تصميم هياكل أكثر ذكاءً

من التحسين الطوبولوجي إلى الطباعة ثلاثية الأبعاد

د. فاجيليس بليفريس

أستاذ مشارك، قسم الهندسة المدنية والبيئية، كلية الهندسة - جامعة قطر



أنظر بتأمُّل إلى شجرة. جذعها لا يتناقص بالتساوي من الأعلى إلى الأسفل؛ بل يتّسع بدقة في المواضع التي تحتاج فيها إلى مقاومة الانحناء، وتتفرّع أغصانها تحديدًا حيث تتوزَّع الأحمال. لا يوجد خشب مهدور، ولا مادة زائدة، مجرد هيكل تشكَّل بفعل القوى. تخيَّل الآن تطبيق هذا المبدأ ذاته على العوارض والأعمدة والمظلات في الهندسة المدنية. هذا هو ما يعِد به التحسين الطوبولوجي، وكان السؤال المحوري في مشروع بحثي اكتمل مؤخرًا في جامعة قطر.

في دولة قطر، حيث يلتقي التطوُّر العمراني المتسارع مع التزام وطني متنامٍ بالاستدامة، لم يعد التساؤل عن كيفية البناء بمواد أقل مجرد تساؤل نظري، فهو يتوافق مباشرة مع أولويات البحث في جامعة قطر في محوري استدامة الموارد والتكنولوجيا الرقمية، وينسجم مع رؤية قطر الأشمل نحو تنمية عالية الكفاءة قائمة على الابتكار.

وهذه الفكرة ليست نظرية فحسب. فالمركز الوطني للمؤتمرات في دولة قطر، الذي صمَّمه المهندس المعماري الياباني أراتا إيسوزاكي، يرتكز على زوج من الأعمدة الخرسانية الضخمة ذات التفرُّعات المستوحاة من شجرة السدرة، الرمز الوطني لدولة قطر. تتشعَّب هذه الأعمدة وتتوزَّع بالنمط الذي يمليه المنطق الإنشائي: تتَّسع حيث تكون القوى في أقصاها، وتتفرَّع حيث تتوزَّع الأحمال. والنتيجة مبنى يبدو حيويًا وعضويًا، لأنه يعكس صدقًا إنشائيًا. ما يفعله التحسين الطوبولوجي هو أخذ هذه الحدسية ذاتها وجعلها حسابية، قابلة للتطبيق على كل عارضة وإطار ومظلة نصمِّمها.

ما هو التحسين الطوبولوجي؟

في التصميم الإنشائي التقليدي، يبدأ المهندس بشكلٍ محدد، عارضة مستطيلة أو عمود صلب، ثم يتحقق من متانتها. والتحسين الطوبولوجي يعكس هذا المنطق. فبمعطيات الفضاء المتاح ومنظومة الأحمال وكمية المادة المستهدفة، تقرِّر الخوارزمية بنفسها أين ينبغي أن توضع تلك المادة. والنتيجة دائمًا واحدة: تتمركز

المادة على طول مسارات نقل القوى، وتختفي من المناطق التي لا تُسهم فيها. وتبدو الهياكل الناتجة عضوية وشبيهة بالبُنى البيولوجية، لأنها محكومة بالمنطق الميكانيكي ذاته الذي يُشكِّل العظام والأصداف.

هذا النهج ليس جديدًا في الهندسة الفضائية، حيث يترجم كل غرام يتم توفيره مباشرةً إلى أداء وتكلفة. لكن تطبيقه المنهجي على المنشآت الهندسية المدنية، مع ربط واضح بكيفية بناء تلك المنشآت فعليًا، لا يزال حدودًا مفتوحة.

المشروع: من العوارض البسيطة إلى مظلة موقف السيارات

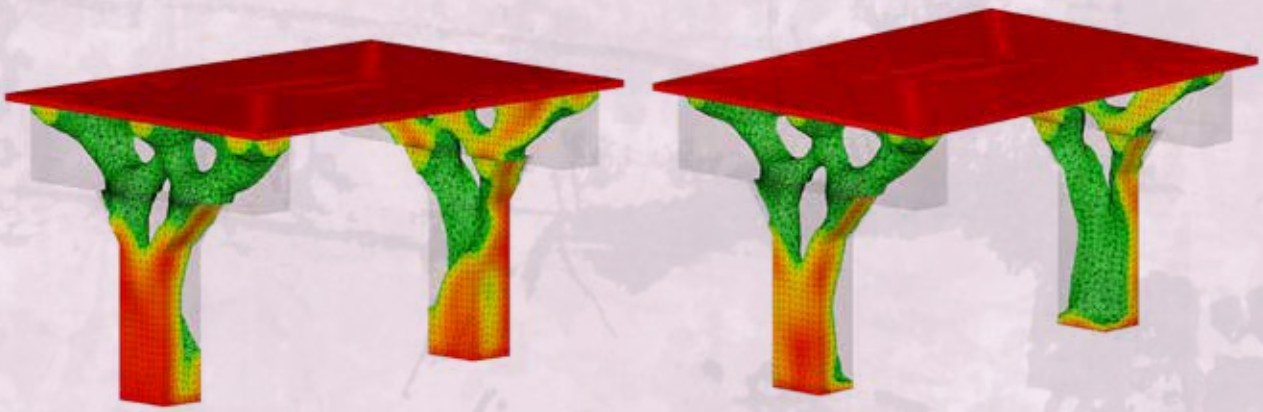
المشروع الموسوم بـ «تعزيز البحث في الهندسة الإنشائية من خلال التحسين الطوبولوجي والتصنيع الإضافي: نهج تطبيقي"، موَّله الصندوق القطري لرعاية البحث العلمي (QNRF) ضمن برنامج تجربة البحث للطلاب الجامعيين (UREP). امتدَّ من يناير 2025 إلى يناير 2026، وأشرك ستة طلاب جامعيين إلى جانب مرشدين أكاديميين من قسم الهندسة المدنية والبيئية.

درس الفريق أربع منظومات إنشائية تتصاعد في تعقيدها: عارضة كابولية، وعارضة بسيطة الارتكاز، وعنصر مظلة موقف سيارات خاضع لقوى وعزوم مركَّبة، وأخيرًا منشأة مظلة ثلاثية الأبعاد كاملة، تكوين مرتبط مباشرة بالبيئة المبنية في دولة قطر.

لكل منشأة، أرسى الفريق أولاً تصميمًا مرجعيًا: هندسة صلبة تقليدية تحلَّل في ظل أحمال واقعية، ثم طُبِّق التحسين الطوبولوجي بالتقليل التدريجي لكمية المادة المحتجزة من 70% وصولاً إلى 30% من الحجم الأصلي، مع رصد دقيق لاستجابة الأداء الإنشائي عند كل مرحلة (شكل 1).

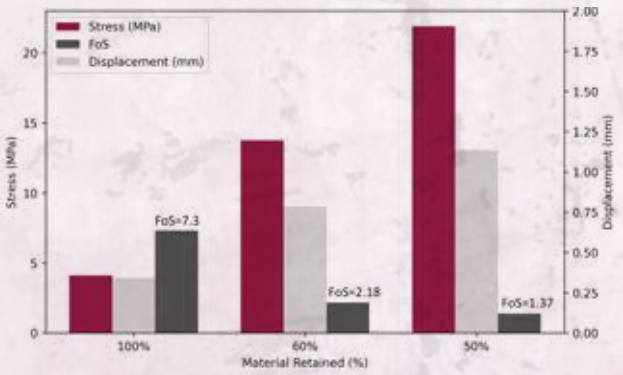
النتائج: ما مقدار المادة التي يمكن إزالتها؟

جاءت النتائج متسقة وكاشفة عبر جميع الحالات، وتبيّن أن تخفيضات في المادة تتراوح بين 40 و50% قابلة للتحقيق دون المساس بالسلامة الإنشائية أو تجاوز حدود التشوّه المقبولة. فالخوارزمية حدَّدت بموثوقية أجزاء المنشأة التي تؤدي عملاً حقيقيًا وتلك التي لا تُسهم فيه. لكن العلاقة بين تخفيض المادة والأداء الإنشائي ليست خطية؛ فالتخفيضات المعتدلة، بإزالة ما بين 30 و40% من المادة، تتيح أفضل توازن: وفورات ملموسة مع زيادات محدودة في الإجهاد



الشكل (1): نتائج التحسين الطوبولوجي لمنشأة مظلة موقف سيارات ثلاثية الأبعاد. عند نسبة كتلة محتجزة 60% يسار و50% يمين، تتمركز المادة على طول مسارات نقل الأحمال الرئيسية بينما تُفرَّغ المناطق منخفضة الإجهاد، مما يُنتج أعمدة بأشكال عضوية تُذكِّر بتفرُّعات الأشجار.

والانحراف. أما دفع التخفيض إلى أبعد من ذلك فيضغط على المنشأة: تضيق هوامش الأمان بسرعة، وترتفع التشوُّهات. الرسالة من البيانات واضحة: ثمة نقطة توازن مثلى، والعثور عليها يستلزم تحليلاً دقيقًا لا تحسينًا متهوِّرًا (شكل 2).

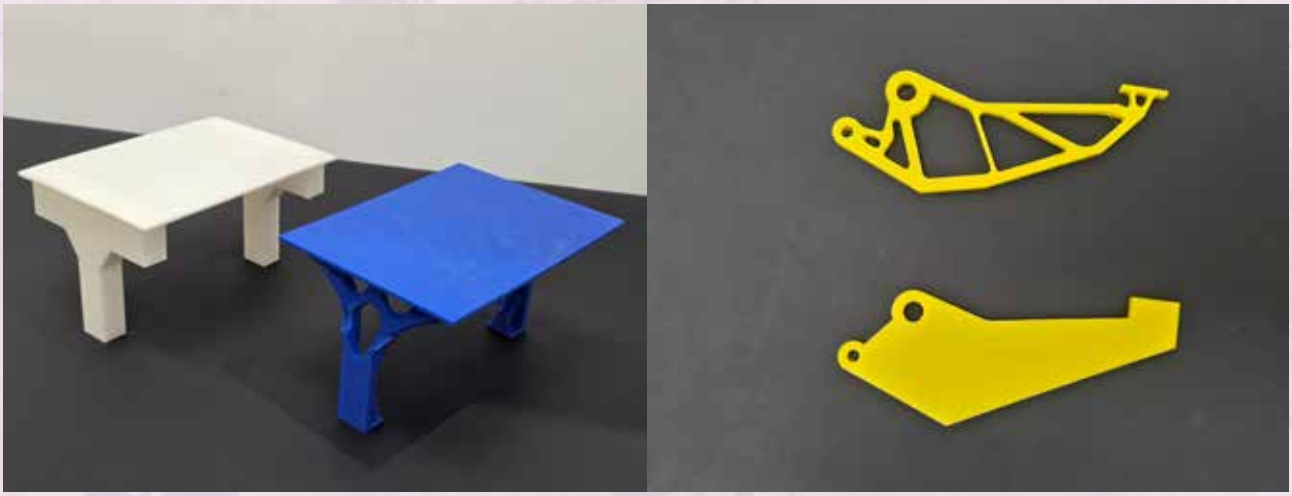


الشكل (2): الأداء الإنشائي لمنشأة المظلة عند مستويات مختلفة من تخفيض المادة. مع انخفاض الكتلة المحتجزة من 100% إلى 50%، يرتفع الإجهاد، ويتزايد الإزاحة، وينخفض معامل الأمان (Factor of Safety – FoS)، مما يوضِّح التوازن الذي يجب إدارته في التطبيق العملي.

من الشاشة إلى الجسم الملموس: دور الطباعة ثلاثية الأبعاد

كثيراً ما يستحيل تشييد الهندسات الناتجة عن التحسين الطوبولوجي باستخدام أساليب التصنيع التقليدية. إذ لا يمكن بسهولة صبُّ منشأة شُكِّلت وفق مسارات الأحمال لا الخطوط المستقيمة في قالب أو قطعها من صفيحة. هنا يصبح التصنيع الإضافي (الطباعة ثلاثية الأبعاد) ضروريًا. فهو لا يفرض أي قيود هندسية: أي شكل تنتجه الخوارزمية يمكن طباعته، طبقة فوق طبقة، بالضبط كما صُمِّم.

صنع الفريق كلاً من النسختين التقليدية والمحسَّنة للمنشآت المختارة باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد البوليمرية. النماذج المادية تجعل الفارق مقروءًا مباشرة بطريقة لا يستطيع أي مخطط بياني أن يفعلها: نسخة واحدة كتلية ومنتظمة؛ والأخرى مفرَّغة ومتفرِّعة، تحمل الحمل ذاته بجزء يسير من المادة (شكل 3).



الشكل (3): نماذج مادية أُنتجت بالطباعة ثلاثية الأبعاد. يمين: العارضة، التصميم القاعدي الصلب (أسفل)، بجانب التصميم المحسَّن الخفيف (أعلى). يسار: منشأة المظلة، النموذج التقليدي الصلب (بيضاء)، بجانب النسخة المحسَّنة طوبولوجيًا (زرقاء) بأعمدتها ذات الأشكال المتفرِّعة المميزة.

للتحقق من أن النتائج لم تكن أثرًا لمنصة برمجية بعينها، أجرى الفريق تطبيقات موازية: برنامج Autodesk Fusion 360 للتحسين التجاري، وكود MATLAB مخصص للتحقق الخوارزمي المستقل. وقد تقاربت النتيجتان بشكلٍ وثيق.

التعلم بالممارسة: تجربة برنامج UREP

يقوم برنامج UREP على فكرة بسيطة لكنها قوية: الطلاب الجامعيون يتعلمون البحث بممارسة البحث. على مدى اثني عشر شهرًا، مرَّ الطلاب الستة عبر القوس الكامل للتحقيق البحثي، من بناء النماذج الحسابية وتشغيل المحاكاة، إلى كتابة الأكواد، إلى الإمساك بأيديهم بجسم مادي صمَّموه وحسَّنوه وطبعوه ثلاثيًا.

تلك الخطوة الأخيرة، الإمساك بالجسم، أهم مما تبدو عليه. تصبح المفاهيم المجردة كمسارات الأحمال ومعاملات الأمان ملموسة حين يمكنك مقارنة منشأتين مطبوعتين تبدوان مختلفتين جذريًا لكنهما تحملان الحمل ذاته. طوَّر الطلاب كفاءات في برامج التصميم بمساعدة الحاسوب وتحليل العناصر المحدودة الاحترافية، وفي البرمجة وتطبيق الخوارزميات، وفي الواقع العملي للتصنيع الرقمي. كما تعلموا العمل الجماعي وتفسير البيانات وتوصيل النتائج التقنية، وهي مهارات ستخدمهم جيدًا بعد هذا المشروع بكثير.

طريقة جديدة في التفكير بالمنشآت

لم تعد تقنيات التحسين الطوبولوجي والتصنيع الإضافي تقنيات مستقبلية، بل أصبحت متاحة اليوم بالفعل. ومع طموحات دولة قطر في تطوير بُنيتها التحتية، تبرز فرصة حقيقية لدمج الكفاءة والاستدامة في تصميم المنشآت منذ المراحل الأولى. ويمثل هذا المشروع خطوة متواضعة لكنها ملموسة في هذا الاتجاه، ودليل على أن الجيل القادم من المهندسين في جامعة قطر يتعلم بالفعل بناء منشآت ليس فقط أقوى، بل أكثر ذكاءً.

شكر وتقدير

أتاح هذا المشروع (UREP31-139-2-043) منحة من الصندوق القطري لرعاية البحث العلمي (QNRF)، العضو في مؤسسة قطر. والنتائج الواردة تعبّر عن مسؤولية المؤلفين وحدهم.

