Contents available at Iraqi Academic Scientific Journals

Iraqi Journal of Architecture and Planning

المجلة العراقية لهندسة العمارة والتخطيط

Journal homepage: https://iqjap.uotechnology.edu.iq

The Role of Algorithmic Design in the Development of Responsive Facades

دور التصميم الخوارزمي في تطوير الواجهات المستجيبة

Ghada Ghalib Abdulwahab[a *], **Younis Mahmood M. Saleem** [a]

[a] Department of Architectural Engineering, University of Technology- Iraq, Baghdad, Iraq.

Submitted: 01/03/2023 Revised: 05/02/2024 Accepted: 27/09/2024 Published: 30/12/2024

K E Y W O R D S

Algorithms, The algorithmic design, Voronoi algorithm, Linder Mayer algorithm, Response, Responsive facade.

A B S T R A C T

In recent years, the use of algorithms in building façade design has significantly increased, enabling architects to create complex geometric forms that were traditionally difficult to achieve. Algorithmic design relies on employing algorithms to generate and process design parameters using digital tools such as 3D modelling and digital fabrication techniques. This approach enhances the performance of façades, allowing them to adapt to changing environmental conditions. The study addresses the need to understand the role of algorithms in creating contemporary architectural façades derived from nature and responsive both environmentally and aesthetically. The research aims to explore how these algorithms improve façade responsiveness. Accordingly, it hypotheses that algorithms contribute to enriching architectural forms while achieving environmental and aesthetic responsiveness. The study reviewed the conceptual framework of algorithms and their applications, analysed various architectural case studies, and concluded that algorithms play a pivotal role in developing environmentally responsive façades, thereby enhancing the sustainability of future buildings.

الكلمات المفتاحية

الخوارزميات، التصميم الخوارزمي، خوارزمية فورونوي، خوارزمية الليندر ماير، الاستجابة، الواجهة المستجيبة.

الملخص

في السنوات الأخيرة، ازداد استخدام الخوارزميات في تصميم واجهات المباني، مما مكّن المهندسين المعماريين من ابتكار أشكال هندسية معقدة كانت صعبة التحقيق تقليديًا. يعتمد التصميم الخوارزمي على توظيف خوارزميات لتوليد ومعالجة معايير التصميم باستخدام أدوات رقمية مثل النمذجة ثلاثية الأبعاد وتقنيات التصنيع الرقمي. يسهم هذا النهج في تحسين أداء الواجهات لتتكيف مع الظروف البيئية المتغيرة. حدد البحث مشكلة الحاجة لفهم دور الخوارزميات في إنشاء واجهات معمارية معاصرة مشتقة من الطبيعة ومستجيبة بيئيًا وجماليا، اذ يهدف البحث إلى الكشف عن كيفية تحسين هذه الخوارزميات لاستجابة الواجهات، وبناءا عليه، يفترض البحث أن ا لخوارزميات تساهم في إثراء التشكيل المعماري وتحقيق استجابة بيئية جمالية. واستعرض البحث الإطار المعرفي للخوارزميات وتطبيقاتها، ثم حلل دراسات معمارية متعددة، ليخلص إلى أن الخوارزميات تلعب دورًا جوهريًا في تطوير واجهات مستجيبة بيئيًا، مما يعزز استدامة المباني مستقبلاً.

* Correspondent Author contact: ghada.g.abdulwahab@uotechnology.edu.iq
DOI: https://doi.org/10.36041/iqjap.2024.138678.1067
Publishing rights belongs to University of Technology's Press, Baghdad, Iraq.
Licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

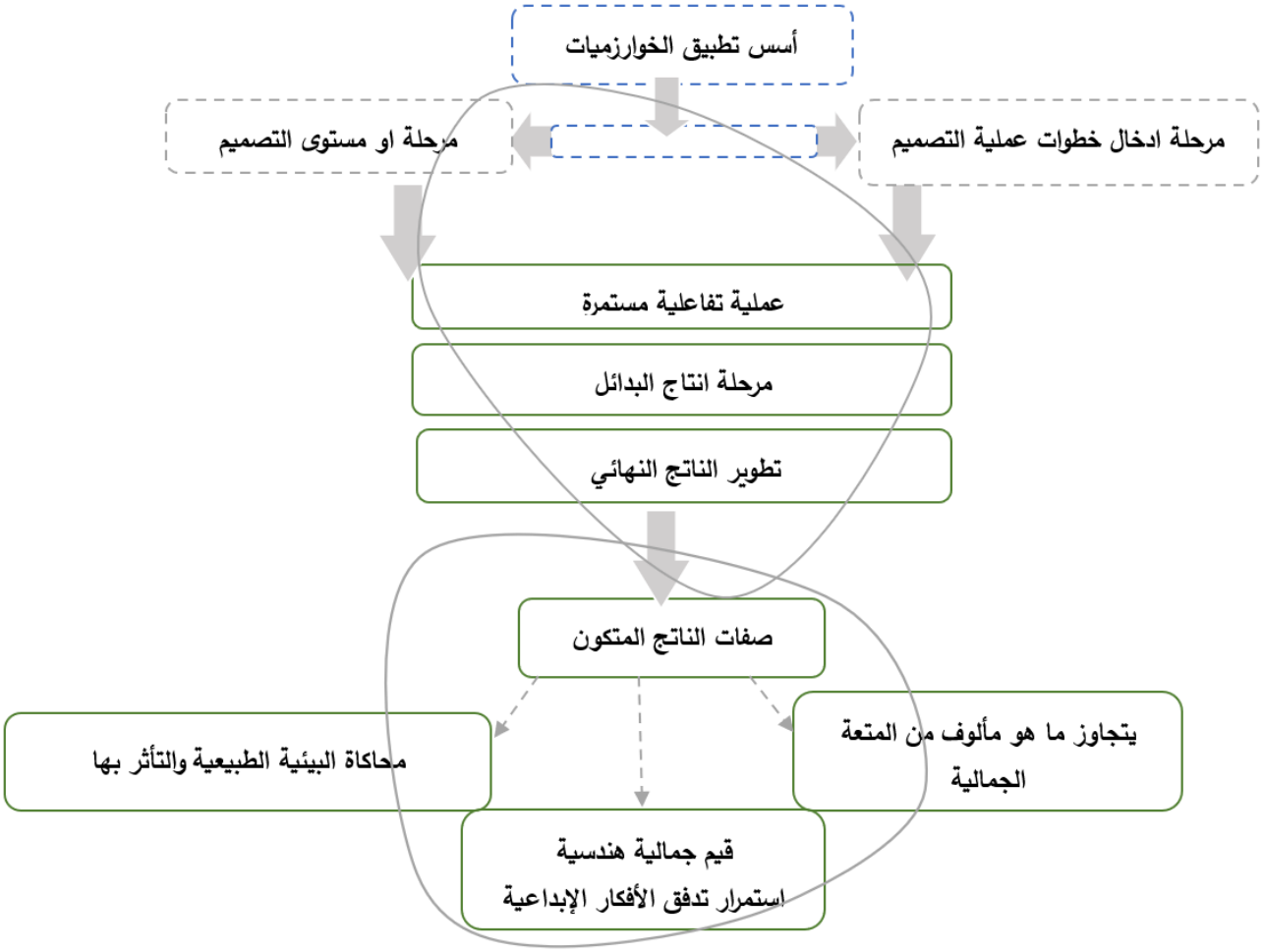
1. المقدمة

تعد الواجهات المعمارية واحدة من الجوانب الأساسية التي تشكل هوية المبنى وتعزز جمالياته. ومع تزايد الاهتمام بالاستدامة البيئية وتكييف المباني مع الظروف الجوية المتغيرة، أصبح تصميم الواجهات المستجيبة للبيئة أمرًا حيويًا لتحقيق تشكيل مستجيب بيئيا وجماليا ويستخدم المصممون المعماريون اليوم التقنيات الرقمية الخوارزمية لتحقيق التكامل بين التصميم المعماري والاستدامة البيئية ان الخوارزميات ومنها المشتقة من الطبيعة لها دور كبير في تحقيق الاستجابة على عدة مستويات منها: على المستوى المادي (النتاج الشكلي) وعلى مستوى القوانين الحاكمة للتشكيل (اليات وقواعد الخوارزمية) وعلى مستوى المحتوى والمضمون (معاني تاريخية وفكرية). ان تأثير التطورات الأخيرة في مجال الثورة التكنولوجية واضح حيث تتوجه الأبحاث الحالية في مجال الخوارزميات المحاكية للبيئة الطبيعية بمساعدة الحاسوب في العملية التصميمية لتلبية الاحتياجات النفعية والرمزية والجمالية بتوظيف هذه التقنية كوسيلة لخلق الشكل وتحويل الخوارزميات الى نتاج مادي حسب النظام التكنولوجي المتبع (اتبع البحث المنهج الوصفي التحليلي، حيث سيعتمد هذا البحث الوصف التحليلي للعينات المنتخبة وكيفية تطبيق استخدام الخوارزمية (الخوارزميات المشتقة من الطبيعة) في تصميم وتطوير الواجهات المستجيبة بيئياً وجمالياً وتحديد مدى تأثيرها على الشكل النهائي للمبنى.

2. المحور الأول: التصميم الخوارزمي والاستجابة

منذ بداية القرن العشرين بدأت الأبحاث الجديدة في مجال الفنون والعمارة باكتشاف جوانب متعددة تربط الفنون والعمارة بالعلوم الأخرى كالرياضيات والخوارزميات والفيزياء والطبيعة وغيرها بمختلف اتجاهاتها الإبداعية وذلك بالكشف عن الجوانب المتعددة للمفاهيم العلمية التي تسهم في فتح افاق معينة معرفية جديدة، تعد الطبيعة غنية بالظواهر والأنظمة والقوانين المختلفة التي تؤخذ منها نظريات الجمال (Aba Hussein, Hind Fahd, 2020, p. 132) وهنا يأتي دور الخوارزميات في علم الرياضيات بوصف خصائص الاشكال في الطبيعة فهي تهتم بالتحقق من الخصائص الرياضية لبعض الاشكال والظواهر التي تثري تفكير المصمم ويجعل من الرياضيات بيئة للفهم والتفكير واللذان يساعدان المصمم على تطوير أفكاره، ففن الخوارزميات (Algorithm Art) فن من الفنون التي تعتمد على الرياضيات المنطقية المتسلسلة وهي عبارة عن مجموعة من الخطوط الرياضية والمنطقية، وهو في الاساس صورة منطق اعيد كتابته بواسطة البرمجيات ليصبح اكثر فاعلية يمكن استغلاله في الحصول على النتائج (المخرجات) من بيانات معطاة المدخلات (Al-Sayed& Asal Muhammad, 2015, p. 6) ومن خلال التقدم العلمي والتكنولوجي والذي مكن من تحويل المعادلات من مجرد ارقام ورموز الى اشكال ورسومات ذات قيمة جمالية كبيره وتفجر طاقات الابداع والخيال عند المصممين حيث تعد الخوارزميات ذات أهمية كبيره في اثراء وتنمية التفكير الإبداعي.

فالخوارزميات: هي مجموعة من الخطوات الرياضية المنطقية والمتسلسلة اللازمة لحل مشكله ما، وسميت الخوارزميات بهذا الاسم نسبه الى العالم (ابو جعفر محمد بن موسى الخوارزمي (الذي ابتكرها في القرن التاسع الميلادي) و (الخوارزميات) منتشره في اللغات اللاتينية والأوربية (algorithm) (وكان معناها يقتصر على خوارزميه لتراكيب ثلاثة وهي :التسلسل والاختيار والتكرار (Fahem,Wannas.Eccer, 2015, p. 3). وتعد أيضا حلول هندسية فعالة من الناحية المعمارية وكذلك الهيكلية للبحث عن حلول تآزريه تجمع بين جماليات الشكل والمنطق الهيكلي مدعومة بالميول الإلكترونية الحديثة. كما موضح في الشكل (1) يوضح أسس تطبيق الخوارزميات لتشكيل النتاج المعاصر.

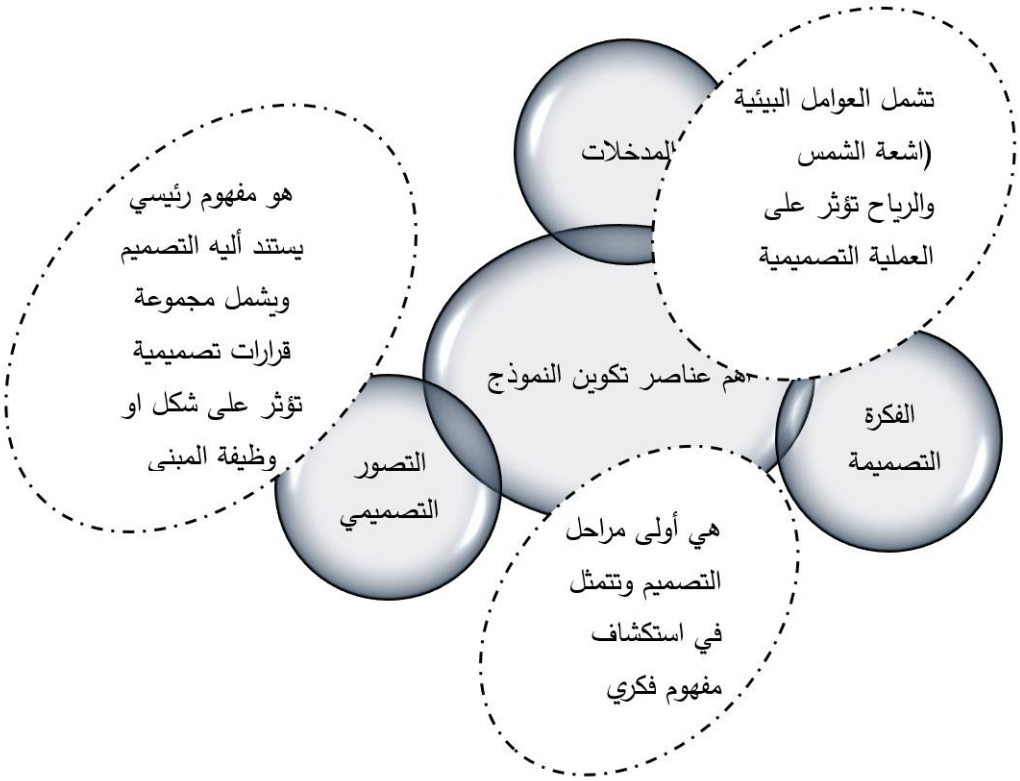


الشكل (1): أسس تطبيق الخوارزميات لتشكيل النتاج المعاصر، (المصدر: الباحثان).

1.2. التصميم الخوارزمي

يقصـــد به توليد الكتل والاشـــكال من خلال الخوارزميات والتي تهدف الى نتائج غير متوقعة، تعمل الخوارزميات على الجمع بين مرونة التصميم الخوارزميAD وبرامج المحاكاة التي تعمل على تحليل البدائل لتحديد حل يوفر الأداء الأمثل، مما اثار اهتمام المصممين بسرعة وسمح لهم باكتشاف مناطق جديدة غير محددة في الهندسة المعمارية، يتيح ذلك للمصمم او حتى السماح له بقيادة العملية ويقدم حلولا هائلة حيث أشارت بعض الدراسات ومنها دراسة (Leitão & Caetano 2019) إلى أن الثورة الخوارزمية تعمل بسرعة على تغيير الطريقة التي تمارس بها العمارة وأن الخوارزميات في التصميـــم المعماري قد تجاوزت دورها كأطر لتحقيق التشكيل وذلك من خلال دمج لغات البرمجة النصية في برامج CAD إذ أصبح بالإمكان عرض مخرجات الخوارزميات مباشرةً ثـــم بناء هذه المخرجات ببيئة رسوم معمارية من خلال طرق التصنيع الرقمية، مما ظهر دورا جديدا للخوارزميات بوصفها أداة تصميمية (Bagul & Uke, 2014, p126). كما موضـح في الشـكل (2) يوضـح دور الخوارزميات في انتاج التشـكيلات المختلفة واهم عناصـر تكوين النموذج (المدخلات– الفكرة والتصور التصميمي).

مما سبق يمكن استنباط مفهوم التصميم الخوارزمي بأنه هو عملية تستكشف الأشكال المعقدة من الأساليب / القواعد البسيطة والتكرارية مع تتابع الأفكار التي من شأنها ان تساعد في فهم المشكلة وعرض حلول ممكنة كما يعتبر وسيط لحل مشاكل جديدة وإيجاد الشـــكل عبر معادلات وأنظمة ديناميكية وبأســـلوب يتخلله التعقيد منتجة مخرجات جديدة غير متوقعة، ومن الخوارزميات التي يمكن استخدامها للتوليد وتصميم وإيجاد الشكل هي:



الشكل (2): يوضح الخوارزميات في انتاج التشكيلات المختلفة واهم عناصر تكوين النموذج (المدخلات– الفكرة والتصور التصميمي)، (المصدر: الباحثان).

1.1.2. خوارزمية فورونوي

تعد من اهم الانماط الموجودة في الطبيعة وتعرف بانها ظاهرة نظامية تقوم على اسس هندسية ومفاهيم ذات منطق رياضي ويمكن ان نجدها بمقياس وخامات مختلفة، ومن امثلتها التكوين البنائي للعظام، البناءات الاسفنجية، خلايا النحل، فقاعات الصابون، نسيج أوراق النبات، تشقق الطين بعد الجفاف، سميت هذه الخوارزمية نسبة الى عالم الرياضيات الروسي جورج فورونوي 1908–1868 الذي أطلق هذا المصطلح على نمط معين من التشكيل يتواجد في الطبيعة وكذلك تعرف على انها تقسيم للمساحات العشوائية الى مجموعة مساحات محدودة والتي تسمى خلايا فورونوي يسهل السيطرة عليها ولها تطبيقات في مجال الفنون فهي نظم هيكلية محاكية للطبيعة ومستقرة مثل فقاعات الصابون التي اعتمد عليها فراي اوتو في ايجاد الشكل (Muhammad & Rana,2017, p. 33) أما في التصميم الحضري نشهد تطبيق هذه الخوارزمية لتوزيع الفراغات والمساحات الخضراء بين المباني بطريقة تتيح الاستفادة القصوى من المساحة المتاحة وتعزيز التفاعل والتلاحم بين المباني المختلفة في الموقع بشكل يعزز جمالية، كما موضح في الشكل (3).

الشكل(3): صور توضح تقسيم الساحات الخضراء بفكر خوارزمية فورونوي، المصدر: (Delaney Tran, 2022) & (joseph.bou.saleh, 2022).

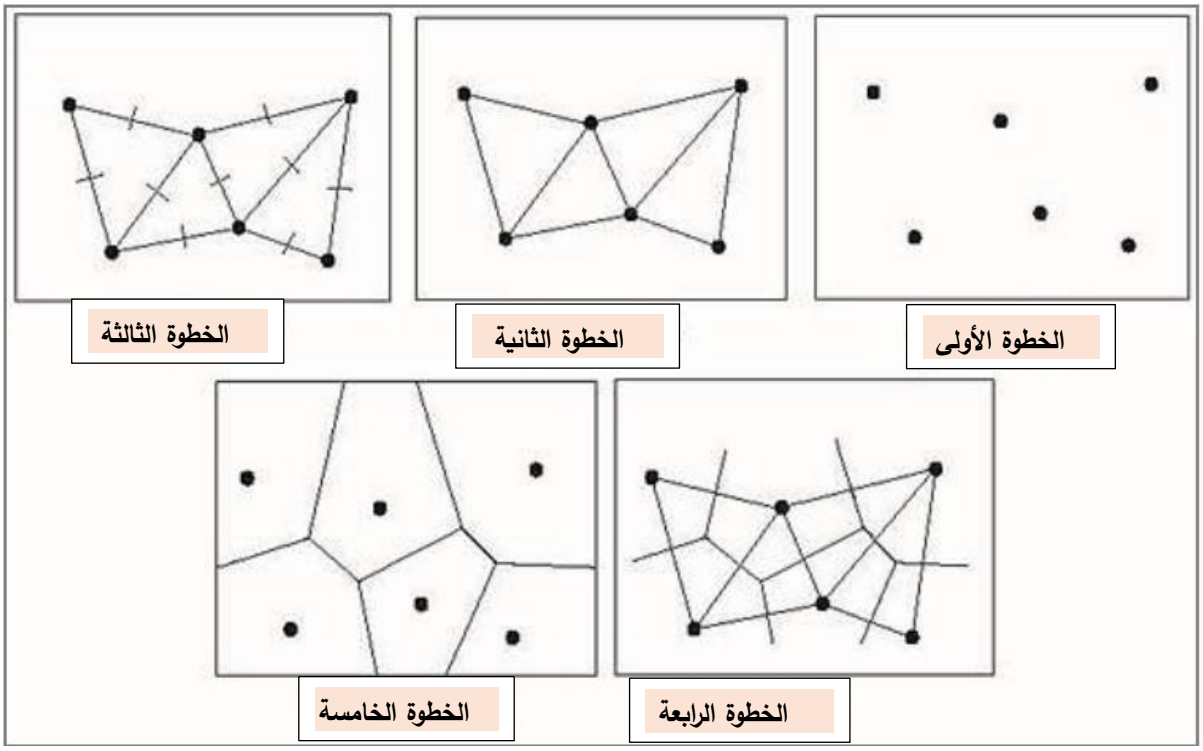
كما تهدف هذه الخوارزمية على المستوى البيئي والجمالي الى محاكاة الأنماط الهيكلية الموجودة في العالم الطبيعي لتطوير الأنظمة ذات الكفاءة البيئية والجمالية وانشـاء حلول مبتكرة وترشـيد اسـتخدام المواد والطاقة، وهي من اهم التوجهات المسـتخدمة في رقمنة الهياكل وبنية السطوح والاشكال في العمارة، وتوفير حلول تصميمية فعالة لمتابعة تكنولوجيا الطبيعة اذ تعمل خلايا فورونوي على المستوى البيئي: كموفر للطاقة مما يجعل المبنى صـديق للبيئة كما في اسـتخدام نمط الخوارزمية VORONOI لتظليل الواجهات والفناء في المقر الرئيس لشـركة Ali Baba في هانغتشـو في الصـين كما في الشـكل(4) و يمكن ايضـاً عن طريق الخلايا تحديد كمية الإضـاءة الطبيعية الداخلة وانكســارها عبر التحكم بعدد وحجم وتوزيع الخلايا والتلاعب بحواف الخلايا المكونة والمســتلهمة من الطبيعة ســواء من خلايا النحل او فقاعات الصابون، نسيج أوراق النبات، تشقق الطين بعد الجفاف، كما في الشكل(5).

شكل (4): صور توضيحية المقر الرئيسي لشركة (Ali Baba)، المصدر: (HASSELL,2002)

شكل (5): صور توضح تحديد كمية الإضاءة الطبيعية عن طريق التحكم بعدد وحجم وتوزيع الخلايا، المصدر.(Ashton.R.M.,2008)

اما على المستوى الجمالي: (صياغة وابتكار حلول تصميمية للتكوينات الخارجية والداخلية للمباني اشكال بسيطة وانيقة، تقنية غير نمطية، خلايا متجانســة وناعمة وممكنة التوظيف والتنفيذ (Ibrahim ,Maha Mahmoud, 2017, p. 597)، ممكن بناء تشــكيلات فورونوي في عدة خطوات كما هو موضـح بهذه الطريقة الخوارزمية ومنها طريقة (تثليث ديلاوني) (قواعد التشـكيل). ممكن بناء تشـكيلات فورونوي في عدة خطوات كما هو موضح بهذه الطريقة الخوارزمية ومنها طريقة (تثليث ديلاوني):

- الخطوة الاولى: تحديد مجموعة من النقاط على مسطح معين مراد تقنينه وتقسيمه إلي مساحات معروفة.(مولد فورونوي).
- الخطوة الثانية: رســم خط يربط بين النقاط الموضــوعة شــرط الا تتقاطع هذه الخطوط ويحدها من البداية نقطة ومن النهاية نقطة اخرى. (محاور فورونوي).
- الخطوة الثالثة: تقسيم الخطوط الواصلة بين النقاط عن طريق مستقيمات متعامدة عليها.
- الخطوة الرابعة: مقاطعة جميع النقاط المتعامدة داخل كل منطقة لتشــكيل نقطة جديدة ضــمن كل منطقة تعرف نقطة التلاقي بنقاط فورونوي.(شكل فورونوي).
- الخطوة الخامسة: حذف الخطوط الاصلية المرسومة في الخطوة الثانية للكشف عن شبكة جديدة تعرف بشبكية فرورنوي، حيث أن هذ المساحات تسمي بخلايا فرونوي وكل خلية منها مسؤولة من نقطة تسمى نقطة فورونوي بداخلها ليست في المنتصف لكن الشرط وجود نقطــة واحــدة محصــــورة بين الاضــــلاع، المتلاقيــة الاطراف (منطقــة فورونوي) (Abdel Aziz, Dalia, Abdel Moneim,2017, p.217)، كما موضح بالشكل (6) خطوات تطبيق قاعدة خوارزمية فورونوي.



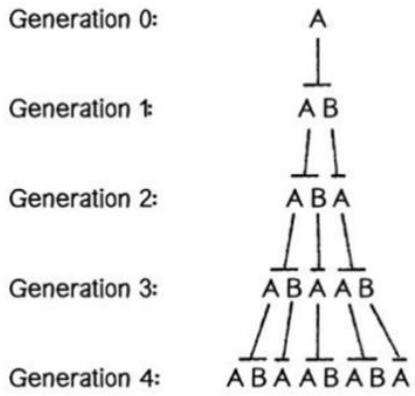
الشكل(6): مخطط يوضح خطوات تطبيق خوارزمية فورونوي، المصدر: (Al Seady, R.M. A.O,2019 , p14).

2.1.2. خوارزمية الليندر ماير

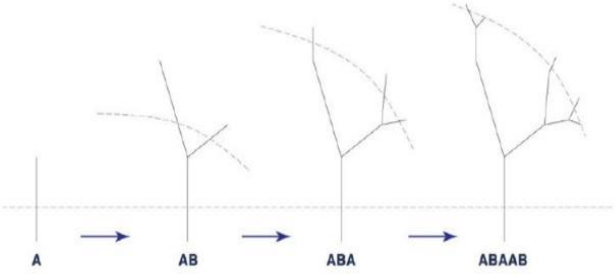
أنشئت هذه الخوارزمية لدراسة نمو النباتات وهي خوارزمية رياضية اكتشفها عالم الاحياء المجري اريستيد ليندر ماير في عام (1968)، حيث استخدم بنية شجرة فيثاغورس لتقديم مفهوم أنظمة (L-SYSTEMS) وهو مولد رقمي للهياكل يعكس ديناميكيات نمو النبات حيث يمكن انشاء الهياكل الشجرية التي تمت ملاحظتها في الطبيعة باستخدام أدوات التصميم التوليدي القائم على التكرار الخاصة بالشفرة الخوارزمية (Wysokińska E,ET.AL, 2013 ,p205).

كذلك قام ليندرماير في استكشاف طريقة نمو الخميرة والفطريات حيث قدمت وصفا شكليا لتطور الكائنات البسيطة لتتطور فيما بعد لتصف الهياكل المنشية في العمارة خاصة الهياكل (النظم الخيطية المنقحة) يعتمد توليد وانشاء هذه النتاجات على اشكال بسيطة تخضع لمجموعة من العمليات التكرارية تستند هذه العمليات على ترميز العناصر بشكل حروف حيث تستبدل فيها الأجزاء بنواتج العمليات التي تسبقها ، ومن خصائصها انها ليس لها نهاية حيث ان فكرة تكوينها تقوم على تقسيم الخط الى ثلاث أجزاء متساوية ومن ثم تكوين مثلث متساوي الاضلاع على جزء منها بدون قاعدته وهكذا تتكرر هذه العملية بدون توقف ويمكن تطبيق قواعد متشابهة على اشكال مختلفة (Mohamed, Doaa 2018, pp. 246-247) اما اهم خطوات بناء التشكيل الخوارزمي وفقا لقواعد هذه الخوارزمية هي وجود عدد من المتغيرات والسلسلة الأولية وقواعد الإنتاج. بدءًا من سلسلة أولية عند t = 0، تتغير المتغيرات المكونة لهذه السلسلة بشكل تكراري بناءً على قواعد الإنتاج التي تتحكم في هذا التحول، وبالتالي تشكل سلسلة موسعة جديدة. يمكن تمثيل نظام Linden Mayer لنمذجة نمو النبات حيث يتم بناء السلاسل من حرفين A و B (المتغيرات). تبدأ السلسلة بالحرف A (السلسلة الأولية) ويتم تحويلها في كل خطوة زمنية وفقًا للقاعدتين التاليتين: A → AB، B → A (قواعد الإنتاج) التي تنتج عند الشكل(7) يوضح قواعد الإنتاج لخوارزمية الليندر ماير. كما يوضح الشكل (8) طريقة النمو الشجرية وفق قواعد خوارزمية الليندرماير، اما الشكل (9) يوضح تطبيق هذه الخوارزمية في مطعم (THE TOTE) في الهند.

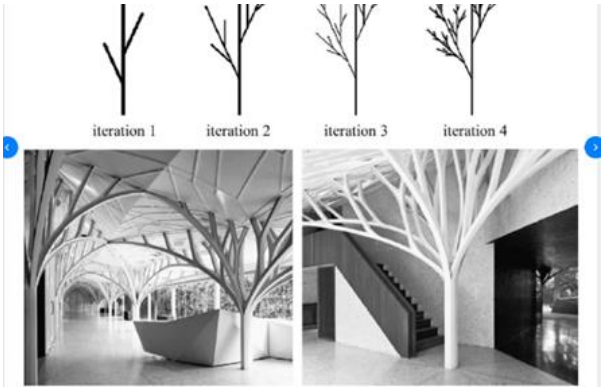
t = 0: A
t = 1: AB
t = 2: ABA
t = 3: ABAAB



الشكل(7): مخطط يوضح قواعد الإنتاج لخوارزمية الليندر ماير النظم الخيطية المنقحة، المصدر: (P.Prusinkiewicz and A.lindernmayer,1990.P22-33).



الشكل(8): مخطط يوضح طريقة النمو الشجرية وفقا لقواعد ليندرماير، المصدر: (p.prusinkiewicz and A.lindernmayer,1990,P22-33).



الشكل(9): صور توضح مطعم (THE TOTE) بومباي الهند لتوضيح تطبيق الخوارزمية لمبنى منفذ، المصدر: (Chris Lee and Kapil Gupta,2009).

يتم تفسير هذه الأحرف الموجودة في الصورة السابقة إلى سمات هندسية تعكس نمطًا هندسيًا ناشئًا بناءً على المتغيرات والسلاسل والقواعد المحتملة المختلفة. يتم عرض أمثلة على الأنماط الناتجة المحتملة ، تنتج هذه النظم تشـــكيلات ثنائية وثلاثية الابعاد غاية في التعقيد من خلال البدء بعنصر بسيط واستبدال الأجزاء الأخرى بشكل تكراري وفقا لمجموعة من القواعد وتتميز الصورة المتكونة بانها اقرب للأشكال الطبيعية وتفتح المجال لإنتاج اشكال غير مألوفة أيضا، وهي أنماط ذات اشكال حره ثلاثية الابعاد ولكونها عضوية بطبيعتها يتم اســـتخدام برمجيات متنوعة لإنتاجها مثل خوارزمية l-system لمحاكاة توليد التفرع في النبات لوغارتميا (Abdel Jalil, Wijdan Diaa, 2018, p. 205) يتضمن استخدام أنظمة L-system لإنشاء تصميمات المباني تحديد مجموعة من القواعد لنمو وتطوير الهيكل. يتم التعبير عن القواعد كمجموعة من الرموز والتعليمات، والتي تُستخدم لتوليد وبناء الهيكل.

3. الاستجابة

هي أي تصرف او تغيير في الحالة يتم استثارته بمثير او محفز حساس او مستجيب، فالاستجابة بعباره موجزه: هي رد فعل الكائن الحي المثير ما ان اســتجابة المبنى هو قدرة المبنى على تلبية رغبات ومتطلبات شــاغليه وللتغييرات في البيئة الداخلية والخارجية للمبنى (p10 Al-Dabbagh, Shamael, 2010).

1.3. العمارة المستجيبة

تتغير البيئة باســتمرار عبر الزمان والمكان وبالتالي هناك حاجة لاســتيعاب وإدارة التغييرات البيئية تبعا لحاجات المســتخدمين من خلال تكيف المبنى مع المتغيرات المتنوعة وقد أصــبحت مفاهيم العمارة المستجيبة اكثر انتشــارا منذ الســبعينات من القرن الماضــي نتيجة المطالب الجديدة للراحة التي ظهرت في المباني، وهي العمارة التي لديها القدرة على تغيير شــكلها لتعكس باســتمرار الاســتجابة للظروف

البيئية التي تحيط بها (Ibrahim, Maha Mahmoud,2018,p 600) ان الثورة المعلوماتية الحالية في الهندسة المعمارية جعلت مفهوم العمارة المستجيبة اكثر فاعلية، يذكر مصطلح الاستجابة في الهندسة المعمارية لوصف العملية التي تقوم بها النظم من خلال تغيير خصائص المبنى ضمن فترة زمنية محددة وذلك بهدف الاستجابة للظروف البيئية المتغيرة او لتأدية وظائف البناء.

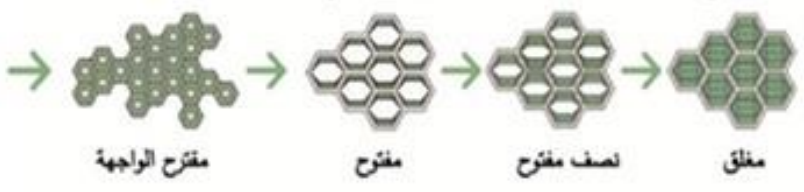
2.3. الخوارزميات والاستجابة

تعد الخوارزميات كمولدات للشكل المعماري حيث تعمل هذه الخوارزميات بأنواعها المختارة والمشتقة من الطبيعة على فتح مجموعة لا حصر لها من القوى التوليدية، ويمكن اعتبار العمارة الخوارزمية على انها المرحلة الأكثر تقدما في مجال الابداع المعماري بمساعدة الحاسوب (Marcos,2010, P81-87). وتكون الخوارزميات ذات طبيعة استكشافية تحاكي العقل البشري أو توسيعه فهي تدور حول الاستقراء والاستنباط والاستكشاف وتنطوي على حل المشكلات والادراك والمحاكاة والذكاء القائم على القواعد ويتناول البحث الاستجابة البيئية والجمالية التي تتحقق في تصميم مبنى قائم على الفكر الخوارزمي.

1.2.3. الاستجابة البيئية

العمارة المستجيبة بيئيا هي عمارة ديناميكية لإنه يمكنها خلق بيئات مستدامة بشكل أفضل في النواحي الاقتصادية والاجتماعية وتوليدها الذاتي للطاقة فعن طريق الطاقة الحركية الذاتية للمبنى يمكن توليد طاقة كهربائية يستفيد منها المبنى وبتوجيه الخلايا الشمسية تجاه الشمس يضمن أكبر قدر من الاستفادة من الطاقة الشمسة (Terzidis, Kostas,2006). فالعمارة الخوارزمية المستجيبة بيئيا: هي عمارة ذات قواعد واليات تشكيل فهي تعمل على تحقيق الاستجابة للمؤثرات البيئية وخلق هيكل تفاعلي مرن من خلال خلايا التحكم في العوامل البيئية حيث تعمل البيئة بكل معطياتها لتساهم في عملية التشكيل عن طريق الخوارزميات لتقوم بإعادة الصياغة ليصل الى علاقات جديدة مختلفة من خلال المحاكاة للطبيعة ومحاولة تطبيقها في العمارة عن طريق التطور السريع للتقنيات الرقمية المستخدمة بعمليات التصميم والتصنيع وعلوم الخوارزميات لتوليد الاشكال المعمارية المعقدة، كما يوضح الجدول (1) الاستجابة البيئية للخوارزميات.

الجدول (1): يوضح اهم نتائج الاستجابة البيئية لخوارزمية فورونوي– الليندر ماير، (المصدر: الباحثان).

الاستجابة البيئية لخوارزمية فورونوي	• العزل الحراري تقليل من الاحمال الحرارية بوجود مساحات مغلقة ومساحات مفتوحة (ضبط نسب الفتح والاغلاق) كما موضح بالشكل (10). • ترشيد استخدام الطاقة. • التهوية الطبيعية – الإضاءة الطبيعية. • التنوع في حجوم الوحدات والعلاقة بينهم وذلك بـ التلاعب بحجم الفتحات والتوجيه حسب كمية اشعة الشمس ان المقياس الكبير والمتوسط للوحدات يغطي الواجهات التي تتعرض لكمية كبيره من اشعة الشمس اما الأجزاء الصغيرة تكون على أجزاء الواجهة التي تعرضها اقل للشمس. • تضاعف الطبقات للغلاف الخارجي بواسطة الخوارزمية.  **شكل(10): يوضح نسب الفتح والاغلاق للواجهة الخوارزمية المستجيبة بيئياً**
الاستجابة البيئية لخوارزمية الليندر ماير	• الخلايا ذات وحدات غير متكررة لكن يوجد رابط قوي وعلاقات متبادلة تحدد في اطارها اشكال الخلايا. • تحقيق مبدأ المسامية والنفاذية تجاه الضوء والهواء بوجود فجوات هوائية التي تتحكم بكمية الإضاءة. • نمط الاضلاع المتكرر بانتظام للحماية من اشعة الشمس للسطح السفلي والداخلي عن طريق الظلال المتكونة بواسطة هذه المسارات المتعرجة.

2.2.3. الاستجابة الجمالية

ســـاعدت التكنولوجيا في تكوين نظام شـــامل وحيوي حيث تدخل علم الحاســـوب في التأثير على فكر وشـــكل عمارة القرن 21 (Raafat ,Ali, 2007, p. 40) وقد افضـت هذه الثورة التكنولوجية الى تكوين اشـكالا جديدة لعمارة اليوم، حيث يتكون الشـكل المعماري من مجموعة خلايا او وحدات تبعا لنظام خوارزميات الحاسـوب نفسـه ومن برامج وتطبيقات الخوارزمية الجينية تتولد اشـكال هجينة غير متوقعة (Hatamal, Rana Al-Farid, 2015, p. 68) تتحقق الاســـتجابة الجمالية للنتاجات المعمارية ذات الفكر الخوارزمي حيث تتميز بالمرونة والديناميكية والتفاعلية مما ساهم في تعزيز النظرة الجمالية في عصر الثور الرقمية حيث رسمت طريقا للجمال خارج اطار المحددات الاكاديمية وحررت الجمال من القيود وذلك بقدرة الخوارزميات على اقتراح بدائل تصميمة غير قياسية تحرر المصمم من الأفكار المغلقة حيث الخطوط الديناميكية الحرة والايقاع المتغير والمرونة العالية وتفاعل بين البيئة من خلال الاســـتجابة للمؤثرات الخارجية، كما يوضح الجدول (2) اليات الاستجابة الجمالية للخوارزميات.

الجدول(2): اليات الاستجابة الجمالية للخوارزمية (فورونوي – الليندر ماير)، (المصدر: الباحثان).

الاستجابة الجمالية لخوارزمية فوونوي	• الاستلهام من الاشكال العضوية الطبيعية. • التناغم خطوط سلسة. • انتاج تكوينات منفردة ومبتكرة. • الشفافية التواصل البصري بين الخارج والداخل.
الاستجابة الجمالية لخوارزمية الليندر ماير	• التكرار والتكامل بين العناصر. • انسيابية ديناميكية وخفة. • محاكاة رقمية لعمليات النمو والتطور في الطبيعة. • نمو وتغيير الأجزاء. • تشكيلات حره ثلاثية الابعاد.

4. البنى المستجيبة: مستوى انتاج التشكيل الخوارزمي المستجيب

البنية المستجيبة هي مساحات وأشياء يمكنها إعادة تكوين نفسها فعليًا لتلبية الاحتياجات المتغيرة (Hu, Catherine and Fox, Michael A,2003, p7) تعتمد كفاءة التشكيل المعماري أساس على التقليل من استهلاك الموارد وملائمة البنى للظروف المتغيرة مما يؤمن بنى خفيفة الوزن ومستجيبة في الوقت ذاته، ومن اهم البنى المعمارية التي يمكن تطبيق اساليب الخوارزمية عليها هي:

- المغلف المعماري والواجهة المستجيبة.
- المواد البنائية المستجيبة.
- عناصر التصميم الداخلي.

سوف يتطرق البحث الى الواجهة المعمارية التي سوف يطبق عليها التشكيل الخوارزمي.

1.4. المغلف المعماري والواجهة المستجيبة

يعد اســـتخدام الخوارزميات في التصـــميم المعماري جديدًا نســـبيًا، لكنه أظهر بالفعل إمكانات كبيرة، أحد المجالات المحددة التي أظهرت للخوارزميات إمكانات غير محدودة هي تصـميم الواجهات، اذ تعد الواجهات العنصـر الأكثر وضـوحًا في المبنى، وتصـميمها له تأثير كبير على جماليات ووظائف المبنى. يبين البحث تطبيقات الخوارزميات في التصـــميم المعماري للواجهات، مع التركيز على استخدامها في إنشاء تصميمات مبتكرة، وتحسين الأداء، وتحسين الاستدامة. كما يلعب تصميم واجهات المباني دورًا مهمًا في المظهر الجمالي والوظيفي للمبنى.

5. المحور الثاني: بناء واستخلاص مفردات الإطار النظري

1.5. نقد الدراسات السابقة

الدراسات السابقة الدراسات المتخصصة بالخوارزميات المحاكية للطبيعة والاستجابة البيئية والجمالية

1.1.5. دراسة (Mohammad Alshami, et al. 2015)

وضحت الدراسة بان المهندسون المعماريون والمصممين في السنوات القليلة الماضية طوروا طرقًا مختلفة للتصميم، اختلفت فيها تقنيات التوليد بشكل خاص ومصادر الإلهام والتحفيز، لكن معظمها يهدف إلى تحقيق أهداف مشتركة مثل تحقيق الاستدامة واستخدام التكنولوجيا الفائقة، أصبحت الأنظمة التوليدية في الطبيعة مصدر إلهام للمهندسين المعماريين. بدلاً من النظر إلى التصميم كإجراء من أعلى إلى أسفل وخطي وموجه نحو الهدف، فإنهم يسعون إلى فهم القواعد والمبادئ الأساسية للأنظمة الطبيعية، والتي تنتج نظامًا هيكليًا وتنظيمًا ماديًا عالي التعقيد والكفاءة والجمال. يمكن تطبيق الأنظمة على التصـــميم المعماري من أجل تحقيق تقنيات النمذجة الأكثر استجابة وتكيفاً على مر التاريخ، استخدم المهندسون المعماريون الطبيعة للإلهام لتصميمات نماذج البناء ومقاربات الديكور. من هذه النقطة، بدأت عملية محاكاة الطبيعة وتم تطويرها في العديد من التخصصات وتم الاعتراف بها مؤخراً "BIOMIMICRY".

تعتمد "الخوارزميات على كيفية اشـــتقاق النظام البنائي لها من الطبيعة والتنوع في إيجاد الشـــكل وتحقيقها لظاهرة النمط تطرقت الدراسة الى خوارزميات فورونوي هندسة فورونوي هي ظاهرة تنظيمية يشار إليها أحيانًا باسم "قاعدة الطبيعة". يتكرر حدوثها في مجموعة متنوعة من المقاييس والمواد وأشـــكال الحياة. تم العثور على أمثلة مختلفة في علم الأحياء، وعلم المعادن من مبادئ التكوين، والهندســـة، والبناء مثل الإسفنج والهياكل العظمية والبلورات.

2.1.5. دراسة (Po-Hung Chiu, A, 2019)

بينت الدراسة وهي دراسة ماجستير في جزء منها على ان خوارزمية الليندر ماير هي أداة جديدة للمهندسين المعماريين تكسب المعماري المزيد من الفرص ليتم تصـــميمها بطرق معقدة أو عضـــوية أو إلكترونية باســـتخدام أدوات حدودية مثل (Rhino with Grasshopper). بينت الدراسة الى تطبيقات هذه الخوارزمية على مشروع مطعم من خلال المحاكاة للنظام الخوارزمي الشجري محققا مفهوم النمو الشـجري والتفرع مع التطرق الى عمليات التصـنيع، أكد البحث على تحديد النموذج الاولي لوحدة الشـجرة ثم تم تكراره حيث يعتبر التكرار هي الصـــفة المهيمنة بجميع العمليات الخوارزمية، وبين الباحث ان نظام الليندر ماير يمكن اشـتقاقه من تفرعات الشـــجرة تطرقت الدراسة الى ان من أدوات التشكيل والتصميم الخوارزمي هي خوارزمية الليندر ماير ان النموذج الفكري لاشتقاق الخوارزمية هي أسلوب التفرع الشجري وتكون الية التطبيق هي الية التكرار.

3.1.5. دراسة (Inés Caetano1, António Leitão,2018)

وضحت الدراسة أهمية الواجهات المعمارية في الوقت الحاضر من خلال تميزها بالأشكال والانماط المعقدة ويرجع ذلك أساسا الى استخدام أدوات التصميم الخوارزمي التي تعتمد على استخدام الأساليب الحسابية التي تعزز من كفاءة التصميم وتطوره وليس فقط عملية التصميم اقترح البحث اطار عمل مصمم لتبسيط الخوارزمية وتطبيقها في الواجهة وظروف عملية التصميم مع تقديم مجموعة من الأمثلة التي تم تطويرها باستخدام هذا الإطار مما يدل على قابليتها للاستخدام والمرونة في تصميم الواجهة، بينت الدراسة أيضا ان التصميم الخوارزمي وهو نهج تصميم قائم على الفكر الخوارزمي يولد اشكالا حسب أساليب وقواعد تختلف حسب نوع الخوارزمية اكدت الدراسة على إطار التعامل مع التصميم الخوارزمي للواجهة الذي يأخذ في الاعتبار عدة مراحل:

- سطح الواجهة بما في ذلك شكلها.
- وحدات التصميم التي معاً تخلق الكل نمط الواجهة.
- توزيع الوحدات.

4.1.5. دراسة (أيسر فاهم وناس المعموري، 2016)

ركزت هذه الدراسة على اولويات التقصي للمصممين والمهندسين عن انظمه جديده وخوارزميات واساليب جديده لدور الخوارزميات في التعامل مع الاشكال المجسمة بشكل طيع، وحسب الدراسة فإن الخوارزميات التوليدية هي منصة للبحث والتجربة والتحليل في التصميم وبحث ما هو(دور الحاسوب) في استكشاف الحلول التصميمية بالتجربة مع محاوله لدراسة النظم في الطبيعة جنبا الى جنب مع حلول الحاسوب في تقنيات تقصي الشكل لتطوير اداء المصمم وتقصي التسلسل لعمليات التصميم التي يربطها المنطق الرياضي. برزت مشكلة البحث على بيان تأثير خوارزميات التصميم البارومتري في بنائيه الشكل المعقد في اثراء التصميم، حيث افترض البحث ان خوارزميات التصميم البارومتري المرتبطة ببنائية الشكل المعقد يمكن ان توثر في اثراء التصميم بالمفاهيم التي تقوم عليها تلك الأنواع من الخوارزميات من صياغه جمالية غير مألوفة تتصف بالتعقيد والتفرد وتقديمها الفهم والتفسير للمنطق الرياضي والهندسي التي تقوم عليها عمليات التشكيل، اكدت الدراسة على ان من اهم سمات الناتج الخوارزمي هي تحقيق صياغة جمالية غير مألوفة وتحقيق التفرد والتعقيد بالاعتماد على أسس المنطق الرياضي للخوارزمية المختارة واثراء التصميم عن طريق المحاكاة من الطبيعة التي تستند عليه الخوارزمية.

5.1.5. دراسة (Borjian &Kazemi, 2015)

عرفت الدراسة ان التصميم الخوارزمي هو مجموعة فرعية من التصميم الرقمي قائم في أساسه على بنية خوارزمية واعتبرت الدراسة ان استخدام الخوارزميات والتقنيات الحاسوبية المتقدمة لا يهدف فقط الى تمثيل المكونات ولكن اتاحة فرصة جديدة للمعماري في عملية التصميم وبينت ان التفكير الحاسوبي وتصميم الخوارزميات يرتبط ارتباطا وثيقا بنتاج التصميم كما تبنت (TERZIDIS2006) في وجهة نظرها في ان الخوارزميات يمكن من خلالها محاكاة القضايا المتعددة وان النظام الخوارزمي واحد من اكثر الأنظمة لإنتاج التصاميم الكفؤة، اكدت الدراسة على ان هناك ثلاث وظائف للتصميم الخوارزمي: الأول تعديل على الشكل والثاني يعتمد على مفاهيم الشكل المتولد والثالث يعتمد عملية اشتقاق الشكل، وبينت ان المناهج الفكرية للخوارزمية والتي يمكن ان يتبناها المصمم سواء من داخل حقل العمارة او خارجها كالأنظمة الخوارزمية المشتقة من الطبيعة هي خوارزميات مستلهمة من النمل والنحل ومحاكاة الأنظمة الطبيعة كخوارزمية فورونوي وبينت ان مهام الخوارزمية هو (الترتيب وتفسير البيانات المدخلات والمخرجات وخزن الحلول واسترجاعها).

2.5. بناء الإطار النظري للتصميم الخوارزمي ودوره في تطوير الواجهات المستجيبة

تمكن مما سبق التوصل الى اهم مفردات الاطار النظري واهم الجوانب والمؤشرات الرئيسة والثانوية وقيمها الممكنة ومفرداتها التفصيلية وهي: قواعد الشكل في التصميم الخوارزمي مستويات التطبيق استجابة التصميم الخوارزمي، كما في الجدول (3).

الجدول (3): اهم مفردات الإطار النظري المستخلص، (المصدر: الباحثان).

المفردة الرئيسية	المفردة الثانوية		القيم الممكنة
قواعد الشكل في التصميم الخوارزمي	خوارزمية فورونوي	نمط المحاكاة	خلايا النحل
			فجوات الاسفنج المضلع
			نسيج الأوراق النبات
		قواعد الخوارزمية	طريقة التنظيم واضحة ومتماسكة الديناميكية
	خوارزمية ليندر ماير	نمط المحاكاة	تفرع شجري
			نمو وامتداد
		قواعد الخوارزمية	نمو وتغيير الأجزاء (العناصر الابتدائية تتضاعف وتنمو)
مستويات التطبيق	المستوى الشمولي		على مستوى المبنى ككل
			مستوى المشهد الحضري
	المستوى الجزئي		جزء من المبنى
			الواجهات

استجابة التصميم الخوارزمي	استجابة جمالية	تناغم مع الطبيعة
		تكوينات منفردة ومبتكرة
		خطوط متناغمة وسلسلة
		شفافية وتواصل بصري
		انسيابية ديناميكية وخفة
	استجابة بيئية	التكيف مع الاستجابة للمحفزات البيئية
		تظليل ذاتي
		تمدد وتقلص الخلايا
		التفاعل (زيادة عدد الخلايا)
		مسامية
		نفاذية
		مضاعفة عدد الطبقات للغلاف الخارجي

6. الدراسة العملية

بعد استخلاص البحث للمفردات الرئيسة تهدف هذه الفقرة الى التطرق لنموذجين لمباني مصممة بالاستناد الى فكر الخوارزمية (لخوارزمية الفورونوي والليندر ماير) ليتم فيما بعد تحليلها وفقا للمفردات المنتخبة (قواعد الشكل في التصميم الخوارزمي، مستويات التطبيق، استجابة التصميم الخوارزمي) ومن أسباب اختيار هذين المشروعين اذ يعدان من مشاريع العمارة التي شكلت بنيتها بواسطة الخوارزميات.

1.6. مشروع مدرسة جي آي، غاتكوبار في مومباي الهند 2010

الجدول (4): يوضح معلومات المشروع الأول، (المصدر: الباحثان).

المشروع	Mumbai School / Sanjay Puri GI School, Ghatkopar, مدرسة جي آي، غاتكوبار،
المصمم	Sanjay puri architects
رمز العينة	A
الموقع	مومباي الهند
السنة	2010
الوظيفة	مباني تعليمية مدرسة
نوع الخوارزمية	خوارزمية فورونوي

يقع المبنى في جزء سكني مكتظ بالسكان في مومباي، ويتراوح تصميمه من 7 إلى 15 طابقاً، جاءت فكرة انشاء المدرسة من تطوير الحي بأكمله، بما في ذلك موقع المدرسة من أجل خلق الخصوصية في المساحات المدرسية وجعل المبنى أكثر كفاءة، قام المصممون في Sanjay Puri Architects بالتفكير بفكرة مستوحاة من الطبيعة (الوحدات السداسية وتشمل المبنى بأكمله). والخوارزمية المرتبطة بالوحدات السداسية فهي خوارزمية فورونوي يُشتق المغلف من الاستجابة المناخية، وتسخير أشعة الشمس المباشرة وغير المباشرة وتعزيز التهوية الطبيعية – والعمل على توفير الطاقة سنويًا بحوالي 30٪، وبذلك تم اشتقاق الشكل للمبنى. تحصل واجهات الفصول الدراسية التي تواجه الشمال على دفء أشعة الشمس غير المباشرة (حسب تصميم الوحدات الخوارزمية للواجهة الشمالية)، ونظرًا لقيود التصميم العديدة كان على المشروع استخدام الارتفاع المتاح بالكامل البالغ 45 مترًا تاركًا المساحات المفتوحة الهامشية فقط من جميع الجوانب. حيث ان ساحات الفناء الداخلية ومساحات الشرفات ومناطق اللعب موزعة في الداخل على عدة مستويات لزيادة الإحساس المكاني وبالرغم من طبيعته الشاهقة ولكي ينفي أي نوع من الخوف من الأماكن المغلقة تم تصميم مساحات إضافية قابلة للاستخدام للجلوس أو اللعب أو القراءة كتمديدات للمساحات المفتوحة في كل طابق، ان تصميم الواجهة الخوارزمي للمدرسة يجعلها بيئة قائمة

بذاتها، محمية من التأثيرات المناخية اذ تحتوي الوحدات السداسية (اشكال خوارزمية فورونوي) على فتحات صغيرة على الجانب الجنوبي لتقليل اكتساب الحرارة إلى المبنى مع توفير تهوية لأن الشمس خلال معظم العام تكون على الجانب الجنوبي في هذا الموقع (تصغير الوحدات السداسية في هذه الاتجاه لتجنب دخول كميات كبيره من اشعة الشمس) بينما يهب نسيم الجنوب الغربي على مدار العام. اما نحو الجانب الشمالي، مع ضوء الشمس غير المباشر (تكبر نسبة الأشكال السداسية لدخول الاشعة غير المباشرة) تعمل الوحدات السداسية بشكل متباين في الواجهة على تنظيم درجة الحرارة الداخلية اعتمادًا على الاتجاه الذي تواجهه. تعمل الواجهة بأعلى مستوياتها لتوفير الطاقة يعد هذا المبنى باستخدامه لتقنية الخوارزمية فورونوي مبنى قابلة للتكيف مع التغيرات في الظروف المناخية مع جعل واجهات المبنى ديناميكية ونشطة، بحيث يمكنها التكيف مع الظروف المتغيرة وتحسين كفاءة الطاقة في المبنى، كما يوضح الشكل (11).

الشكل (11): صور متنوعة توضيحية لمشروع (GI School, Ghatkopar)، المصدر (Shivam . Ayya, 2021).

2.6. مطعم (The Tote) 2011

الجدول (5): يوضح معلومات المشروع الثاني، (المصدر: الباحثان).

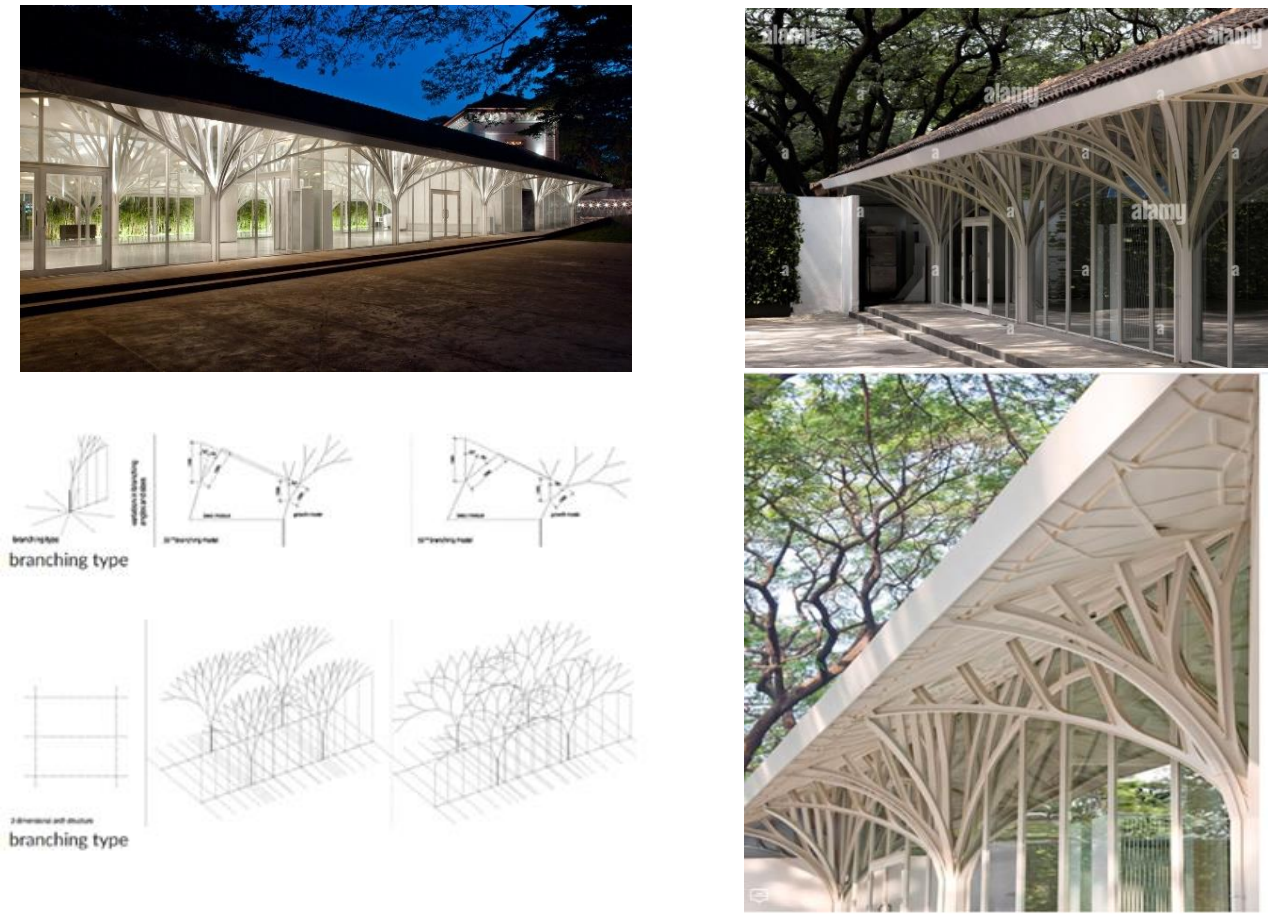
المشروع	Architects Serie Chris Lee, Kapil Gupta, Yael Gilad, Dharmesh Thakker, Suril Patel, Purva Jamdade, Advait Potnis, Vrinda Seksaria, Udayan Mazumdar, Mayank Ojha and Atish Rathod
رمز العينة	B
الموقع	مومباي الهند
السنة	2011
نوع الخوارزمية	خوارزمية الليندر ماير

صمم كريس لي وكابيل جوبتا من شركة (Serie Architects) بتحويل مبنى مهجور من الماضي الاستعماري لمومباي إلى قاعة حفلات ومطعم وبار يسمى (The Tote) ودمج سلسلة من المباني للمدينة والتي تم وضعها داخل مضمار سباق مومباي المبنى، اعتمد على الخوارزمية الليندر ماير المشتقة من الطبيعة (التفرع الشجري والنمو للنباتات) وهو أحد اهم القواعد الفكرية لهذه الخوارزمية، وهذا ما

يخلق نظام هيكلي جديد ذا جمالًا مذهلاً يسري في جميع أنحاء الفضاء. يكمن التحدي للمصممين في العمل من خلال نظام البناء المتوافق مع المهارات المحلية، قام المهندسـون المعماريون بتوفير مصـنعين للعمل بدقة عالية، السـقف المعلق عبارة عن ترتيب معقد لثلاثة أنظمة مبنية في ألواح الجبس والخشب الرقائقي. أنها تتيح المرونة لتغيير تأثيرات الإضاءة بناءً على نوع الحدث.

أكمل كريس لي وكابيل جوبتا من شركة (Serie Architects) قاعة مآدب في مومباي بالهند، والتي تحتوي على هيكل يشبه تفرع الأشـــجار. تم اقتراح هيكل جديد داخل غلاف المبنى القديم والنظام الهيكلي المعتمد هنا هو نظام فرع الشـــجرة، يتم تمييز انتشـــار النظام المتفرّع على طول المقطع الطولي للمبنى المحمي في نموه على طول المقطع.

ان خوارزمية ليندر ماير: تشـبه قاعدة عملها ظاهرة الانبثاق حيث تقدم هذه الظاهرة نظرة عميقة في الطريقة التي تتشـكل وتتحرك بها الاجسام والانظمة التي تعرض السلوك الجماعي في انماط قوية وغير متوقعة وتعتبر الخوارزمية تعبير عن العنصر الأساسي للتصميم اللاخطي في هذا النموذج وبروز ظاهرة الانبثاق ومنه اخذ الاتجاه مســـماه حيث تقدم هذه الظاهرة نظرة عميقة في الطريقة التي تتشـــكل وتتحرك فيها الاجسـام ومن خلال الدرجة المتغيرة للهيكل المتفرّع. حيث يتفرع الهيكل إلى أعضـاء هيكلية دقيقة عندما يقترب من السـقف. عندما تلمس الفروع السقف، يتم ثقب مستوى السقف بسلسلة من الفتحات المقابلة لتقاطع الفروع مع المدادة والعوارض الخشبية. تتحول هذه الفتحات إلى فجوات وشقوق ضوئية. تم تصميم هيكل الشجرة ليكون عبارة عن (جمالون) فولاذي ويكمن التحدي في العمل من خلال نظام البناء المتوافق مع المهارات المحلية. ان استخدام العمليات الحسـابية (Algorithm) في التصـميم يهدف لتحقيق عمليات النمو العضـوي للطبيعة بواسطة هذه الخوارزمية ودمجها بالعملية التصميمية حققت الجودة البيئية للتصميم الداخلي بدمج الطبيعة بالبيئة الداخلية واستخدام الخشب كخامة طبيعية صديقة للبيئة وبالتالي رفع كفاءة الوظيفة داخل الفراغ الداخلي، كما في الشكل (12).



الشكل (12): صور متنوعة توضيحية لمشروع (The Tote)، المصدر (Archdaily, 2009).

7. تحديد أسلوب القياس واختبار الفرضية

اعتمد البحث المنهج الوصفي التحليلي في التعامل مع المشاريع المنتخبة لاستكشاف تطبيق المؤشرات وذلك من خلال المعلومات المتوفرة عنه وتم وضـــع اســـتمارة التحليل لقيم تحقق المتغيرات حيث تم إعطاء القيمة (1) للقيم المتحققة و(0) للقيم غير المتحققة وذلك بالاستناد الى المعلومات المستخلصة من المشروع المنتخب للدراسة العملية، وكما موضح في الجدول (6).

جدول(6): جدول يوضح استمارة التحليل لقيم تحقق المتغيرات لمشروعي المدرسة والمطعم حيث تمثل القيمة (1) تحقق القيمة والقيمة (0) عدم تحقق القيمة، (المصدر: الباحثين).

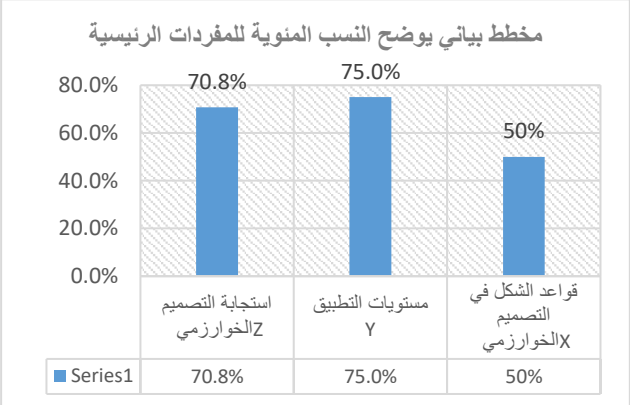
المفردة الرئيسية	المفردة الثانوية		الرمز	القيم الممكنة	نسبة المفردة الرئيسية		نسبة المفردة الثانوية	تحقق القيمة
					A	B		
قواعد الشكل في التصميم الخوارزمي X	خوارزمية فورونوي x1	نمط المحاكاة	X1-1	خلايا النحل	1	0	50	%50
			X1-2	فجوات الاسفنج المضلع	1	0	50	
		قواعد الخوارزمية	X1-3	طريقة التنظيم واضحة ومتماسكة الديناميكية	1	0	50	
	خوارزمية ليندر ماير x2	نمط المحاكاة	X2-1	تفرع شجري	50	1	0	%50
			X2-2	نمو وامتداد	50	1	0	
		قواعد الخوارزمية	X2-3	نمو وتغيير الأجزاء (العناصر الابتدائية تتضاعف وتنمو)	50	1	0	
مستويات التطبيق Y	المستوى الشمولي Y1		Y1-1	على مستوى المبنى ككل	1	1	100	%75
			Y1-2	مستوى المشهد الحضري	1	0	50	
	المستوى الجزئي Y2		Y2-1	جزء من المبنى	0	1	50	
			Y2-2	الواجهات	1	1	100	
استجابة التصميم الخوارزمي Z	استجابة جمالية Z1		Z1-1	تناغم مع الطبيعة	0	1	50	%70
			Z1-2	تكوينات منفردة ومبتكرة	1	1	100	
			Z1-3	خطوط متناغمة وسلسلة	0	1	50	
			Z1-4	شفافية وتواصل بصري	0	1	50	
			Z1-5	انسيابية ديناميكية وخفة	1	1	100	
	استجابة بيئية Z2		Z2-1	التكيف مع الاستجابة للمحفزات البيئية	1	1	100	72%
			Z2-2	تظليل ذاتي	1	0	50	
			Z2-3	تمدد وتقلص الخلايا	1	0	50	
			Z2-4	التفاعل (زيادة عدد الخلايا)	1	1	100	
			Z2-5	مسامية	1	1	100	
			Z2-6	نفاذية	0	0	50	
			Z2-7	مضاعفة عدد الطبقات للغلاف الخارجي	1	0	50	

لقد نصـت الفرضـية الأولى: اعتماد المشـاريع المعمارية على انماط لتصـميم الواجهة وفقًا لقواعد وآليات تشـكيلية خوارزمية متنوعة محققة استجابة بيئية اما الفرضية الثانية: تساهم الخوارزميات المشتقة من الطبيعة في إثراء التشكيل المعماري للواجهات

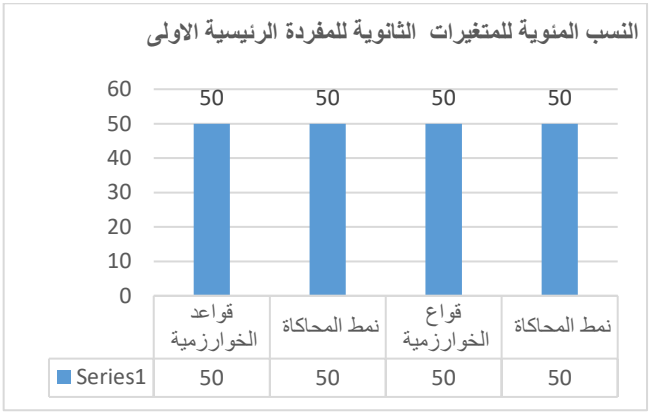
8. النتائج

اظهرت النتائج الخاصـــة بالتطبيق وجود تفاوت في نســـب تحقق المفردات فقد حققت مفردة مســـتويات التطبيق اعلى نســـبة وهي (75%) في حين حققت مفردة استجابة التصميم الخوارزمي ثاني اعلى نسبة وهي (70%) اما مفردة قواعد الشكل في التصميم الخوارزمي حققت (50%) وكما في الشكل(13) وفيما يلي توضيح المفردات الثانوية لكل مفردة رئيسية:

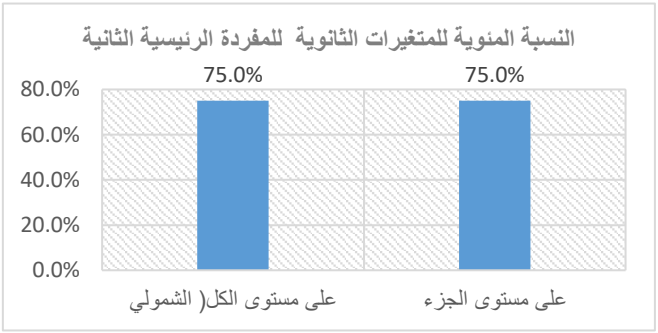
- النتائج المرتبطة بقياس مفردة قواعد الشكل في التصميمي الخوارزمي تم قياسها وفقا لمتغيرين خوارزمية فورونوي والتي تتضمن (نمط المحاكاة والتي حققت 50%وقواعد الخوارزمية حققت 50%) وخوارزمية الليندر ماير والتي تتضمن (نمط المحاكاة والتي حققت 50%وقواعد الخوارزمية حققت 50%) وكما في الشكل (14).
- النتائج المرتبطة بقياس مفردة مستويات التطبيق تتضمن مؤشرين رئيسين وهما على المستوى الشمولي وقد حققت 75% وعل المستوى الجزئي فقد حقق75%، كما في الشكل (15).
- مفردة استجابة التصميم الخوارزمي: حققت الاستجابة الجمالية التي تتضمن (تناغم مع الطبيعة، تكوينات منفردة ومبتكرة، شفافية وتواصل بصري، خطوط متناغمة وسلسة، انسيابية، ديناميكية وخفة) نسبة 70% اما الاستجابة البيئية والتي تتضمن (تظليل ذاتي، تمدد وتقلص خلايا، تفاعل – زيادة عدد الخلايا – مسامية نفاذية تكيف مع الاستجابة للمحفزات البيئية مضاعفة عدد الطبقات للغلاف الخارجي) فقد حققت 72% كما في الشكل (16) كما يوضح الشكل (17–18) نسب تحقق القيم الممكنة لمفردة الاستجابة الجمالية والبيئية.



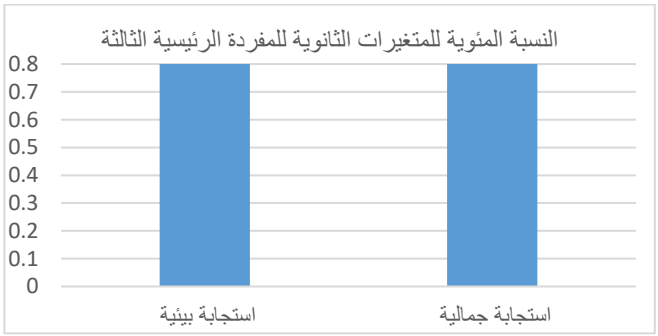
شكل (13): مخطط بياني يوضح النسب المئوية للمفردات الرئيسة، (المصدر: الباحثان).



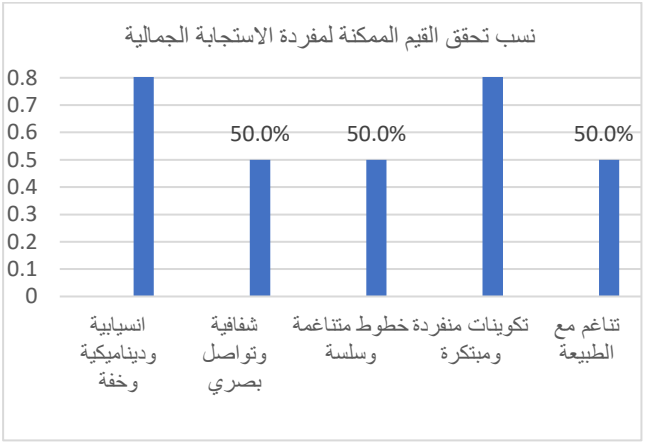
شكل (14): مخطط بياني يوضح النسب المئوية للمتغيرات الثانوية للمفردة الرئيسة الأولى (قواعد الشكل في التصميم الخوارزمي X)، (المصدر: الباحثان).



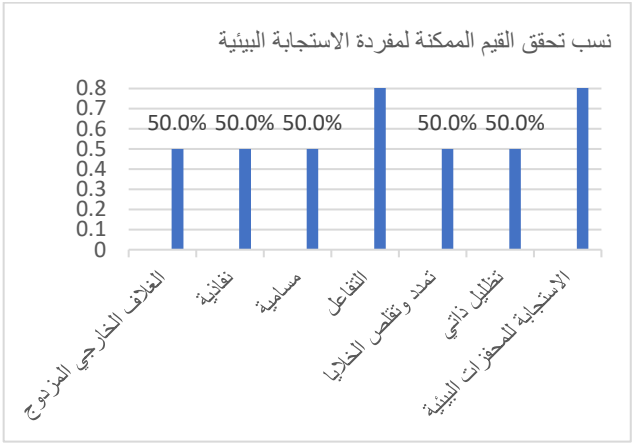
شكل (15): مخطط بياني يوضح النسب المئوية للمتغيرات الثانوية للمفردة الرئيسة الثانية (مستوى التطبيق Y)، (المصدر: الباحثان).



شكل (16): مخطط بياني يوضح النسب المئوية الثانوية للمفردة الرئيسة الثالثة (استجابة التصميم الخوارزميZ)، (المصدر: الباحثان).



شكل (17): مخطط بياني يوضح نسب تحقق القيم الممكنة لمفردة الاستجابة الجمالية، (المصدر: الباحثان).



شكل (18): مخطط بياني يوضح نسب تحقق القيم الممكنة لمفردة الاستجابة البيئية ، (المصدر: الباحثان).

1.8. تحليل ومناقشة النتائج

بعد قياس تطبيق المفردة الرئيسة الأولى ومفرداتها الثانوية (قواعد وانماط المحاكاة لخوارزميتي فورونوي والليندر ماير) تبين ان نمط محاكاة خوارزمية فورونوي بالاعتماد على خلايا النحل حققت نسبة عالية بالإضافة محاكاة نسيج أوراق النبات اما نمط محاكاة خوارمية الليندر ماير لنمو وتطور فروع الأشجار فقد حقق المطعم استجابة جمالية وبيئية من ناحية تحقيق الامتداد والنمو والتغيير، ان اختلاف في أنماط التشكيل للنتاج الخوارزمية وبما يختلف حسب قواعد الخوارزمية المختارة وتطوير الواجهات بجعلها مستجيبة بيئيا وجماليا وهذا يثبت صحة الفرضية الأولى باعتماد المشاريع المعمارية على قواعد واليات تشكيلية وتصميمية خوارزمية متنوعة حسب تنوع الخوارزمية نفسها.

- حقق مستوى التطبيق للفكر الخوارزمي في مرحلة التصميم على المستويين الشمولي والجزئي نسبة مرتفعة على المستوى الثلاثي الابعاد والثنائي الابعاد.
- ارتفاع نسبة الاستجابة الجمالية وذلك عندما يرتبط النتاج بمنهج خوارزمي رقمي تظهر نتاجات تحاكي المستقبل تحمل تناسب فكري وشكلي (وهذا ما يثبت صحة الفرضية الثانية بوجود اثراء للنتاجات الخوارزمية) حيث تعد الخصائص التشكيلية وخاصة (الواجهات) هي الأقرب إدراكا وتأثيرا في المتلقي واكثر فاعلية بوجود تشكيل ديناميكي.

كذلك ارتفاع نسبة الاستجابة البيئية الى نسب عالية لان الأساس الفكري للخوارزمية هي محاكية للبيئة الطبيعية حيث تبين المشاريع طبيعة المعالجات المستندة على أساس خوارزمي وكيفية المعالجة من ناحية بيئية تحديد كمية الإضاءة الطبيعية الداخلة والتحكم عدد وحجم وتوزيع الخلايا والتلاعب بها فالعمل يحقق الاستدامة ويعتمد على الطاقة الطبيعية كما في مروع مدرسة مومباي وكذلك تعزيز العلاقة بين الداخل والخارج كما في مشروع المطعم (THE TOTE). كذلك تحققت الاستجابة البيئية للمشاريع المنتخبة من حيث ارتفاع نسب المتغيرات كالمسامية والتظليل الذاتي وتمدد وتقلص الخلايا وتعدد الطبقات في مشروع المدرسة، وكذلك ارتفاع نسبة التفاعل الديناميكي والشفافية في مشروع المطعم.

9. الاستنتاجات

يتضح من مناقشة نتائج التطبيق ان الخوارزميات تعمل على توليد الكتل والاشكال من خلال الجمع بين مرونة التصميم الخوارزمي (AD) وبرامج المحاكاة التي تعمل على تحليل البدائل لتحديد حل يوفر الأداء الأمثل والنتائج غير المتوقعة، مما اثار اهتمام المصممين بسرعة وسمح لهم باكتشاف مناطق جديدة غير محددة في الهندسة المعمارية.

كما تعد الواجهات المعمارية واحدة من الجوانب الأساسية التي تشكل هوية المبنى وتعزز جمالياته. ومع تزايد الاهتمام بالاستدامة البيئية وتكييف المباني مع الظروف الجوية المتغيرة، أصبح تصميم الواجهات المستجيبة للبيئة أمرًا حيويًا لتحقيق تشكيل مستجيب بيئيا وجماليا كما استنتج البحث ان مجموعة من الخوارزميات التوليدية تم استخدامها في عملية تشكيل وتصميم النتاجات المعمارية لتضمنها

قواعد واليات معينة ومنها خوارزمية فورونوي وخوارزمية الليندر ماير. حيث تمتلك الخوارزميات (فورونوي والليندر ماير) قواعد واليات مما يجعلها صالحة في تشكيل وتصميم النتاج المعماري المستقبلي و تؤدي الى توليد نتاجات جديدة وديناميكية ومستجيبة بيئيا وجماليا وكذلك أظهرت الخوارزميات إمكانات في تطوير وتحسين استجابة الواجهات بتحقيق استجابة بيئية من خلال ارتفاع تحقق نسب مفرداتها الثانوية ومنها تظليل ذاتي، تمدد وتقلص الخلايا التفاعل (زيادة عدد الخلايا) تحقيق المســـامية تحقيق النفاذية ومضـــاعفة عدد الطبقات للغلاف الخارجي وبتحقيق اســـتجابة جمالية من خلال ارتفاع تحقق نســـب مفرداتها الثانوية، تناغم مع الطبيعة تكوينات منفردة ومبتكرة، خطوط متناغمة، وسلسلة شفافية وتواصل بصري، انسيابية ديناميكية وخفة.

10. التوصيات

- يوصي البحث بضرورة استخدام التصميم الخوارزمي والاستفادة من إيجابياته وتطبيقه من خلال برامج الحاسبة الالي المختلفة.
- ضرورة الاطلاع المستمر على ما يستجد من مناهج التصميم او تكنولوجيا النتاج والتصنيع لتحديث الفكر التصميم في الاكاديميات المتخصصة بتعليم التصميم.

References:

Abdel Aziz, D. A., (2017), "The effect of Voronoi diagrams on the construction of ceramic form", Architecture, Arts and Humanistic Science Magazine, Issue 8, pp.217, https://platform.almanhal.com/Reader/Article/108499 .

Abdel-Jalil, W. D., (2018), "Generating the Whole and Its Relation to the Structure in Digital Architecture", Babylon University Journal of Pure and Applied Sciences and Engineering Sciences, Vol. 26, Issue 2.

Abdel Rahman, J. D., (2018), "A study of the effect of using the algorithmic system on generating ideas in interior design and furniture", Architecture and Arts Journal, Issue 11, Part One.

Alsayed, A. M., (2015)," Catalogs and Mathematical Algorithms as an Introduction to Enriching Digital Graphic Arts", The First International Conference on Fine Arts and Community Service, Luxor, Vol.1, P6.

Al-Dabbagh, Sh. (2010)," Architecture with multiple sensory responses, an analytical study of the internal space remaining in memory in closed marketing centers", PhD thesis, Department of Architecture.

Aba Hussein. H, F, (2020)," The Fractal Technique and its Employment in the Production of Abstract Digital Photographic Works", Journal of Arts and Human Sciences, vol. 3, Issue 6, p. 132.

Ashton, R. M., (2008), "Melbourne Recital Centre by Ashton Raggatt Mcdougal" "www.designboom.com/architecture/preview-melbourne-recital-centre-by-ashton-raggatt-mcdougal/ in collabo (Accessed: 10/08/2020).

Bagul, P.G.& UKeN. J., (2014) Algorithm in Architectural Design, International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering, vol.4, pp126-130.

Chris L. and Kapil G, (2009). "The Tote / Serie Architects" 08 Dec 2009. ArchDaily. (Accessed: 04/10/2021). https://www.archdaily.com/43090/the-tote-serie-architects , ISSN 0719-8884.

Caetano, I., Leitão, A. (2019), "Integration of an algorithmic BIM approach in a traditional architecture studio", Journal of Computational Design and Engineering 6, p. 327–336.

Delaney, T. (2022)," voronoi-diagrams-architecture-designnhabitat.com" www.design-milk.com/voronoi-diagrams-architecture-designnhabitat.com/underground-eco-resort-and-spa-is-dug-into-the-earth/ (Accessed: 21/03/2021).

El Seady, R. M., A.O.E.,(2019)," Parametric Design as an Approach to Inspire Nature in Product Design," Journal of Architecture Arts and Humanistic Sciences, vol.4, issue 14, https://doi.org/10.21608/mjaf.2019.25765 .

Fahem, W. E., (2016)," Parametric Design Algorithms as an Introduction to Enriching Structural Concepts of Complex Shape", Helwan University, p3.

Hatamal, R. F., (2015),” Beauty standards and methods of measuring them in contemporary architecture”, doctoral thesis submitted to the Faculty of Engineering, Department of Architecture, University of Damascus.

Hassell, M., (2002),” world-architects.com” www.world-architects.com/pt (Accessed: 10/08/2020).

Hu, C., & Fox, M. A. (2003).” Starting From the Micro a Pedagogical” Approach to Designing Responsive Architecture.

Ibrahim, Abdel Rahman, M. M. D, (2018),” The concept of simulation and its impact on interior design and furniture in the light of digital technologies”, Al-Amar Wal-Fonoun Magazine, the tenth issue of vol. 3, p. 600.

Ibrahim, M. M. (2017),” The concept of biomimicry and its impact on interior design and furniture in light of digital technologies”, Architecture and Arts Magazine, Issue 10, p. 597.

Joseph.A.S. (2022)” eskurtze-parkea-bilbaos-regional-gateway” www.iaacblog.com/programs/eskurtze-parkea-bilbaos-regional-gateway (Accessed: 25/08/2022).

Marcos Carlos, I., (2010),” Complexity digital consciousness and open form: anew design paradigm,” conference ACADIA 10life information on responsive information and variations in architecture, New York, P.81-87.

Mohamed, D. (2018). “'The Effect of Using the Algorithm System on the Generate Ideas in Interior Design and Furniture”, Issue 11 (1), pp. 238-254'.

Mohamed, E, O., Rana, M. (2017).” Voronoi’s structural systems as an artistic approach to drawing and painting”, Architecture and Arts Journal, Issue 7, Volume 2, p.33.

P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, (1991),” The Algorithm Beauty of Plants “Published in The Virtual Laboratory - https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8476-2 .

Raafat, A.(2009),” The Trilogy of Architectural Creativity, Content and Form Between Rationality and Sentimentality”, Reconsult Research Center Vol., Egypt.

Shivam, Arya, November 9, (2021), “Kinetic Facade: Evolution and Design Process “www.archdaily.com/43090/the-tote-serie-architects, (Accessed: 23/10/2022).

Terzidis, Kostas, (2006),” Algorithmic Architecture”, USA: Elsevier Ltd.

Wysokińska E, ET.AL, (2013), “Discretization of structural surfaces in the development of modern architecture”, Conference materials: “New Trends in Engineering Sciences” at the 3rd Conference of Young Doctoral Students: Impact of Young Scientists on Achievements in Polish Science” in Wroclaw.