Journal of
Design Sciences and Applied Arts

الاستفاده من برنامج التصميم التوليدي لإنجاز بدائل لتصميم المنتج الصناعي

رحاب محمود عبدالعظيم عبدالله

مدرس بقسم التصميم الصناعى - كلية الفنون التطبيقية - جامعة بنى سويف

Submit Date: 2021-10-30 09:33:54 | **Revise Date: 2021-12-04 14:39:48** | **Accept Date:2021-12-10 05:51:05**

DOI:10.21608/jdsaa.2021.103473.1143

ملخص البحث:-

يطالب المصممين دوماً بإنجاز مهامهم بشكل أسرع وبتكلفة أقل، فأصبح من اللازم استكشاف التقنيات والأدوات المساعده لتحقيق هذا التوازن وفي ظل التوجه إلى الرقمنه تصميماً وتصنيعاً.فكان من نتائجه ظهور متلاحق لبرامج ذكيه للتصميم ، ليس في الرسم فحسب بل في اقتراح بدائل للتصميم في ظل مدخلات وبارامترات الأهداف لهذه البرامج وهو ما يشير إليه مفهوم (Generative Design) التصميم التوليدي وبتسابق مجالات التصميم المختلفه للاستفاده من هذه البرامج بتوظيفها في تخصصاتها واتمام وضع الأفكار بشكل أسهل وأسرع وأغنى استناداً إلى هذه البرامج الذكيه، كان من الضروري دراسة كيفية الإستفاده من هذه البرامج والمرتبطه بتكنولوجيا التصنيع الحديثه في تخصص التصميم الصناعي، والاستفاده منها توفيراً للوقت وتقليل عبء الأعمال المتكرره، ومن الملاحظ تسابق شركات البرمجه في اضافة تحديثات مميزه لبرامجها، أو اطلاق برنامج جديد يتيح خاصية التصميم التوليدي، ويمكن القول أن ما يتم يهذا الصدد هو حقبه جديده في عالم التصميم. لذا دعمت شركة AutoDesk برامجها بخاصية التصميم التوليدي استنادا على اسهامات الذكاء الإصطناعي بأن يمكن للبرنامج اقتراح العديد من البدائل المختلفه للتصميم استنادا على بارامترات وبيانات يقوم المصمم بتغذيته إياها استناداً على الفكره الأساسيه وتكنولوجيا التصنيع المتوقعه للنموذج الجاري تصميمه، فيقوم البرنامج بتحليل هذه البيانات ومطابقتها بالتصميم الأولي، وفي ذلك دعماً هاماً يتيح للمصمم التركيز على عمليات التصميم اجمالاً وبالتالي الحصول على النتيجه النهائيه بشكل فعال. لذا يتيح البحث تصوراً عن توظيف برنامج التصميم التوليدي لخدمة المصمم الصناعي في تخصصه الدقيق بإعادة معالجة الأسطح لهيكل بنائي كأحد الحلول وتقليل عدد الأجزاء المجمعه في ظل تكنولوجيا التصنيع الحديثه مؤدياً إلى تأثير إيجابي على الابتكار والإنتاجية على حد سواء.

الكلمات المفتاحية:-

Generative Design (التصميم التوليدي) Fusion 360 (برنامج فيوجن 360) , التصميم التوليدي في التصنيع، البرامج المساعده لبدائل التصميم، تطبيقات التصميم التوليدي.

(1) موضوع البحث: Subject of The Research

يجب الربط بين التكنولوجيا المعاصره والأدوات المساعده -خاصةً الرقميه- لعملية التصميم لما لها من الأثر الفعال في تطوير وتجديد طرق تفكير المصمم وحسن استغلاله لهذه الإمكانيات في اجراءات التصميم بهدف تحسين الجوده، أو الدقه ، أو تقليل زمن عمليات التصميم وفي ظل توجه الصناعه إلى استبدال طرق التصنيع التقليديه بطرق التصنيع المضافه أصبح من الضروري مجاراة وتوظيف برامج التصميم التوليدي والاستفاده منها في مجال التصميم الصناعي،كما هو الحال في التصميمات المعماريه والهندسيه .

(2) مشكلة البحث: The Problem of The Research

تتمثل مشـــكلة البحث في قلة وجود بحوث اجرائيه لكيفية توظيف التصـميم التوليدي في برامج التصـميم بالحاســب مثل Fusion 360في تطبيقات التصــميم الصـــناعي وتوضـــيح مدى فعاليته في أداء مهام المصمم الصناعي ومساعدته في العمليات المتكرره.

(3) هدف البحث:The Aim of The Research

يهدف البحث إلى تشجيع المصممين على دمج برمجية التنظيم التوليدي في سير العمل الحالي مع الأساليب الجديدة،وكيفية الاستفاده من برنامج التصميم التوليدي في خدمة عملية التصميم الصناعي وتحسين أداء المصمم الصناعي ودعمه ليس فقط في مرحلة النمذجه، بل أيضاً في خلق الأفكار.

(4) أهمية البحث: Importance of The Research

تتمثل في توضيح كيفية الاستفاده من مفهوم التصميم التوليدي وإدراجه ببرنامج Fusion 360 في تطبيقات تصميم المنتج الصناعي ودعم مهام المصمم الصناعي.

(5) منهج البحث: Methodology of The Research

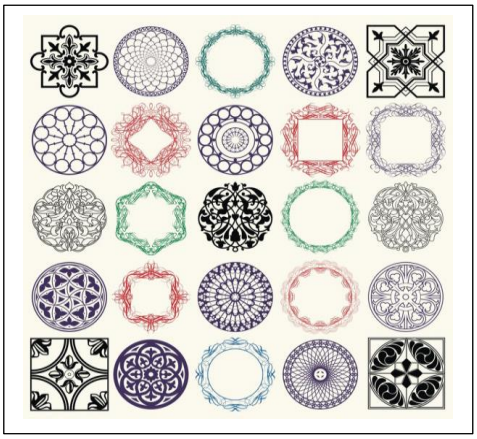
اتبع البحث المنهج الاستقرائي بدراسة وتحليل تأثير التصميم التوليدي ودراسة الحاله للاستفاده به في مجال التصميم الصناعي.

(6) فرض البحث: Hypothesis of The Research

إذا أمكن التعرف على مفهوم التصميم التوليدي، مع تحديد مستوى تكنولوجيا التصنيع وتأثيرها على بناء المنتج الصناعي، والتعرف على امكانات برنامج Fusion 360 المدرج به Generative Design ، فإن ذلك يزيد من نجاح العمليه التصميميه، ويقلل الحاجه إلى العديد من النماذج الأوليه،كما سيساعد في خلق بدائل تصميم مبتكره ذات بناء متشعب يصعب بناءه بالعقل البشري في وقت قياسي على النحو الذي يوفره البرنامج ودون الخلل ببارمترات التصميم من قوه أو متانه أو أي متطلبات سبق وأن حددها المصمم.

مقدمه: التصميم بمساعدة الحاسب.

ظهر مفهوم النظم التوليديه منذ فترة طويلة من مختلف الحضارات على مر التاريخ .ولعل الفن الإسلامي هو أفضل الأمثلة على كيفية استخدام البشر للهندسة لفهم العلاقات بين البشر والطبيعه، الشكل رقم (1) تمثيل لذلك.



الشكل رقم (1) يوضح البناء الهندسي للفن الإسلامي بتكرار العناصر (عناصر_الفن_الإسلامي/mawdoo3.com)

وكان استخدام أجهزة الكمبيوتر في الستينيات لتوليد هندسيات معقدة هو أصل الفن التوليدي .وبعد عقدين من الزمن توسع استخدامه في صناعة العمارة والهندسة والبناء(AEC) ، مما أدى إلى ما يعرف اليوم باسم التصميم التوليدي .وبما أن الحوسبة الرقمية أصبحت سائدة في الوقت الحالي، أصبحت الأتمتة الآن مكوناً رئيسياً لتوليد حلول معقدة مثل تلك التي يستند إليها التصميم التوليدي .حيث تعمل الأتمتة على تقليل عبء أداء المهام المتكررة، مما يسمح للمصمم بتركيز طاقته وفكره على أنشطة أكثر جدوى تعمل على تحسين نوعية الحياة. وتتجاوز فائدة التشغيل الآلي لمجرد أداء المهام المتكررة، وفتح الباب أمام تحقيق المهام المعقدة التي قد يكون من المستحيل على العقل البشري القيام بها بنفسه.

يقوم التصميم التوليدي لكونه نوع من أنواع الذكاء الاصطناعي على تطوير قواعد شكل فريدة تستند إلى ثلاثة أنواع من المعلومات :

مجموعة من القواعد ، وطريقة لتطوير الأشكال ، والأهداف التي يجب تحقيقها من خلال الأشكال الناتجه، ويمكن أن تتضمن الأهداف عوامل مثل الكتلة أو القوة أو عمليات التصنيع . (Awan &Khan,2018, p.2)

يوفر التصميم التوليدي العديد من الفوائد، بما في ذلك تطوير الأشكال ذات الأشكال الهندسية الفريدة التي تتماشى مع سياقها وتحسين الأداء الميكانيكي، ويمكن للتصميم الصناعي تبني مبادئ التصميم التوليدي، مع التركيز على النمط الجمالي الفريد الذي يأتي من الأشكال العضوية المستوحاة من الطبيعة .كما تمكن المصممون من دمج الأتمتة في عمليات التصميم ، والتي

توفر سير عمل مبسط وهندسات معقدة مع إمكانية أن تكون فعالة ومرنة ، مما يوفر مزايا في الأداء الميكانيكي وكذلك في توفير الخامات.(Awan &Khan,2018, p.2)

ويمكن أن يتم دمج التصميم التوليدي إما كأداة تنفذ الرؤية التي لدى المصمم لمنتج معين ، أو كخلق أشكال جديدة تلبي الأهداف التي تحددها مشاكل التصميم .

يقدم البحث توضيحاً لاستخدام استراتيجية التصميم التوليدي في مجال التصميم الصناعي و دمجها في العمليات الإبداعية لتطوير المنتجات. وعلى المصممين أن يدركوا أن توطيد التصميم التوليدي كعنصر رئيسي في عملية التصميم سيساعده في تطوير الحلول.

أطلقت شركة البرمجيات أوتوديسك برامج تفاعليه بهدف خلق تصميمات توليديه تسمح للمصممين بتحديد الأهداف والمعايير الوظيفيه لتصاميم CAD ، ومن ثم وجود برنامج كمبيوتر قادر على توليد بدائل للحلول المحتملة.من الفكره الرئيسيه للتصميم. هذه العملية تمثل تحولاً جذرياً لشكل التعاون بين المصمم والآله، حيث أن الكمبيوتر لم يعد مجرد أداة رسم التصميم، ولكن بل يقترح تصميمات بديله .في ظل مسئولية المصمم عن سائر عمليات التصميم ، وتحديد الحلول المناسبة لمزيد من الصقل والتنفيذ.
(https://www.autodesk.com/solutions/generative-design)

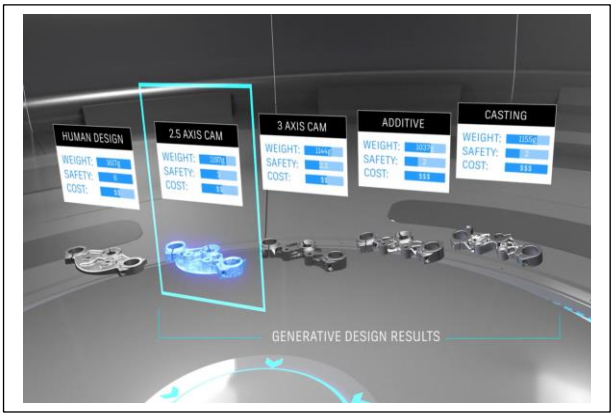
التصميم التوليدي "Generative Design"

1. مفهوم برنامج التصميم التوليدي

التصميم التوليدي هو نهج قائم على التطور التكنولوجي الخوارزميات المتقدمة التي تولد تلقائيًا أشكالًا مختلفة من النماذج ثلاثية الأبعاد بناءً على مدخلات محددة. يؤدي هذا إلى إنشاء المئات من التصميمات المختلفة دون الحاجة إلى إنشاء نموذج أولي مادي واحد - مما يعني أنه يمكن اختيار تصميم متقدم استنادًا إلى جميع المعايير الخاصة بموضوع التصميم وحفظ كميات كبيرة من الموارد التي يمكن إنفاقها على الاختبار والنماذج الأولية، ويقدم التصميم التوليدي تقنية تحاكي نهج الطبيعة التطوري للتصميم. يبدأ بأهداف التصميم الخاصة ثم يستكشف جميع التبادل الممكنة للحل للعثور على الخيار الأفضل. باستخدام الحوسبة السحابية ، ويتنقل برنامج التصميم التوليدي بسرعة عبر الآلاف - أو حتى الملايين - من خيارات التصميم ، ويختبر التكوينات ويتعلم من كل تكرار ما يعمل وما لا ينجح. تتيح هذه العملية للمصممين إنشاء خيارات جديدة تماماً ، تتجاوز ما يمكن للمصمم وحده إنشاؤه ، للوصول إلى التصميم الأكثر فاعلية. (Tang, Cui,2014,p. 3)

وهو شكل من أشكال الذكاء الاصطناعي الذي يستفيد من قوة السحابه لدوليه للمعلومات "cloud" وتعليم الآله machine learning" مع تسريع عملية التصميم بالكامل. استناداً على تغذيته بفكره واحده، يقوم بإنشاء العديد من بدائل التصميم عالية الأداء بسرعة والتي قد لا يفكر بها المصمم وعليه أن يختار التصميم الأنسب لاحتياجاته من هذه البدائل.فكرة عمل البرنامج تقوم على عمل استكشاف للتصميم. يبدأ بأن يُدخل المصمم أهداف التصميم في البرنامج ، ومحددات التصميم والتعليمات مثل الأداء أو المواد الخام ، وطرق التصنيع، والتكلفة. يستكشف البرنامج جميع التباديل الممكنة للحل، ويولد بسرعة بدائل التصميم. فهو يختبر ويتعلم من كل تكرار فيمكنه تحديد ما يصلح للمطلوب وما لا يصلح. والشكل رقم (2) يمثل قدرته على طرح بدائل للفكره الأوليه، واختيار أفضل الحلول بناءاً على محددات التصميم كالوزن والتكلفه.

ما يحدث اليوم يوفر فرصًا كبيره لمزيد من التحسين والتصميم والتغيير.من خلال تآزر حقيقي بين علوم المواد والتصنيع والتكنولوجيا - حيث تتعاون معًا لإطلاق العنان لأشياء لم تكن ممكنة من قبل.
https://www.autodesk.com/solutions/generative-design)



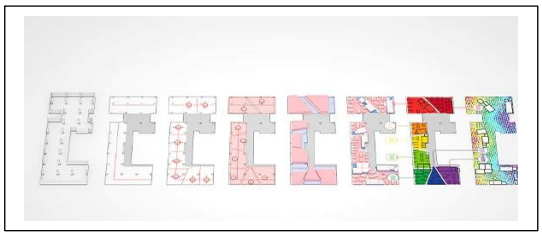
الشكل رقم (2) يمثل قدرات برنامج التصميم التوليدي لطرح بدائل مختلفة اقتراناً ببارامترات التصميم.
(https://www.autodesk.com/solutions/generative-design)

2. مجالات تستفيد من التصميم التوليدي

يدمج المبتكرون الرائدون في العديد من المجالات كالطيران والنقل والهندسة المعمارية والبناء والرعاية الصحية هذه الأداة في خطة تطوير منتجاتهم لاكتشاف نماذج أولية وعمليات جديدة إبداعية ومستدامة واقتصادية وآمنة. وتتوسع تطبيقات التصميم التوليدي بسرعة بفضل أدوات البرامج الجديدة والمواد الجديدة وكذلك الأجهزة الجديدة. نظرًا لقدرتها على تحسين المنتجات والعمليات والمساحات وتحويلها.

1.2 في المجال العماره

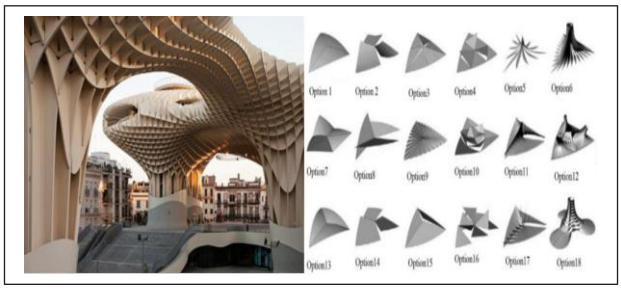
كما هو موضح في التخطيط بالشكل رقم (3) ، يمكن أن تساعد تقنية التصميم التوليدي في استكشاف حلول للأهداف والقيود للمساحات والفراغات المعماريه.(Agkathidis,2016, p.4)



الشكل رقم (3) تخطيطات معماريه مقترحه من خلال برنامج – Revit Generative Design
(https://www.autodesk.com/solutions/generative-design)

مثال آخر هو المقر الإداري للبترول البريطاني الذي صممه Adams Kara Taylor (آدامز كارا تايلور)، والذي يمكن

رؤية هيكل السقف الخاص به في العديد من الاختلافات في الشكل رقم (4). تضمنت المعايير،على سبيل المثال، الحصول على نفس القدر من ضوء الشمس الممكن داخل فناء المبنى. (Trautmann,2021,p.91)



الشكل رقم (4) بدائل تصميميه بالاستعانه بالتصميم التوليدي تحقق معيار دخول الشمس لداخل مقر إداري بريطاني(Trautmann,2021,p.91)

2.2 في مجال التصنيع.

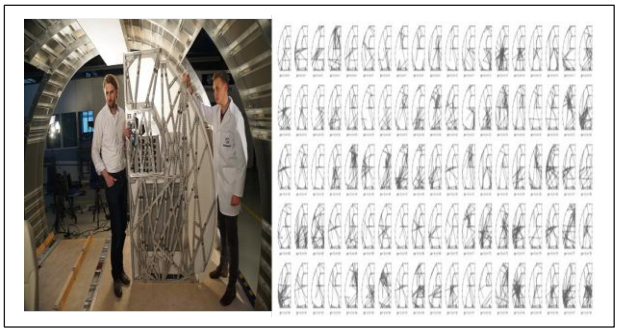
أولاً: السيارات

من المكونات خفيفة الوزن إلى توحيد الأجزاء ، يتم استخدام التصميم التوليدي لـ Autodesk من قبل الشركات التي ترسم مستقبل صناعة السيارات. يمثل شكل رقم (5) أحد نتائج استخدام التصميم التوليدي على تصميم السياره.

الشكل رقم(5) استخدام التصميم التوليدي في تصميم السيارات. (/https://3dprint.com/201321/hackrod-equity-crowdfunding)

ثانياً: الطائرات

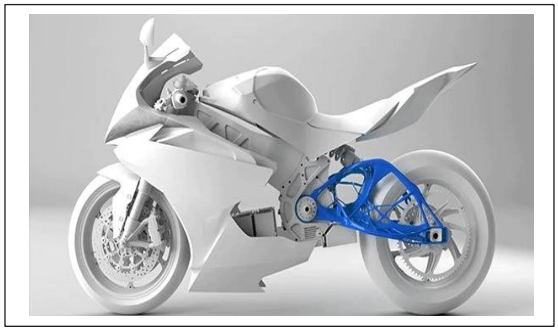
من خلال أهداف التصميم والتصنيع المتعلقة بإنقاص الوزن والتأثير البيئي والسلامة ، تتبنى صناعة الطيران تصميمًا توليديًا لاستكشاف خيارات التصميم الجديدة وتحسين الأداء. استفادت شركة Airbus من امكانيات التصميم التوليدي في تخفيف وزن باب طائرتها A320. التصميم الناتج هو هيكل شبكي يبدو عشوائيًا ، ولكن تم تحسينه ليكون قويًا وأخف بنسبة 55% ، ولاستخدام أقل كمية من المواد للبناء.الشكل رقم(6) يوضح البدائل التي قدمها البرنامج، والتصميم الذي اختارته الشركه وقامت بتنفيذه.(Trautmann,2021,p.89)



الشكل رقم(6) باب طائره أخف بنسبة 55% باستخدام التصميم التوليدي. (Trautmann,2021,p.89)

ثالثاً: المركبات الخفيفه.

من أهم متطلبات المركبات تحقيق المتانه والثبات لضمان السلامه في ظل خفة الوزن، وهو أهم ما وفرته تطبيقات التصميم التوليدي، ينقل الشكل رقم (7) نموذجاً لدراجه بخاريه، تم دمج أجزاء هندسيه فيها بعد أن وفرت طرق التصنيع الحديثه إمكانية تصنيعها بالشكل الموضح في الصوره، تقليل الأجزاء المجمعه القريبه من نقاط تحميل يساهم في زيادة عامل الأمان والمتانه للمنتج الصناعي.



الشكل رقم (7): دراجه بخاريه تم معالجة بعض أجزائها باستخدام Generative Design (https://www.autodesk.com/solutions/generative-design)

ويحمل التصميم التوليدي شقين في التعامل مع وضع حلول للبدائل التصميميه:

أولاً: شق خاص بحلول "إزالة المساحات الغير مؤثره على بناء التصميم كنقاط التحميل" مما يوفر كثيراً في الخامات ويقلل الهادر، وبالتالي يقدم سعراً مناسباً للمنتج. كما قد تحقق هذه المعالجه خفة الوزن التي قد تكون متطلب هام للحركه في حالة منتج كالدراجات بأنواعها،كما هو موضح بالشكل رقم (8) الذي يمثل بدائل حلول مختلفه للدراجه،بإزالة المساحات التي لا تؤثر على ثباتها وأدائها الوظيفي بالابتعاد عن نقاط التحميل في بناء الدراجه التي هي العامل المشترك بين كل البدائل، وكأن البدائل عمليات توصيل مختلفه لهذه النقاط، ولكن بهيكل مختلف لكل حل على حده. أو الطائرات مع تقليل الانباعاثات كأحد أهم نتائج خفة الوزن مما يساهم ذلك في الحفاظ على البيئه (Zimmermann,Chen,2017,p21).

الشكل رقم(8) بدائل حلول لتصميم دراجه من خلال التصميم التوليدي.
(https://www.autodesk.com/solutions/generative-design)

ثانيا: الشق الآخر هو وضع بدائل في ظل متطلبات ومحددات التصميم وهو ما يوفر وقت للمصمم ليقوم بمهامه الأخرى.

4. فكرة البناء التوليدي

غالبًا ما تنشئ خوارزميات التصميم التوليدية أشكالًا عضوية عالية الكفاءة مع دعم شبكي يكون مكلفًا أو حتى من المستحيل تصنيعه باستخدام تقنيات التصنيع التقليدية مثل القولبة بالحقن أو أدوات التصنيع الطرح مثل التصنيع باستخدام الحاسب الآلي. تعتبر أدوات التصنيع المتقدمة مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد ضرورية لأنواع التطبيقات الحساسة للأداء حيث يكون هذا التحسين مقنعًا(Awan,Khan , 2018,p13)

تعمل الطباعة ثلاثية الأبعاد بشكل جيد مع التصميم التوليدي لأنها توفر وسيلة مرنة وسريعة لإنتاج نموذج ثلاثي الأبعاد عالي الدقة لواحد أو أكثر من تكرارات التصميم لمنتج نهائي فعال من حيث التكلفة. بشكل عام ، من الناحية الاقتصادية ، تزداد فعالية تكلفة الطباعة ثلاثية الأبعاد جنبًا إلى جنب مع تعقيد تكرار التصميم.(Awan,Khan , 2018,p14)

تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد أكثر تنافسية من حيث التكلفة بأحجام إنتاج أقل لأنك لا تحتاج إلى الوصول إلى اقتصاد الحجم لتعويض تكاليف الإعداد. لذلك ، فإنه يسهل التخصيص الشامل الذي يجعل التصميم التوليدي ممكنًا. مع استمرار انخفاض تكلفة الطباعة ثلاثية الأبعاد وزيادة تنوع المواد ، أصبحت الطباعة ثلاثية الأبعاد عملية للأجزاء الصغيرة والمتوسطة الحجم لمزيد من التطبيقات.

سيطرت فكرة التصميم التوليدي على خيال المصممين الصناعيين لعقود استخدموه بشكل يدوي .حيث قاموا بعمل أشكال فردية مع اختلافات تدريجية من الشكل أو النسبه، من أجل تحقيق تدفق انتقالي عضوي وتتيح برامج التصميم بالحاسب للمصمم بتطوير مجموعات من القواعد والسلوكيات التي تتحول إلى قواعد شكل مثيرة للإهتمام . (Lobos,2018,P.18)

وقد حدت المعرفة العالية اللازمة للبرمجة الناجحة من اعتمادها عبر مجالات التصميم مثل برامج جراسشوبر Grasshopper وديناموDynamo والتي وجدت طرقا فعالة لجعل البرمجة أكثر سهولة.

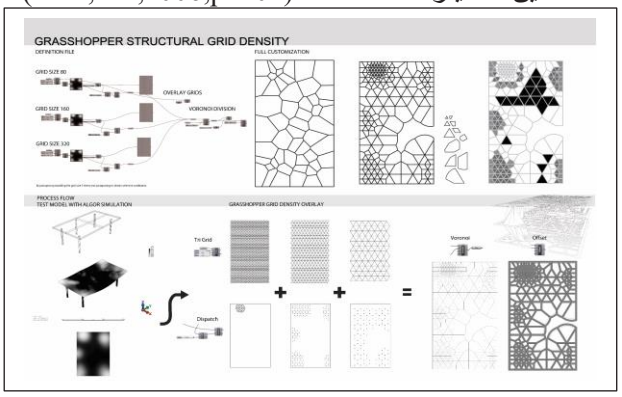
مما يجعل النظام توليدي أسهل للفهم .بالإضافة إلى ذلك ، ترتبط هذه البرامج بسهولة لتطبيقات CAD أخرى مستخدمة في التصميم والتصنيع ، مما يجعل عملية التصميم والمحاكاة والتصنيع ، أكثر تكاملاً وتبسيطاً. الشكل رقم (9) تمثيلاً لطريقة بناء برنامج Grasshopper للأسطح الشبكيه.

في عام 2018 أطلقت شركة أوتوديسك برنامج التصميم التوليدي الخاص بها، كجزء من Fusion 360، كأداه تعمل بشكل مختلف عما كانت عليه في برنامجي جراسشوبر وديناموء بجعل العمليه أقرب إلى ما هو تصميم توليدي حقيقي قابل للتطبيق.

استناداً إلى الذكاء الإصطناعي يتم تغذية هذا البرنامج بالبارامترات والأهداف المحدده من المصمم، ويخلق كميات كبيره من قواعد الشكل من الصفر. كقائمة أمنيات للأهداف الواجب تحقيقها في ظل الاحتفاظ بالبيانات والنقاط والأشكال والمحددات التي يجب الحفاظ عليها وتجنبها عند إنشاء نموذج جديد. والأهم من ذلك يتم تعيين الأهداف بحيث يكون التصميم قادراً على دعم أحمال محدده أو قوى ماديه.

بمجرد اكتمال المدخلات، يتناول الحاسب هذه المعلومات ويولد تلقائياً بدائل عديده للتصميم، كلها تحل المشاكل التصميميه وبأسلوب فريد، وكلما طال فترة تشغيل البرنامج ، كلما زادت عدد التكرارات التي سيتم إنتاجها بواسطة الكمبيوتر، بعدها يتحقق المصمم من النتائج والتي تختلف في الشكل والمواد المستخدمه، والقوه وعمليات التصنيع، على الرغم أنها جميعها تستوفي المعايير الأساسيه التي وضعها المصمم. وتأتي مهمة المصمم في هذه المرحله إلى عملية اختيار أفضل الحلول التي يرى امكانية تطبيقها.
https://dfabnus.wordpress.com/2011/02/10/mass-customized-voronoi-grid-system

إنشاء أشكال آلياً، كأحد الأهداف الرئيسية للتصميم التوليدي . بالسماح لكمية كبيرة من البيانات التي تتم معالجتها بواسطة أجهزة الكمبيوتر، وإزالة العبء من المصمم .بسبب ضيق الوقت أو المعرفة أو الاهتمام بإجراء كميات كبيرة من الحسابات والمهام المتكررة. كمية الحلول التي يتم إنشاؤها بواسطة البرنامج غير محدودة تقريباً .وهذا يوفر أساساً غنياً للمصممين لاختيار الحل الأمثل. (Mei,etal,2006,p. 102)



الشكل رقم (9): تحليل برنامج Grasshopper للأسطح
https://dfabnus.wordpress.com/2011/02/10/mass-customized-/voronoi-grid-system

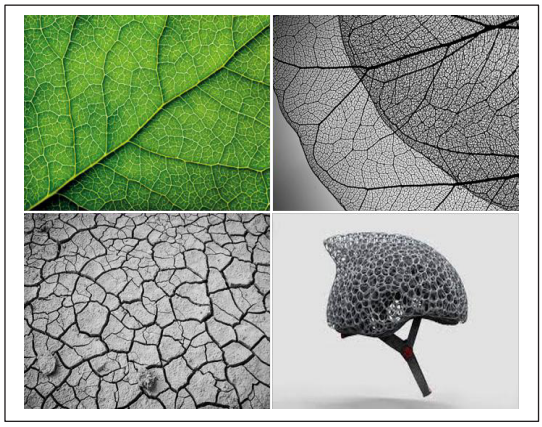
توفر العملية مستوى متزايد من الإبداع للمصمم .يمكن للكمبيوتر إنشاء حلول عدة مرات بكميات كبيره على خلاف العقول البشرية التي لا تعالج المعلومات بنفس الطريقة بالإضافة إلى ذلك ، يمكن أن يستلهم المصممون من النتائج التي يحصلون عليها من البرنامج أفكاراً غير تقليديه أكثر ، مما يدفع عمليتهم الإبداعية إلى مستويات أعلى وأوسع .
مع وجود برنامج تصميم توليدي بالحاسب الآلي لم يعد الحاسب الآلي مجرد أداة سلبيه تتبع أوامر من المصمم، بل يقدم حل المشاكل الديناميكية التي توفر حلول تصميم فريدة من نوعها . ولعل هذا هو المساهمة الأكثر أهمية للتصميم التوليدي في مجال التصميم.(Singh,Gu,2012,p. 186)

5. أنواع الأنظمه التوليديه الممكنه لتصميم المنتجات.

هناك عدة أنواع من الأنظمة التوليديه، وكلها توفر مهام سير العمل المتنوعة والأشكال الناتجة منها ما يسمى بأشكال فورونويVoronoi patterns، والشبكات الإجرائية procedural networks ، والهياكل التوليديه generative structures.هذه الأنظمة الثلاثة يتم بها إنشاء الأشكال و كذلك تطوير منتجات جديدة باستخدام برامج الكاد أثناء عملية التصميم. ويمكن تحليل تأثير أشكال فورونوي في التصميم الصناعي باعتباره أكثر الأنواع التوليديه الوارد استخدامها في هذا المجال. (Lobos,2019,p.2)

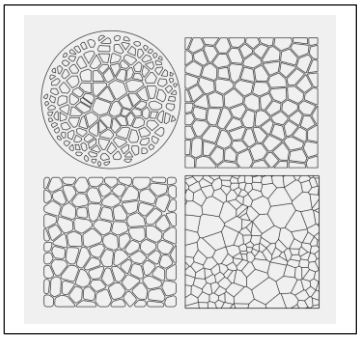
1.5 أشكال فورونوي (Voronoi Patterns)

هي الأكثر شيوعاً في تصميم المنتجات، وهي عباره عن تقسيمات تطبق على السطح بمسافات متساويه من نقطة ما على هذا السطح. مكونةً شكل يبدو منتظم ومتكرر الوحدات. تشبه فكرة بناءه الكثير من العناصر في الطبيعه مثل النماذج الموضحه بالشكل رقم (10) كورقة الشجر والتربه وتمثيل الزهره.(Lobos,2019,p.3)



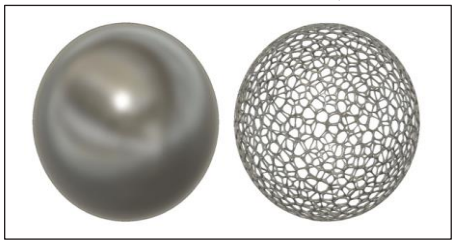
الشكل رقم (10): نماذج من الطبيعه كمصادر استلهام لبناء فورونوي.

ومن خصائص أشكال فورنوي استنادها إلى التصميمات الموجوده فعلياً، ، وهي طريقه توليديه شائعه للمصممين الصناعيين حيث تقوم على تحديد بارامترات Straight forward "المسافات بين الخلايا، مع تحديد النقطه" مثل التخطيطات الثنائية الأبعاد الموضحه في الشكل رقم (11).



الشكل رقم (11): أشكال فورنوي ثنائية الأبعاد يوازي بناء عضوي من الطبيعه

وهناك العديد من التطبيقات عبر الانترنت التي يمكنها توليد أشكال فورنوي تلقائياً كما أنه هناك برامج كاد يمكنها أيضاً خلق هذه الأشكال كمهام أساسيه في البرنامج، أو كميزات اضافيه يمكن اضافتها له "Plugin" . وفي ظل وجود تسهيلات برامج الكاد لا حاجه لتعلم خوارزميات معقده لتوليد وتحليل الأشكال مما يوفر للمصمم القدره على التحكم في عملية التصميم ككل بشكل أفضل،
ويوضح الشكل رقم (12) نتيجة تحويل شكل صلب إلى فورونوي باستخدام تطبيق انترنت بمجرد تحديد نقطه على السطح والمسافات بين خلايا السطح المقترحه.
بالاضافه إلى شكلها المميز والجذاب، فإن أشكال فورنوي تقدم أشكالاً أقوى وأخف وزناً من نظائرها من الأشكال الصلبه. بتحويل الأشكال الصلبه إلى شبكات بإزالة مساحات من السطح لا تؤثر على متانتها واعتماداً على عملية تصنيع حديثه – كالطباعه الثلاثية الأبعاد- ويمكن أن يقلل ذلك في الخامه بشكل كبير، ففي الشكل رقم (12) في اصدار فورنوي له، سيستخدم مواد أقل بنسبة 40% من الإصدار الصلب لنفس التصميم. (Lobos,2019,p.4)



الشكل رقم (12) تحويل شكل صلب إلى فورنوي(Lobos,2019,p.4)

بالنظر إلى الشكل رقم (13) يظهر تصميم الجيتار الكهربائي الذي صمم كشكل صلب في البدايه، ثم تم تقسيم الشكل الخارجي إلى عدة مقاطع، ثم تحويل المقاطع الممكن تحويلها إلى أنماط فورنوي باستخدام تطبيقwww.voronator.com من خلال الانترنت ، مع الاحتفاظ بالمقطع المرتبط بالأجزاء الالكترونيه الداخليه صلبه لتفادي التأثير على أدائه وكذلك لتوفير ما يحتاجه الجيتار من أجزاء صلبه مناسبه لاصدار صوته بشكل جيد، وتم

أيضاً تحليل عنق الجيتار وتحويل بعض أجزائه إلى فورنوي، فكانت النتائج:

- منتج أخف وزناً في الاستخدام.
- مظهراً أنيقاً ومميزاً.
- توفيراً في الخامه المستخدمه.

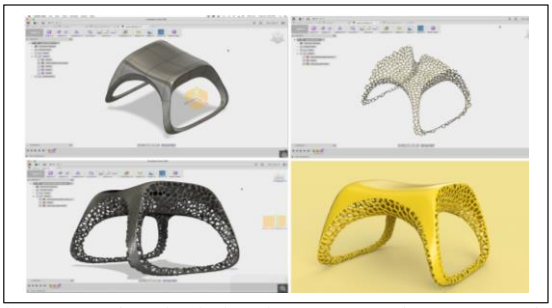
الشكل رقم (13): تصميم جيتار تمت معالجته إلى شكل فورونوي (Lobos,2019,p.4)

وبالمثل في الشكل رقم (14) للمقعد الذي جمع بين مقاطع صلبه وأنماط فورنوي، حيث تم التوزيع بشكل يتيح للمنتج بأداء وظيفته بشكل مناسب، فالمقطع الصلب في سطح الجلوس للاحتفاظ بعامل الراحه بالجلوس على سطح أملس، وكذلك تجنب نقاط الضغط الغير ضروريه الملامسه للجسم، وباستخدام شبكة فورنوي في الأجزاء السفليه، أضاف ذلك شكلاً مميزاً للتصميم دون المساس بالأداء أو قوة واستقرار المنتج في ظل توفير أكثر في خامته، ومن خلال تقنية الطباعه الثلاثية الأبعاد تبين أن:

الوقت المستغرق لطباعة المقعد:

في حالته المصمته: 497 دقيقه / وزنه 78.2 جرام

في حالته الفورونويه: 575 دقيقه / وزنه 43 جرام. (Lobos,2018,p.6)



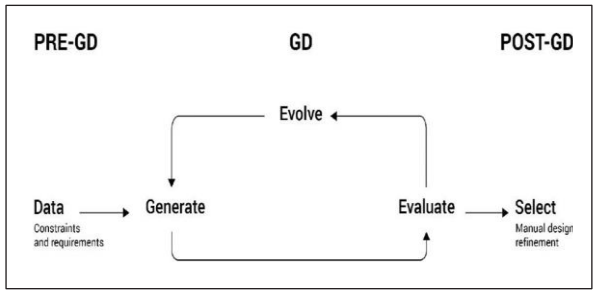
الشكل رقم (14) تحويل سطح مقعد من البناء الصلب إلى شكل فورنوي بإزالة المساحات الغير مؤثره على وظيفته في اطار جمالي.(Lobos,2018,p6)

وينقل الشكل رقم (15) نماذج لمنتجات تم تصميمها بالاستعانه ببناء فورنوي مقدمةً شكلاً عضوياً مميزاً وأداءاً أفضل.

الشكل رقم (15) نماذج لتصميمات فورنوية الشكل

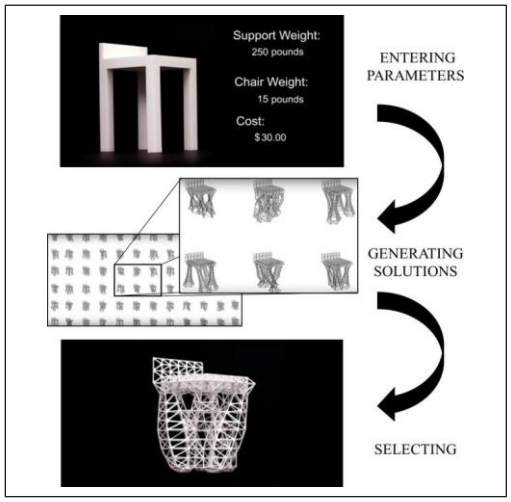
6. عمليات برنامج التصميم التوليدي

تنقسم مراحل عمليات التصميم التوليدي التي يتعامل معها كبرنامج كمبيوتر إلى ثلاث مراحل أساسيه " ما قبل التصميم، وأثنائه، وما بعد التصميم" وهذا تماماً ما يشير إليه المخطط في شكل رقم (16) والذي يوضح أيضاً مرونة البرنامج بتوفير القدره على التدخل والتطوير أثناء عملية التصميم التوليدي واجراء تعديلات على التصميم المختار.(Trautmann, 2021,p.88)



الشكل رقم (16): عمليات برنامج التصميم التوليدي https://www.danieldavis.com/generative-design-doomed-to-/fail

وتتميز العمليه بالمرونه واحتماليه التغذيه المرجعيه للمرحله السابقه لإجراء أي تعديل سواء في البارامترات أو المتطلبات أو القيم إذا ماكانت البدائل لا توافق رضا المصمم. والشكل رقم (17) مثال بسيط للاجراءات المتبعه لخلق بدائل لتصميم كرسي على برنامج GD-Fusion 360. (Trautmann, 2021,p.88)



الشكل رقم (17): مثال توضيحي لمراحل عمليات التصميم التوليدي على برنامج Fusion 360-GD (Trautmann, 2021,p.88)

1.6 ما قبل التصميم التوليدي: Pre-GD

ويقصد بها اعداد البيانات المطلوب ادخالها للبرنامج التي يبني على أساسها مقترحاته وبدائله التصميميه، هذه البيانات تنقسم إلى متطلبات ومحددات كأن يكون أحد الشروط للتصميم ألا يقل وزنه عن 30 كجم. (Trautmann, 2021,p.88)

No.	Parameters	Values
1	Support Weight	250 Pounds
2	Chair Weight	15 Pounds
3	Cost	30 $

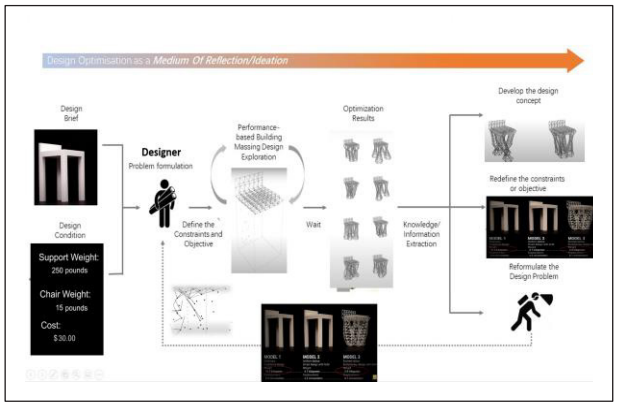
الجدول رقم (1): يوضح البارامترات التي يتم ادخالها للبرنامج ليلتزم بها أثناء معالجة البدائل الممكنه للتصميم في اطارها.

2.6 عملية التصميم التوليدي:GD

وهي المرحله التي يعالج فيها الكمبيوتر البارامترات والمدخلات مقدماً العديد من البدائل للتصميم وتعديل المتاح في اطار القيود والأهداف، ويمكن اجراء مقارنه بين البدائل واختيار أكثرها تحقيقاً للبارامترات المحدده وبالتالي اختيار أفضلها.

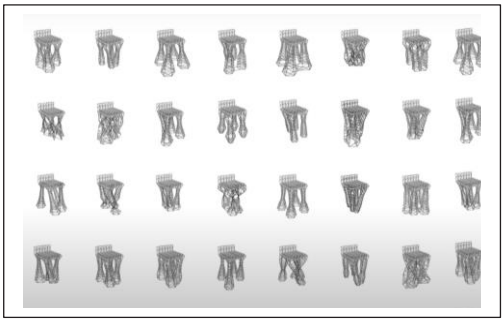
3.6 ما بعد التصميم التوليدي:POST-GD

ويمكن للمصمم في هذه المرحله اجراء تعديلات على التصميم المختار والتي غالباً ما ستكون طفيفه وتجهيزه للإنتقال للمرحله التاليه. وينتهي البرنامج بعملية الاختيار لأفضل الحلول التصميميه -وقد يحتاج حينها الدعم من برامج لطرق اختيار أفضل تصميم "Design Methods of Big Idea"- ليبدء المصمم في التقدم في سائر اجراءاته التنفيذيه للتصميم.



الشكل رقم (18): تأثيراستخدام برنامج التصميم التوليدي على عملية التصميم (الباحث)

بعد تحديد متطلبات التصميم والبارامترات، فعلى المصمم تحديد مشكلته التي يمكن للبرنامج الذكي مساعدته بها، بتعريف المشكله والبارامترات، وينتظر أن يقوم البرنامج بعمل معالجه بناءاً على البارامترات المعطاه، ثم يعرض مجموعه من النتائج كبدائل للتصميم ويعرضها كما هو موضح بالشكل رقم (19) الذي يعرض بدائل لتصميم المقعد.



الشكل رقم (19): بدائل تصميمات توليديه تمت باستخدام Fusion 360-GD (https://www.youtube.com/watch?v=E2SxqUvtpIk&t=1s)

فإن لم توافق البدائل المعروضه تصور المصمم، فسيكون أمام أحد الأختيارات الثلاث: التعديل بنفسه في أقرب الأختيارات، إن كانت التعديلات طفيفه، أو الرجوع إلى بارامترات التصميم وتعديلها، أو الرجوع للتعديل في تحديد مشكلة التصميم لإخراج نتائج مختلفه من التصميم لحين اعتماده.

وفي ظل تسابق المجالات السالف ذكرها في الاستفاده من امكانيات برنامج التصميم التوليدي ودمجه في برامج التصميم بالحاسب مثل برنامج "Fusion 360" في مجال التصميم الهندسي أو برنامج "Revit" لمجال العماره "as a Plugin" ، لما له الأثر الإيجابي في العديد من المميزات والايجابيات على وضع حلول بديله ومبتكره ومتطوره في التصميم وللعديد من المميزات السابق ذكرها في البحث، لذلك وجب القاء الضوء على كيفية الاستفاده منه في مجال التصميم الصناعي بدوره.

7. الإستفاده من برنامج التصميم التوليدي في مجال التصميم الصناعي .

1.7 (دراسة حاله).

وفي دراسة حاله تمت على احتياج قاطني المناطق الريفيه الهنديه للأطراف الصناعيه أثناء مزاولة أعمالهم التي تحتاج لأعمال يدويه كالزراعه والبناء وفقا لتقرير صادر عن وزارة الإحصاءات وتنفيذ البرامج في الهند، يعيش 2.21% من سكان البلد مع إعاقة .ومن بين هؤلاء السكان، يعاني 20% منهم من إعاقة في الحركة، معظمهم من قاطني المناطق الريفية .ويحدث أعلى معدل للبتر في هذه البيئات الريفية، بسبب أن العمالة الرئيسية هي في الزراعة والبناء. ونسب الحوادث فيهما كبير. وعادة ما يتم استيراد الأطراف الاصطناعية من الخارج ويمكن أن تكلف أكثر من ستة أضعاف متوسط الدخل الشهري للأسرة الهندية الريفية(Redshift, 2020,p.8) .

بعد البحث في الحلول القائمة ، لذا ظهرت الحاجة إلى نهج جديد لتصميم الطرف الاصطناع.

تم بناء الأطراف الاصطناعية لمؤسسة الأجهزة الاجتماعية لهذا الغرض باستخدام التصميم التوليدي لتكون في متناول عمال الزراعة والبناء في المناطق الريفية في الهند. مع تحقيق التوازن بين خفة الوزن والمتانه والسعر المناسب.

من خلال التحدث مباشرة مع المستخدمين وأولئك الذين يعملون في صناعات الأطراف الاصطناعية وتقويم العظام، علم فريق البحث أن معظم الأجهزة غير مناسبة للمستخدمين النهائيين في المناطق الريفية في الهند .وعلى وجه الخصوص، فإن المتانة والنظافة الصحية مسألتان رئيسيتان لم تعالجا على النحو المناسب .(Redshift, 2020,p.9)

وبمجرد أن طورت المؤسسه ذراعاً اصطناعياً كهربائياً مناسباً، أنشأ الفريق موصل المعصم، وهو جهاز مساعد يستخدم لربط الأدوات الزراعية والبناء بأمان بالأطراف الاصطناعية الخاصة به يمكن تركيب الموصل مفرداً دون اليد كما هو موضح بالشكل رقم (20)، أو تركيب اليد في وضعها التقليدي كما هو بالشكل رقم (21)، أو تركيبهما معاً إذا دعت الحاجه لذلك أثناء مزاولة المزارع لأعماله اليدويه كما هو موضح بالشكل رقم (22) ."استلهم المصمم من صلابة تصميم المعدات العسكرية" .بالبحث في براءات الاختراع القديمة

لمساعدته على فهم كيفية تركيب المرفقات المختلفة في البيئات العسكرية." (Redshift, 2020,p.9)

الشكل رقم (20): ذراع اصطناعية مزوده بأداة للزراعه.
(Redshift, 2020,p.9)

الشكل رقم (21): يد اصطناعيه تم تصميمها باستخدام برنامج Fusion 360 -GD
(Redshift, 2020,p.9)

الشكل رقم (22): يد اصطناعيه مزوده بأداة الزراعة تعلق على موصل المعصم
(Redshift, 2020,p.9)

كان على الفريق معالجة القضايا المتعلقة بالأجهزة التعويضية الموجودة
.لا تعتمد الأطراف الاصطناعية التي تعمل بالطاقة الخارجية على قوة المستخدم، تعتمد على بطاريه ولكن المشكله أن عمر البطارية محدودا وعادة ما لا تكون قوية بما يكفي للعمل عالي الكثافة . أما الأطراف الاصطناعية التي تعمل بطاقة الجسم أكثر دواما بكثير ولا تتطلب بطاريات، لكنها ثقيلة ولها وظائف محدودة. (Redshift, 2020,p.10)
.وفي دراسة الحاله تبين ضرورة الجمع بين مميزات النوعين وتلافي عيوبهما :
النهج الخفيف الوزن والغني بالميزة للأطراف الاصطناعية التي تعمل بالطاقة الخارجية مع متانة وموثوقية جهاز يعمل بالجسم.
لتحقيق هذا التوازن ، توجهت المؤسسه إلى التصميم التوليدي.
استخدم الفريق برنامج فيوجن 360 وعملية تصميم توليدي من خمس مراحل لخفض وزن موصل المعصم وتسريع عملية التطوير.
وكانت النتائج :

- خفض الوزن من 300 جرام إلى 96 جرام مع الحفاظ على المتانة المطلوبه. هذه النتائج قد استغرق شهورا من التجربة والخطأ للتحقيق من خلال الوسائل التقليدية."
- كما ساعد التصميم التوليدي الأجهزة الاجتماعية على التصدي للتحديات التي يواجهها المبتورون مع مآخذهم الاصطناعية وتحسين مظهرهم" .
- تلافي مشاكل العرق والحرارة، وخاصة في البيئات الرطبة أو في حالة العمل بكثافة عالية"،
- قدم التصميم التوليدي مقبس خفيف الوزن وقابل للتنفس مع جمالية فريدة من نوعها .
- شعور المستخدم المستهدف ذو الدخل المنخفض بأن لديه أحدث التقنيات المتطورة .

وبذلك تم استخدام التصميم التوليدي لإسقاط وزن موصل المعصم مع الحفاظ على قوتها(Redshift, 2020,p.11) .

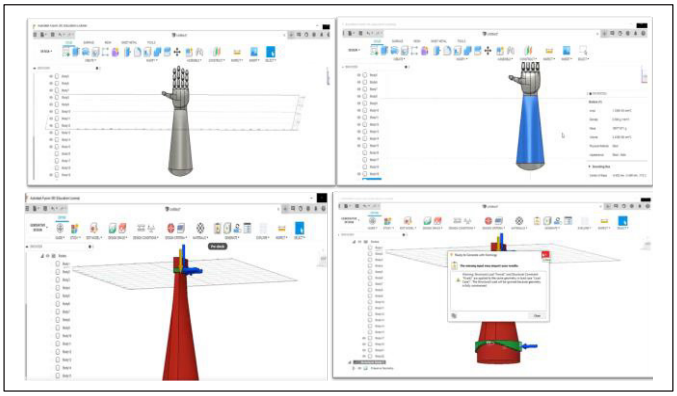
واستعراضاً لكيفية الاستفاده من برنامج Fusion360-GD لحل المشاكل الوظيفيه لطرف اصطناعي قام الباحث بتطبيق ما يمكن الاستفاده منه في ايجاد بدائل أفضل لطرف اصطناعي، باتباع برنامج التصميم التوليدي كما يلي:

2.7 استخدام برنامج Fusion 360 -GD لإيجاد بدائل لتصميم طرف اصطناعي. (الباحث).

- **اعداد ورسم الفكره الأوليه: (الباحث).**

(ما قبل التصميم التوليديPre - GD)

ادخال التصميم الأساسي واعداده وفصل الأسطح لتجهيز الجزء المراد تدخل فيه تحليل التصميم التوليدي له بالاستعانه مع أمر Generate واعدادته.

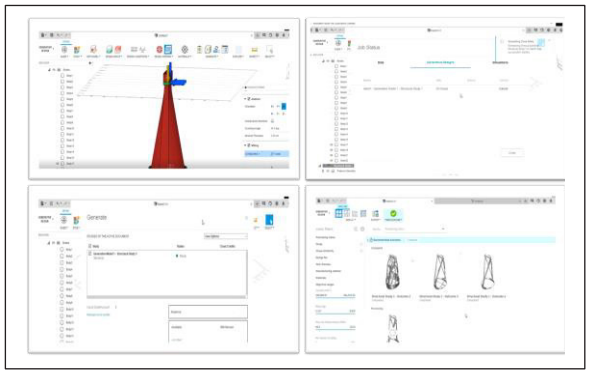


الشكل رقم (23): اعدادات التصميم الأساسي على برنامج Fusion 360-GD "تحديد خصائص ماقبل التصميم التوليدي" (الباحث).

- **عملية التصميم التوليدي:GD**

وبادخال اعدادت التصميم من خلال تغذيته بالبارامترات والقياسات اللازمه وأقل مدى للأقطار وسمك الخامه وطرق التصنيع من خلال Design Conditions/Manufacturing وبالضغط على Generate يبدأ البرنامج في معالجة التصميم في ظل البارامترات المحدده وخلق بدائل للتصميم الأساسي

وينقل الشكل رقم (24) بعض تتابع الاجراءات المتبعه وصولاً إلى مرحلة التوليد Generate Button

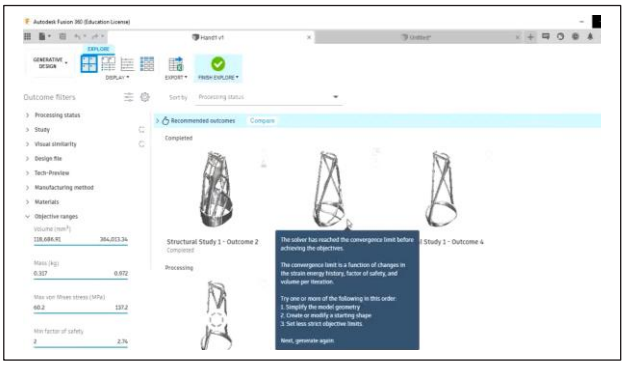


الشكل رقم (24): نتائج عملية التصميم التوليدي على برنامج Fusion 360-GD

- **ما بعد التصميم التوليدي:POST-GD**

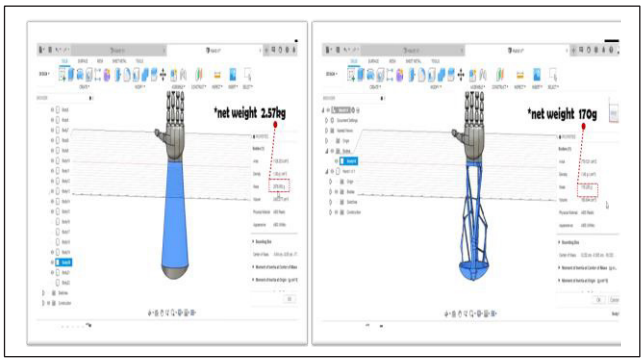
وبعد مرور ساعه ونصف قدم البرنامج الاقتراحات الموضحه بالشكل رقم (25) ظهرت شاشه فرعيه توضيحيه لمرجعية اقتراح الأفكار، وكذلك بعض التعليمات للمصمم التي يمكن أن تساعده في التعامل مع نتائج التوليد. قدم البرنامج حلولاً طبقاً لحدود التقارب قبل تحقيق الأهداف. والمقصود بحدود التقارب في هذا المشروع هو الوظيفه وعامل السلامة. وأوصى البرنامج في التعامل مع النتائج بالآتي:

- تبسيط البناء الهندسي للنموذج .
- إنشاء أو تعديل شكل البدايه.
- وضع حدود للأهداف أقل صرامة.
- إعادة التوليد.



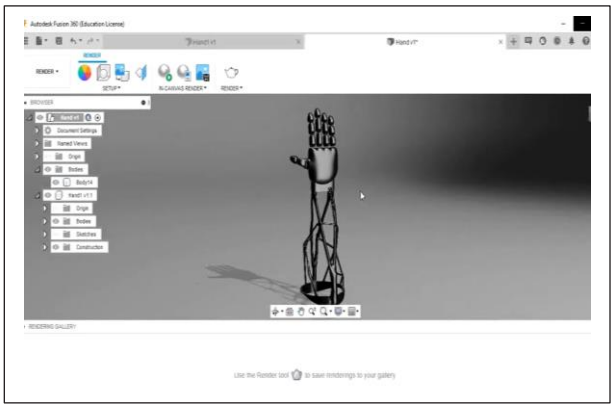
الشكل رقم (25): توصيات البرنامج لمرحلة ما بعد التصميم التوليدي

وفي الشكل رقم (26) مقارنه بين خصائص النموذج الأساسي، والنموذج المقترح من برنامج Fusion 360-GD فكانت النتيجه أن التصميم الذي تم توليده وزنه 170 جم، في حين أن التصميم الأساسي يزن 2570 جم، في ظل المتانه الموائمه لاستخدام اليد الصناعيه التي ستزيد خفة وزنه من كفائته الوظيفيه.



الشكل رقم (26): قدم البرنامج تصميم أخف وزناً بمقدار 2.4 كجم

وبمراجعة نتائج التصميم المقترح من بين البدائل الأخرى تم اختيار الأقرب للبارامترات والأهداف وكانت النتيجه النهائيه على النحو الموضح بالشكل رقم (27).



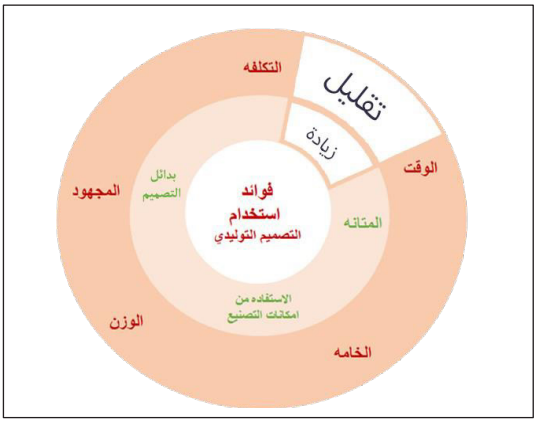
الشكل رقم (27): النموذج النهائي المختار "Big Idea"

نتائج البحث :

فوائد برامج التصميم التوليدي

- تقديم بدائل ضخمه للتصميم.
- تحسين والإسراع في عملية التصميم بجوده ودقه عاليه.
- يقدم الالاف من الاقتراحات أو البدائل، والتي قد لا يطرأ الكثير منها على ذهن المصمم ويفضل احداها.
- بدائله القائمه على البناء الهيكلي تزيد من المتانه وبالتالي من السلامه في ظل تقليل الوزن وخفة الحركه.
- إنشاء أنماط معقدة تشبه الأنظمة الطبيعية ، والابتعاد عن الأشكال الهندسية التقليديه للتصميم.
- أتمتة العمليات التي تؤدي فيها أجهزة الكمبيوتر مهاما معقدة ومتكررة من شأنها أن تكون صعبة أو مملة للغاية بالنسبة للمصمم للقيام بها.
- يوفر في اجراء تعديلات على الأفكار الأوليه.
- يساعد المصمم على التركيز في عملية اختيار أفضل البدائل.

- يتيح إنشاء أشكال معقدة وشبكات داخلية مُحسَّنة يمكن بناؤها باستخدام طرق تصنيع مضافة جديدة.
- يعمل على تحسين المواد والبناء على أساس طرق التصنيع الحديثه "كالطباعه الثلاثية الأبعاد".
- يحدد المصمم الأهداف والمتطلبات، ويقوم البرنامج بإنشاء خيارات تصميم عالية الأداء بناءً على تلك الحدود.
- يحل البرنامج قيود التصميم، مقللاً عبء المهام المكتررة المطالب بها المصمم فيتمكن أكثر من التركيز على المهام الأكثر احتياجاً له.
- يقلل الإطار الزمني للتصميم.
- يوفر بناء فعال للمساحات وعلاقات أكثر متانه وتوفيراً بين الأجزاء.
- إمكانية خفض التكاليف للعملاء
- يحفظ الموارد القيمة وبالتالي زيادة الإيرادات
- يخلق تصميمًا غير تقليدي وذو مظهر مميز.
- يقلل من أجزاء التجميع، توفيراً للإنتاج، وتجنباً لنقاط ضعف اجهاد التجميع استناداً على امكانيات التصنيع الحديثه.
- يصبح الكمبيوترمع برنامج للتصميم التوليدي ليس فقط أداة للمصمم ولكن متعاون ذكي فعلي.
- يمثل الشكل رقم (28) تخطيطاً يعكس أهم الفوائد السابقه لاستخدام برامج التصميم التوليدي.
- حقق برنامج التصميم التوليدي حلم التوازن الصعب بين خفة الوزن بنسب قد تصل لـ40% من التصميم الأساسي وتقليل الخامات والمتانه المطلوبه للأداء الجيد لوظيفة المنتج.
- أتاح التصميم التوليدي اتجاها مميزاً حيث يمكن الجمع بين مسارات العمل المختلفة وطرق تحقيق الأنظمة المستوحاة من الطبيعة بطرق جديدة وغير متوقعة .
- مع استمرار تطور التصميم التوليدي، فإنه يدمج معايير تطوير الشكل والتحسين مع أهداف الأداء الوظيفي.
- يمكن الاستفاده من التصميم التوليدي كأداه رئيسية داعمه للتصميم الصناعي ، مما يوفر عدداً كبيراً من الفوائد . أهمها هو زيادة القدرة التي تجلبها الأتمتة إلى عملية التصميم ، سواء كان ذلك كوسيلة لتجنب المهام المتكررة التي تصبح رتيبة وتستغرق وقتاً طويلاً ، أو قيود على إجراء حسابات معقدة.



الشكل رقم (28) تخطيط يلخص أهم فوائد استخدام برامج التصميم التوليدي (الباحث)

التوصيات:

- أصبحت الأتمتة عنصراً أساسياً في الصناعة ويحتاج المصممون إلى التعرف عليها ، والتأكد من استخدامها في مرحلة التصميم وموائمتها لمقتضيات الصناعه الرابعه.
- إدراج مناهج التصميم بالحاسب كمناهج أساسيه في تعليم التصميم بالجامعات المعنيه بتدريس مجال التصميم الصناعي، لضرورة دمج طالب التصميم بأحدث الأدوات المساعده له في عملية التصميم.
- على المصمم الإطلاع الدائم على التكنولوجيا المعاصره والمتوقعه والتي قد تؤثر على أفكاره واتجاهاته التصميميه، مواكبةً للتغير الهائل في الأدوات المساعده في مجال التصميم،مواكبةً للتغير الهائل في الأدوات المساعده في مجال التصميم، وفهم تأثير تقنيات التصنيع على التصميم.

وما يلي بعض برامج تصميم بالحاسب تدعم خاصية التصميم التوليدي يمكن الاستعانه بها أثناء مرحلة وضع الأفكار:

- Fusion 360 from Autodesk.
- Creo Generative Design from PTC
- nTop Platform from nTopology
- NX from Siemens
- MSC Apex Generative Design from MSC Software.

مراجع البحث:

[1] Agkathidis , Asterios. (2016): *Generative Design: Form-finding techniques in Architecture*. Laurence King.

[2] Awan, Muhammad Junaid &Khan, Shahroz (2018): *A generative design technique for exploring shape variations. Journal of Advanced Engineering Informatics.* DOI: 10.1016/j.aei.2018.10.005.

[3] Lobos, Alex (2019): *Applying Generative Systems to Product Design*. Generative Art Conference.

[4] Lobos, Alex (2018): *Finding Balance in Generative Product Design. In Proceedings* of Norddesign Conference: Design in the era of digitalization. Linköping, Sweden.

[5] Mei, Choo Ang &CHAU, Hau Hing & Alison, MCKAY& Pennington, Alan (2006): *Combining*

evolutionary algorithms and shape grammars to generate branded product design, in: Design Computing and Cognition06. pp. 521–539.

[6] Singh, Vishal & Gu, Ning (2012): *Towards an integrated generative design framework*. Design Studies. DOI: 10.1016/j.destud.2011.06.001.

[7] Tang, Ming Xi & Cui, Jia (2014): *Supporting product innovation using 3D shape grammarians a generative design framework.* International Journal of Design Engineering 5(3): 193-210.[9] Redshift (2020): *Generative Design Redefining What's Possible in the Future of Manufacturing*. ,Autodesk.

[8] Trautmann, Laura (2021): *Product customization and generative design*. Multi-diszciplináris Tudományok 11(4):87-95. DOI: 10.35925/j.multi.2021.4.10. pp. 87-95.

[9] Zimmermann, Luca & Chen, Tian & K., Shea (2017): *Generative Shape Design Using 3D Spatial Grammars, Simulation and Optimization.* In: Gero, J. (ed) 7th International Conference on Design Computing and Cognition. 27-29 June. Evanston, Illinois, USA. DOI:10.1007/978-3-319-44989-0_16

[10] URL: https://www.autodesk.com/solutions/generative-design. (Accessed: 3rd September 2021).

[11] URL: https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Next-leveldesign-workflows-Fusion-360-mixing-T-Splines-meshes-and-Voronoi-based-patterns. (Accessed: 3rd September 2021).

[12] URL: https://www.formlabs.com/blog/generative-design/(Accessed: 3rd September 2021).

[13] URL: https://dfabnus.wordpress.com/2011/02/10/mass-customized-voronoi-grid-system/(Accessed: 7th September 2021)

[14] URL: https://www.researchgate.net/publication/349521837_Product_customization_and_generative_design/figures?lo=1 (Accessed: 7th September 2021).

[15] URL: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/03090561211202503/full/html (Accessed: 9th September 2021).

[16] URL: https://www.inhabitat.com/airbus-starts-3d-printing-airplaneparts-in-collaboration-with-autodesk-apworks-and-the-living (Accessed: 9th September 2021).