تحقيق التناغمية التشكيلية لعناصر التصميم الداخلى والأثاث من خلال النظريات الخوارزمية

Achieving the Harmonic Forming of Interior Design & Furniture Elements through Algorithmic Theories

ا. م. د/ ضياء الدين محمد امين طنطاوى

أستاذ مساعد بقسم التصميم الداخلى والأثاث بكلية الفنون التطبيقية – جامعة حلوان

Associ. Prof. Dr. Diaa El-Din Mohamed Amin Tantawy

Associate Professor, Interior Design and Furniture Department, Faculty of Applied Arts - Helwan University

diaatantawy@hotmail.com

م. د/ أحمد محمد محمد إبراهيم

مدرس بقسم التصميم الداخلى و الأثاث بكلية الفنون التطبيقية – جامعة حلوان

Dr. Ahmad Mohamed Mohamed Ibrahim

Lecturer, Interior Design and Furniture Department, Faculty of Applied Arts - Helwan University

ahmad_ibraheem@hotmail.com

الباحثة/ دينا محمد عبد المحسن أحمد

مصمم داخلى

Researcher. Dina Mohamed Abdel Mohsen

Interior Designer

dinaselim.id@gmail.com

الملخص:

الخوارزمية هي إجراء حسابي لمعالجة مشكلة في عدد محدود من الخطوات. إنه ينطوي على الاستنتاج والاستقراء والتجريد والتعميم والمنطق المنظم. إنه الاستخراج المنهجي للمبادئ المنطقية وتطوير خطة حل عامة. تستخدم الاستراتيجيات الحسابية البحث عن الأنماط المتكررة والمبادئ العامة والوحدات القابلة للتبديل والروابط الاستقرائية. تكمن القوة الفكرية للخوارزمية في قدرتها على استنتاج طرق جديدة وتوسيع حدود العقل البشري. على الرغم من انتشار أجهزة الكمبيوتر في الهندسة المعمارية اليوم ، فإن استخدام الخوارزميات في التصميم المعماري محدود بشكل عام. يمكن تحديد الوضع السائد لاستخدام أجهزة الكمبيوتر في الهندسة المعمارية اليوم على أنه أسلوب الحوسبة ، حيث يتم إدخال الكيانات أو العمليات التي تم تصورها بالفعل في عقل المصمم أو تقديمها أو تخزينها على نظام الكمبيوتر. في المقابل ، فإن الخوارزميات ، كعملية لإنشاء حلول التصميم باستخدام الأساليب الرياضية أو المنطقية ، محدودة بشكل عام. في حين أن البحث والتطوير في البرنامج نفسه ينطوي على تقنيات خوارزمية واسعة النطاق ، فإن التلاعب باستخدام الماوس لنماذج الكمبيوتر ثلاثية الأبعاد على شاشة الكمبيوتر ليس بالضرورة عمليات حسابية.

يسمح التصميم الخوارزمى AD بتوليد الكتل والأشكال من خلال الخوارزميات على وجه الخصوص. أثارت فئة معينة من الخوارزميات التي تهدف إلى إنتاج نتائج غير متوقعة اهتمام المصممين بسرعة ، مما سمح لهم باستكشاف مناطق جديدة غير محددة في الهندسة المعمارية. تشكل قواعد الشكل والنماذج الرياضية والخصائص الطوبولوجية والأنظمة الجينية والتشكيلات بعض الأمثلة على العمليات الحسابية التي تم استكشافها لعدم القدرة على التنبؤ بها.

من خلال الجمع بين مرونة التصميم الخوارزمى AD وبرامج التحليل والمحاكاة ، يمكن بعد ذلك تحليل بدائل التصميم ومقارنتها بالبساطة النسبية لتحديد حل يوفر الأداء الأمثل. يتيح ذلك للمصمم تحديد أولويات الأداء في وقت مبكر من عملية التصميم ، أو حتى السماح له بقيادة العملية ، ويقدم تحولًا هائلاً عن منهجيات التصميم التقليدية ، حيث يتم إجراء تقييمات الأداء عادةً في نهاية العملية ، مما يجعلها نادرًا ما تكون ذات أولوية. لا تقتصر إجراءات التحسين هذه فقط على الجوانب الفنية لأداء التصميم مثل الهيكل والسلوك الحراري والصوتيات والديناميكا الهوائية ؛ يمكن أن تشمل أيضًا جوانب أخرى مثل استخدام المواد ، والتوزيع المكاني ، و أمور أخرى.

أخيرًا ، يتيح التصميم الخوارزمى AD أيضًا اتمام المهام المتكررة التي تستغرق وقتًا طويلاً والتي كان يجب تنفيذها يدويًا من قبل ، مثل النمذجة المتكررة أو عمليات التصنيع. هذا يريح المهندسين المعماريين من الأعمال الشاقة والمعرضة للخطأ ، مما يسمح لهم بتوفير الكثير من الوقت والجهد أثناء عملية التصميم.

الكلمات المفتاحية:

الخوارزميات – العمارة الخوارزمية – التصميم الخوارزمىAD – التصميم التوليدى– التصنيع الرقمى.

Abstract:

An algorithm is a computational procedure for addressing a problem in a finite number of steps. It involves deduction, induction, abstraction, generalization, and structured logic. It is the systematic extraction of logical principles and the development of a generic solution plan. Algorithmic strategies utilize the search for repetitive patterns, universal principles, interchangeable modules, and inductive links. The intellectual power of an algorithm lies in its ability to infer new knowledge and to extend certain limits of the human intellect.

Despite the proliferation of computers in architecture today, the use of algorithms in architectural design is generally limited. Instead, the dominant mode of utilizing computers in architecture today can be identified as that of computerization, i.e. that where entities or processes that are already conceptualized in the designer's mind are entered, presented, or stored on a computer system. In contrast, algorithms, as process of creating design solutions by the use of mathematical or logical methods, are generally limited. While the research and development of software itself involves extensive algorithmic techniques, mouse-based manipulations of 3D computer models on a computer screen are not necessarily algorithmic processes.

As mentioned before, AD allows the generation of forms and shapes through algorithms. In particular, a category of algorithms aimed at producing unpredictable results quickly triggered designers' interest, allowing them to explore new uncharted formal territories in architecture. Shape grammars, mathematical models, topological properties, genetic systems, mappings, and morphisms are a few examples of algorithmic processes explored for their unpredictability.

By combining this flexibility of AD with analysis and simulation softwares, design alternatives can then be analyzed and compared with relative simplicity to select a solution that offers optimal performance. This allows the designer to prioritize performance early in the design process, or even let it lead the process, and presents a massive shift from traditional design methodologies, where performance evaluations are typically done at the end of the process, making it rarely a priority. These optimization procedures are not only restricted to

technical aspects of the design performance such as structure, thermal behavior, acoustics, and aerodynamics; they can also include other aspects such as material usage, spatial distribution, among others.

Finally, AD also enables the automation of repetitive, time-consuming tasks that had to be manually executed before, such as repetitive modelling or fabrication processes. This relieves architects from tedious and error prone work, allowing them to save a lot of time and effort during the design process.

Keywords:

Algorithms - Algorithmic architecture - Algorithmic design AD - Generative design - Digital fabrication.

المقدمة:

تلعب الرياضيات دائما دورا هاما فى عملية إيجاد الشكل فى الفن و العمارة و التصميم الداخلى على مر الزمن. و كان البناء يعتمد فى بداية الأمر على الرياضيات التقليدية (الكلاسكية) و الهندسة الإقليدية لعدة قرون . و نتيجة إلى عدم القدرة على حل الحسابات الرياضية المعقدة لخلق أشكال جديدة قد استمر هذا الأعتماد على الرياضيات التقليدية (الكلاسكية) حتى بداية القرن العشرين . و فى آواخر القرن العشرين لم تعد الرياضيات التقليدية (الكلاسكية) و الهندسة الإقليدية أساسا كافيا للتصميم المعمارى والداخلى أو لعملية إيجاد الأشكال نتيجة بما يتعلق بمطلب زيادة التعقيد فى العملية التشكيلية. و نتيجة لذلك تم توجيه الأعتماد إلى الفروع الأخرى من علم الرياضيات لحل هذة المعضلة التى اصبحت اولوية يجب تحقيقها فى هذا العالم الذى يتطلب التجديد فى مصادر الاستلهام و الأشكال النابعة منها ليتناسب مع روح العصر. و بصفة خاصة , تطور علم التفاضل و التكامل فى القرن ال١٨ قد مد علماء الرياضيات بأدوات تساعد فى تطور فروع الرياضيات المتقدمة . هذه الأدوات اتحدت مع ثورة تكنولوجيا المعلومات لتقديم الكاد CAD للتصميم المعمارى . و من ثم مميزات الكاد CAD قدمت لنا إمكانيات هندسية جديدة تشق طريقها بعيدا عن الهندسة الإقليدية المعروفة و تساعد فى عملية خلق التكوينات الجديدة . و قد استمرت هذة العلاقة التبادلية بين تطور الرياضيات و تكنولوجيا المعلومات , حتى جعلت لهذه الأدوات الرياضية الجديدة أنشطة أخرى مختلفة بدلا من خلق حلول مختلفة للمعادلات الرياضية وهى خلق التكوينات المستحدثة . و هذا النهج يعرف الآن بالتصميم التوليدى Generative Design . العديد من نماذج التصميم التوليدي قد طرحت أدوات جديدة معروفة كقواعد الشكل Shape Grammars , و المتغيرات البارامترية Parametric Variations , و الخوارزمية Algorithmic Generation . و مؤخرا قد طرحت أدوات أخرى للبحث عن الأشكال و التكونات الجديدة فى عالم الفوضى Chaos و المعادلات العشوائية , كالهندسة الكسرية Fractals Geometry و الأدوات التطورية Evolutionary Tools استنادا إلى عملية الهندسة الوراثية كالخوارزميات الجينية Genetic Algorithms و الميكنة الخلوية Cellular Automata. هذه الأدوات قد غيرت الطبيعة الادراكية النظرية و الرياضية للشكل المعمارى . حيث حولت الهندسة الإقليدية الأفلاطونية إلى نوع جديد من الهندسة لا يمكن التنبؤ به ابدا.[١] و النظريات الخوارزمية Algorithmic Theories لها كبير الأثر على الهندسة الحديثة بسبب تعريفاتها و تصنيفاتها للتحولات المختلفة , و خاصة التشوهات أو التغيرات فى الشكل . و هذا لم يقدم فقط الهام للنماذج المعمارية المفاهيمية الجديدة , ولكن عند دمجها مع تكنولوجيا الكمبيوتر , يمكن ان تساعد على خلق التصميمات المعدلة و الغير تقليدية (Deformed and Distorted Designs) .

مشكلة البحث:

1- ندرة أستغلال النظريات الخوارزمية كمصدر إستلهام فى التصميم المعاصر.

2- أفتقار عناصر التصميم الداخلى فى العصر الحديث إلى التناغمية التشكيلية بين مفرادته.

هدف البحث:

1- أستقراء فلسفة الإستلهام من خلال النظريات الخوارزمية.

2- الدعوة إلى النظر إلى ما وراء الاشياء وليس فقط بالنظر لما نراه بل بالنظام الذي أوجد ذلك الشئ.

3- الربط بين النظريات الخوارزمية وآليات توليد الشكل فى صورة تخدم التصميم الداخلى والأثاث.

4- تحقيق التناغم والترابط والوحدة بين مفردات الحيز الداخلي من خلال النظريات الخوارزمية

فرضية البحث:

أختبار فرضية العلاقة بين النظريات الخوارزمية والتناغمية التشكيلية كعلاقة ينتج عنها تكونات تشكيلية مستحدثة.

المنهجية البحثية:

الأسلوب الوصفى التحليلي.

أدوات البحث:

1- الأستبيان.

2- الملاحظة.

3- الأختبار.

1.1. تعريف الخوارزميات :

و فقا للمعجم فان الخوارزميات هى سلسة من الخطوات الرياضية المتتالية و التى تكتب بشكل منطقى لحل مشكلة معينة , فهى إجراء لإنجاز مهمة محددة , و هى الفكرة وراء أى برنامج منطقى مقبول , و سميت الخوارزمية بهذا الأسم نسبة إلى العالم الخوارزمى الذى ابتكارها فى القرن التاسع الميلادى , و الكلمة المنتشرة فى اللغات اللاتينية و الأوربية هى " Algorithm " .

فالخوارزمية ما هى الا إجراء حسابي لمعالجة مشكلة في عدد محدود من الخطوات.الخوارزميات يتضمن بداخلها الاستنتاج والاستقراء والتجريد والتعميم والمنطق المنظم. إنه الاستخراج المنهجي للمبادئ المنطقية وتطوير خطة حل عامة. تستخدم الاستراتيجيات الحسابية للبحث عن الأنماط المتكررة والمبادئ العامة والوحدات القابلة للتبديل والروابط الاستقرائية. تكمن القوة الفكرية للخوارزميات في قدرتها على استنتاج طرق جديدة للمعرفة وتوسيع حدود العقل البشري فى التفكير و التخيل.[٢]

1.2. العمارة الخوارزمية Algorithmic Architecture :

تعرف على أنها تلك التى تعتمد على " Mathematical Logic of Computer " كأداة جديدة للتصميم. و هى عبارة عن عدد من الخطوات المحددة لتحقيق هدف ما, و هو منطق الكمبيوتر الذى يعتمد على اجراء عدد متكرر من الخوارزميات للوصول الى حل المشكلة, و تستخدم كمدخل للتصميم التطورى, يسمح بأيجاد حلول تصميمة مبتكرة و غير مسبوقة كما يسمح بخلق اتجاه تصميمى حديث فريد لكل مصمم.

و قد ظهر العديد من التطبيقات للخوارزميات فى العمارة, و التى منها ما يعمل وفق خطوات عملية التصميم, و يمكن باستخدامها انتاج بدائل تصميمية لتصميم معين أو بأسلوب معمارى معين فى التصميم فى دقائق معدودة, و من تطبيقات

الخورازميات العملية فى العمارة أداة Falling water Toolbox Ver.1.0 , و يمكن لهذه الأداة أن تنتج مخطط تصميمى يعتمد على أسس و قواعد, و لعل فيلا الشلالات للمعمارى فرانك لويد رايت تمثل هذا الفكر, حيث تم تحويل هذه القواعد الى خوارزميات و رموز Codes تستخدم لإنتاج الحلول التصميمية. فبعد تحديد المشكلة و الهدف المراد الوصول اليه نبدأ فى عمل خطوات الخوارزمية بالترتيب تحت مبدأ IF-Then, و يمكن كتابتها بالعديد من لغات المبرمجة منها Java & C\C و تكون نتائجها دقيقة و لكنها لغات صعبة فى الكتابة و الفهم" و لذلك يتم استخدام أكواد Pseudocode التى تمثل وسط مناسب لعمل الخوارزميات. [٣]

1.3. التصميم الخوارزمى Algorithmic Design :

لفهم التصميم الخوارزمى AD ، من المهم أن نفهم أولاً ماهية الخوارزميات. تعرف الخوارزميات بأنها "إجراء حسابي لمعالجة مشكلة في عدد محدود من الخطوات". بمعنى آخر ، تعرف الخوارزميات بأنها طريقة الخطوة بخطوة لمعالجة مشكلة معينة. وبالتالي ، فإن التصميم الخوارزمى AD هو أسلوب يعتمد على طريقة مرتبة, منطقة و غير متوقعة فى التصميم. [٤]

مصطلح " خوارزمى " يشير إلى أستخدام تقنيات إجرائية فى حل المشكلات التصميمة . و تقنيا فإن الخوارزمية هى تعليمات بسيطة و لهذا فهى تتعلق بشكل كبير بعملية التصميم التناظرى التقليدية , كما ترتبط بعملية التصميم الرقمى. و فى مجال التصميم الرقمى فهى تشير بشكل خاص الى استخدام لغات البرمجة النصية و التى تسمح للمصمم أن يتغلب على قصور واجهات المستخدم الرسومية , و أن يصمم عبر التلاعب المباشر ليس بالشكل و لكن بالكود أو الشفرة المكونة له. و التصميم الخوارزمى العادى يمكن أداؤه عبر لغات البرمجة فى الحاسوب مثل 3dMaxScript, Visual Basic , Rhino Script , MEL (Maya) و غيرها, و على النقيض فانه نظرا لصعوبة البرمجة النصية, فان تطبيقات برامج مثل Generative Components و Grasshopper تستبدل الكود بأشكال مصورة لاتمام العملية و لهذا فأنه من الممكن وصفهم كأشكال للبرمجة الجرافيكية, أن التصميم الخوارزمى يستثمر سعة الحاسوب كمحرك بحثى و يؤدى المهام التى قد تستهلك وقتا كبيرا. و لهذا فهى تستخدم فى الأمثلة optimization و مهام أخرى تتخطى قصور محددات التصميم التقليدى. [٥]

على الرغم من انتشار أجهزة الكمبيوتر في الهندسة المعمارية اليوم ، فإن استخدام الخوارزميات في التصميم المعماري محدود بشكل عام. بدلاً من ذلك ، يمكن تعريف الوضع السائد الآن لاستخدام أجهزة الكمبيوتر في الهندسة المعمارية على أنه أسلوب الحوسبة ، اى يتم إدخال الرسومات أو العمليات التي يتم تصورها بالفعل في ذهن المصمم على نظام الكمبيوتر حيث يتم ادخالها و عرضها و تخزينها على الكمبيوتر. في المقابل ، فإن الخوارزميات ، كعملية لإنشاء حلول تصميمة باستخدام الأساليب الرياضية أو المنطقية ،فان استخدام الخوارزميات محدودة بشكل عام. في حين أن البحث والتطوير في البرنامج نفسه ينطوي على تقنيات خوارزمية واسعة النطاق.

في الوقت الحاضر ، يتم صياغة اتجاه جديد و هو التصميم الخوارزمى . الذى يتضمن تعيين الخوارزميات لتوليد الفراغ والشكل من المبدأ القائم على القواعد المتأصل في البرامج المعمارية والأنماط ورمز البناء واللغة الحاسوبية نفسها. بدلاً من البرمجة المباشرة ، يمكن الادعاء بان نية التصميم من خلال البرامج النصية الخوارزمية المبنية على أعلى أنظمة النمذجة الحالية يمكنها بناء بنية تحتية للتصميم تتميز بالتماسك وإمكانية التتبع والذكاء في شكل ثلاثي الأبعاد محوسب. باستخدام البرامج النصية الخوارزمية ، يمكن للمصممين تجاوز الماوس ، متجاوزين القيود الموضوعة على البرامج ثلاثية الأبعاد الحالية. فالتصميم الخوارزمى ما هو الا إطار عمل تخيلى لاستكشاف أشكال وهياكل وعمليات تصميمة معقدة. فهو

يجمع بين كل من النظريات والأساليب الخاصة بعلوم الكمبيوتر بالإضافة إلى أعطاءه مساحة التصميم المجردة المجسدة في أنظمة النمذجة والرسوم المتحركة الحالية.[٦]

يتطلب التصميم الخوارزمى AD استخدام الخوارزميات ، أو العمليات الحسابية ، كجزء من عملية التصميم التي يمكن أن تشكل بعض التحديات الجديدة للمصممين.

أولاً ، من أجل تنفيذ الخوارزميات في الكمبيوتر ، يجب أن يتعلم المصممون كيفية البرمجة ، أي ترجمة الخوارزميات إلى تعليمات يمكن أن يفهمها الكمبيوتر. في حين أن المصممين أعتادوا على التعامل مع مشاكل التصميم الغامضة والغير محددة ، فإن التصميم الخوارزمى AD يتطلب منهم صياغة وصف رسمي محدد لا لبس به وواضح المعالم لحل التصميم المطلوب وترجمته إلى تعليمات يمكن أن يفهمها الكمبيوتر باستخدام لغة البرمجة. يجب أن يكون هذا الحل صحيحًا من الناحية التركيبية والمعنوية في لغة البرمجة المختارة وإلا فلن يقوم البرنامج بتنفذها بشكل صحيح.

ثانيًا ، يجب أن نفهم الرياضيات ، ولا سيما الهندسة. و بذلك يمكن أن يوفر فهم الرياضيات الكامنة وراء إنشاء االشكل ومعالجته رؤية جديدة لإمكانيات التصميم وزيادة تحكم المصمم في التصميم. يمكن أيضًا استغلال الرياضيات كإجراءات توليدية.

أخيرًا ، يتطلب التصميم خوارزمي AD أن يفكر المرء بطريقة حسابية. يتطلب هذا من المصممين تجريد أنفسهم من النشاط المباشر للتصميم والتمثيل المرئي والتفاعلي المألوف للتصميم والتركيز على المنطق الذي يربط التصميم معًا والتعليمات النصية التي تصف التصميم. بعبارة أخرى ، لم يعد المصمم يتعامل بشكل مباشر مع التمثيلات المرئية للتصميم في الأدوات التقليدية ولكنه يصيغ وصفًا حسابيًا للتصميم. بشكل عام ، يتطلب التصميم الخوارزمي AD شكلاً مختلفًا من التفكير عن الذي اعتاد عليه المصممون ، يعتمد على الحدس والإبداع. يمكن أن يكون هذا التحول إلى منطق الخوارزميات حاجزًا لمعظم المصممين ولكن بمجرد تجاوز هذا التحدي الأولي ، يفتح مجال جديد للاستكشاف.[٧]

1.3.1. التصميم الخوارزمى كنقلة نوعية فى التصميم :

يتم تعريف النقلة النوعية على أنها تغيير تدريجي في طريقة التفكير الجماعي. إنه تغيير فى الافتراضات الأساسية والقيم والأهداف والمعتقدات والتوقعات والنظريات والمعرفة. النقلة النوعية عبارة عن تحول وسمو وتقدم و تطور وانتقال. ترتبط النقلة النوعية ارتباطًا وثيقًا بالتقدم العلمي ، فإن تأثيرها الحقيقي يكمن في الإدراك الجماعي بأن النظرية أو النموذج الجديد يتطلب فهم المفاهيم التقليدية بطرق جديدة ، ويرفض الافتراضات القديمة ، ويستبدلها بأخرى جديدة. بالنسبة لـ T. Kuhn (١٩٩٦) ، الثورات العلمية حدثت خلال تلك الفترات التي يتعايش فيها نموذجان على الأقل ، أحدهما تقليدي والآخر جديد على الأقل. النماذج غير قابلة للقياس ، وكذلك المفاهيم المستخدمة لفهم وشرح الحقائق والمعتقدات الأساسية. يعيش الاثنان في عالمين مختلفين. يُطلق على الحركة من النموذج القديم إلى النموذج الجديد مصطلح نقلة نوعية.

جرت العادة ان العملية التصميمة تكون نابعة من الحدس والإبداع البشري و لكننا هنا نتكلم عن نقلة نوعية تفوق سابقاتها. حيث يستخدم التصميم الخوارزمى طرقًا وأنظمة حديثة و مبتكرة للغاية فى عملية التصميم و انتاج الشكل. فإذا اردنا للعملية التصميمة أن تدخل في ذلك العالم الغريب للأشكال الخوارزمية ، فيجب أن تتضمن تلك العملية التصميمة الكثير من العمليات الحسابية المعقدة. فإذا كان هناك شكل يصعب فهمه و تمثله بالطرق التقليدية المتعارف عليها فإننا نجد ان هذا الشكل يقع ضمن مجال التصميم الخوارزمي بينما يكون كلا من الحدس والإبداع البشري هما فقط نقطة البداية.

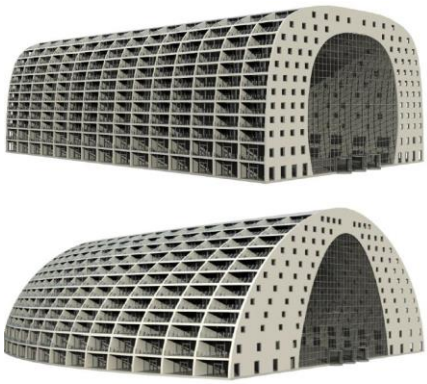
ومع ذلك ، لا تهدف الاستكشافات الحسوبية الجديدة إلى القضاء على الخيال البشري ، بل تهدف إلى توسيع حدوده التفكيرية. الحوسبة ليست بديلاً عن الإبداع البشري وبالتالي لا يمكن أن تكون الحوسبة معادية للابداع البشرى. بل إنها توفر وسائل الاستكشاف والتجريب والاستثمار في عالم افتراضى بديل. ربما لأول مرة ، قد يكون الشكل غير متوافقًا مع

الإنتاج الكمى أو الحتمية الحسابية ولكنه متوافق مع الحوسبة الابداعية computational creativity و الابداع الحاسوبى creative computation . لا تتعلق الحوسبة هنا بالإدراك أو التفسير بل تتعلق بعملية استكشاف وتوسيع العقل البشري. ففى التصميم الخوارزمى نجد أن كل من المدخلات الخوارزمية ومخرجات الكمبيوتر لا ينفصلان داخل نظام حسابي متكامل. بهذا المعنى ، تصبح العملية التصميمية تجسيدًا لعملية يمكن الحصول عليها من خلال منطق " المساهمات المتبادلة " و التى تتم من خلال اندماج منطق العقل البشري و منطق مساعدة الكمبيوتر. .[٨]

1.3.2. فوائد التصميم الخوارزمي :

كما ذكرنا من قبل ، يسمح التصميم الخوارزمى AD بتوليد الكتل والأشكال من خلال الخوارزميات. على وجه الخصوص ، يوجد فئات من الخوارزميات التي تهدف إلى إنتاج نتائج تصميمية غير متوقعة تعمل على جذب اهتمام المصممين بسرعة ، مما يتيح لهم استكشاف مناطق تصميمية جديدة غير متعارف عليها في الهندسة المعمارية. يعد كلا من قواعد الأشكال والنماذج الرياضية و الخصائص الطوبولوجية والأنظمة الجينية والتحويلات بعض الأمثلة على العمليات الخوارزمية التي تكشف لنا جزء من قدرتها على عدم التنبؤ بها.

علاوة على ذلك ، نظرًا لأصله الخوارزمي ، عادةً التصميم الذي تم إنشاؤه باستخدام التصميم الخوارزمى AD ينى بحيث يمكن إنشاء حالات مختلفة منه ولكن ذات صلة بنفس الحل التصميمى الأولى بسرعة كبيرة و ذلك عن طريق تجربة قيم المعاملات المتغيرة ، مما يتيح للمصممين تصور واستكشاف مجموعة واسعة من الاحتمالات التصميمية المختلفة. نظرًا لأن التصميم الذي تم إنشاؤه هو تصميم بارمترى - أي يستغل الهندسة الترابطية لوصف العلاقات بين الأشياء ، وبالتالي إنشاء علاقات ترابطية بينها - التغييرات التي تم إجراؤها على الخوارزميات التي تولد التصميم أو متغيراته يتم نشرها بحيث لا يضطر المصمم إلى القيام بتحديث جميع جوانب التصميم يدويًا.



الشكل (١) - يمكن أن تنتج نفس الخوارزميات حالات مختلفة من التصميم من خلال إسناد قيم مختلفة إلى محدداته. في هذه الحالة ، تم استخدام نفس الخوارزميات لإنشاء بدائل تصميم مختلفة لقاعة السوق في روتردام ، التي صممها MVRDV Architects

من خلال الجمع بين مرونة التصميم الخوارزمى AD و برامج التحليل والمحاكاة ، يمكن للبدائل التصميمية أن يتم تحليلها ومقارنتها بالبساطة النسبية لتحديد حل يوفر الأداء الأمثل. مما يتيح للمصمم تحديد أولويات الأداء في وقت مبكر من عملية التصميم ، أو حتى السماح له بقيادة العملية التصميمية ، كما هو موضح في حالة London City Hall في الشكل (٢) ، ويكون تحولًا هائلاً من منهجيات التصميم التقليدية ، حيث تتم تقييمات الأداء في نهاية العملية التصميمية عادة. لا تقتصر هذه الإجراءات التحسينية على الجوانب الفنية لأداء التصميم مثل الأنشاء والسلوك الحراري والصوتيات والديناميكا الهوائية فقط ؛ و لكنها تشمل أيضًا جوانب أخرى مثل استخدام المواد ، والتوزيع المكاني ، و أمور أخرى كثيرة. أخيرًا ، يتيح التصميم الخوارزمى AD أتمام المهام المتكررة التي تستغرق وقتًا طويلاً والتي كان يتم تنفيذها يدويًا من قبل ، مثل

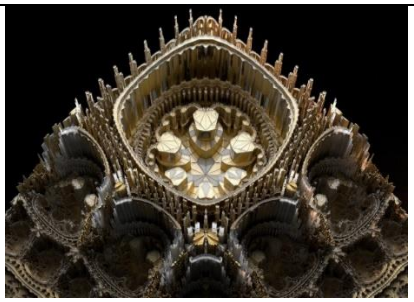
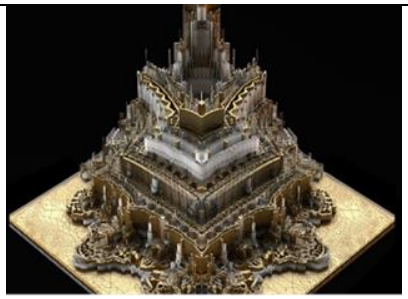
النمذجة المتكررة أو عمليات التصنيع. هذا يريح المهندسين المعماريين من الأعمال الشاقة والمعرضة للخطأ ، مما يسمح لهم بتوفير الكثير من الوقت والجهد أثناء عملية التصميم.[٩]

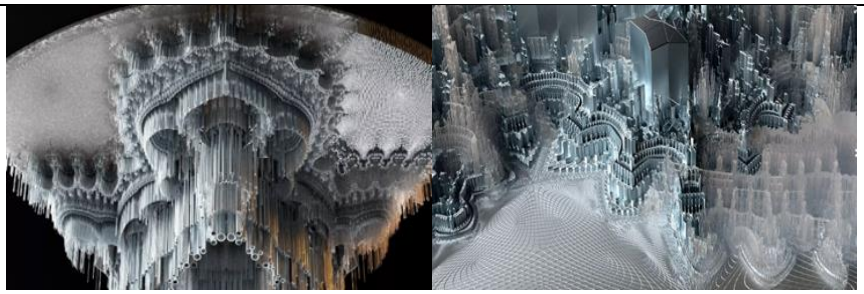
الشكل (٢) - من تصميم فوستر وشركاه، تم الحصول على الشكل الدائري والميل قليلاً لمبنى مجلس مدينة لندن من خلال عملية تحسين: تم تقليل السطح الملامس لأشعة الشمس المباشرة، مما أدى إلى تقليل المكاسب الشمسية من خلال جلد المبنى.

1.4. دراسة تحليلة لمشاريع خوارزمية

التالى هو دراسة وتحليل لبعض المشاريع المبنية على المعادلات الخوارزمية التى تم انتاجها بواسطة الكمبيوتر سواء فى مرحلة الاستلهام او مرحلة التصنيع الرقمى حيث يتضح فيها مدى توفر أسس ومبادئ التصميم الداخلى وما إذا كانت تحقق التناغمية التشيكلية ام لا.

1.4.1. مشروع المقرنصات Muqarnas:

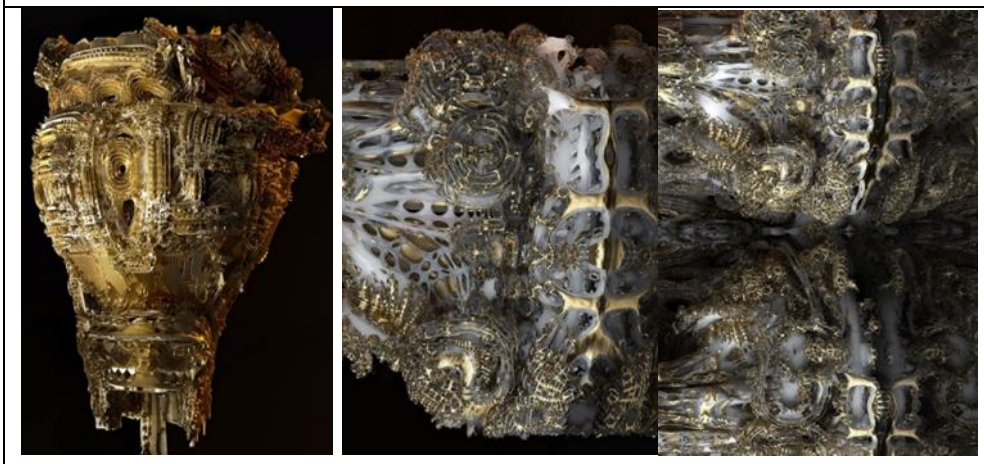
اسم المشروع	المقرنصات Muqarnas
موقع المشروع	متحف موري للفنون، طوكيو، لمعرض المستقبل والفنون. تم عرضه لأول مرة في نوفمبر ٢٠١٩.
المصمم	مايكل هانسمير Michael Hansmeyer يو تينغ شنغ (جامعة فنغ شيا) Yu-Ting Sheng (Feng Chia University) شيه يوان وانغ(جامعة تشياو تونغ الوطنية) Shih-Yuan Wang (National Chiao Tung University) منغ هاو (روبوتيك بلس) Meng Hao (RoboticPlus)
مساحة المشروع	تبلغ مساحة المقرنصة المكتملة ٢٤ متر مربع وارتفاعها ٢,٤ متر
صور المشروع النموذج الخوارزمى الأولي للمقرنصة	 

	
   	صور المشروع فى الحقيقة

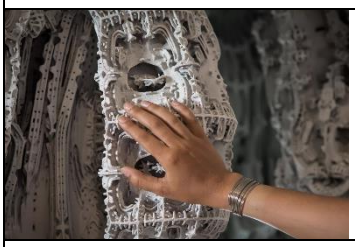
وصف المشروع	طفرة مقرنصة: مقرنصة مصممة بشكل آلي ، ومصنعة آليًا ، بعرض ٦ أمتار يتم تثبيتها في غرفة معرض مركزية. يستكشف المشروع كيف - في سياق الثورة الصناعية الرابعة - يمكن للحوسبة والتصنيع الآلي أن يجلب روعة مثل هذا الفن الهندسي القائم على القواعد إلى المستقبل.تستخدم طفرة المقرنصة خوارزمية التقسيم الانتقائي لإنتاج هندسة تربط عمودًا ضخمًا موجودًا مسبقًا في وسط غرفة المعرض بسقف الغرفة. تولد الخوارزمية مئات الآلاف من البلاطات الموضوعة بين ستة عشر طبقة لإنشاء انتقال زخرفي ممتد من العمود إلى السقف. يتم تحويل المنتج الصناعي الذي يتم إنتاجه بكميات كبيرة ، مقاطع الألمنيوم المبثوقة ، إلى هيكل زخرفي متقن من خلال استخدام جذري لتكنولوجيا المعلومات: تحدد الخوارزمية على التوالي شكلاً معقدًا ، وتقوم الروبوتات بتنقية عناصر الأنبوب البسيطة وتثبيتها في مجموعة سريعة الزوال. يتجاوز الهيكل الناتج التصنيف التاريخي إلى شيء جديد وغير مرئي.عند الوقوف تحت المقرنصة ، يذهل الزوار بمزيج من الحيرة والفضول: الحمل الزائد الحسي المربك يحجب جزئيًا المنطق التركيبي الأساسي. يمكن تمييز الأنماط بسهولة عندما يغير المرء منظوره ، لكنه يختفي مرة أخرى وسط الانعكاسات اللامتناهية
مفهوم التصميم	أساس طفرة مقرنصة هو عمود هيكلي ضخم موجود مسبقًا بعرض ١,٦ متر يقع في وسط إحدى غرف معرض متحف موري. بدلاً من إنشاء مقارنصة في المساحة الضيقة بين العمود وجدران الغرفة ، يتم استخدام العمود نفسه كأصل للمقرنصة. يخلق طفرة المقرنصة انتقالًا بين هذا العمود وسقف الغرفة. تستخدم خوارزمية تقسيم فرعي انتقائية مخطط العمود ومحيط السقف لإنتاج مخطط مقرنص بمئات المستويات الفردية وملايين الجوانب الصغيرة. تقوم الخوارزمية بتحسين خطوط الكونتور هذه لإنشاء منظر طبيعي شاسع بتفاصيل لا نهاية لها على ما يبدو ، بالتناوب بين الهوابط والتشكيلات المقعرة. تم تصوير هذا التصميم الأولي في صورة تطوير المفهوم. بالنسبة للتصنيع ، يتم تكرير منتج صناعي يتم إنتاجه بكميات كبيرة - مقاطع الألمنيوم المبثوقة - آليًا وتثبيته في مجموعة متقنة. أنماط التبليط مفصلية على شكل ١٥٠٠٠ أنبوب من أنابيب الألمنيوم.تخلق الانعكاسات والتداخلات بين الأنابيب اللامعة تأثير تشبع يعكس أسلاف المقرنة التاريخيين. تظهر الأنماط وتختفي عندما يتحرك المرء تحتها ويغير منظوره.
التصنيع	تم تقسيم المقرنصة إلى ستة عشر طبقة أفقية ، وهذه بدورها تم تقسيمها إلى ٤٠ مكونًا منفصلاً لتسهيل النقل والتجميع. تم طحن الطبقات الفردية آليًا من EPS عالي الكثافة. في الخطوة الثانية ، تم حفر آلاف الثقوب ذات الأعماق والأقطار المختلفة آليًا في الطبقات. بشكل منفصل ، تم قطع رقاقة بلاستيكية ناعمة بالليزر وربطها بالطبقات لتحسين جودة السطح. لتوضيح بلاطات التصميم الأصلي ، تم إدخال ١٥٠٠٠ أنبوب فردي مجوف من الألومنيوم في الطبقات ولصقها في مكانها. تم تصنيع أنابيب محددة خصيصًا لتقليل وزنها.

مدى توفر أسس و مبادئ التصميم الداخلى فى المشروع	
الايقاع	يتوفر من خلال تكرار الشكل الأسطوانى المفرغ باحجام مختلفة و احداثيات متغيرة فى الفراغ ثلاثى الابعاد ينتج عنه لغة حوارية بصرية ذات ايقاع لعين المتلقى.
الوحدة و التجانس	تتوفر حيث تحققت الوحدة فى التصميم من خلال استخدام شكل هندسى واحد فى جميع انحاء التصميم و استخدام خامة واحدة ايضا مما ادىالى ترابط و وحدة تظهر فى اللغة الفنية و التشكيلية المستخدمة فى المشروع.
الأتزان	يتوفر حيث ان هناك اتزان بين الكتل التصميمية و تكافؤ بين عناصر التشكيل الداخلى و يتوفر ذلك من خلال الاتزان البصرى حول محور عمودى فى منتصف المقرنصة حيث يتوفر نوعان من الأتزان فى الحجوم الكبيرة اتزان غير متماثل نابع من تقابل كتل متشابهة حول محور التشكيل الرئيسى فى المنتصف اما بالنسبة للحجوم الصغيرة فهى يحكمها أتزان ديناميكى حيث ان الأشكال تتزن من خلال حركة العين و ليس من خلال محور محدد للتشكيل.
التكرار	يتوفر حيث يتم تكرار العناصر التصميمية بشكل متغير الحجم يحقق الأتزان و الجاذبية.
التباين	يتوفر من خلال التضاد فى الاحجام و الارتفاعات حيث الاشكال الصغيرة و الكبيرة
النسبة و التناسب	تتوفر من خلال مراعاة النسبة بين اجزاء العناصر التصميمية حيث ان نسبة احجام الكتل الصغيرة المتمثلة فى الاسطوانات المعدنية صغيرة جدا مقارنة الى نسبة الحجم الكلى للتشكيل و جاء ذلك تأكيدا على دقة التفاصيل الناتجة عن التصميم الرقمى واستخدام الكمبيوتر و هو الشئ الذى لم يكن متاح بالطرق التقليدية من قبل.
الحركة	التشكيل فى الفراغ بالاسطوانات المعدنية يخلق مستويات متعددة ثلاثية الأبعاد ينتج عنها احساس بالحركة يمنح الشكل خواص ديناميكية واضحة .
الرمزية فى التشكيل	قام المصمم بانتاج شكل المقرنصات و هى احد أشكال التصميم الأسلامى الصريحة بأسلوب تجريدى رقمى مشيرا الى القيم الجمالية القوية للفكر الأسلامى للتصميم الهندسى التى تتناسب مع مختلف العصور و الثقافات.

1.4.2. مشروع Digital Grotesque II :

اسم المشروع	Digital Grotesque II
موقع المشروع	معرض Imprimer le monde التابع لمركز بومبيدو نفذ عام ٢٠١٧.
المصمم	مايكل هانسمير Michael Hansmeyer بنيامين ديلنبرجر Benjamin Dillenburger
مساحة المشروع	كتلة يبلغ ارتفاعها ٣,٥ مترًا يتم إحياؤها في شكل سبعة أطنان
صور المشروع النموذج الخوارزمى الأولي	
صور المشروع فى الحقيقة	

وصف المشروع	Digital Grotesque II - مغارة مطبوعة ثلاثية الأبعاد كاملة الحجم - تم عرضها لأول مرة في معرض Imprimer le monde التابع لمركز بومبيدو. يستكشف Digital Grotesque II علاقة جديدة بين المصمم والكمبيوتر ، حيث يتحول الكمبيوتر من أداة سلبية إلى شريك نشط يمكنه توسيع خيال المصمم. يتعلم الكمبيوتر إنشاء الهياكل المعمارية التي تثير الاهتمام والفضول والاستجابة العاطفية. يولد حجم واحد ملايين الفروع ، تنمو وتنطوي مرارًا وتكرارًا. يتم ضغط مئات الأمتار المربعة من الأسطح في كتلة يبلغ ارتفاعها ٣,٥ مترًا يتم إحياؤها في شكل سبعة أطنان ، وهيكل من الحجر الرملي ثلاثي الأبعاد. الهيكل الناتج يكون مربكًا ومثيرًا للفضول ومثيرًا للذكريات في آن واحد دون أن يكون توجيهيًا. إنه يسكن مساحة بين ما هو من صنع الإنسان وما هو طبيعي ، بين النظام والفوضى ، ويقدم لحظات مفاجأة غير متوقعة.
مفهوم التصميم	في Digital Grotesque ، بدلاً من البرمجة الصريحة لمجموعة من القواعد المحددة مسبقًا للوصول إلى معايير التصميم هذه ، يتعلم الكمبيوتر معايرة التصميم بهدف إثارة التحفيز واهتمام الناظر. حيث تم تدريب الكمبيوتر باستخدام اختلافات التصميم التي تم تقييمها عبر الإنترنت من قبل مئات المتطوعين. تعمل العملية بدون أي سوابق معمارية وبدون تحكم مباشر في النموذج. برنامج الكمبيوتر قادر على تصميم أشكال متنوعة لا يمكن رسمها ولا يمكن تصورها ؛ أشكال لا يستطيع المصمم البشري تصورها بالتفصيل والتمايز. يصبح دور المصمم دور أمين ، يوجه العملية ويحدد أهداف التصميم المناسبة. في عملية تصميم Digital Grotesque ، اقترح الكمبيوتر الآلاف من حلول التصميم المحسّنة لإثارة استجابة عاطفة الناظر. لقد تم التعلم عن إمكانيات التصميم الجديدة في كل خطوة في عملية

	تكرارية.و اختيار حلولًا محددة ودمجها في شكل واحد. يحرر هذا التفاعل الجديد بين الإنسان والآلة المصمم من التفكير فيما يتعلق بالنماذج الأصلية والفئات ، ويخدم في النهاية لتوسيع خيال المصممين وإبداعهم.
التصنيع	اليوم يمكننا صنع أي شيء. يعمل التصنيع الرقمي الآن على كل من المقياسين الجزئي والكلي ، ويجمع بين مواد متعددة ، ويستخدم عمليات تجسيد مختلفة. لم يعد التعقيد والتخصيص عوائق في التصميم. بينما يمكننا تصنيع أي شيء ، يمكن القول إن التصميم يبدو محصورًا في أدوات التصميم لدينا: يمكننا فقط تصميم ما يمكننا تمثيله بشكل مباشر. إذا نظر المرء إلى المصنوعات المطبوعة ثلاثية الأبعاد ، فغالبًا ما يكون هناك تناقض بين سحر التصنيع الرقمي وتقليد الأشياء المطبوعة. ما نحتاجه هو نوع جديد من أدوات التصميم. نحتاج إلى أدوات للبحث والاستكشاف ، بدلاً من مجرد التحكم والتنفيذ. نحن بحاجة إلى أدوات تتجاوز تلبية أو تحسين المتطلبات الوظيفية البسيطة ، والتي تسمح لنا بالتحقيق في عوامل أكثر غموضًا في التصميم وتطويرها: المعايير اللينة.
مدى توفر أسس و مبادئ التصميم الداخلى فى المشروع	
الايقاع	تداخل الاشكال الشديد يتيح للمتلقى ادراك كل جزء منها بعدة طرق مختلفة و بأكثر من صياغة و هو ما ينتج عنه ايقاع فريد من نوعه بين اجزاء التشكيل المختلفة.
الوحدة و التجانس	 تتوفر حيث تحققت الوحدة بالرغم من اختلاف الأشكال فى الحجم والكتلة الا انها تتمتع بنفس الخواص الشكلية فى العموم وذلك نتيجة لكونها ناتجة عن نفس سلسلة العمليات الرقمية.
الأتزان	يتوفر حيث ان قد يبدو ان التشكيل للوهلة الاولى يحقق سيمترايا كاملة الا ان بعد التدقيق فى تفاصيله تظهر الكثير من الأختلافات بين الجانب الايمن والأيسر لذلك فهو يحقق اتزان غير متماثل بشكل ناجح جدا.
التكرار	يتوفر فى الكتل العامة وليس تكرارا فى التفاصيل الدقيقة و هو الأسلوب الذى يخلق تشكيل ناجح بدون ملل.
التباين	يتوفر من خلال كثرة الكتل البارزة والغائرة الدقيقة التى ينتج عنها الكثير من الظلال وهو ما يضيف بعد جديد للتشكيل.

النسبة و التناسب	تتوفر من خلال مراعاة النسبة بين اجزاء العناصر التصميمية حيث ان نسبة احجام الكتل الصغيرة المتمثلة فى الاسطوانات المعدنية صغيرة جدا مقارنة الى نسبة الحجم الكلى للتشكيل وجاء ذلك تأكيدا على دقة التفاصيل الناتجة عن التصميم الرقمى واستخدام الكمبيوتر وهو الشئ الذي لم يكن متاح بالطرق التقليدية من قبل.
الحركة	الحركة ناتج عن اتصال كل الكتل الصغيرة ببعضها البعض مكونة العديد من الاسطح المائلة فى الفراغ بشكل يجعل عين المتلقى فى حركة دائمة مستمرة.
الرمزية فى التشكيل	بالرغم من ان الشكل ناتج عن معادلات رياضية و خوارزميات معقدة الا ان الشكل النهائى مشابه جدا الى الكتل الحجرية الطبيعية و هو ما يرمز الى ان الرياضيات و الطبيعة ما هما الا وجهان لعملة واحدة.

النتائج:

1- النظريات الخوارزمية في التصميم تعتبر نظريات توضيحية ارشادية تعتمد على تغيير منهجية عملية التصميم وتغيير أدواتها للوصول إلى حلول تصميمية فريدة تحمل ملامح وسمات فكرية جديدة.

2- التصميم بمساعدة النظريات الخوارزميات يفتح آفاق جديدة للفكر التصميمي الذي لم يعد يعتمد على ذاتية المصمم في قواعد التشكيل، ولكن يعتمد على المعادلات الرياضية والتحليل العلمي الذي يتضمن التصميم القائم على تحليل وتقييم الأداء والتصميم وفقا لمعلومات التصميم.

3- أصبح كلا من التصميم المعماري والتصميم الداخلي منصهرا في بوتقة التصميم الخوارزمى، فأصبح من غير الممكن فصل رؤية وتأثر كلا منهما على الآخر، الأمر الذي يستوجب نظرة شمولية لعملية التصميم تقوم على العلاقة العضوية وعلاقة التأثير والتأثر بين كل العناصر.

4- تتيح النظريات الخوارزمية للمصممين تصور واستكشاف مجموعة واسعة من الاحتمالات التصميميمة المختلفة. نظرًا لأن التصميم الذي تم إنشاؤه هو تصميم بارمترى - أي يستغل الهندسة الترابطية لوصف العلاقات بين الأشياء ، وبالتالي إنشاء علاقات ترابطية بينها - التغييرات التي تم إجراؤها على الخوارزميات التي تولد التصميم أو متغيراته يتم نشرها بحيث لا يضطر المصمم إلى القيام بتحديث جميع جوانب التصميم يدويًا.

5- يتيح التصميم الخوارزمى AD أيضًا أتمام المهام المتكررة التي تستغرق وقتًا طويلاً والتي كان يجب تنفيذها من قبل يدويًا، مثل النمذجة المتكررة أو عمليات التصنيع.

6- تكمن القوة الفكرية للخوارزمية في قدرتها على استنتاج طرق جديدة وتوسيع حدود العقل البشري.

7- جعلت النظريات الخوارزمية لهذه الأدوات الرياضية الجديدة أنشطة أخرى مختلفة بدلا من خلق حلول مختلفة للمعادلات الرياضية وهي خلق التكوينات المستحدث.

التوصيات:

1- يوصى الباحث بضروره إستخدام التصميم الخوارزمي، والاستفاده من إيجابياته، وتطبيقه من خلال برامج الحاسب الالى المختلفة.

2- ضرورة الاطلاع المستمر على ما يستجد من مناهج للتصميم أوتكنولوجيا الإنتاج والتصنيع لتحديث الفكر التصميمى في الأكاديميات المتخصصة في تعليم التصميم.

3- ضرورة تطوير البرامج الدراسية الأكاديمية بمؤسسات التعليم، سواء فيما يخلص بمقررات التصميم – الداخلى او المعماري أم غيرهم، من أجل تعريف الطلاب وتدريبهم على التقنيات الرقمية الحديثة وتطبيقاتها المختلفة والمتنوعة في كافة مجالات العمل.

المراجع:

1- عباس، لؤى حبشى كمال، الأتجاه الطوبولوجى كمنهجية أبداعية فى تصميم العمارة الداخلية، رسالة دكتوراه، كلية الفنون الجميلة، جامعة الأسكندرية, ٢٠١٤.

1- eabaas , luay habashi kamal , alatijah altuwbuluji kamanhaj 'iibdaeiin fi tasmim aleimarat aldaakhiliat , dukturah. kuliyat alfunun aljamilat jamieat al'iiskandariat 2014.

2- عبد الله، يمنى خالد إبراهيم محمد: " الأتجاه البارامترى فى التصميم الداخلى وتطبيقه على المعارض التجارية الدولية ", رسالة ماجستير، كلية الفنون التطبيقية. جامعة حلوان ,٢٠١٦.

2- eabd allah , yumnaa khalid 'iibrahim muhamad: "al'atjah albaraimtaraa fi altasmim aldaakhilaa fi almintaqat altijariat alduwaliati" , risalat majistir , kuliyat alfunun altatbiqiati. jamieat hulwan , 2016.

3- السفطي ,مروة وائل. " الأنماط التصميمية للإضاءة الطبيعية التقليدية في التصميم الداخلي و العمارة الإسلامية "مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية المجلد ٦، العدد ٢٨

3- alsafati, marwat wayil. "al'anmat altasmimiat lil'iida'at altabieiat fi altasmim aldaakhilii w aleimarat al'iislamiatu" majalat aleimarat walfunun waleulum al'iinsaniat almujalad 6, aleadad 28

3- El Iraqi , Ahmed Medhat, Form Generation in Architecture using Tools Based on Evolutionary & Mathematical Functions, M.Sc. Degree in Architecture , Ain Shams University, 2008.

4- Terzidis, Kostas, "Algorithmic Design: A Paradigm Shift in Architecture?, PhD, School of Design, Harvard University.

5- Feist, Sofia Teixeira de Vasconcelos, "A-BIM: Algorithmic-based Building Information Modelling", Master, tecnico lisboa.

---

[1] Ahmed Medhat El Iraqi , Form Generation in Architecture using Tools Based on Evolutionary & Mathematical Functions, M.Sc. Degree in Architecture , Ain Shams University, 2008.

[2] Kostas Terzidis, "Algorithmic Design: A Paradigm Shift in Architecture?, PhD, School of Design, Harvard University, page 202.

[٣] لؤى حبشى كمال عباس, الأتجاه الطوبولوجى كمنهجية أبداعية فى تصميم العمارة الداخلية, رسالة دكتوراه, كلية الفنون الجميلة, جامعة الأسكندرية, ٢٠١٤ , صفحة ٣٠ .

[٤] Sofia Teixeira de Vasconcelos Feist, "A-BIM: Algorithmic-based Building Information Modelling", Master, tecnico lisboa, page 12

[٥] يمنى خالد إبراهيم محمد عبد الله : " الأتجاه البارامترى فى التصميم الداخلى و تطبيقه على المعارض التجارية الدولية ", رسالة ماجستير , كلية الفنون التطبيقية . جامعة حلوان . ,٢٠١٦ , صفحة ٤٩ .

[٦] Kostas Terzidis, "Algorithmic Design: A Paradigm Shift in Architecture?, PhD, School of Design, Harvard University, page 20

[٧] Sofia Teixeira de Vasconcelos Feist, "A-BIM: Algorithmic-based Building Information Modelling", Master, tecnico lisboa, page 12

[8] Kostas Terzidis, "Algorithmic Design: A Paradigm Shift in Architecture?, PhD, School of Design, Harvard University, page 206.

[9] Sofia Teixeira de Vasconcelos Feist, "A-BIM: Algorithmic-based Building Information Modelling",Master, tecnico lisboa, 2017, page 13-14