

Ứng dụng mô hình tính toán tự động kết cấu thép cho nhà dân dụng trong quy trình phối hợp kiến trúc – kết cấu

Võ Hoàng Minh^{1,2*}, Nguyễn Hoàng Tùng²

¹ Viện sau Đại Học, Trường Đại Học Văn Lang

² Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Văn Lang

TỪ KHOẢ

Tính toán tự động
 Kết cấu thép
 MATLAB
 Nhà dân dụng
 Phối hợp kiến trúc - kết cấu
 Tối ưu hóa thiết kế

TÓM TẮT

Việc ứng dụng các công cụ mô hình tự động hóa trong thiết kế nhà dân dụng bằng kết cấu thép đang là một xu hướng cần thiết, nhằm nâng cao hiệu quả phối hợp giữa thiết kế kiến trúc và kết cấu ngay từ giai đoạn thiết kế ban đầu. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng và áp dụng mô hình tính toán tự động kết cấu thép sử dụng công cụ lập trình MATLAB, đáp ứng các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành của Việt Nam (TCVN 2737:2023, TCVN 7571-15:2019, TCVN 5575:2024) và quốc tế (Eurocode 3). Mô hình cho phép tự động đánh giá và lựa chọn tiết diện tối ưu cho các cấu kiện dầm, cột, kết cấu phụ trợ, đồng thời thực hiện kiểm tra ổn định cục bộ, độ võng, liên kết, móng và xuất báo cáo tính toán một cách nhanh chóng. Kết quả áp dụng thực nghiệm cho công trình nhà dân dụng 2 tầng đã chứng minh được tính tối ưu vượt trội của mô hình, giúp giảm hơn 30% thời gian thiết kế và tối ưu quy trình trao đổi thông tin giữa kiến trúc sư và kỹ sư trong quá trình thiết kế so với phương pháp truyền thống trên bài toán thử nghiệm. Nghiên cứu không những góp phần thúc đẩy nghiên cứu ứng dụng công nghệ số hóa vào thực tiễn xây dựng tại Việt Nam, mà còn mở ra triển vọng tích hợp mạnh mẽ với các phần mềm, công cụ thiết kế và quản lý thông tin công trình (BIM) trong tương lai.

KEYWORDS

Automated computation
 Steel structures
 MATLAB
 Residential buildings
 Architectural-structural coordination
 Design optimization

ABSTRACT

The application of automated modeling tools in the design of residential buildings with steel structures has become an essential trend, aiming to enhance the efficiency of coordination between architectural and structural design from the earliest stages. This paper presents the development and application of an automated computational model for steel structures using the MATLAB programming environment, aligned with current Vietnamese standards (TCVN 2737:2023, TCVN 7571-15:2019, TCVN 5575:2024) and international codes (Eurocode 3). The model enables the automatic evaluation and selection of optimal cross-sections for beams, columns, and secondary members, while simultaneously performing checks for local stability, deflection, connections, foundations, and generating calculation reports rapidly. A practical application to a two-story residential building demonstrated the superior efficiency of the model, reducing design time by more than 30% and streamlining the information exchange process between architects and engineers compared to the conventional design approach in the test case. The study not only contributes to advancing the integration of digital technologies in construction practice in Vietnam but also opens up strong prospects for integration with Building Information Modeling (BIM) platforms and other digital design and project management tools in the future.

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, nhà dân dụng sử dụng kết cấu thép ngày càng được quan tâm tại Việt Nam nhờ các ưu điểm về tốc độ thi công, kiểm soát chất lượng, linh hoạt tạo hình và khả năng vượt nhịp, đặc biệt phù hợp điều kiện đô thị chật hẹp. Tuy vậy, quy trình thiết kế truyền thống còn thiếu phối hợp sớm giữa kiến trúc và kết cấu, dẫn đến nhiều vòng lặp hiệu chỉnh, phát sinh chi phí và suy giảm mức độ tối ưu tổng thể; ở phân khúc nhà ở quy mô nhỏ, hạn chế về đầu tư phần mềm

thương mại càng làm tăng tính thủ công và rủi ro. Trên thế giới, hướng tiếp cận mô hình tính toán tự động đã chứng minh hiệu quả trong rút ngắn thời gian và hỗ trợ tối ưu hóa. Tiêu biểu, SAOSYS Toolbox hiện thực hoá trong MATLAB cho phân tích đàn dẻo và thiết kế tối ưu khung thép, vận hành theo kiến trúc hướng đối tượng và minh họa trên khung nhà công nghiệp với các ràng buộc bền – cứng, cho thấy tính khả thi của tự động hóa dựa trên công cụ lập trình kỹ thuật[5]. Gần đây hơn, các khung tính toán tự động tích hợp tối ưu hóa và kiểm tra FEA cho thiết kế giàn thép từ thư viện cấu kiện thu hồi (stock-constrained) sử

*Liên hệ tác giả: minh.2585802010005@vanlanguni.vn

Nhận ngày 28/09/2025, sửa xong ngày 12/03/2026, chấp nhận đăng ngày 16/03/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1081>

dụng thuật toán di truyền đã cho thấy tốc độ sinh mô hình thử nghiệm ở mức nhỏ hơn 5 giây và quy trình lựa chọn phương án tối ưu theo tiêu chí đa mục tiêu, minh họa trên nhiều bài toán điển hình – khẳng định lợi ích của tự động hóa trong các tác vụ bố trí, lựa chọn cấu kiện và kiểm tra hiệu năng[6]. Trong bối cảnh áp dụng trong nước còn phân tán và thiếu hệ thống, nghiên cứu này đề xuất mô hình MATLAB cho nhà dân dụng quy mô nhỏ, cho phép lựa chọn tiết diện và kiểm tra ổn định – độ võng – liên kết – móng một cách tự động, qua đó rút ngắn thời gian, giảm chi phí tư vấn, nâng cao hiệu quả và phối hợp kiến trúc–kết cấu ngay từ giai đoạn ý tưởng.

Cụ thể hóa phạm vi, nghiên cứu nhằm đạt được ba mục tiêu chính:

(1) Xây dựng và kiểm chứng tính hiệu quả, chính xác của mô hình tính toán tự động kết cấu thép bằng phần mềm MATLAB theo các tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN 2737:2023[1], TCVN 7571-15:2019[2], TCVN 5575:2024[3] và quốc tế (Eurocode 3)[4]. Đánh giá thực nghiệm khả năng tối ưu hóa trong việc lựa chọn tiết diện cấu kiện, vật liệu thép và giảm thiểu thời gian thiết kế chi tiết khi áp dụng vào công trình thực tế;

(2) Đề xuất một quy trình thiết kế hiệu quả với sự phối hợp liên tục giữa kiến trúc và kết cấu thông qua mô hình tính toán tự động được phát triển.

Việc nghiên cứu triển khai thành công mô hình tối ưu thiết kế này không những tạo một bước tiến quan trọng trong việc ứng dụng kỹ thuật số vào lĩnh vực xây dựng dân dụng tại Việt Nam, mà còn góp phần gia tăng năng lực cạnh tranh của các công ty tư vấn và thiết kế trong bối cảnh hội nhập quốc tế hiện nay.

2. Nghiên cứu liên quan tối ưu hóa quy trình BIM và MATLAB trong kết cấu

2.1. Các nghiên cứu trong nước và quốc tế

Tổng quan trong và ngoài nước cho thấy tự động hóa và tối ưu hóa thiết kế kết cấu thép chủ yếu theo hai hướng: (i) tích hợp BIM, và (ii) tích hợp các nền tảng tính toán/FEA. Ở hướng BIM, do Carmo và Sotelino đề xuất quy trình IDM nhằm tăng hiệu quả phối hợp kiến trúc–kết cấu ngay từ giai đoạn ý tưởng[7]; Kang và cộng sự xây dựng quy trình tối ưu thiết kế tự động cho kết cấu thép mô-đun, ghi nhận mức cải thiện hiệu suất sử dụng tiết diện khoảng 40–50 % so với phương án ban đầu[8]; Afzal và cộng sự phát triển khung ESSDO tích hợp Revit–Dynamo–Robot để tối ưu thiết kế bền vững và trực quan hóa kết quả trong không gian phối hợp chung[9]. Ở hướng nền tảng tính toán/FEA, Falcon và cộng sự trình bày phương pháp luận tối ưu hệ giàn thép bằng cách liên kết MATLAB với ANSYS nhằm tối ưu tiết diện và vị trí nút, góp phần giảm chi phí kết cấu[10]; trong nước, Đỗ Quang Thành mô tả quy trình thiết kế tự động nhà công nghiệp thép bằng SAP2000 V10, không chỉ tính nội lực mà còn tự động hóa các bước thiết kế chủ chốt[11]. Bổ sung theo nhánh công cụ tính toán chuyên sâu, Jankovski và Atkočiūnas giới thiệu Saosys toolbox (MATLAB) cho phân tích dàn hồi–déo và tối ưu khung thép[5]. Gần đây, bài báo “Automated planar truss design with reclaimed partially disassembled steel truss components,” đề xuất khung tối ưu hóa giàn phẳng sử dụng thư viện

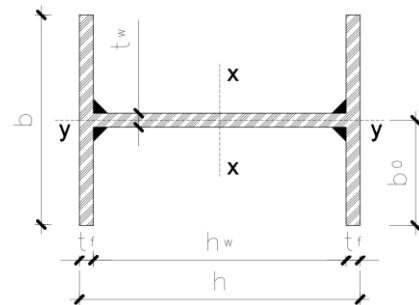
cấu kiện giàn thép tái sử dụng, qua đó giảm nhu cầu tháo dỡ và rút ngắn quá trình phá dỡ[6].

2.2. Khoảng trống nghiên cứu

Trong nước, các nghiên cứu tự động hóa thiết kế kết cấu thép đã xuất hiện và chủ yếu dựa trên phần mềm thương mại (SAP2000/ETABS/Robot) kết hợp bảng tính và thao tác thủ công; tiêu biểu, các nghiên cứu đã trình bày quy trình thiết kế tự động nhà dân dụng và công nghiệp sử dụng khung thép tự động hóa bước phân tích và gợi ý chọn tiết diện nhưng vẫn phụ thuộc nền tảng phần mềm thương mại, chưa chuẩn hóa kiểm chứng liên tiêu chuẩn và chưa gắn kết chặt chẽ quy trình phối hợp kiến trúc–kết cấu[11]. Tuy nhiên, lĩnh vực nhà ở dân dụng khung thép còn thiếu một khung tính toán độc lập, có thể tái lập cho bài toán nhiều nhịp–nhiều tầng; chưa có mô hình lựa chọn tiết diện dầm–cột–dầm phụ đáp ứng đồng thời ULS/SLS theo TCVN 2737:2023, TCVN 5575:2024 và phân loại tiết diện Eurocode 3 (cho phép uốn dẻo khi thỏa các điều kiện); đồng thời chưa chuẩn hóa các thước đo hiệu quả (thời gian thiết kế, khối lượng thép, số vòng lặp phối hợp) để so sánh định lượng với quy trình truyền thống, và còn hạn chế về liên kết trao đổi dữ liệu với BIM/IFC phục vụ phối hợp từ giai đoạn sớm với thiết kế kiến trúc. Bài báo này hướng tới đóng góp thêm các khoảng trống nêu trên bằng một mô hình MATLAB độc lập, mô-đun, đáp ứng đồng thời yêu cầu TCVN và đối chiếu Eurocode 3, tích hợp các kiểm tra khung kết cấu thép và cung cấp minh chứng định lượng về hiệu quả trên công trình thử nghiệm.

3. Kiến trúc mô hình và trình tự khởi tạo quy trình thiết kế phối hợp kiến trúc – kết cấu

3.1. Dữ liệu vào và tiêu chuẩn áp dụng



Hình 1. Sơ đồ thông số hình học của tiết diện thép.

Tải trọng và tổ hợp: Tải bản sàn theo diện tích

Tính tải, Hoạt tải tác dụng lên sàn G_{san}, Q_{san}

Tính tải, Hoạt tải tác dụng lên sàn G, Q

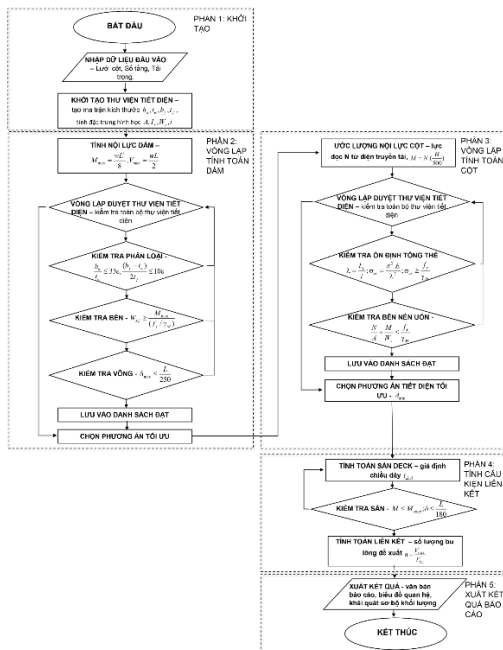
Tải tường bên $q_{tường} = \gamma_{tường} \cdot h_{tường} \cdot t_{tường}$

Tổ hợp sử dụng dạng phổ biến 1.1G + 1.3Q (tham số hoá để lựa chọn). Vật liệu: Thép f_y, E ; hệ số an toàn vật liệu γ_m .

Tiêu chuẩn kiểm tra: Theo TCVN 2737:2023 (tải trọng), TCVN 7571-15:2019 (thư viện tiết diện thép hình I), TCVN 5575:2024 đối chiếu tham khảo với Eurocode 3 (kiểm tra mảnh bản, ổn định), với các giới hạn kiểm tra phổ biến: võng dầm $\delta \leq L/250$ võng sàn $\delta \leq L/180$, kiểm tra độ mảnh theo Eurocode 3: $h_w/t_w \leq 33\varepsilon$, $(b_f - t_w)/2t_f \leq 10\varepsilon$ với $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$.

3.2. Kiến trúc tổng quát của mô hình

Mô hình được hiện thực trên MATLAB dưới dạng một script duy nhất, gồm các khối chức năng tương ứng với các bước của quy trình thiết kế phối hợp kiến trúc-kết cấu. Toàn bộ tham số đầu vào (số tầng, lưới nhịp, chiều cao tầng, vật liệu, tải trọng tĩnh-hoạt tải, tải tường, tổ hợp tải) được khai báo ở phần đầu và được truyền xuyên suốt đến các mô-đun: (i) xác định phương án tiết diện dầm phụ, (ii) xác định phương án tiết diện dầm chính nhiều nhịp, (iii) chọn tiết diện kích thước cột có xét ổn định trên tổng thể, (iv) tính sàn deck tạm thời (coppa) và kiểm tra võng, (v) tính liên kết bulông/hàn, (vi) thiết kế sơ bộ bản mã chân cột và kiểm tra nền, (vii) xuất báo cáo và trực quan hóa. Mô hình cho phép phản hồi nhanh cho nhóm kiến trúc thông qua báo cáo .txt, biểu đồ moment-võng và cửa sổ tóm tắt kết luận (popup).



Hình 2. Lưu đồ quy trình thuật toán lựa chọn tiết diện thép.

3.3. Mô-đun chọn tiết diện dầm

3.3.1. Không gian tổ hợp lựa chọn

Tiết diện I hàn được tạo bởi lưới tham số (h_w, t_w, b_f, t_f) trong khoảng hợp lý cho dầm phụ và dầm chính. Với mỗi tổ hợp hình học:

Diện tích: $A = 2b_f \cdot t_f + h_w \cdot t_w$. (1)

Chiều cao tiết diện: $h = h_w + 2t_f$. (2)

Momen quán tính xấp xỉ: $I_x = \frac{b_f \cdot h^3 - (b_f - t_w) \cdot h_w^3}{12}$ (3)

Mô-đun chống uốn: $W_x = I_x / (h/2)$. (4)

3.3.2. Yêu cầu chịu uốn và kiểm tra võng

Với dầm giản đơn chịu tải phân bố đều w (đơn vị kN/m, quy đổi nội bộ về N/mm):

Momen lớn nhất: $M_{max} = w \cdot L^2 / 8$. (5)

Yêu cầu mô-đun chống uốn: $W_{x,req} = \frac{M_{max} \cdot 10^6}{f_y / \gamma_m}$. (6)

Độ võng đường đàn hồi: $\delta(x) = \frac{w \cdot x(L^3 - 2Lx^2 + x_3)}{24EI_x}$, lấy δ_{max} để so giới hạn. (7)

Tiết diện ứng viên phải đồng thời thỏa: (i) độ mảnh theo Eurocode 3, (ii) sức kháng uốn $W_x \geq W_{x,req}$. Sau đó ưu tiên các phương án đạt võng $\delta_{max} \leq L/250$. Thuật toán chọn tiết diện cuối cùng theo tiêu chí tối thiểu diện tích A (xấp xỉ hóa mục tiêu khối lượng).

3.3.3. Dầm chính nhiều nhịp và tải tường

Đối với dầm chính, tải trọng phân bố đều được tăng thêm ở các nhịp biên để xét đến các tải tường:

$w_{thiết\ kế} = \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q + 1_{biên} \cdot q_{tường}$ (8)

Quy trình duyệt-lọc kiểm tra yêu cầu chịu uốn và độ võng, thực hiện cho từng nhịp và từng tổ hợp tải; người dùng chọn tổ hợp dùng để thiết kế (tham số TOHOP_USE).

Nội lực dọc cột được ước lượng từ tải sàn phân bố theo lưới cột (khác nhau giữa vị trí biên/giữa). Mô hình xét hiệu ứng lệch tâm sơ bộ $e = H_{tầng} / 500$ để tạo moment kèm nén:

$N = (\text{tải trọng phân bố}); M = N \cdot e; W_{x,req} = \frac{M \cdot 10^6}{f_y / \gamma_m}$ (9)

Tiết diện lựa chọn phải thỏa mảnh bản và uốn như với dầm. Đồng thời kiểm tra ổn định tổng thể (Euler):

$i = \sqrt{I_x / A}; \lambda = \frac{L_e}{i}; \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$ (10)

3.4. Mô-đun chọn tiết diện cột (có xét ổn định tổng thể)

Nội lực dọc cột ước lượng từ tải sàn phân bố theo lưới cột (khác biệt biên/giữa). Xét lệch tâm sơ bộ $e = H_{tầng} / 500$ để tạo moment $M = N \cdot e$ và yêu cầu $W_{x,req} = \frac{M \cdot 10^6}{f_y / \gamma_m}$.

Với $L_e = K \cdot H_{tầng}$ (mặc định $K = 1.0$). Điều kiện chấp nhận: $\sigma_{cr} \geq \frac{f_y}{\gamma_m}; \sigma_N = N/A < \sigma_N$. Ta được phương án chọn A trong thư viện tiết diện tòa điều kiện.

3.5. Kiểm tra sàn deck

Mô hình deck dùng tham số chiều dày tôn t_{deck} , chiều cao sóng tôn h_{deck} , lớp bê tông làm việc h_{bt} , và tải hoàn thiện. Kiểm tra ở giai đoạn làm việc như coppa:

$$M_{\max} = \frac{w \cdot L^2}{8}; I_{deck} \approx 2 \cdot \frac{h_{deck}^3 \cdot t_{deck}}{12}; W = \frac{I}{h_{deck}/2} \quad (11)$$

Điều kiện: $M_{\max} \leq W \cdot f_y / 10^6$ và $\delta \leq \frac{L}{180}$. Nếu không đạt thuật toán tự tăng t_{deck} theo bước 0.2mm đến khi thỏa điều kiện hoặc báo cần đổi sang tiết diện khác, giảm nhịp.

3.6. Liên kết bu lông và hàn (sơ bộ)

Thiết kế của một bu lông được thiết kế xấp xỉ: $F_{b,1} \approx \frac{0.6 f_u A_b}{\gamma_{M2}}$; $A_b = \pi d^2 / 4$ số bu lông $n = V_{\max} / F_{b,1}$ với V_{\max} lấy từ dầm chính. Thiết kế mối hàn góc: $F_{v,weld} \approx 0.7 a l f_{vw}$; $f_{vw} \approx 0.25 f_y$. Ta suy ra được số mối hàn yêu cầu.

3.7. Bản mã chân cột và kiểm tra nền

Áp lực nền $\sigma = N / A_{bản mã} \leq f_{cd,đất}$. Uốn công xôn mỗi phía:

$$q = N / (ab); M_u = q s^2 / 2; M_{pl,1mm} = f_y t^2 / 4 \quad (12)$$

Nếu $M_u > M_{pl}$, đề xuất sườn hoặc tăng kích thước tấm; tạo vòng lặp tăng a, b theo bước 50mm đến khi $\sigma \leq f_{cd,đất}$. Tiếp tục kiểm tra ứng suất tiếp và mảnh bản cục bộ.

3.8. Phân loại tiết diện theo Eurocode 3/TCVN (tiền đề cho thiết kế trên miền dèo)

Để cho phép cấu kiện làm việc trong miền dèo, tiết diện phải đặc chắc (phân loại xấp xỉ lớp 1-2 theo Eurocode 3/TCVN). Mô hình áp dụng các bất đẳng thức rút gọn-an toàn:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 33\epsilon; \frac{b_f - t_w}{2t_f} \leq 10\epsilon; \quad (13)$$

Trong đó: $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

Nếu tiết diện thỏa đồng thời 2 điều kiện, cấu kiện đạt tính đặc chắc trong lớp 1, 2. Đủ điều kiện kiểm tra dèo. Khi không thỏa mãn một trong hai điều kiện trên, cấu kiện không đặc chắc phân loại lớp 3, 4. Chỉ tính toán dầm hồi.

3.9. Trạng thái giới hạn dèo (ULS theo mô-đun dèo)

Đối với các cấu kiện đủ “đặc” (compact) theo phân loại tiết diện (Class 1–2 “Phân loại tiết diện”), khả năng chịu uốn có thể đánh giá theo mô-đun kháng uốn dèo nhằm tận dụng dự trữ dèo của tiết diện. Kiểm tra dèo được triển khai như một tùy chọn song song với kiểm tra dầm hồi, dùng cho dầm/cột đã được chống lật đầy đủ trong giai đoạn khai thác.

Các điều kiện để tính toán trong giai đoạn biến dạng dèo: (i) Dầm có tiết diện không đổi và chịu tải trọng tĩnh, (ii) Thép dầm làm việc có giới hạn chảy $f_y = 530$ MPa, (iii) Điều kiện kiểm tra ổn định tổng thể của dầm được đảm bảo, (iv) Ứng suất tiếp τ tại tiết diện ảnh

hưởng đồng thời mômen M và lực cắt V do tổ hợp tải trọng gây ra có $\tau \leq 0.9f$.

Kiểm tra dầm hồi (tham chiếu): $\frac{M_{Ed}}{W_x f_y / \gamma_M} \leq 1.0$

Trong đó $W_x = I_x / (h/2)$ là mô-đun kháng uốn dầm hồi (đã dùng ở mục 3.3), f_y là cường độ chảy, γ_M là hệ số an toàn vật liệu.

Kiểm tra dèo (Thay W_x bằng W_{pl})

$$\frac{M_{Ed}}{W_{pl,x} f_{yd}} \leq 1.0; f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (14)$$

Trong thực hành TCVN 5575/ Eurocode 3, $W_{pl,x}$ có thể xấp xỉ từ mô-đun dầm hồi thông qua hệ số tăng cường dèo: $W_{pl,x} \approx C_x W_x$

Với C_x lấy theo Phụ lục/tra cứu của tiêu chuẩn (phụ thuộc loại hình tiết diện). Với dầm I đối xứng hàn làm việc theo trục mạnh và đủ điều kiện tiết diện loại 1–2, giá trị thực hành thường dùng:

$$C_x \approx 1.18; C_x \approx 1.28; C_x \approx 1.40 \quad (15)$$

Khi đó ta có bất đẳng thức dèo:

$$\frac{M_{xmax}}{C_1 W_{xn} f_{yc}} \leq 1.0 \text{ hoặc } \frac{M_{Ed}}{(C_1 W_{xn}) f_{yc}} \leq 1.0 \quad (16)$$

Ghi chú ký hiệu:

- $W_{pl,x}$: mô-đun kháng uốn dèo quanh trục uốn chính
- W_x : mô-đun kháng uốn dầm hồi
- $f_{yd} = f_y / \gamma_M$: cường độ thiết kế
- C_x : hệ số chuyển từ dầm hồi sang dèo (tra theo tiêu chuẩn/phụ lục)
- γ_M : hệ số an toàn vật liệu (mô hình đang dùng tham số gamma_m)

Để thiên về an toàn, trong thiết kế lựa chọn tiết diện dầm chỉ thường sử dụng giai đoạn dầm hồi để tính toán lựa chọn.

3.10. Chiến lược tối ưu lựa chọn

Trong mỗi nhóm cấu kiện, thuật toán lọc theo ràng buộc (mảnh bản, bền, võng/ổn định, giới hạn sửa dụng) rồi tối ưu gần đúng bằng cách chọn phương án có A nhỏ nhất. Với dầm, ưu tiên các phương án thỏa võng; nếu không có, chọn phương án nhỏ nhất A và gắn cờ “võng lớn” để kiến trúc xem xét điều chỉnh nhịp/khoảng cách dầm phụ. Khi tùy chọn dèo bật, mô hình lưu hai phương án song song (EL/PL) và đề xuất phương án có khối lượng thấp hơn (kèm cảnh báo yêu cầu chi tiết hóa cho miền dèo).

3.11. Xuất kết quả và giao diện

Mô hình ghi báo cáo tuần tự (.txt) ở từng mô-đun (tiết diện đã chọn, chỉ tiêu kiểm tra, đề xuất tăng cường), vẽ biểu đồ moment–võng và sơ đồ khung có gắn nhãn M_{\max} . Cửa sổ hiện lên (popup) tóm tắt khối lượng thép (dầm chính, dầm phụ, cột), thông số bản mã/móng (nếu có) và các ghi chú kỹ thuật, phục vụ phản hồi nhanh cho nhóm kiến trúc.

3.12. Giới hạn và hướng mở

Mô hình giả định dầm/cột giản đơn theo ứng xử đàn hồi tuyến tính; các hiệu ứng bậc hai tổng thể, liên hợp giữa thép và bê tông giai đoạn sử dụng và phi tuyến vật liệu chưa xét chi tiết. Trong thực hành, đề xuất kiểm chứng chéo bằng mô hình phần tử hữu hạn (ví dụ SAP2000) và/hoặc so sánh số liệu thực nghiệm; chênh lệch nội lực/độ võng trong khoảng 5–10 % được coi là chấp nhận được ở giai đoạn phương án.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Công trình ứng dụng so sánh thử nghiệm

Công trình minh họa là nhà khung thép 2 tầng: cao tầng $H_{tầng} = 3.1\text{ m}$; lưới nhịp phương $X: 4\text{ m} - 4\text{ m}$; số khung phương $Y: 3.1\text{ m} - 3.9\text{ m}$; dầm phụ vuông góc $L_{dp} = 4\text{ m}$ với khoảng cách 1.2 có tường gạch biên dày 110 mm. vật liệu thép $E = 2.1 \times 10^5\text{ MPa}$; $f_y = 275\text{ MPa}$. Tĩnh tải và hoạt tải sàn lần lượt như sau :

$$\begin{aligned} [G_{sàn\ tang\ 1}, Q_{sàn\ tang\ 1}] &= [2.6; 1.6694]\text{ KN/m}^2 \\ [G_{sàn\ tang\ 2}, Q_{sàn\ tang\ 2}] &= [1.3; 0.8347]\text{ KN/m}^2 \end{aligned}$$

Thuật toán tự động lựa chọn sơ bộ cho trường hợp minh họa: dầm chính nhóm I (I200×100 theo kiểm tra giới hạn sử dụng ULS và

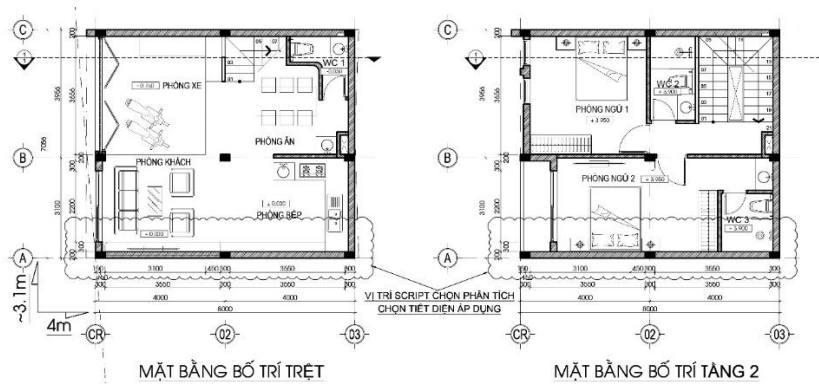
I180×75 theo kiểm tra giới hạn trên miền dẻo SLS), dầm phụ nhóm I (I150×75), cột nhóm I200×100; bản mã chân cột và liên kết bu lông– hàn được khuyến nghị theo nội lực bất lợi. Báo cáo thuyết minh kèm biểu đồ mômen–độ võng có gắn nhãn M_{max} được xuất tự động để phục vụ rà soát phương án. Ta sẽ lựa chọn khung có chiều dài lớn để tiến hành chạy thử mô hình, trong trường hợp này ta chọn trục A là trục phân tích.

Để làm rõ cơ sở truyền tải nội lực và minh bạch hóa sơ đồ tính trong mô hình sơ bộ, quan niệm liên kết giữa các cấu kiện của khung thử nghiệm được thiết lập cụ thể như sau:

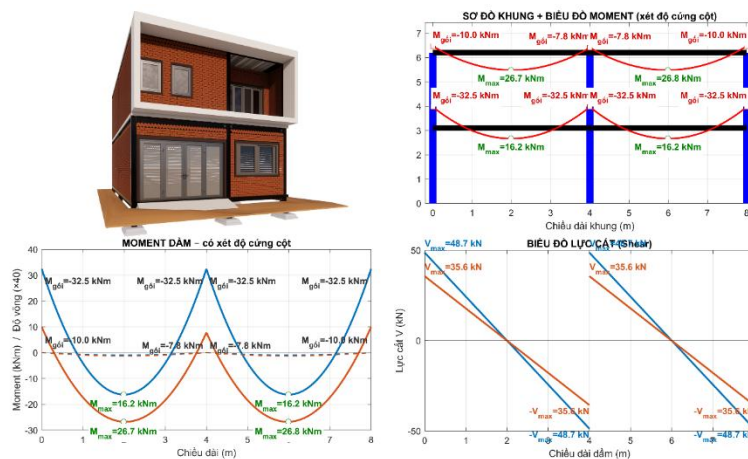
Liên kết dầm phụ – dầm chính: Được mô hình hóa là liên kết khớp, chủ yếu chịu lực cắt. Phản lực từ dầm phụ truyền sang dầm chính dưới dạng các lực tập trung (P) tại các điểm gác dầm.

Liên kết dầm chính – cột: Được giả định là liên kết khớp, phù hợp với mô hình dầm làm việc theo sơ đồ hai gối tựa chịu tải trọng đứng dọc theo trục. Cột chủ yếu tiếp nhận lực nén dọc trục (N) và mômen uốn do độ lệch tâm sơ bộ ($M = N \times e$).

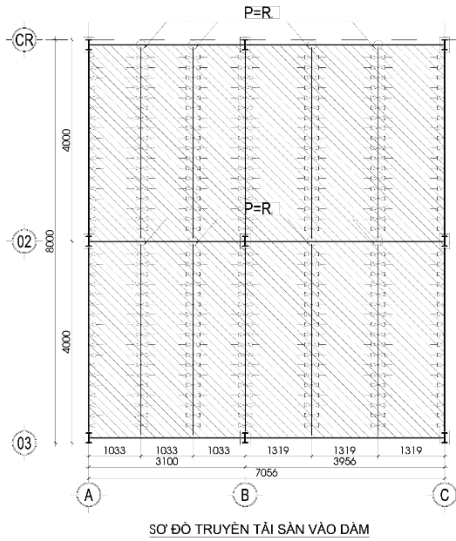
Liên kết chân cột – móng: Được quan niệm là liên kết ngàm cứng. Giả thiết này đảm bảo chân cột tiếp nhận toàn bộ nội lực (lực dọc, lực cắt và mô-men), làm cơ sở vững chắc cho thuật toán đề xuất kích thước bản mã và số lượng bu lông neo bám sát với thực tế làm việc của kết cấu.



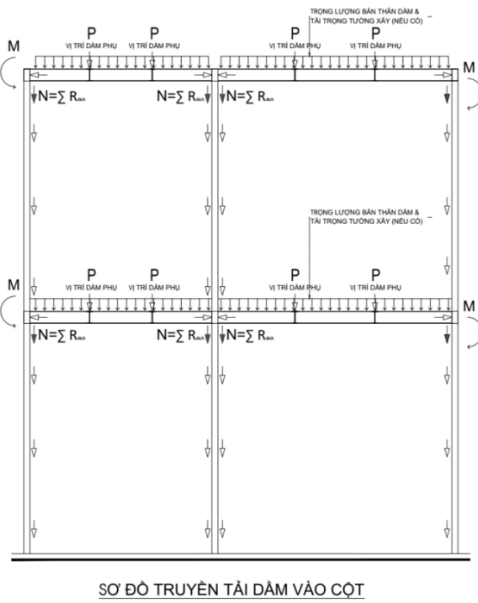
Hình 3. Mặt bằng mô hình thử nghiệm.



Hình 4. Biểu đồ nội lực sau khi chạy tự động hóa lựa chọn sơ bộ tiết diện (script).

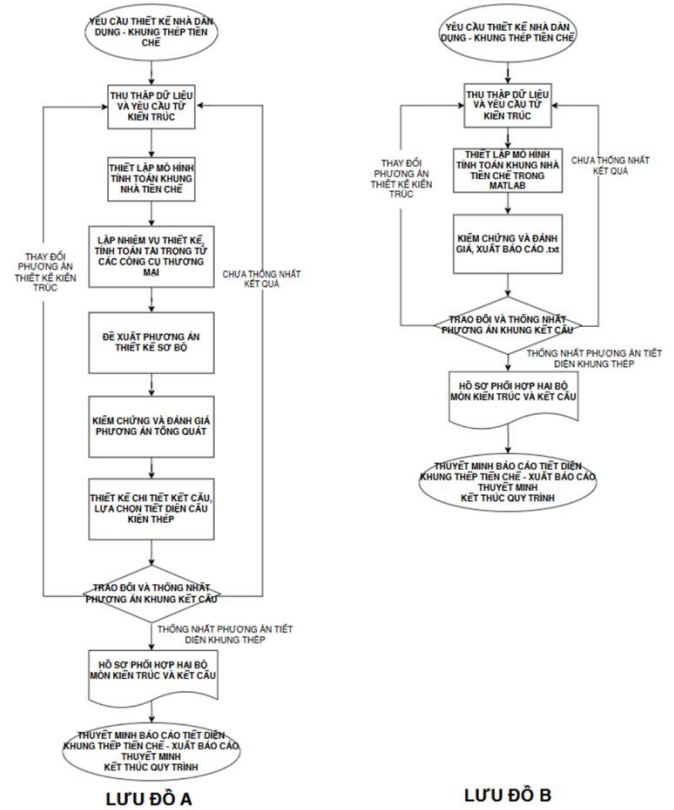


Hình 5. Sơ đồ truyền tải theo phương ngang.



Hình 6. Sơ đồ truyền tải theo phương đứng.

đạt; và cuối cùng xuất báo cáo, bản vẽ. Quy trình này đặc trưng bởi nhiều thao tác thủ công, dễ sai sót nhập liệu và độ trễ phản hồi lớn khi phương án kiến trúc thay đổi. Ở Lưu đồ B, sau khi tiếp nhận các thông số (nhịp, tải, tường biên, tổ hợp), mô hình khung thép được thiết lập và các bước lựa chọn/kiểm tra được tự động hóa: chọn dầm phụ (thép hộp/thép cán nóng) theo M_{req} , độ võng và mảnh bản; chọn dầm chính theo ULS/SLS và mảnh bản; ước lượng cột và kiểm tra ổn định sơ bộ; tính sàn deck, đỉnh chống cắt, bu lông-hàn, bản mã chân cột; sinh báo cáo và đồ thị kèm nhãn M_{max} ; trao đổi - cập nhật phương án; lặp đến khi đạt; và xuất báo cáo, bản vẽ. Quy trình tự động hóa giảm thao tác tay, chuẩn hóa tiêu chí kiểm tra và tự động sinh báo cáo/đồ thị, từ đó hỗ trợ quét nhanh nhiều phương án. Việc so sánh được thực hiện theo các chỉ tiêu chính: thời gian phản hồi mỗi vòng lặp, số vòng lặp cần thiết để hội tụ, khối lượng thao tác nhập liệu và mức độ chuẩn hóa các kiểm tra kỹ thuật.



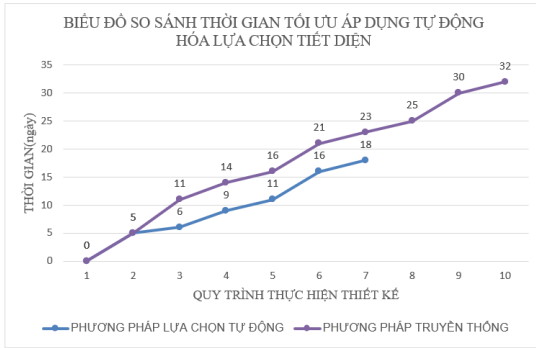
Hình 5. Lưu đồ so sánh quy trình thiết kế lựa chọn tiết diện sơ bộ.

Tổng hợp kết quả thiết kế tự động các cấu kiện phụ và liên kết từ thuật toán trong Bảng 1.

4.2. So sánh hai lưu đồ quy trình

Nghiên cứu đối chiếu hai quy trình thiết kế để lượng hóa hiệu quả: Lưu đồ A – quy trình truyền thống (CAD/Excel kết hợp phần mềm phân tích thương mại) và Lưu đồ B theo hình 3 – quy trình tự động hóa bằng script MATLAB. Ở Lưu đồ A, chu trình gồm: tiếp nhận phương án kiến trúc và yêu cầu; giả định tiết diện sơ bộ; dựng mô hình – gán tải – chạy phân tích; đề xuất phương án sơ bộ; hiệu chỉnh tiết diện/kiểm tra ULS, SLS; triển khai chi tiết; trao đổi – thống nhất; lặp lại đến khi

Để minh họa rõ hơn sự khác biệt về hiệu quả giữa hai phương pháp, nhóm tác giả đã tiến hành so sánh trực quan thời gian thực hiện thiết kế theo từng vòng lặp trong trường hợp thử nghiệm. Cần làm rõ rằng, thước đo thời gian ở đây được định nghĩa là tổng thời gian của một chu trình phối hợp, bao gồm khối lượng thực tế cộng dồn với độ trễ giao tiếp (thời gian chờ phản hồi, cập nhật lại mô hình và xuất báo cáo thủ công giữa Kiến trúc sư và Kỹ sư).



Hình 6. Biểu đồ so sánh thời gian khi sử dụng phương pháp truyền thống và phương pháp tự động hóa lựa chọn tiết diện.

Kết quả được thể hiện trên Hình 5 cho thấy, quy trình truyền thống tiêu tốn lượng lớn thời gian vào các bước trao đổi và chỉnh sửa lặp đi lặp lại. Trong khi đó, phương pháp tự động hóa bằng script MATLAB giúp loại bỏ hoàn toàn các thao tác thủ công trung gian, tính toán và đề xuất tiết diện gần như tức thời. Điều này không chỉ giúp rút ngắn đáng kể tổng số giờ làm việc ở mỗi vòng lặp và giảm sai số do con người, mà còn nâng cao năng lực phản hồi nhanh trước mọi thay đổi của phương án kiến trúc, qua đó tối ưu sự đồng bộ trong thiết kế kiến trúc – kết cấu."

Để minh chứng hiệu quả của mô hình, nghiên cứu tiến hành so sánh trực tiếp hai quy trình thiết kế: phương pháp truyền thống (CAD/Excel kết hợp phần mềm thương mại) và quy trình tự động hóa bằng script MATLAB. Kết quả được lượng hóa thông qua các chỉ tiêu về thời gian, số vòng lặp, khối lượng thép, độ chính xác nội lực – độ võng, cũng như mức độ rủi ro trong thao tác. Các số liệu tổng hợp trong bảng dưới đây cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai cách tiếp cận.

5. Kết luận về đóng góp và các hạn chế của nghiên cứu

5.1. Đóng góp của nghiên cứu

Đóng góp, (i) Khung tính toán tự động, nhẹ: xây dựng mô hình MATLAB cho nhà dân dụng thép quy mô nhỏ, tự động hóa quy trình

lựa chọn tiết diện dầm–cột, dầm phụ (hộp/T), kiểm tra độ võng, ổn định cục bộ, liên kết (bulông/hàn), sàn deck–đỉnh chống cắt và bản mã chân cột, kèm báo cáo và đồ thị gắn nhãn M_{max} sinh tự động. (ii) Tuân thủ tiêu chuẩn: mã hóa nhất quán các kiểm tra theo TCVN 2737:2023, TCVN 7571-15:2019, TCVN 5575:2024 và tham chiếu Eurocode 3, giúp rút ngắn thao tác thủ công và giảm sai sót nhập liệu ở giai đoạn thiết kế sơ bộ. (iii) Hiệu quả phối hợp liên ngành: cho phép “quét” nhanh nhiều phương án kiến trúc–kết cấu, rút ngắn thời gian phản hồi khi thay đổi phương án; trên bài toán thử nghiệm nhà 2 tầng, thời gian thiết kế giảm trên 30 % so với quy trình truyền thống, đồng thời cải thiện tính minh bạch và khả năng truy xuất quyết định kỹ thuật.

5.2. Các hạn chế của nghiên cứu và hướng mở

Hạn chế, (i) Giản lược mô hình: khung được mô hình hóa 2D với dầm làm việc theo sơ đồ hai gối; chưa xét liên kết nửa cứng, tính liên tục nhiều nhịp, hiệu ứng màng của sàn và tải tập trung từ dầm phụ lên dầm chính ngoài quy đổi “vệt tải phân bố” xấp xỉ. (ii) Tải trọng và tổ hợp: phạm vi dừng ở các tổ hợp tĩnh–hoạt tải phục vụ thiết kế sơ bộ; chưa tích hợp gió, động đất theo tiêu chuẩn hiện hành và chưa tách bạch trạng thái ngắn hạn/dài hạn để kiểm tra SLS, cũng như bao nội lực theo tổ hợp vô bao. (iii) Ổn định và liên kết (mức sơ bộ): ổn định cột dầm đường cong chuẩn với chiều dài hữu hiệu giả định và trong phiên bản hiện tại, mô hình chủ yếu giải quyết bài toán chịu tải trọng đứng theo sơ đồ dầm liên tục đơn giản hóa, chưa tính đến sự phân phối nội lực theo độ cứng không gian của nút khung cứng. Đây sẽ là tiền đề để phát triển thuật toán phân tích ma trận độ cứng (Stiffness Matrix Method) ở các nghiên cứu tiếp theo.

Khả năng mở rộng: cấu trúc mã theo mô-đun, thuận lợi tích hợp thêm tải gió–động đất, mô hình liên kết nửa cứng, kiểm tra liên hợp nâng cao và kết nối BIM/FEA trong các bước phát triển tiếp theo và cuối cùng nghiên cứu có thể ứng dụng tích hợp vào trang diện tử giúp người dùng xác định khối lượng thép dựa trên quy mô và nhu cầu công năng ngay từ giai đoạn sớm.

Bảng 1. Tổng hợp kết quả thiết kế tự động cấu kiện phụ từ thuật toán.

Hạng mục thiết kế	Thông số đầu vào / Nội lực	Kết quả phần mềm đề xuất
1. Sàn thép liên hợp (Sàn Deck)	- Tĩnh tải(G): 2.6 kN/m^2 - Hoạt tải(Q): 1.67 kN/m^2 - Nhịp dầm phụ(L_{dp}): 4.0 m	- Chiều dày tôn Deck(t_{deck}): 0.75 mm - Chiều dày lớp bê tông (h_c): 100 mm
2. Liên kết dầm phụ - dầm chính	- Lực cắt lớn nhất (V_{max}): 36.4 kN - Khả năng chịu cắt 1 bu lông($F_{b,1}$): 75.3 kN	- Đường kính bu lông: M20 - Số lượng bu lông tính toán 0.48 con - Số lượng bu lông bố trí: 2 bu lông – theo yêu cầu cấu tạo
3. Bảng mã chân cột	- Lực nén dọc trục lớn nhất(N_{max}): 52.2 kN	- Kích thước bản mã($B \times L$): $600 \times 600 \text{ mm}$ - Chiều dày bản mã(t_p): 24 mm - Số lượng bu lông neo: 4 bu lông

Bảng 2. Các chỉ số sánh mức độ tối ưu trên ứng dụng thử nghiệm.

Tiêu chí	Lưu đồ A – truyền thống	Lưu đồ B - ứng dụng tự động hóa lựa chọn
Chu trình vòng lặp phương án		~3-8 % trên bài toán minh họa
Sai số nội lực so với phương pháp phần tử hữu hạn tham chiếu	-	≤ ~3 % trên bài toán minh họa
Sai khác độ võng	-	± 3-8 % trên bài toán minh họa
Khối lượng thép so với phương án thủ công	-	± 2-8 % trên bài toán minh họa
Rủi ro nhập liệu, thao tác máy tính	Cao (đa phần thao tác tay)	Thấp (tham số hóa, ghi theo log)
Khả năng phản hồi phương án kiến trúc	Chậm, dễ sót cập nhật	Nhanh, cập nhật nhất quán

Danh mục ký hiệu sử dụng trong bài báo

Ký hiệu	Đơn vị	Diễn giải
Thông số hình học tiết diện		
h_w	mm	Chiều cao bản bụng
t_w	mm	Chiều dày bản bụng
b_f	mm	Bề rộng bản cánh
t_f	mm	Chiều dày bản cánh
A	mm ²	Diện tích mặt cắt ngang tiết diện
h	mm	Chiều cao tổng thể của tiết diện $h = h_w + 2t_f$
I_x	mm ⁴	Mô-men quán tính quanh trục chính x
W_x	mm ³	Mô-đun kháng uốn đàn hồi
$W_{pl,x}$	mm ³	Mô-đun kháng uốn dẻo
i	mm	Bán kính quán tính ($i = \sqrt{I_x/A}$)
Vật liệu và Hệ số an toàn		
E	MPa	Mô-đun đàn hồi của thép
f_y	MPa	Giới hạn chảy của thép
f_u	MPa	Cường độ kéo đứt của bu lông/ thép
γ_M	-	Hệ số an toàn vật liệu
ϵ	-	Hệ số phụ thuộc giới hạn chảy ($\epsilon = \sqrt{235/f_y}$)
C_x	-	Hệ số chuyển từ đàn hồi sang dẻo
Tải trọng và nội lực		
G, Q	kN/m	Tĩnh tải và hoạt tải tác dụng lên dầm
G_{san}, Q_{san}	kN/m ²	Tĩnh tải và Hoạt tải tác dụng lên sàn
w	N/mm	Tải trọng phân bố đều quy đổi
M_{max}	N.mm	Mô-men uốn lớn nhất trong dầm
M_{Ed}	N.mm	Mô-men thiết kế
N	N	Lực dọc trục (nén)
V_{max}	N	Lực cắt lớn nhất
Tính toán ổn định và kết cấu phụ		
δ	mm	Độ võng của cấu kiện
L	mm	Nhịp dầm hoặc chiều dài tính toán
λ	-	Độ mảnh của cột $\lambda = L_e/i$

Ký hiệu	Đơn vị	Diễn giải
σ_{cr}	MPa	Ứng suất tới hạn
e	mm	Độ lệch tâm sơ bộ $e = H_{tang}/500$
t_{deck}	mm	Chiều dày tôn sàn Deck
h_{deck}	mm	Chiều cao sóng tôn
$F_{b,1}$	N	Khả năng chịu cắt của một bu lông
$f_{cd,dat}$	MPa	Cường độ chịu nén tính toán của nền đất

Tài liệu tham khảo

- [1]. Bộ Khoa học & Công nghệ, TCVN 2737:2023—Tài trọng và tác động, Hà Nội, Việt Nam, 2023.
- [2]. Bộ Khoa học & Công nghệ, TCVN 7571-15:2019—Thép hình cán nóng, Phần 15: Thép chữ I, Hà Nội, Việt Nam, 2019.
- [3]. Bộ Khoa học & Công nghệ, TCVN 5575:2024—Thiết kế kết cấu thép, Hà Nội, Việt Nam, 2024.
- [4]. CEN, EN 1993-1-1: Eurocode 3—Design of steel structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, Belgium, 2005, (2014).
- [5]. V. A. Jankovski and J. Atkočiūnas, “SAOSYS Toolbox as MATLAB implementation in the elastic–plastic analysis and optimal design of steel frame structures,” Journal of Civil Engineering and Management, vol. 16, no. 1, pp. 103–121, 2010.
- [6]. A. L. Van Marcke, V. Carstensen, and J. Voigt, “Automated planar truss design with reclaimed partially disassembled steel truss components,” Journal of Building Engineering, vol. 84, 108458, 2024.
- [7]. C. S. T. S. do Carmo and E. Domínguez, “A framework for architecture and structural engineering collaboration in BIM projects through structural optimization,” Automation in Construction, vol. 27, pp. 223–239, 2012.
- [8]. J. D. Kang, W. Huang, and Y. Xu, “A BIM-based automatic design optimization method for modular steel structures: Rectangular modules as an example,” Journal of Building Engineering, vol. 13, pp. 1410–1419, 2023.
- [9]. M. L. Afzal, R. Y. M. Ayyub, M. F. Shoaib, and M. Bilal, “Towards BIM-based sustainable structural design optimization: A systematic review and industry perspective,” Computers in Industry, vol. 151, 2023, Art. no. 103444.
- [10]. G. A. S. Falcon, R. das C. Ferreira, W. G. Menandro, and F. C. Meira, “Computational methodology for the optimal design of steel truss frames integrating MATLAB and FEA platforms,” Engineering Structures, vol. 276, 2023, Art. no. 113000.
- [11]. KS. Đ. Q. Thành, “Thiết kế tự động kết cấu thép nhà công nghiệp bằng phần mềm SAP2000 V10,” Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật Xây dựng, 2011.