Journal of Al-Azhar University Engineering Sector

Vol.15, No. 54, January, 2020, 236-251

AN APPROACH TO DEAL WITH PROPLEMS OF EXISTING BUILDINGS' ENVELOPES USING GENERATIVE DESIGN

Mona Mohamed Hosni Aggour
Department of Architecture, Faculty of Engineering, Mataria, Helwan University, Helwan, Cairo, Egypt
E-mail: mona.mhosni@gmail.com

ABSTRACT
The research discusses the possibility of using generative design to improve the role of existing buildings' envelops by reshaping the original envelop or some of its elements according to the needs of the building. The research study the problems of existing building envelopes that the generative design could be a part of the solution, that demand study generative design concept in the production of new complex patterns, categorical dimensions of the envelope elements in the digital environment, then devising possible alternatives to reshape the existing building envelope by offering an approach to deal with the problems of buildings envelopes, includes the relationship between enhancement objectives, envelope components, alteration and addition strategies, then the design stages that include a list of formative alternatives to envelop elements. Then an experimental study on an existing building. The results proved that the efficiency of the interior spaces of a building can be improved with the help of generative design tools.

Keywords: Generative design, Generative system, Building envelope, Existing building, Envelope reshaping.

مدخل للتعامل مع مشكلات أغلفة المباني القائمة باستخدام التصميم التوليدي

منى محمد حسني عجور
قسم الهندسة المعمارية ، كلية الهندسة بالمطرية ،جامعة حلوان،القاهرة ، مصر
البريد الاليكتروني:E-mail: mona.mhosni@gmail.com

الملخص
يناقش البحث إمكانية استخدام التصميم التوليدي في تحسين دور أغلفة المباني القائمة وذلك بإعادة تشكيل الغلاف الأصلي أو بعض عناصره وذلك طبقاً لاحتياج المبنى واختبار هذا الطرح. ويتناول البحث دراسة بعض مشكلات أغلفة المباني القائمة، ودور التصميم التوليدي في إنتاج الأنماط التشكيلية المعقدة الجديدة، ودراسة أبعاد تصنيف عناصر الغلاف في البيئة الرقمية، ومن ثم استنباط البدائل الممكنة لإعادة تشكيل غلاف مبنى قائم من خلال طرح مدخل للتعامل مع مشكلات أغلفة هذه المباني ويشمل العلاقة بين أهداف التحسين ومكونات الغلاف واستراتيجيات التعديل والإضافة للغلاف التي يمكن تفعيلها، وخطوات التصميم التي تضم قائمة البدائل التشكيلية لعناصر الغلاف والتي يمكن أن تساعد المصمم في الاختيار باستخدام هذا النوع من التصميم. ومن ثم دراسة إمكانية التطبيق بإجراء دراسة تجريبية على أحد المباني القائمة بالفعل لاختبار الفرضية، وأثبتت النتائج أنه يمكن رفع كفاءة أداء أحد الفراغات الداخلية من حيث تحسين توزيع الإضاءة باستخدام الأنماط التشكيلية الحديثة بمساعدة أدوات التصميم التوليدي.

الكلمات المفتاحية: التصميم التوليدي، النظم الإنتاجية، غلاف المبنى، المباني القائمة، إعادة تشكيل الغلاف.

١ المقدمة: إشكالية البحث ، الهدف ، المنهجية

١-١ الإشكالية : مقدمة وعرض

منذ التسعينات من القرن العشرين استخدمت التقنية الرقمية كآداة أساسية في عملية التصميم المعماري، ومع التقدم التقني الرقمي ظهرت أدوات وبرمجيات تقود العملية الابداعية في العمارة لتكوين وتوليد أشكال معقدة، حيث أمكن باستخدام الحاسب الآلي معالجة جميع مراحل توليد التصميم، وتحديد أماكن العناصر وعلاقتها وأساليب التشييد والمواد المستخدمة، مما دفع الباحث إلى التفكير في إمكانية استخدام هذه التقنية في تحسين دور أغلفة المباني القائمة وذلك بإعادة تشكيل الغلاف الأصلي أو بعض عناصره وذلك طبقًا لاحتياج المبنى. المشكلة الأساسية في تحسين الوضع القائم مع مراعاة عدم الإخلال با لهيكل الإنشائي للمباني حيث أنها تمثل نسبة كبيرة من الإنشاء الحالي وتعاني من ضعف مستوى تصميم الغلاف وافتقار بعضها للمعالجات المعمارية التي يحتاج إليها المبنى لرفع كفاءة آداءه. وتبحث الدراسة في إمكانيات التشكيل الممكنة باستخدام التصميم التوليدي وما أفرزه من نتاج جديد لشكل الغلاف بهدف تحسين الجوانب الجمالية و البيئية التي تجعل هذه المباني قادرة على تحقيق وظيفتها بشكل جيد وفي ذات الوقت تكون عنصر جذب وبهجة للمستعمل. وترجع أهمية غلاف المبنى إلى كونه يُمثل خط الدفاع الأول لحماية المبنى من الظروف المحيطة، وبالتالي ه و أحد الحلول الرئيسية في مواجهة التغيرات البيئية، بالاضافة إلى تأثيره المباشر والهائل على مظهر المدن والتأثير على سلامة الوجدان. ومن هنا تظهر أهمية البحث في تقديم مدخل مُعاصر لإعادة تشكيل وتحديث أغلفة المباني القائمة وتأكيد العلاقة الترابطية بين تقنيات التصميم الحديثة وتحسين آداء الغلاف.

وفيما يلي عرض وتوثيق الوضع الراهن لبعض مشكلات متطلبات الآداء الوظيفي للغلاف:

- مشكلات بيئية: نتيجة ضعف إسلوب تصميم وتشكيل الغلاف الغير ملائم للاعتبارات المناخية، كاستخدام الواجهات الزجاجية بكامل مسطح المبنى دون الأخذ في الا عتبار الحماية من أشعة الشمس المباشرة وتأثيرها على جودة البيئة الداخلية للفراغ والتأثير السلبي على الراحة الحرارية مما يسبب رفع معدلات استهلاك الطاقة شكل١أ.
- مشكلات إنسانية: مثل الحاجة إلى تغيير الوظائف أوالحاجة إلى الامتداد والإضافة، شكل١ب. ، أو واجهات تحتاج إلى الاتصال بالمحيط الخارجي مع عدم تحقيق الخصوصية نتيجة وضع الفتحات.
- مشكلات جمالية: عدم الحفاظ على الطابع المعماري بالموقع، عدم توافق شكل المبنى مع وظيفته، ضعف العلاقات الجمالية، والمظهر الجمالي النهائي، شكل ١ج.

أ. إغفال بعض الظروف المناخية في تشكيل الواجهة [١]

ب. الحاجة إلى الامتداد بالإضافة واستخدام الهياكل الخرسانية بطريقة غير مناسبة [٢]

ج. الحاجة إلى تحسين المظهر الجمالي لأغلفة بعض المباني القائمة التي تفتقر إلى القيم الجمالية [٣]

شكل.١ يوضح بعض مظاهر مشكلات تصميم أغلفة المباني القائمة

١-٢ الهدف من البحث

يهدف البحث للوصول إلى مقترح مدخل لحل تصميمي معاصر سريع ومبتكر لإعادة تشكيل أغلفة المباني القائمة باستخدام التصميم التوليدي يساهم في تحسين الجوانب الجمالية والبيئية للمبنى وذلك بـ البحث في استراتيجية التصميم التوليدي وبدائل الحلول الممكنة لتحسين الغلاف باستخدام الامكانيات التشكيلية في تصنيف عناصر الغلاف باستخدام التصميم التوليدي.

١-٣ فرضية البحث

أنه يُمكن باستخدام التصميم التوليدي تعديل تصميم وتشكيل غلاف المبنى القائم أو بعض عناصره باستخدام أساليب مختلفة للتعديل والإضافة، لتحسين دوره في تحقيق متطلبات آداءه الوظيفي (البيئي - الإنساني - الجمالي).

١-٤ المنهجية والأدوات المستعملة

وصولاً إلى هدف البحث تتناول محورين رئيسيين:

- المحور الأول : ويشمل الدراسة النظرية بالتعرف على مفهوم التصميم التوليدي وأهميته كمفهوم رئيسي لنظم التصميم الانتاجية، ثم استعراض أسباب ودوافع التوجه نحو هذا النهج لتحقيق فكرة البحث، دراسة استراتيجية عمل التصميم

التوليدي، ثم التعرف على الاتجاهات الرئيسية لنظم التصميم التوليدي. يليها دراسة التحول المعاصر في تشكيل وتصميم غلاف المبنى والتي تشمل اشتراطات تصميم الغلاف، ومراحل تصميمه باستخدام التصميم التوليدي، ومن ثم تصنيف أبعاد تصميم عناصر الغلاف وفقا للتعبيرات المقابلة له في التصميم التوليدي أي الوسط الرقمي وبدائل الاختيارات، ثم التحليل والاستنباط لامكانيات التشكيلية لتعديل الغلاف باستخدام هذا النوع من التصميم.

- المحور الثاني: ويشمل الدراسة التجريبية لاختبار إمكانية تطبيق المدخل التصميمي المقترح لتعديل أغلفة المباني القائمة، وذلك باختيار مبنى قائم بالفعل وإعادة تصميم الغلاف باستخدام برامج ونظم التصميم التوليدي في إطار رفع كفاءته من الناحية البيئية والجمالية، واختبار كفاءة آداءه الوظيفي بتسليط الضوء على مُشكلة عدم كفاءة توزيع الاضاءة الطبيعية لأحد فراغاته، واختبارها باستخدام أحد برامج المحاكاة، لاختبار الفرضية، وتحقيق هدف البحث.

٢ التصميم التوليدي كمدخل لتطوير غلاف المبنى

يحتاج الإبداع في تطوير تصميم غلاف مبنى إلى عملية تصميم تحتضن التغيير، ومن الصعوبة أن تدعم الأدوات التقليدية التغيير بسهولة لأنها تحتاج الكثير من الوقت والجهد لتغيير النموذج Model. وفي المقابل، أصبح الحاسب الآلي آداة هامة لعملية التصميم التي تغيرت ولازالت تُغير طريقة المعماريين في التصميم، كما سمحت التقنيات الحديثة بتحقيق تصميمات تتجاوز الإمكانيات التقليدية وبالتالي تُشجع على تطويرالأشكال المعقدة والأنماط الجديدة وتقنيات الإنتاج المتقدمة. وتوفر وسائل الاستكشاف والتجريب والتحقيق في بيئة بديلة قبل عملية تنفيذ التصميم [٤].

٣ مفهوم التصميم التوليدي

التصميم التوليدي Generative design هو تحويل الطاقة الحاسوبية إلى طاقة استكشاف إبداعية تُمكن المصممين من استكشاف عدد أكبر من إمكانيات التصميم ضمن قيود قابلة للتعديل [٥]. ويُعد منهج معاصر للتصميم؛ يتبع تحديداً المنهج الرياضي بخلق الأشكال من خلال الخوارزميات [٦]، وغالبًا ما تنبثق من الأدوات الحسابية ، مثل المعالجة processing، الرينو rhinoceros، جراسهوبر Grasshopper ومنصات البرمجة النصية الأخرى [٧-٨]. ويُمكّن هذا المنهج من إنشاء حلول متنوعة في فترة زمنية قصيرة؛ يمكن التحكم بها بسهولة، مرن يسمح بتقليل الوقت والجهد، وإنتاج عدة نماذج مختلفة لاستكشاف التنوع في التصميم، ويعالج أنواع التغيير المختلفة. كما أن هذا النوع من التصميم يُتيح ويُسهل تصنيع الحلول المعقدة، من خلال استخراج الوثائق مباشرة من النموذج إلى CAM (التصنيع بمساعدة الكمبيوتر) أو Digital Fabrication [٤]. وبالتالي يسمح للمصمم أن يتغلب على القصور الناتج من رسم الواجهات ببرنامج الاتوكاد والـ 3D max وأن يتم التصميم عبر التلاعب المباشر ليس بالشكل ولكن بالكود أو بالشفره المكونة له [٩]. وأكد Branko Kolarevic أن عملية التوليد الرقمي للشكل تسببت في إزاحة التصميم المعماري من صنع الشكل إلى اختيار الشكل [٨-١٠] .

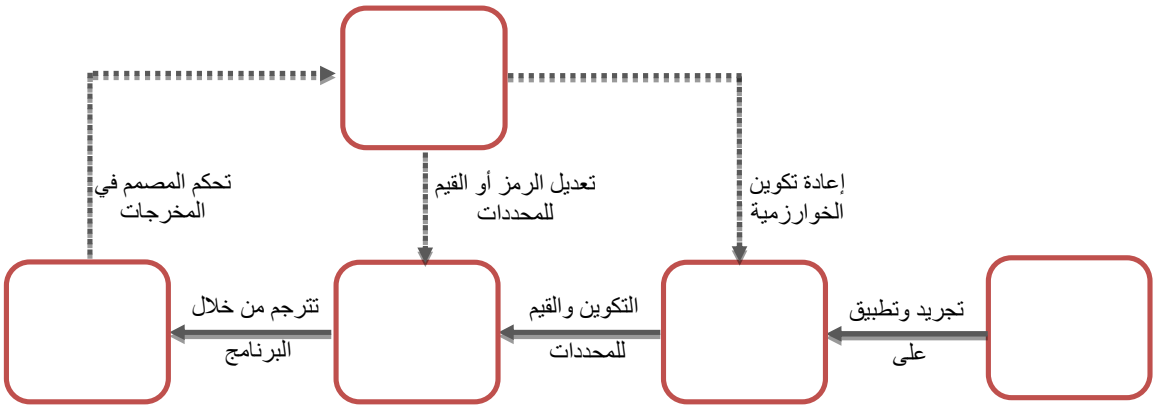
٣-١ أسباب اختيار منهج التصميم التوليدي

وتتضمن أسباب الاختيار؛ انتاج تصميمات فريدة وتحقيق التباين في نفس التصميم؛ وسيلة لاختيار النتائج المرغوبة؛ يتبنى التغيير تلقائياً [٩]. ويوضح شكل ٢ مثال لاستخدام التصميم التوليدي في تعديل أحد أغلفة المباني القائمة لتوضيح الفكرة، حيث تم تجديد الكلية التقنية لجنوب الدنمارك لتحسين أدائها في مجال الطاقة بإضافة واجهة جديدة إلى الواجهة الأصلية والتي شيدت في سبعينيات القرن الماضي ولم تعد تستوفي متطلبات كفاءة الطاقة وتحتاج إلى تحديث لمواكبة العصر. حيث تم إنشاء واجهة مثقبة Perforated أمام الواجهة الأصلية من ٧ أنواع مختلفة من وحدات GRC يتم تناوبها لإعطاء الواجهة مظهرًا أقل تسلسلاً وأكثر ديناميكية وهي سابقة التجهيز، مصنعة من الخرسانة البيضاء المقواة بالألياف، ذات فتحات بأقطار مختلفة مما جعل المشروع ذا مظهراً جذابًا ومتسقًا تمامًا مع العلوم المبتكرة التي يتم تدريسها بداخله. ووظيفتها تقليل أشعة الشمس على الغلاف الزجاجي للمبنى بنسبة ٥٠٪، مما يحقق الآداء المناسب للطاقة مع تلبية المتطلبات المعمارية [١١].

شكل ٢ يوضح إمكانية استخدام التصميم التوليدي في تعديل غلاف مبنى قائم، الكلية التقنية، جنوب الدنمارك، [١١]

٣-٢ إستراتيجية عمل التصميم التوليدي

التصميم التوليدي هو نظام قائم على الحسابات الخوارزمية التي تتم على مجموعة من المدخلات Inputs فيتم معالجتها بواسطة برامج الحاسب الآلي المصممة لهذا الغرض في صورة خطوات رياضية منطقية ومتسلسلة يتم محاكاتها بصرياً وصولاً إلى النتاج التصميمي المطلوب [١٢]. يعرف Bohnacker, Lazzeroni, Groß and Laub عملية التصميم التوليدي أنها عملية دورية تستند إلى فكرة بسيطة مجردة ، والتي يتم تطبيقها على قاعدة أو خوارزمية وتترجم إلى رمز، والتي تنتج بدائل تصميمية لتصميم معين في صورة مخرجات. تعود النواتج عبر حلقة تغذية راجعة، مما يُمكّن المصمم من إعادة تكوين الخوارزمية والرمز. فهي عملية تكرارية ، تعتمد على تبادل المعلومات بين المصمم ونظام التصميم؛ شكل.٣، [٧].



شكل ٣ شكل تخطيطي يوضح استراتيجية عمل التصميم التوليدي، بتصرف من الباحث [٧]

٣-٣ أنظمة التصميم التوليدي/ الإنتاجي Generative Design Systems

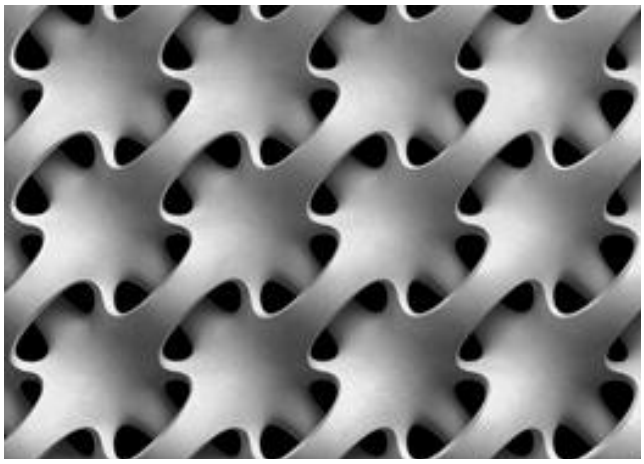
تعتبر نماذج أو أنظمة التصميم الإنتاجية مرحلة متطورة من تطبيقات الثورة الرقمية في التصميم، وتختلف عن النظم الأخرى في أن المصمم لا يتعامل معها لإنتاج التصميمات بل لأنها تُنتج الأدوات أو البرامج المُنتجة للتصميم وليس لإنتاج التصميم نفسه، وتهدف إلى إنشاء العمليات التصميمية، والتي بدورها تُنتج تصميمات جديدة كُفء قابلة للبناء، من خلال استغلال الحاسبات والقدرات الصناعية الحالية ، وتعتمد في تصميمها على عمليات حسابية ينتج عنها توليد الشكل والتصميم [١٣]، و قد ذكرت El-Gewely ، إن نُظم التصميم الإنتاجية GDS تنقسم إلى أربعة اتجاهات رئيسية تعمل باستراتيجية واحدة [١٤]، كما هو موضح بالجدول رقم١.

جدول. ١ يوضح الاتجاهات الرئيسية لنُظم التصميم التوليدي/ الإنتاجي بتصرف من الباحث من [٩، ١٥-١٩].

اتجاهات نظم GDS	مفهوم النظام	أمثلة النتاج المعماري باستخدام نظم التصميم التوليدي	استراتيجية النظم
الخوارزميات Algorithms	يسمح هذا النظام للمصممين باستكشاف هيئات Forms ذات معنى ضمن نظم هندسية Geometrical Pattern أكثر تعقيداً، وتتميز البيئات التي يعمل بها النظام بكونها مبنية رياضياً، حيث يتم تحديد الأساليب التي يمكن أن يسلكها التصميم عند نمذجته، ثم عمل المحاكاة الرقمية. وقد تم استخدام هذا النظام في تصميم العديد من المباني منهم ستاد بكين الدولي و المعروف باسم عش الطائر [١٥].		١. تحديد الفكرة المبدئية بواسطة المصمم. ٢. تحويل الفكرة المبدئية إلى متسلسلة من النماذج بواسطة الحاسب الآلي. ٣. تطوير النماذج. ٤. تحديد مجموعة القواعد الإنتاجية بواسطة المصمم. ٥. تحديد قواعد معايير الاختيار بواسطة المصمم. ٦. اختيار النماذج.
قواعد الشكل Shape Grammars	تُعرف قواعد الشكل بأنها طريقة إنتاج تصميمات باستخدام أشكال أولية وقواعد تفاعلية فيما بينها، ويمكن تصميم القواعد لإنتاج أي نوع من أنواع الرسومات، وليس بالضرورة أن تكون الرسومات المنتجة على النحو الذي صممها المبرمجون. وهي نوعان؛ قواعد الشكل القياسية، وقواعد الشكل متغيرة القيمة وهي تنتج أشكال أكثرتنوعاً من القياسية. وقد تم استخدام هذا النظام في تصميم العديد من المباني منهم جناح معرض Serpentine ، لندن [١٥].		
الخوارزميات الوراثية Genetic Algorithms	هي أداة من أدوات التكوين أو إحدى نماذج التحويل ذات صلة بتصميم حل مشكلة لأنها تحقق تكامل وسائل لتوليد حلول التصميم مع التركيز على تقييم ملاءمة البدائل .تعتمد بشكل أساسي على تحويل الأشكال الهندسية إلى رموزCodes والحصول على أشكال أصلية تعتبر بمثابة آباء Parents تسمى نمط وراثيGenotype وإجراء عملية التزاوج بينها Phenotype والحصول على أشكال جديدة كما في الهندسة الوراثية. مثال المكعب المائي بأشكال عشوائية ومحددة بدقة [٩].		
نظام لينذنماير L-System	هو أسلوب إعادة صياغة لتعريف عناصر معقدة بالاستعاضة عنها بأجزاء من عناصر بسيطة باستخدام مجموعة من قواعد إعادة الكتابة أو الإنتاج، وقد بدأ هذا النظام كنظرية رياضية للعالم Lindenmayer حول نمو الكائنات متعددة الخلايا، ثم بدأ استخدامها كأساس لوضع النماذج الرياضية الحسابية لنمو النباتات ولكن سرعان ما تم إعادة صياغتها من خلال نظم إعادة الكتابة [١٥].		

٤ التحول المعاصر في مفهوم تصميم وتشكيل غلاف المبنى باستخدام التصميم التوليدي

في الوقت الحاضر، حدث تطور هائل في تصميم غلاف المبنى نظراً لدوره الهام في ممارسة الهندسة المعمارية، ويرجع ذلك جزئيًا إلى دعم التقنيات الرقمية. حيث يُعيد توجه التصميم التوليدي لغلاف المبنى قوة ووضوح الملمس ويُحيي فكر الزخرفة في العمارة، بالإضافة إلى الإبداع في تكوين عناصر الغلاف. وقد عزز المنهج الرياضي للتصميم التوليدي عدد الأسطح المعمارية ذات التركيبات المعقدة، والمستويات متباينة المسامية التي تساعد على التكيف بشكل أفضل. على سبيل المثال، فكرة أنماط واقيات الشمس المتطورة للغاية (متسلسلة مستمرة) لـ "إروين هاور" كما بالشكل.٣أ، أو فكرة أنماط زخرفية مطبوعة على واجهات شفافة، كما بالشكل. ٣ب [٥].



أ. نمط المتسلسلة المستمرة لـ "إروين هاف"

ب. نمط زخرفي جمالي، لمتجر بنيويورك

شكل. ٤ يوضح أمثلة لتوليد الأفكار في تصميم وتشكيل الغلاف باستخدام التصميم التوليدي، [٦] .

٤-١ اشتراطات تصميم الغلاف الخارجي للمبنى

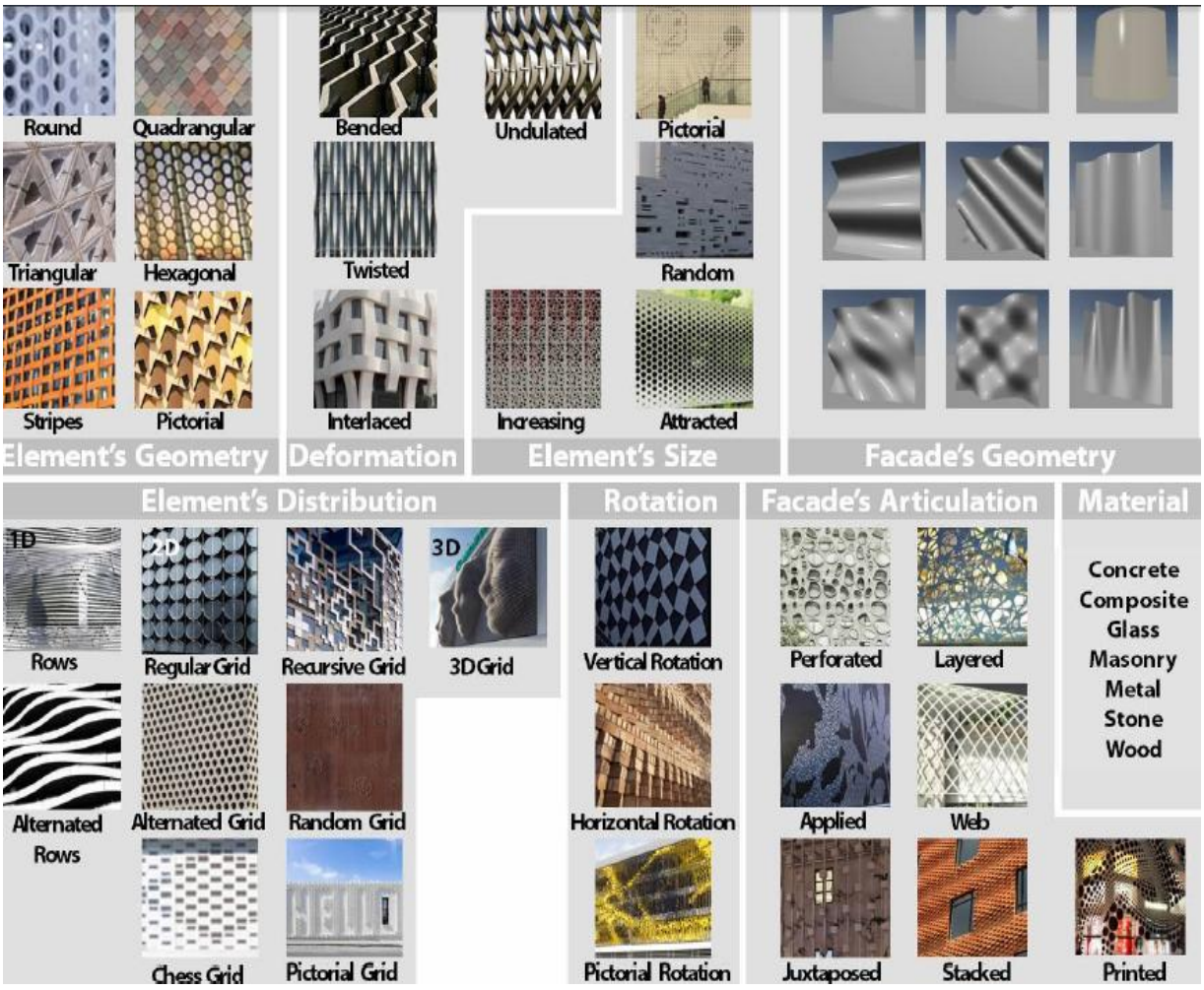
هناك مجموعة من الاشتراطات يجب مراعاتها عند تصميم غلاف المبنى سواء باستخدام الطرق التقليدية أو الطرق الرقمية الحديثة وتشمل: التصميم الجيد للغلاف مع مراعاة علاقته بالعناصر الانشائية طبقاً لطبيعة ووظيفة المبنى، وتفاعل الغلاف مع المعطيات البيئية والانسانية من الاتصال مع البيئة الخارجية أو تحقيق الخصوصية وكذلك الحماية،والمتطلبات الجمالية بتوافق تعبير المبنى عن محتواه ومراعاة الطابع المعماري في البيئة المحيطة إن وجد، اختيار مواد الانشاء والتشطيب الملائمة، معالجة الفتحات بما يتناسب مع الظروف البيئية والمناخية [٢٠-٢٢].

٤-٢ مراحل تصميم غلاف المبنى باستخدام التصميم التوليدي

يشمل تصميم الغلاف مجموعة من المراحل[٥]: (١) تعريف هندسية الغلاف، (٢) توليد عناصر الغلاف وتشمل تعريف هندسيتها، نوع التشويه Distortion type للحصول على تغييرات في الشكل، والحجم، (٣) توزيع العناصرالمسئولة عن رسم الخرائط envelope mapping، ودوران العناصر على الغلاف، (٤) توليد الشكل النهائي للغلاف، والذي ينتج نوع التشطيب النهائي باختيار مواد النهو والألوان لتطبيقها في عناصر الغلاف. وذلك باستخدام برامج تعتمد على التصميم التوليدي مثل Rhinoceros 3D الذي يعتمد على الخوارزميات والمتضمن لبرنامج Grasshopper وهو لغة للبرمجة المرئية.

٤-٣ تصنيف أبعاد عناصر تصميم الغلاف

وقد حدد Inês Caetano ثمانية أبعاد لتصنيف عناصر الغلاف يمكن تطويرها باستخدام التصميم التوليدي وأنظمته وتشمل (١) هندسية الغلاف ، ويقصد به التكوين العام لهندسية الغلاف وما يرمز إليه في الخوارزمية المقابلة. (٢) هندسية العنصرحيث تحدد هندسية الغلاف نوع السطح الذي يتم وضع العناصر عليه ولكن قبل النظر في وضع العناصر، يجب وصف الخوارزميات التي تشكلها. والمعادلة الرياضية التي تُمثل الأشكال الهندسية وفي كثير من الحالات يمكن وصفها بنفس المعادلة الخاصة بهندسية الغلاف. (٣) تشوه العنصر Element's Distortion هو نوع من التحول، يتم فيه تغيير صفات العنصر بعدم الانتظام نتيجة الضغط أو اللف على طول بعض الأبعاد، أو ثني العنصر ينتج عنه تشوه مشابه لـ Zig-Zag وذلك وفقاً لزوايا محددة من قبل المصمم. (٤) حجم العنصر. (٥) توزيع العنصر. (٦) دوران العنصر. (٧) السطح ويشمل مواد وألوان الغلاف، (٨) توضيح الغلاف articulation ويعبر عن طبيعة العلاقات بين عناصر الغلاف بطرق مختلفة من خلال معادلات خاصة، وينتج عنه التنوع في الأشكال النهائية للغلاف. حيث يتوافق كل بعد مع مجموعة من الوظائف الحسابية ذات الصلة. يولد هذا التصنيف مساحة متعددة الأبعاد حيث يمكن التعامل مع أجزاء الغلاف. وبالتالي يمكن تحديد وتنفيذ مجموعة من الخوارزميات والاستراتيجيات الأساسية التي تلبي احتياجات الأبعاد المختلفة للمبنى[٦،٥]، ويوضح شكل ٥ تصنيف الأبعاد وما يقابله من تعبيرات للشكل في التصميم التوليدي، حيث يُظهر أبعاد خلق الشكل النهائي لغلاف مبنى معاصر بالتقنية الرقمية. ويتم على مراحل وفقًا للتفكير الحسابي. ويتضح من التصنيف السابق للأبعاد الإمكانيات التشكيلية للغلاف باستخدام التصميم التوليدي.



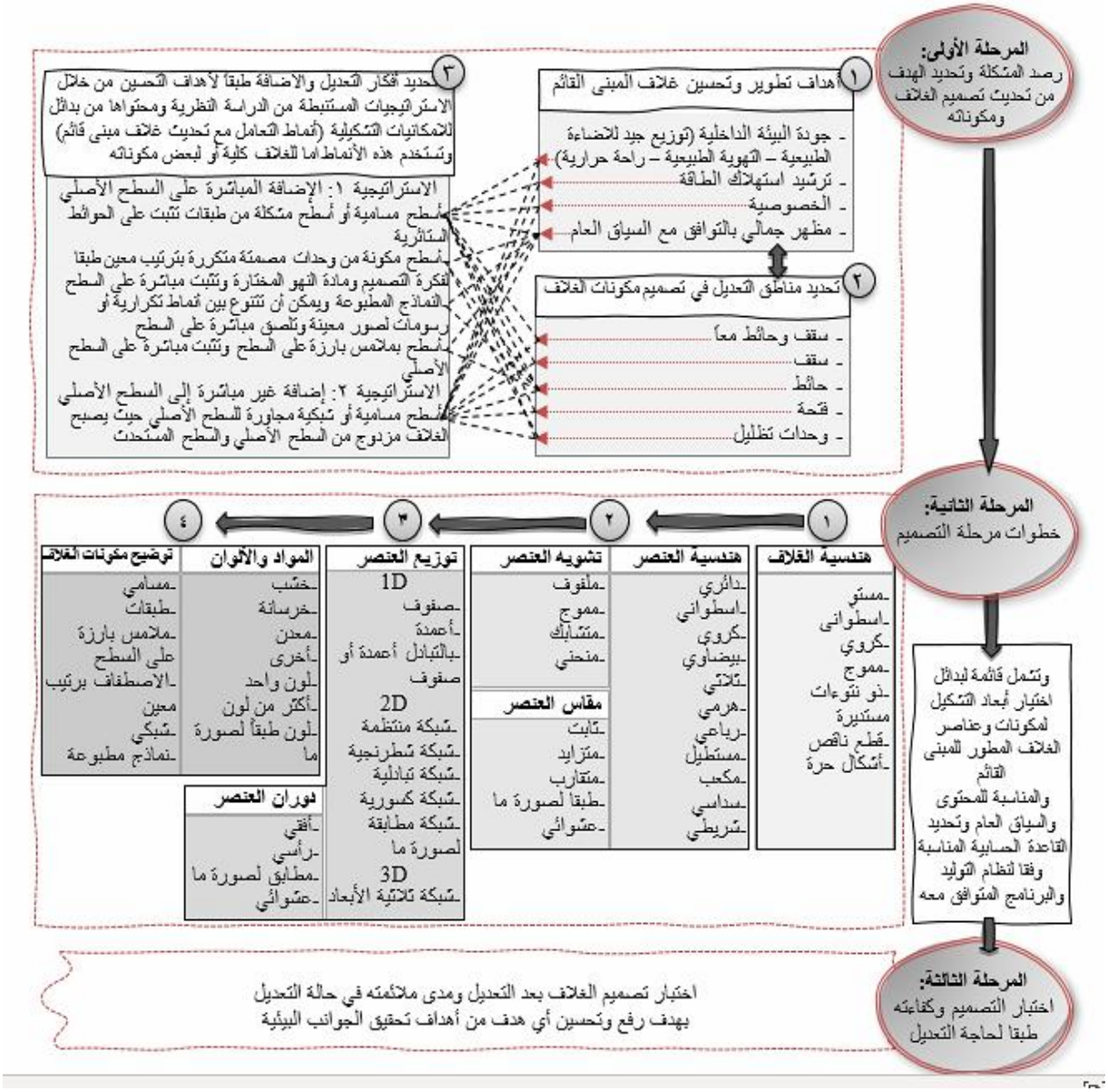
شكل.٥ يوضح تصنيف أبعاد الغلاف والاختيارات المقابلة في التصميم التوليدي لكل بعد، [٦] .

٤-٤ استخلاص مفردات الاطار النظري

تحتاج إعادة تحديث غلاف مبنى قائم في البداية إلى دراسة وتحديد الاحتياجات التي من أجلها يتم تطوير التصميم والمظهر الخارجي للمبنى، ومن ثم تحديد العناصر التي تحتاج إلى التطوير، وفي هذا السياق أوضحت دراسة Inês Caetano حول وضع إطار خوارزمي لتصميم الواجهة باستخدام التصميم التوليدي، مجموعة من الاختيارات المختلفة لإمكانيات التشكيل، وذلك أسفل كل عنصر من عناصر تصنيف أبعاد الغلاف، تتيح للمصمم أكثر من بديل تصميمي وفي أكثر من بُعد، تُمكن المصمم من اختيار من بدائل متعددة، شكل ٥ ، وبالتالي يمكن صياغة مراحل مقترح خطة تعديل واعادة تصميم وتشكيل غلاف مبنى قائم بالاستنباط من الدراسة النظرية كما يلي:

- المرحلة الأولى: تحديد الهدف من تحديث تصميم الغلاف والمتطلبات واشتراطاتها ومحدداتها والعناصر التي سوف يتم تعديلها من مكونات الغلاف الأصلي.
- تحديد استراتيجيات التعديل والاضافة للغلاف وعناصره والتي تم استنباطها من البعد الثامن من أبعاد تصنيف الغلاف وتحديد أنماط التعامل مع التحديث، ووضع قائمة بالبدائل لتشكيلية الممكنة، واختيار الأنسب طبقا لمتطلبات المبنى والامكانات المتاحة والسياق العام.
- المرحلة الثانية: عملية التصميم بما تشمله من خطوات محددة متتالية، مع الاستفادة من التعبيرات المقابلة لكل عنصر في البيئة الرقمية، والتي يمكن اعتبارها قائمة يمكن الاختيار منها لتشكيل كل عنصر، طبقا لاحتياجات التعديل والوصول للبديل الأمثل.

- وأخيراً المرحلة الثالثة: في حالة التعديل بهدف تحسين الكفاءة البيئية يتم الاختبار في برامج المحاكاة والتعديل بما يناسب حالة الفراغات الداخلية.



شكل.٦ مقترح مدخل لإعادة تشكيل أغلفة المباني القائمة لتحسين كفاءتها الجمالية والبيئية بتحديث مفردات الغلاف باستخدام الامكنيات التشكيلية للتصميم التوليدي، [الباحث].

ونلاحظ من تحليل المقترح السابق في المرحلة الأولى بالنسبة للبدائل المستخدمة، أن النمط المسامي والمشكل من طبقات أكثر البدائل المناسبة للاستخدام مع معظم مكونات الغلاف وذلك لسهولة تنفيذه؛ يُغطي مساحات متنوعة دون شرط أو قيد لعدم ارتباطه بمحددات كثيرة تخص الوضع الأصلي للغلاف وهذا يعزز فكرة المرونة الناتجة عن المنهج التصميمي المتبع، كما أنه يرتبط بمعالجة غلاف المبنى وبالتالي تحسين الآداء البيئي. بينما انحسر دور بعض البدائل مثل الوحدات المصمتة والوحدات ذات الملامس في الدور الجمالي فقط. أما النماذج المطبوعة فيمكن تفعيلها في كل من الجانبيت البيئ والجمالي حيث يمكن لصقها على الأسطح الشفافة وبالتالي توفير الظلال وتوزيع أفضل للاضاءة.

٥ تجربة لإمكانية تطبيق واستخدام التصميم التوليدي في تحسين دور غلاف مبنى قائم

مثال لقابلية التطبيق العملي لاستخدام التصميم التوليدي بنظام ليندنماير L-System؛ كمعالجة لبعض عناصر غلاف مبنى قائم بالفعل (مبنى قسم العمارة، كلية الهندسة بالمطرية، القاهرة، ١٩٩٦م)، وأثرها على آداء الفراغ الداخلي من حيث الاضاءة الطبيعية والحماية من أشعة الشمس لصالات الرسم. وتكمن المشكلة في عدم كفاءة الاضاءة الطبيعية في صالات الرسم للواجهات الشرقية لأنها معرضة لأشعة الشمس بشكل مباشر في الفترة الصباحية (أثناء اليوم الدراسي) مما يجعلها تحتاج إلى وسائل حماية من أشعة الشمس دون التأثير على الإضاءة.

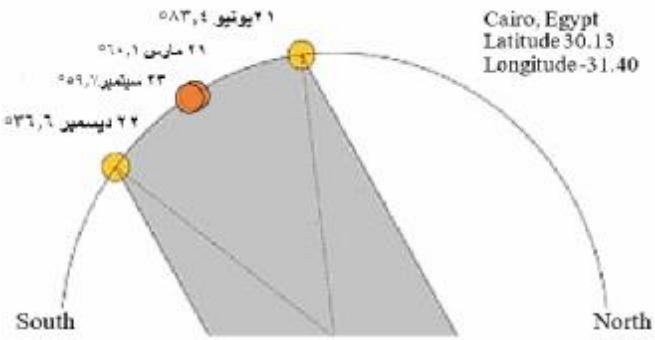
وتهدف التجربة إلى بيان مرونة التصميم التوليدي في سرعة وسهولة الوصول إلى حل تصميمي يناسب المشكلة بمساعدة برامج الحاسب؛ لتعزيز كفاءة الإضاءة الطبيعية والحماية من أشعة الشمس المباشرة للفراغ المحدد، بالإضافة إلى تحسين المظهر الجمالي للغلاف باقتراح نموذج جديد لتصميم بنية وحدات مضافة لمعالجة عناصر الغلاف تعمل كستائر حماية من الأشعة الشمسية، وذات تشكيل مميز يتوافق مع السياق وقابل للتطبيق والتنفيذ في الواقع.

٥-١ وصف الحالة محل الدراسة

تم اختيار قاعة الرسم الشرقية بمبنى قسم العمارة، كلية الهندسة بالمطرية، القاهرة، ١٩٩٦. وتحديد الموقع حيث يتميز بمدة سطوع الشمس ٩٥% من أيام السنة، المبنى يطل بالواجهة الشرقية (واجهة المدخل) على الفناء الرئيسي للكلية، أبعاد القاعة (٢٠.٦٦م طول × ١٣.٣٢م عرض) وارتفاع الدور ٣.٦م. و تشمل عدد ٤ فتحات ، ثلاثة فتحات بمساحة (٣.٨٤م ×٢.٠٠م) ٧.٦٨م^{٢}، والفتحة الرابعة (٢.٥٢م ×٢.٠٠م) ٥.٠٤م^{٢} ويوضح شكل ٦ الموقع العام وعلاقة المبنى بالفراغات المحيطة، وكذلك الواجهة الشرقية من حيث نمط التصميم والسياق المحيط بها (الحديقة الأمامية للمدخل) والتي تتضمن نباتات تشبه نبات السرخس. كما يشير الشكل إلى قاعة الرسم المختارة للدراسة على المسقط الأفقي للمبنى.

شكل ٦ يوضح الوضع الراهن للموقع العام وشكل غلاف المبنى، والقاعة الشرقية بالمبنى لقسم العمارة بهندسة المطرية، الباحث.

ويوضح شكل ٧ زاوية الشمس في منتصف اليوم للفصول الأربعة، لمدينة القاهرة. وبدراسة الشكل يُمكن استنباط أن قياس شدة الإضاءة في فصلي الصيف والشتاء قد يُعطى صورة تقريبة للقرآت في الربيع والخريف وذلك لتوسط الفصلين؛ كل من فصلي الصيف والشتاء من حيث زاوية الارتفاع.

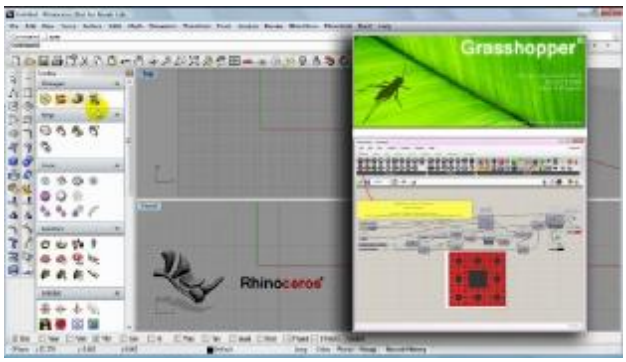


شكل ٧ مسار الشمس السنوي للقاهرة ، مصر. وتظهر زاوية الشمس في منتصف النهار في الفصول الأربعة، [٢٣] بتصرف من الباحث

٥-٢ أدوات ومحددات التجربة

أولاً: أدوات التحليل:

١. التصوير الفوتوغرافي لتوثيق حالة الصالة وتنظيم الفرش.
٢. زيارات ميدانية لدراسة حالة الصالة من مواد تشطيب وفرش بالإضافة لرفع المقاسات.
٣. تطبيق google earth لاستخراج صورة للموقع العام ليستخدم في التحليل.
٤. برنامج Sketchup لبناء الصالة وإدخال نسبة عكس مواد التشطيب للضوء.
٥. برنامج Grasshopper الخاص بالتصميم المتضمن ببرنامج Rinoceros لاختيار وتصميم النمط المناسب لعناصر الغلاف بنظام ليندنماير L-System، شكل ٨.
٦. برنامج Enscape للإظهار ودراسات الاضاءة لمحاكاة الفراغ محل الدراسة، شكل ٩.



شكل ٨ إنشاء نموذج النمط الكسوري بفتح برنامج GH على واجهة Rhinoceros، المصدر: الباحث

شكل ٩ استخدام تطبيق انسكيب لمعالجة الفراغ الذي تم إنشاءه في اسكتش آب لدراسة توزيع الاضاءة داخل القاعة، المصدر: الباحث

ثانياً: محددات التجربة:

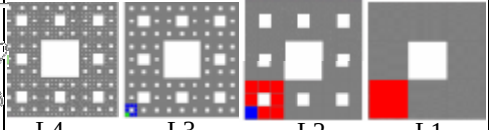
ترتبط بنجاح التصميم حيث أنه يُقاس بنسبة خفض الحد الأقصى لشدة الإضاءة ورفع الحد الأدنى حيث تتراوح الإضاءة المثالية لصالات الرسم ما بين ٥٠٠ و١٠٠٠ لوكس. وزيادة الحد الأقصى عن ١٠٠٠ لوكس قد تُشير إلى احتمال التسبب في حدوث وهج والانخفاض عن ٥٠٠ لوكس يستدعى الاستعانة بالإضاءة الصناعية. وكلما قلت المسافة بين الحد الأعلى والأدنى زادت فاعلية التصميم، لأنه يدل على توزيع متساوٍ للإضاءة الطبيعية في الفراغ. وتقاس الإضاءة لحالة الدراسة خلال ساعات سُطوع الشمس من اليوم الدراسي وذلك من ٠٨:٠٠صباحاً حتى ١٦:٠٠ مساءاً.

٥-٣ خطوات التجربة

أولاً: اختيار النمط المناسب لتعديل عناصر الغلاف

بدراسة النمط التصميمي للمبنى طبقاً لتصنيف أبعاد تصميم الغلاف والتعبيرات المقابلة في التصميم التوليدي، يُمكن اختيار بدائل الأكواد الكسورية الأساسية داخل برنامج التصميم Grasshopper سواء الهندسي أو الطبيعي كنمط يناسب حالة الدراسة، الهندسي مستوحى من تصميم المبنى باستخدام (كود مثلث سربنيسكي Sierpinski Triangle Code) لتوليد شكل (بساط سربنيسكي Sierpinski Carpt)، أوالطبيعي المستوحى من النباتات المحيطة في مدخل المبنى باستخدام (كود السرخس Fern code)، لتوليد الشكل باقتراح شكل البادئ حسب فكر المصمم ثم تكراره، ويوضح جدول.٢ أطوار نمو الأنماط الكسورية المقترحة باستخدام نظام ليندنماير L-System.

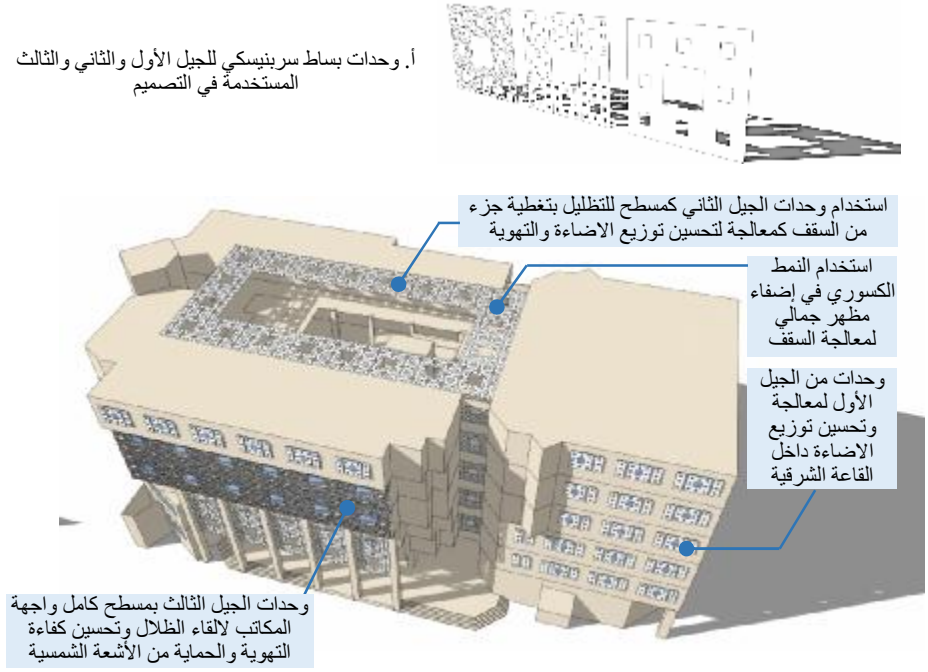
جدول.٢ أطوار بدائل النمط الكسوري المقترح لتصميم معالجات الغلاف ببرنامج التصميم [٢٤،٢٥]، بتصرف من الباحث

النمط الكسوري الهندسي	النمط الكسوري الطبيعي
	
L4 L3 L2 L1	L8 L7 L6 L5 L4 L3 L2 L1
نمو أشكال بساط سربنيسكي في برنامج Grasshopper	نمو أشكال السرخس في برنامج Grasshopper

ومن ثّم بناء النموذج الكسوري بتطبيق واتباع خطوات إنشاء نموذج بساط سربينيسكي على الشاشة، بمساعدة برنامج جراسهوبر كآداة لتوليده؛ باختيار الكود المقترح، وتطبيق نظام L-System، بحدوث مجموعة من الانقسامات لوحدات أصغر من نفس النوع بأحجام مختلفة، والتحكم في تكرارالقاعدة وأية تعديلات مطلوبة لإنشاء أشكال الأجيال المناسبة في عملية التصميم. وتمثل حدود الفتحات المُتغيرات المطلوب دراستها للمبنى محل الدراسة.

ثانياً: تطبيق النمط المقترح في النموذج التصميمي

ويشمل تطبيق التعديل المقترح لتصميم بعض عناصر الغلاف بما يتناسب مع الوضع الأصلي، ويحقق متطلبات التصميم بالتوافق مع المعطيات البيئية للموقع، لتحسين جودة الفراغات الداخلية من إضاءة طبيعية وحماية من الأشعة الشمسية، وتحسين المظهر الجمالي، باستخدام برنامج اسكتش أب Sketchup لبناء نموذج المبنى المُعدل، وإجراء عملية التباديل والتوافيق للمعالجة المقترحة شكل١٠أ للوصول إلى البديل المناسب لحالة الدراسة كما هو مبين في شكل ١٠ب. ويتضح تأثيراستخدام تقنيات التصميم التوليدي على التشكيل الجديد لعناصر الغلاف في تحريك المساحة الموجودة أسفل التشكيل بواسطة لعبة الظل الناتجة عن تعديل الضوء بواسطة الشبكة المعقدة من الفتحات الصغيرة عبر سطح الوحدات المضافة، والتي تنعكس على الواجهة وأرضية الدور الأخير للمبنى.



شكل ١٠ مراحل إنشاء النموذج المقترح ومخرجات برنامج تصميم المبنى واستخدام أجيال بساط سربنيسكي باستخدام تقنيات التصميم التوليدي لمعالجة عناصر الغلاف - الواجهة، السقف، الفتحات، المصدر: الباحث

ثالثاً: محاكاة الإضاءة الطبيعية بعد تعديل التصميم للفراغ محل الدراسة:

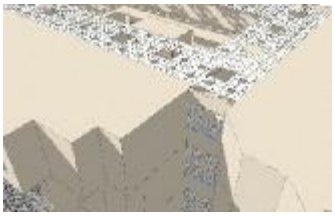
باستخدام أدوات المحاكاة On screen rendering، برنامج انسكيب Enscape، لمحاكاة شدة الاضاءة الطبيعية داخل فراغ القاعة الشرقية، بتمثيل المدخلات؛ وهي نموذج الفراغ ومصدر الضوء، ثم بيان تأثير مخرجات الأشكال على توزيع الاضاءة الطبيعية داخل الفراغ؛ عند أعلى زاوية لسقوط الشمس بالقاهرة وأقل زاوية، بهدف الوصول إلى البدائل الممكنة لتحسين الراحة البصرية في مرحلة التصميم، ومن ثم اختيار البديل الأمثل، وذلك بمقارنة القيم الناتجة من البرنامج وتحليلها، ومن ثم عملية تقييم البدائل.

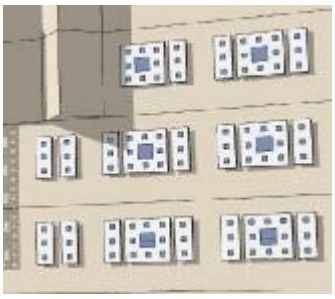
٤-٥ مناقشة نتائج التجربة

أولاً: تحليل عناصر غلاف المبنى القائم المطورة المقترحة طبقاً لقائمة تصنيف أبعاد الغلاف باستخدام التصميم التوليدي يتضح من نتيجة التحليل بجدول ٣ أنه يُمكن تطوير عناصر غلاف أي مبنى قائم وذلك طبقاً لاحتياجته، مع ملاحظة عدم تعرض التجربة لبُعد تطوير واختيار المواد. وذلك نظراً لتركيز البحث على جانب تطوير التصميم والتشكيل وتأثيره في تحسين آداء الفراغات الداخلية للمبنى القائم. ونلاحظ بعد اجراء التعديل؛ التنوع في التصميم باستخدام أكثر من جيل لنفس الوحدة الأساسية وتحقيق الاختلاف في نفس التصميم، حسب طبيعة الوظائف كما في شكل ١٠.

جدول ٣ تحليل عناصر غلاف المبنى القائم المطورة المقترحة طبقاً لقائمة تصنيف أبعاد الغلاف باستخدام التصميم التوليدي، الباحث

تحليل تطوير عناصر الغلاف المقترح طبقاً لتصنيف أبعاد الغلاف باستخدام التصميم التوليدي						مكونات الغلاف المطور للمبنى القائم	
هندسية الغلاف	مستو		دوران العنصر		أفقي		حائط
	اسطواني				رأسي		حائط وسقف معاً
	كروي				مطابق لصورة معينة		وسقف √
	مموج				عشوائي		
	ذو نتوءات مستديرة		توزيع العنصر	1D	صفوف		
	قطع ناقص				أعمدة		
	أشكال حرة				بالتبادل أعمدة أو صفوف		
هندسية العنصر	دائري			2D	شبكة منتظمة		
	اسطواني				شبكة شطرنجية		
	كروي				شبكة تبادلية		فتحة √
	بيضاوي				شبكة كسورية	√	
	ثلاثي				شبكة مطابقة لصورة ما		
	هرمي			3D	شبكة ثلاثية الأبعاد		
	رباعي	√	المواد والألوان		خشب		
	مستطيل				معدن		
	مكعب				خرسانة		
	سداسي				لون واحد		
	شريطي				أكثر من لون		
نشوء العنصر	ملفوف				لون طبقا للصورة		عناصر مضافة للتظليل √
	مموج				عشوائي		
	متشابك		توضيح الغلاف أو مكونات الغلاف		مسامي	√	
	منحني				طبقات		
مقاس العنصر	ثابت				ملامس بارزة على السطح		
	متزايد	√			الاصطفاف بترتيب معين		
	متقارب				التجاور	√	
	مطابق لصورة ما				شبكي		
	عشوائي				نماذج مطبوعة		



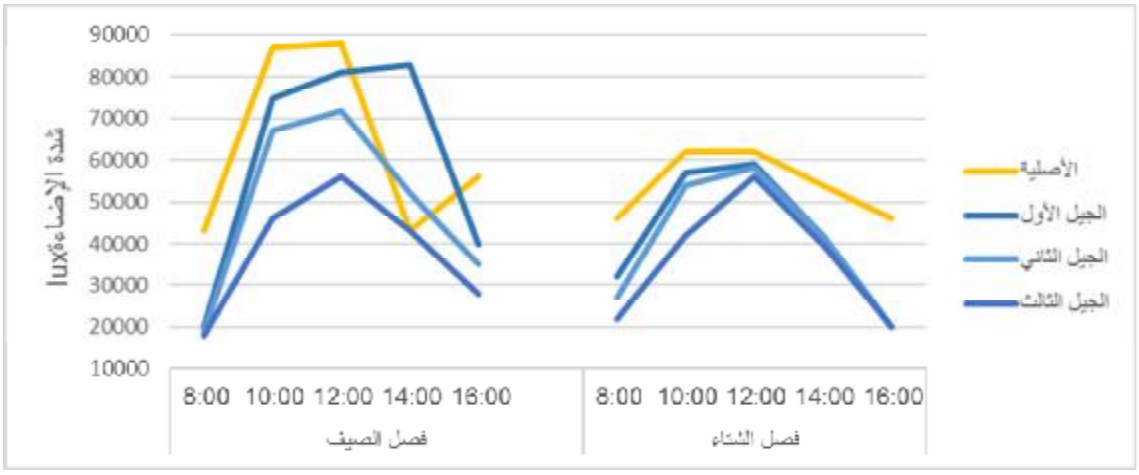


ثانياً: تقييم آداء الفراغ محل الدراسة بعد تطويروتعديل تصميم الفتحات باستخدام التصميم التوليدي

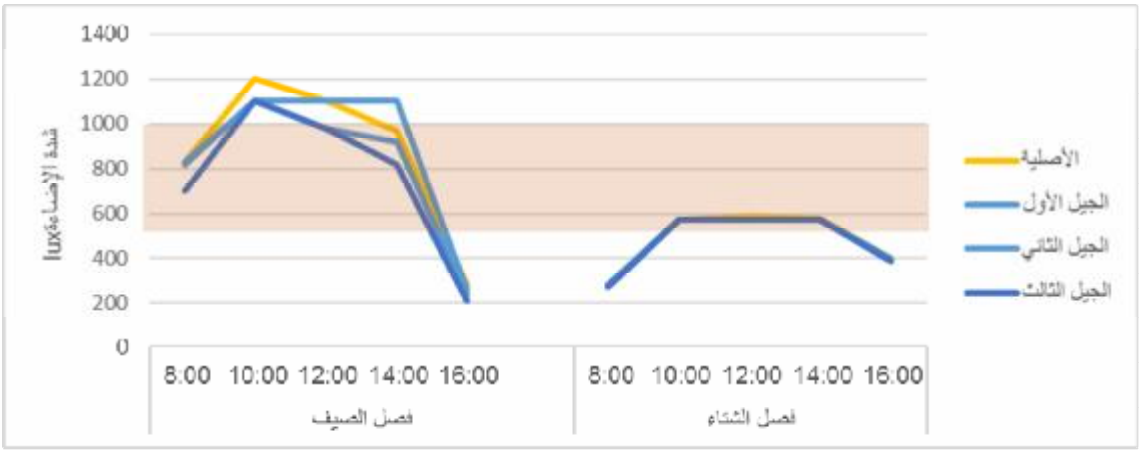
وذلك بمقارنة حالات الفراغ المختلفة والتي توضح مدى شدة الإضاءة باللوكس Lux قبل وبعد استخدام بدائل أجيال النموذج بالكود الكسوري وذلك خلال الساعات المحددة، واستخدام التحليل المقارن للقيم الناتجة من برنامج انسكيب بفصلي الصيف والشتاء، وذلك عند الحد الأقصى للإضاءة كما بشكل ١١، والحد الأدنى كما بشكل ١٢حيث تُظهر قيم الحالة الأصلية باللون الأصفر، بينما تُظهر القيم باللون الأزرق تدرج استخدام الأطوار المختلفة للنموذج المقترح لتصميم الفتحة، وبمقارنة النتائج نلاحظ مايلي:

- تدرج تأثير الأجيال المختلفة يظهر جلياً في شكل ١٢، تدرج خفض شدة الاضاءة على التوالي بدءاً من الجيل الأول وحتى الجيل الثالث الذي كان الأكثر تخفيضاً مما يجعله الأكثر نجاحاً.

- أن التأثير في فصل الصيف أعلى للأجيال الثلاثة؛ فمثلا الجيل الثالث في الساعة العاشرة خفض شدة الإضاءة القصوى من ٨٧٠٠٠ إلى ٤٦٠٠٠ بنسبة تصل إلى ٤٧% تقريباً. وإن لم يدخل الفراغ إلى حيز الراحة البصرية فإن نسبة التأثير عالية خصوصاً وإن اقترنت بنتائج الحد الأدنى والتي تأثرت تأثراً طفيفاً لتبقى في مساحة الراحة البصرية.
- تأثير النماذج لم يكن بهذه القوة في فصل الشتاء ما قد يُفسر بانخفاض زاوية الشمس واقتراب زاوية دخول الضوء من أن تكون عمودية على النمط المستخدم مما يضعف من تأثيره. ويضعف كذلك في شدة الإضاءة الدنيا صيفاً ويتلاشى التأثير شتاءً. ولكن بالرجوع إلى تخفيض شدة الإضاءة الدنيا في الصيف، فإن ذاك التأثير وإن ضَعف فإنه أدخل أكثر ساعات اليوم في حيز الراحة خاصة للجيل الثاني والثالث.

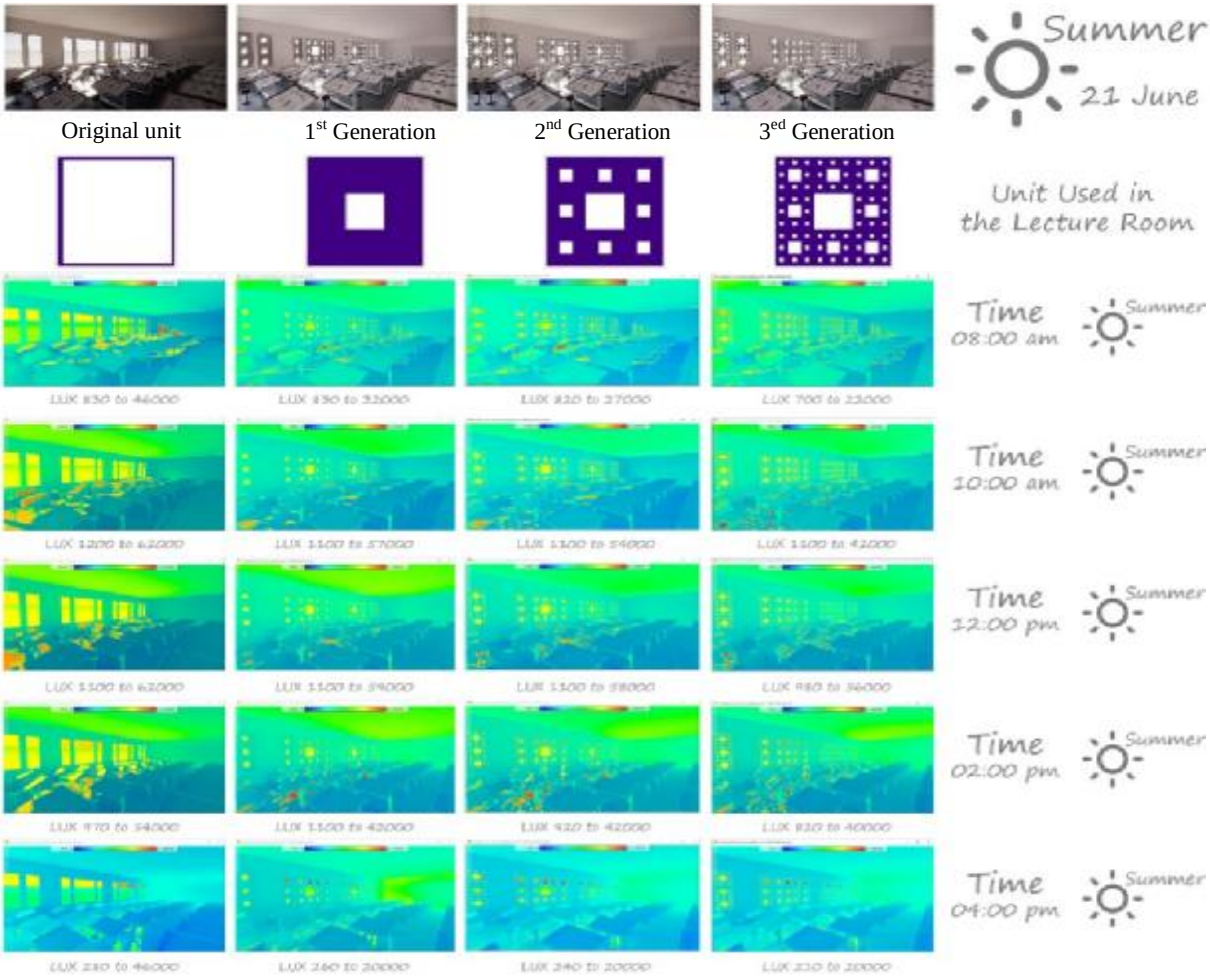


شكل ١١ الحد الأقصى لشدة الإضاءة داخل فراغ القاعة قبل وبعد استخدام بدائل النموذج المقترح لتعديل تصميم فتحات القاعة خلال ساعات الدراسة بفصلي الصيف والشتاء، المصدر: الباحث



شكل ١٢ الحد الأدنى لشدة الإضاءة داخل فراغ القاعة قبل وبعد استخدام بدائل النموذج المقترح لتعديل تصميم فتحات القاعة خلال ساعات الدراسة بفصلي الصيف والشتاء، المصدر: الباحث

- بناءاً على ما تم توضيحه في شكل ١١، وشكل ١٢ من تباين كبير في شدة الإضاءة في الحالة الواحدة، فقد تم استخراج صور تبين توزيع الإضاءة من برنامج إنسكيب شكل ١٣. حيث نُلاحظ انخفاض نسبة المساحة المتأثرة بالحد الأعلى لشدة الإضاءة الطبيعية، وكذلك تلك المتأثرة بالحد الأدنى، بينما نجد شدة إضاءة معظم المساحة متوسطة. لذلك قد يكون التحسن في توزيع الإضاءة أفضل مما تبينه الأرقام. ويُعزز هذا التحليل الصور الفوتوغرافية من زيارة الموقع كما هو مبين في شكل ١٤ من انحسار الحد الأقصى لشدة الإضاءة في مساحة محدودة من الفراغ.



شكل ١٣ يوضح توزيع الإضاءة من برنامج إنسكيب داخل الفراغ محل الدراسة طبقاً للبدائل المستخدمة في تصميم الفتحة خلال ساعات اليوم الدراسي في فصل الصيف ، المصدر: الباحث

- يُلاحظ أيضاً من شكل ١٣ وإن لم يكن من المحددات المقيسة تقليل احتمال الوهج بنسبة كبيرة في الحالات الثلاث مقارنة بالحالة الأصلية حيث أن احتمال الوهج يعتمد بالأساس على الفرق في شدة الإضاءة، وزاوية الرؤية الواحدة. وقد نجحت النماذج الثلاث في تدريج التباين في شدة الإضاءة كما هو ملحوظ من الرمز اللوني للشكل.

شكل ١٤ الإضاءة المباشرة داخل فراغ القاعة الشرقية للمبنى، المصدر: الباحث

٥-٥ الدروس والخبرات المستفادة من التجربة

تُشير نتائج التجربة السابقة إلى:

- المرونة في خلق أنماط بنائية لشكل الفتحات باستخدام الخوارزميات والتي تقبل التغيير تلقائياً، مكَّن من توليد سريع وبدون جهد لمجموعة واسعة من الحلول، وبالتالي فرصة الاختيار من بدائل متعددة طبقاً لوظيفة الفراغ، بالتكامل مع برامج النمذجة للتطبيق على المبنى، ومن ثم اختبار النتائج باستخدام برامج المحاكاة لتأثير أشكال الاضاءة الناتجة عن البدائل المختلفة.
- يُمَكن النمط الكسوري أحد أنماط السطح الشبكي من حل بعض مشكلات المباني القائمة، بشكل مرن وحلول تقترب المعايير القياسية ويمكن تحسين النتائج بتضمين اختيار خصائص مواد تزجيج شبه شفافة مناسبة واختبارها، بحيث تعزز من كفاءة توزيع الاضاءة الطبيعية في الفراغ.

٦ النتائج والتوصيات

٦-١ الخلاصة:

- أنه يمكن الاعتماد على التصميم التوالدي كآداة مستحدثة لإيجاد حل سريع لبعض مشكلات تصميم أغلفة المباني القائمة، محققاً توجهات بديلة تختلف عن الطرق التقليدية للوصول إلى نتائج ايجابية. وأنه يمكن استخدام التصميم التوليدي كمدخل لتطوير أغلفة المباني القائمة حيث يعتبر آداة للتكيف والتطور، وخلق التنوع والاختلاف لاختيار النتائج المرغوبة.
- أن المنطق التوليدي للنموذج يعتمد على توليد الشكل، ثم اختيار المعماري للشكل من بين الأشكال المتنوعة الممكنة التي ينتجها البرنامج. مما يؤدي إلى فتح افاق جديدة في التفكير المعماري والشكل الناتج، ويولد قيم جديدة بسبب الإمكانات المتنوعة في الانماط المغطية للسطوح المعمارية.
- أنه من مميزات التصميم التوليدي أنه يُمكن من إعطاء مظهر جمالي مرموق يتوافق مع المتطلبات المعمارية ويحقق القيم الجمالية التشكيلية، كالتفرد، التنوع ضمن الوحدة، التآلف حيث ارتباط الخصائص الشكلية للنتاج .

٦-٢ التوصيات:

- ضرورة وضع استراتيجية لتحسين ورفع كفاءة أغلفة المباني القائمة اعتماداً على استخدام التكنولوجيا الرقمية للتصميم التوليدي، مع أهمية تفاعل المصمم مع المتغيرات البيئية، ووضع فكر جديد للتعامل مع السلبيات الناتجة عن عدم كفاءة غلاف المبنى وتحقيق دوره الوظيفي.
- ضرورة التوعية بأهمية تطوير أغلفة المباني القائمة الغير كفوءة، وذلك لزيادة العمر الافتراضي للمبنى وتحسين جودة البيئة الداخلية والعديد من المزايا البيئية والاقتصادية. ودعم مناهج الفكر الابداعي لعمليات إعادة احياء وتجديد أغلفة المباني القائمة بما يتلائم مع السياق الحالي ويمكن دعم ذلك من خلال المدخل المقترح في البحث للتعامل مع مشكلات أغلفة المباني القائمة.
- مراعاة تضمين خصائص المواد، كجزء من وظيفة هذه الطريقة لتحسين آداء الغلاف في الدراسات اللاحقة.

المراجع

1. http://www.cpas-egypt.com/pdf/HAITHAM/Research_Hitham.pdf/ accessed at 10/9/ 2019.
2. https://nb-no.facebook.com/.../٩٧٩١٣٠٥٩٢/-ابهار-العالم-مستمرين.../ accessed at 4/9/ 2019.
3. https://twitter.com/arch3badi/status/ accessed at 16/11/ 2019.
4. Caetano, I. (2015), From Idea to Shape, From Algorithm to Design: A Framework for the Generation of Contemporary Facades, p.2. https://www.researchgate.net/publication/300789559_From_Idea_to_Shape_from_Algorithm_to_Design_A_Framework_for_the_Generation_of_Contemporary_Facades, accessed at 13/11/ 2019.
5. Caetano, I., An Algorithmic Framework for Facade Design, M.S.D. Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisbon, 2015, p.30,56.
6. Leitão, A., Santos, L., & Lopes, J. (2012). Programming languages for generative design: A comparative study. International Journal of Architectural Computing, *10* (1), pp.139-162.
7. Agkathidis, A. (2015), Introduction to Generative Design, Laurence King, pp. 14-16, https://www.researchgate.net/publication/299457545_Generative_Design, accessed at 15/11/ 2019.
8. Larsen, N. M. (2014), Digital Tectonics - To Generate Architecture, The Aarhus School of Architecture: Arkitektskolens Forlag, pp. 32-39.

٩. إمام، أمينة، نظم التشكل الخوارزمي كمدخل للتصميم الداخلى بمساعدة الحاسب الآلي، المؤتمر الدولي الخامس لكلية الفنون التطبيقية، ٢٣-٢٤ أبريل ٢٠١٨، ص.٣.

١٠. عبد الجليل، وجدان، توليد الشكل وعلاقته بالهيكل في العمارة الرقمية، الجامعة التكنولوجية، بابل، مجلة جامعة بابل ، العلوم التطبيقية والعلوم الهندسية، المجلد ٢٦ ، العدد ٢ ، ٢٠١٨، ص.١٩٧.

11. https://www.floornature.com/ceramic-innovation/architectural-solutions/crc-facade-cfA-moller-moeas-sdu-technical-faculty-14111/, accessed at 1/11/ 2019.
12. Jabi, W. (2013), Parametric design for Architecture, Laurence King Publishing, London.

١٣. فريد، علاء الدين، الثورة الرقمية وأيدلوجيات الفكر والإبداع المعماري، مجلة العلوم الهندسية، أسيوط، مارس ٢٠١٤، المجلد ٤٢، العدد ٢، ص.٤٦٨.

14. El-Gewely, M. H. (2010). Algorithm Aided Architectural Design (AAAD). M.Sc. Alexandria University, Faculty of Engineering, Department of Architecture, Egypt.

١٥. جودة، دعاء، أثر استخدام النظام الخوارزمي على توليد الأفكار في التصميم الداخلي والأثاث، مجلة العمارة والفنون، العدد الحادي عشر، الجزء الأول، ٢٠١٧، ص.٢٤١-٢٤٦.

16. https://www.designbuild-network.com/projects/national_stadium/ accessed at 2/11/ 2019.

17. https://www10.aeccafe.com/blogs/arch-showcase/2011/08/09/serpentine-gallery-pavilion-2002-in-london-uk-by-toyo-ito-with-arup/ accessed at 16/11/ 2019.

18. https://archello.com/project/watercube-beijing/ accessed at 16/11/ 2019.

19. https://issuu.com/twentytwo22magazine/docs/twentytwo48hq/ accessed at 16/11/ 2019.

٢٠. سعيد، عصام، دور الغلاف الخارجي للمباني السكنية في مدينة نجران السعودية من منظور بيئي، مجلة القطاع الهندسي بجامعة الأزهر، العدد١٣، رقم ٤٨، يوليو ٢٠١٨، ص.٥.

21. Lee. M, Form, Style and Function: A Constraint-Based Generative System for Apartment Façade Design, In V. Bourdakis & D. Charitos (Eds.), Communicating Space(s): 24th eCAADe Conference Proceedings, 6-9 September 2006, Volos, pp. 875-877). Volos, Greece: University of Thessaly.

٢٢. خالد، إبراهيم، (٢٠١٦)، تصميم الحوائط الستائرية، رسالة ماجستير، كلية الهندسة، جامعة القاهرة.

23. https://www.researchgate.net/figure/1-Annual-sun-path-for-Cairo-Egypt-Highest-and-lowest-mid-day-altitudes-are-shown_fig3_280156825/ accessed at 16/9/ 2019.

24. http://larryriddle.agnesscott.org/ifs/carpet/carpet.htm/ accessed 1/7/2019

25. https://mathematica.stackexchange.com/questions/124919/construction-steps-of-barnsleys-fern/ accessed 1/7/2019