

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN TIẾN HÓA VI PHÂN ĐA MỤC TIÊU TRONG TỐI ƯU TIẾN ĐỘ VÀ CHI PHÍ CHO DỰ ÁN

RESEARCHING ON APPLICATION OF MULTIPLE OBJECTIVE DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM TO SOLVE TIME-COST TRADE OFF PROBLEMS IN CONSTRUCTION PROJECTS

Trần Đức Học, Nguyễn Quang Trung, Phạm Anh Đức, Mai Anh Đức

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

tdhoc@dut.udn.vn; nqtrung@dut.udn.vn; paduc@dut.udn.vn; maduc@dut.udn.vn

Tóm tắt - Bên cạnh tiêu chí chất lượng, thời gian và chi phí là hai yếu tố tiên quyết trong việc xác định sự thành công của một dự án xây dựng. Tuy nhiên, hầu hết các dự án xây dựng gắn liền với nguồn vốn đầu tư hay chi phí bị giới hạn. Thực tế cho thấy rằng, rút ngắn thời gian thực hiện dự án với chi phí xác định ban đầu sẽ mang lại hiệu quả cao. Vì vậy, tối ưu hóa tiến độ và chi phí đóng vai trò vô cùng quan trọng đối với thành công của một dự án xây dựng. Bài báo này đề xuất mô hình tối ưu hóa dựa trên thuật toán tiến hóa vi phân để giải quyết bài toán tối ưu thời gian và chi phí. Mô hình đề xuất được kiểm chứng thông qua một dự án nhà dân dụng. Kết quả tính toán là các giải pháp tối ưu giúp các nhà quản lý có các giải pháp phù hợp. Bên cạnh đó, kết quả tính toán thể hiện được hiệu quả của thuật toán di truyền khi so sánh với các giải pháp khác NSGA-II và MOPSO.

Từ khóa - quản lý xây dựng; tiến độ; thời gian; chi phí; vi phân tiến hóa.

1. Đặt vấn đề

Thời gian và chi phí gắn bó chặt chẽ và tương hỗ với nhau trong các dự án xây dựng. Thông thường, rút ngắn thời gian thi công đi liền với việc tăng chi phí thực hiện của dự án. Do đó, khả năng tối ưu đồng thời hai yếu tố thời gian và chi phí sẽ quyết định sự thành công của các công ty xây dựng trong sự cạnh tranh khốc liệt với các đối thủ. Vì vậy, tối ưu việc cân bằng hai yếu tố này là vấn đề cực kỳ quan trọng đối với các nhà quản lý xây dựng. Trong thời gian qua, nhiều phương pháp đã được đề xuất để tối ưu bài toán thời gian và chi phí bằng cách chọn các tổ hợp các phương án thi công tối ưu cho các công việc. Các phương pháp này bao gồm: Phương pháp tìm kiếm (Heuristic-based approaches) [1]; Phương pháp quy hoạch toán học sử dụng các chương trình như quy hoạch tuyến tính (linear programming) [2]. Nhiều năm qua, các nhà khoa học trong nước và quốc tế đã sử dụng các thuật toán dựa trên nền tảng tiến hóa (evolutionary-based optimization algorithm). Trong đó, Luan and Nhan [3] nghiên cứu ứng dụng thuật toán thuật toán đàn kiến – Ant Colony Algorithm nhằm tối ưu thời gian và chi phí cho dự án xây dựng. Trang [4] xây dựng phần mềm WinQSB tối ưu thời gian và chi phí của phẩm ngâm dự án Nhà điều hành Điện lực Đà Nẵng. Feng và các đồng nghiệp [5], Li và các cộng sự [6] đề xuất ứng dụng thuật toán di truyền và phương pháp miền tối ưu để giải quyết bài toán thời gian chi phí. Yang [7] phát triển thuật toán bầy đàn tối ưu đa mục tiêu. Ng and Zhang [8], Afsh và các cộng sự [9] đưa ra thuật toán đa mục tiêu dựa vào thuật toán đàn kiến để tối ưu bài toán thời gian chi phí.

Thuật toán tiến hóa vi phân – Differential Evolution

Abstract - Along with quality criteria, time and cost are two crucial factors playing an important role in the success of a construction project. However, a number of current construction projects are related with the limitation of the budget or financial source. In construction industry, reducing the implementation time of the project without increasing the budget will be considerably beneficial for the owners. Therefore, trade-off optimization between time and cost is essential for the improvement of benefit of construction projects. This study presents a novel optimization model named Multiple Objective Differential Evolution (MODE) algorithm to deal with the time-cost trade-off problems. A numerical case study of an apartment project is used to illustrate the application of MODE. The research result shows that non-dominated solutions generated by MODE assist project managers in choosing appropriate plans. In addition, the sufficiency of the proposed optimization algorithm, MODE, is verified by comparing the solutions of this model with those of other commonly-used optimization algorithm including Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), Multiple Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO).

Key words - construction management; scheduling; time; cost; differential evolution.

(THVP) là thuật toán tiến hóa rất hữu hiệu cho việc giải các bài toán tối ưu toàn cục. THVP đã được chứng minh là hiệu quả và hội tụ nhanh trong việc giải bài toán đơn mục tiêu [10]. Những điểm mạnh của thuật toán THVP đã được nhiều nhà nghiên cứu áp dụng để giải bài toán đa mục tiêu, với nhiều công bố minh chứng sự vượt trội của thuật toán THVP [11]. Đó là động lực để các tác giả phát triển thuật toán tối ưu đa mục tiêu trong nghiên cứu này và áp dụng giải bài toán tối ưu thời gian và chi phí.

2. Bài toán cân bằng yếu tố thời gian và chi phí

Một dự án được thể hiện ở sơ đồ mạng $G = (A)$, trong đó các công việc được thể hiện ở trên các nút của sơ đồ mạng. Các công việc được đánh số từ 1 đến N . P là tập hợp tất cả các công việc trong dự án. Mỗi công việc $i \in A$ có nhiều phương án thi công. Mỗi phương án thi công đều có thời gian thi công là T_i và chi phí C_i . Vấn đề đặt ra cho bài toán cân bằng thời gian và chi phí của dự án là lựa chọn các phương án thi công để đưa ra một tổ hợp phương án thi công của các công việc đơn lẻ, nhằm rút ngắn thời gian và chi phí cho toàn dự án hiệu quả nhất. Yếu tố thời gian và chi phí được tính toán như sau:

a. Tính thời gian hoàn thành

Mục tiêu đầu tiên là rút ngắn thời gian dự án được thể hiện theo công thức (1):

$$T = \sum_{n=1}^l T_n = \text{Max}_{v_n} (ES_n + d_n) \quad (1)$$

$$ES_n = \text{Maximum}_{\text{all predecessors } m \text{ of } n} (ES_m + d_m)$$

Trong đó, T_n là thời gian thực hiện của các công việc $n \{n = 1, 2, \dots, l\}$ trên đường Găng; l là tổng số các công việc trên đường Grantt; ES_n là thời gian khởi sớm của công việc n ; d_n là thời gian thực hiện của công việc n . Một cách tổng quát, tổng thời gian của dự án được tính dựa trên mối quan hệ công việc và thời gian của các công việc. Thông tin dự án xác định mối quan hệ công việc và sự lựa chọn phương án thi công xác định thời gian thực hiện của công việc.

b. Tính toán chi phí của dự án

Tổng chi phí của một dự án bao gồm chi phí trực tiếp, chi phí gián tiếp và chi phí do sự chậm trễ. Chi phí gián tiếp tính theo thời gian hoàn thành dự án. Theo yêu cầu của hợp đồng, các nhà thầu sẽ chịu một phần chi phí do chậm trễ thời gian hoàn thành.

Mục tiêu thứ hai là giảm thiểu chi phí công trình:

$$C = \sum_{i=1}^N (DC_i^{S_i} + IC_i^{S_i} + TC_i^{S_i}) \quad (2)$$

Trong đó, DC_i, IC_i, TC_i lần lượt là chi phí trực tiếp, chi phí gián tiếp và chi phí chậm trễ của từng công việc, N là tổng số công việc trong dự án.

3. Thuật toán tiến hóa vi phân đa mục tiêu cho bài toán thời gian và chi phí (THVPĐMT-TC)

Trong mục này, thuật toán tiến hóa vi phân đa mục tiêu (THVPĐMT) được trình bày một cách chi tiết. THVPĐMT là thuật toán tối ưu cốt lõi trong mô hình tối ưu thời gian và chi phí. THVPĐMT được phát triển dựa trên thuật toán vi phân mà được đề xuất bởi Storn and Price [11]. Mô hình tối ưu hóa thời gian và chi phí được trình bày ở Hình 1.

3.1. Khai báo thông số và khởi tạo quần thể

Nghiên cứu này cần nhắc hai yếu tố thời gian và chi phí trong một dự án được tối ưu đồng thời. Do đó, thông số đầu vào của mô hình cần thiết đó là thông tin dự án, bao gồm mối quan hệ các công việc, thời gian thi công một công việc, chi phí thực hiện từng công việc và các phương án thi công cho mỗi công việc. Hơn nữa, chúng ta cần cung cấp các thông số của thuật toán tối ưu như số quần thể NP , biến thiết kế D , số lượng hàm mục tiêu M , biên độ đột biến F , xác suất lai ghép C_r , số thế hệ tối đa G_{max} , giá trị nhỏ nhất LB và giá trị lớn nhất UB của các biến. Với các thông số đầu vào như trên, thuật toán tối ưu sẽ tiến hành tính toán tự động để tìm ra các tổ hợp phương án thi công của các công việc trong dự án nhằm tối ưu hai yếu tố tiến độ và chi phí.

Khởi tạo quần thể ban đầu là công việc quan trọng đối với bất kỳ thuật toán tiến hóa nào. Quần thể trong thuật toán THVPĐMT được khởi tạo một cách ngẫu nhiên theo công thức (3):

$$X_{i,j} = LB_j + rand[0,1] \times (UB_j - LB_j); \quad (3)$$

$(j = 1, \dots, D; i = 1, \dots, NP)$

Trong đó LB_j và UB_j là giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của biến thứ j^{th} ; $rand[0,1]$ là hàm phân bố chuẩn trong khoảng 0 và 1; $X_{i,j}$ phần tử thứ i^{th} và j^{th} trong quần thể ban đầu.

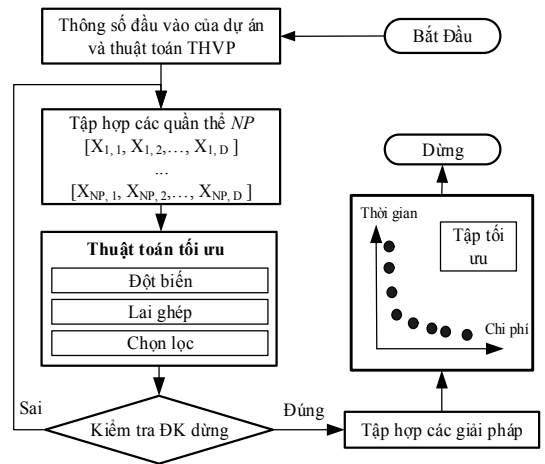
Một giải pháp tiềm năng của bài toán thời gian - chi phí được trình bày theo một vector biểu diễn trong (4):

$$X = [X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,j}, \dots, X_{i,D}] \quad (4)$$

Trong đó D là số biến thiết kế của bài toán đang tối ưu, số biến này trùng với số lượng công việc trong một dự án. Tham số i ký hiệu là thành phần thứ i trong quần thể. Véc tơ X_{ij} cho biết sự lựa chọn một phương án thi công của công việc j . X_{ij} là một số nguyên trong khoảng $[1, M_j]$ ($j=1$ đến D), cho biết một phương án thi công trong tổng số phương án M_j . Vì thuật toán THVP hoạt động với số thực, cần một hàm để chuyển đổi từ biến thực sang biến nguyên trong miền khả thi như phương trình (5).

$$X_{i,j} = Ceil(rand[0,1] \times UB(j)) \quad (5)$$

$Ceil$ là hàm để làm tròn số thực về số nguyên lớn hơn hoặc bằng chính nó.



Hình 1. Mô hình tối ưu thời gian và chi phí bằng THVPĐMT

3.2. Đột biến

Sau khi khởi tạo quần thể ban đầu, tại mỗi vòng lặp thuật toán THVP áp dụng quá trình đột biến để khai phá không gian tìm kiếm, làm rộng vùng tìm kiếm. Mỗi véc tơ X_i^G ở thế hệ hiện tại tại G được gọi là một “véc tơ mẹ”. Đối với mỗi “véc tơ mẹ”, một “véc tơ đột biến” được xác định theo công thức (6):

$$V_i^{G+1} = X_{r_1}^G + F(X_{r_2}^G - X_{r_3}^G) \quad (6)$$

Trong đó, $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ là ba số nguyên được tạo ngẫu nhiên khác nhau và khác i nằm trong khoảng $[1; NP]$; F là biên độ đột biến được lựa chọn trong khoảng $F \in [0, 1]$.

3.3. Lai ghép

Tiếp theo quá trình đột biến, quá trình lai ghép được áp dụng nhằm làm đa dạng quần thể bằng cách trao đổi các thành phần của “véc tơ mẹ” và “véc tơ đột biến”. Quá trình lai ghép sinh ra “véc tơ con” $U_i^{G+1} = \{u_{i,1}^G, u_{i,2}^{G+1}, \dots, u_{i,D}^{G+1}\}$, trong đó các thành phần véc tơ con được xác định theo công thức (7):

$$u_{i,j}^{G+1} = \begin{cases} v_{i,j}^{G+1} & \text{if } (rand_j[0,1] \leq CR \text{ or } j = j_{rand}) \\ x_{i,j}^G & \text{khác} \end{cases} \quad (7)$$

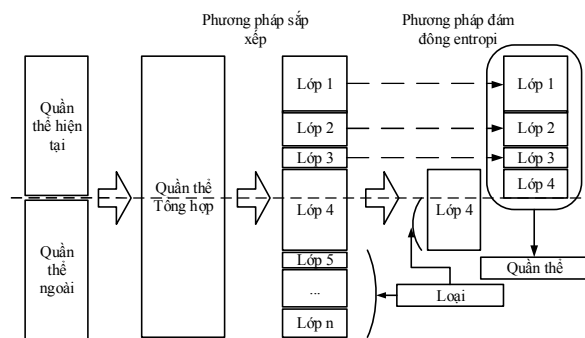
$CR \in [0, 1]$ là xác suất lai ghép; j_{rand} là số nguyên dương trong khoảng $[1; D]$.

3.4. Chọn lọc

Thay thế quá trình chọn lọc là một trong những việc quan trọng nhất trong thuật toán đa mục tiêu, bởi vì chọn lọc cẩn thận sẽ cho ra những thế hệ tốt. Nghiên cứu này sử

dụng quá trình chọn lọc đề xuất bởi Ali và các cộng sự [22]. Trong quá trình này, đầu tiên đánh giá cá thể “véc tơ con” U_i^{G+1} , sau đó so sánh với cá thể “véc tơ mẹ” X_i^G . Nếu cá thể “véc tơ con” vượt trội cá thể “véc tơ mẹ”, nó sẽ thay thế lập tức cá thể “véc tơ mẹ” trong quần thể hiện tại, và cá thể “véc tơ mẹ” sẽ đưa vào quần thể ngoài. Ngược lại cá thể “véc tơ con” sẽ được đưa vào quần thể ngoài. Hai quần thể hiện tại và quần thể ngoài được gộp với nhau sau mỗi vòng lặp. Tổng số cá thể trong quần thể tổng là 2NP.

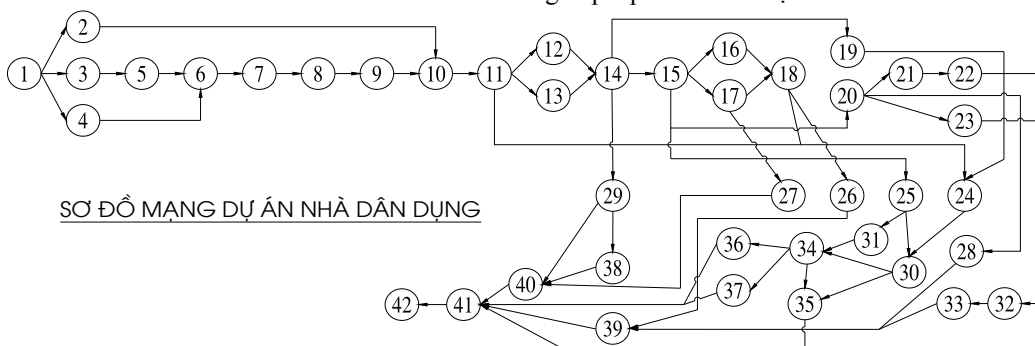
Trong suốt quá trình tối ưu hóa, số lượng cá thể trong quần thể là không đổi - là NP. Do đó, NP cá thể sẽ được chọn lọc từ tổ hợp cá thể. Đối với thuật toán tối ưu đơn mục tiêu, giải pháp tối ưu là giải pháp cho hàm mục tiêu đạt giá trị tốt nhất. Tuy nhiên, trong thuật toán đa mục tiêu phương pháp hai giải pháp không vượt trội (a two-solutions dominance approach) được sử dụng [13]. Vì vậy, nghiên cứu này sử dụng phương pháp sắp xếp giải pháp không vượt trội [14] và phương pháp đám đông entropi. Hình 2 mô tả quá trình chọn lọc.



Hình 2. Quá trình chọn lọc

3.5. Điều kiện dừng

Quá trình tối ưu hóa kết thúc khi mà điều kiện dừng được thỏa mãn. Điều kiện dừng thường được sử dụng là số vòng lặp tối đa hoặc là số lần đánh giá hàm mục tiêu. Trong mô hình đề xuất, chúng tôi sử dụng số vòng lặp tối đa. Khi điều kiện dừng của thuật toán thỏa mãn thì các giải pháp tối ưu sẽ được đưa ra.



Hình 3. Sơ đồ mạng của dự án

Bảng 1. Thông số của dự án

TT	Tên công việc	Bình thường		Khẩn trương	
		T	C	T	C
1	Công tác chuẩn bị	2	10	1	15
2	Lắp đặt ván khuôn	3	50	2	70
3	Kéo hệ thống nước	3	2	2	3
4	Kéo điện	2	5	1	7
5	Hệ thống cống rãnh	3	20	2	25
6	San mặt bằng	1	40	1	40
7	Lớp chống thấm	1	50	1	50
8	Công tác cốt thép	3	150	2	190
9	Đổ bê tông	2	50	1	75
10	Tháo ván khuôn	1	10	1	10
11	Khung tầng 1	5	500	3	580
12	Hệ thống nước tầng 1	3	55	2	65
13	Dầm tầng 2	2	120	1	135
14	Sàn tầng 2	1	80	1	80
15	Khung tầng 2	5	500	3	580
16	Hệ thống nước tầng 2	3	30	2	35
17	Đổ bê tông liên kết tầng 2	3	40	2	50
18	Điện tầng 1	3	55	2	65
19	Hệ thống thông gió tầng 1	3	30	2	40
20	Hệ kết cấu mái	3	300	2	330
21	Tường thu hồi	2	40	2	40
22	Trần treo mái	3	60	2	70
23	Hệ thống cứu hỏa	2	130	1	150
24	Lắp tấm che bao tầng 1	2	70	1	90
25	Lắp tấm che bao tầng 2	3	70	2	85
26	Điện tầng 2	3	55	2	68

27	Hệ thống thông gió tầng 2	3	30	2	37
28	Hệ thống TV và điện thoại	2	70	1	84
29	Xây cầu thang	3	30	2	41
30	Khung cửa	4	50	3	59
31	Lắp cửa sổ	5	10	4	14
32	Lợp tấm che mái	4	70	2	100
33	Nội thất	4	400	3	435
34	Hoàn thiện ngoài nhà	2	100	1	121
35	Lắp cửa ngoài	2	70	1	80
36	Trần treo hành lang	2	20	1	22
37	Lan can	3	30	2	39
38	Vịn cầu thang	3	20	2	25
39	Hệ thống cách nhiệt	3	60	2	70
40	Tường phân cách	8	50	5	70
41	Trải thảm và cách âm	4	80	2	100
42	Kiểm tra và bàn giao	2	15	1	20

Ghi chú: T: Thời gian (Ngày); C: Chi phí (Triệu đồng)

4. Trường hợp nghiên cứu

Mô hình tối ưu hóa đa mục tiêu ở trên được áp dụng để tối ưu tiến độ và chi phí của một dự án nhà dân dụng thực tế. Kết quả tính toán tối ưu sẽ được so sánh với thuật toán di truyền và thuật toán bầy đàn đa mục tiêu. Dự án này gồm 42 công việc, mỗi công việc sẽ có hai sự lựa chọn trong phương án thi công là theo chế độ bình thường hoặc chế độ khẩn trương. Sơ đồ mạng của dự án được thể hiện ở Hình 3. Phương án thi công, cùng với các giá trị về thời gian thi công và chi phí của các công tác được thể

$\bar{d} = \frac{1}{\Omega} \sum_{X \in \Omega} d(X, \Omega)$ giá trị trung bình của tất cả các giá trị $d(X, \Omega)$. Giá trị SP càng nhỏ chứng tỏ sự phân bố trong tập giải pháp là đều. Bảng 4 trình bày giá trị so sánh về chỉ số Spread đối với các thuật toán. Thuật toán THVPĐMT đạt kết quả tốt nhất.

Bảng 4. So sánh theo chỉ số Spread của các thuật toán

Chỉ số	A1	A2	A3
Tốt nhất	0.481	0.604	0.642
Yếu nhất	0.848	1.077	1.931
Trung bình	0.672	0.803	1.470
Lệch chuẩn	0.131	0.153	0.574

3. Hyper-volume (HV): Chỉ số này tính thể tích của hình bao bởi các giải pháp không vượt trong tập. Về mặt toán học, mỗi giải pháp $X_i \in \Omega$ là một hình lập phương v_i được xây dựng dựa vào véc to tham thảo W và X_i là ở một đỉnh của hình lập phương. Công thức toán học sau dùng để tính HV:

$$HV = \bigcup_{i=1}^{|\Omega|} v_i \quad (10)$$

Bảng 5. So sánh theo chỉ số HV của các thuật toán

Chỉ số	A1	A2	A3
Tốt nhất	1.000	0.714	0.364
Yếu nhất	0.449	0.303	0.149
Trung bình	0.810	0.551	0.214
Lệch chuẩn	0.113	0.047	0.120

Sau khi tiêu chuẩn hóa, các giá trị HV sẽ thuộc khoảng [0,1]. Bảng 5 trình bày giá trị so sánh về chỉ số Hyper-volume đối với các thuật toán. Thuật toán THVPĐMT đạt kết quả tốt nhất.

5. Kết luận

Tối ưu hóa thời gian và chi phí là một vấn đề rất quan trọng trong xây dựng, giữa thời gian hoàn thành xây dựng công trình và chi phí toàn bộ có mối quan hệ chặt chẽ. Hoàn thành dự án đúng thời hạn với chi phí thấp nhất sẽ mang lại những kết quả to lớn về kinh tế và chính trị. Nghiên cứu này đề xuất thuật toán vi phân tiến hóa đa mục tiêu để giải quyết bài toán thời gian và chi phí trong các dự án xây dựng. Dựa vào kết quả nghiên cứu và thực nghiệm, các tác giả đưa ra các kết luận sau:

- Mô hình tính toán dựa trên thuật toán THVPĐMT là một công cụ hiệu quả để giải quyết bài toán thời gian và chi phí trong các dự án xây dựng.
- Thuật toán THVPĐMT tạo ra các giải pháp không vượt trội tốt hơn so với các lời giải của các thuật toán được sử dụng để so sánh. Tập tối ưu tạo ra bởi thuật toán đề xuất cung cấp những thông tin hữu ích, giúp cho các

nhà quản lý dự án đưa ra các quyết định nhằm tối ưu hóa thời gian và chi phí của dự án xây dựng.

- Thuật toán đề xuất hội tụ nhanh, phân bố đều và đa dạng các giải pháp không vượt trội khi so sánh với các thuật toán SXKVTDT-II và BĐĐMT.

Thuật toán đề xuất là đơn giản, dễ sử dụng và không giới hạn về số lượng biến và số lượng hàm mục tiêu. Do vậy, trong các nghiên cứu tiếp theo chúng ta có thể áp dụng thuật toán này để giải quyết các bài toán tối ưu trong lĩnh vực xây dựng như bài toán điều hòa nguồn nhân lực, bài toán rút ngắn thời gian hoàn thành công trình có cân nhắc nguồn lực bị giới hạn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Siemens, "A simple CPM time-cost tradeoff algorithm", *Management Science* 17(6): 354-363., 1971.
- [2] S. A. Burns, L. Liu, and C.-W. Feng, "The LP/IP hybrid method for construction time-cost trade-off analysis", *Construction Management and Economics*, vol. 14, pp. 265-276, 1996/05/01 1996.
- [3] P. H. Luan and D. T. Nhan, "Nghiên cứu ứng dụng thuật toán ACO (Ant colony optimization) tối ưu thời gian và chi phí cho dự án xây dựng", *Tạp chí Phát triển KH&CN*, vol. 13, 2010.
- [4] P. T. Trang, "Xây dựng chương trình tối ưu hoá theo chỉ tiêu thời gian và chi phí trên sơ đồ mạng", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, vol. 30, 2009.
- [5] Feng, L. Liu, and Burns, "Using Genetic Algorithms to Solve Construction Time-Cost Trade-Off Problems", *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 11, pp. 184-189, 1997.
- [6] H. Li, J. Cao, and P. Love, "Using Machine Learning and GA to Solve Time-Cost Trade-Off Problems", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 125, pp. 347-353, 1999.
- [7] I. Yang, "Using Elitist Particle Swarm Optimization to Facilitate Bicriterion Time-Cost Trade-Off Analysis", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 133, pp. 498-505, 2007.
- [8] S. Ng and Y. Zhang, "Optimizing Construction Time and Cost Using Ant Colony Optimization Approach", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 134, pp. 721-728, 2008.
- [9] A. Afshar, A. Ziaraty, A. Kaveh, and F. Sharifi, "Nondominated Archiving Multicolony Ant Algorithm in Time-Cost Trade-Off Optimization", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 135, pp. 668-674, 2009.
- [10] R. M. Storn and K. Price, "Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces", *Journal of Global Optimization*, vol. 11, pp. 341-359, 1997.
- [11] S. Das and P. N. Suganthan, "Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 15, pp. 4-31, 2011.
- [12] M. Ali, P. Siarry, and M. Pant, "An efficient Differential Evolution based algorithm for solving multi-objective optimization problems", *European Journal of Operational Research*, vol. 217, pp. 404-416, 2012.
- [13] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, pp. 182-197, 2002.
- [14] E. Zitzler, L. Thiele, M. Laumanns, C. M. Fonseca, and V. G. d. Fonseca, "Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review", *Trans. Evol. Comp.*, vol. 7, pp. 117-132, 2003.

(BBT nhận bài: 15/12/2015, phản biện xong: 29/12/2015)