دور الأمثَلة في تصميم الإنشاءات الهيكلية الشبكية المبتكرة

أ.د. محمد حمزة عرفة

الملخص: تلعب الأمثَلة في التصميم الإنشائي، وبشكل خاص في الهياكل الشبكية بأنواعها المختلفة (truss, lattice, diagrid)، دوراً مفصلياً في تحسين الأداء والتقليل من استخدام المواد وبالتالي تخفيض الكلفة مع رفع الكفاءة، وهذه البنى الإنشائية واسعة الاستخدام في الهندسة المدنية والعمرانية. فلكل منها مواصفاته الفريدة وتطبيقاته، مما ينعكس على استراتيجيات الأمثَلة المتبعة في كل منها. فالجوائز الشبكية (trusses) تتم أمثَلتها غالباً من أجل الحصول على كفاءة في استثمار المواد والأداء الإنشائي، في حين أن الهياكل الشبكية من نوع (lattice, diagrid) فتتم أمثَلتها لكي تحقق تكاملاً وظيفياً وجمالياً في العمارة الحديثة. هذا وسنتطرق في هذه المقالة إلى الفروقات بين هذه البنى الإنشائية مع ذكر أمثِلة هندسية تطبيقية، وبعض التقنيات المستخدمة في أمثَلتها.

كلمات مفتاحية: هياكل شبكية، أمثَلة، تصميم أمثَلي، هياكل مبتكرة، إنشاءات أمثلية.

التوصيف العلمي: مقالة مرجعية.

1. مقدمة:

إن البنى الإنشائية الشبكية تعتبر مكونات هيكلية أساسية في الهندسة المدنية والعمرانية والميكانيكية والطيرانية، نظراً لما تحققه من نسب مرتفعة للمتانة الوزنية (strength-to-weight ratios)، وبالتالي تحقق كفاءة في استخدام المواد. هذا ويمكن القول أن البنى الإنشائية الشبكية بمختلف أنواعها تتكون من عناصر مترابطة مع بعضها البعض ومرتبة في أشكال هندسية لتعطي المتانة والصلابة المطلوبة مع مراعاة التقليل من استخدام المواد. إن طرق التصميم التقليدية تعتمد على الخبرة والحدس الهندسي، والتي يمكن أن تقود إلى تصاميم أثقل من اللازم. إلا إن تكامل خوارزميات الأمثلة مع برمجيات التصميم، جعل بالإمكان الحصول على تصاميم أمثلية بشكل آلي، حيث تُستخدم المادة فيها بشكل أمثلي، وبالتالي تقلل من استخدامها، وفي ذلك استدامة للموارد وتقليل للكلف المترتبة.

2. مقارنة بين البنى الإنشائية الشبكية:

1.2 الجوائز الشبكية (trusses):

- تتكون من عناصر خطية مستقيمة مرتبطة مع بعضها في عقد، مشكلة وحدات مثلثية تتوزع الحمولات بكفاءة.
- استخدم التصميم الأمثلي في دراسة الجوائز الشبكية ([1] & [2])، وذلك بغية تحسين المتانة (strength) والصّلابة (stiffness) والتقليل من استخدام المادة، هذا وتعتبر قضايا إنقاص الوزن (weight reduction) وفعالية الكلفة (cost efficiency) من القضايا الحرجة في التصميم الإنشائي.

- تستخدم بشكل شائع في الجسور كجسر بروكلين المعلق في نيويورك، والهياكل المعمارية الكبيرة مثل الأسقف في المصانع والصالات الرياضية الكبيرة حيث الحاجة لفسحة كبيرة دون وجود أعمدة في الوسط.

الشكل رقم (1): جسر بروكلين المعلق.

2.2 البنى الإنشائية الشبكية من نوع lattice:

- إن البنى الإنشائية الشبكية من هذا النوع غالباً ما تكون ثلاثية الأبعاد وذات أنماط متكررة وتتكون من عناصر خطية مترابطة فيما بينها بشكل أكثر تعقيداً من سابقتها، بحيث تؤمن ممرات متعددة للحمولات، وتحتوي على عدد لا بأس به من العناصر الزائدة عن الحاجة (high redundancy)، ويمكنها تحمل حمولات متعددة الاتجاهات بشكل أفضل، وتستخدم عادة في التطبيقات ذات الوزن الخفيف.
- تعتبر طريقة (solid isotropic material with penalization: SIMP) إحدى الطرق المتبعة في أمثَلة البنى الإنشائية الشبكية من هذا النوع ([3]).
- إن التطبيقات الهندسية لهذه البنى الإنشائية نجدها في مجال الطيران والفضاء حيث تتيح الطباعة ثلاثية الأبعاد تصنيع هياكل شبكية معقدة بدقة عالية، مما يسمح بتصميمات مبتكرة وخفيفة الوزن، كما نجدها في واجهات وأسقف العمارة الحديثة ...إلخ، حيث الأولوية للوزن والمظهر الجمالي، كما هي الحال في سقف مطار حمد في الدوحة (الشكل 2) ومتحف اللوفر بأبي ظبي (الشكل 3)، وتتيح أيضاً الحصول على فسح كبيرة بدون أعمدة، مع تأمين مظهر انسيابي وجمالي.

الشكل (2): مطار حمد الدولي.

الشكل رقم (3): متحف اللوفر بأبي ظبي.

3.2 البنى الإنشائية الشبكية من نوع diagrid:

- إن البنى الإشائية من هذا النوع عبارة عن شبكة من الجوائز القطرية تجمع بين المظهر الجمالي والتدعيم الإنشائي، يمكن أن تكون هذه الجوائز من المعادن أو البيتون أو الخشب، وهي تعتبر مشابهة للنوع السابق (lattice) من حيث استخدام أنماط متكررة، ويعود الفضل فيها إلى العبقري الروسي فلاديمير شيتخوف.
- تسعى الأمثَلة لتحقيق نوع من التوازن بين الأداء الإنشائي والتصميم المعماري، والذي غالباً ما يستخدم خوارزميات متقدمة لهذه الغاية ([4]).
- تستعمل بشكل بارز في ناطحات السحاب والأشكال المعمارية المعقدة كما في برج Hearst في New York (الشكل 4)، حيث استخدم المصمم Norman Foster كمية من الفولاذ أقل بـ 21% من التصميم القياسي (standard design). كما نشاهد مثل هذه البنى الإنشائية في مبنى آخر مصمم من قبل المبدع Foster في

لندن والمعروف باسم The Gherkin (الشكل 5). وتجدر الأشارة إلى أن هذا النوع من البنى الإنشائية يسمح أيضاً بتحقيق مجازات كبيرة للأسقف بدون أعمدة.

الشكل رقم (4): برج "Hearst" في نيويورك.

الشكل رقم (5): "The Gherkin" في لندن.

3. دور الأمثلة:

إن التصميم الإنشائي الأمثلي للهياكل الإنشائية الشبكية بأنواعها الثلاثة يهدف إلى تحسين الأداء والكفاءة. ولقد استخدمت تقنيات وخوارزميات مختلفة لهذه الغاية، مركزة على أمثَلة الأبعاد (sizes or dimensions) أو الشكل (shape) أو البنية (topology). وهذه الطرق أساسية للتقليل من استخدام المادة وكلف الإنشاء والتأثير البيئي. وفيما يلي نبين التقنيات والخوارزميات المفتاحية المستخدمة في التصميم الإنشائي الأمثلي.

1.3 أمثلة الأبعاد:

- تستخدم خوارزميات (Meta-Heuristic) بشكل عريض في أمثَلة الجوائز الشبكية بسبب قدرتها على التعامل مع فضاءات بحث معقدة دون أي معرفة مسبقة. الخوارزميات الشائعة منها تشمل الخوارزميات الجينية (Genetic Algorithms)، أمثَلة جسيمات السرب (Particle Swarm Optimization)، مستعمرة النحل الصنعية (Artificial Bee Colony)، التطور التفاضلي (Differential Evolution)، التخمير المحاكى (Simulated Annealing). هذه الطرق فعالة في أمثَلة أبعاد الجائز الشبكي مع قيود على الانتقالات والإجهادات ([5]).
- استخدمت خوارزميات محددة، كمستعمرة النحل الصنعية، والبحث الوقواقي (Cuckoo Search) والأمثَلة المبنية على التعلم والتعليم (Teaching-Learning-Based Optimization)، في الجوائز الشبكية مركزة على تخفيض الوزن مع المحافظة على الترابط الإنشائي ([6]).

2.3 أمثَلة الشكل والبنية:

- تستخدم تقنيات كالمجانسة (Homogenization) وإدراج فقاعة (Bubble Insertion) ومشابهة الطبيعة (Nature Analogy) في الأمثَلة البنيوية. فهذه الطرق تساعد في توليد تصاميم أمثلية من خلال تغيير توزيع المادة ضمن فضاء تصميمي معطى (فضاء البحث) ([7]).
- إن التصميم الأمثلي للشكل غالباً ما يتطلب تغييراً في الحدود وطرقاً هجينة، تشمل نظم تعلم الآلة (Machine Learning Systems) المرتبطة مع بيئة الأمثَلة، مما ينعّم الشكل الهندسي للمنشأ لإنجاز مواصفات أداء مرغوبة ([7]).

4. التقانات والتطبيقات البازغة (Emerging):

- إن تعلم الآلة يتكامل بشكل متزايد مع تقنيات الأمثَلة التقليدية بهدف تحسين العملية التصميمية. هذا التكامل يتيح استراتيجيات أمثلة أكثر ذكاء وتكيفاً، ولا سيما في البنى الإنشائية المعقدة كالهياكل الشبكية من نوع Diagrids ([4]).
- إن خوارزمية EB-A-SHADE، التي تعتبر نوع ذاتي التكيف من التطور التفاضلي، قد أعطت نتائج واعدة في أمثلة أبعاد الجوائز الشبكية، كما أثبتت تقارباً مستقراً وأداءً منافساً للخوارزميات المعتمدة ([8]).

5. الخاتمة:

على الرغم من كون هذه التقنيات والخوارزميات تعطي حلولاً لمسائل الأمثَلة الإنشائية، يبقى التحدي في قابلية التوسع وفعالية الحوسبة. الأبحاث المستقبلية يمكن أن تركز على الطرائق الهجينة التي تربط بين نقاط قوة خوارزميات مختلفة، والتي يمكن أن تدمج معلومات الزمن الحقيقي وآليات التعلم التكيفي لزيادة تحسين مخرجات الأمثَلة. إن التطور المستمر في تقنيات الأمثلة سيعيد تشكيل التصميم الإنشائي في الهندسة المدنية والمعمارية. كما نود أن نشير أخيراً إلى أهمية اللجوء إلى هذه التقنيات، والتي يمكن أن تلعب دوراً مهماً في إعادة الإعمار، وذلك إذا ما أردنا أن ننشأ صروحاً هندسية مبتكرة تدمج الإبداع الهندسي مع استدامة الموارد.

6. المراجع:

1- Yang Feng, “Research and Application of Topology Optimization Design of Truss Structures”, 27 Mar 2024, Highlights in Science Engineering and Technology, 10.54097/v3b16h11.

2- Xin Wen,” Research On Optimal Design and Application of Truss Structures”, 16 Jul 2024, Highlights in Science Engineering and Technology, 10.54097/v1529b67.

3- Mihai Victor Pricop, Marian Bunea, Roxana Nedelcu, “Truss systems and shape optimization”, 21 Jul 2017, 10.1063/1.4992592.

4- Julieta Ant onio, A. Tadeu, Letícia Godinho de Souza, “Topology, Size, and Shape Optimization in Civil Engineering Structures: A Review”, 1 Jan 2025, Cmes-computer Modeling in Engineering & Sciences, 10.32604/cmes.2025.059249.

5- Aristotelis E. Charalampakis, George C. Tsiatas,” Critical Evaluation of Metaheuristic Algorithms for Weight Minimization of Truss Structures”, 2 Oct 2019, Frontiers in Built Environment, 10.3389/FBUIL.2019.00113.

6- Ali Kaveh, K. Biabani Hamedani, Farnaz Barzinpour,”Optimal size and geometry design of truss structures utilizing seven meta-heuristic algorithms: a comparative study”, 10 Apr 2020- Iran University of Science & Technology.

7- M. Canonaco, U. Loher, V. Esslinger ,” Structural Optimization Methods”,1 Jan 1970, WIT Transactions on the Built Environment, 10.2495/OP970361.

8- Christopher Renkavieski, Rafael Stubs Parpinelli,” Meta-heuristic algorithms to truss optimization: Literature mapping and application”, 15 Nov 2021, Expert Systems With Applications, 10.1016/J.ESWA.2021.115197.