل المناطق المركزية والشرقية تعاني من ضعف الإضاءة، إذ تُسجل بعض المواضع قيمًا منخفضة تتراوح بين 16و٤٠cd/m² ، مما يدل على استمرار نقص الإضاءة.

وتُظهر الأسطح العلوية – وخاصة بلاطات الجبس في السقف – تباينًا حادًا: حيث تبلغ شدة الإضاءة 300–350 cd/m²بالقرب من النوافذ، مقابل 50–80 cd/m² في المناطق الداخلية الأعمق، وهو ما يزيد من حدة التباين الإدراكي داخل الفراغ. كما تؤكد خرائط الإضاءة الملونة هذا التباين، حيث تتركز الألوان الدافئة (الأصفر والبرتقالي) بجوار الفتحات، بينما تهيمن الألوان الباردة (الأزرق والبنفسجي) في المناطق البعيدة عنها.

ورغم أن زيادة مساحة التزجيج سمحت بدخول كمية أكبر من الضوء الطبيعي، إلا أنها أدّت أيضًا إلى زيادة خطر الوهج واكتساب الحرارة الشمسية، مما يؤثر سلبًا على الراحة الحرارية. وتُظهر هذه التجربة أن الاكتفاء بزيادة مساحة الفتحات الزجاجية لا يُعالج بشكل كافٍ اختلالات الإضاءة، وقد يترتب عليه مشكلات جديدة مثل ارتفاع درجة الحرارة وعدم الراحة البصرية. ومن ثم، تبرز الحاجة إلى نهج تصميمي أكثر توازنًا واستهدافًا. الشكل ١٣



شكل (١٣) التجربة الثانية زيادة مسطحات الشبابيك في الواجهة الغربية بنسبة ٣٠٪ باستخدام برنامج VELUX Daylighting Visualizer (cd/m²). (الباحث، ٢٠٢٤)

٤-٣-٣ التجربة الثالثة: دمج نظام الإضاءة الطبيعية بالألياف الضوئية (Himawari)

يستعرض السيناريو الثالث إدماج نظام Himawari للإضاءة الطبيعية بالألياف الضوئية، والذي يعمل على تجميع أشعة الشمس وتوجيهها إلى الفضاءات الداخلية باستخدام عدسات بصرية وألياف ضوئية. وقد أظهرت نتائج المحاكاة أن هذا النظام يُحسّن بشكل كبير من تجانس توزيع الإضاءة داخل القاعة، حيث تم القضاء على التباينات الحادة التي ظهرت في النماذج السابقة. الشكل ١٤

شكل (١٤) تحليل الإضاءة الطبيعية – تجربة استخدام الألياف الضوئية مثل (Himawari) (الباحث، ٢٠٢٤)

وتتراوح قيم شدة الإضاءة المحاكاة بين ٦٠٠ cd/m²، ٩٠٠ في معظم أنحاء القاعة، بما في ذلك المناطق التي كانت تعاني سابقًا من ضعف الإضاءة، والتي باتت الآن ضمن النطاق المريح بين cd/m² 500، 750 ويتوافق هذا النطاق مع المعايير المثلى للإضاءة في البيئات التعليمية، مما يدعم كلاً من راحة الرؤية وكفاءة أداء المهام البصرية.

٤-٣-٤ حساب عدد الوحدات المطلوبة من Himawari :

- معطيات القاعة: المساحة: ٢٢,٥ م × ١٢,٤ م = 279 م²
- متوسط شدة إضاءة مستهدفة: (٣٠٠–٥٠٠ Lux) تقابل ~ ٣٠٠–٥٠٠cd/m² بافتراض انعكاسية قياسية للأسطح.
- قدرة وحدة:Himawari تعطي في المتوسط 30,000 Lumens ضوء طبيعي، كل وحدة يمكن توصيلها إلى 6–8 نقاط ضوئية داخلية

الحساب: جدول ٢

- إجمالي Lumens المطلوب = ٢٧٩ × ٤٠٠ = ١١١,٦٠٠ Lumens
- عدد الوحدات المطلوبة = ١١١,٦٠٠ ÷ ٣٠,٠٠٠ تقريبا ٤ وحدات
- عدد النقاط الضوئية المغذاة = ٤ × ٦ = ٢٤ نقطة ضوئية تغطي كامل القاعة

٥- تقييم استراتيجيات الإضاءة الطبيعية في الفضاءات التعليمية: دراسة محاكاة مقارنة

٥-١ التجربة الأولى: الحالة المرجعية– ظروف الإضاءة القائمة

كشفت المحاكاة التي أُجريت باستخدام برنامج VELUX Daylighting Visualizer عن تفاوت كبير في شدة الإضاءة (luminance) عبر أرجاء الفصل الدراسي. فقد تجاوزت مستويات السطوع بجوار الواجهة الغربية – لا سيما بالقرب من النوافذ – cd/m²٦٨٠ ، مما تسبب غالبًا في ظهور وهج ناتج عن انعكاس الضوء على الأسطح اللامعة مثل الطاولات وأرضيات السيراميك. وتفوق هذه القيم الحدود الموصى بها لراحة الرؤية في البيئات التعليمية.

وعند الانتقال نحو مركز القاعة، تنخفض شدة الإضاءة إلى ١٢٠–

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is pr cited.

cd/m²٢٥٠ ، وهي ضمن الحدود المقبولة لكنها تُظهر توزيعًا غير منتظم. أما المناطق الخلفية والشرقية – وخاصة الزوايا – فتُسجّل قيمًا منخفضة حرجة تقل عن cd/m²٦٠ ، مع وصول بعضها إلى cd/m²٥٠ ، وهي أقل من الحد الأدنى اللازم لإنجاز مهام بصرية مريحة كأنشطة القراءة والكتابة.

تُظهر خريطة المحاكاة، عبر التدرج اللوني من الأبيض الساطع إلى الأزرق الداكن، هذا الخلل بوضوح. ورغم وجود نوافذ مواجهة للشمال، فإن توجيهها نحو فناء داخلي ضيق قلل من كمية الضوء الداخل. وبذلك، تبيّن أن التكوين المعماري الحالي عاجز عن تحقيق إضاءة طبيعية كافية أو متجانسة، مما يستدعي التفكير في حلول بديلة للإضاءة النهارية أو إجراء تعديلات تصميمية لتحسين عدالة توزيع الإضاءة داخل الفضاء التعليمي.

٥-٢ التجربة الثانية: زيادة الفتحات الغربية:

تختبر هذه التجربة تأثير زيادة مساحة النوافذ في الواجهة الغربية بنسبة ٣٠٪. وقد أظهرت المحاكاة ارتفاعًا في شدة الإضاءة بالقرب من الفتحات الموسعة، حيث وصلت القيم إلى cd/m²٨٦٠ ، مما حسّن السطوع على طول الطرف الغربي للقاعة. إلا أن المناطق المركزية والشرقية لا تزال تعاني من نقص في الإضاءة، إذ سجلت بعض النقاط قيمًا منخفضة تتراوح بين ١٦–cd/m²٤٠ ، مما يدل على استمرار القصور في الإضاءة.

كما أظهرت الأسطح السقفية – وخاصة بلاطات الجبس – تباينًا حادًا، حيث بلغت شدة الإضاءة ٣٠٠–cd/m² ٣٥٠ بالقرب من الفتحات، مقابل ٥٠–cd/m² ٨٠ في المناطق الداخلية، مما يزيد من الشعور بعدم التوازن البصري. وأكدت خرائط التدرج اللوني للإضاءة هذا التفاوت، إذ تركزت الألوان الدافئة (أصفر وبرتقالي) قرب الفتحات، في حين سيطرت الألوان الباردة (أزرق وبنفسجي) في المواضع البعيدة.

ورغم أن التزجيج الإضافي سمح بدخول مزيد من الضوء الطبيعي، إلا أنه زاد أيضًا من احتمالية الوهج وكسب الحرارة الشمسية، مما يؤثر سلبًا على الراحة الحرارية. وتُظهر هذه التجربة أن مجرد تكبير الفتحات لا يكفي لعلاج مشكلات الإضاءة، بل قد يُدخل تحديات جديدة مثل ارتفاع درجات الحرارة وعدم الراحة البصرية، مما يُبرز الحاجة إلى حلول أكثر توازنًا وتخصصًا.

٥-٣ التجربة الثالثة: دمج نظام الإضاءة الطبيعية بالألياف الضوئية (Himawari)

يقدم السيناريو الثالث دمج نظام Himawari للإضاءة الطبيعية عبر الألياف الضوئية، والذي يعمل على تجميع الضوء الشمسي وتوجيهه إلى المساحات الداخلية باستخدام عدسات وألياف بصرية. وقد أظهرت هذه المنظومة تحسنًا كبيرًا في تجانس الإضاءة داخل القاعة، حيث تم القضاء على التباينات الشديدة التي ظهرت في النماذج السابقة.

وتراوحت القيم المحاكاة لشدة الإضاءة بين ٦٠٠–cd/m² ٩٠٠ في معظم أنحاء الفضاء، بما في ذلك المناطق التي كانت تعاني من نقص الإضاءة، والتي أصبحت ضمن نطاق ٥٠٠–cd/m²٧٥٠ ، وهو نطاق يتماشى مع معايير الإضاءة المثلى في البيئات التعليمية، مما يدعم كلاً من الراحة البصرية وكفاءة تنفيذ المهام.

٥-٤ التقدير الفني:

- مساحة القاعة: ٢٢,٥ م × ١٢,٤ م = ٢٧٩ م²
- متوسط الإضاءة المستهدف: ~٤٠٠ cd/m² ما يعادل تقريبًا ٤٠٠ Lux
- الإضاءة المطلوبة الإجمالية: ٢٧٩ × ٤٠٠ = ١١١,٦٠٠ Lumen
- إنتاجية وحدة Himawari الواحدة: ~٣٠,٠٠٠ Lumen تخدم ٦–٨ نقاط ضوئية
- عدد الوحدات المطلوبة: نحو ٤ وحدات رئيسية تغذي ما يصل إلى ٢٤ نقطة إضاءة موزعة

٥-٥ التقييم المقارن:

- نظام Himawari: يوفر ضوءًا طبيعيًا خاليًا من الوهج دون اكتساب حراري أو استهلاك كهربائي. يمتاز بعمر افتراضي يتجاوز ٢٠ عامًا مع صيانة محدودة. رغم تكلفته الأولية العالية، يصبح النظام مجديًا اقتصاديًا بعد ٥–٦ سنوات.
- نظام LED: فعال وقابل للتحكم، لكنه يستهلك الكهرباء ويتطلب استبدالاً دوريًا.
- الإضاءة الفلورية (Fluorescent): منخفضة التكلفة الأولية، لكنها تعاني من كفاءة ضوئية منخفضة، وانبعاث حرارة عالية، وعمر افتراضي قصير.

يهدف هذا التحليل المقارن إلى تقييم الأداء النوعي والاقتصادي لثلاثة أنظمة إضاءة مختلفة تستخدم في البيئات التعليمية، وهي: نظام الإضاءة الطبيعية Himawari، ونظام الإضاءة الصناعية باستخدام مصابيح LED بقدرة ٤٠ واط، ونظام الإضاءة التقليدية باستخدام المصابيح الفلورية. وقد تم اعتماد فترة زمنية تمتد إلى ٢٠ عامًا لقياس الجدوى طويلة الأمد، مع تجاهل تكاليف الصيانة نظرًا لتقاربها بين الأنظمة الثلاثة.

من الناحية النوعية، يُظهر نظام Himawari تفوقًا واضحًا في تحقيق إضاءة طبيعية متجانسة وخالية من الوهج، إلى جانب حيادية طاقية تامة، أي أنه لا يُسهم في رفع الحمل الحراري داخل الفراغات. هذه الخصائص تضمن مستوى عاليًا من الراحة البصرية، وهو أمر بالغ الأهمية في الفراغات التعليمية، لما له من تأثير مباشر على تركيز الطلبة وكفاءة البيئة التعليمية. في المقابل، تُنتج أنظمة الإضاءة الصناعية مثل LED والفلوريسنت توزيعات ضوئية قد تكون غير متجانسة، كما تسهم في توليد حرارة إضافية قد تؤثر سلبًا على جودة الهواء الداخلي.

اقتصاديًا، تختلف تكلفة كل نظام على مدار ٢٠ عامًا. يتميز نظام Himawari بأنه لا يستهلك أي طاقة كهربائية بعد التركيب، ما يعني أن تكلفته الوحيدة هي تكلفة التركيب الأولي، والتي تبلغ حوالي ٧٥٠ $ للوحدة. في المقابل، ورغم انخفاض تكلفة التركيب الأولي لكل من نظام LED (١٠ $) ونظام الفلوريسنت (٥ $)، إلا أنهما يعتمدان على استهلاك طاقة سنوي مستمر. إذ تصل تكلفة التشغيل السنوي لنظام LED إلى حوالي ٤٨٠ $، ما يؤدي إلى تكلفة إجمالية قدرها ٩,٦٠٠ $ على مدى ٢٠ عامًا، ليبلغ المجموع الكلي مع التركيب حوالي ٩,٦١٠ $. أما نظام الفلوريسنت، فتبلغ تكلفة تشغيله السنوية نحو ٧٢٠ $، ما ينتج عنه تكلفة تراكمية قدرها ١٤,٤٠٠ $ خلال فترة التشغيل، ليصل المجموع الكلي مع التركيب إلى نحو ١٤,٤٠٥ $.

يتضح من هذا التحليل أن نظامHimawari ، ورغم ارتفاع تكلفة تركيبه الأولى نسبيًا، يُعد الأقل تكلفة على المدى الطويل، حيث تبلغ تكلفته الإجمالية خلال ٢٠ عامًا ٧٥٠ $ فقط. وبالإضافة إلى مزاياه النوعية في توفير الراحة البصرية وعدم التسبب في الحمل الحراري، فإنه يُمثل خيارًا استراتيجيًا مثاليًا للمنشآت التعليمية المتوسطة والكبيرة التي تسعى لتحقيق أقصى درجات الاستدامة البيئية والكفاءة الاقتصادية في آنٍ واحد. جدول. ٤؛ جدول. ٣

لذا، يُوصى باعتماد نظام Himawari كحل مستقبلي فعّال لإضاءة الفراغات التعليمية، نظرًا لتكامله بين الأداء العالي وانخفاض التكاليف التشغيلية على مدار دورة الحياة.

جدول. ٢: التكلفة التقديرية لسعر وحدات التركيب. (الباحث، ٢٠٢٤)

النظام	عدد الوحدات	التكلفة/وحدة	إجمالي التكلفة (تقريبي)
Himawari	٢٤	750 $	18,000 $
LED (40W) لكل نقطة	24	10 $	240 $

Fluorescent (60W)	24	5 $	120 $

جدول ٣: تكلفة التشغيل السنوي / للوحدة الواحدة. (الباحث، ٢٠٢٤)

النظام / للوحدة الواحدة	استهلاك/ يوم (٨ ساعات)	استهلاك/ سنة (٢٥٠ يوم)	تكلفة سنوية ($/ ك.وات)
Himawari	0ك.وات	0	0 $
LED (40W)	0.96 ك.وات	240ك.وات·ساعة	480 $
Fluorescent	1.44ك.وات	360ك.وات·ساعة	720 $

٦- النتائج والتحليل:

لتقييم فعالية استراتيجيات الإضاءة الطبيعية المختلفة، تم توزيع عشر نقاط قياس بشكل منهجي من الواجهة الغربية إلى الداخل الشرقي لقاعة الرسم. وقد أُجريت جميع المحاكاة في نفس الوقت من اليوم وتحت ظروف إضاءة خارجية متقاربة لضمان الاتساق والدقة. تم تحليل قيم الإضاءة الناتجة) بوحدة (cd/m²) باستخدام برنامج جداول البيانات، مع الاستعانة بتمثيلات بيانية لتوضيح التباينات في توزيع السطوع عبر السيناريوهات التجريبية الثلاثة.

٦-١ الحالة المرجعية:

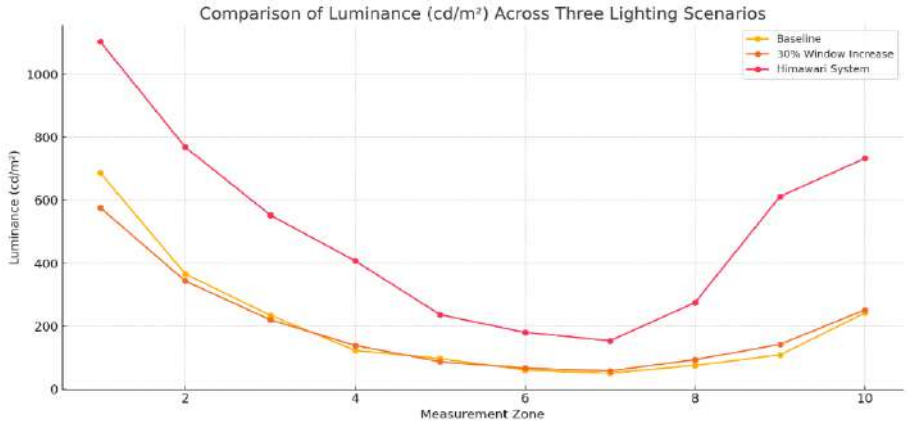
في حالتها الأصلية، أظهرت القاعة اختلالاً واضحاً في توزيع الإضاءة الطبيعية. حيث تم تسجيل أعلى مستوى للسطوع بالقرب من الواجهة الغربية، وبلغ تقريبًا ٦٨٧,١ cd/m² ، في حين انخفضت القيمة الأدنى في المناطق الشرقية القصوى إلى ٥٠,٨ cd/m². يبرز هذا التباين الحاد وجود تركّز إضاءة مفرط بالقرب من النوافذ، مقابل ضعف شديد في الإضاءة في المناطق الداخلية. وكانت النتيجة بيئة غير مريحة بصريًا، تجمع بين وهج مفرط في بعض المواضع وإضاءة غير كافية في أخرى، مما يؤثر سلبًا على الأداء العام للفراغ في سياق الأنشطة التعليمية.

٦-٢ زيادة مساحة النوافذ (توسعة الواجهة الغربية بنسبة ٣٠٪):

في التجربة الثانية، تم توسيع مساحة النوافذ في الواجهة الغربية بنسبة ٣٠٪. وقد حسّن هذا التعديل من نفاذية الضوء الطبيعي بالقرب من الواجهة، حيث ارتفعت قيمة السطوع القصوى إلى ٥٧٦,٨ cd/m². ومع ذلك، لم يُسهم هذا التعديل بفعالية في تحسين ظروف الإضاءة في كامل الفراغ. إذ بقيت قيم الإضاءة في المناطق المركزية والشرقية أقل من ١٠٠ cd/m² في العديد من النقاط، مما يدل على استمرار القصور في الإضاءة. علاوة على ذلك، أدى ازدياد مساحة التزجيج إلى تفاقم ظاهرة الوهج بالقرب من الفتحات، وأسهم في زيادة اكتساب الحرارة الشمسية، دون تحقيق توزيع متوازن للإضاءة داخل القاعة.

٦-٣ دمج نظام Himawari بالألياف الضوئية:

في السيناريو الثالث، تم إدخال نظام Himawari للإضاءة الطبيعية باستخدام الألياف الضوئية، بالتوازي مع إزالة السقف المعلق للسماح بانتشار الضوء بشكل رأسي كامل. وقد أسفر هذا التكوين عن فراغ مضاء بشكل متجانس، حيث لم تسجل أي نقطة قياس قيمة أقل من ١٥٠ cd/m². ، وبلغ متوسط شدة الإضاءة عبر جميع المناطق المختبرة. ٥٠٢,١ cd/m². نجح النظام في نقل وتوزيع الضوء الطبيعي إلى جميع أجزاء القاعة شكل. ١٥.



شكل (١٥) مقارنة توزيع شدة الإضاءة (cd/m²) داخل القاعة عبر ثلاث استراتيجيات تصميمية للإضاءة الطبيعية. (الباحث، ٢٠٢٤)

بما في ذلك تلك التي سبق تحديدها كمناطق ضعيفة الإضاءة. وأدى هذا التوزيع المتجانس إلى تحسين كبير في الراحة البصرية، وتقليل الوهج، والاستغناء التام عن الإضاءة الكهربائية خلال ساعات النهار، دون زيادة في مستويات الحرارة الداخلية. جدول ٤؛ جدول ٥

جدول ٤: بيانات المناطق العشر. (الباحث، ٢٠٢٤)

المنطقة	الوضع الحالي	بعد التوسعة	Himawari
1	687.1	576.8	1104.3
2	366.0	343.4	768.9
3	234.6	220.3	553.2
4	122.7	138.5	407.5
5	96.7	86.8	236.3
6	60.3	66.3	180.0
7	50.8	57.3	153.5
8	74.9	93.3	275.0
9	108.4	142.0	612.2
10	241.9	251.9	733.6

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is pr cited.

جدول ٥: التحليل الإحصائي (الباحث، ٢٠٢٤)

البند	Baseline	توسعة الشبابيك	Himawari
متوسط السطوع	204.5	221.6	502.1
أقصى فرق بين منطقتين	636.3	519.5	950.8
عدد المناطق < 125 cd/m²	6	5	0

٦-٤ التقييم المقارن:

تكشف السيناريوهات الثلاثة عن تحسن تدريجي في أداء الإضاءة:

- الحالة المرجعية أظهرت اختلالاً بصريًا واضحًا وضعفًا في جودة الإضاءة.
- استراتيجية توسيع النوافذ حسّنت بشكل طفيف من الإضاءة قرب الفتحات، لكنها فشلت في معالجة ضعف الإضاءة في المناطق العميقة، وأدخلت تحديات حرارية إضافية.
- نظام Himawari قدّم حلاً شاملاً وفعّالاً، محققًا عدالة في توزيع الإضاءة وراحة بصرية دون استهلاك طاقة إضافي.
- تؤكد هذه التحليلات أن تقنيات الإضاءة الطبيعية المتقدمة، عند دمجها بشكل مدروس مع تعديلات معمارية مكانية، توفر أداءً متفوقًا مقارنة بالحلول السلبية التقليدية. وتُبرز النتائج أهمية التوجيه المستهدف للضوء في تحقيق إضاءة متجانسة داخل الفراغات التعليمية ذات العمق الداخلي الكبير.

٧- الخاتمة:

تبرز التحليلات المقارنة لثلاثة سيناريوهات لمحاكاة الإضاءة الطبيعية ضمن قاعة رسم تعليمية واحدة أهمية ألا يقتصر التركيز على زيادة كمية الضوء الطبيعي الداخل فحسب، بل ينبغي أيضًا ضبط توزيعه وتوجيهه وانتشاره داخل الفراغ بعناية. إن تحقيق إضاءة طبيعية فعّالة يتطلب منهجًا شاملاً يضمن التوزيع المتجانس للإضاءة في جميع المناطق ذات الأهمية الوظيفية، لا سيما في المساحات الداخلية العميقة.

في الحالة القائمة، أظهرت القاعة اختلالاً بصريًا واضحًا؛ إذ تعرضت المناطق الطرفية المجاورة للواجهة الغربية إلى سطوع مفرط ووهج، بينما سجّلت المناطق الداخلية والشرقية مستويات إضاءة أقل من الحد الأدنى المقبول للراحة البصرية. وقد سُجّل أكثر من ٦٠٪ من نقاط القياس عند قيم تقل عن ١٢٥ cd/m² ، ما يشير إلى قصور كبير في الإضاءة اللازمة للمهام التعليمية. وأثبت الاعتماد الحصري على الفتحات الجانبية، عدم كفايته لتحقيق نفاذية ضوء مقبولة أو تغطية مكانية متجانسة.

أما السيناريو الثاني، الذي تم فيه زيادة مساحة الفتحات الزجاجية في الواجهة الغربية بنسبة ٣٠٪، فقد أسفر عن تحسّن محدود في السطوع المحلي قرب النوافذ، حيث سُجلت زيادة تراوحت بين ١٠–١٥٪ في تلك المناطق. إلا أن هذا التعديل لم يعالج المشكلة الجوهرية المتمثلة في التوزيع غير المتوازن للضوء. فقد ظل النفاذ إلى المناطق الأعمق محدودًا، وسجّلت أكثر من نصف مساحة القاعة مستويات إضاءة دون المستوى المطلوب. علاوة على ذلك، فإن زيادة مساحة التزجيج أدّت إلى تفاقم الوهج وارتفاع الحمل الحراري الشمسي، مما يبرز محدودية التعديلات المعمارية السلبية حين لا تُستكمل بإستراتيجيات توجيه ضوئي دقيقة.

في المقابل، مثّل السيناريو الثالث - الذي استُخدم فيه نظام الإضاءة الطبيعية عبر الألياف الضوئية (Himawari) - تقدمًا ملحوظًا في الأداء البصري. فقد أتاح دمج هذا النظام، بالتوازي مع إزالة السقف المعلق، توصيل الضوء الطبيعي بشكل موجه إلى ٢٤ نقطة موزعة أفقيًا ورأسيًا ضمن الفراغ. وأدى ذلك إلى تحقيق متوسط إنارة تجاوز ٥٠٠ cd/m² ، دون أن تنخفض أي من نقاط القياس عن ١٥٠ cd/m². وقد نتج عن هذا التكوين توزيع ضوئي عالي التجانس، حيث تم القضاء على مناطق الوهج والقصور الضوئي معًا. إضافة إلى ذلك، أسهم غياب الحمل الحراري المصاحب في تحسين الراحة الحرارية، مما وفّر بيئة داخلية مستقرة تعزز التركيز والإنتاجية على المدى الطويل.

بوجه عام، تؤكد النتائج أن تقنيات الإضاءة الطبيعية المتقدمة، عند تنفيذها بشكل صحيح، قادرة على تجاوز القيود التي تفرضها استراتيجيات التصميم التقليدية. ففي الفراغات التعليمية العميقة أو غير المتماثلة، غالبًا ما تكون الحلول السلبية وحدها غير كافية. ويُعدّ استخدام أنظمة توجيه الضوء النشطة، التي توفّر إضاءة طبيعية متوازنة وخالية من العبء الحراري، أكثر فاعلية واستدامة في تحقيق الراحة البصرية وكفاءة الطاقة.

المراجع: References

1- (n.d.), H. (2025, March 15). Natural Light System. Retrieved from https://www.himawari-net.co.jp/
2- A. Mohammed. (2022) Study of Shading Device Parameters of the Mixed-Mode Ventilation on Energy Performance of an Office Building: Simulation Analysis for Evaluating Energy Performance in Egypt . Advances in Architecture, Engineering and Technology .Springer, Cham . doi:10.1007/978-3-030-86913-7_19
3- ASHRAE. (2019). ASHRAE Standard 62.1: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality . ASHRAE.
4- D. H. W & ,.Tsang, E. K. W. Li. (2008). .(An analysis of daylighting performance for classroom design in Hong Kong .Building and Environment.٧٥٢–٧٤٤ ،(٥)٤٣ ،
5- G. D. Ander. (2003) Daylighting Performance and Design .Hoboken: NJ: John Wiley & Sons.
6- Google Earth. (2023). Google Earth تم الاسترداد من Google Earth.: https://earth.google.com/web/
7- L & ,.Torcellini, P. Edwards. (2002). A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants . doi:10.2172/15000841.
8- M. Boubekri. (2008). Daylighting, Architecture and Health: Building Design Strategies .oxford: Elsevier.
9- M.-C. Dubois. (2001). Impact of solar shading devices on daylight quality: A pilot study . Energy and Buildings.١١٨–١٠٥ ،(٢)٣٣ ،
10- Mori Bulding Group. (2025). How Himawari brings sunlight into your room تم الاسترداد من La Foret engineering: https://himawarisolar.com/himawari-solar-natural-lighting-system/how-it-works/
11- N & ,.Steemers, K Baker. (2002) Daylight Design of Buildings: A Handbook for Architects and Engineers .London: Earthscan.
12- NSP Egypt. (2025). NSP Egypt تم الاسترداد من .

NSP Egypt.: https://nspegypt.com/

13- P. R. Boyce. (2014) Human Factors in Lighting (الإصدار ٣rd).(Boca Raton, Florida: CRC Press.

14- Parans Solar Lighting. (2025). Daylight Transport Systems تم الاسترداد من .Parans Solar Lighting.: https://www.parans.com/

15- R. Hopkins. (2012). Lighting for Interior Design .London: Laurence King Publishing.

16- Reinhart, C. (2014). Daylighting Handbook I. Boston: BTES.

17- Tregenza, P. &. (2011). Daylighting: Architecture and Lighting Design. London: Routledge.

18- VELUX Group. (2024). VELUX Daylight Visualizer (Version 4.0) [Computer software for Windows] .VELUX Group تم الاسترداد من . Retrieved from https://www.veLux.com/what-we-do/daylight-visualizer

١٩- الباحث. (٢٠٢٤). VELUX Daylight Visualizer (Version 4.0) [Computer software for Windows] تحليلات باستخدام. VELUX Group.

٢٠- الباحث. (٢٠٢٥). بيانات ميدانية غير منشورة تم جمعها أثناء البحث حول المعهد العالي للهندسة بمدينة ١٥ مايو. القاهرة، مصر: الباحث.

٢١- الجوهري، سحر احمد. (٢٠٢٢). دور التصميم المعماري في تعزيز الاستدامة البيئية من خلال تحسين الإضاءة الطبيعية للمباني المدرسية. الزقازيق، رسالة دكتوراه، مصر: جامعة الزقازيق.

٢٢- الملا، هشام جمال. (٢٠١٦). مدخل الى تصميم المباني الموفرة للطاقة. القاهرة: الهيئة المصرية العامة للكتاب.

٢٣- حسن، احمد عبد الرحيم. (٢٠١١). اساسيات تصميم المباني الصديقة للبيئة. القاهرة: مكتبة الانجلو المصرية.

٢٤- راضي، منى احمد. (٢٠٢٠). استخدام نظم محاكاة الإضاءة الطبيعية في تقييم كفاءة المباني التعليمية القائمة. القاهرة، رسالة دكتوراه، مصر: جامعة عين شمس.

٢٥- سعاد مصطفى الصياد. (٢٠١٩). تحليل الأداء الضوئي لقاعات الرسم باستخدام محاكاة الإضاءة الطبيعية. المجلة الدولية للعلوم الهندسية والتكنولوجيا.

٢٦- عبد الغفار، صلاح عبد العظيم. (٢٠٠٩). الاعتبارات البيئية في تصميم المباني. القاهرة: مكتبة زهراء الشرق.

٢٧- عبد الله، دعاء محمود. (٢٠١٩). تأثير الإضاءة الطبيعية على كفاءة الأداء في مباني التعليم العالي في مصر. القاهرة، رسالة ماجستير، مصر: جامعة القاهرة.

٢٨- عبدالفتاح، لمياء مصطفى. (٢٠١٨). التحليل البيئي لأثر الإضاءة الطبيعية في تصميم الفراغات التعليمية المفتوحة. الاسكندرية، رسالة ماجستير، مصر: جامعة الاسكندرية.

٢٩- فهمي، نجلاء سعيد. (٢٠٢١). تأثير التوجيه المعماري على كفاءة توزيع الضوء الطبيعي في الفصول الدراسية. القاهرة، رسالة ماجستير، مصر: جامعة المنيا.

٣٠- وزارة الإسكان والمجتمعات العمرانية. (٢٠٢٠). البيانات الإحصائية لمدن الجيل الأول. مدينة ١٥ مايو: لهيئة العامة للتخطيط العمراني.

٣١- يوسف، هالة محمود. (٢٠١٧). العوامل المعمارية المؤثرة على كفاءة الإضاءة الطبيعية في المباني التعليمية بالقاهرة الكبرى. القاهرة، رسالة ماجستير، مصر: جامعة حلوان.

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is pr cited.