

# PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH CÁC HỆ SỐ THỰC NGHIỆM THEO LÝ THUYẾT CẮT ĐẤT CỦA VETROV ĐỐI VỚI RĂNG CẮT ĐẤT TRÊN THIẾT BỊ CÔNG TÁC ĐÀO RÃNH HẸP

Nguyễn Tiến Nam<sup>a,\*</sup>, Phạm Quang Dũng<sup>a</sup>, Nguyễn Văn Tịnh<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Cơ khí, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

*Nhận ngày 11/02/2025, Sửa xong 07/3/2025, Chấp nhận đăng 20/5/2025*

## Tóm tắt

Việc nghiên cứu phát triển máy đào rãnh hẹp (MDRH) là rất cần thiết, có ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn tại Việt Nam. Để thiết kế chế tạo MDRH cỡ vừa và nhỏ thi công trên nền đất á sét trung bình có độ cứng cấp III thì việc nghiên cứu xác định chính xác lực cản cắt đất của răng cắt hình nêm tách đất từ nền thành phoi có vai trò rất quan trọng. Lý thuyết cắt đất của Vetrov được sử dụng phổ biến nhất do làm rõ được quy luật của quá trình cắt đất và có độ chính xác cao. Tuy nhiên, các hệ số thực nghiệm để xác định lực cản cắt đất theo lý thuyết này thường được cho ở khoảng rộng, khó chọn chính xác khi thiết kế cho một loại máy đào thi công trên nền đất cụ thể. Trong nghiên cứu này, các tác giả đề xuất phương pháp nghiên cứu xác định các hệ số thực nghiệm theo lý thuyết cắt đất của Vetrov, xây dựng mô hình nghiên cứu thực nghiệm và tiến hành thực nghiệm. Kết quả đã thu được giá trị chính xác của các hệ số thực nghiệm cho nền đất nêu trên. Quy luật thay đổi chi phí năng lượng riêng theo chiều sâu cắt đất đã được làm rõ và chỉ ra chiều sâu cắt đất tối hạn để đạt chi phí năng lượng riêng nhỏ nhất.

*Từ khóa:* máy đào rãnh hẹp; lý thuyết cắt đất của Vetrov; răng cắt hình nêm; lưỡi cắt hình nêm; lực cản cắt đất.

METHOD OF DETERMINING EXPERIMENTAL COEFFICIENTS ACCORDING TO VETROV'S SOIL CUTTING THEORY FOR SOIL CUTTING TOOTH ON A WORKING EQUIPMENT OF NARROW TRENCHERS

## Abstract

The research and development of narrow trenchers are very necessary, has scientific and practical significance in Vietnam. To design and manufacture narrow trenchers as a medium and small sized earthmoving machine for construction on clayey loam soil with hardness level III, the research to accurately determine the soil cutting resistance force of the wedge-shaped cutting teeth separating soil from the ground into chips plays a very important role. Vetrov's soil cutting theory is the most widely used because it clarifies the laws of the soil cutting process and has high accuracy. However, the experimental coefficients to determine the soil cutting resistance according to this theory are often given in a wide range, making it difficult to choose accurately when designing an excavator working on a specific ground. In this study, the authors propose a research method to determine the experimental coefficients according to Vetrov's soil cutting theory, build an experimental research model, and conduct the experiment. The experimental results have obtained the exact values of the experimental coefficients for the above soil type. The law of change of specific cutting energy with soil cutting depth in this case has been clarified and the critical depth for getting the smallest specific cutting energy has been shown.

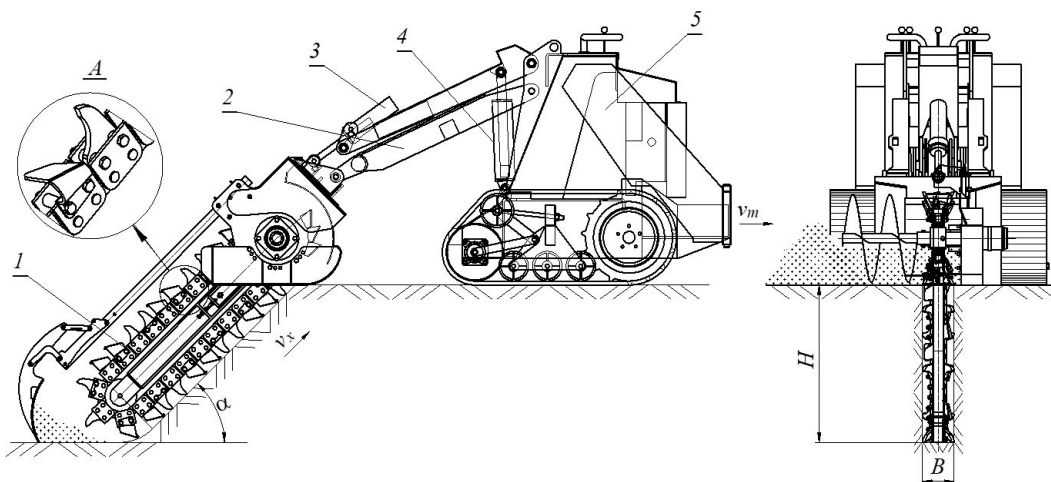
*Keywords:* narrow trenchers; Vetrov's soil cutting theory; wedge-shaped cutting teeth; wedge-shaped cutting blade; soil cutting resistance force.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(2V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(2V)-11) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [namnt1@huce.edu.vn](mailto:namnt1@huce.edu.vn) (Nam, N. T.)

## 1. Giới thiệu

Máy đào rãnh hẹp (MĐRH) là loại máy có chế độ làm việc liên tục cho năng suất cao, dùng để đào rãnh có chiều sâu lớn, chiều rộng hẹp, có ưu thế thi công theo tuyến các công trình hạ ngầm cáp điện lực, cáp viễn thông và các đường ống kỹ thuật nhỏ trong hệ thống cấp nước đô thị, hệ thống cấp nước tưới tiêu trong công nghệ nông nghiệp cao,... Do máy có thể đào được rãnh sâu với chiều rộng hẹp vừa đủ để đặt được các đường ống hoặc cáp ngầm mà khối lượng đất cần đào là nhỏ nhất, tiết kiệm năng lượng, tăng năng suất, rút ngắn thời gian thi công.



Hình 1. Máy đào rãnh hẹp

- 1- Thiết bị công tác dạng xích có gắn các lưỡi hoặc răng cắt đất;
- 2- Cần đỡ thiết bị công tác;
- 3- Xi lanh nâng hạ và điều chỉnh góc nghiêng của thiết bị công tác
- 4- Xi lanh nâng hạ cần để nâng hạ thiết bị công tác;
- 5- Máy cơ sở

Máy đào rãnh hẹp (Hình 1) được tổ hợp từ máy cơ sở và thiết bị công tác (TBCT) dạng xích có gắn các răng cắt đất và lưỡi cắt gạt đất. Khi máy làm việc, động cơ của TBCT dẫn động xích chuyển động với tốc độ  $v_x$  đồng thời di chuyển máy với tốc độ  $v_m$  để cắt đất và gạt đất lên miệng rãnh, đất ở miệng rãnh được vận chuyển sang một bên nhờ vít lắp đồng trục với đĩa xích chủ động.

Ở Việt Nam hiện nay, hệ thống công trình hạ tầng kỹ thuật cũ và mới tại các đô thị sẽ đa phần được hạ ngầm dưới lòng đất, đặc biệt là ở Hà Nội và thành phố Hồ Chí Minh thì khối lượng đường dây cáp điện lực, cáp viễn thông và các đường ống kỹ thuật yêu cầu hạ ngầm là rất lớn [1, 2]. Mặt khác, nhu cầu đi ngầm cáp viễn thông, cáp điện lực kết nối các thành phố, các khu đô thị và các vùng ven, dọc theo các tuyến đường giao thông liên vùng, liên tỉnh cũng như nhu cầu hạ ngầm ống cấp nước phục vụ tưới tiêu trong sản xuất nông nghiệp công nghệ cao là rất lớn và ngày càng tăng, không chỉ ở trong nước mà cả trên thế giới [3, 4]. Tuy nhiên việc sử dụng MĐRH để thi công các công trình nêu trên ở Việt Nam là rất hạn chế, duy nhất chỉ có tập đoàn viễn thông quân đội Viettel đã nhập khẩu một số MĐRH của hãng Vermeer (Mỹ) với giá thành rất cao để thi công hạ ngầm cáp viễn thông dọc theo ven đường quốc lộ và các công trình viễn thông của tập đoàn này ở nước ngoài. Các công bố về phương pháp tính toán thiết kế, chế tạo MĐRH cũng hạn chế do các hãng sản xuất thường giữ bản quyền, không phổ biến rộng rãi. Vì vậy, việc nghiên cứu phát triển MĐRH ở Việt Nam mà trước tiên là loại MĐRH cỡ vừa và nhỏ thi công trên nền đất cát, á cát và á sét có độ cứng đến cấp III là rất cần thiết, có ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn.

Các loại MĐRH do các hãng thuộc các nước công nghiệp phát triển chế tạo dùng để thi công hạ ngầm cáp điện lực, cáp viễn thông và các đường ống kỹ thuật đa phần là các máy làm đất cỡ vừa và

nhỏ thi công trên nền đất cát, á cát và á sét có độ cứng cấp III [5]. Máy được thiết kế với TBCT dạng xích có gắn các răng cắt/lưỡi cắt có tiết diện hình nêm tách đất từ nền thành phoi (xem nút A Hình 1) để thi công nền đất á sét trung bình có độ cứng cấp III và khi đào rãnh trên nền đất yếu hơn thì có thể tăng tốc độ di chuyển máy  $v_m$  để tăng năng suất, phát huy hết công suất của máy. Như vậy, việc nghiên cứu xác định chính xác lực cắt đất của răng cắt/lưỡi cắt hình nêm tách đất từ nền thành phoi có vai trò rất quan trọng khi thiết kế chế tạo loại MĐRH nêu trên.

Trong khi đó, các nghiên cứu liên quan đến việc phát triển MĐRH hiện nay thường tập trung vào hai hướng. Thứ nhất là nghiên cứu để khai thác máy một cách hiệu quả chẳng hạn như: xác định các thông số cơ bản của thiết bị công tác và lựa chọn máy cơ sở cho máy đào rãnh hẹp [6]; đề xuất phương pháp để xác định chế độ vận hành hiệu quả cho máy đào khi đào rãnh đảm bảo tiêu thụ năng lượng riêng tối thiểu và hiệu suất tối đa của máy [7]; nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống mài mòn của các bộ phận cắt trong máy đào rãnh dạng xích và xác định tần suất tối ưu để thay thế các bộ phận cắt trong máy đào rãnh dạng xích [8]; tìm ra các yếu tố ảnh hưởng đến lực đào và công suất của máy đào rãnh dạng xích, nghiên cứu thực nghiệm và so sánh với kết quả lý thuyết [9]; nghiên cứu lý thuyết mối tương quan giữa độ sâu cắt của máy đào rãnh dạng xích với các thông số động học, thông số kết cấu [10]; xác định khoảng cách hai lưỡi cắt trên xích và tốc độ quay đĩa xích chủ động theo hàm mục tiêu năng suất cao nhất [11]; và đề xuất phương pháp điều chỉnh tốc độ di chuyển máy cơ sở của máy làm đất có sẵn phù hợp với máy đào rãnh hẹp [12]. Thứ hai là thiết kế và phát triển máy trên cơ sở mô hình cắt đất của Reece kết hợp với lực cắt trên mũi nhọn của Goktan [13]; cải tiến thiết kế của máy đào rãnh để cho phép nó có thể đào rãnh ở hai bên và bên dưới đường ống đang sửa chữa phục vụ trong công tác sửa chữa lớn đường ống [14].

Lý thuyết cắt đất thành phoi bằng răng cắt/lưỡi cắt hình nêm hiện nay được phổ biến và áp dụng rộng rãi khi thiết kế máy đào đất là của các nhà khoa học lớn như Đômbrovski, Zelenhin, Vetrov, ... [15–17], trong đó, lý thuyết cắt đất của Vetrov đã làm rõ được quy luật của quá trình cắt đất. Phương pháp xác định lực cản cắt đất của Vetrov có quy luật thuật toán chặt chẽ, có kể đến ảnh hưởng của các nhân tố đến quá trình cắt đất bằng các hệ số thực nghiệm, không những cho độ chính xác cao trong tính toán thiết kế mà còn rất phù hợp để phân tích, nghiên cứu xác định các thông số hợp lý của TBCT máy đào đất trong thiết kế tối ưu.

Tuy nhiên, các hệ số thực nghiệm trong các công trình của Vetrov chưa được công bố đầy đủ cho từng loại nền đất cụ thể và thường cho ở khoảng rộng, khó chọn chính xác khi thiết kế cho một loại máy đào đất thi công trên nền đất cụ thể. Vì vậy, để xác định chính xác lực cản cắt đất khi thiết kế chế tạo một loại máy đào đất thi công trên nền đất cụ thể thì rất cần thiết phải tiến hành nghiên cứu thực nghiệm xác định các hệ số thực nghiệm (lực cản cắt riêng) theo lý thuyết cắt đất của Vetrov.

Bài báo trình bày phương pháp nghiên cứu xác định các hệ số thực nghiệm theo lý thuyết cắt đất của Vetrov đối với răng cắt hình nêm cắt đất thành phoi trên nền đất á sét có độ cứng cấp III, phục vụ thiết kế chế tạo loại MĐRH cỡ vừa và nhỏ dùng để thi công hạ ngầm cáp điện lực, cáp viễn thông và các đường ống kỹ thuật có nhu cầu rất lớn hiện nay ở Việt Nam.

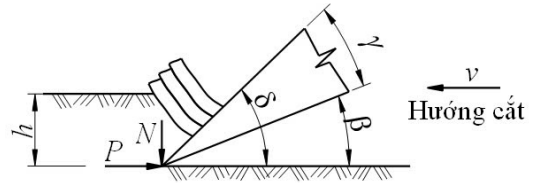
## 2. Lý thuyết cắt đất của Vetrov và phương pháp xác định các hệ số thực nghiệm

### 2.1. Lý thuyết cắt đất của Vetrov

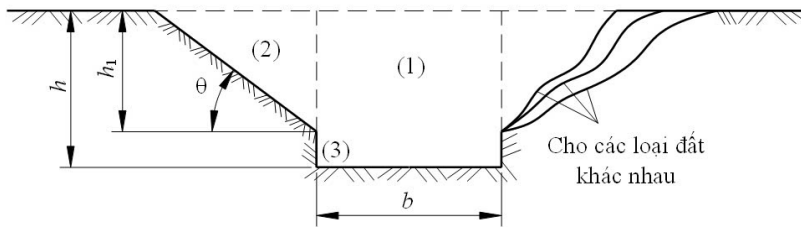
Các phương pháp tính lực cản cắt đất bằng răng cắt/lưỡi cắt hình nêm tách đất từ nền thành phoi thường xác định lực cản cắt đất theo phương tiếp tuyến  $P$  và pháp tuyến  $N$  với các thông số cơ bản sau (Hình 2):  $\delta$  - góc cắt;  $\gamma$  - góc sắc;  $\beta$  - góc sau;  $v$  - vận tốc di chuyển của răng cắt/lưỡi cắt theo hướng cắt;  $h$  - chiều sâu cắt đất (chiều dày phoi đất) và  $b$  - chiều rộng răng cắt/lưỡi cắt (chiều rộng phoi đất).

Lực cản cắt đất phụ thuộc vào các nhân tố sau [15–17]:

- Tính không gian của vệt cắt (Hình 3): đối với vệt cắt ban đầu, tiết diện của vệt cắt là hình thang cân với vùng (1) là đất bị cắt ở trước mũi răng cắt/lưỡi cắt (nén và trượt); vùng (2) là đất bị nứt vỡ ở hai bên cạnh cắt (tách và trượt) với  $h_1 = (0,65 \div 0,9)h$  và  $\theta = 30^\circ \div 35^\circ$  tùy theo nền đất; vùng (3) là đất bị cắt thuần túy bởi cạnh cắt ở hai bên.

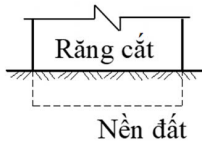


Hình 2. Sơ đồ cắt đất

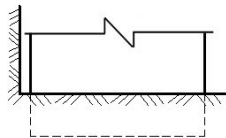


Hình 3. Tính không gian của vệt cắt

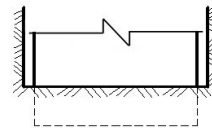
- Vị trí tương đối của răng cắt/lưỡi cắt so với nền đất (Hình 4): Hình 4(a) là vệt cắt ban đầu, có tiết diện hình thang cân như trên Hình 3; Hình 4(b) là vệt cắt bị chặn một bên, có tiết diện hình thang vuông (chỉ có vùng đất nứt vỡ ở 1 bên); Hình 4(c) là vệt cắt bị chặn cả hai bên, có tiết diện hình chữ nhật; Hình 4(d) là cắt lấn và Hình 4(e) là cắt hót. Như vậy, khi thiết kế cần phải phối hợp các răng cắt trên TBCT sao cho xảy ra cắt lấn và cắt hót thì sẽ giảm được lực cản cắt, tránh trường hợp như Hình 4(b), (c) cho lực cản cắt lớn.



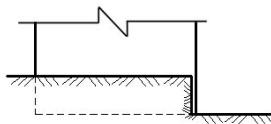
(a) Vệt cắt ban đầu có tiết diện hình thang cân



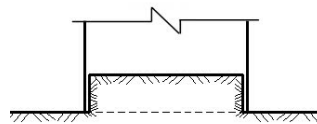
(b) Vệt cắt bị chặn một bên có tiết diện hình thang vuông



(c) Vệt cắt bị chặn cả hai bên có tiết diện hình chữ nhật



(d) Vệt cắt lấn



(e) Vệt cắt hót

Hình 4. Vị trí tương đối của răng cắt/lưỡi cắt so với nền đất

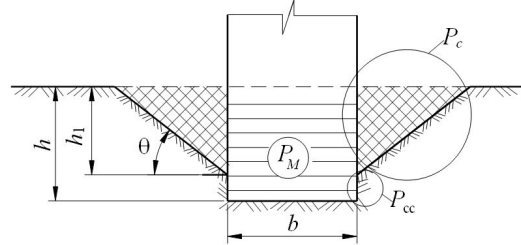
- Chiều dày  $h$ , chiều rộng  $b$  của phoi đất và tương quan giữa chúng: Lực cản cắt riêng ở vùng (2) nhỏ hơn  $2 \div 4$  lần so với lực cản cắt riêng ở vùng (1) (xem Hình 3). Khi tăng chiều sâu vệt cắt  $h$  thì chiều sâu phần đất bị nứt vỡ ở hai bên  $h_1$  cũng tăng theo với tỷ lệ  $k_1 = h_1/h$  và góc nghiêng  $\theta$  ổn định (Hình 3). Tương quan này được bảo toàn cho tới khi  $h$  đạt đến chiều sâu tới hạn  $h_t$  và khi tăng  $h > h_t$  thì phần đất bị nứt vỡ không tăng theo và lực cản cắt đất tăng mạnh ( $h_t/b = (2 \div 4)$  lần tùy từng nền đất). Như vậy, vệt cắt có chi phí năng lượng riêng  $E$  nhỏ nhất là vệt cắt có chiều sâu tới hạn  $h_t$  và khi

thiết kế cần phải điều chỉnh sao cho phần lớn tiết diện là ở vùng (2) và tiết diện vùng (1) nhỏ nhất (giảm  $b$  và tăng  $h$  tiệm cận đến  $h_t$ , tránh vệt cắt có  $h > h_t$ ).

- Ảnh hưởng của góc cắt  $\delta$ : Lực cản cắt đất tăng mạnh khi  $\delta > 60^\circ$ . Mặt khác, khi  $\delta < 30^\circ$  sẽ làm góc sắc  $\gamma$  và góc sau  $\beta$  nhỏ làm răng cắt/lưỡi cắt chóng mòn ( $\beta$  thường lấy từ  $5^\circ \div 10^\circ$ ). Giá trị hợp lý của góc cắt nằm trong khoảng  $\delta = 30^\circ \div 60^\circ$  tùy theo loại nền đất và vật liệu, chế độ làm việc của răng cắt/lưỡi cắt.

Ngoài ra, lực cản cắt đất còn phụ thuộc vào độ mòn/cùn của răng cắt/lưỡi cắt, vào dạng phoi cắt tách từ nền và độ bết dính tùy thuộc vào loại nền đất ...

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu nêu trên, Vetrov đã đề xuất phương pháp xác định lực cản cắt đất tiếp tuyến  $P$  đối với răng cắt/lưỡi cắt hình nêm còn sắc cho vệt cắt ban đầu tách đất từ nền thành phoi như sau (Hình 5) [15, 16]:



Hình 5. Sơ đồ xác định các thành phần lực cản cắt tiếp tuyến

$$P = P_M + P_c + P_{cc}$$

$$P = F_M p_M + F_c p_c + L_{cc} p_{cc}, \text{ N} \quad (1)$$

trong đó  $P_M = F_M p_M$ , (N) là lực cản cắt tại vùng mũi trước răng cắt/lưỡi cắt với diện tích tiết diện  $F_M = bh$ , ( $\text{cm}^2$ ) và  $p_M$ , ( $\text{N}/\text{cm}^2$ ) là lực cản cắt riêng tại vùng mũi trước răng cắt/lưỡi cắt.  $p_M = \varphi m_M$  với  $m_M$  là lực cản cắt riêng tại vùng mũi trước răng cắt/lưỡi cắt khi góc cắt  $\delta = 45^\circ$  và  $\varphi$  là hệ số ảnh hưởng của góc cắt ( $\varphi = 1$  với  $\delta = 45^\circ$ );  $P_c = F_c p_c$ , (N) - lực cản cắt tại phần đất bị nứt vỡ ở hai bên với tổng diện tích tiết diện  $F_c$  ( $\text{cm}^2$ ) và  $p_c$  ( $\text{N}/\text{cm}^2$ ) là lực cản cắt riêng tại phần đất bị nứt vỡ ở hai bên;  $P_{cc} = L_{cc} p_{cc}$ , (N) - lực cản cắt tại cạnh cắt thuần túy ở hai bên phía dưới phần đất nứt vỡ với tổng chiều dài cạnh cắt thuần túy  $L_{cc}$  (cm) và  $p_{cc}$  ( $\text{N}/\text{cm}$ ) là lực cản cắt riêng tại cạnh cắt thuần túy.

- Công thức (1) tính lực cản cắt đất tiếp tuyến cho vệt cắt ban đầu (Hình 4(a)) có thể viết dưới dạng:

+ Đối với vệt cắt có  $h \leq h_t$ ;  $k_1 = h_1/h$

$$P = \varphi m_M b h + k_1^2 h^2 \cot \theta p_c + 2h(1 - k_1)p_{cc}, \text{ N} \quad (2)$$

+ Đối với vệt cắt có  $h > h_t$ ;  $k_1 = h_1/h_t$

$$P = \varphi m_M b h + k_1^2 h_t^2 \cot \theta p_c + 2(h - k_1 h_t)p_{cc}, \text{ N} \quad (3)$$

- Chi phí năng lượng riêng  $E_P$  đối với lực cản cắt tiếp tuyến  $P$  cho vệt cắt ban đầu (Hình 4(a)):

$$E_P = \frac{N_{dc}}{Q}, \text{ Ws}/\text{cm}^3 \quad (4)$$

trong đó  $N_{dc} = 10^{-2} P v$ , (W) là công suất cản di chuyển lưỡi cắt theo phương tiếp tuyến, lực cản tiếp tuyến  $P$ , (N), tốc độ lưỡi cắt  $v$ , ( $\text{cm}/\text{s}$ );  $Q = F v$ , ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) là năng suất cắt đất, với  $F$  tiết diện vệt cắt ( $\text{cm}^2$ ).

+ Đối với vệt cắt có  $h \leq h_t$ ;  $k_1 = h_1/h$

$$E_P = 10^{-2} P / (b h + k_1^2 h^2 \cot \theta), \text{ Ws}/\text{cm}^3 \quad (5)$$

+ Đối với vệt cắt có  $h > h_t$ ;  $k_1 = h_1/h_t$

$$E_P = 10^{-2}P/(bh + k_1^2h_t^2 \cot \theta), \text{ Ws/cm}^3 \quad (6)$$

Trong công thức (5) và (6),  $P$  có đơn vị là N và  $b, h, h_t$  có đơn vị là cm.

- Đối với các vệt cắt khác (Hình 4(b), (c), (d), (e)), có thể xác định lực cản cắt tiếp tuyến theo cách làm trên, tùy theo tiết diện vệt cắt mà có những thành phần lực cản tương ứng. Ví dụ: đối với cắt lún (Hình 4(d)) thì các thành phần  $P_c$  và  $P_{cc}$  lấy 0,5 lần còn đối với cắt hớt (Hình 4(e)) thì  $P_c = P_{cc} = 0$ .

- Lực cản cắt pháp tuyến được xác định theo công thức:

$$N = P \cot(\delta + \mu), \text{ N} \quad (7)$$

trong đó  $\mu$  là góc ma sát giữa nền đất và bề mặt răng cắt/lưỡi cắt.

Như vậy, theo phương pháp của Vetrov ta có thể xác định chính xác được lực cản cắt đất khi thiết kế, hơn thế nữa ta có thể sử dụng các công thức trên để nghiên cứu xác định các thông số hợp lý của TBCT (thiết kế tối ưu) bằng cách thay đổi các biến số  $b, h, \varphi(\delta)$  để tìm ra phương án tốt nhất (chi phí năng lượng riêng  $E$  nhỏ nhất). Tuy nhiên, các hệ số  $k_1 = h_1/h = 0,65 \div 0,9$ ;  $h_t/b = 2 \div 4$ ;  $p_M/p_c = 2 \div 4$ ;  $\theta = 30^\circ \div 35^\circ$  cho ở khoảng rộng, khó chọn chính xác cho trường hợp tính toán cụ thể và  $m_M, p_c, p_{cc}$  chưa công bố đầy đủ cho từng nền đất. Vì vậy cần phải xây dựng phương pháp xác định các hệ số thực nghiệm nêu trên theo lý thuyết cắt đất của Vetrov (công thức (2) và (3)).

## 2.2. Phương pháp xác định các hệ số thực nghiệm

Đối tượng nghiên cứu là TBCT đào rãnh hẹp lắp trên máy cơ sở của máy đào một gầu hoặc máy xúc lật thủy lực cỡ vừa và nhỏ, dùng để thi công hạ ngầm cáp điện lực, cáp viễn thông và các đường ống kỹ thuật trên nền đất á sét trung bình có độ cứng cấp III. Vì vậy, để đạt độ chính xác cao ta tiến hành các thí nghiệm đối với răng cắt đất của loại MĐRH này (mẫu 1 có  $b_1 = 1,2$  cm; mẫu 2 có  $b_2 = 1,8$  cm; cả hai mẫu có góc cắt  $\delta = 45^\circ$  nên hệ số  $\varphi = 1$ ) với mô hình đất có tính chất cơ lý tương đương với nền đất á sét trung bình có độ cứng cấp III [18]. Như vậy, theo công thức (2) và (3) ta phải xây dựng phương pháp xác định 6 hệ số thực nghiệm ( $h_t$  (cho mẫu 1),  $k_1, \theta, m_M, p_c, p_{cc}$ ), trong khi đó mỗi lần thí nghiệm ta chỉ xác định được lực cản tiếp tuyến  $P$  với các giá trị  $b, h$  tương ứng ( $\varphi = 1$  với  $\delta = 45^\circ$ ).

### a. Xác định $h_t$ (cho mẫu 1), $k_1 = h_1/h$ và góc nghiêng $\theta$

Sử dụng mẫu răng cắt số 1 có  $b_1 = 1,2$  cm. Thực hiện các vệt cắt có chiều sâu  $h_{ai}$  tăng dần với bước tăng  $\Delta = 0,3$  cm. Với  $h_t/b_1 = (2 \div 4)$  lần thì lấy  $h_{a1} = 1,5$  cm;  $i = 1 \div 12$  và  $h_{ai} = [1,5 + (i - 1)\Delta]$ , cm;  $h_{a12} = 4,8$  cm (tổng số 12 lần thí nghiệm). Với mỗi lần thí nghiệm, tương ứng với  $b_{ai} = b_1$  và  $h_{ai}$ , ta sẽ đo được lực cản cắt tiếp tuyến  $P_{ai}$ ; chiều sâu phần đất nứt vỡ ở hai bên  $h_{1ai}$ ;  $k_{1ai} = h_{1ai}/h_{ai}$ ; góc nghiêng  $\theta_{ai}$  và đưa vào bảng thống kê các số liệu thực nghiệm. Sau khi phân tích, xử lý số liệu ta xác định được  $h_t$  (theo quy luật của quá trình cắt đất:  $h_{1ai}$  tăng dần theo  $h_{ai}$  và khi đạt tới  $h_t$  thì  $h_{1ai}$  sẽ không tăng theo  $h_{ai}$  nữa); hệ số  $k_1$  và góc nghiêng  $\theta$  lấy trung bình của các giá trị  $k_{1ai}$  và  $\theta_{ai}$  ( $i = 1 \div 12$ ).

### b. Xác định lực cản cắt riêng tại vùng mũi trước răng cắt $m_M$ ( $\varphi = 1$ với $\delta = 45^\circ$ )

Theo quy luật của quá trình cắt đất thì lực cản cắt tại phần đất nứt vỡ ở hai bên răng cắt  $P_c$  phụ thuộc vào loại nền đất (tức  $p_c$ ) và diện tích tiết diện phần đất nứt vỡ này (tức  $h_1$  và  $\theta$ ), không phụ thuộc vào chiều rộng vệt cắt  $b$  và góc cắt  $\delta$ . Vì vậy mà ta sử dụng cả hai mẫu răng cắt với chiều rộng  $b_1 = 1,2$  cm và  $b_2 = 1,8$  cm, mỗi mẫu thực hiện 1 vệt cắt có chiều sâu cắt đất như nhau  $h_b = h_{b1} = h_{b2} < h_t$ , ta xác định được lực cản cắt tiếp tuyến  $P_{b1}$  và  $P_{b2}$  cùng các thông số hình học của vệt cắt  $h_{1b1} = h_{1b2}$ ;  $k_{1b1} = k_{1b2}$ ;  $\theta_{b1} = \theta_{b2}$  (phần đất nứt vỡ ở hai bên của hai vệt cắt là như nhau). Như vậy, lực cản cắt

tiếp tuyến  $P_{b1}$  và  $P_{b2}$  có các thành phần lực cản cắt tại phần đất nứt vỡ ở hai bên  $P_c$  và lực cản cắt tại cạnh cắt thuần túy  $P_{cc}$  bằng nhau. Theo công thức (2) ta có:

$$P_{b2} - P_{b1} = m_M h_b b_2 - m_M h_b b_1$$

$$m_M = \frac{P_{b2} - P_{b1}}{h_b(b_2 - b_1)}, \text{ N/cm}^2 \quad (8)$$

c. Xác định lực cản cắt riêng tại cạnh cắt thuần túy ở hai bên phía dưới phần đất nứt vỡ  $p_{cc}$

Lực cản cắt riêng  $p_{cc}$  được xác định sau khi đã thực hiện các bước ở mục a và b (đã biết  $h_t, k_1, \theta, m_M$ ).

Sử dụng kết quả thí nghiệm ở mục a, chọn 2 vệt cắt có chiều sâu  $h_{ai} > h_t$  gồm: vệt cắt thứ  $i = n < 12$  với  $h_{an} > h_t$  và vệt cắt thứ  $i = 12$  với  $h_{a12} = 4,8$  cm (vệt cắt thứ  $i = n$  nên chọn ngay sau vệt cắt có chiều sâu tới hạn), xác định lực cản cắt tiếp tuyến cho 2 vệt cắt này theo công thức (3):

$$P_{an} = b_{an} h_{an} m_M + k_1^2 h_t^2 \cot \theta p_c + 2(h_{an} - k_1 h_t) p_{cc}, \text{ N} \quad (9)$$

$$P_{a12} = b_{a12} h_{a12} m_M + k_1^2 h_t^2 \cot \theta p_c + 2(h_{a12} - k_1 h_t) p_{cc}, \text{ N} \quad (10)$$

Với  $b_{an} = b_{a12} = b_1 = 1,2$  cm; từ (9) và (10) ta có:

$$p_{cc} = \frac{P_{a12} - P_{an} - b_1(h_{a12} - h_{an})m_M}{2(h_{a12} - h_{an})}, \text{ N/cm} \quad (11)$$

d. Xác định lực cản cắt riêng tại phần đất nứt vỡ ở hai bên  $p_c$

Sau khi đã xác định được 5 hệ số thực nghiệm  $h_t, k_1, \theta, m_M$  và  $p_{cc}$  ở các bước trên, sử dụng kết quả thí nghiệm ở mục a hoặc b, thay giá trị các thông số đã biết của lần thí nghiệm được chọn vào công thức tính lực cản cắt đất tiếp tuyến và rút ra được  $p_c$  (do  $p_c$  là thông số cuối cùng chưa biết trong công thức). Đối với lần thí nghiệm có  $h \leq h_t$  thì sử dụng công thức (2), còn khi  $h > h_t$  thì sử dụng công thức (3).

### 3. Thiết bị thực nghiệm và kết quả nghiên cứu

#### 3.1. Thiết bị thực nghiệm

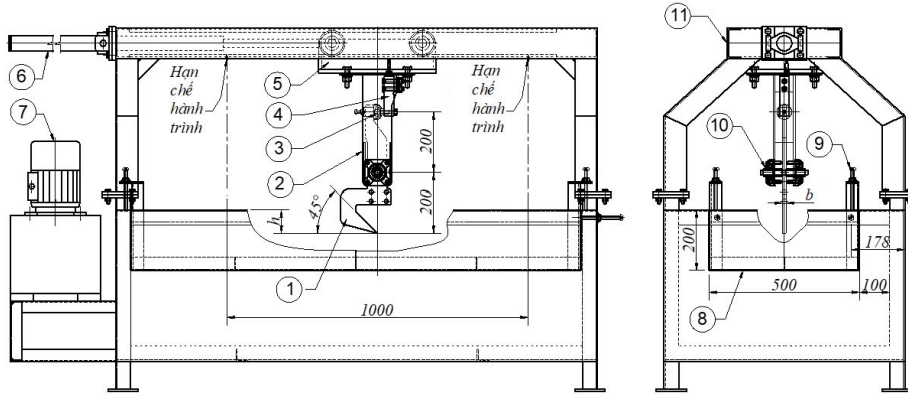
##### a. Mô hình nghiên cứu thực nghiệm

Trên cơ sở các đặc điểm của máy nghiên cứu và phân tích các mô hình nghiên cứu thiết bị làm đất trong phòng thí nghiệm [19], mô hình nghiên cứu thực nghiệm đã được nghiên cứu thiết kế, chế tạo tại Phòng nghiên cứu thực nghiệm cơ khí Trường Đại học Xây dựng Hà Nội [20]. Cấu tạo của mô hình được trình bày tại Hình 6 và Hình 7.

Trong Hình 6, răng cắt (1) được lắp trên giá treo (2) qua khớp bản lề (10), giá treo (2) được gắn vào xe con (5) di chuyển dọc theo ray di chuyển (11) nhờ xi lanh thủy lực (6). Loadcell đo lực (4) được lắp trên giá treo (2) để đo lực cản cắt tiếp tuyến ở đỉnh răng cắt (1) thông qua phản lực tại khớp cầu (3). Xi lanh thủy lực (6) hoạt động nhờ bộ nguồn thủy lực (7) (bộ nguồn thủy lực bao gồm 1 động cơ điện, 1 bơm kép thủy lực và thùng chứa dầu thủy lực) truyền qua hệ thống truyền dẫn thủy lực. Kênh đất (8) có thể được điều chỉnh lên/xuống, sang trái/phải so với hệ khung đỡ nhờ các vít (9).

Mô hình đất được thiết lập theo phương pháp của giáo sư Balôvnhev [18] bằng cách trộn đều bột đất sét tự nhiên nghiền nhỏ (25%) với cát (48%) và nước (27%). Hỗn hợp tạo được là mô hình đất có tính chất cơ lý tương đương với loại đất á sét trung bình có độ cứng cấp III, đảm bảo các tính chất cơ lý của nền đất theo yêu cầu. Việc sử dụng mô hình đất cho kết quả đo ổn định và chính xác hơn so với làm thực nghiệm trên nền đất tự nhiên vì mô hình đất được trộn đều, đồng nhất hơn nền đất tự nhiên, tránh được các yếu tố ngẫu nhiên.

Đảm bảo đến độ chặt cần thiết và kiểm tra độ chặt trước mỗi lần thí nghiệm. Độ chặt của đất có thể xác định bằng búa xác định cấp đất [18].



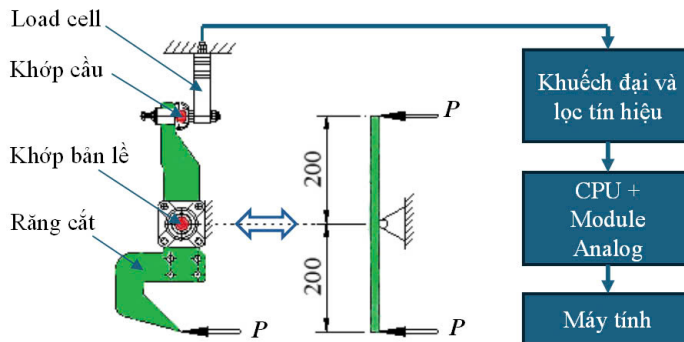
Hình 6. Sơ đồ mô hình nghiên cứu thực nghiệm xác định lực cản cắt đất tiếp tuyến P  
 1- Răng cắt; 2- Giá treo; 3 - Khớp cầu; 4- Loadcell; 5- Xe con; 6- Xi lanh thủy lực; 7- Bộ nguồn thủy lực;  
 8- Kênh đất; 9- Các vít điều chỉnh; 10- Khớp bản lề; 11- Ray di chuyển



Hình 7. Mô hình nghiên cứu thực nghiệm và Mẫu răng cắt đất

### 3.2. Thiết bị đo

- Đồng hồ đo áp suất dầu: Dùng để đo áp suất dầu của xi lanh thủy lực;
- Loadcell đo lực: Dùng để thể hiện biểu đồ biến thiên của lực cản cắt tiếp tuyến  $P$  được kết nối với máy tính thông qua bộ vi xử lý PLC (Hình 8);



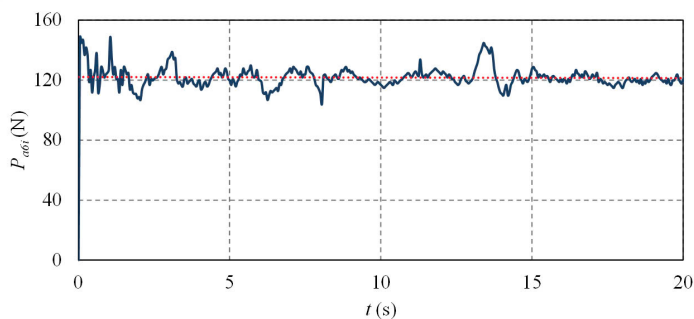
Hình 8. Sơ đồ nguyên lý xác định lực cản cắt tiếp tuyến  $P$

- Thước kẹp, thước góc: Dùng để đo chiều sâu  $h_1, h$  và góc nghiêng  $\theta$  của từng lần thí nghiệm;
- Đồng hồ bấm giây: Đo thời gian di chuyển của xi lanh.



### 3.3. Kết quả nghiên cứu

Tiến hành theo phương pháp xác định các hệ số thực nghiệm đã xây dựng ở mục 2.2. Mỗi lần thí nghiệm, răng cắt thực hiện cắt đất với hành trình cắt là 0,8 m trong thời gian 20 s. Giá trị lực cắt tiếp tuyến được máy tính ghi lại cho cả quá trình. Trên Hình 9 là ví dụ giá trị lực cản cắt tiếp tuyến tương ứng với mã thí nghiệm a6 được ghi lại trên máy tính và có giá trị trung bình  $P_{a6} = 122,9$  N. Các đại lượng về kích thước hình học được đo tại 10 vị trí khác nhau trên vệt cắt và mỗi đại lượng được lấy bằng giá trị trung bình.



Hình 9. Đồ thị biểu diễn giá trị lực cản cắt tiếp tuyến  $P$  biến thiên theo thời gian  $t$  của mã thí nghiệm a6

Mỗi thí nghiệm được thực hiện 2 lần, kết quả thu được chênh không quá 10% thì lấy giá trị trung bình, còn nếu chênh quá 10% thì phải làm lại lần thứ 3 và xử lý số liệu theo lý thuyết xác suất trong kỹ thuật đo lường [21].

#### a. Kết quả xác định $h_t, k_1, \theta$

Kết quả đo các thông số thực nghiệm theo mục 2.2a cho mẫu răng cắt số 1 được thống kê trong Bảng 1.

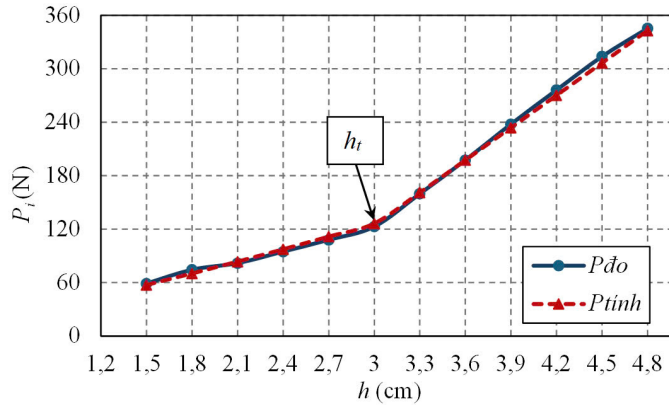
Bảng 1. Kết quả đo các thông số thực nghiệm cho mẫu 1

Xeri thí nghiệm	$b$ (cm)	$h$ (cm)	$h_1$ (cm)	$\theta$ (độ)	$P$ (N)
a1	1,2	1,5	1,19	32,5	59,0
a2	1,2	1,8	1,40	30,0	74,5
a3	1,2	2,1	1,70	33,5	81,9
a4	1,2	2,4	1,94	31,2	94,9
a5	1,2	2,7	2,19	32,0	106,7
a6	1,2	3,0	2,43	33,0	122,9
a7	1,2	3,3	2,42	32,4	159,8
a8	1,2	3,6	2,43	32,0	197,6
a9	1,2	3,9	2,40	31,5	237,9
a10	1,2	4,2	2,42	32,0	276,2
a11	1,2	4,5	2,41	33,2	313,9
a12	1,2	4,8	2,40	32,5	345,4

Giá trị góc nghiêng của phần đất bị nứt vỡ ở hai bên răng cắt không thay đổi nhiều, dao động quanh giá trị trung bình  $\theta = 32,15^\circ$  mặc dù chiều sâu cắt đất thay đổi.

Giá trị của lực cắt tiếp tuyến của mỗi lần thí nghiệm tăng theo chiều sâu cắt đất. Đặc biệt, bắt đầu từ chiều sâu cắt đất 3 cm đến 4,8 cm, giá trị này tăng nhanh (xem giá trị  $P_{do}$  trong Hình 10). Trong

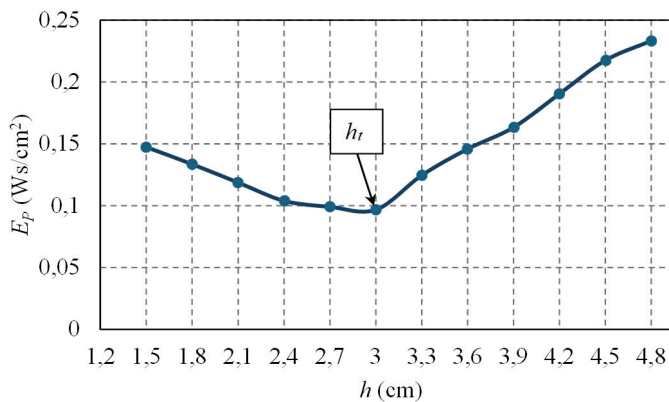
khoảng chiều sâu này, phần đất nứt vỡ không tăng nhưng lực cản cắt lại tăng mạnh, chứng tỏ lực cản cắt thuần túy tại hai cạnh bên là rất lớn.



Hình 10. Đồ thị biểu diễn giá trị biến thiên lực cản cắt tiếp tuyến  $P$  theo chiều sâu  $h$

Bảng 2. Tiết diện vật cắt  $F$  và chỉ phí năng lượng riêng  $E_P$

Xeri thí nghiệm	$F_M$ (cm <sup>2</sup> )	$F_c$ (cm <sup>2</sup> )	$k_1$	$F = F_M + F_c$ (cm <sup>2</sup> )	$E_P$ (Ws/cm <sup>3</sup> )
a1	1,80	2,21	0,79	4,01	0,147
a2	2,16	3,42	0,78	5,58	0,134
a3	2,52	4,37	0,81	6,89	0,119
a4	2,88	6,24	0,81	9,12	0,104
a5	3,24	7,66	0,81	10,90	0,099
a6	3,60	9,10	0,81	12,70	0,097
a7	3,96	8,86	0,79	12,82	0,125
a8	4,32	9,22	0,80	13,54	0,146
a9	4,68	9,88	0,82	14,56	0,163
a10	5,04	9,46	0,81	14,50	0,191
a11	5,40	9,03	0,81	14,43	0,218
a12	5,76	9,05	0,80	14,81	0,233



Hình 11. Đồ thị biểu diễn chỉ phí năng lượng riêng cắt đất  $E_P$  biến thiên theo chiều sâu  $h$

Chi phí năng lượng riêng theo công thức (5) và (6) đối với mỗi mã thí nghiệm được tính toán, liệt kê trong Bảng 2 và thể hiện dưới dạng đồ thị như Hình 11. Diện tích tiết diện vệt cắt từ mã thí nghiệm a1 đến mã a6 tăng lên hơn 3 lần (từ 4,01 cm<sup>2</sup> đến 12,7 cm<sup>2</sup>) trong khi chi phí năng lượng riêng lại giảm 35%; từ mã thí nghiệm a6 đến a12 diện tích tiết diện tăng ít (tăng 17%), chi phí năng lượng riêng tăng mạnh (tăng 141%). Giá trị  $E_P$  tại mã thí nghiệm a6 ứng với chiều sâu tới hạn  $h_t$  có giá trị nhỏ nhất (0,097 Ws/cm<sup>3</sup>, xem Hình 11).

Như vậy, kết quả phân tích số liệu thực nghiệm nêu trên (Bảng 1 và Bảng 2; đồ thị Hình 10 và Hình 11) cho thấy  $h_t = 3$  cm ( $h_t/b = 2,5$ ). Hệ số  $k_1$  được xác định cho mỗi mã thí nghiệm như trong Bảng 2, giá trị của nó thay đổi không quá lớn và dao động quanh giá trị trung bình  $k_1 = 0,8$ .

#### b. Xác định $m_M$

Tiến hành thực nghiệm theo các bước trong mục 2.2b và sử dụng các số liệu của mã thí nghiệm a5 cho mẫu răng cắt số 1 với các thông số  $b_1 = 1,2$  cm;  $h_b = h_{b1} = 2,7$  cm  $< h_t$ ; giá trị lực cản cắt tiếp tuyến thu được là  $P_{b1} = P_{a5} = 106,7$  N. Tiến hành thí nghiệm cho mẫu răng cắt số 2 với các thông số  $b_2 = 1,8$  cm;  $h_b = h_{b2} = 2,7$  cm  $< h_t$ , thu được  $P_{b2} = 123,1$  N. Như vậy, lực cản cắt riêng tại vùng mũi trước răng cắt theo công thức (8) là  $m_M = 10,1$  N/cm<sup>2</sup>.

#### c. Xác định $p_{cc}$

Chọn hai mã thí nghiệm có chiều sâu cắt đất  $h > h_t$  là a7 ( $n = 7$ ) và a12, thay các giá trị có được từ Bảng 1 và giá trị xác định được từ các bước a và b vào công thức (11), giá trị lực cản cắt riêng tại cạnh cắt thuần túy ở hai bên răng cắt là  $p_{cc} = 55,8$  N/cm.

#### d. Xác định $p_c$

Thay các giá trị đã biết từ Bảng 1 của các mã thí nghiệm a1 đến a6 (có  $h \leq h_t$ ) vào công thức (2), ta xác định được một bộ số là giá trị của  $p_{ci} = [2, 58; 2, 48; 2, 72; 2, 39; 2, 36; 2, 52]$  (N/cm) và tính giá trị trung bình thu được  $p_c = 2,51$  N/cm<sup>2</sup>.

Sau khi xác định được giá trị của 6 hệ số thực nghiệm, các giá trị này được thay thế vào công thức (2) và (3) để tìm ra lực cản cắt tiếp tuyến tính toán. Trong Hình 10 thể hiện giá trị lực cản cắt tiếp tuyến tính toán  $P_{tính}$  theo chiều sâu cắt đất có sai lệch rất nhỏ so với giá trị đo được từ thí nghiệm (sai lệch lớn nhất là 5,7%).

### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng được quy trình thực nghiệm để xác định 6 hệ số thực nghiệm theo lý thuyết cắt đất của Viện sỹ Vetrov. Trên cơ sở đó, nghiên cứu cũng đã thiết lập được mô hình thực nghiệm và tiến hành thực nghiệm với loại đất á sét trung bình có độ cứng cấp III. Kết quả nghiên cứu đã xác định được quy luật phá vỡ đất tương đồng với lý thuyết khi tiến hành cắt đất bằng răng cắt hình nêm và tách đất từ nền đất thành phoi.

Giá trị của 6 hệ số thực nghiệm theo lý thuyết ứng với loại đất á sét có độ cứng cấp III là  $h_t = 3$  cm;  $k_1 = 0,8$ ;  $\theta = 32,15^\circ$ ;  $m_M = 10,1$  N/cm<sup>2</sup>;  $p_{cc} = 55,8$  N/cm;  $p_c = 2,51$  N/cm<sup>2</sup>. Các giá trị này chính xác, đáng tin cậy và phù hợp với lý thuyết. Các giá trị lực cản cắt riêng xác định được thuộc vùng cận dưới trong khoảng giá trị khá rộng mà các công trình nghiên cứu trước đã công bố. Hơn nữa, chi phí năng lượng riêng cắt đất nhỏ nhất cũng đã được tìm thấy tương ứng với chiều sâu cắt đất tới hạn.

Kết quả thu được ở nghiên cứu này có vai trò rất quan trọng trong việc tính toán chính xác lực cản cắt, phục vụ thiết kế và thiết kế tối ưu MĐRH. Nó quyết định đến hiệu quả về mặt năng lượng cắt đất, kích thước nhỏ gọn của kết cấu máy và chế độ vận hành máy hiệu quả.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội trong đề tài mã số 07-2024/KHXD-TĐ.

## Tài liệu tham khảo

- [1] UBND TP Hà Nội (2022). *Quyết định số 913/QĐ-UBND về phê duyệt Quy hoạch chung không gian xây dựng ngầm đô thị trung tâm - TP Hà Nội đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050.*
- [2] Tập đoàn điện lực Việt Nam (2016). *Hạ ngầm cáp viễn thông, điện lực: Tăng an toàn - đẹp cảnh quan.* Truy cập ngày 30/12/2024.
- [3] Taiwan News (2022). *Trencher Attachment Market Demand Product Types, Application, Regions 2030.* Truy cập ngày 30/12/2024.
- [4] The Business Research Private Ltd. (2024). *Global Trenchers Market Report 2024.* Truy cập ngày 30/12/2024.
- [5] Phạm, Q. D. (2017). *Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo thiết bị đào rãnh hẹp phục vụ thi công công trình hạ tầng kỹ thuật đô thị.* Báo cáo tổng kết đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Bộ Xây dựng - mã số: RD70-16, Trường Đại học Xây dựng, Hà Nội.
- [6] Dũng, P. Q., Nam, N. T., Minh, P. V. (2017). Xác định các thông số cơ bản của thiết bị công tác và lựa chọn máy cơ sở đối với máy đào rãnh hẹp. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng - Đại học Xây dựng*, 11(4/07-2017):134–138.
- [7] Kravets, S., Suponyev, V., Goponov, A., Kovalevkiy, S., Koval, A. (2020). *Determining efficient operating modes and sizes of blades for multi-scraper trench excavators.* *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(106):23–28.
- [8] Kravchenko, S. M., Slepchenko, V. A., Slepchenko, I. V. (2021). *Determination of Optimal Frequency to Replace Cutting Elements in Chain Trenchers.* *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1118(1):012026.
- [9] Ghonimy, M., Rahman, E. A. E., Alzoheiry, A. (2022). *Mathematical Prediction of Excavating Force and Power of Chain Type Trenching Machine.* *Acta Technologica Agriculturae*, 25(4):197–204.
- [10] Điệp, Đ. Đ. (2017). Analysis the Factors Affecting Conveyance Rate of Unbucket Chain Trenching Machine. *Agricultural, Forest and Transport Machinery and Technologies*, 4(1):38–44.
- [11] Giang, D. T. (2023). *Study to Determine the Effect of Blade Distance and Chain Speed on the Productivity of Trench Excavators Using Taguchi Method.* *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(4):139–149.
- [12] Nam, N. T., Dũng, P. Q., Tịnh, N. V. (2024). *Phương pháp điều chỉnh tốc độ di chuyển máy cơ sở của máy làm đất có sẵn phù hợp với máy đào rãnh hẹp.* *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 18(2V):72–81.
- [13] Lemu, H., Kejela, D. (2018). *Design and Modelling of a Light Duty Trencher for Local Conditions.* *Advances in Science and Technology Research Journal*, 12(1):303–311.
- [14] Letopolsky, A. B., Korchagin, P. A., Teterina, I. A., Demidenko, A. I. (2020). *Trencher equipment.* *E3S Web of Conferences*, 193:01047.
- [15] Vetrov, Y. A., Baladinsky, V. L. (1973). *Destruction of strong rocks.* Bugivelnhik, Kiev. (in Russian).
- [16] Vetrov, Y. A. (1971). *Soil cutting with earthmoving machines.* Mashynostroeny, Moscow. (in Russian).
- [17] Phạm, H. Đ., Hoa, V. N., Luru, B. T. (2004). *Máy làm đất.* Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
- [18] Balovnev, V. I. (1981). *Modeling of the processes of interaction with the environment of the working bodies of road-building machines.* Higher school, Moscow. (in Russian).
- [19] Phạm, Q. D. (2014). *Nghiên cứu xây dựng mô hình nghiên cứu thực nghiệm bộ phận công tác máy làm đất.* Báo cáo đề tài khoa học cấp trường trọng điểm – Mã số 111-2013/KHXD-TĐ, Trường Đại học Xây dựng, Hà Nội.
- [20] Ứng, Q. T. (2014). *Nghiên cứu, thiết kế chế tạo mô hình nghiên cứu thực nghiệm bộ phận công tác máy làm đất.* Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Xây dựng, Hà Nội.
- [21] Phạm, T. H., Nguyễn, T. Q., Nguyễn, V. H. (2007). *Kỹ thuật đo lường các đại lượng vật lý.* Nhà xuất bản Giáo dục, Hà Nội.