



The Role of Algorithms in the Formation Structure of Future Architecture

دور الخوارزميات في تشكيل البنية الإنشائية لعمارة المستقبل

Shahad Alaa Soud ^{a*}, Ali Mohsen Jaafar Al-khafaji ^b

^a Department of Architectural Engineering, AL-Esraa University College, Baghdad, Iraq.

^b Department of Architectural Engineering, University of Technology- Iraq, Baghdad, Iraq.

Submitted: 04/09/2022

Accepted: 12/10/2022

Published: 18/03/2023

KEY WORDS

Algorithms, Algorithms generation, The structure of future architecture

ABSTRACT

Technological development is an essential element in architectural development. It works to change the perception of how buildings are designed. Also, it leads to future horizons to imagine distinctive architecture based on the rules of the unfamiliar in architectural forms and the trend towards dynamic forms. Moreover, it takes nature as a source of inspiration and, in addition to the possibilities of technology for building materials, resulting in the emergence of unexpected, vibrant, and ever-changing architectural forms. Future architecture depends on using digital generation tools to form its free dynamic structure, and algorithms are one of the digital tools used today for generation and structural optimization. Therefore, the research problem of "the lack of a theoretical perception that describes algorithms and their role in shaping the structure of future architecture". The research initially dealt with the general knowledge of algorithms. Then the theoretical framework for algorithms was extracted by analyzing several architectural studies. After that, an applied example of the role of these algorithms was studied and analyzed. Then the main conclusions, recommendations and sources were presented.

الكلمات المفتاحية

الخوارزميات، التوليد الخوارزمي،
 بنية عمارة المستقبل

الملخص

يعد التطور التكنولوجي عاملاً أساسياً في تطور العمارة، إذ يعمل على تغيير النظرة إلى الطريقة التي تصمم بها المباني، بما يؤدي إلى آفاق مستقبلية لتخيل عمارة غير مسبقة، تقوم على قواعد اللامألوف في الأشكال المعمارية، والاتجاه نحو أشكالاً ديناميكية تتخذ الطبيعة مصدراً للإلهام بالإضافة إلى الإمكانيات التكنولوجية للمواد البنائية، مما أدى إلى ظهور أشكال معمارية غير متوقعة حيوية ومتغيرة باستمرار. العمارة المستقبلية تعتمد على استخدام أدوات التوليد الرقمية في التشكيل الحر، وتمثل الخوارزميات إحدى الأدوات الرقمية المستخدمة في الوقت الحالي والتي تتيح للمصمم إمكانيات كبيرة خلال عملية التصميم المعماري لمختلف النماذج مهما بلغت من التعقيد، وذلك عن طريق تسهيل عملية التحكم فيها والسيطرة على مختلف متغيرات التصميم حيث تمثل أداة للتوليد والتحسين الهيكلي. لذلك ظهرت مشكلة البحث المتمثلة في "عدم وجود تصور نظري واضح يصف دور الخوارزميات في تشكيل الهيكل الإنشائي لعمارة المستقبل". إذ تناول البحث في البداية الإطار المعرفي الخاص بالخوارزميات، ومن ثم استخلاص الإطار النظري للخوارزميات من خلال تحليل العديد من الدراسات المعمارية، وتم بعد ذلك دراسة وتحليل مثال تطبيقي لدور هذه الخوارزميات ومن ثم طرح الاستنتاجات الرئيسية التوصيات والمصادر.

* Correspondent Author contact: shahad2021@esraa.edu.iq.

DOI: <https://doi.org/10.36041/iqjap.2023.135681.1061>

Publishing rights belongs to University of Technology's Press, Baghdad, Iraq.

Licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

1. المقدمة

شهدت نهايات القرن العشرين تقدماً ملحوظاً في جميع المجالات المرتبطة بالحاسوب مما أدى إلى تغيير أشكال الحياة وأنماطها، فقد كان لبرامج الحاسوب تأثيراً كبيراً على العمارة بعد الاستقادة منها في مجالات عديدة كان أبرزها تشكيل الهياكل الإنشائية (المنظومات التشغيلية)، والتي لم تعد تشكل عائقاً في عملية تصميم الأشكال المعقدة نظراً لاستخدام آليات التوليد الرقمية التي أسهمت في تشكيل بنية معمارية معاصرة ذات تشكيلات مركبة ومعقدة في الوقت نفسه. إذ تعتبر الخوارزميات واحدة من التقنيات التي يمكن من خلالها الوصول إلى أفضل الطرق لتصميم وإنشاء المباني، فاستخدام الخوارزميات في عملية تصميم المباني يسمح أيضاً بتحسين التصميم بهدف تحقيق أفضل أداء ممكن للمبنى وبأعلى درجة من الموثوقية وبأقل تكلفة، لذلك أصبح استخدامها ضرورة لعمارة أكثر تعقيداً وفعالية وكفاءة والمساعدة في إنشاء هياكل إنشائية فريدة تعمل على أعلى مستوى ممكن، فهي تعتبر هندسة القرن الحادي والعشرين والتي تراعي البيئة ومتطلبات عمارة المستقبل. وعليه فقد برزت أهمية البحث في صياغة إطار نظري متكامل يصف آليات حل المشكلة البحثية والمتمثلة في (عدم وجود تصور نظري يصف دور الخوارزميات على المستوى الإنشائي عند تكوين عمارة المستقبل).

2. الإطار المعرفي للخوارزميات

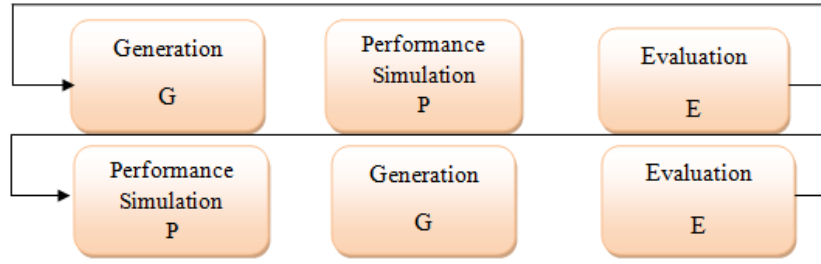
1.2. التعريف الاصطلاحي للخوارزميات

تعرف الخوارزميات بأنها عبارة عن أجزاء (إجراءات تتابعية) من خطوات ذات عدد معين وتكون مكتوبة بلغة ترميزية ثابتة ويتم التحكم بها من خلال مجموعة من التعليمات الدقيقة، وتكون حركة هذه الخطوات ثابتة بحيث لا يتطلب تنفيذها أي حدس أو رؤية فهي سوف تصل عاجلاً أم آجلاً إلى مرحلة تتوقف فيها عن العمل (Orabi, 2016, p.7). وتُعرف أيضاً بأنها عملية حسابية لمعالجة مشكلة محددة من خلال عدد من الخطوات، حيث تحاكي القدرة البشرية في تبسيط المشكلة وتقسيمها إلى عدد من الخطوات البسيطة والتي يمكن حسابها بسهولة. ويمكن بواسطتها إنشاء مختلف الأشكال وذلك عن طريق كتابة تلك الخطوات وترجمتها إلى لغة برمجية معينة مع مراعاة عدد من الخواص المهمة والتي تشمل على ما يلي: الخوارزميات هي مجموعة من التعليمات (Instructions)، أي تعتمد الخوارزميات على مجموعة محددة وواضحة من المدخلات (Inputs)، أو ما يدعى بـ (Formal Parameters)، وتولد الخوارزميات مخرجات (Outputs)، معرفة بصورة جيدة (Al-Shukri, 2020, p.70). نستنتج مما سبق، أنه يمكن تعريف الخوارزميات بأنها عبارة عن سلسلة من الإجراءات التي يمكن من خلالها تشكيل مختلف الأشكال الهندسية، وذلك من خلال أخذها لأي من حالات الإدخال الممكنة ومن ثم تحويلها إلى النتائج المطلوب.

2.2. مكونات الخوارزميات

التركيب الخوارزمي (يتضمن الفرز أو عرض التعليمات من خلال التسلسل العملياتي - والاختيار للمسار الأصح والتكرار المرحلي بشكل خطي، متدفق، عشوائي، تغذية استرجاعية)، هذا التكوين يسمح بحل المسائل الاندماجية والعديدية المعقدة وصولاً لأعداد وأشكال عشوائية قابلة للقياس الهندسي. وتتكون أي خوارزمية من ثلاثة تراكيب أساسية وتشتمل على ما يأتي:

- التسلسل (Sequence): تتكون الخوارزمية من مجموعة من العمليات المتسلسلة.
- الاختيار (Selection): عندما لا يتم حل المشكلات بتسلسل بسيط للتعليمات سوف تحتاج إلى إجراء اختبار لبعض الشروط وانتظار النتيجة فإذا كانت صحيحة سوف تتبع مسار يحتوي على تعليمات متسلسلة، أما إذا كانت خاطئة فستتبع مسار آخر وهذه العملية تسمى بالاختيار المفضل.
- التكرار (Repetition): يقصد به إعادة نفس تسلسل الخطوات ولعدد من المرات عند حل بعض المشاكل (Jawda, 2018, p. 240)، كما في الشكل (1).



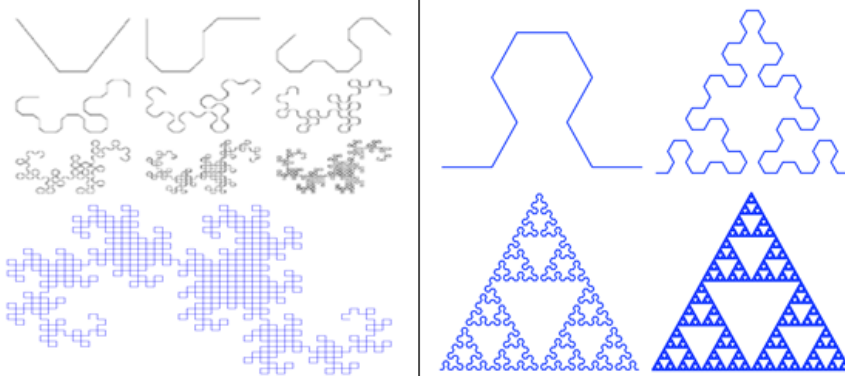
شكل (1): يوضح مخطط يوضح وظيفة الانظمة الخوارزمية عند التكرار المرحلي. المصدر: الباحثين.

3.2. التوليد الخوارزمي

لقد أدى استخدام البارامترات (والتي يمكن تعريفها بأنها عبارة عن قيم متغيرة بحدود تتوافق وظيفياً، ويتم انتخابها للتمرير داخل الدالة لأجل وصفها لاحقاً بالمخرجات) في عملية التصميم إلى ظهور مجموعة لا حصر لها من التصورات التوليدية للخوارزميات، حيث تعتبر العمارة الخوارزمية المرحلة الأكثر تقدماً في مجال الإبداع المعماري وبمساعدة الحاسوب (Marcos, 2010, p.81)، مما مكن المعماريين من تكوين تصاميم جديدة اعتماداً على الشفرات والخوارزميات التي تقود إلى أشكال جديدة. إذ تعتمد الخوارزميات على المعلومات (Parametric)، التي تقود إلى ظهور مستوى جديد من التصاميم غير القياسية والتي يمكن تحويلها لغرض تحقيق التفاعل والتكامل ما بين عملية التصميم وتصنيع العناصر المعمارية (Al-Saadi, 2021, p.9). وتستخدم البرمجة النصية لغرض معالجة اشكالية التصميم والبحث عن الحلول الممكنة حيث تقوم الخوارزميات بتوفير الأدوات التصميمية التي تساهم في توليد هياكل ذات تشكيلات جديدة وغريبة وغير مألوفة (Duna, 2012, p.61)، حيث تقوم بإنشاء البدائل/ النماذج (Function prototyping)، وتقييم النتائج ومن ثم اختيار الحلول الأكثر فاعلية وانسجام لأجل تطويرها بعد عملية المحاكاة كأداء تقليدي للحقيقة (Burry, 2011, p.92). وتعتبر الخوارزميات مهمة في عمارة المستقبل بسبب قدرتها على توفير حرية كبيرة للتلاعب بالأشكال لأنها ستمكن من تكوين عمارة ذاتية التغيير والتحسس وبمساعدة برامج الحاسوب (Al-Khafaji, 2015, p.140) وتتضمن أنظمة التوليد الخوارزمي التي يمكن استخدامها للتوليد الهيكلي ما يأتي:

1.3.2. نظام ليندنماير (L-systems)

يعرف مصطلح ليندنماير (L-systems)، الذي هو اختصار لـ (Linden Mayer System)، بأنه عبارة عن خوارزميات رياضية طورت لأول مرة من قبل عالم الأحياء (Lindenmayer)، (Ibrahim, 2014, p.12). إذ انشئت هذه النظم في البداية لدراسة نمذجة نمو النبات وقد استخدمت في البداية لدراسة نمو الفطريات وقدمت وصفاً شكلياً لتطور الكائنات البسيطة ثم تطورت فيما بعد واستخدمت في تشكيل العمارة المعاصرة (Sahib, 2020, p.70). وتعرف أيضاً بأنها أداة عامة لإنشاء الأجسام المعقدة وذلك من خلال البدء بجسم بسيط والعمل على استبدال الأجزاء بصورة تكرارية اعتماداً على مجموعة من القواعد (Al-Mukaram, 2008, p.101). وكذلك تعرف على أنها مجموعة من القواعد والرموز التي تمثل الخصائص المماثلة للقواعد النحوية، وتستخدم هذه الرموز لإنشاء سلاسل ومجموعة من قواعد الإنتاج التي توسع كل رمز إلى سلسلة أكبر من الرموز، وهي كذلك آلية ترجمة السلاسل المتولدة إلى هياكل هندسية، ويمكن استخدام هذه الآلية لتوليد الكسريات المتشابهة ذاتياً (Boudon et al, 2012, p.3).



شكل (2): يوضح نموذج نظام L-system الخطي. المصدر: (Jawda, 2018, p.247).

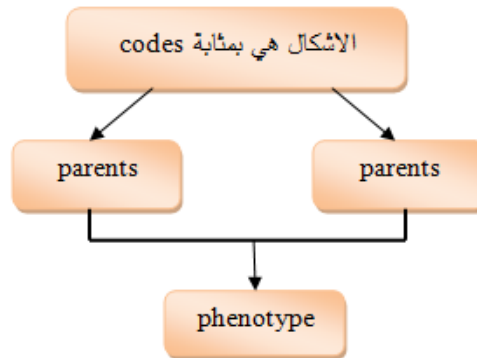
تقوم فكرة تكوين الهيكل في هذا النوع من خلال تقسيم الخط إلى ثلاثة أجزاء متساوية ثم تكوين مثلث متساوي الأضلاع على جزء منها بدون قاعدة ويتم تكرار العملية، يمكن تطبيق هذه القواعد على أشكال مختلفة حيث يمكن استخدام شكل المربع بدلاً من المثلث، ويتم برمجة الحاسوب لغرض إنتاج متوالية غير منتهية من الأفكار تعتمد على التقسيم بهذه الطريقة (Jawda, 2018, p.247)، كما في الشكل (2). نستنتج مما سبق أن نظام (L-system)، يستخدم في توليد الأشكال والهيكل الإنشائية المشتقة من الطبيعة والتي تتميز بالدينامية وبكونها متناغمة مع البيئة، من خلال استخدام آليات مثل الاستبدال الجزئي، والتكرار بمختلف أنواعه (الخطي، الشعاعي، الاتجاهي، المتشعب، وغيرها)، مما يقود إلى تحقيق التكامل ما بين الهيكل الإنشائي والشكل المعماري وإنتاج أشكال معمارية ذات سمات مميزة وغير منتهية.

2.3.2. الخوارزميات الجينية

يُرمز لها بـ (GA) وهو اختصار (Genetic algorithms)، وتُعرف بأنها تقنية حسابية تعتمد على مبدأ التطور وهي حقل مستوحى من العمليات التطورية في الطبيعة. حيث ظهر هذا المفهوم في عام (1960) من قبل العالم (John Holland)، لتقدم الخوارزميات الجينية حلاً فعالاً لمشاكل التحسين وتقديم مجموعة من الحلول الممكنة (Chiu, 2015, p.3). تهدف هذه التقنية لدراسة ظاهرة التكيف في الطبيعة ووضع الطرق التي تمكن من استيرادها في أنظمة الحاسوب، حيث تُستخدم لغرض تطوير الهياكل الإنشائية وتقليل الوزن الإجمالي لها بالإضافة إلى الكلفة المادية، إذ بات استخدامها متزايداً باعتبارها واحدة من تقنيات التحسين وخاصةً بالنسبة للهياكل الكبيرة والمشاريع الضخمة التي تتطلب الآلاف من العناصر (Ibrahim, 2014, p.13). تقوم هذه التقنية بتحويل الأشكال الهندسية إلى رموز codes للحصول على أشكال أصلية تعتبر بمثابة النموذج الأصلي وعند إجراء عملية المزج بين هذه الأشكال ليتم الحصول على أشكال جديدة كما يحدث في الهندسة الوراثية (Imam et al, 2018, p.4)، كما في شكل (3).

تعمل هذه التقنية بطريقتين مختلفتين؛ الأولى منهما تستخدم كأدوات تحسين أو كأدوات إنشاء لغرض الوصول لأفضل تكاملية في التصميم، وتتم هذه العملية من خلال قراءة الأشكال على هيئة مدخلات لمجموعة من المشاكل ثم العمل على إيجاد الحلول لها، مما يؤدي إلى تحقيق أفضل أداء للمبنى، وأعلى درجة من الموثوقية، وذلك باستخدام برامج الحاسوب لاختيار الحلول المثلى لأداء المبنى مثل؛ الصوتيات، والهيكل الإنشائي، والإضاءة، والطاقة (Fasoulaki, 2007, p.4).

نستنتج مما سبق، أن الخوارزميات الجينية لها دور مهم في تشكيل بنية العمارة وذلك من خلال تقديمها أفضل الحلول لتصميم المنشأ، وأقصى تحميل ممكن، وأدنى حد من المواد المستخدمة في المنشأ. حيث ساهم توظيف الخوارزميات الجينية في التصميم في إكساب المنشأ صفات عديدة مثل؛ التكيف، والمرونة، والدينامية، لكونها تتجه لدراسة الأشكال في الطبيعة وتحليلها ومعالجتها بصورة رقمية لغرض الحصول على تشكيلات جديدة وغير مألوفة. من خلال اعتماد النظام على اليات عديدة مثل (التشفير، الانتساخ Transcription، التجميع الجزئي، المزج التوافقي، وغيرها).



شكل (3): يوضح مخطط لطريقة التعامل مع الأشكال في الخوارزميات الجينية. المصدر: الباحثين.

3.3.2. آلية الذكاء السربي (Swarm Intelligence)

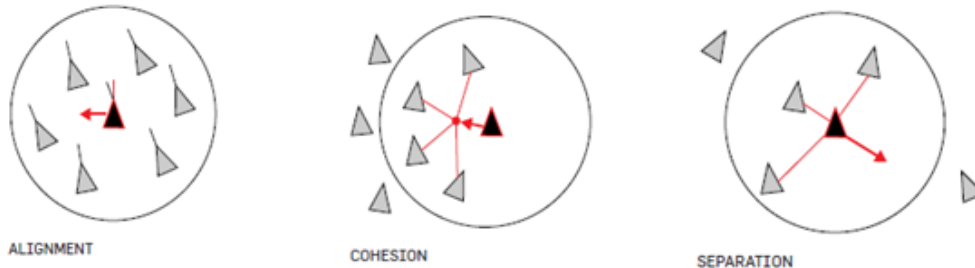
يرمز له بـ (SI) ويعرف بأنه السلوك الجماعي للأنظمة اللامركزية ذاتية التنظيم سواء كانت طبيعية أو اصطناعية، ويتم استخدام المفهوم في العمل على الذكاء الاصطناعي، وقد تم التعبير عنه بواسطة الأنظمة الروبوتية الخلوية حيث تتكون أنظمة (SI)، عادةً من

مجموعة من العوامل البسيطة أو مراوح تتفاعل بعضها مع البعض ومع بيئتها وغالباً ما يأتي الإلهام من الطبيعة وخاصة الأنظمة البيولوجية. وتشمل الأمثلة في الأنظمة الطبيعية لنظام السرب مستعمرات النمل، وحشود الطيور، ومستعمرات النحل، والنمو البكتيري، من نماذج الطبيعة (Chen, 2015, p.9)، لاحظ شكل (4). ويمكن تعريفه أيضاً بأنه إنتاج سلوك جمعي ذكي عن أنظمة فرعية محددة المهام وذاتية التنظيم بما يقود الى تفاعلات عشوائية مبدعة ناجمة عن اشتراك محلي لأنظمة غير ذكية. وتستخدم هذه الآلية لغرض التغلب على المشاكل المعمارية المعقدة، ولإنتاج الأفكار أي يمكن أن تكون مصدراً للإلهام لإنتاج الأشكال الجديدة، وأيضاً يمكن استخدامها لتمثيل ديناميات الفراغات والكتل المعمارية ويمكن ربطها مع تقنيات التصنيع الجديدة التي تترجم النماذج الافتراضية بهيئة مادية (Al-Shukri, 2020, p.82). ويمكن السبب وراء استخدام نظام السرب في تشكيل بنية العمارة لخلق هياكل معمارية تمتاز بالبساطة الميكانيكية والتعقيد الظاهري، حيث يشترك نظام السرب مع الأنظمة الخلوية ببعض أوجه التشابه مثل (كونها أنظمة متوازنة، تتفاعل على المستوى الموضعي) وذات سمات عديدة (التفرد، البساطة، التنظيم الذاتي). ويتم تشكيل الهيكل الإنشائي بواسطة نظام السرب من خلال استخدام مجموعة من الآليات، وتشتمل على ما يلي: آلية الانفصال: ويقصد به أن أي عنصر في السرب له القدرة على المحافظة على مسافة انفصال معينة مع الآخرين ويمنع هذا السلوك العناصر من الاكتظاظ ويوفر مساحة أكبر. أما الآلية الثانية فهي آلية التماسك: ويقصد به أن كل عنصر يتجمع ويتماسك مع العناصر الأخرى. وأخيراً الآلية الثالثة التي هي آلية المحاذاة: ويقصد بها أن كل عنصر يكون محاذياً للعناصر الأخرى وإن اتجاه المحاذاة يطبق لمعرفة مواضع العناصر بالنسبة لمجاوراتها (Sahib, 2020, p.69)، لاحظ شكل (5). يتم التعامل مع الهيكل في نظام السرب بطريقتين، إما ان يتعامل معه كإطار مع غلاف غشائي، أو بشكل ألواح مرتبطة بعضها مع البعض (أي أن حركة النقاط هي التي تقوم بتحديد شكل الهيكل والتي تكون بثلاثة محاور، حي يكون نوع الحركة إما دوران أو امتداد أو توسع) وبعد ذلك يتم ترجمة هذه المحاكاة في السرب في حقل العمارة إلى هياكل وأشكال بالاعتماد على الارتباط والتماسك الذي يمكن الوحدات البسيطة من إنشاء وتكوين هياكل هندسية متنوعة (Chen, 2015, p.44).

نستنتج مما سبق، أن آلية ذكاء السرب هي واحدة من الخوارزميات التي يمكن استخدامها لتكوين الهيكل الإنشائي في العمارة من خلال محاكاة نظام الأسراب الموجودة في الطبيعة، وذلك بالاعتماد على آليات الانفصال والتماسك المحاذاة. إذ تتم عملية المحاكاة لنظام السرب في الطبيعة من خلال استخدام البرامج الرقمية واعتماد مبدأ تكرار العناصر الإنشائية، ويتميز الهيكل الإنشائي الناتج بهذه الطريقة بالتعقيد ظاهرياً والبساطة ميكانيكياً بالإضافة إلى خاصية التنظيم الذاتي (Self-organization) للأجزاء.



شكل (4): يوضح نماذج لنظام السرب في الطبيعة. المصدر: (Chen, 2015, p.5).



شكل (5): يوضح محاكاة أسراب الطبيعة بواسطة آليات الانفصال والتماسك والمحاذاة. المصدر: (Chen, 2015, p.6).

3. استخلاص الإطار النظري

1.3. نقد الدراسات السابقة

ولأجل استخلاص مفردات الإطار سيتم نقد عدد من الدراسات المعمارية السابقة النظرية المتعلقة بدور الخوارزميات في تشكيل بنية عمارة المستقبل وتحليل أهم جوانبها.

1.1.3. دراسة (Kostas Terzidis, 2011)

تطرقت الدراسة إلى عملية تكوين الأشكال المعمارية باستخدام التصميم الخوارزمي (Algorithm Design)، الذي يعتمد على لغات البرمجة لغرض تصميم برامج حسابية لها القدرة على توليد الأشكال والهياكل والفضاءات (مستويات التطبيق اللوغاريتمي)، بالاعتماد على عدد من القواعد في البرامج المعمارية مما يتيح للمصمم تجاوز القيود المفروضة من قبل مصنعي البرامج واستخدام الحاسوب بطريقة إبداعية (بمعنى هندسة البرمجة بما يخدم الفكر المعماري). وبينت لدراسة العمليات الخوارزمية التي يمكن استخدامها من قبل المصمم والتي تشمل على؛ قواعد الشكل (قواعد التشكيل النحوي عند الترجمة - Shape Grammars)، والنماذج الرياضية (Mathematical Models)، والخصائص الطوبولوجية (Topological Properties)، والانظمة الجينية (Genetic Systems)، حيث تُستخدم لتوليد الأشكال غير المألوفة والهياكل الخوارزمية المتفرقة (Unique)، من خلال محاكاة الانظمة الجينية عند التشكيل، الخصائص الطوبولوجية عن طريق تقليد الاداء الحقيقي للأنظمة الطبيعية او الاصطناعية. نستنتج مما سبق، ان الحاسوب يمثل الاداة التي يمكن من خلالها تحقيق عملية التكامل في التصميم المعماري وذلك باستخدام العمليات الخوارزمية، حيث يُمكن الحاسوب المصمم اكتشاف الخصائص والسلوكيات غير المألوفة وتحقيق هياكل إبداعية.

2.1.3. دراسة (Pek GÜRSEL DİNO, 2012)

ناقشت الدراسة أنظمة التصميم البارامترية كأداة تستخدم في التشكيل المعماري حيث تعتمد الادوات البارامترية على الخوارزميات مما يوفر تحكماً حسابياً متزايداً (متدفق/ تكرار مرحلي) في عملية التصميم، وتمتاز هذه الانظمة بقدرتها على التكيف والاستجابة لمختلف متطلبات التصميم المتغيرة. وتعتبر الخوارزميات امتداداً للداغ البشري (Tool Box) حيث يمكن لها إنشاء كيانات ومعالجتها حسابياً مثل الشكل الهندسي ومتغيرات التصميم والهياكل المعمارية. إذ يسمح هذا المستوى من التحكم في بيئة النمذجة ثلاثية الابعاد للمصممين بالاستجابة بشكل مناسب حيث تتعامل الخوارزمية بفعالية مع التعقيدات التصميمية والتي تتجاوز الشكل وترجمتها إلى هياكل معمارية ذات أشكال مبدعة. وطرحت الدراسة عدداً من الأمثلة لاستخدام النهج الخوارزمي في عملية توليد الهياكل لكون العلاقات التكنونية هي الأساس في عملية التصميم التطوري للهياكل المعمارية.

نستنتج مما سبق، ان النمذجة البارامترية تعتبر واحدة من الأدوات التوليدية للهياكل الإنشائية وذلك بالاعتماد على مجموعة من الخوارزميات، حيث تتمتاز الأنظمة البارامترية بقدرتها على التكيف والاستجابة مع كل من المحفزات الداخلية والخارجية مما يولد مجموعة متميزة من الهياكل ذات الأدائية العالية والأشكال المتفرقة.

3.1.3. دراسة (K.A. Liapi, 2013)

تطرقت الدراسة إلى موضوع الهياكل الشدية في العمارة وتوضيح أبرز مميزاتها ومكوناتها، حيث تتألف هذه النظم من الأوتار (Beams) والدعامات. وقد تم وصف وتحليل عدد من النماذج المادية لهذه الهياكل. ووضحت الدراسة دور التقنيات الرقمية الحديثة في توليد هذه الهياكل عندما بينت إمكانية تطوير وصف حسابي خوارزمي لتشكيل الهياكل الشدية وذلك بالاعتماد على عدد من المعلمات (Parameters)، التي تشمل على؛ حجم الوحدة للهيك، والنسب، وحجم الهيك، وإنحاء الهيك، وعدد الوحدات. وأشارت الدراسة إلى دور هذه النظم في التعبير عن الشكل المعماري من خلال طرحها مثال لهيك شدي يتألف من عدد من الوحدات الإنشادية وعدت تغيير اتجاه عناصر الضغط (الدعامات) سوف تتكون وحدة هيكلية جديدة متفرقة وغير مألوفة. وقد ساهمت عملية التصميم البارامترية في تسهيل عملية استكشاف الشكل المعماري حيث يُمكن من خلالها التحكم وتعديل التعبير التكنوني بشكل كامل.

نستنتج مما سبق، أن التصميم الخوارزمي ومن خلال مجموعة من المعلومات (كحجم الوحدات، ونسبها، وحجم الهيكل نفسه، وعدد الوحدات المكونة له من المعلومات)، يُمكن المماريين من توليد واستكشاف التشكيلات الجديدة في الهياكل الشدية والحصول على هياكل إنشائية فريدة ومتميزة وذات رمزية عالية.

4.1.3. دراسة (Pietroni et. Al, 2014)

بحثت الدراسة في تصميم وتوليد الهياكل القشرية الشبكية وذلك باستخدام الخوارزميات الرياضية مما يساهم في خلق هياكل مبتكرة وممتعة من الناحية الجمالية والوظيفية كالملاعب، واقترحت استخدام نظام (Voronoi)، والذي يقصد به استخدام اللوغاريتمات عند التشكيل بمساعدة أجهزة الحاسوب والمعلومات ويمكن ملاحظة هذا النظام في الطبيعة مثل تكوين الهيكل العظمي للعظام والاسفنج. وبينت الدراسة ان (Voronoi): هو أحد تطبيقات الهندسة الرياضية الحاسوبية حيث تُستخدم اللوغاريتمات لحل وتفسير المشاكل وطرق التشكيل من خلال استخدام برامج الحاسوب والمعلومات. وتم إجراء تجربة لتوليد الهيكل بالاعتماد على الإجهاد ويكون الشكل متباين الخواص، وبعد ذلك تم إجراء اختبارات فيزيائية للهيكل المتولد من خلال عملية المحاكاة للتحقق من سلامة الهيكل. نستنتج مما سبق، أن الخوارزميات تعتبر من الطرق الحديثة التي تستخدم لتوليد الهياكل المعمارية وذلك باستخدام نظام (Voronoi)، الذي يعتمد اللوغاريتمات والمعلومات في توليد البنية المعمارية من خلال قدرتها على حل المشاكل وتحليلها والتعامل مع تعقيدات طرق التشكيل مما يؤدي إلى تحقيق هياكل إنشائية ذات تكوينات مميزة.

5.1.3. دراسة (Esther Rivas Adrover, 2015)

تطرقَت الدراسة إلى موضوع توليد الهياكل القابلة للتعديل أو الهياكل المتحركة باستخدام الخوارزميات التوليدية المختلفة والاستفادة منها في تطوير الأنظمة الهيكلية، وعن طريق المحاكاة للنظم الحية الموجودة في الطبيعة لتوليد مجموعة من الهياكل المستجيبة (المتحسنة للمتغيرات / المرونة والتكيف). فقد ساهمت الطبيعة ومنذ القدم في تطوير العديد من الأنظمة الهيكلية ولاسيما الأنظمة القابلة للتعديل أو الأنظمة الهيكلية المتحركة، مثال على ذلك القنب الجيوديسية والهياكل الإنشائية التي تتضح فيها عملية مشابهة لعملية تنظيم جزيئات الماء في الطبيعة، ويمكن نقل هذه الهياكل من الطبيعة إلى العمارة من خلال البرامج والتقنيات التوليدية والقيام بالمحاكاة الحيوية للتشكل والحركة في الحيوانات والنباتات أو الاستلهام من فن الأوريغامي. نستنتج مما سبق، أن التكامل ما بين الخوارزميات التوليدية ومبادئ الطبيعة يساهم في توليد هياكل إنشائية مستجيبة متحركة وقابلة للتعديل مما يساهم في تطوير الأنظمة الهيكلية.

6.1.3. دراسة (Nadin-Al-Bqour, 2020)

تناولت الدراسة مفهوم التصميم البارامترى للهياكل الإنشائية في العمارة المعاصرة وتطرقَت إلى دور الحاسوب وأهميته في التصميم المعماري، حيث تعتمد أنظمة التصميم البارامترى بشكل أساسي على الخوارزميات في عملية التوليد كونها تعتمد على إنشاء هياكل معمارية وتعديلها رياضياً باعتماد عدد من المعلومات والتعامل بفعالية مع تعقيدات التصميم التي تتجاوز الشكل بدقة كبيرة وتحويلها إلى خصائص معمارية تمثلها الهياكل البارامترية، مما يساهم في إكمال قدرات المصمم والحصول على هياكل ذات تشكيلات فريدة وغير مألوفة لكونها تعتمد على محاكاة الأشكال في الطبيعة. ومن المتوقع أن يتطور مستقبل الهياكل البارامترية بتطور أنظمة التصميم البارامترية عندما يتمكن المصممين من السيطرة على هذه الإستراتيجيات الحسابية الجديدة ودمجها بشكل فعال في عملية التصميم. نستنتج مما سبق، أن الخوارزميات هي الأساس الذي يقوم عليه التصميم البارامترى للهياكل الإنشائية مما يؤدي إلى خلق هياكل معمارية ذات أشكال مبتكرة ومتنوعة، لأنه يعتمد على الأشكال الحية ذات التشكيلات الهندسية التي تجذب الانتباه بدلاً من استخدام الأشكال الكلاسيكية.

2.3. بناء الإطار النظري لدور الخوارزميات في تكوين الهيكل الإنشائي لعمارة المستقبل

من خلال نقد وتحليل الدراسات السابقة تم استخلاص الإطار النظري لدور الخوارزميات في تشكيل هيكل عمارة المستقبل والتي اشتمل على أربع مفردات رئيسية، وكما موضحة في الجدول (1) ادناه:

جدول (1) يوضح مفردات الإطار لدور الخوارزميات في تشكيل بنية عمارة المستقبل. المصدر: الباحثين.

المفردة الرئيسية		المفردة الثانوية	القيم الممكنة
المفردة الأولى	استخدام المعلومات وعناصر النظام	حجم وحدة الهيكل	تكمال التصميم والتصنيع
	العمليات الخوارزمية	النسب	قواعد الشكل (التشكيل)
	النمذجة البارامترية	حجم الهيكل وانحناءه	النماذج الرياضية
المفردة الثانية	التعامل مع المجسمات وفهم الأنظمة البنائية المعقدة	عدد الوحدات	النظم الجينية
	أدواته	تتعتمد على	برامج الحاسوب
	Voronoi خوارزمية	امكانية تعديل الهياكل رياضياً من خلال البارامترات	المعادلات الرياضية والخوارزميات
المفردة الثالثة	خصائص إنشائية	تكمال الشكل والهيكل	استخدام أقل للمواد والطاقة
	خصائص وظيفية	خفيفة الوزن	الأداء العالي، الدقة، الموثوقية
	خصائص جمالية	تحسين مؤشر الصلابة الهيكلية	هياكل مرنة ودينامية
المفردة الرابعة	خصائص اقتصادية	تقليل تكاليف البناء	تقليل استهلاك الطاقة
	الهياكل الإنشائية	مكوناتها	كابلات
	الهياكل المتحركة أو القابلة للتحويل	التحكم بالتكوين الشكلي	دعامات
المفردة الخامسة	أنواع الهياكل الناتجة	آليات التكوين	تغيير اتجاه عناصر الضغط (الدعامات)
	هياكل قشرية شبكية	تحقيق التكمال ما بين العمارة والطبيعة	فن الاوريجامي
	الهياكل الكسرية	آلية توليد الهيكل	المحاكاة الحيوية
المفردة السادسة	الهياكل الكسرية	آلية توليد الهيكل	إنشاء انقسامات من الأشكال الأصغر حجماً
	الهياكل الكسرية	آلية توليد الهيكل	تكرار العملية مع تغيير المقياس
	الهياكل الكسرية	آلية توليد الهيكل	شبكات ذات كثافة متغيرة

المفردة الرابعة	أهداف الخوارزميات	إنشاء مباني فعالة	مستدامة
			متكيفة مع الظروف البيئية
			هياكل ثابتة الأجزاء
			هياكل متحركة الأجزاء
			مرحلة الفكرة التصميمية
المفردة الخامسة	مستويات التطبيق الخوارزمي	على مستوى الجزء	مرحلة إنشاء النموذج
			مرحلة التصميم الهيكلي الإنشائي
			على مستوى الهيكل
			على مستوى عناصر محددة
			على مستوى الفراغات
		على مستوى الكل	على مستوى السطوح
			على مستوى المبنى بأكمله

4. التطبيق العملي

سيتم في هذه الفقرة التطرق إلى مثال معماري مصمم باستخدام آلية خوارزمية معينة، ليتم فيما بعد تحليلها وفقاً للمفردات المنتخبة (آليات توليد الهيكل خوارزمية، خصائص الهيكل الناتج خوارزمية، أنواع الهياكل الناتجة، أهداف الخوارزميات)؛ إذ يكمن السبب الرئيسي في اختيار هذا المشروع كونه يعتبر نموذج لعامة المستقبل التي شكلت بُنيته بواسطة الخوارزميات.

1.4. مشروع متحف المستقبل (Museum of the Future, 2021)

• نبذة عن المشروع

هو صرح معماري في مدينة دبي صمم من قبل المعماري (Shaun Killa)، ذو دلالات رمزية وقنية تعبر عن المستقبل حيث يمتد المبنى على مساحة (615 م²) وينقسم إلى ثلاثة أقسام رئيسية، حيث تتناول دور الروبوتات والذكاء الاصطناعي في تحسين القدرات البدنية والذهنية للإنسان، والعلاقة ما بين الإنسان والروبوتات، وكذلك كيفية تأثير تطور تقنيات الذكاء على عمليات اتخاذ القرار، ويمثل المبنى قطعة إماراتية تعبر عن مستقبل هندسة البناء (Chilton, 2022). ويهدف المتحف إلى أن يكون حافظاً للمفاهيم والأفكار الرائدة وإلهام أولئك الذين يرون ويزورون المبنى للابتكار والإبداع والاستكشاف (Ravenscroft, 2021). وسوف يكون متحف المستقبل الذي يبلغ ارتفاع 78م معرضاً للابتكار والتكنولوجية، لذا فإن شكله المستقبلي مناسب. كان الإلهام الأولي للمبنى هو إنشاء نموذج يمثل رؤية العميل للمستقبل، ويوضح (Killa)، أن المبنى المادي يمثل فهمنا للمستقبل كما نعرفه اليوم وعلى مدى السنوات الخمس إلى العشر القادمة، بينما في نفس الوقت يمثل الفراغ الموجود في وسط المبنى كل شيء غير معروف حتى الآن (المستقبل) (Galetti, 2019).

• فكرة تكوين المتحف

يتكون المتحف من ثلاثة عناصر رئيسية:

- التل الأخضر: يمثل الأرض والصلابة والجذور في الزمان والمكان والتاريخ ويتحقق ذلك من خلال التحولات السلسة من الموقع على شكل تل ترابي ونباتي.
- المبنى: يمثل الإنسانية بقوتها وقدرتها على تحقيق الإبداع.
- الفضاء: يمثل الفراغ الموجود في الهيكل العلوي الابتكار، ويتحقق ذلك من خلال مساحة فارغة تدل على المستقبل، كما في الشكل (6).



شكل (6): يوضح تخطيط الفكرة الأولية لمشروع متحف المستقبل ومقطع طولي في المتحف. المصدر: (Vijayan, 2021).

• وصف الهيكل الإنشائي للمتحف

التكنولوجيا هنا هي المحرك الحقيقي للمشروع، ولم يكن التصميم ممكناً إلا بمساعدة وتبني تقنيات جديدة ومتطورة حيث يمتاز المتحف بهيكل فريد ومنحني يتكون من آلاف القطع المثلثية المتشابكة، فبسبب تعقيده وشكله غير العادي تم اختيار الإطار الفولاذي بدلاً عن القشرة الخرسانية أو الفولاذية للخرسانة (Vijayan, 2021). لذلك كان لابد من إنشاء الشكل العام للمتحف بيئة رقمية، فبدأ (Buro Happold)، منفذ المشروع بضبط شكل المنحنيات المعقدة للمبنى، بعد ذلك تم تصميم الهيكل الفولاذي حيث استخدم التصميم البارامتري (وهي عملية مبنية على التفكير الخوارزمي وتسمح بمعالجة متغيرات محددة)، وكذلك تم الاستعانة بنمذجة معلومات (BIM)، وخوارزمية نصية حسابية متقدمة (خوارزمية النمو) للوصول إلى الترتيب الأكثر ملائمة للهيكل، ولحساب متطلبات إنجاز الهيكل الداخلي، ويتكون الهيكل الإطاري للمتحف من (2400 قطعة) من الفولاذ المتقاطع قطرياً، وآلاف القطع المثلثية التي تعزز متانة الهيكل الخارجي (Chilton, 2022)، كما في الشكل (7).

وقد سمحت الجوانب البارامتريّة بإنشاء روابط ديناميكية بين المعلومات، مما يتيح التعديل في الوقت الفعلي والمستمر للتصميم من خلال إدخال الأحمال والأوزان للهيكل وعدد وحجم وحدات الهيكل وانحناءاته، ونتيجة لهذه النمذجة الحاسوبية الدقيقة أمكن تصميم جميع المقاطع الفولاذية بنفس القطر تماماً، هذا القطر الموحد جعل البناء أسرع وأبسط بشكل ملحوظ فبمجرد بناء الشعاع الدائري الخرساني المسلح تم الانتهاء من الأعمال الفولاذية في غضون (14 شهر) فقط. تم استخدام الخوارزمية أيضاً لتحديد موضع النصوص وحجمها النهائيين وأيضاً لإيجاد التوازن الأمثل للضوء الطبيعي الذي يخترق المتحف (Writer, 2019). وقد أتاح التصميم البارامتري لهيكل المتحف خفة الوزن والتي كانت أمراً ضرورياً والأدائية العالية للهيكل من خلال اختبار الهيكل ببراكج النمذجة الثلاثية الأبعاد، ولهذا السبب تم بناء (11000 م²)، من الأرضيات المنتشرة في جميع أنحاء المتحف كأرضيات مركبة من قبل شرك (Tate Steel Comflor)، (Castroparedes, 2019). إذ يسمح استخدام الأرضيات المصنوعة من الصلب بالتركيب السريع مع تقليل التأثير على أساسات المبنى، ويتميز هيكل المبنى بكونه غير تقليدي وفريد ومبتكر وبمظهر مذهل وغير مألوف للغاية مما يجعله يتميز بقوة عن البناء المحيط. فينفرد هيكل المتحف بانسيابية كاملة تندمج فيها الوحدات الزجاجية، وأنظمة العزل الحراري والهوائي والمائي والهيكل المعدني وكأنها كتلة واحدة متجانسة (Barandy, 2022). وتكون واجهة المتحف عبارة عن تجميع سلس تماماً وخالي من المفاصل حيث تتألف من (890 لوحاً)، فريداً من الفولاذ المقاوم للصدأ والألياف الزجاجية مصنعة باستخدام طرق مستعارة من صناعة الطيران. تحقق بنية المتحف التكامل بين العمارة والطبيعة من خلال المحاكاة الحيوية للهيكل حيث استوحى شكله من محاكاة العين البشرية، فيكون عنصر التضاد في أفق دبي المليء بناطحات السحاب، فالمتحف على شكل دائري ديناميكي (بيضاوي فضي لامع يرمز إلى الماضي والحاضر والمستقبل) مع مركز مفتوح فيبدو وكأنه يراقب هذه المدينة المتنامية ويتطلع إلى المستقبل (Vijayan, 2021).

• ميزات المبنى

المتحف فعال وقابل للتكيف مع الظروف البيئية لأنه مزود بالعديد من التقنيات المستدامة كاستخدام الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء، وتقليل استخدام الطاقة والمياه، ويعد المبنى بدون انبعاثات كربونية لاستخدام الطاقة المتجددة، و يعتبر هيكل معقد بأجزاء ثابتة. حصل المبنى على تصنيف LEED Platinum كونه يستمد طاقته من محطة للطاقة الشمسية، وكما أنه سيوفر مرافق لشحن السيارات الكهربائية، مما سيؤدي إلى توفير الطاقة (Galetti, 2019).



الهيكل الإنشائي للمتحف يتكون من جميع آلاف القطع المثلثة الشكل والتي تكون مقطوعة قطرياً، وتكون مادة هذه القطع هي الفولاذ المقاوم للصدأ.



منظور لمشروع متحف المستقبل قيد الإنشاء حيث وتوضح فكرة المصمم في خلق مبنى يراقب المدينة وتم تحقيق ذلك من خلال اللجوء إلى المحاكاة البيولوجية حيث تم الاستلهام من العين البشرية

شكل (7): يوضح المنظور الخارجي لمتحف المستقبل وهو قيد الإنشاء وتفاصيل القطع الفولاذية المثلثة المستخدمة في تشكيل الهيكل الإنشائي للمتحف وطريقة الرابط القطري بين القطع. المصدر: (Writer, 2019).

2.4. تحديد أسلوب التحليل والقياس

اعتمد البحث المنهج الوصفي التحليلي في التعامل مع المشاريع المنتخبة لاستكشاف تطبيق المؤشرات وذلك من خلال المعلومات المتوفرة عنه أو من خلال ملاحظة المخططات الواردة مع المشروع، وتم وضع استمارة التحليل لقيم تحقق المتغيرات حيث تم اعطاء القيمة (1) للقيم المتحققة و(0) للقيم غير المتحققة وذلك بالاستناد على المعلومات المستخلصة من المشروع المنتخب للدراسة العملية، وكما موضح في الجدول (2) ادناه.

جدول (2): استمارة التحليل لقيم تحقق المتغيرات لمشروع متحف المستقبل في دبي حيث يمثل (1) تحقق القيمة و(0) عدم تحقق القيمة. المصدر: الباحثين.

المفردة الرئيسية	المفردة الثانوية	القيم الممكنة		الرمز	تحقق القيمة	نسبة المفردة الرئيسية	
%50	استخدام المعلمات parameters وعناصر النظام (X1)	حجم وحدة الهيكل		X1-1	1		
		النسب		X1-2	0		
		حجم الهيكل وانحناء		X1-3	1		
		عدد الوحدات		X1-4	1		
		مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية %75					
	العمليات الخوارزمية (X2)	قواعد الشكل		X2-1	0		
		النماذج الرياضية		X2-2	1		
		محاكاة التشكيل وفق الخصائص الطبولوجية		X2-3	0		
		النظم الجينية		X2-4	0		
		مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية %25					
	النمذجة البارامترية (X3)	تعتمد على	برامج الحاسوب		X3-1	1	
			المعادلات الرياضية والخوارزميات		X3-2	1	
		إمكانية تعديل الهياكل رياضياً من خلال البارامترات		X3-3	1		
		التعامل مع المجسمات وفهم الأنظمة البنائية المعقدة		X3-4	1		
		أدواته		X3-5	1		
	مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية %100						
	خوارزمية voronoi (X4)	أدواته	اللوغاريتمات		X4-1	0	
			المعلمات		X4-2	0	
		تكامل الشكل والهيكل		X4-3	0		
		إستخدام أقل للمواد والطاقة		X4-4	0		
		مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية %0					
%62.5		خفيفة الوزن	Y1-1	Y1	1		

	1		Y1-2	الأداء العالي، الدقة، الموثوقية		خصائص إنشائية (Y1)	خصائص وسمات الهيكل الناتج خوارزمياً (Y)
	1		Y1-3	تحسين مؤشر الصلابة الهيكلية			
	%100			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية			
	0	Y2	Y2-1	التكيف والاستجابة مع كل من المحفزات الداخلية والخارجية	التكيف والإستجابة	خصائص وظيفية (Y2)	
	0		Y2-2	هياكل مرنة ودينامية			
	%0			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية			
	1	Y3	Y3-1	الاعتماد على الأشكال الحية ذات التشكيلات الهندسية التي تجذب الانتباه بدلاً من الأشكال الكلاسيكية	هياكل إبداعية وغير تقليدية	خصائص جمالية (Y3)	
	1		Y3-2		هياكل غير مألوفة ومبتكرة		
	1		Y3-3		التكامل ما بين الهيكل والشكل		
	1		Y3-4		هياكل متناغمة مع الطبيعة		
	%100			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية			
	0	Y4	Y4-1	تقليل تكاليف البناء		خصائص اقتصادية (Y4)	
	1		Y4-2	تقليل استهلاك الطاقة			
	%50			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية			

%33.3	0	Z1	Z1-1	كابلات	مكوناتها	الهياكل الإنشادية (Z1)	أنواع الهياكل الناتجة (Z)	
	0		Z1-2	دعامات				
	0		Z1-3	تغيير اتجاه عناصر الضغط				التحكم بالتكوين الشكلي
	%0			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية				
	0	Z2	Z2-1	محاكاة النظم والأشكال الحية	مصدرها	الهياكل المتحركة أو القابلة للتحول (Z2)		
	0		Z2-2	فن الأوريغامي	آليات التكوين التقنيات التوليدية			
	0		Z2-3	المحاكاة الحيوية				
	0		Z2-4	أشكال ذات تعبيرات حقيقة	تحقيق التكامل ما بين العمارة والطبيعة			
	%0			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية				
	1	Z3	Z3-1	شبكة ذات كثافة متغيرة	خوارزمية voronoi	آلية التكوين		هياكل شبكية قشرية (Z3)
	1		Z3-2	الشكل متباين الخواص				
	%100			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية				
	0	Z4	Z4-1	توليد شكل متكرر من بُنية واحدة		آلية التكوين		الهياكل الكسرية (Z4)
	0		Z4-2	إنشاء انقسامات من الأشكال الأصغر حجماً				
	0		Z4-3	تكرار العملية مع تغيير المقياس				
	%0			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية				

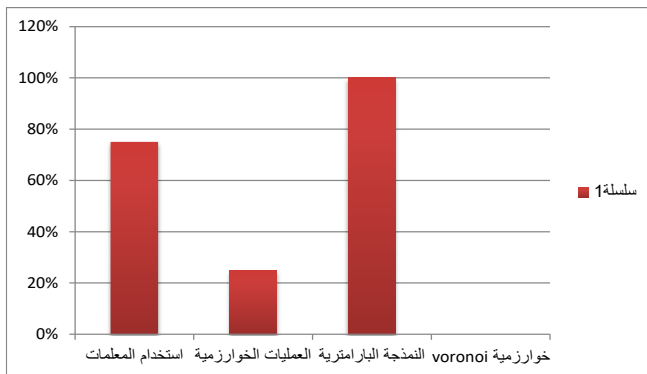
%55.5	1	L1	L1-1	مستدامة		إنشاء مباني فعالة (L1)	أهداف الخوارزميات (L)
	0		L1-2	متكيفة مع الظروف البيئية			
	%50			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية			
	1	L2	L2-1	هياكل ثابتة الأجزاء		تسهيل عملية إنتاج الهياكل المعقدة (L2)	
	0		L2-2	هياكل متحركة الأجزاء			
	%50			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية			
	0	L3	L3-1	مرحلة الفكرة التصميمية		تصنيع المشروع في مراحل مختلفة (L3)	
	1		L3-2	مرحلة إنشاء النموذج			
	1		L3-3	مرحلة التصميم الهيكلي الإنشائي			

		%66.6		مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية			
%87.5	1	M1	M1-1	على مستوى الهيكل		على مستوى الجزء (M1)	مستويات التطبيق الخوارزمي
	0		M1-2	على مستوى عناصر محددة			
	1		M1-3	على مستوى الفراغات			
	1		M1-4	على مستوى السطوح			
	%75			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية			
	1	M2	M2-1	على مستوى المبنى بأكمله		على مستوى الكل (M2)	
	%100			مجموع نسب تحقق المفردة الثانوية			

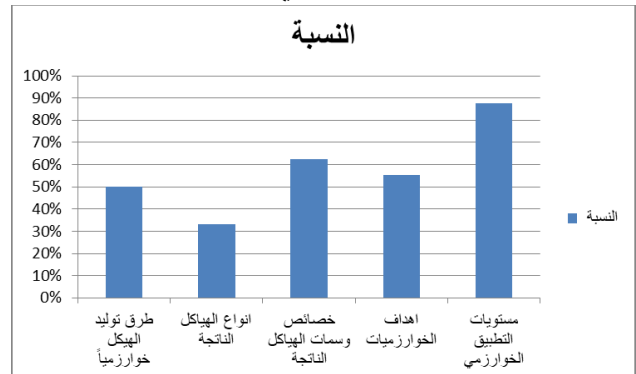
5. النتائج

أظهرت نتائج الخاصة بالتطبيق وجود تفاوت في نسب تحقق المفردات، فقد حققت مفردة مستويات التطبيق الخوارزمي أعلى نسبة وهي (87.5%) في حين حققت مفردة خصائص الهيكل الناتج خوارزميةً ثاني أعلى نسبة وهي (62.5%). إما مفردة أهداف الخوارزميات فقد حققت نسبة وهي (55.5%)، وحققت مفردة طرق توليد الهيكل خوارزميةً نسبة (50%)، في حين حققت ومفردة أنواع الهياكل الناتجة نسبة (33.3%)، وهي أقل قيمة متحققة، كما في الشكل (8)، وفيما يلي توضيح للمفردات الثانوية لكل مفردة رئيسية:

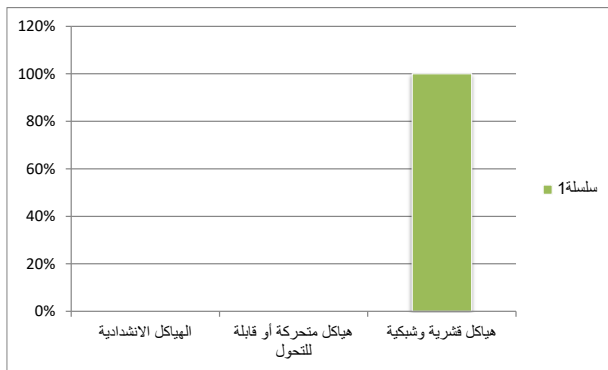
- **مفردة طرق توليد الهيكل خوارزميةً:** تم قياسها وفقاً لأربعة من المتغيرات الرئيسية المؤثرة والتي تمثلت باستخدام المعلمات والذي حقق نسبة (75%)، والعمليات الخوارزمية التي حققت نسبة (25%)، فيما حققت النمذجة البارامترية نسبة (100%)، إما خوارزمية (Voronoi)، فجاءت بنسبة (0%)، وكما في الشكل (9).
- **مفردة خصائص الهيكل الناتج خوارزميةً:** تم قياس هذه المفردة تبعاً للمتغير الخصائص الإنشائية والخصائص الوظيفية والخصائص الجمالية والخصائص الاقتصادية والتي جاءت بالنسب (100%، 0%، 100%، 50%)، على التوالي، وكما في الشكل (10).
- **مفردة أنواع الهياكل الناتجة:** هذه المفردة يتم قياسها وفقاً لثلاثة مؤشرات مهمة والتي تتضمن الهياكل الانشدادية والتي جاءت بنسبة 0%، والهياكل المتحركة أو القابلة للتحويل والتي حققت نسبة 0% والهياكل القشرية الشبكية التي جاءت بنسبة 100%، وكما في الشكل (11).
- **مفردة أهداف الخوارزميات:** وتتضمن هذه المفردة ثلاثة مؤشرات رئيسية وهي إنشاء مباني فعالة والتي حققت نسبة (100%)، في حين جاءت مفردة تسهيل عملية انتاج الهياكل المعقدة بنسبة 50%، إما مفردة تصنيع المشروع في مراحل مختلفة فقد حققت نسبة 66.6%، وكما في الشكل (12).
- **مفردة مستويات التطبيق الخوارزمي:** تتضمن مؤشرين رئيسيين وهما على مستوى الجزء والذي حقق نسبة 75% وعلى مستوى الجزء فقد حقق نسبة (100%)، كما في الشكل (13).



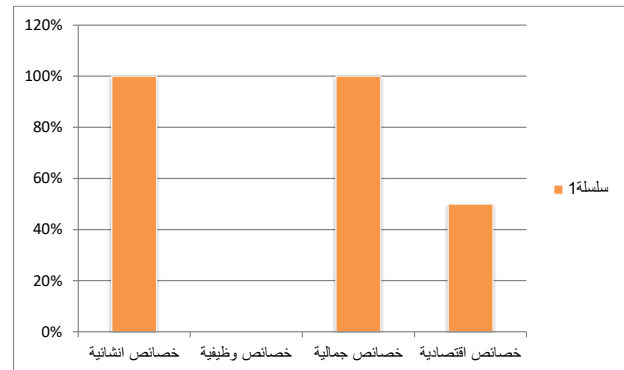
الشكل (9): النسب المئوية للمتغيرات الرئيسية للمفردة الرئيسية الأولى.



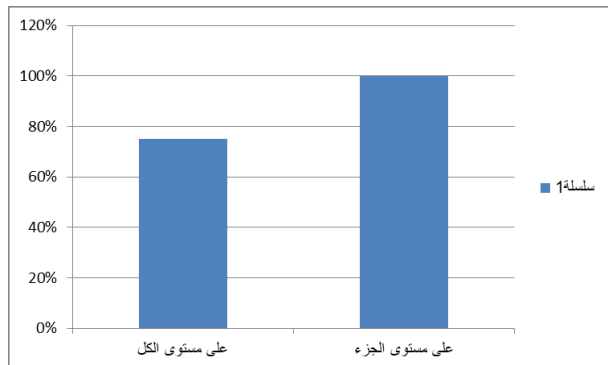
الشكل (8): مخطط بياني لتوضيح النسب المئوية للمفردات.



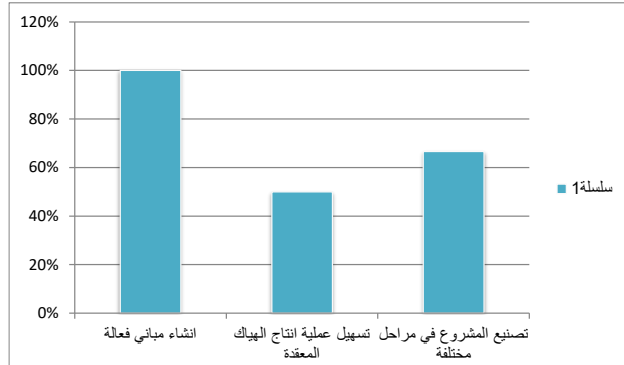
شكل (11): النسب المئوية للمتغيرات الرئيسية.



شكل (10): النسب المئوية للمتغيرات الرئيسية للمفردة الرئيسية الثانية.



شكل (13): النسب المئوية للمتغيرات الرئيسية للمفردة الرئيسية الخامسة.



شكل (12): النسب المئوية للمتغيرات الرئيسية للمفردة الرئيسية الرابعة.

6. الاستنتاجات

- ساعد التصميم الرقمي المدعوم بالحاسوب المصممين على التحرر من القيود ومكنهم من الإبداع والابتكار من خلال تنفيذ التصاميم التي تتميز بالحياة والدينامية، حيث يعتمد التصميم الرقمي بصورة أساسية على الخوارزميات المختلفة.
- تساهم الخوارزميات في إنتاج وتوليد أفكار لانهاية، وتعتبر أيضاً أداة استكشافية تساعد المصمم على الابتكار لكونها تتبع منهج يقوم على إنتاج عدد غير محدود من الحلول والبدائل.
- تعرف الخوارزميات بأنها عملية معالجة المشاكل بخطوات محددة بعملية حسابية وتكون مكتوبة بلغة مشفرة وتمتاز بقدرتها على وصف خطوات الحل بشكل واضح ودقيق، وتستخدم الخوارزميات لغة برمجة نصية في معالجة مشاكل التصميم والبحث عن الحلول الممكنة.
- يُمكن الاستفادة من الخوارزميات التوليدية واستخدامها في تشكيل الهياكل الإنشائية لعمارة المستقبل (عمارة اللامألوف) حيث تعتمد الخوارزميات التوليدية على المعلومات مما يؤدي إلى توليد هياكل ذات تشكيلات جديدة وغريبة وغير مألوفة.
- توجد عدد من الخوارزميات التوليدية التي يمكن استخدامها في عملية التوليد وتشمل على ما يأتي؛ نظام ليندنماير، والخوارزميات الجينية، ونظام الذكاء السري، ونظام (voronoi).
- أن التصميم البارامتري والذي يعتمد بالدرجة الأساس على الخوارزميات يعتبر واحد من الآليات الفرعية الخوارزمية التي يُمكن استخدامها لتشكيل بنية عمارة المستقبل (المرتبطة بالتطور التكنولوجي السريع)، حيث تُمكن هذه الآلية من الوصول إلى هياكل معمارية فريدة وغير مألوفة وذلك بالاعتماد على مجموعة من المعادلات الرياضية.
- تمتاز الأنظمة الخوارزمية بالقدرة على التعامل مع المجسمات وفهم الأنظمة البنائية المعقدة.
- تمتاز الهياكل الناتجة خوارزمية بالعديد من المميزات وتشتمل على ما يأتي؛ إمكانية تعديل الهياكل رياضياً من خلال المعلومات، وهياكل خفيفة الوزن وذات أدائية عالية ومعقدة إما تكون ثابتة أو متحركة الأجزاء، وهياكل قابلة للتكيف مع مختلف الظروف بسبب قدرة الأنظمة الخوارزمية على التكيف والاستجابة مع كل من المحفزات الداخلية والخارجية، وأيضاً صعوبة التمييز ما بين التكوين الشكلي والهيكلي بسبب الاعتماد على المحاكاة الحيوية للنماذج الطبيعية والابتعاد عن الأشكال الكلاسيكية.

- يرتبط التصميم الخوارزمي بعلم المورفولوجيا (هو العلم الذي يدرس هيئات الأشكال في الطبيعة والموجودات غير الحية ذا التصاميم الهندسية والتي تعد مصدراً للإبداع في التصميم المعماري) ارتباطاً وثيقاً، فهو بمثابة أداة تُمكن المصمم من فهم التشكيلات المعقدة وتبسيطها وذلك من خلال استخدام عدد من برامج الحاسوب المختلفة.
- من أهم الأهداف التي يمكن للمصمم أن يحققها من خلال الخوارزميات إنتاج مباني فعالة تمتاز بقدرتها على الاستدامة والتكيف مع الظروف المختلفة.

7. التوصيات

- يوصي البحث باستثمار آلية الخوارزميات والاستفادة منها في تشكيل الهيكل الإنشائي لعمارة المستقبل (عمارة ذات هياكل معقدة ومبهرة ومستلهمة من الطبيعة)، بسبب قدرتها على إنتاج هياكل لا مألوفة ومبهرة وبخطوات محددة مسبقاً.
- يوصي البحث باعتماد التصميم والنمذجة البارامترية في توليد الهياكل الإنشائية.
- يوصي البحث بمواكبة التطورات في البرامج الرقمية الخوارزميات والتي تخدم المصممين وتمكنهم من التغلب على مختلف مشاكل التصميم.
- الاستفادة من الطبيعة كمصدر للإلهام لإنشاء هياكل ذاتية التغيير ومستجيبة لمختلف المؤثرات.

References

- Adrover, E. R. (2015), "Deployable Structures", United Kingdom: Laurence King Publishing Ltd.
- Al – Khafaji, A.M. (2015), "Tectonic in Architecture", IQJAP, vol. 30, No. (1-2), p.140.
- Al-Bqour, N. (2020), "Parametric Thinking for Designing structures in Contemporary Architecture", International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 11, Issue 6, p.p. 1-5.
- Al-Mukaram A.M. (2008), "Fractals in Architecture", [Arabic], PhD Thesis, University of Technology, Iraq.
- Al-Saadi, W. G. (2021), "Breaking the Convention in Generating Contemporary Architectural Texts", [Arabic], M.S.C Thesis, University of Technology, Iraq.
- Al-Shukri, N. A. (2020), "Desperation in Architecture: The Role of Algorithmic Synergy in Generating and Exploring Architectural Form Digitally", [Arabic], M.S.C Thesis, University of Technology, Iraq.
- barandy, K. (2022), "A MUSEUM TO ENVISION THE FUTURE OF DUBAI", Designboom 19 April, available at: <https://www.designboom.com/architecture/museum-future-dubai-kill-design-nears-completion-united-arab-emirates-uae-04-07-2021/> (accessed 8 May 2022).
- Boudon, F., Pradal, C., Cokelaer, T., Prusinkiewicz, P., Godin, C. (2012), "L-Py: An L-System Simulation Framework for Modeling Plant Architecture Development Based on a Dynamic Language", Vol. 3, No.1, p.3.
- Burly, M. (2011), "Scripting Cultures: Architectural Design and Programming", 1st ed. Chichester, UK : Wiley.
- Castroparedes, C. (2021), "https://luxcior.com/2021/03/19/museum-of-the-future/", Luxcior, 19 March, available at: <https://luxcior.com/2021/03/19/museum-of-the-future/> (accessed 7 May 2021).
- Chen, Y. (2015), "Swarm Intelligence in Architectural Design", [English], M.S.C Thesis, Berkeley: University of California.
- Chilton, N. (2022), "Museum of the Future in Dubai.. defying gravity", qposts, 4 September, available at: <https://www.qposts.com/%D9%85%D8%AA%D8%AD%D9%81-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%B3%D8%AA%D9%82%D8%A8%D9%84-%D9%81%D9%8A-%D8%AF%D8%A8%D9%8A-%D8%AA%D8%AD%D8%AF%D9%91%D9%8D-%D9%84%D9%84%D8%AC%D8%A7%D8%B0%D8%A8%D9%8A%D8%A9/> (accessed 23 November 2022).
- Chiu, P. (2015), "The Structure of L-System", [English], M.S.C Thesis, School of Architecture and Interior Design, College of Design, Architecture, Art and Planning.

- Dino, I. G. (2012), "CREATIVE DESIGN EXPLORATION BY PARAMETRIC GENERATIVE SYSTEMS IN ARCHITECTURE", METU JFA, p.p. 207-224.
- Dunn, N. (2012) "Digital fabrication in architecture", 1st ed. London: Laurence King.
- Fasoulaki, E. (2007), "Genetic Algorithms in Architecture: A Necessity or a Trend?", Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States.
- Galetti, G. (2019), "Museum of the Future: the unusual building designed by an algorithm", dlmag, 29 October, available at: <https://dlmag.com/museum-of-the-future-the-unusual-building-designed-by-an-algorithm> (accessed 23 May 2021).
- Ibrahim, S.W. (2014), "The Role of Form Grammar in the Analytical Reading of Architectural Texts", [Arabic], M.S.C Thesis, University of Technology, Iraq.
- Imam, D., Abd al-Khaleq, A., Abd al-Rahman, A. (2018), "Algorithmic formation systems as an introduction to computer-assisted interior design", Proceedings of the 5th International Conference of the College of Applied Arts; 23-24 April 2018; Helwan university, p.4.
- Jawda, D.A. (2018), "The Effect of Using the Algorithm System on the Generate Ideas in Interior Design and Furniture ", Architecture and Arts Journal, vol. 3, No. 11, p.p.240-247.
- Liapi, K. A. (2013), "Tensegrity tectonics: structural concept and architectural expression", In STRUCTURES AND ARCHITECTURE: Concepts, Applications and Challenges, edited by Paulo J.S. Cruz, 268-275. New York: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.
- Marcos, C.L. (2010), Complexity, "Digital Consciousness and Open Form: A New Design Paradigm ", Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture Conference; 21-24 October; New York, ACADIA, p.81.
- Orabi R. (2016), "The Role of Computation in the Architectural Design Process", [Arabic], M.S.C Thesis, Damascus University; Syria.
- Pietroni, T., Puppo, F., Scopigno, N., Davide, E., Maurizio, R. (2014), "Voronoi Grid-Shell Structure", ACMTOG, p.p 1-10.
- Ravenscroft, T. (2021), "Calligraphy-covered Museum of the Future nears completion in Dubai", Dezeen, 30 March, available at: <https://www.dezeen.com/2021/03/30/museum-of-the-future-dubai-killadesign-buro-happold-arabic-calligraphy> (accessed 6 May 2021).
- Sahib T. M. (2020), "The Role of Iterative Systems in Generating Contemporary Structures", [Arabic], M.S.C Thesis, University of Technology, Iraq.
- Terzidis, K. (2011), "Algorithmic Form", In AD: Computational Design Thinking, Edited by Achim Menges, and Sean Ahlquist, 94-101, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Vijayan, V. (2021), "The Museum of Future, by Killa Designs in Dubai-UAE", Archestudy, 25 June, available at: <https://archestudy.com/the-museum-of-future-by-killadesigns-in-dubai-uae/> (accessed 8 July 2021).
- Writer, S. (2019), "New images of Dubai's Museum of the Future reveal structural complexity", middleeastarchitect, 20 January, available at: <https://www.middleeastarchitect.com/multimedia/41970-phil-handforth-reveals-under-construction-images-of-dubais-museum-of-the-future-by-killadesign> (accessed 10 May 2021).