# أساليب تصميم الهياكل الشجرية وتقنيات تنفيذها وآثارها التشكيلية على الفراغات الداخلية في المباني

**م. لجين الحسن[1]**

**د. م. سمير سلوم[2]**

## الملخص

**شهد العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين انتشاراً واسعاً للهياكل البيولوجية المستوحاة من الطبيعة والكائنات الحية، وأحد هذه الهياكل هي تلك المتفرعة الشجرية (Tree-Like Branching Structures)؛ التي استحوذت على اهتمام العديد من المعماريين في أنحاء العالم، لما لها من آثار هامة على المستويين المعماري والإنشائي للفراغات الداخلية في المباني؛ إذ تعتمد الهياكل الشجرية على نقل الأحمال السطحية الكبيرة إلى نقطة واحدة على الأرض، باستخدام عناصر هيكلية أرق وأنحف وتغطي مجازات أوسع من تلك المستخدمة بالهياكل التقليدية (الأعمدة)، وذلك ضمن أشكال تصميمية متعددة (هيكل شجري مستمر، متمفصل أو شبكة فروع شجرية متداخلة)، وبتقنيات تنفيذ تختلف باختلاف مواد البناء المستخدمة وحجم الهياكل الشجرية المنفذة (الصب في الموقع، مسبق الصنع، التجميع في الموقع)؛ يوضح البحث الحالي بعض أساليب تصميم هذه الهياكل المعقدة (الأسلوب الرقمي والعددي)، ويقارن بين تقنيات تنفيذها المختلفة، وآثارها التشكيلية على الفراغات الداخلية (الانفتاح نحو الخارج، تنوع أشكال الأسقف والتغطيات (مستوية، منحنية، مائلة))**

**الكلمات المفتاحية:** الهياكل الشجرية، الهياكل البيولوجية، المفاصل، الوصلات، الإنشاء المظلي، تقنيات التنفيذ

[1] طالبة ماجستير في قسم علوم البناء والتنفيذ– كلية الهندسة المعمارية– جامعة دمشق.

[2] مدرس في قسم علوم البناء والتنفيذ– كلية الهندسة المعمارية– جامعة دمشق.

# Methods of Designing Tree Structures, Techniques of Their Implementation, and Their Morphological Effects on the Interior Spaces in Buildings

**Arch .Loujain Al-hasan[(1)]**
**Dr. Samer saloum[(2)]**

## Abstract

**The second decade of the twenty-first century witnessed a wide spread of biological structures inspired by nature and living organisms, and one of these structures is Tree-Like Branching Structures; Which has captured the attention of many architects around the world, because of its important effects on the architectural and structural levels of the interior spaces in buildings; Tree structures rely on transferring large surface loads to a single column on the ground, using thinner structural elements that cover larger areas than those used in conventional structures (columns), within multiple design forms (continuous tree structure, articulated tree structure or intertwined tree branches network), with implementation techniques that vary according to the building materials and the size of the tree structures implemented (cast on site, prefabricated, on site assembly); The current research clarifies some methods of designing these complex structures (Numerical and digital method), and compares between the different implementation techniques, and their effects on the interior spaces (opening to the outside, the diversity of roofs and coverings (flat, curved, inclined))**

**Key words:** Tree Structures, Biological Structures, Joints, Connections, The Umbel System, Implementation techniques

[(1)]Master's student in the Department of Building and Implementation Sciences - Faculty of Architecture - Damascus University.
[(2)]Lecturer in the Department of Building and Implementation Sciences - Faculty of Architecture - Damascus University.

## 1- المقدمة:

ظهر اتجاه محاكاة الطبيعة في الهندسة المعمارية (العمارة البيولوجية[3]) كأحد الاتجاهات الحديثة للفكر المعماري، حيث اجتذب المجال البيولوجي "علم الأحياء" اهتمام العديد من المعماريين، وذلك من خلال محاكاة الهياكل النباتية أو الحيوانية أو نظماً إيكولوجية بأكملها، واعتمادها أساساً للتصميم؛ ويمكن ملاحظة أوجه التشابه بين الهياكل الطبيعية وتلك التي صنعها الإنسان منذ أقدم العصور، على الرغم من اختلاف المقاييس والوظائف بينها، إلا أن الأهداف هي نفسها (تحقيق احتياج وظيفي، والتحسين، والفعالية، وتقليل إنفاق الطاقة)؛ وتعد الهياكل الشجرية بتفرعات أغصانها أنموذجاً واضحاً من نماذج الطبيعة التي تمت محاكاتها معمارياً لتصميم ما يسمى بالهياكل المتفرعة الشجرية.

## 2- مشكلة البحث:

وجود نقص معرفي في تحقيق التكامل ما بين أساليب تصميم الهياكل الشجرية وتقنيات تنفيذها، واختيار مواد البناء الملائمة للنموذج التصميمي المرافق، فضلاً عن عدم وضوح الآثار الشكلية على الفراغات الداخلية في المباني.

## 3- أهداف البحث:

1-التعريف بمفهوم الهياكل المتفرعة الشجرية في العمارة.

2- دراسة الأساليب المتبعة في تصميم الهياكل المتفرعة الشجرية، والتقنيات المختلفة لتنفيذها.

3-تحديد الآثار التشكيلية لاستخدام الهياكل المتفرعة الشجرية على الفراغات الداخلية في المباني.

## 4- أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث في تسليط الضوء على أساليب الاستفادة من العناصر النباتية "الأشجار" في تصميم عناصر إنشائية معمارية في آنٍ واحد، ودور مادة البناء في تحديد تقنيات تنفيذها، لتكون مصدراً لإلهام المعماريين في تصميم نماذج تراعي احتياجات الفراغات المصممة من أجلها.

## 5- منهج البحث:

اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي بالاستفادة من التجارب العالمية لمعرفة أساليب تصميم الهياكل المتفرعة الشجرية، والمواد والتقنيات الملائمة لتنفيذها، وتأثير كل منهما على الآخر.

## 6- لمحة تاريخية عن الهياكل الشجرية:

ظهرت بوادر العلاقة ما بين العمارة والعناصر النباتية "الأشجار" منذ العصور القديمة، حيث يصور الكتاب المقدس خلال زمن سليمان (970-931 ق.م) استخدام العناصر المستوحاة من أشجار النخيل – الموجودة في الاراضي المقدسة- في أجزاء من المبنى (Joshy, 2018, p. 136)؛ ويمكن استقراء التسلسل الزمني لمحاكاة العناصر النباتية في الهندسة المعمارية كما يلي: (انظر الجدول1)

1) كان البدء بمحاكاة العناصر النباتية لأغراض تزيين الفراغات الداخلية بشكل أساسي، والذي يظهر بوضوح في زخارف القصور والأهرامات المصرية، مثالاً على ذلك أعمدة معبد الأقصر (1400 ق.م)، والتي تعتبر من أقدم الأعمدة المتفرعة المبنية من الحجر الرملي، المصممة بتيجان تحاكي نبات البردي (Md Rian & Sassone, 2014, p. 302) ؛

[3] العمارة البيولوجية: نهج متعدد التخصصات بين علم الأحياء "البيولوجيا" والطبيعة والهندسة المعمارية، وتعتبر فلسفة معاصرة تسعى الى وضع حلول مستدامة لمشكلات التصميم، عبر محاكاة أنماط ونماذج، ونظم، ومبادئ الطبيعة وآلية عملها، وعناصرها، ووظائفها ونظمها البيئية وفهم القواعد التي تحكم تلك الاشكال (أبو العلا، 2018، ص 71).

كما ظهرت الأشكال النباتية والزهور بنسب دقيقة في تيجان الأعمدة الكورنثية والمركبة وظهرت أيضاً في الأفاريز وغيرها من المناطق المزخرفة في العمارة اليونانية والرومانية القديمة (500 ق.م إلى 400 م) (Joshy, 2018, p. 136).

2) اتجهت بعض الأساليب المعمارية نحو الهياكل المتشعبة الخشبية، مثالاً على ذلك أقواس دوغونغ الصينية (Dougong)، التي يعود تاريخها إلى أكثر من ألفي عام (Yan, Hong-tie, & Jian-yang, 2010, p. 74).

3) ظهر نوع مهم من الهياكل الشجرية في عمارة أقبية المروحة (Fan Vault)، بكاتدرائيات العصور الوسطى في القرن الثاني عشر الميلادي، حيث كانت الأعمدة مخروطية الشكل مستوحاة من المظهر الهيكلي للأشجار، ليدعم جذعاً واحداً سطحاً كبيراً من التاج، ويمكن التعرف على أحد الأمثلة لمثل هذا النسخ المتماثل من صنع الإنسان لقبو يشبه الغابة في كنيسة كلية الملك King's College Chapel بمدينة كامبريدج؛ وفي أواخر العصور الوسطى – ولا سيما خلال فترتي الباروك والروكوكو – عادت الأشكال النباتية والزهرية للظهور في العمارة كزخارف ثقيلة بدون أن تلعب أي دورٍ إنشائيٍ. (Md Rian & Sassone, 2014, p. 305)

4) يمكن تتبع الأسلوب الفريد لمحاكاة العناصر النباتية في العمارة والإنشاء لأواخر القرن السابع عشر، عند البدء بتشييد كاتدرائية العائلة المقدسة (Sagrada Familia) في برشلونة بإسبانيا، من تصميم المعماري أنطونيو غاودي Antonio Gaudi الذي كان رائداً في قدرته على دمج الشكل المعماري مع العقلانية الهيكلية المستوحاة من الطبيعة (Md Rian & Sassone, 2014, p. 307).

5) بدأ التوجه نحو استخدام المواد المعدنية في محاكاة العناصر النباتية أواخر القرن التاسع عشر –الذي يعتبر "العصر الذهبي" لاستخدام الأشكال النباتية في الفن والعمارة– وكان ذلك باستخدام الحديد الزهر، وتعتبر واجهة القصر الكبير Grand Palace في باريس بفرنسا، التي شيدت عام 1900 مثالاً للأعمال الحديدية المعمارية التي تخلق هياكل شبيهة بالأشجار. (Md Rian & Sassone, 2014, p. 306)

6) أتاح ازدهار الخرسانة المسلحة خلال النصف الأول من القرن العشرين توجه العديد من المعماريين نحو الشكل المجرد للعناصر النباتية، مثل نبات الفطر، ليتم بذلك التوجه نحو البساطة الهيكلية لتحقيق أشكال منحوتة، حرة الشكل ومجردة؛ ففي الثلاثينيات من القرن العشرين، وصلت التطورات بالأعمدة الفطرية إلى ذروتها في مبنى إدارة جونسون للشمع، الذي صممه فرانك لويد رايت Wright F.L. وشيد عام 1939، وأصبح مثالاً بارزاً على هياكل عيش الغراب الخرسانية؛ والذي حقق فيه رايت وعده بإعطاء مبنى جميل يمكن لأي شخص أن يشعر فيه وكأنه بين أشجار الصنوبر (Md Rian & Sassone, 2014, p. 309).

7) استمرت محاكاة العناصر النباتية "الأشجار" خلال العقدين الخامس والسادس من القرن العشرين، وتعد أعمال المهندس الإنشائي والمعماري فيليكس كانديلا Felix Candela في تصميم عدد من أعمدة المظلة القشرية umbrella column shells مثالاً على ذلك؛ فلم تستوحي هذه الأعمدة الدعم الهيكلي من شكل الأشجار فحسب، وإنما صممت كهيكل قائم بذاته كالمظلة، تغطي مساحةً كبيرة

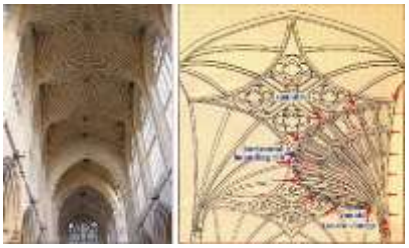
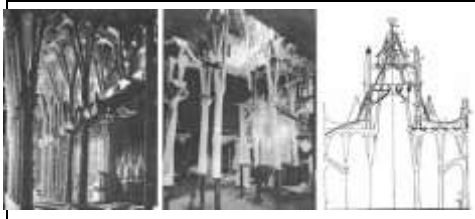
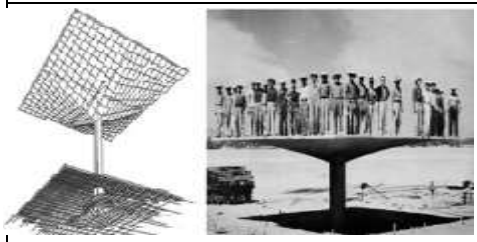
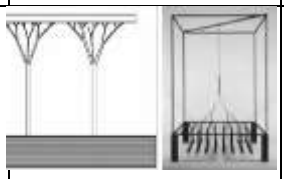
(قد تصل لـ 12*12م، ارتفاع 2م، وسماكة 4 سم)، والذي يعتبر ابتكاراً هيكلياً متقدماً للغاية في تلك الفترة الزمنية (Garlock & Billington , 2008).

8) أتاح انتشار الفولاذ خفيف الوزن في سبعينيات القرن العشرين، فرصاً عديدة لابتكار تصاميم معقدة في الهندسة المعمارية، وقد كان المهندس المعماري الألماني فراي أوتو Frei Otto من أوائل المبدعين في اكتشاف الهياكل المتفرعة الشجرية باستخدام الفولاذ، فقد بحث بشكل منهجي في ذلك، من خلال دراسة أنماط تفرع الأشجار الطبيعية، والاستفادة منها في أعماله التجريبية للوصول إلى أشكال معمارية متفرعة شجرية فعالة (عن طريق أخذ العلاقة بين مسار القوى وشكلها بعين الاعتبار). (Md Rian & Sassone, 2014, p. 313)

9) إن تطبيق التقنيات الحسابية والمحاكاة في الكمبيوتر في العمارة في أواخر القرن العشرين، ساعد على تطوير وتحسين تصميم الهياكل الشجرية المتفرعة، وتنفيذها بطرق أكثر منطقية، ويظهر ذلك في الهياكل الشجرية لمبنى محطة مطار شتوتغارت Stuttgart Airport الذي بني في عام 1992 بألمانيا، حيث تم الاعتماد على استخدام خوارزميات حسابية algorithm للوصول إلى نماذج الهيكل الشجري ثلاثي الأبعاد فيه.

10) طورت تقنية الخوارزمية الوراثية[4] genetic algorithm –التي ظهرت في بداية القرن الحادي والعشرين– تصميم وبناء الهياكل المتفرعة، حيث ساعدت في إعادة تشكيلها، وحسنت من أحجامها، ويظهر ذلك في مركز قطر الوطني للمؤتمرات Qatar National Convention Centre بالدوحة، الذي بني عام 2011، حيث تم تحديد الشروط الأولية للهيكل المتفرع من حيث الارتفاع، الحجم، الأحمال ونقاط الدعم، وتطويرها باستخدام خوارزميات تطورية، بغرض تحسين سلوكه الإنشائي، لاختيار الشكل الأكثر إثارةً للاهتمام من مجموعة الأشكال النهائية المثلى؛ وبذلك نجد أن التقنيات الحسابية لم تساعد في تصميم الهياكل المتفرعة فحسب، بل شجعت المعماريين على ربط أفكارهم بالطبيعة (الأشجار) بطريقة أكثر منهجية، مع فهم أعمق لمنهجية وكفاءة الهياكل الطبيعية (Md Rian & Sassone, 2014, pp. 317-319).

[4] الخوارزميات الوراثية في التصميم: هي أداة من أدوات التكوين باستخدام برامج الحاسب الآلي، تعتمد على تحويل الأشكال الهندسية إلى رموز، وإجراء عملية التزاوج بينها، وتوليد عدد من الأشكال المتشابهة التي تنتقى من الجمع المولد بناءً على موازنة مناسبة معرفة سابقاً، ثم تهجن الأشكال، فتمرر الملامح المفيدة التي تعزز الصمود والاستمرارية إلى الأجيال الجديدة من التصميم، ويتم ذلك للحصول على الحلول المثلى من خلال تغييرات إضافية صغيرة على عدة أجيال. (جوده، 2018، ص246)

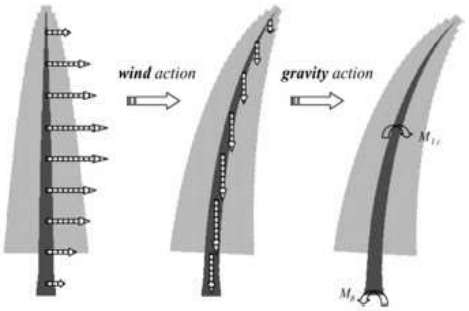
| الجدول (1) التسلسل التاريخي لمحاكاة العناصر النباتية في المباني | | | |
|---|---|---|---|
| الفترة الزمنية | | الفترة الزمنية | |
| 1400 قبل الميلاد مصر | أعمدة معبد الأقصر | من 500 قبل الميلاد إلى 400 الميلادي العمارة الكلاسيكية الرومانية واليونانية | العمود الكورنثي ونبات الـ Acanthus والأفاريز الرومانية القديمة |
| من 771 قبل الميلاد إلى 476 قبل الميلاد الصين (بلاد الشرق البعيد) | أقواس دوغونغ الصينية | القرن التاسع إلى القرن السادس عشر فترة العصور الوسطى |  كنيسة King's College في مدينة كامبريدج |
| من 1890 إلى 1920 | Grand Palace في باريس | من 1880 إلى 1920 أعمال أنطونيو غاودي |  كاتدرائية Sagrada Familia في برشلونة |
| النصف الأول من القرن العشرين ((1930-1950 | مبنى إدارة جونسون للشمع | النصف الثاني من القرن العشرين (1950-2000) |  أعمدة المظلة القشرية لـ فيليكس كانديلا |
| في أواخر القرن العشرين 1970 |  أبحاث فراي اوتو | العمارة المعاصرة | مطار شتوتغارت- ومركز قطر الوطني للمؤتمرات |

المصدر: (Md Rian & Sassone, 2014, p. 321) بتعديل الباحثة

## 7- مفهوم الهياكل المتفرعة الشجرية:

تعد أشكال الأشجار من أفضل الأمثلة على التعقيد والكسورية الطبيعية التقريبية (Fractal geometry) المتشابهة ذاتياً في النمط وغير المنتظمة بدرجة كبيرة، والمتمتعة بمجموعة من الخصائص الميكانيكية، التي تركز على العلاقة بين الشكل والقوة الهيكلية؛ وتتمثل

أهم هذه الخواص في شكل الأشجار القادر على تهيئة نفسه لتحمل قوى الرياح ومعالجة لحظات الانحناء، فأثناء حركة الرياح، تتغير الضغوط من الشد على الجانب المقعر إلى الضغط على الجانب المحدب؛ والضغط المحوري هو حمولة أخرى تحملها جذوع الأشجار والسيقان (انظر شكل1)، حيث يتم توزيع الضغوط الداخلية بالتساوي والحفاظ على التجانس عن طريق التناقص التدريجي لمقاطع فروع الأشجار باتجاه الأعلى، مما يضمن التوزيع المنتظم للضغط في جميع أنحاء الهيكل، ويقلل من الوزن الذاتي له؛ كما أن نمو الأشجار لا يتطور بالتساوي في جميع الاتجاهات، ولكن تنظمها تأثيرات الجاذبية والضوء(Joshy, 2018, p. 133).

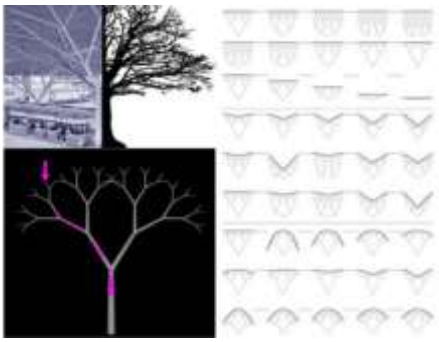



**الشكل (1) عمل قوى الرياح والجاذبية ولحظات الانحناء القاعدية في الشجرة (Md Rian & Sassone, 2014, p. 301)**

وبذلك نجد أن الأشجار تمثل أكثر بكثير من مجرد مجموعة من الأغصان والفروع المرتبطة بمحور مشترك، مما لفت انتباه المصممين والمهندسين المعماريين لتصميم عدد من الهياكل الشبيهة بالأشجار، والتي يشار إليها باسم الهيكل الشجري Dendritic Structure[5]"، كما تعرف هذه الهياكل بمصطلحات أخرى كـ: "الهياكل المتفرعة Branching Structure"، "شبيه بالشجرة Tree-Like"، و"الشجرية Arboreal" (Md Rian & Sassone, 2014, p. 302).

فالهياكل الشجرية نظام إنشائي مستلهم من شكل الأشجار، وطريقة تحميل جذوعها على الهيكل الرأسي الدائري الذي يشبه العمود في النظام الإنشائي الهيكلي، فيعتبر نظاماً هندسياً قائماً بشكل عام على نقل الأحمال الإنشائية وتوزيعها على التفرع باستخدام مجموعة من الدعامات المائلة، التي تعتبر أنظمة هيكلية يتفرع كل منها عند نقطة معينة (عقدة knot) إلى فرعين آخرين على الأقل؛ يمكن أن تتعرض هذه الهياكل للتوتر والضغط والانثناء والالتواء، كما توفر طريقة فعالة لنقل الأحمال السطحية الكبيرة إلى نقطة واحدة على الأرض (SMIA, p. 7).

تتيح الهياكل المتفرعة الشجرية استخدام عناصر هيكلية رشيقة، ذات أسطح خارجية متنوعة (مستوية، منحنية أو مائلة) (كما في الشكل 2)، تعتمد على تكرار التفرعات لتغطي مجازات مختلفة (SMIA, p. 9).



**الشكل (2) مفهوم الهياكل المتفرعة الشجرية، ودورها في نقل الأحمال الى الأرض الطبيعية (SMIA, pp. 8,24)**

## 8- أنواع الهياكل الشجرية:

تتقسم الهياكل الشجرية حسب خصائصها الشكلية إلى عدة أنواع منها:

[5] "Dendron" (δενδρον) هي كلمة يونانية التي تعني "شجرة"، Dendriforms هو تقليد لهيئة وشكل شجرة أو نبات.

1- هيكل شجري مستمر، حيث يتفرع العمود الذي يمثل جذع الشجرة إلى عدة فروع تمثل الأغصان؛ لتحمل السقف بحيث تكوّن وحدة واحدة.

**الشكل (3) نموذج الهيكل الشجري المستمر في مطعم the Tote (Md Rian & Sassone, 2014, p. 316) بتعديل الباحثة**

2- هيكل شجري متفصل، حيث يتصل عمود أساسي سميك بعدة أعمدة فرعية (اثنان أو ثلاثة أو أكثر) عن طريق وصلات.

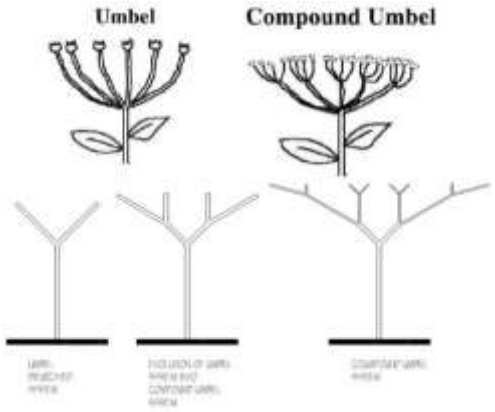
**الشكل (4) نموذج الهيكل الشجري المتفصل في المبنى السكنيUnder Pohutukawa (Barrie, pp. 36,38)**

3- شبكة فروع شجرية متداخلة، والتي تكون غالباً من الصلب "steel"، وبترابطها مع بعضها تكوّن الشكل الانسيابي لفراغ المبنى.

**الشكل (5) نموذج لهيكل شجري من الفروع المتداخلة في مبنى El- Masdar Headquarters (Ghobashy & Mosaad, 2016, p. 578)**

## 9- النظام المظلي The Umbel System:

تأتي كلمة umbel من umbella باللاتينية الجديدة، ومن اللاتينية umbrella (بمعنى مظلة الشمس، المظلة، الظل)؛ يمكن تصور نظام umbel كحالة خاصة من النظام الشبيه بالأشجار، حيث ينتشر عدد من سيقان فرعية قصيرة (تسمى عناقيدpedicles)، متساوية في الطول من نقطة مشتركة مثل أضلاع المظلة، والتي تنقل الحمولات عبر عمود واحد إلى الأرض، بشكل مشابه لمبدأ انتقال الأحمال في المظلة (كما في شكل 6) (Ahmeti, 2007, p. 19).




**الشكل(6) نظام umbel الهيكلي والمركب في الطبيعة والعمارة (Ahmeti, 2007, pp. 19,20)**

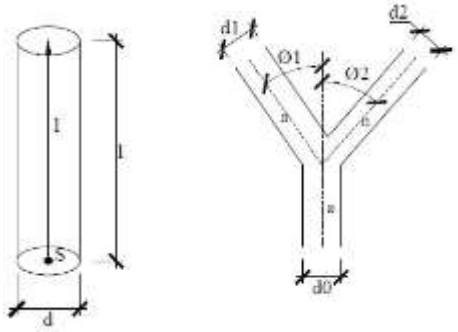
## 10- أساليب تصميم الهياكل الشجرية وتقنيات تنفيذها:

عند تصميم أي هيكل شجري يتم فحص عدة مجموعات من الهياكل المتفرعة والمبادئ الهيكلية، فيما يتعلق بأدائها وتكلفة البناء وجودة التصميم وقيود كود البناء المحلي وتقييمها، حيث تتحدد خصوصية استخدام هذه الهياكل المتفرعة في إيجاد الشكل الأكثر ملاءمةً لحل مشكلة المشروع الفعلي؛ تم تصميم هذه الهياكل قديماً من خلال الطريقة التجريبية، التي تعتمد

على بناء نماذج models لدراسة هذه الأشكال، ومع تطور التكنولوجيا جذبت الطريقة العددية والرقمية انتباه المهندسين، للعثور على أشكال هندسية فعالة، تتميز بحد أدنى من الطول والوزن الكلي للعناصر (Buelow, 2007, p. 363).

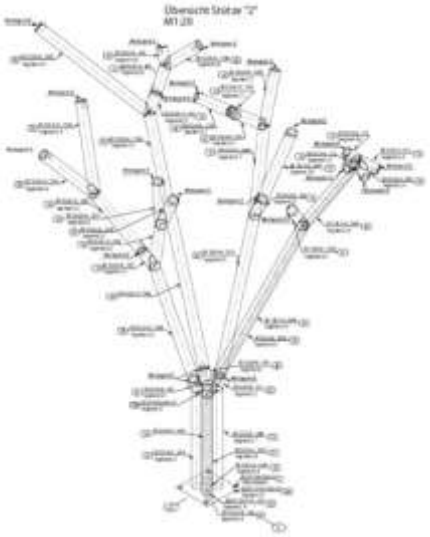
تعتمد هندسة الهياكل المتفرعة على عدة عوامل داخلية وخارجية، أهم عاملين في بنية الهيكل الشجري هما: العقد والعناصر المتفرعة الداخلية (الفروع) وتشعبها؛ حيث يتم تعريف الفرع مادياً من خلال طوله (l)، وقطره ($d$) ونقطة البداية ($s$) والاتجاه ($l$)؛ يتميز التشعب بزوايا بين محور الفرع الأصلي والفروع الفرعية $Ø_i$ ( i = 1,2)، ونسب الطول $l_i/l_0$، والقطر $d_i/d_0$، بين الفروع الأصلية والفرعية (انظر الشكل7) (Ahmeti, 2007, p. 18).

يلعب مستوى الحمل أيضاً دوراً في الشكل الهندسي الأمثل؛ مع مستويات الحمل الأكبر، تكون أطوال العناصر الأكثر كفاءة أطول، ومع الأحمال ذات المستوى المنخفض، يلزم وجود عناصر أصغر وأقصر للحفاظ على نسبة رشاقة جيدة للهيكل ككل (Buelow, 2007, p. 367).




**الشكل (7) العوامل المؤثرة في شكل الهياكل المتفرعة الشجرية، المتغيرات المؤثرة (Ahmeti, 2007, p. 18)**

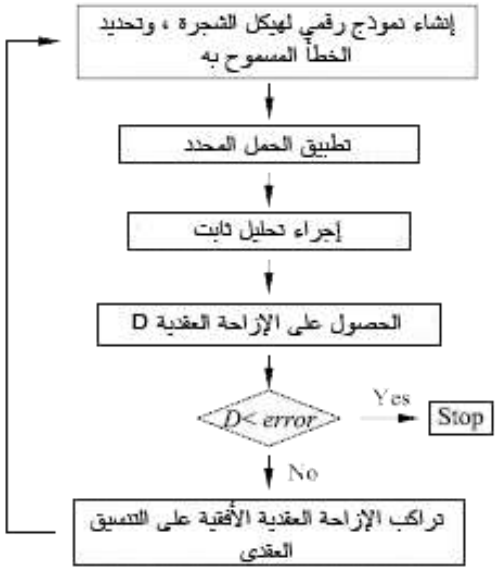
تعتمد **الطريقة العددية** في التصميم على تمثيل الهيكل إنشائياً كنموذج ثلاثي الأبعاد، ويتم تعريف كل عنصر من عناصر الهيكل والمفاصل الواصلة بينها، كما هو موضح في الشكل8.



**الشكل (8) نمذجة ثلاثية الأبعاد للعامود الشجري (Agkathidis & Brown, 2013, p. 94)**

ثم يتم إجراء التحليل المحدد لمحاكاة الأداء واشتقاق الإزاحة العقدية[6] nodal displacement؛ إذا كانت الإزاحة العقدية أكبر من الخطأ المسموح به، فهذا يشير إلى أن شكل هيكل الشجرة المشتق ليس هو الشكل الأمثل، ويتم الاستمرار بسلسلة من العمليات التكرارية للوصول إلى الوضع الأمثل.

[6] الإزاحة العقدية: درجة من الحرية في العقد تسمح بالانتقال، الدوران، الإزاحة.




**الشكل (9) خطة إيجاد نموذج الهيكل الشجري باستخدام الطريقة العددية (Zhao, Liang, Liu, & Sun, 2017, p. 2244) تعديل الباحثة**

أما بالنسبة للهياكل الكبيرة، يمكن أن يكون الخطأ المسموح به أكبر لتقليل العملية التكرارية؛ يجب تعيين هذا وفقاً للمتطلبات الفعلية للمشروع، حيث يؤدي هذا الأسلوب إلى تحسين كل من نقل الحمولات للهياكل المتفرعة، مع تقليل وزن الهيكل وتقليلٍ موازٍ بتكلفة البناء (Zhao, Liang, Liu, & Sun, 2017, p. 2244).

أما **الأسلوب الرقمي** في تصميم الهياكل الشجرية، فيعتمد على توليد الشكل رقمياً في بيئة الحاسب الآلي، حيث يمكن الاعتماد على (جوده، 2018، ص 244):

أ) الأسلوب الخوارزمي (اللوغاريتمي): يسمح هذا الأسلوب باستكشاف هيئات Forms ذات معنى ضمن نظم هندسية أكثر تعقيداً، مبنيةً على أساسٍ رياضي، حيث يتم تحديد الأساليب التي يمكن أن يسلكها التصميم عند نمذجته، ومن ثم عمل محاكاة رقمية لعمليات طبيعية من خلال هذا الأسلوب.

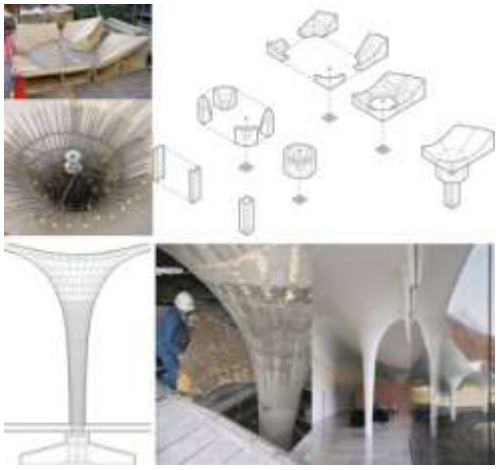
ب) الخوارزميات الوراثية (تم ذكرها سابقاً)

بذلك لم تعد الأشكال مرتبطة بالمحددات السابقة كالحجم والمقياس والأبعاد فهناك محددات أخرى، كالقوى الخارجية والقوى الداخلية والحركة مع إضافة البعد الرابع "الزمن"، وأيضاً تدفق الطاقة الطبيعة التي تولد الأشكال.

وبشكل عام يعرض النظام المتفرع تنظيماً هرمياً متكرراً، حيث تتشابه أجزائه هندسياً مع الكل، وهي سمة مميزة للهندسة الكسورية (Ahmeti, 2007, p. 18)؛ وتختلف تقنيات تنفيذ الهياكل الشجرية حسب مادة البناء المستخدمة كما يلي:

## 10-1- الأعمدة الشجرية الخرسانية:

تعتمد الأعمدة الشجرية الخرسانية في تنفيذها على **آلية الصب في المكان** بشكل اساسي، حيث يتم تشكيل القوالب (الكوفراج)، ووضع حديد التسليح عليها، ليتم بعدها صب الخرسانة، وقد استخدمت هذه التقنية في تنفيذ الأعمدة الشجرية في قاعة جنازة بلدية تويو إيتو في كاكاميغاهارا باليابان (كما هو موضح بالشكل9).



**الشكل (10) نموذج الأعمدة الشجرية الخرسانية المصبوبة في قاعة جنازة تويو إيتو (Keskeys)**

حديثاً يتم استخدام **تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 3D- Printed** في تنفيذ الهياكل الشجرية الخرسانية، وقد تم استخدام هذه التقنية في تنفيذ العمود الذي تم

انشاؤه لدعم سقف في ملعب حضانة في إيكس إن بروفانس والذي صممته جمعية مارك داليبارد المعمارية Marc Dalibard Société d'Architecture، بغرض إنتاج عمود خرساني بارتفاع 4م، وذلك عن طريق برمجة ذراع روبوت صناعي لبثق خليط خاص من الخرسانة، لتشكيل الطبقة الخارجية للهيكل العضوي، ومن ثم تعبئة السطح الخارجي بالخرسانة، لإعطائه السطح الأملس، وإزالة مظهر الطبقات المطبوعة؛ وقد تمت طباعة الهيكل على أجزاء ثم تم تجميعه في الموقع (انظر شكل10)، استغرقت عملية الطباعة وحدها أكثر من 15 ساعة، ومع ذلك تعتبر هذه الطريقة أكثر اقتصاديةً من طريقة الصب التقليدية، وذلك بسبب استخدام عدد أقل من الكوادر البشرية العاملة.

**الشكل (11) نموذج الأعمدة الشجرية الخرسانية بتقنية طباعة 3D (Baranyk, 2017)**

## 10-2- الأعمدة الشجرية المعدنية:

يعتمد المعماري على الفولاذ بصورة أساسية في تصميم الهياكل المتفرعة المعدنية، وذلك بسبب قوته ومتانته، وسهولة تشكيله؛ أما تقنية تنفيذه فتعتمد عل المنهجية "المُجمَّعة" مسبقة الصنع إلى حد كبير، ويعتمد فنه على الاختيار المناسب للعناصر (أشكال الفروع ومقاطعها)، وطريقة تصميم التوصيلات، حيث تلعب الوصلات دوراً مهماً لاستيعاب المتطلبات الهيكلية لمقاومة القص والعزم، جنباً إلى جنب مع ربط الفروع المتراكبة متفاوتة الأبعاد، بالإضافة لاعتبارات أخرى مثل التوازن والشكل والتماثل وقابلية التنفيذ والاقتصاد؛ حيث أن الهياكل الفولاذية شديدة المفصلية أكثر صعوبة في التركيب، فهي تسمح بقدر أقل من الأخطاء في التوصيل، ويمكن أن تؤدي الأخطاء المتراكمة إلى اختلال المحاذاة بشكل عام؛ وعلى الرغم من أن التفاصيل التي تُستخدم عادةً تتضمن بعض طرق الاتصال القياسية إلى حدٍ ما، إلا أنه يتم تعديلها في الغالب كطريقة لتعزيز التعبير المعماري للهيكل، ومن المحتمل أن تمثل تحديات لكل من التصنيع والتركيب، حيث يوجد أنواع مختلفة من التوصيلات التي يمكن تقسيمها إلى: (Boake, 2011, pp. 16,29)

**الوصل باللحام Welded Connections**

**الوصل المثبت بالمسامير Bolted Connections**

**الوصل المصبوب Cast Connections**

**الوصل بالدبوس Pin Connections**

**الوصل بالمفصل Hinge Connections**

**الوصل المخفي Hidden Connections**

بعض هذه الوصلات تصنع وتنفذ في الموقع، وأخرى مسبقة الصنع يتم نقلها للموقع، ومن الأفضل زيادة عدد الوصلات مسبقة الصنع بدلاً من تلك التي يتم تنفيذها عادةً في الموقع، لإمكانية زيادة مراقبة الجودة في الورشات والمصانع الخارجية.

في النهاية، غالباً ما يحدد الحجم الأقصى للعنصر الإنشائي، الذي يمكن نقله إلى الموقع عدد الوصلات المصنعة في الورشات، وعدد ونوع الوصلات الذي يجب القيام به في الموقع؛ وعلى الرغم من أنه يمكن نقل القطع كبيرة الحجم إلى الموقع مع زيادة عوامل

الأمان في نقلها، إلا أن ذلك يزيد من تكلفة المشروع. وبالمثل، عندما يكون الموقع مقيداً فقد لا يكون التجميع المسبق للقطع في الموقع على الأرض ممكناً أيضاً.

يجب التحقق من معظم مشكلات المظهر المرتبطة بالوصلات، من خلال استخدام عينات مادية، أو نموذج بالحجم الطبيعي، أو رسومات ثلاثية الأبعاد – نظراً للهندسة المعقدة للهياكل الشجرية، لا يمكن وصفها بكفاءة في نظام التمثيل ثنائي الأبعاد – يمكن لهذا النهج الأخير توفير الوقت والمال، وفي هذه الحالة فمن المهم مناقشة الجوانب الدقيقة للحام والتثبيت والتشطيب حيث من المحتمل ألا يتم تمثيلها بشكل كامل في النموذج الرقمي.

ولاختيار نوع الاتصال الأفضل للمشروع، يجب معرفة ما يلي:

نوع مسارات التحميل التي تمر عبر الاتصال- الأعضاء في حالة شد أو ضغط- هل أي من التوصيلات ناتج عن حدود عمل عملية النقل؟- تأثير عملية الانتصاب على تصميم الوصلة- نوع الأشكال الهيكلية التي يتم توصيلها- نوع التشطيبات المطلوبة، في حين أن التشطيبات قد تكون المرحلة الأخيرة من البناء، يجب أن يتم اختيار التشطيب في بداية عملية التصميم حيث يمكن أن تؤثر طريقة التشطيب (الدهان) على تكلفة الهيكل الشجري.

**1) الوصل باللحام Welded Connections:**

يتم التركيز على نوعين رئيسين بطريقة الوصل باللحام هما: لحام الشرائح fillet weld ولحام الأخدود the groove weld.

حيث يتم تنفيذ الهياكل المتفرعة المرتبطة باللحام عن طريق حساب ملف تجميعي لكل أنبوب من عناصر الهيكل الشجري وترقيمه، واستخدامه كبيانات تصنيع لقص عناصر الهيكل، بمجرد اكتمال عملية القطع، يتم لحام جميع الوحدات الفرعية المختلفة معاً، بعد الانتهاء من عملية اللحام المتعدد، يتم التخلص من المواد الزائدة الناتجة عن اللحام –من خلال الطحن والتعبئة– مما يؤدي إلى الحصول على انتقال سلس، ثم يتم طلي وغلفنة كافة الفروع الملحومة (انظر الشكل 12).

غالباً ما تُستخدم الوصلات الملحومة على العناصر الهيكلية المجوفة، وتنفذ في ورشات خارجية، بحيث يمكن استخدام أدوات الرفع والتثبيت المناسبة لمعالجة أماكن اللحام والتشطيب، هذا لا يمنع استخدام الوصلات الملحومة في الموقع، ولكنه قد يعني تكاليفاً إضافية لوضع دعائم مؤقتة أو قطع داعمة في مكانها أثناء إجراء اللحام؛ وعند اتخاذ قرار بشأن مستوى تشطيب الاتصال الملحوم، من المهم للغاية احترام مسافة المشاهدة[7]، فغالباً ما يتم طحن أماكن وصل اللحام أو ملؤها أو تنعيمها دون داعٍ، وبالتالي زيادة في التكاليف، كما أن التجليخ المفرط للحامات يمكن أن يقلل من قوتها (Boake, 2011, p. 19).

**الشكل(12) عملية قص ولحام الأعمدة الشجرية المعدنية (Agkathidis & Brown, 2013, pp. 98,99)**

[7] مسافة المشاهدة: إذا كان الاتصال على بعد 6 أمتار أو أكثر من موضع المشاهدة، فسيكون للتوصيل تأثير بصري أقل وسيكون المشاهد أقل عرضة لرؤية اللحامات والعيوب الطفيفة

**2) الوصـــــل المثبـــــت بالمســـــامير Bolted Connections:**

تـتم عمليـة الانتصـاب (عمليـة إنشـاء الهيكـل فـي الموقـع) برفـع العناصـر بواسـطة الرافعـة إلـى الموقـع، حيث يتلقى عمال الحديد العناصر الهيكلية ويوجهونها إلى موضعها، بحيث تتم محاذاة فتحات المسامير –يتم ربـط معظـم زوايـا الألـواح التـي يـتم اسـتخدامها لتـأمين الاتصال بعنصر الاستقبال في الورشات الخارجية قبل الشـحن– ليتضـمن عمـل الموقـع اصـطفاف العناصـر، وإضـافة الحشـوات إذا لـزم الأمـر لتـأمين المحـاذاة، وتركيب البراغي (كما في الشكل13)؛ عندما يتم إدخال البراغـي فـي البدايـة، يـتم شـدها يـدوياً بواسـطة عمـال الحديد، حيث يتم إدخال عدد قليل من البراغي لتحقيق الاستقرار المناسب للهيكل، بحيث يمكن تحرير الرافعة، ثم يقوم طاقم ثانوي بمتابعة الوصلات وتنظيفها لإكمال التوصيل، حيث يتم شد البراغي بشكل صحيح من أجل تحقيق السعة الكاملة عند تحميل الاتصال.

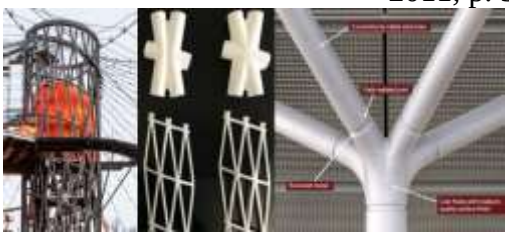
عادةً ما يتم اختيار الوصلات بالمسامير لتحصيل المظهر الصناعي، والذي قد يكون أكثر ملاءمة من الناحية الجمالية، أو نتيجة لقضايا الانتصاب، إضافةً لاستخدامها مع الوصلات الملحومة كوسيلة لتبسيط الانتصاب، عند اختيار هذا النوع من الوصل يتم اختيار نوع البراغي المراد استخدامها، بالإضافة إلى اتساق الجانب الذي يوجد عليه رأس البرغي؛ يمكن استخدام أنواع مختلفة من الفولاذ كمادة للمسامير والبراغي، يستخدم الفولاذ عالي القوة بشكل شائع لقدرته الفائقة على تحمل الأحمال، ويتم استخدام الفولاذ المقاوم للصدأ في التطبيقات التي يكون فيها المظهر مهماً والأحوال الجوية غير مناسبة (رطوبة، أمطار)، وتستخدم البراغي المغلفنة مع مشاريع الصلب المغلفن .(Boake, 2011, p. 29)

**الشكل (13) عملية تثبيت الأعمدة الشجرية المعدنية باستخدام المسامير (Boake, 2011, pp. 16,24)**

**3) الوصلات المصبوبة Cast Connections:**

يـتم اسـتخدام الوصـلات المصـبوبة فـي الهياكـل المتفرعـة المعقدة، ويعـود ذلـك لخصـائص المسـبوكات الفولاذيـة الحاليـة، والتـي تتميـز بقوة أعلـى وقابلـة للحـام أكثـر مرونـة، وقـد سـمحت الوصـلات المصـبوبة فـي التعامل مـع الأشـكال الهندسـية المعقدة والمنحنيـة، دون الصـعوبات التـي تـم العثـور عليهـا باسـتخدام طـرق الوصـل الأخـرى، إلا أنهـا تتطلـب مسـتوىً مختلفـاً مـن الخبرة الهندسية والاختبار.

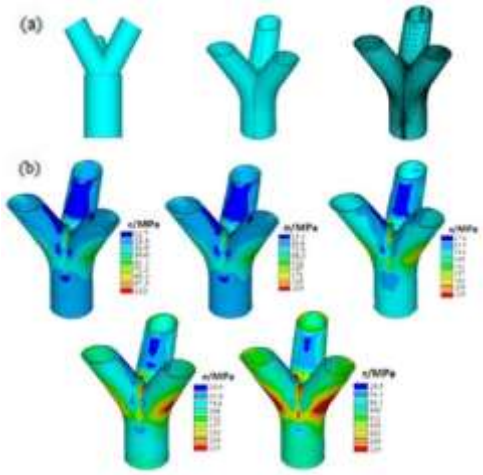
يمكن تشكيل المصبوبات بشكل مجوف أو صلب (مملـوء)، عـادة مـا توجـد المصـبوبات الصـلبة فـي الوصـلات صـغيرة الحجـم، بينمـا تسـتخدم المصـبوبات المجوفـة للأعضـاء الأكبـر حجمـاً (انظـر الشـكل14)، حيث ستواجه المصبوبات الصلبة صعوبة في تحقيق التبريد المنتظم – يمكن أن يؤدي التبريد غير المنتظم إلى ضغوط داخلية– وستكون أكثر تكلفة. (Boake, 2011, p. 31)



**الشكل (14) الوصلات المصبوبة للأعمدة الشجرية المعدنية (HOW TO SPECIFY CAST STEEL TREE NODES, 2019)**

تتطلب المصبوبات المتخصصة الكبيرة اختباراً محدداً للتأكد من أنها مصممة بشكلٍ صحيح وقادرة على مقاومة الضغوط؛ فمن ناحية، يتم دعم الهيكل العلوي بأكمله فقط من خلال مفصل واحد، وسوف ينهار الهيكل الشبيه بالشجرة إذا تم تدمير المفصل؛ من ناحية أخرى، تتلاقى العديد من الأعضاء بما في ذلك الجذع والأنابيب الفرعية على المفصل مع ضمان وجود انتقالات سلسة، وبذلك تكون استجابات القوى لمثل هذه المفاصل معقدة.

من أجل معرفة أداء المفصل بشكل شامل، يتم إنشاء نموذج العنصر المحدد (الهيكل الشجري كاملاً)، ثم إنشاء نموذج كامل الحجم لمفصل الفولاذ المصبوب بواسطة البرامج الرقمية، ويتم تحليله مع الأخذ في الاعتبار اللاخطية الهندسية والمادية، يتم إجراء تجربة التحقق المقابلة لتأكيد المحاكاة العددية، ويتم الحصول على توزيع الضغط للمفصل تحت الضغط (كما يوضح الشكل15). ليوفر أساساً لتقييم قوة وصلابة المفصل تلبيةً لمتطلبات التصميم، حيث تتركز الضغوط الكبيرة بشكل أساسي على المنطقة الأساسية للمفصل، وتكون الضغوط في الأنبوب الرئيسي والأنابيب الفرعية صغيرة. (DU, ZHU, WANG, & HE, 2019, p. 303 )




**الشكل (15) (a) النمذجة الرقمية للمفصل باستخدام برامج مختلفة، (b) حدود اجهاد المفصل تحت قوى مختلفة ( DU, ZHU, WANG, & HE, 2019, pp. 303,304)**

بعد التأكد من صحة تصميم المفصل يتم ترجمة الشكل الأساسي للقالب المستخدم لصب الوصلات، من ملفCAD إلى شكل ثلاثي الأبعاد؛ ليتكون قالب الراتنج ثلاثي الأبعاد بالحجم الكامل (انظر الشكل16).

**الشكل (16) تشكيل المفصل المصبوب للعمود الشجري (Boake, 2011, p. 33)**

يتم وصل التفرعات الشجرية بالوصلة المصبوبة عن طريق اللحام، ويتطلب خط اللحام الذي يربط الفرع بالصب تمريرات متعددة وطحناً وتعبئة، من أجل إنشاء المظهر الذي يرغب به المهندس المعماري (كما في الشكل17)؛ وبغض النظر عن الشكل النهائي الخارجي للمفصل المصبوب، لا يجب أن تتطابق الأبعاد الداخلية للفراغ في الصب مع الشكل الخارجي للوصلة، أي يمكن حصول تغيرات في سمك الجدار، ويمكن إدخال اللامركزية في هندسة الخط المركزي

للإطار الفولاذي؛ لتقليل الحجم الإجمالي المطلوب لعقدة الصب.

**الشكل (17) لحام العقدة المصبوبة مع الفروع والمظهر السلس النهائي للعمود الشجري (Boake, 2011, p. 33)**

تختلف نهايات الوصلات المصبوبة، ويعود ذلك إلى عملية التصنيع الخاصة بها، والمواد المستخدمة أثناء عملية الصب، على سبيل المثال، يكون السطح النهائي للصلب بمظهر مشابه للرمل الخشن؛ إذا تم استخدام الرمل كمادة في عملية الصب (كما يوضح الشكل18). وعليه سيكون التشطيب الخاص مطلوباً، إذا تم السعي للحصول على مظهر نهائي سلس بين الوصلة المصبوبة والعنصر الأنبوبي المجاور، يمكن أن يعني ذلك طحناً وتعبئة كبيرة لتعيم النهاية الخشنة للصب، أو إزالة علامات طاحونة الصب (Boake, 2011, p. 33).

**الشكل(18) طريقة معالجة السطح النهائي لمفصل العمود الشجري (Boake, 2011, p. 33)**

يمكن أن يكون استخدام الوصلات المصبوبة لمرة واحدة مكلفاً للغاية، وبالتالي لكي تستخدم المسبوكات بشكل ناجح، يمكن حصر مجموعة من الأسباب مثل: المتطلبات الجمالية العالية الناتجة عن نوعية وأهمية المنشأة تدفع لاستخدام هذه الوصلات– تكرار استخدام نموذج الوصلة المصبوبة لعدة مرات في المشروع– الفولاذ المصبوب متناحي القوة والمتانة، هذا يجعل استخدام المصبوبات مثالياً في التطبيقات الحرجة عالية الضغط، لاسيما عندما تتزامن مناطق التعقيد الهندسي مع المنطقة المتأثرة بالحرارة في اللحام؛ في هذه الحالات، يؤدي استخدام العقدة الفولاذية المصبوبة إلى نقل اللحام إلى منطقة ذات ضغط أقل وتحسين الهندسة الانتقالية، وكلاهما يقلل بشكل كبير من تركيز الإجهاد ويحسن بشكل كبير من عمر إجهاد الاتصال.

**4) الوصل باستخدام الدبوس Pin Connections:**

تعمل وصلة الدبوس بشكل أساسي مثل مفصل ملتف، غالباً ما تكون خفيفة الوزن جداً في المظهر، تنقل أحمال القص الرأسية والأفقية بينما لا يمكنها مقاومة أي قوى انحناء أو عزم (الدوران)؛ تحدد كمية الحمولة التي يتم نقلها عبر المفصل حجم البرغي وسمك اللوحة، حيث يجب أن يكون قطر البرغي كبيراً بما يكفي، ليكون به مساحة مقطعية كافية للتعامل مع قوة القص، ويجب أن يكون سمك اللوحة مناسباً، عند دمجه مع قطر البرغي، لمقاومة الانزلاق.

قد تبدو العديد من وصلات الدبوس وكأنها مصممة للتدوير، ولكنها لا تعمل كنقاط دوران للهيكل، ولكنها مصممة لاستيعاب وقبول درجة معينة من الدوران لتسهيل عملية الانتصاب، عن طريق السماح ببعض الاختلافات الطفيفة في زوايا العناصر (التفرعات الشجرية). فإذا لم يكن من الضروري أن يكون الاتصال قاسياً، فإنه يجعل من السهل إلى حدٍ ما على عمال الحديد تركيب هذه العناصر.

تعتبر وصلات الدبوس سهلة الصنع نسبياً، حيث يتم لحام اللوحات ذات الثقوب في الجزء السفلي من العضو الهيكلي (فرع الشجرة)، ويتم إنشاء لوحات

دائرية لتوصيل الدبوس خاصة من الفولاذ المكثف لمقاومة القوى عند الاتصال، ويتم توصيل هذه اللوحات الدائرية عن طريق لوحات بشكل X التي تشكل جزءاً من حامل توصيل الدبوس، ثم يتم لحام العنصر الدائري في الموقع، بحيث يتكيف كل موصل مع زاوية دخول مختلفة قليلاً نتيجة لعدم تناسق تفرعات الشجرةP ثم يتم إدخال نهايات فروع الشجرة في وصلة الدبوس هذه (كما يوضح الشكل19) (Boake, 2011, p. 36).

**الشكل (19) المراحل المتسلسلة لاستخدام وصلة الدبوس في العمود الشجري (Boake, 2011, pp. 16,36)**

**5) الوصل باستخدام المفاصل Hinge Connections:**

يمكن اعتبار المفاصل نموذجاً مبسطاً للوصلات المعدنية (الفولاذية)، تتضمن العديد من الأنواع التي لا يُقصد منها التدوير أو غير مصممة لمقاومة الدوران، يتم نقل القوى الرأسية والأفقية من خلال هذه المفاصل.

يكمن الاختلاف بين المفصل ووصلة الدبوس في عدد البراغي التي نجدها عادة في الوصلة والتي بدورها تستنتج قدرة الاتصال على الدوران؛ ففي حين أن اتصال الدبوس يستخدم مسمار واحد لتوفير المادة لنقل القص، سيكون لوصلة المفصل عدداً أكبر من البراغي لمقاومة قوى القص، فلن تكون قادرة على الدوران نتيجة للمسامير، ولكنها لا تزال غير مصممة لمقاومة أي لحظة انحناء (Boake, 2011, p. 21).

**الشكل (20) وصل المفصل في العمود الشجري (Boake, 2011, p. 21)**

**6) الوصل المخفي Hidden Connections:**

أحياناً ولتحقيق النواحي الجمالية للهيكل المتفرع الشجري، يتم العمل على جعل مناطق الوصل بين الفروع تختفي، إلا أن ذلك ينتج عنه تكاليف إضافية للمشروع، ناتجة عن الابتعاد عن القيام بأنواع التوصيل البسيطة (مثبت بالمسامير أو الدبوس أو باستخدام المفصل)، أو نتيجةً للمعالجات المتعددة في إصلاح مناطق اللحام (الطحن والتعبئة) لجعلها غير مرئية – وهو خيار مكلف خاصةً إذا تم في الموقع– وقد لا يمكننا استخدام طريقة اللحام، نتيجةً لبعض القيود في عملية النقل والتركيب (الزمن، الكلفة) التي تؤدي إلى ضرورة تبسيط الاتصال (اختيار الوصل المثبت بالمسامير)، ولتحقيق النواحي الجمالية المطلوبة، يتم تغطية الاتصال بنظام لوحة بسيطة (كما هو موضح في الشكل21)، مما يجعل هذا النوع من الوصلات أسهل بكثير في التركيب من الوصلة الملحومة وأقل تكلفةً (Boake, 2011, p. 18).

**الشكل (21): نموذج من نماذج الوصلات المخفية في الأعمدة الشجرية (Boake, 2011, p. 18)**

وبذلك نجد أن لكل نوع من أنواع الوصل مزايا وعيوب يتم توضيحها من خلال الجدول أدناه (الجدول رقم 2):

**الجدول (2) مقارنة بين أنواع الوصل المختلفة للأعمدة الشجرية المعدنية**

| | المظهر النهائي | تكاليف التنفيذ | التشطيب النهائي | عملية التنفيذ |
|---|---|---|---|---|
| **الوصل باللحام** | نظيف لا توجد أي خطوط مرئية. تسمح بتشكيل أشكال هندسية معقدة. | مكلفة نتيجة لعمليات الطن والتعبئة لأماكن اللحام، وبخاصة اذا تمت في الموقع. | الكثير من عمليات الطحن والتعبئة | يحتاج مستوى عالي من الصنعة. تنفذ في ورشات خارجية أو في الموقع. |
| **الوصل بالمسامير** | صناعي | الأقل كلفةً | ــ | سهل وبسيط. تنفذ في ورشات خارجية وتجمّع في الموقع. |
| **الوصل المصبوب** | نظيف لا توجد أي خطوط مرئية. تسمح بتشكيل أشكال هندسية معقدة. | مكلفة للغاية عند الاستخدام لمرة واحدة، ولكنها تعتبر اقتصادية عند تعدد الاستخدام. | عمليات كثيرة لإزالة علامات عملية الصب | يحتاج مستوى عالٍ من الخبرة الهندسية. تقلل من صعوبة بناء الهيكل. تنفذ في ورشات خارجية. |
| **باستخدام الدبوس** | خفيف الوزن في المظهر. يستخدم برغي واحد لتأمين الوصل. | الأقل كلفةً | ــ | سهل وبسيط. تنفذ في ورشات خارجية وتجمّع في الموقع. |
| **باستخدام المفصل** | خفيف الوزن في المظهر. تستخدم عدة براغي لتأمين الوصل. | الأقل كلفةً | ــ | سهل وبسيط. تنفذ في ورشات خارجية وتجمّع في الموقع. |
| **الوصل المخفي** | لا توجد أي خطوط مرئية، يمكن أن تظهر حدود اللوحة التي يتم تغطية الوصل من خلالها | أقل كلفةً من وصل اللحام أو المصبوب. | أحياناً يتم معالجة (إخفاء) حدود اللوحة المستخدمة لتغطية الوصل. | سهل وبسيط. سرعة في التنفيذ. |

**المصدر: (إعداد الباحثة)**

## 10-3- الأعمدة الشجرية الخشبية:

غالباً ما يستخدم الفولاذ في نقاط الوصل مع الأخشاب الهيكلية، حيث يؤدي إقران الفولاذ والخشب في مشروع واحد إلى تجميعات فريدة من الهياكل الهجينة المستدامة والممتعة من الناحية الجمالية، كما أن قوة الفولاذ تقلل من الحجم والكلفة الاقتصادية للهيكل، والذي لن يكون ممكناً مع تصميم مصنوع بالكامل من الخشب.

يمكن أن تكون الوصلات بين الخشب والصلب صعبة، بسبب خصائصها المختلفة، تتمثل إحدى المشكلات الرئيسية في معاملات التمدد والانكماش المختلفة عند دمج العناصر الخشبية بوصلات معدنية، بالإضافة إلى ذلك، يتفوق الفولاذ في الشد بينما يتفاعل الخشب بشكلٍ أفضل مع الضغط؛ وقد ظهرت برامج تحليلية متاحة الآن للمساعدة في إعداد الهيكل المطلوب عند دمج المواد.

**الشكل (22) الوصلات المعدنية في التفريعات الخشبية للهياكل الشجرية (Boake, 2011, p. 39)**

يمكن أن تكون هذه الوصلات المعدنية واضحة وظاهرة للعيان، وترتبط بالعناصر الخشبية عن طريق براغي تمر من خلال العنصر الخشبي والصلب بالكامل (كما في الشكل22) (Boake, 2011, p. 39).

ويمكن تصميم نظام لإخفاء لوحات التوصيل، حيث يتم إدخال صفيحة فولاذية واحدة في فتحة ممزقة في وسط كل قطعة من خشب، كما صممت شركة Timber Systems في ردهة مركز كارلو فيداني بيل الإقليمي للسرطان، التابع لمستشفى كريدي فالي في مدينة ميسيساغا الكندية؛ حيث أمضى فريق Timber

Systems ساعات في ابتكار نظام من الوصلات المخفية لتحقيق أكثر الهياكل الخشبية تعقيداً في أمريكا الشمالية عندما تم افتتاحه في عام 2004 (انظر الشكل23) (WARD, 2014).

**الشكل (23) الوصل المخفي للأعمدة الشجرية الخشبية (WARD, 2014)**

يمكن استخدام القصب أيضاً في إنشاء الهياكل الشجرية المتفرعة (كما في الشكل24)، على أن يتم تعيين نوع وطبيعة الوصلات والمفاصل المستخدمة، والذي يعتمد على كيفية أو مكان توصيل الموصلات بقصبة الخيزران: على السطح الخارجي للقصبة، في داخل تجويف القصبة، أو اختراق جدار القصبة عمودياً على الألياف.

**الشكل (24) نماذج لاستخدام القصب في الأعمدة الشجرية (Widyowijatnoko & Harries, 2020, pp. 586, 570,)**

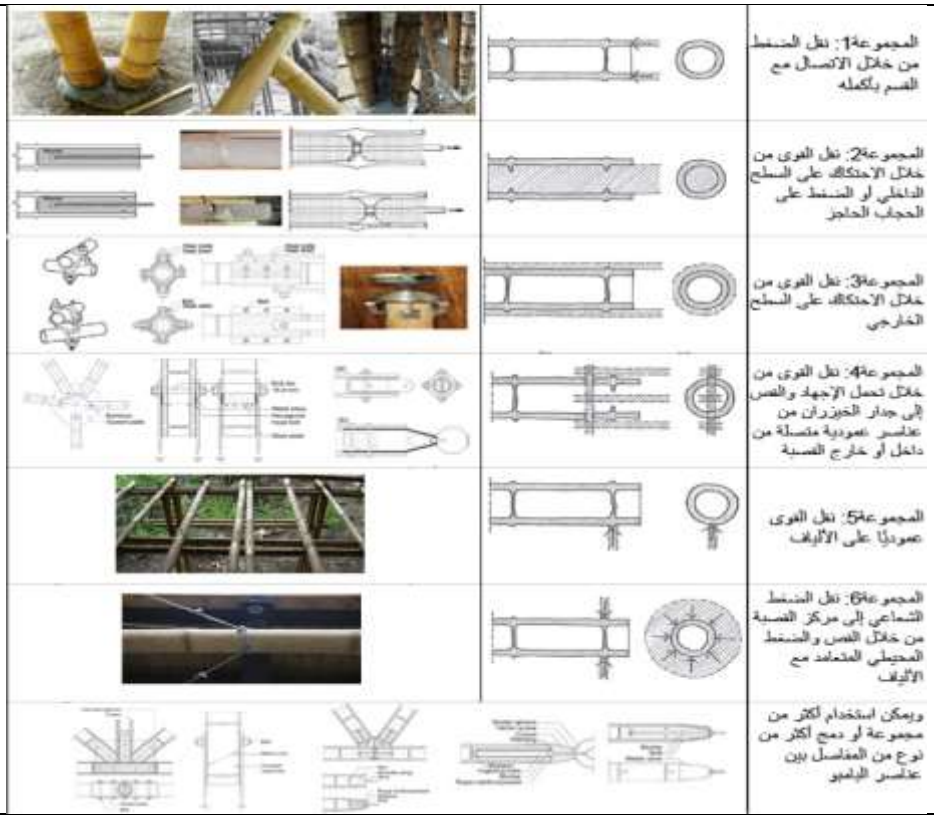
وقد تم اقتراح تصنيف دقيق لهذه المفاصل بناءً على المبادئ التالية: (Widyowijatnoko & Harries, 2020, p. 571)

**طريقة نقل القوة:** الضغط على طول الألياف أو بشكل عمودي عليها، توتر، احتكاك أو قص.

**موضع الوصل:** متصل من داخل أو خارج القصبة، أو متصل بشكل موازٍ أو عمودي على الألياف.

بناءً على هذه المبادئ، يمكن تقسيم وصلات الخيزران إلى ست مجموعات رئيسة (كما هو موضح في الجدول3)؛ حيث تستخدم معظم مفاصل الخيزران مزيجاً من هذه المبادئ الأساسية.

**الجدول (3) تصنيف المجموعات الرئيسة لوصلات الخيزران**




المصدر: (Widyowijatnoko & Harries, 2020, pp. 572-584) بتصرف الباحثة

## 10-4- الأعمدة الشجرية المختلطة:

يمكن استعمال أكثر من مادة بناء في الهيكل المتفرع الشجري، بالتركيز على إمكانيات كل مادة، ضمن سياق عملها؛ حيث يمكن استخدام **الخرسانة والمعدن** (تفريعات شجرية معدنية على عمود خرساني أساسي والوصل باستخدام المسامير)، أو استخدام **الخرسانة والخشب** (تجميع التفريعات الخشبية على أساس خرساني بواسطة وصلات معدنية)، أو استخدام **المعدن والخشب** (حيث يمكن تثبيت التفريعات الخشبية على عمود معدني)، إضافة لاستخدام الوصلات المعدنية (كما يوضح الشكل 25).

**الشكل (25)نماذج مختلفة لأعمدة شجرية مختلطة (Steel Structures Education Foundation, 2006)، (Boake, 2011, p. 33)**

**11- التأثيرات التشكيلية للهياكل المتفرعة الشجرية على الفراغات الداخلية للمباني:**

**الجدول (4) تأثير الهياكل المتفرعة الشجرية على الفراغات الداخلية**

| | | |
|---|---|---|
| **تطوير أشكال العناصر الداخلية interior element** | **الأعمدة** | تعتمد الأعمدة التقليدية على التكرار التقليدي الممل وتشابه المسافات؛ تم تطوير الأعمدة المتفرعة الشجرية، بحيث يمكن تجميع عدة أعمدة إلى عمود واحد، بخصائص شكلية متشعبة ومتمايزة، وبعناصر هيكلية أرق وأنحف، تغطي مساحات أكبر، وتؤمن المزيد من الثبات مقارنة بالإنشائيات التقليدية. |
| | **الجدران المحيطة** | يسمح استخدام الهياكل المتفرعة الشجرية بتحرير الجدران الخارجية من الأعمدة المكررة فيها، وبالتالي تحقيق إمكانية الفتح الكامل على المحيط، لتأمين مجال رؤية كامل دون عوائق على المنظر الخارجي، وتأمين الإضاءة الطبيعية للفراغ. |
| | **الأسقف** | أدى استخدام الهياكل المتفرعة الشجرية لتحقيق إمكانية تفاوت الارتفاعات في الأسقف، أو تأمين أسطح مائلة أو منحنية بالإضافة للأسطح المستوية. |
| **تطوير الفضاء الداخلي spaces** | | إن الكائنات الحية تتفوق من حيث سلامة الوظيفة، والتشكيل، والبنية والمواد، والتي ألهمت إنتاج هياكل معمارية بيولوجية مماثلة من خلال العمل بأقل طاقة ومواد على أقصى تقدير؛ فقد أدى استخدام الهياكل الشجرية إلى تقليل عدد الأعمدة اللازمة، وبالتالي تحرير الفراغ الداخلي، مما يسمح بتعدد استخدام هذه الفراغات بما يحقق احتياجات والتغيرات المستقبلية للمستخدم. |
| **الوظائف function** | | انتشرت الهياكل المتفرعة الشجرية في وظائف معينة أكثر من غيرها، بحسب خصائصها ومميزاتها المعمارية، والتي يلحظ وجودها في المباني العامة ذات المجازات الواسعة كالمطارات ومحطات القطار، وكذلك مراكز التسوق والساحات الرياضية وبعض المطاعم، كما وجدت الهياكل (الأعمدة) الشبيهة بالأشجار تطبيقاً فعالاً للغاية في تصميم الجسور. |

**المصدر: (إعداد الباحثة)**

## 12- النتائج والتوصيات:

توصل البحث إلى مجموعة من النتائج تتمثل بـ:

1) تخضع الهياكل الشجرية في المجال الهندسي والبيولوجي لتحديات وقيود مختلفة (قدرة الأشجار على نمو، المرونة التي تتيحها الطبيعة بالحركة، التكيف للتغيرات المحيطة)، والتي تعد فرقاً مركزياً بين النباتات والهياكل المتفرعة المبنية؛ وعلى الرغم من أن عملية النمو نفسها غير قابلة للتحويل إلى هياكل البناء، إلا أنه يمكن تلخيص ترتيبات الأنسجة والمبادئ الوظيفية للتطبيقات الفنية، بالإضافة إلى محاكاة الاستقرار الميكانيكي لها.

2) إن عملية تصميم الهيكل المتفرع ليس عملية تصميم تقليدية (حيث يحدد المعماري التصميم ويمرره إلى المهندسين لمزيد من المعالجة)، وإنما يتم من خلال عملية تكرارية تفاعلية بين أعضاء الفريق الهندسي(معماريين، مهندسين والمصنعين).

3) يعتمد تصميم الهياكل المتفرعة الشجرية على طبيعة الفروع والعقد الواصلة بينها، إذ يتم توصيف الفرع من خلال طوله وقطره واتجاهه (الزاوية).

4) يؤثر مستوى الأحمال في تحديد الأشكال المثالية للأنظمة المتفرعة، حيث تكون العناصر الفعالة أطول مع مستويات التحميل الأكبر؛ أما الأحمال المنخفضة، يلزمها وجود عناصر أصغر بأطوال أقصر للحفاظ على نسبة النحافة للهيكل ككل، وبذلك نجد أن الطول يتناسب مع الحمولة؛ ويزداد وزن العناصر أيضاً مع زيادة الحمل.

5) دور التكنولوجيا والتقدم التقني ومواد البناء في تطوير وتنفيذ هذه الهياكل، حيث تفقد الرسومات المعمارية النموذجية، مثل المساقط والمقاطع والارتفاعات ومخططات الطوابق أهميتها، لأنها غير قادرة على وصف الهياكل الهندسية المعقدة بالكامل؛ وفي الوقت نفسه، يكتسب دور النماذج الرقمية التفاعلية أهمية كبيرة في النقل الفعال لمعلومات التصميم بين الجهات الفاعلة.

6) يعتبر تنفيذ الهياكل المتفرعة الشجرية باستخدام الخرسانة المسلحة معقداً، وبخاصة عند استخدام تقنية الصب في الموقع، حيث أن تركيب حديد التسليح والكوفراج يحتاج الى عمالة كبيرة، وخبرة في

التنفيذ، بالإضافة لصعوبة الإنتاج والكلفة الكبيرة المترتبة عليها.

7) يعتبر الفولاذ من أفضل المواد المستخدمة في تنفيذ الهياكل الشجرية، حيث يظهر الفولاذ قدرة على التحمل وفي نفس الوقت أصغر حجم وكتلة، وتعتبر الوصلات المصبوبة الفولاذية أفضل الوصلات التي تلبي المتطلبات الميكانيكية والجمالية العالية ولكنه مكلف للغاية، بينما تعتبر الوصلات الملحومة أقل إرضاءً بصرياً بالإضافة لكلفتها العالية وبخاصة إذا تم تنفيذها في الموقع، بينما تتميز وصلات الدبوس والمفصل والمسمار بالمظهر الصناعي، ويعتبر الوصل المخفي من أفضل حلول الوصلات في الموقع بكلف أقل ومظهر مقبول حسب مسافة المشاهدة.

8) انتشرت الهياكل الشجرية في مباني ذات وظائف مختلفة، نتيجةً لخصائصها ومميزاتها المتعددة، من إمكانية تجميع عدة أعمدة إلى عمود واحد، وإمكانية تحقيق تفاوت في ارتفاعات الأسطح، وتأمين الدعم لأسطح مائلة أو منحنية أو مستوية، بالإضافة لتحرير الواجهات الخارجية وإمكانية الفتح الكامل فيها ، وتأمين الإضاءة الطبيعية للفراغ؛ كما أن تعدد مواد البناء التي يمكن إنشاؤها بها، ساعد على انتشارها بشكل أوسع، بالإضافة لخصائصها الجمالية الناتجة عن محاكاة مورفولوجيا الهياكل النباتية الطبيعية.

كما توصي الباحثة بـ:

1) تطوير الهياكل المتفرعة المستوحاة من الحيوية بناءً على مولدات المفاهيم البيولوجية المتفرعة؛ في محاولة لتحقيق عمود متفرّع جمالي ومستقر ميكانيكياً، بتجميع فعال من حيث التكلفة.

2) تحليل تكيفات الحمل في التشعبات النباتية، لترجمة المحاكاة الحيوية إلى الهياكل المتفرعة المبنية؛ لاكتساب نظرة ثاقبة للسلوك الميكانيكي لمولدات المفاهيم البيولوجية، وتجريد المبادئ الهيكلية والوظيفية الأساسية للتطبيقات التقنية في الهندسة المعمارية، والتي ستفتح آفاقاً جديدة لابتكار هياكل شجرية أكثر ابتكاراً.

3) إجراء دراسات موسعة لربط هندسة الهياكل المتفرعة الشجرية بالهندسة الكسورية.

4) إن تعدد مواد وطرق تنفيذ الهياكل الشجرية، يتيح الفرصة لتنفيذ هذه الهياكل محلياً، والاستفادة من خصائصها الإنشائية والوظيفية والجمالية المتعددة.

## 13- مراجع البحث:


1- أميرة سعودي محمد أبو العلا. (2018). **المحاكاة البيولوجية وتطبيقاتها في الشكل المعماري والعمارة الداخلية**. مجلة العمارة والفنون، مصر، 66-78.

2- دعاء عبد الرحمن محمد جوده. (2018). **أثر استخدام النظام الخوارزمي على توليد الأفكار في التصميم الداخلي والأثاث.** مجلة العمارة والفنون، العدد الحادي عشر – الجزء الأول، 238-254.

3- Agkathidis, A., & Brown, A. (2013, March). **Tree-Structure Canopy:A Case Study in Design and Fabrication of Complex Steel Structures using Digital Tools**. international journal of architectural computing, pp. 87-104.

4- Ahmeti, F. (2007). **Efficiency of Lightweight Structural Forms: The Case of Tree like Structures - A comparative Structural Analysis**. MSc Program "Building Science & Technology". TU VIENNA.

5- Baranyk, I. (2017, February 28). **This Complex Concrete Column Was Made Using 3D-Printed Formwork.** Retrieved from archdaily.com.
https://www.archdaily.com/806230/this-complex-concrete-column-was-made-using-3d-printed-formwork

6- Barrie, A. (n.d.). **residential Under Pohutukawa- out of the woods**. MONUMENT 111, 36-42.

7- Boake, T. M. (2011). **CISC Guide For Specifying Architecturally Exposed Structural Steel.** Canadian Institute Of Steel Construction.

8- Buelow, P. v. (2007). IASS, International Association for Shell and Spatial Structures: Structural Architecture – Towards the future looking to the past. **A Geometric Comparison of Branching Structures in Tension and in Compression versus Minimal Path**s (pp. 363-371). International Association for Shell and Spatial Structures.

9- DU, W.-f., ZHU, L.-m., WANG, L.-x., & HE, P.-f. (2019). International Conference on Information Technology, Electrical and Electronic Engineering (ITEEE). **Numerical Simulation Analysis of the Cast-Steel Joint in a Tree-Like Column Structure** (pp. 302-309). Kaifeng, China: Institute of Steel and Space Structures in Henan University.

10- El-Ghobashy, S., & Mosaad, G. (2016). **Nature Influences on Architecture Interior Designs. Procedia Environmental Sciences**, pp. 573-581.

11- Garlock, M. E., & Billington , D. (2008). **Félix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist.** Yale University Press.

12- **HOW TO SPECIFY CAST STEEL TREE NODES**. (2019, September 25). Retrieved from castconnex.
https://www.castconnex.com/blog/how-to-specify-cast-steel-tree-nodes

13- Joshy, R. (2018, December). **Biomimetics in Structural Design**. International Journal of Science and Research (IJSR), Volume 7, Issue 12, pp. 132-140.

14- Keskeys, P. (n.d.). **Architectural Details: Toyo Ito's Flowing Concrete Canopy**. Retrieved from architizer.com.
https://architizer.com/blog/inspiration/stories/architectural-details-toyo-ito/

15- knippers , j., G. Nickel, K., & Speck, T. (2016). **Biomimetic Research for Architecture and Building construction Biological Design and Integrative Structures**. Switzerland: Springer International Publishing.

16- Md Rian, L., & Sassone, M. (2014). **Tree inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture: A brief historical overview**. Frontiers of Architectural Research, 298-323.

17- SMIA, S. (n.d.). **Tree Like Structures. catalunya: universital politecnica de catalunya.**

18- Steel Structures Education Foundation. (2006, May 29). **vancouver millennium line:commercial station**. Retrieved from tboake.com.
http://www.tboake.com/steel/ssef/skytrain/commercial.html

19- WARD, L. (2014, July 29). **A Tree-Filled Atrium to Inspire Patients**. Retrieved from architectmagazine.com.
https://www.architectmagazine.com/technology/detail/a-tree-filled-atrium-to-inspire-patients_o

20- Widyowijatnoko, A., & Harries, K. (2020). **Joints in bamboo construction. In Nonconventional and Vernacular Construction Materials (Second Edition)** (pp. 561-596). Woodhead.

21- Yan, S., Hong-tie, Z., & Jian-yang, X. (2010). **EXPERIMENTAL STUDY ON LATERAL STIFFNESS OF DOUGONG LAYER IN**

**CHINESE HISTORIC BUILDINGS**. Engineering Mechanics, Volume 27, Issue 03, pp. 74-78.

22- Zhao, Z., Liang, B., Liu, H., & Sun, Q. (2017). **A novel numerical method for form-finding analysis of branching.** The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2241-2252.