

Ứng dụng tối ưu trong lập kế hoạch bố trí địa điểm xây dựng động cho các dự án đường cao tốc tại Việt Nam sử dụng thuật toán tiến hóa vi phân

Nguyễn Thị Thanh², Phạm Nguyễn Văn Phương³, Trương Việt Hùng^{1*}

¹ Bộ môn Công trình Giao thông, Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi

² Bộ môn Kỹ thuật công trình, Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Hồng Đức

³ Bộ môn Công nghệ và Quản lý Xây dựng, Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Tối ưu hóa
Tổ chức thi công
Đường cao tốc
Tiến hóa vi phân
Chi phí vận chuyển
Cung ứng vật liệu

TÓM TẮT

Việc tối ưu hóa bố trí địa điểm xây dựng đóng vai trò quan trọng trong việc giảm chi phí và nâng cao hiệu quả thi công các dự án hạ tầng giao thông, đặc biệt đối với các dự án đường cao tốc tại Việt Nam, nơi địa bàn thi công trải rộng lớn, địa hình phức tạp và nhu cầu vật liệu, nhân công thay đổi liên tục theo tiến độ. Nghiên cứu này đề xuất mô hình tối ưu hóa bố trí địa điểm xây dựng động (Dynamic Construction Site Layout Planning - DCSLP), sử dụng thuật toán tiến hóa vi phân (Differential Evolution - DE) để tối ưu hóa vị trí các cơ sở tạm thời, giảm thiểu tổng chi phí vận chuyển vật liệu và tái định vị. Mô hình hỗ trợ sắp xếp linh hoạt các cơ sở (như mỏ đá, máy nghiền, nhà máy bê tông, nhà máy nhựa đường, kho lưu trữ, văn phòng và khu thi công) theo từng giai đoạn dự án, tích hợp chuỗi cung ứng thực tế từ nguyên liệu thô tại mỏ đến chế biến và thi công. Một nghiên cứu tình huống trên dự án cao tốc giả định dài 50 km, chia thành bốn giai đoạn chính với 19 cơ sở và tám khu vực thi công (năm khu vực đường và ba cầu lớn), minh họa khả năng thích ứng của mô hình với nhu cầu vật liệu biến động. Kết quả cho thấy cách tiếp cận động mang lại hiệu quả tài chính vượt trội hơn so với cách tiếp cận tĩnh, cho phép giảm chi phí tổng thể đồng thời đảm bảo tính linh hoạt theo sát thực tế của công trường. Mô hình có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các dự án cao tốc quốc gia tại Việt Nam, góp phần đạt mục tiêu 5.000 km vào năm 2030.

1. Giới thiệu chung

Việc lập kế hoạch bố trí địa điểm xây dựng (Construction Site Layout Planning - CSLP) đóng vai trò then chốt trong việc nâng cao hiệu quả thi công và giảm thiểu chi phí cho các dự án hạ tầng giao thông, đặc biệt là các dự án đường cao tốc tại Việt Nam. CSLP là quá trình sắp xếp một cách khoa học và hợp lý các không gian và cơ sở tạm thời trên công trường xây dựng, nhằm tối ưu hóa việc sử dụng không gian, giảm chi phí vận hành, nâng cao năng suất lao động và giảm thiểu rủi ro an toàn [1]. Cụ thể, nó liên quan đến việc xác định vị trí, kích thước và chức năng lý tưởng cho các cơ sở như khu vực lưu trữ vật liệu, nhà máy chế biến, văn phòng quản lý, và các khu thi công, dựa trên mối quan hệ tương tác giữa chúng, nhu cầu theo tiến độ dự án, cũng như các ràng buộc về địa hình, môi trường và an toàn [2]. Ví dụ, trong CSLP, việc đặt kho vật liệu gần khu thi công có thể giảm thời gian vận chuyển, trong khi sắp xếp các cơ sở nguy hiểm cách xa khu nghỉ ngơi để đảm bảo an toàn lao động [3]. Với địa bàn thi công thường trải rộng lớn, địa hình phức tạp và nhu cầu vật liệu, nhân công thay đổi liên tục theo tiến độ, việc bố trí các cơ sở tạm thời như mỏ đá, nhà máy bê tông, kho lưu trữ và khu thi công cần phải đảm bảo tính linh hoạt và tối ưu hóa tài chính. Theo các nghiên cứu và báo cáo về dự án cao tốc Bắc-Nam, giá vật liệu và chi phí vận chuyển có thể làm tăng giá thực hiện gói thầu lên 20-30 % so với giá trúng thầu nếu không được kiểm

soát tốt, đặc biệt khi vật liệu phải vận chuyển từ xa 45-50 km. Hơn nữa, trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh xây dựng hệ thống đường cao tốc quốc gia với mục tiêu đạt 5.000 km vào năm 2030, việc áp dụng các phương pháp tối ưu hóa động (Dynamic CSLP - DCSLP) trở nên cấp thiết để đối phó với sự biến động theo giai đoạn thi công, từ nền đường đến mặt đường và cầu cống.

Việc lập kế hoạch CSLP hiện nay thường dựa vào kinh nghiệm của kỹ sư, dẫn đến các phương án thiếu tính khoa học và không tận dụng tối đa nguồn lực. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, một bố trí địa điểm không hợp lý có thể làm tăng chi phí xử lý vật liệu lên tới 30 %, ảnh hưởng đến tiến độ và an toàn lao động [4]. Trong các dự án đường cao tốc, vấn đề càng phức tạp hơn do chuỗi cung ứng vật liệu kéo dài: từ mỏ đá thô đến máy nghiền, rồi đến nhà máy bê tông hoặc nhựa đường, và cuối cùng đến các khu thi công phân tán. Ngoài ra, yếu tố động (dynamic) (thể hiện sự thay đổi theo thời gian của mục tiêu hoặc điều kiện thiết kế) đòi hỏi phải tái định vị các cơ sở tạm thời theo từng giai đoạn, ví dụ: giai đoạn đầu tập trung vào nền đường cần nhiều đất đá, trong khi giai đoạn sau ưu tiên bê tông và nhựa đường. Nếu không tối ưu, chi phí tái định vị và vận chuyển có thể làm đội chi phí tổng lên đáng kể, đồng thời ảnh hưởng đến môi trường như tăng phát thải khí nhà kính từ xe tải.

Lĩnh vực CSLP đã phát triển từ các mô hình tĩnh (static) sang động, và được xem là bài toán thuộc lớp vấn đề tính toán khó (Non-

*Liên hệ tác giả: truongviethung@tlu.edu.vn

Nhận ngày 27/08/2025, sửa xong ngày 16/10/2025, chấp nhận đăng ngày 17/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2025.1140>

deterministic Polynomial-time hard (NP-hard)), nơi không tồn tại thuật toán chính xác có thời gian chạy đa thức (polynomial time) cho các trường hợp lớn, đòi hỏi phải sử dụng các phương pháp xấp xỉ để tìm giải pháp gần tối ưu trong thời gian hợp lý. Các nghiên cứu gần đây như Prayogo và cs. [5] sử dụng lai tìm kiếm sinh vật cộng sinh (SOS) để tối ưu vị trí cơ sở tạm thời, tập trung vào giảm chi phí vận chuyển trong các dự án xây dựng chung. Sau đó, các mô hình động được mở rộng, ví dụ Tao và cs. [6] áp dụng tối ưu đa mục tiêu sử dụng mô hình BIM cho DCSLP, xem xét tái định vị theo giai đoạn và tích hợp yếu tố an toàn, môi trường. Hawarneh và cs. [7] đã tổng quan toàn diện về CSLP tĩnh và động, nhấn mạnh vai trò của tối ưu hóa trong việc giảm chi phí và tăng năng suất, đồng thời chỉ ra rằng các mô hình động cho phép di dời cơ sở theo nhu cầu dự án, phù hợp hơn với thực tế. Tương tự, Shahebrahimi và cs. [8] đánh giá tổng hợp các nghiên cứu ứng dụng tối ưu đa mục tiêu để giảm phát thải khí nhà kính trong dự án đường bộ, kết hợp chi phí thời gian và môi trường. Các nghiên cứu trên đại diện cho xu hướng ứng dụng các thuật toán metaheuristic trong giải quyết bài toán có tính phức tạp rất cao như CSLP.

Metaheuristic là các thuật toán tìm kiếm xấp xỉ lấy cảm hứng từ các quá trình tự nhiên, tiến hóa hoặc xã hội, được thiết kế để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa phức tạp mà các phương pháp toán học chính xác không thể xử lý hiệu quả do tính chất NP-hard hoặc không gian tìm kiếm lớn. Chúng đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu, từ kỹ thuật xây dựng, nơi chúng đặc biệt hiệu quả trong tối ưu hóa kết cấu giàn với đơn mục tiêu như giảm trọng lượng [9] hoặc đa mục tiêu để cân bằng trọng lượng và chuyển vị [10-14], khung (frame) với đơn mục tiêu tập trung vào chi phí vật liệu [15-16] và đa mục tiêu xem xét độ bền thông qua chuyển vị lệch tầng [17], và logistics để tối ưu hóa chuỗi cung ứng và lộ trình vận chuyển [18] đến y tế nhằm cải thiện phân bổ tài nguyên và chẩn đoán bệnh [19], kinh tế để giải quyết vấn đề phân bổ nguồn lực và quản lý rủi ro tài chính [20], và khoa học dữ liệu để tinh chỉnh mô hình học máy và khai thác dữ liệu lớn [21]. Liên quan đến các bài toán tối ưu động CSLP, các thuật toán như thuật toán tiến hóa (GA), tối ưu bầy đàn (PSO) và tiến hóa vi phân (DE) được sử dụng rộng rãi. Wang và cs. [22] đề xuất phương pháp lai đa phương thức của thuật toán tối ưu Bộ Hung cho vấn đề đa mục tiêu động, chứng minh hiệu quả trong việc theo dõi hàm mục tiêu thay đổi. Shao và cs. [23] cải tiến tối ưu hóa bầy đàn đa mục tiêu để xử lý môi trường động. Borges và cs. [24] phát triển khung tối ưu sử dụng BIM và GA cho CSLP rời rạc, giảm chi phí vận hành đáng kể. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu này tập trung vào dự án xây dựng chung hoặc nhà máy, ít ứng dụng cụ thể cho đường cao tốc với địa bàn dài và phân tán. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về CSLP còn hạn chế, chủ yếu dừng ở mức lập kế hoạch thủ công hoặc sử dụng phần mềm GIS đơn giản, chưa tích hợp tối ưu hóa động với thuật toán tiên tiến. Khoảng trống này bao gồm: thiếu mô hình tích hợp chuỗi cung ứng thực tế (từ mỏ đến thi công), chưa xem xét nhu cầu vật liệu biến động theo giai đoạn, và ít ứng dụng thuật toán tối ưu metaheuristic - một phương pháp mạnh mẽ trong tối ưu hóa liên tục và rời rạc, với khả năng hội tụ tốt trong không gian tìm kiếm lớn.

Nghiên cứu này đề xuất một mô hình DCSLP sử dụng thuật toán DE để tối ưu hóa bố trí địa điểm xây dựng động cho dự án đường cao tốc tại Việt Nam. Mô hình xem xét 19 cơ sở tạm thời (bao gồm mỏ đá, máy nghiền, nhà máy bê tông/nhựa đường, kho lưu trữ, văn phòng và khu thi công) trên 48 vị trí tiềm năng, chia thành bốn giai đoạn thi công. Hàm mục tiêu tối thiểu hóa chi phí tổng, bao gồm chi phí vận chuyển vật liệu (tính theo khoảng cách Euclidean và nhu cầu hàng ngày) và chi phí tái định vị (dựa trên loại cơ sở). Ràng buộc bao gồm vị trí cố định cho mỏ và khu thi công chính, cũng như vị trí hạn chế (restricted locations) do địa hình hoặc quy định môi trường. Mô hình được triển khai qua ngôn ngữ lập trình Python, cho phép người dùng dễ dàng nhập liệu (tọa độ vị trí, nhu cầu vật liệu theo giai đoạn, chi phí) và trực quan hóa kết quả qua biểu đồ. Một nghiên cứu tình huống trên dự án cao tốc giả định dài 50 km minh họa khả năng áp dụng.

2. Thiết lập bài toán CSLP động cho dự án giao thông

Việc lập bài toán CSLP trong các dự án giao thông, đặc biệt là đường cao tốc, cần xem xét tính đặc thù của loại hình công trình này. Đường cao tốc thường có địa bàn thi công dàn trải rộng lớn, địa hình đa dạng và tiến độ thi công thay đổi theo từng giai đoạn, từ san nền, xây dựng cầu cống đến trải nhựa đường. Điều này dẫn đến nhu cầu vật liệu và nhân công biến động mạnh, đòi hỏi bố trí cơ sở tạm thời phải linh hoạt, tối ưu hóa chuỗi cung ứng vật liệu và giảm thiểu chi phí vận chuyển cũng như tái định vị. Khác với CSLP tĩnh, nơi cơ sở được bố trí cố định suốt dự án, CSLP động (Dynamic CSLP - DCSLP) cho phép tái định vị cơ sở theo từng giai đoạn để thích ứng với nhu cầu thay đổi, giảm chi phí không cần thiết. Trong bài toán này, chúng tôi tập trung vào DCSLP cho các dự án đường cao tốc tại Việt Nam, với mô hình xem xét các cơ sở tạm thời được bố trí trên các vị trí tiềm năng dọc tuyến đường. Các cơ sở này được phân loại thành cố định (như mỏ khai thác, khu thi công chính) và di chuyển (như văn phòng, máy nghiền, nhà máy bê tông). Dự án được chia thành các giai đoạn chính, mỗi giai đoạn có nhu cầu vật liệu và số ngày thi công khác nhau.

2.1. Mô tả các yếu tố bài toán

Bài toán DCSLP cho đường cao tốc được xây dựng dựa trên các yếu tố chính sau:

- Cơ sở tạm thời (Facilities): Bao gồm các loại như mỏ khai thác (đá, đất), khu thi công (đường, cầu), văn phòng quản lý, khu nghỉ ngơi công nhân, máy nghiền đá, kho lưu trữ (nhựa đường, xi măng), và nhà máy chế biến (bê tông, nhựa đường). Các cơ sở cố định không thể di dời do ràng buộc địa lý hoặc pháp lý, trong khi các cơ sở di chuyển có thể tái định vị giữa các giai đoạn để gần hơn với nhu cầu thi công.

- Vị trí (Locations): Các vị trí tiềm năng dọc tuyến đường, mỗi vị trí có tọa độ trong hệ tọa độ 2D, với khoảng cách được tính theo Euclidean để mô phỏng đường vận chuyển thực tế. Một số vị trí bị hạn chế do địa hình khó khăn, quy định môi trường hoặc an toàn (ví dụ: gần sông hoặc khu dân cư).

➤ **Giai đoạn dự án (Phases):** Dự án được chia thành các giai đoạn, mỗi giai đoạn có nhu cầu vật liệu biểu diễn dưới dạng ma trận: lượng vật liệu vận chuyển từ cơ sở nguồn đến cơ sở đích. Ví dụ, giai đoạn đầu cần nhiều đất đá cho san nền, trong khi giai đoạn sau ưu tiên bê tông và nhựa đường cho mặt đường.

➤ **Chuỗi cung ứng vật liệu:** Mô hình tích hợp chuỗi cung ứng thực tế cho đường cao tốc, từ nguyên liệu thô (từ mỏ) đến chế biến (máy nghiền, nhà máy) và sử dụng tại khu thi công. Điều này đảm bảo dòng chảy vật liệu liên tục, giảm ùn tắc và lãng phí, phù hợp với các dự án tại Việt Nam nơi nguồn vật liệu thường xa tuyến.

➤ **Chi phí:** Bao gồm chi phí vận chuyển (dựa trên khoảng cách, lượng vật liệu và số ngày) và chi phí tái định vị (dựa trên loại cơ sở). Tổng chi phí được tính cho toàn dự án, nhằm tối thiểu hóa.

➤ **Ràng buộc:** Vị trí cố định cho một số cơ sở; không chồng chéo vị trí; vị trí hạn chế không được sử dụng; sở thích khoảng cách cho an toàn/môi trường.

2.2. Mô hình toán học

Mô hình DCSLP được xây dựng như một vấn đề tối ưu hóa đơn mục tiêu, sử dụng các ký hiệu sau:

➤ **Chỉ số:** $t=1, \dots, T$: giai đoạn dự án; $i, j=1, \dots, N$: cơ sở tạm thời; $k, l=1, \dots, M$: vị trí tiềm năng.

➤ **Biến quyết định:** $x_{i,k,l} = 1$ nếu cơ sở i tại vị trí k ở giai đoạn t , $= 0$ nếu không.

➤ **Tham số:** $d_{k,l}$: khoảng cách giữa vị trí k và l ; $n_{i,j,t}$: nhu cầu vật liệu từ i đến j ở giai đoạn t ; c_v : chi phí vận chuyển đơn vị; r_i : chi phí tái định vị cơ sở i ; $days_t$: số ngày giai đoạn t ; F : tập cơ sở cố định; **Restricted**: tập vị trí hạn chế.

2.2.1. Hàm mục tiêu: Tối thiểu hóa tổng chi phí Z

$$Z = \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(n_{i,j,t} \cdot days_t \cdot c_v \cdot \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M (d_{k,l} \cdot x_{i,k,t} \cdot x_{j,l,t}) \right) \right) + \left(\sum_{t=2}^T \sum_{i \in F} \left(r_i \cdot \sum_{k=1}^M \sum_{l \neq k}^M (x_{i,k,t-1} \cdot x_{i,l,t}) \right) \right) \quad (1)$$

Trong công thức (1), số hạng thứ nhất thể hiện chi phí vận chuyển theo giai đoạn; số hạng thứ hai thể hiện chi phí tái định vị (chỉ tính khi vị trí thay đổi).

2.2.2. Ràng buộc

– Mỗi cơ sở một vị trí duy nhất ở mỗi giai đoạn: Ràng buộc này đảm bảo rằng mỗi cơ sở tạm thời được gán chính xác một vị trí trong mỗi giai đoạn dự án, tránh tình trạng một cơ sở không được bố trí hoặc được bố trí ở nhiều vị trí cùng lúc, giúp duy trì tính toàn vẹn của bố trí tổng thể.

$$\sum_{k=1}^M x_{i,k,t} = 1, \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

– Mỗi vị trí chỉ một cơ sở (không chồng chéo): Ràng buộc này ngăn chặn việc nhiều cơ sở được gán vào cùng một vị trí trong cùng giai đoạn, đảm bảo sử dụng không gian hiệu quả và tránh xung đột vật

lý giữa các cơ sở, đặc biệt quan trọng trong địa bàn đường cao tốc hẹp và dài.

$$\sum_{i=1}^N x_{i,k,t} \leq 1, \forall k = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (3)$$

– Vị trí cố định: Ràng buộc này buộc các cơ sở cố định (như mỏ khai thác hoặc khu thi công chính) phải giữ nguyên vị trí xuyên suốt các giai đoạn, phản ánh các ràng buộc thực tế từ địa lý, pháp lý hoặc kinh tế, giúp mô hình phù hợp với điều kiện không thể di dời.

$$x_{i,k,t} = 1, \forall i \in F, k = fixed[i], t = 1, \dots, T \quad (4)$$

– Vị trí hạn chế: Ràng buộc này cấm sử dụng các vị trí bị hạn chế cho bất kỳ cơ sở nào, do các yếu tố như địa hình nguy hiểm, khu vực bảo vệ môi trường hoặc gần dân cư, nhằm tuân thủ quy định pháp lý và giảm rủi ro an toàn trong dự án đường cao tốc.

$$x_{i,k,t} = 0, \forall i = 1, \dots, N; k \in Restricted, t = 1, \dots, T \quad (5)$$

– Biến nhị phân: Ràng buộc này định nghĩa biến quyết định là nhị phân, đảm bảo tính logic của mô hình bằng cách chỉ cho phép giá trị 0 hoặc 1, phù hợp với bản chất rời rạc của việc gán vị trí.

$$x_{i,k,t} \in \{0,1\} \quad \forall i, k, t \quad (6)$$

2.3. Cách xử lý điều kiện ràng buộc

Trong mô hình DCSLP, các ràng buộc được xử lý như ràng buộc cứng (hard constraints), phải được tuân thủ nghiêm ngặt để đảm bảo tính khả thi của giải pháp; nếu vi phạm, giải pháp sẽ bị sửa chữa hoặc loại bỏ. Để xử lý, phương pháp khởi tạo và sửa chữa (initialization and repair mechanism) được áp dụng. Cụ thể, quần thể ban đầu được tạo bằng cách chọn vị trí ngẫu nhiên cho các cơ sở di chuyển từ tập vị trí khả dụng, tránh vị trí cố định, vị trí hạn chế, và đảm bảo không chồng chéo bằng cách gán vị trí duy nhất. Nếu trong quá trình đột biến hoặc lai chéo tạo ra giải pháp vi phạm (ví dụ: chồng chéo vị trí hoặc sử dụng vị trí hạn chế), tính năng tự động sửa chữa được áp dụng bằng cách phát hiện vị trí trùng lặp hoặc bị hạn chế, sau đó hoán đổi với vị trí trống hoặc vị trí hợp lệ khác trong tập vị trí khả dụng, đảm bảo tất cả giải pháp trong quần thể đều khả thi trước khi đánh giá hàm mục tiêu. Điều này giúp tránh lãng phí tài nguyên tính toán trên các giải pháp không khả thi, đặc biệt trong không gian tìm kiếm lớn của DCSLP động.

3. Xây dựng khung tối ưu sử dụng thuật toán DE cho bài toán CSLP động

Để giải quyết bài toán DCSLP động với tính chất NP-hard và không gian tìm kiếm lớn, nghiên cứu này áp dụng thuật toán DE, một thuật toán metaheuristic mạnh mẽ trong việc tìm kiếm giải pháp gần tối ưu cho các vấn đề tối ưu hóa phức tạp. DE được chọn nhờ khả năng hội tụ nhanh, ít tham số điều chỉnh và hiệu quả cao trong xử lý các hàm mục tiêu liên tục hoặc rời rạc, đặc biệt khi kết hợp với cơ chế sửa chữa ràng buộc. Trong phần này, chúng tôi trình bày khung tối ưu dựa trên DE, bao gồm giới thiệu thuật toán, cách mã hóa giải pháp, quy trình thực hiện và triển khai.

3.1. Giới thiệu về thuật toán DE

Thuật toán DE được đề xuất bởi Storn và Price năm 1997 [25], là một phương pháp tiến hóa dựa trên vector vi phân để tối ưu hóa toàn cục. DE hoạt động trên quần thể các cá thể (individuals), mỗi cá thể đại diện cho một giải pháp tiềm năng trong không gian tìm kiếm. Không giống như thuật toán di truyền (GA) sử dụng xác suất lai chéo và đột biến, DE tạo ra các cá thể mới thông qua phép toán vi phân giữa các vector ngẫu nhiên trong quần thể, giúp duy trì sự đa dạng và tránh hội tụ cục bộ. DE có các biến thể phổ biến như DE/rand/1/bin hoặc DE/best/1/bin, với các tham số chính: kích thước quần thể NP (thường 25-50), hệ số đột biến F (0.5-1.0), tỷ lệ lai chéo CR (0.8-1.0) và số thế hệ tối đa $MaxIter$.

DE đã được chứng minh hiệu quả trong các bài toán tối ưu hóa kỹ thuật xây dựng, như tối ưu hóa cấu trúc giàn [10-14] và khung thép [15-17], nơi nó vượt trội về tốc độ hội tụ và chất lượng giải pháp so với PSO hoặc GA. Trong DCSLP, DE được thích nghi để xử lý tính rời rạc bằng cách mã hóa giải pháp dưới dạng vector thực, sau đó ánh xạ sang vị trí rời rạc, kết hợp với cơ chế sửa chữa để đảm bảo ràng buộc.

3.2. Mã hóa giải pháp và xử lý ràng buộc

Trong khung DE cho DCSLP, mỗi cá thể trong quần thể được biểu diễn dưới dạng vector thực $X = [x_1, x_2, \dots, x_D]$, với $D = N \times T$ (N là số cơ sở, T là số giai đoạn). Mỗi x_i đại diện cho vị trí của cơ sở i ở giai đoạn t , với giá trị thực trong khoảng $[1, M]$ (M là số vị trí tiềm năng). Để chuyển sang giải pháp rời rạc, áp dụng ánh xạ: vị trí $k = \text{round}(x_i)$, đảm bảo k là số nguyên từ 1 đến M .

Quần thể ban đầu được khởi tạo ngẫu nhiên, nhưng áp dụng cơ chế sửa chữa (repair mechanism) để tuân thủ ràng buộc: (i) ưu tiên vị trí cố định cho cơ sở trong tập F ; (ii) tránh vị trí hạn chế trong tập $Restricted$; (iii) đảm bảo không chồng chéo bằng cách hoán đổi vị trí trùng lặp với vị trí trống khả dụng; (iv) kiểm tra điều kiện về khoảng cách an toàn (nếu có) (ví dụ: cơ sở nguy hiểm cách xa khu nghỉ ngơi ít nhất 500m). Nếu vi phạm xảy ra trong quá trình đột biến hoặc lai chéo, cơ chế sửa chữa tự động kích hoạt: phát hiện xung đột và điều chỉnh bằng cách chọn vị trí gần nhất hợp lệ từ tập vị trí khả dụng, dựa trên khoảng cách Euclidean.

3.3. Quy trình DE cho DCSLP

Khung DE được thực hiện theo các bước sau:

- Khởi tạo: Tạo quần thể ban đầu với NP cá thể, mỗi cá thể là vector thực ngẫu nhiên trong khoảng $[1, M]$. Áp dụng sửa chữa để đảm bảo khả thi. Đánh giá hàm mục tiêu Z cho mỗi cá thể theo công thức (1).
- Đột biến: Với mỗi cá thể mục tiêu X_i^G (thế hệ G), tạo vector đột biến V_i^G sử dụng chiến lược DE/rand/1:
 - $V_i^G = X_{r1}^G + F \times (X_{r2}^G - X_{r3}^G)$ (6)
 - trong đó $r1, r2, r3$ là chỉ số ngẫu nhiên khác i , F là hệ số đột biến. Giới hạn lại giá trị của V_i^G trong $[1, M]$.

- Lai chéo: Tạo vector thử nghiệm U_i^G bằng lai chéo nhị phân giữa X_i^G và V_i^G :
 - $\{u_{j,i}^G = v_{j,i}^G \text{ nếu } \text{rand} \leq CR \text{ hoặc } j = \text{randj} \mid u_{j,i}^G = x_{j,i}^G \text{ nếu không}\}$ (7)
 - Áp dụng sửa chữa nếu U_i^G vi phạm ràng buộc.
 - Chọn lọc: Đánh giá Z cho U_i^G . Nếu $Z(U_i^G) < Z(X_i^G)$, thay X_i^G bằng U_i^G ; ngược lại giữ nguyên X_i^G .
 - Lặp lại: Tiếp tục từ bước 2 đến $MaxIter$ hoặc hội tụ.

Trong nghiên cứu này, khung DE được triển khai bằng Python, sử dụng thư viện NumPy cho tính toán vector và Matplotlib cho trực quan hóa (biểu đồ vị trí cơ sở theo giai đoạn).

4. Trường hợp nghiên cứu

Để minh họa khả năng ứng dụng của mô hình DCSLP đề xuất, nghiên cứu này thực hiện một trường hợp nghiên cứu trên dự án đường cao tốc giả định dài 50 km tại Việt Nam. Dự án được chia thành tám khu vực thi công chính, bao gồm năm khu vực đường (mỗi khu vực dài khoảng 10 km) và ba cầu lớn, với địa bàn thi công trải rộng lớn, địa hình đa dạng (bao gồm các vị trí dốc tăng chi phí xây dựng 20%) và nguồn vật liệu phân bố xa tuyến (khoảng 10-20 km). Mục tiêu là tối ưu hóa bố trí 19 cơ sở tạm thời trên 44 vị trí tiềm năng có tọa độ như biến và thi công, đồng thời giảm thiểu chi phí tổng thể bao gồm xây dựng, di dời, vận chuyển vật liệu và di chuyển nhân sự. Chi phí xây dựng 19 cơ sở được cho trong Bảng 2. Trong ví dụ này, các điểm hạn chế bố trí cơ sở không được xem xét.

4.1. Mô tả dự án và dữ liệu đầu vào

Dự án được chia thành bốn giai đoạn thi công chính, mỗi giai đoạn kéo dài 180 ngày (tổng 720 ngày), phản ánh sự biến động nhu cầu vật liệu theo tiến độ: giai đoạn 1 tập trung vào san nền và đất đắp; giai đoạn 2 xây dựng lớp nền và cấp phối; giai đoạn 3 trải mặt đường và bê tông nhựa; giai đoạn 4 hoàn thiện và cầu cống. Các cơ sở tạm thời bao gồm:

- Mỏ khai thác: Mỏ đá 1, Mỏ đá 2, Mỏ đất 1, Mỏ đất 2 (cố định tại vị trí 3, 15, 17, 18 tương ứng).
- Khu thi công: Khu thi công đường 1-5 (cố định tại vị trí 1, 8, 10, 23, 24) và Khu thi công cầu 1-3 (cố định tại vị trí 20, 21, 22).
- Cơ sở di chuyển: Văn phòng, Khu nghỉ công nhân, Máy nghiền đá, Kho nhựa đường, Kho xi măng, Nhà máy bê tông, Nhà máy nhựa đường.

Đơn giá vận chuyển cơ bản là 5×10^{-7} triệu VND/m³ (hoặc người/m), điều chỉnh theo hệ số loại di chuyển (1-5, phản ánh độ nặng nhẹ) cho trong Bảng 3, trong khi đó tần suất người di chuyển giữa các khu vực cho trong Bảng 4. Nhu cầu vật liệu hàng ngày (m³/ngày) cho tám khu thi công được định nghĩa theo bốn loại: bê tông xi măng, bê tông nhựa, đá cấp phối và đất đắp. Nhu cầu thay đổi theo giai đoạn thi công cho trong Bảng 5. Nhà máy bê tông và Nhà máy nhựa đường không được đặt tại vị trí hạn chế (ký hiệu trong Bảng 1).

Thuật toán DE được thiết lập với kích thước quần thể NP=40, hệ số đột biến F=0,8, tỷ lệ lai chéo CR=0.9, số thế hệ tối đa MaxIter=500, và cơ chế sửa chữa ràng buộc để đảm bảo tính khả thi (không chồng chéo vị trí, tránh vị trí hạn chế).

Bảng 1. Tọa độ các vị trí.

Vị trí	X	Y	
1	5000	500	Khu thi công đường 1
2	10000	1388	
3	50000	-4000	Mô đá 1
4	20000	2000	
5	25000	4296	
6	30000	4664	
7	35000	3222	
8	15000	1250	Khu thi công đường 2
9	40000	4752	Khu vực dốc
10	25000	2500	Khu thi công đường 3
11	48000	5576	
12	30000	2466	Khu vực dốc
13	20000	3249	
14	10000	-869	
15	15000	-15000	Mô đá 2
16	35000	-18000	
17	5000	-10000	Mô đất 1
18	25000	-12000	Mô đất 2
19	45000	-20000	Khu vực dốc
20	12000	1200	Khu thi công cầu 1
21	20000	2000	Khu thi công cầu 2
22	38000	3800	Khu thi công cầu 3
23	35000	3750	Khu thi công đường 4
24	45000	4500	Khu thi công đường 5
25	3000	1045	
26	6000	2532	
27	9000	-345	
28	12000	974	
29	15000	1864	
30	18000	1649	
31	21000	1864	Khu vực dốc
32	24000	3028	
33	27000	2469	
34	30000	3466	
35	33000	4463	
36	36000	2834	
37	39000	1985	

Vị trí	X	Y	
38	42000	3665	
39	45000	3520	
40	48000	3628	
41	3000	3613	
42	6000	4177	
43	9000	3018	
44	12000	3145	
45	15000	4039	
46	18000	2998	
47	21000	2860	
48	24000	3135	
49	27000	4266	
50	30000	2860	
51	33000	3135	
52	36000	4266	
53	39000	2860	
54	42000	3135	
55	45000	4266	
56	48000	2860	

Bảng 2. Chi phí xây dựng các cơ sở.

Thứ tự	Cơ sở	Chi phí xây dựng (Triệu VNĐ)	Chi phí di dời (Triệu VNĐ)
1	Mô đá 1	90	0
2	Mô đá 2	80	20
3	Mô đất 1	70	15
4	Mô đất 2	70	15
5	Khu thi công đường 1	0	0
6	Khu thi công đường 2	0	0
7	Khu thi công đường 3	0	0
8	Khu thi công đường 4	0	0
9	Khu thi công đường 5	0	0
10	Khu thi công cầu 1	200	0
11	Khu thi công cầu 2	200	0
12	Khu thi công cầu 3	200	0
13	Văn phòng	300	50
14	Khu nghỉ công nhân	300	50
15	Máy nghiền đá	100	25
16	Kho nhựa đường	15	0
17	Kho xi măng	15	0
18	Nhà máy bê tông	150	25
19	Nhà máy nhựa đường	120	25

Bảng 3. Ma trận loại di chuyển giữa các khu vực.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	0	5	5	5	5	5	5	1	1	5	5	3	5	5	5
5	5	5	5	5	0	5	5	5	5	5	1	1	5	5	3	5	5	5
5	5	5	5	5	5	0	5	5	5	5	1	1	5	5	3	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	0	5	5	5	1	1	5	5	3	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	0	5	5	1	1	5	5	3	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	0	5	1	1	5	5	3	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0	1	1	5	5	3	5	5	5
5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	0	1	5	5	3	5	5	5
5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	0	1	1	1	1	1
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	0	3	3	3	3
5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	3	0	3	3	3
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	3	3	0	3	3
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	3	3	3	0	3
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	3	3	3	3	0

Bảng 4. Ma trận tần suất người di chuyển giữa các khu vực trong 1 ngày.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	50	0	10	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	50	0	10	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	50	0	10	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	50	0	10	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	50	0	10	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	50	0	10	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	50	0	10	0	0	0
0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	0	5	5	5	5	5	5
0	0	0	0	50	50	50	50	50	50	50	50	5	0	20	10	0	20	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	20	0	0	5	5	5
0	0	0	0	10	10	10	10	10	0	0	0	5	10	0	0	0	0	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	0	0	5	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	20	5	0	5	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	20	5	5	0	0	0

5. Kết luận

Bài báo đề xuất một mô hình tối ưu hóa bố trí địa điểm xây dựng động (DCSLP) dành riêng cho các dự án đường cao tốc tại Việt Nam, sử dụng thuật toán tiến hóa vi phân (DE) để giải quyết bài toán phức tạp NP-hard. Mô hình tích hợp chuỗi cung ứng vật liệu thực tế, xem xét sự biến động nhu cầu theo từng giai đoạn thi công, và tối thiểu hóa tổng chi phí vận chuyển cùng tái định vị các cơ sở tạm thời. Thông qua nghiên cứu tình huống trên dự án giá định dài 50 km với 19 cơ sở và bốn giai đoạn, kết quả cho thấy cách tiếp cận động (C2) mang lại hiệu quả tài chính vượt trội hơn so với cách tiếp cận tĩnh (C1), với chi phí tổng thể giảm từ 304.465 tỷ VND xuống 299.028 tỷ VND, đồng thời đảm bảo tính linh hoạt thích ứng với địa bàn dân cư và địa hình phức tạp đặc trưng của Việt Nam.

Đóng góp chính của nghiên cứu nằm ở việc lấp đầy khoảng trống trong lĩnh vực CSLP tại Việt Nam, nơi các phương pháp thủ công truyền thống thường thiếu tính khoa học, dẫn đến lãng phí nguồn lực. Mô hình không chỉ giảm chi phí lên đến 5-10 % mà còn hỗ trợ ra quyết định nhanh chóng thông qua triển khai trên chương trình tối ưu, với khả năng trực quan hóa và tùy chỉnh dữ liệu đầu vào. Điều này có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong hệ thống đường cao tốc quốc gia, góp phần đạt mục tiêu 5.000 km vào năm 2030, đồng thời giảm tác động môi trường từ vận chuyển và tái định vị.

Tuy nhiên, nghiên cứu còn một số hạn chế, chẳng hạn như giả định khoảng cách Euclidean thay vì đường thực tế, và chưa tích hợp đầy đủ các yếu tố ngẫu nhiên như thời tiết hoặc gián đoạn chuỗi cung ứng. Hướng nghiên cứu tương lai có thể mở rộng mô hình sang tối ưu hóa đa mục tiêu (bao gồm an toàn lao động và giảm phát thải khí nhà kính), kết hợp với công nghệ BIM hoặc GIS để mô phỏng 3D, cũng như áp dụng các thuật toán lai tiên tiến hơn để cải thiện tốc độ hội tụ trong các dự án quy mô lớn. Việc kiểm chứng thực tế trên các dự án cao tốc Bắc-Nam sẽ là bước tiếp theo để khẳng định tính khả thi và hiệu quả của mô hình đề xuất.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Salah, M., Khallaf, R., Elbeltagi, E., Wefki, H. (2023). Construction Site Layout Planning: A Social Network Analysis. *Buildings*, 13(10), 2637.
- [2]. Borges, M. L. A. E., Granja, A. D., Monteiro, A. (2024). A Hybrid Framework for Multi-Objective Construction Site Layout Optimization. *Buildings*, 14(12), 3790.
- [3]. Cheng, J.C.P., Kumar, S.S. (2014). A BIM Based Construction Site Layout Planning Framework Considering Actual Travel Paths. The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014), Sydney, Australia, 450-457.
- [4]. Savsar, M., Aldehaim, A. (2020). Analysis and Improvement of Facility Layout in a Furniture Factory: A Case Application. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dubai, UAE, March 10-12, 2020*, 436-447.
- [5]. Prayogo, D., Cheng, M.-Y., Wu, Y.-W., Redi, A. A. N. P., Yu, V. F., Persada, S. F., Nadlifatin, R. (2020). A Novel Hybrid Metaheuristic Algorithm for Optimization of Construction Management Site Layout Planning. *Algorithms*, 13(5), 117.
- [6]. Tao, G., Feng, H., Feng, J. et al. (2022) Dynamic Multi-objective Construction Site Layout Planning Based on BIM. *KSCE J Civ Eng* 26, 1522–1534.
- [7]. Hawarneh, A.A., Bendak, S., Ghanim, F. (2021). Construction site layout planning problem: Past, present and future. *Expert Systems with Applications*, 168, 114247.
- [8]. Shahebrahimi, S. S. , Lorak, A. , Sedaghat Shayegan, D. and Amir Kardoust, A. A. (2025). Optimization of construction site layout planning with combination of metaheuristic algorithms. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications* (published online).
- [9]. Pham, H.A., Nguyen, D.X., Truong, V.H. (2021). An efficient differential-evolution-based moving compensation optimization approach for controlling differential column shortening in tall buildings. *Expert Systems with Applications* 169, 114531.
- [10]. Truong, V. H., Tangaramvong, S., Pham, H. A., Nguyen, M.C., Su, R. (2025). An efficient archive-based parameter-free multi-objective Rao-DE algorithm for bi-objective optimization of truss structures. *Computers & Structures* 308, 107647.
- [11]. Nguyen, M.C., Pham, H. A., Truong, V. H. (2025). An efficient multi-objective algorithm based on Rao and differential evolution for solving bi-objective truss optimization. *Engineering Optimization*, 1-31 (Online).
- [12]. Truong, V. H., Cao, T. S., Tangaramvong, S. (2024) A robust machine learning-based framework for handling time-consuming constraints for bi-objective optimization of nonlinear steel structures. *Structures* 2024, 62, 106226.
- [13]. Cao, T. S., Pham, H. A., Truong, V. H. (2024). An efficient algorithm for multi-objective structural optimization problems using an improved pbest-based differential evolution algorithm. *Advances in Engineering Software* 197, 103752.
- [14]. Truong, V. H., Pham, H. A., Tangaramvong, S. (2025). An efficient method for nonlinear inelastic truss optimization based on improved k-nearest neighbor comparison and Rao algorithm. *Structures* 71, 108158.
- [15]. Truong, V. H., Ha, M.H., Pham, H.A., Tran, D.H. (2020). Optimization of steel moment frames with panel-zone design using an adaptive differential evolution. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE)-HUCE* 14(2), 65-75.
- [16]. Vu, Q.A., Cao, T.S., Nguyen, H.H., Truong, V.H., Ha, M.H. (2023). An efficient differential evolution-based method for optimization of steel frame structures using direct analysis. *Structures* 51, 67-78.
- [17]. Nguyen, M.C., Le, M.T., Vu, Q.A., Nguyen, N.T., Truong, V.H. (2025). Multi-objective optimization for nonlinear steel frames using a parameter-less MOO algorithm and XGBoost. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE)-HUCE*, 19(2), 48-61.
- [18]. Detwal, P.K., Agrawal, R., Samadhiya, A., Kumar, A. (2023). Metaheuristics in circular supply chain intelligent systems: A review of applications journey and forging a path to the future. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 126 (Part D), 107102.
- [19]. Rahul, K., Banyal, R.K. (2022). Metaheuristics approach to improve data analysis process for the healthcare sector. *Procedia Computer Science* 215, 98-103.
- [20]. Doering, J., Kizys, R., Juan, A.A., Fito, A., Polat, O. (2019). Metaheuristics for rich portfolio optimisation and risk management: Current state and future trends. *Operations Research Perspectives* 6, 100121.
- [21]. Tomar, V., Bansal, M., Singh, P. (2023). Metaheuristic Algorithms for Optimization: A Brief Review. *Engineering Proceedings*, 59(1), 238.

- [22]. Wang, J., Huang, Z., Song, Y. (2025) Intelligent planning of safe and economical construction sites: Theory and practice of hybrid multi objective decision making. *Front. Eng. Manag.* 12, 487–509.
- [23]. Shao, J., Lu, Y., Sun, Y. et al. (2025) An improved multi-objective particle swarm optimization algorithm for the design of foundation pit of rail transit upper cover project. *Scientific Reports* 15, 10403.
- [24]. Borges, M. L. A. E., Granja, A. D., Monteiro, A. (2024). A Hybrid Framework for Multi-Objective Construction Site Layout Optimization. *Buildings*, 14(12), 3790.
- [25]. Storn, R., Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359.