



## Nghiên cứu ảnh hưởng lưu biến của dòng sạt lở đất ngầm tới đặc trưng sóng thần dùng mô hình số tích hợp

## A study on the influence of submarine debris flow rheology on tsunamis using an integrated numerical model

Phạm Văn Khôi\*

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Từ khóa:*

Lưu biến  
Dòng sạt lở ngầm  
Sóng thần  
Mô hình số

**TÓM TẮT**

Dưới tác động của các hiện tượng địa chấn, khối đất ngầm ở rìa lục địa có thể sạt lở, tạo ra sóng thần lan truyền đến bờ và biển, từ đó, đe dọa nghiêm trọng đến cơ sở vật chất và tính mạng con người trên đường di chuyển của nó. Nghiên cứu này sử dụng mô hình số tích hợp mô phỏng đồng thời dòng sạt lở đất ngầm và sự hình thành, lan truyền của sóng thần bằng hệ phương trình phi tuyến nước nông bảo toàn. Qua tác động của lưu biến dòng sạt lở đất ngầm, bao gồm ma sát trong, tính rối và tính chảy, dẫn đến đặc trưng sóng thần lan truyền có sự khác nhau trong cùng điều kiện biên về thể tích khối sạt và thời gian mô phỏng. Khi tính chảy nhỏ, chiều dài sạt lở và chiều cao sóng thần lan truyền ở phía biển lớn và với tính chảy lớn, chiều dài sạt lở và chiều cao sóng thần ở phía bờ lớn. Kết quả của nghiên cứu này góp phần bổ sung lý thuyết tính toán để lý giải sự phức tạp của hiện tượng sóng thần do sạt lở đất ngầm trong thực tế.

*Keywords:*

Rheology  
Submarine debris flow  
Tsunami  
Numerical model

**ABSTRACT**

Under the influence of seismic phenomena, the submarine mass on the continental shelf edge can slide down, generating tsunami waves that propagate both towards the shore and out to sea, thereby threatening infrastructure and human life. This study uses an integrated numerical model to simultaneously simulate both the submarine landslide and tsunami waves using the nonlinear shallow water equations. Under the effect of the rheological properties of the submarine landslide, including internal friction, turbulence, and yield stress, the propagated tsunami characteristics are different in the same conditions of the landslide volume and simulation time. With the low value of yield stress, the landslide length and tsunami wave height are larger in seaward areas. On the other hand, with the high value of yield stress, the landslide length and tsunami wave height are larger in coastal areas. The results of this study contribute to enhancing the theoretical computations for explaining the complexity of tsunami phenomena caused by submarine landslides in real-life scenarios.

\* Phạm Văn Khôi. Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

Email: [khoipv.ctt@vamaru.edu.vn](mailto:khoipv.ctt@vamaru.edu.vn)

[https://www.doi.org/10.55228/JTST.14\(2\).27-36](https://www.doi.org/10.55228/JTST.14(2).27-36)

Ngày nhận bài: 12/01/2025; Ngày nhận bài sửa: 12/02/2025; Ngày chấp nhận đăng: 17/02/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/3/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

## 1. Giới thiệu

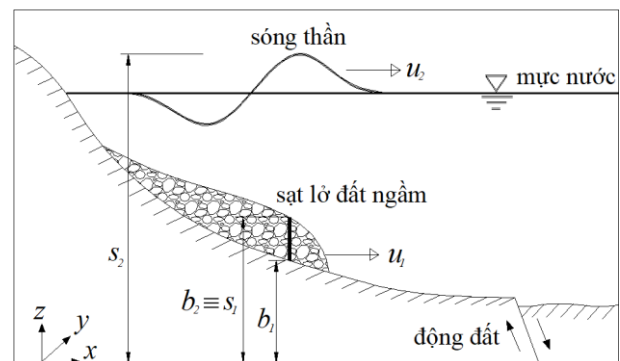
Với đặc điểm hình thành ngoài biển sâu, việc xác định vị trí và cơ chế hình thành sóng thần đến nay vẫn là một thử thách lớn đối với con người [1], [2], [3], [4], [5]. Trong các nguyên nhân hình thành sóng thần, sạt lở đất ngầm dưới đáy biển được xem là khó xác định nhất [2]. Sạt lở đất ngầm thường bắt nguồn từ các hiện tượng địa chấn như động đất hay núi lửa phun trào nên khi tính toán có thể bị nhầm lẫn với các nguyên nhân địa chấn tạo ra sóng thần [2], [3]. Xác định chính xác hình dạng, kích thước của khối đất ngầm đã sạt lở và khối đất ngầm ban đầu gặp nhiều hạn chế do điều kiện tiếp cận khó khăn và thiếu hụt số liệu đo đạc thực tế [3], [4].

Mô hình số mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần được sử dụng phổ biến hơn mô hình vật lý do tính hiệu quả đầu tư và chi phí thực hiện thấp. Theo lịch sử phát triển của mô hình số, từ việc sử dụng riêng mô hình mô phỏng sạt lở đất và mô hình mô phỏng sóng thần, đến nay, các mô hình số này đã được tích hợp trong một mô hình duy nhất với đặc điểm chung là thể hiện mối liên hệ giữa chiều sâu sạt lở đất và chiều sâu nước [5], [6], [7], [8], [9]. Yếu tố khó khăn nhất khi mô phỏng dòng sạt lở đất ngầm chính là xác định các thành phần ma sát của khối đất ngầm, hay còn gọi là tính lưu biến của khối đất ngầm. Naef và các cộng sự [10] đã sử dụng các thành phần như tính ma sát trong, tính rỗng, và tính chảy trong mô hình số một chiều để so sánh đặc tính lưu biến của dòng sạt lở đất. Tuy nhiên, nghiên cứu của nhóm tác giả này chỉ xét đến dòng sạt lở đất trên bờ trong một mô hình số đơn giản. Từ đó, trong nghiên cứu này, tác giả có xét tới các tính lưu biến khác nhau để đưa vào mô hình số tích hợp nhằm mô phỏng dòng sạt lở đất và ảnh hưởng của nó tới đặc trưng sóng thần hình thành và lan truyền.

Tiếp theo, phần 2 giới thiệu mô hình số tích hợp mô phỏng sóng thần do sạt lở đất ngầm và phương pháp giải. Phần 3 ứng dụng mô hình số tích hợp mô phỏng khối sạt lở đất ngầm tạo sóng thần thực tế cho bài toán một chiều. Phần 4 trình bày ảnh hưởng tính lưu biến của dòng sạt lở đất ngầm đến đặc trưng sóng thần và tiến hành thảo luận. Kết luận và hướng nghiên cứu trong tương lai được trình bày tại phần 5.

## 2. Mô hình số tích hợp mô phỏng sóng thần do sạt lở đất ngầm

Trong nghiên cứu này, mô hình số một chiều được phát triển dựa trên sự tích hợp giữa mô hình sạt lở đất ngầm và mô hình sóng thần có sử dụng nhất quán hệ phương trình phi tuyến nước nông dạng bảo toàn [11]. Mô hình sạt lở đất ngầm trên đáy không xói sử dụng biến bề mặt đất ( $s_1$ ) và vận tốc phần tử đất ( $u_1$ ), trong khi đó, mô hình sóng thần sử dụng biến bề mặt nước ( $s_2$ ) và vận tốc phần tử nước ( $u_2$ ), được minh họa trên Hình 1. Sóng thần hình thành khi bề mặt đất ngầm thay đổi, từ đó, dẫn đến chiều sâu nước biến đổi theo.



**Hình 1.** Mô hình số tích hợp mô phỏng sạt lở đất ngầm và mô hình sóng thần, sử dụng nhất quán hệ tọa độ  $(b, s)$ .

### 2.1. Mô hình sạt lở đất ngầm

Hệ phương trình chủ đạo mô phỏng sạt lở đất ngầm một chiều bao gồm phương trình liên tục và phương trình động lượng:

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} + \frac{\partial P_1}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} + \frac{\partial F_1}{\partial x} = g_1(s_1 - b_1)(S_{o1} - S_{f1}) \quad (2)$$

Trong đó:

$P_1 = (s_1 - b_1)u_1$  là lưu lượng đơn vị của dòng sạt lở đất ngầm;

$F_1 = (s_1 - b_1)u_1^2 + \frac{1}{2}g_1(s_1 - b_1)^2$  là thông lượng

của dòng sạt lở đất ngầm;  $S_{o1} = -\frac{\partial b_1}{\partial x} = \tan\theta$  là

độ dốc đáy không xói của dòng sạt lở đất ngầm;  $\theta$  là góc dốc;  $b_1$  là cao độ đáy không xói;  $g_1$  là gia tốc trọng trường có kể đến lực đẩy nổi của nước [12];  $S_{f1}$  là thành phần độ dốc do lực cản ma sát, được xác định theo đặc tính lưu biến học của dòng sạt lở đất ngầm.

## 2.2. Tính lưu biến của dòng sạt lở đất ngầm

Dưới tác động của động đất hay các hoạt động địa chấn khác, khối sạt lở đất ngầm dưới đáy có độ dốc đủ lớn, có thể khởi động và trượt xuống tạo ra ứng suất sạt lở. Trong quá trình chuyển động, khối đất phát sinh ứng suất cản do ma sát nội tại và giữa khối đất với môi trường xung quanh. Đặc tính này gọi là tính lưu biến của dòng sạt lở đất [1], [4], [10].  $S_{o1}$  và  $S_{f1}$  lần lượt là thành phần ứng suất sạt lở và ứng suất cản trong phương trình động lượng (2) của hệ phương trình chủ đạo mô hình sạt lở đất ngầm. Tính lưu biến của khối sạt lở đất ngầm được thể hiện bởi ma sát trong, ma sát bề mặt (tính rối) và tính chảy của vật liệu đất sạt lở. Các đặc tính này được thể hiện thông qua các thành phần trong công thức sau [1], [10]:

$$S_{f1} = \tan\phi \cos\theta + \frac{n^2 u_1 |u_1|}{(s_1 - b_1)^{4/3}} + \frac{\tau_y}{\rho g_1 (s_1 - b_1)} \quad (3)$$

Trong công thức (3), tính ma sát trong, tính rối, và tính chảy lần lượt được thể hiện

bằng góc ma sát trong  $\phi$  (°), hệ số ma sát bề mặt  $n$  ( $m^{-1/3}s$ ), và ứng suất chảy  $\tau_y$  ( $N/m^2$ ).

Mục tiêu của nghiên cứu này là điều khiển ba hệ số trên, đại diện cho ba đặc tính lưu biến của dòng sạt lở đất ngầm trong cùng một điều kiện biên để thấy được ảnh hưởng của chúng đến đặc trưng hình thành và lan truyền của sóng thần.

## 2.3. Mô hình sóng thần

Sóng thần được hình thành do bề mặt đất ngầm ( $s_1$ ) thay đổi, dẫn đến cao độ bề mặt đáy biển ( $b_2 = s_1$ ) thay đổi theo không gian và thời gian, từ đó, chiều sâu nước biển đổi, tạo ra sóng thần. Hệ phương trình phi tuyến nước nông bảo toàn được sử dụng nhất quán, bao gồm phương trình liên tục và phương trình động lượng:

$$\frac{\partial s_2}{\partial t} + \frac{\partial P_2}{\partial x} = \frac{\partial b_2}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} + \frac{\partial F_2}{\partial x} = g(s_2 - b_2)(S_{o2} - S_{f2}) \quad (5)$$

Với,  $P_2 = (s_2 - b_2)u_2$  là lưu lượng đơn vị của sóng thần;  $F_2 = (s_2 - b_2)u_2^2 + \frac{1}{2}g(s_2 - b_2)^2$  là

thông lượng của sóng thần;  $S_{o2} = -\frac{\partial b_2}{\partial x}$  là độ

dốc đáy biển;  $g$  là gia tốc trọng trường;

$S_{f2} = \frac{C_m^2 u_2 |u_2|}{(s_2 - b_2)^{4/3}}$  là thành phần độ dốc do lực

cản ma sát của phần tử nước với đáy biển;  $C_m$  là hệ số ma sát đáy.

## 2.4. Phương pháp giải hệ phương trình chủ đạo

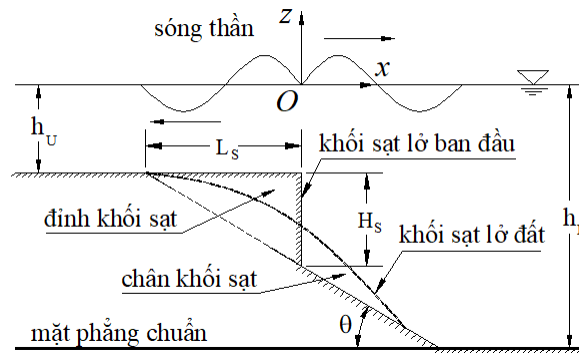
Do sự nhất quán về cách đặt biến số, dạng bảo toàn của hệ phương trình phi tuyến nước nông thuộc hai hệ phương trình chủ đạo gồm phương pháp hỗn hợp sai phân hữu hạn - thể tích hữu hạn và phương pháp tường minh Runge - Kutta bậc ba ba bước được nhất quán sử dụng để tương ứng giải vi phân

không gian và thời gian. Khi giải vi phân theo không gian, phương pháp sai phân tiến được sử dụng để tính các thành phần độ dốc  $S_{01}$ ,  $S_{02}$ . Thành phần thông lượng  $F_1$ ,  $F_2$  được thực hiện giải vi phân thông qua phương pháp thể tích hữu hạn kết hợp trung bình trọng số thông lượng và tổng biến thiên giảm dần. Chi tiết phương pháp thể tích hữu hạn được trình bày trong các tài liệu [11], [12]. Mô hình số tích hợp được kiểm chứng với số liệu thí nghiệm mô hình vật lý khối cát ngầm sạt lở tạo sóng [13] và được trình bày trong tài liệu [11].

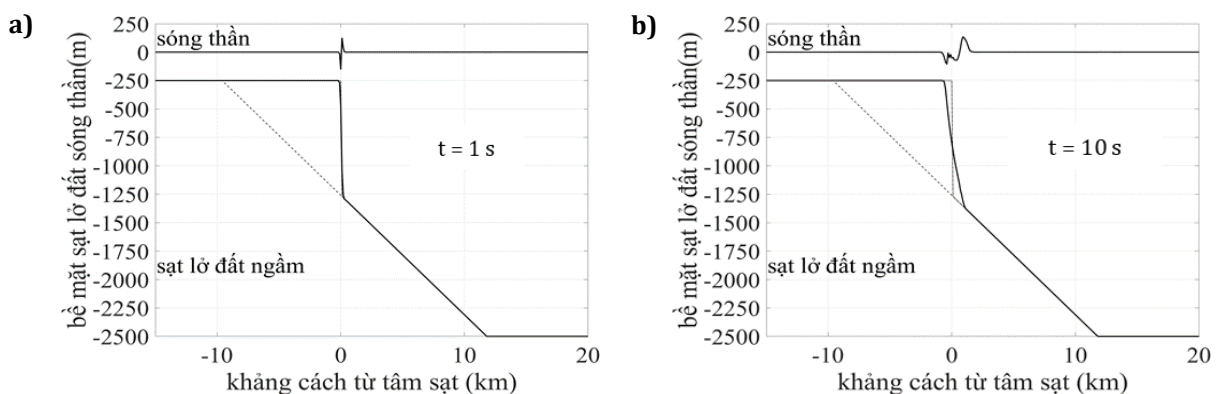
### 3. Thiết lập mô hình và kết quả mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần

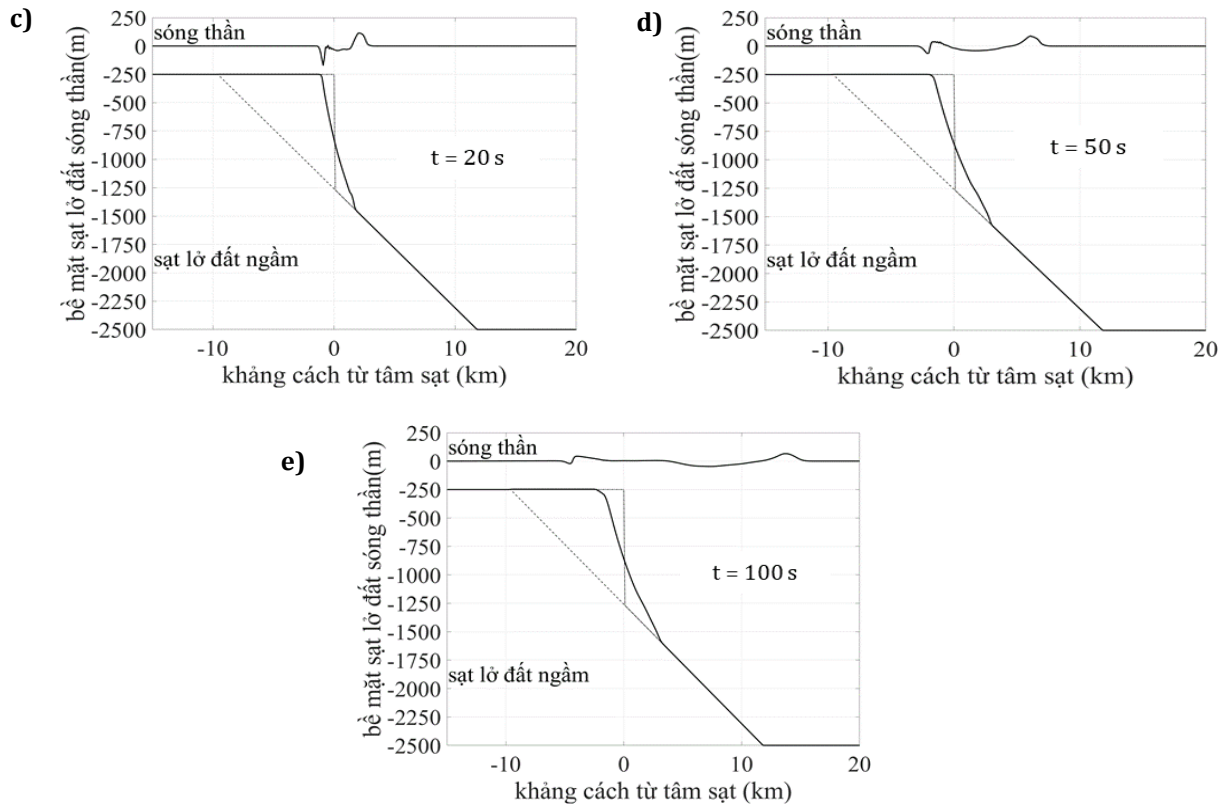
Miền tính toán mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần trong nghiên cứu này được thiết lập dựa trên miền tính toán thực tế khối sạt lở đất ngầm Currituck tạo sóng thần xảy ra tại bờ Đông nước Mỹ [4]. Trong miền tính toán một chiều dài 75 km, khối đất sạt lở ban đầu có hình tam giác với chiều dài  $L_s = 9,6$  km, chiều cao  $H_s = 1,009$  km, tạo ra thể tích trên một đơn vị mét dài là  $4,843 \text{ km}^3$ . Khối

đất sạt lở trên mái dốc không xói có góc dốc  $\theta = 6^\circ$ , chiều sâu nước bên trái (phía bờ) là  $h_U = 250$  m, chiều sâu nước bên phải (phía biển) là  $h_L = 2500$  m (Hình 2). Mô hình số được thiết lập tương ứng với kích thước thực tế của khối sạt lở đất ngầm tạo sóng thần. Kích thước lưới tính toán  $\Delta x = 100$  m, bước thời gian  $\Delta t = 0,2$  s đủ nhỏ để đảm bảo độ ổn định của mô hình. Hệ số ma sát đáy  $C_m = 0,014 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  [11]. Dung trọng riêng của khối đất ngầm có xét đến lực đẩy nổi  $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$ . Tính lưu biến được thể hiện bởi tính ma sát trong và tính rớt (tính lưu biến Voellmy) tương ứng với hai hệ số góc ma sát trong  $\phi = 24^\circ$  và  $n = 0,12 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  [11], [14], [15]. Gốc tọa độ theo phương x được đưa về tâm sạt lở đất ngầm (giữa miền tính toán) và gốc tọa độ theo phương z đặt tại mực nước tĩnh (Hình 2). Kết quả mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần theo thời gian được thể hiện trên Hình 3. Dựa trên mức độ ảnh hưởng tới con người và tài nguyên, đặc trưng chiều cao và vận tốc của sóng thần được trình bày trong nghiên cứu này.



Hình 2. Miền tính toán một chiều mô hình sạt lở đất ngầm tạo sóng thần.





**Hình 3.** Kết quả mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần tại các thời điểm: (a)  $t = 1$  s; (b) 10 s; (c) 20s; (d) 50 s; (e) 100s.

Theo Hình 3a, tại thời điểm  $t = 1$  s, khối đất ngầm sạt ngay tại tâm sạt với một thể tích rất nhỏ  $V = 0,016 \text{ km}^3$  làm cho đáy biển thay đổi, tạo ra sóng thần có một bụng (sóng bên trái, cao độ -150 m) và một đỉnh (sóng bên phải, cao độ +123 m). Tại  $t = 10$  s (Hình 3b), khối đất ngầm tiếp tục sạt xuống với thể tích  $V = 0,175 \text{ km}^3$ , truyền năng lượng cho sóng thần trên mặt biển. Sóng bên phải có vận tốc lớn hơn nên lan truyền nhanh, tạo ra một đỉnh sóng có cao độ +134 m và một bụng sóng có cao độ -72 m, sóng bên trái lan truyền chậm hơn với một bụng sóng cao độ -106 m.

Đến thời điểm  $t = 20$  s (Hình 3c), khối đất sạt xuống mái dốc, hình dạng bắt đầu rõ ràng, với thể tích  $V = 0,324 \text{ km}^3$ . Sóng bên phải tiếp tục lan truyền khá ổn định với cao độ đỉnh +115 m và cao độ bụng -40 m. Sóng bên trái có xu hướng tăng cao độ bụng đến -170 m do tiếp thêm năng lượng cho khối sạt bên trái tâm sạt. Tại thời điểm  $t = 50$  s như Hình 3d, khối sạt tiếp tục sạt xuống với thể tích sạt  $V$

$= 0,536 \text{ km}^3$ , sóng bên trái lan truyền về vùng nước nông tạo ra một đỉnh với cao độ +40 m và một bụng với cao độ -65 m. Sóng bên phải lan truyền khá ổn định với một bụng có cao độ -40 m và một đỉnh có cao độ +90 m. Đến thời điểm  $t = 100$  s (Hình 3e), khối sạt tăng lên không đáng kể với thể tích  $V = 0,550 \text{ km}^3$ . Sóng bên trái lan truyền ổn định với một bụng cao độ -21 m và một đỉnh cao độ +43 m. Tương tự, sóng bên phải cũng lan truyền với một bụng cao độ -47 m và một đỉnh cao độ +66 m.

#### 4. Ảnh hưởng lưu biến của dòng sạt lở đất ngầm tới đặc trưng sóng thần

Theo Hình 3d và Hình 3e, thời gian mô phỏng tăng từ 50 s đến 100 s (tăng 100%), thể tích sạt lở tăng từ  $0,536 \text{ km}^3$  đến  $0,550 \text{ km}^3$  (tăng 2,6%) cho thấy tốc độ sạt lở rất nhỏ, được xem là ổn định. Ngoài ra, hình dạng sóng thần lan truyền phía biển và phía bờ giữ được sự ổn định với một đỉnh sóng và một bụng sóng mỗi bên. Vì vậy, trong nghiên

cứu này, điều kiện biên chung được lựa chọn để xét ảnh hưởng lưu biến của dòng sạt lở đất ngầm tới đặc trưng sóng thần là thể tích khối sạt lở đất ngầm  $V = 0,550 \text{ km}^3$  tại thời điểm  $t = 100 \text{ s}$ .

Theo mục 2.2, tính lưu biến của dòng sạt lở đất ngầm được thể hiện bởi tính ma sát trong (góc ma sát trong  $\phi$ ), tính rỗng (hệ số nhám Manning  $n$ ) và tính chảy (ứng suất chảy  $\tau_y$ ). Trong phần 3, kết quả mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần được trình bày theo mô hình lưu biến Voellmy, trong đó, chỉ xét tính ma sát trong và tính rỗng, bỏ qua tính chảy (ứng suất chảy  $\tau_y = 0$ ). Tuy nhiên, xét về bản chất vật lý, khi dòng vật liệu chuyển động, tính ma sát trong và tính chảy tồn tại. Riêng tính rỗng có thể bỏ qua nếu bề mặt đáy không xói, hoàn toàn nhẵn, tức hệ số nhám bề mặt  $n = 0$ . Trong nghiên cứu này, tác giả có xét đến tính chảy (đại diện là hệ số ứng suất chảy  $\tau_y$ ) trong tính lưu biến của dòng sạt lở đất ngầm như thể hiện ở [Bảng 1](#). Các thông số lưu biến có vai trò chi phối mức độ sạt lở của khối đất ngầm, từ đó, làm cho hình dạng của khối sau sạt lở và sóng thần hình thành có đặc điểm riêng.

Nghiên cứu đưa ra ba trường hợp để xem xét ảnh hưởng lưu biến của khối sạt lở đất ngầm tới đặc trưng sóng thần:

Trường hợp 1 (TH1) - Không xét tới tính chảy, chỉ xét tính ma sát trong và tính rỗng;

Trường hợp 2 (TH2) - Không xét tới tính rỗng chỉ xét tới tính ma sát trong và tính chảy;

Trường hợp 3 (TH3) - Xét tính ma sát trong, tính rỗng và tính chảy (hệ số ma sát trong và hệ số nhám đều giảm một nửa).

Khi xét tới hệ số ứng suất chảy  $\tau_y$ , dù cùng một điều kiện biên thể tích khối sạt, nhưng hình dạng khối sạt khác nhau, dẫn đến đặc trưng sóng thần lan truyền cũng khác nhau, như trên Hình 4. Qua đó, có thể thấy hình dạng

của khối sạt lở đất ngầm và đặc trưng sóng thần của ba trường hợp khá giống nhau tại các thời điểm đầu  $t = 1 \text{ s}$  và  $t = 10 \text{ s}$ , khác nhau tại các thời điểm tiếp theo  $t = 20 \text{ s}$  và  $t = 50 \text{ s}$ , khác nhau rõ rệt tại thời điểm  $t = 100 \text{ s}$ .

Tại  $t = 1 \text{ s}$  ([Hình 4a](#)), do thể tích khối sạt rất nhỏ, nên đặc trưng sóng thần trong ba trường hợp đều có hình dạng một đỉnh và một bụng với chiều cao gần như không khác biệt. Đến thời điểm  $t = 10 \text{ s}$  ([Hình 4b](#)), thể tích khối sạt bắt đầu khác biệt, chủ yếu tại phần chân sạt, tung độ sóng thần trở nên không giống nhau, khó nhận biết bằng mắt thường.

Đến thời điểm  $t = 20 \text{ s}$  ([Hình 4c](#)), có thể thấy đặc trưng khối sạt lở đất ngầm và sóng thần lan truyền đã bắt đầu khác biệt rõ hơn. Hình dạng khối sạt lở đất ngầm của TH1 và TH2 gần giống nhau, chỉ khác một ít ở phần đuôi chân sạt, riêng TH3 khác hoàn toàn. Ngoài ra, khối đất sạt TH3 còn có điểm khác biệt so với hai trường hợp TH1 và TH2 như phần đỉnh sạt (bên trái tâm sạt) khá giống TH1 và TH2, phần chân sạt (bên phải tâm sạt) có chiều sâu sạt lớn hơn và chiều dài sạt nhỏ hơn. Điều này dẫn đến hình dạng sóng bên trái giống nhau, hình dạng sóng và chiều cao sóng bên phải (tương ứng với miền chân sạt) sai khác. Có thể thấy bằng mắt thường, đỉnh sóng bên phải của hai trường hợp TH 1 và TH2 lớn hơn đỉnh sóng bên phải của TH3. Khi thời gian mô phỏng  $t = 50 \text{ s}$  ([Hình 4d](#)), có thể thấy hình dạng khối đất sạt của TH3 khác biệt rõ rệt so với TH1 và TH2. Ở phần đỉnh khối sạt, chiều dài sạt lớn hơn nhưng chiều cao nhỏ hơn, trong khi ở phần chân khối sạt thì ngược lại, như vậy, chiều cao bụng sóng bên trái lớn hơn và chiều cao đỉnh sóng bên phải nhỏ hơn.

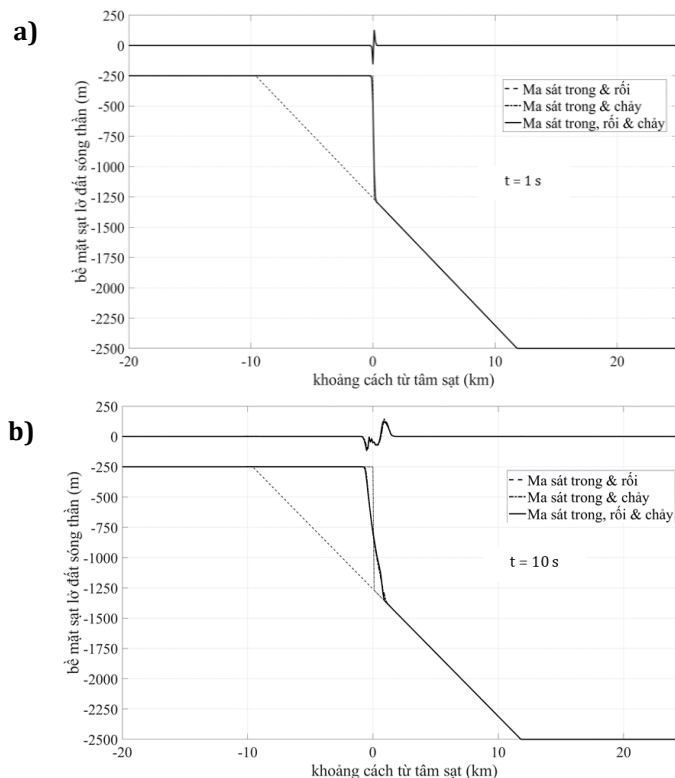
Đến thời điểm  $t = 100 \text{ s}$  ([Hình 4e](#)), vận tốc sạt lở đất ngầm đã chậm lại so với tốc độ lan truyền sóng, có thể thấy hình dạng và vị trí của khối sạt trong ba trường hợp gần như

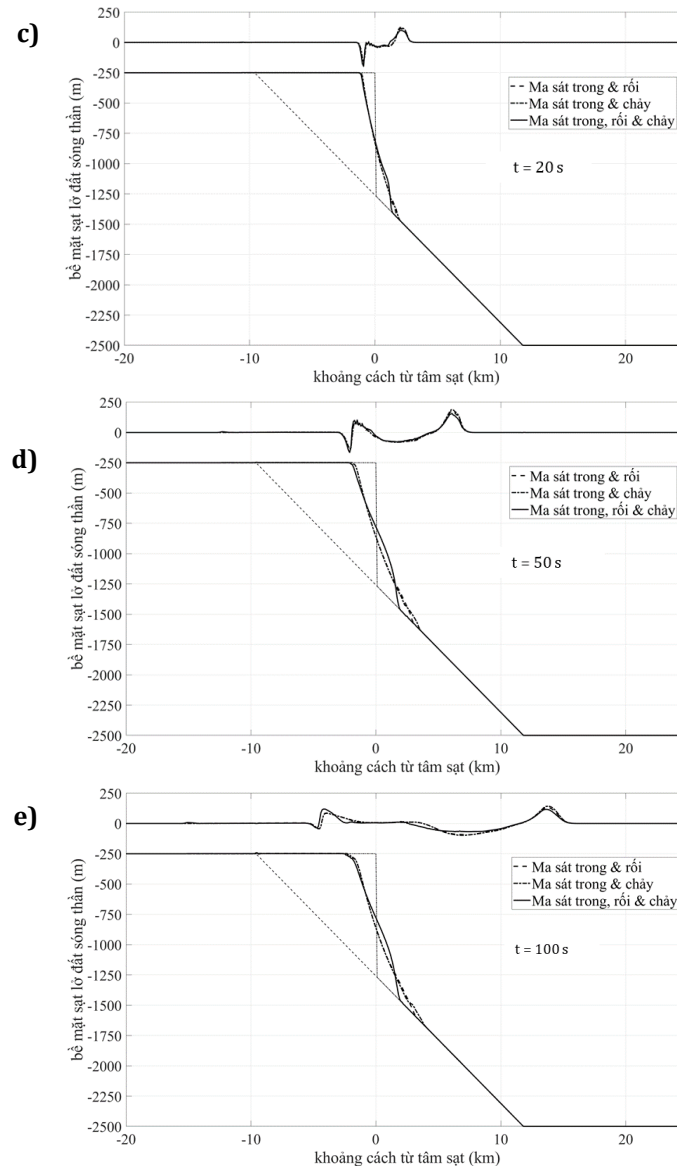
không thay đổi so với thời điểm  $t = 50$  s nhưng vẫn đảm bảo tổng thể tích khối sạt đều như nhau là  $0,550 \text{ km}^3$ . Do ảnh hưởng của hình dạng khối sạt, đặc trưng sóng thần lan truyền tại thời điểm này cũng có sự khác nhau đáng kể, đặc biệt về chiều cao sóng, như thể hiện trên Bảng 1. Phía bên trái, bụng sóng có cao độ khá gần nhau, nhỏ nhất là  $-21,82$  m thuộc về TH2 khi không có ma sát bề mặt của khối sạt lở với mặt không xói đáy biển. Với đỉnh sóng bên trái, chiều dài đỉnh sạt lớn nhất nên đỉnh sóng thuộc TH2 lớn hơn hẳn với cao độ  $59,55$  m. Tại sóng bên phải, bụng

sóng và đỉnh sóng của TH2 đều đạt giá trị cao độ cực trị tương ứng với các giá trị  $-48,67$  m và  $71,08$  m bởi chiều dài chân khối sạt lớn nhất. Như vậy, có thể thấy chiều dài sạt lở đất ngầm có ảnh hưởng quyết định để tạo ra thông số sóng thần cực trị trong cùng điều kiện về thể tích khối sạt lở. Chiều dài sạt lở đất được chi phối bởi các thông số về lưu biến dòng sạt lở đất, đặc biệt là ảnh hưởng của tính chảy được đại diện bởi thông số ứng suất chảy  $\tau_y$ . Ứng suất chảy lớn làm cho đỉnh sóng ở phía bờ lớn và ứng suất chảy nhỏ làm cho đỉnh sóng ở phía biển lớn.

**Bảng 1.** Kết quả xác định đặc trưng sóng thần theo tính lưu biến của dòng sạt lở đất ngầm tại thời điểm  $t = 100$  s, thể tích sạt  $V = 0,550 \text{ km}^3$ .

Tính lưu biến	TH	$\phi$ (°)	$n$ ( $\text{m}^{-1/3}\text{s}$ )	$\tau_y$ ( $\text{Nm}^{-2}$ )	$H_L$ (m)		$H_R$ (m)	
					Min	Max	min	max
Tính ma sát trong và tính rớt	1	24	0,12	0	-21,29	43,06	-46,50	65,57
Tính ma sát trong và tính chảy	2	24	0	3500	<b>-21,82</b>	41,97	<b>-48,67</b>	<b>71,08</b>
Tính ma sát trong, tính rớt và tính chảy	3	12	0,06	489000	-18,30	<b>59,55</b>	-33,69	58,18





**Hình 4.** Kết quả mô phỏng ảnh hưởng lưu biến của khối sạt lở đất ngầm tới đặc trưng sóng thần tại các thời điểm: (a)  $t = 1$  s; (b) 10 s; (c) 20s; (d) 50 s; (e) 100s.

## 5. Kết luận

Bài báo đã trình bày ảnh hưởng của tính lưu biến dòng chảy sạt lở đất ngầm đến đặc trưng sóng thần hình thành và lan truyền. Mô hình số tích hợp sử dụng nhất quán hệ phương trình phi tuyến nước nông bảo toàn để mô phỏng đồng thời dòng chảy sạt lở đất ngầm và sóng thần. Ứng suất chảy, đại diện cho tính chảy của dòng lưu biến, được đưa vào thành phần độ dốc ma sát cùng với tính ma sát trong và tính rớt trong mô hình mô phỏng để xét ảnh hưởng lưu biến dòng sạt lở đất ngầm tới sóng thần.

Mô hình số tích hợp được giải nhất quán theo phương pháp hỗn hợp sai phân hữu hạn – thể tích hữu hạn cho vi phân không gian và phương pháp Runge-Kutta ba bước bậc ba cho vi phân thời gian. Mô hình số tích hợp được sử dụng để mô phỏng khối sạt lở đất ngầm Currituck (Mỹ) tạo ra sóng thần lan truyền theo thời gian thực, nhưng chỉ xét đến tính ma sát trong và tính rớt trong tính lưu biến. Khối sạt có thể tích đơn vị gần  $5 \text{ km}^3$ , sạt xuống mái dốc  $6^\circ$ , trong vùng biển có độ sâu từ 250 m đến 2500 m, tạo ra chiều cao sóng thần lớn nhất lên đến 66 m sau 100 s lan truyền. Tính chảy sau đó được đưa vào

thành phần độ dốc ma sát (theo giá trị ứng suất chảy  $\tau_y$ ) để khảo sát ảnh hưởng của tính lưu biến dòng sạt lở đất ngầm tới đặc trưng sóng thần trong cùng điều kiện biên về thể tích khối sạt và thời gian mô phỏng. Kết quả cho thấy ứng suất chảy lớn làm cho chiều dài sạt lở và chiều cao sóng thần phía bờ tăng lên, ứng suất chảy nhỏ khiến chiều dài sạt lở và chiều cao sóng thần ở phía biển lớn hơn. Trong các nghiên cứu tiếp theo, tác giả sẽ thực hiện xem xét các tính lưu biến khác để mô phỏng ảnh hưởng đến dòng sạt lở đất ngầm cũng như đặc trưng sóng thần hình thành và lan truyền.

### Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

### Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.84.

---

Van Khoi Pham. *Faculty of Civil Engineering, Vietnam Maritime University.*

Corresponding author: khoipv.ctt@vimaru.edu.vn

---

### Tài liệu tham khảo

- [1] S. Yavari-Ramshe and B. Ataie-Ashtiani, "Numerical modeling of subaerial and submarine landslide-generated tsunami waves—recent advances and future challenges," *Landslides*, vol. 13, no. 6, pp. 1325–1368, 2016, doi: [10.1007/s10346-016-0734-2](https://doi.org/10.1007/s10346-016-0734-2).
- [2] D. R. Tappin et al., "Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami?," *Marine Geology*, vol. 357, pp. 344–361, 2014, doi: [10.1016/j.margeo.2014.09.043](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.09.043).
- [3] C. E. Synolakis et al., "The slump origin of the 1998 Papua New Guinea Tsunami," in *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 458, no. 2020, pp. 763–789, 2002, doi: [10.1098/rspa.2001.0915](https://doi.org/10.1098/rspa.2001.0915).
- [4] S. T. Grilli et al., "Modeling coastal tsunami hazard from submarine mass failures: effect of slide rheology, experimental validation, and case studies off the US East Coast," *Nat. Hazards*, vol. 86, no. 1, pp. 353–391, 2017, doi: [10.1007/s11069-016-2692-3](https://doi.org/10.1007/s11069-016-2692-3).
- [5] P. Heinrich, A. Piatanesi, and H. Hebert, "Numerical modelling of tsunami generation and propagation from submarine slumps: the 1998 Papua New Guinea event," *Geophysical Journal International*, vol. 145, no. 1, pp. 97–111, Apr. 2001, doi: [10.1046/j.0956-540X.2001.00336.x](https://doi.org/10.1046/j.0956-540X.2001.00336.x).
- [6] A. Paris, P. Heinrich, R. Paris, and S. Abadie, "The December 22, 2018 Anak Krakatau, Indonesia, Landslide and Tsunami: Preliminary Modeling Results," *Pure Appl. Geophys.*, vol. 177, pp. 571–590, 2020, doi: [10.1007/s00024-019-02394-y](https://doi.org/10.1007/s00024-019-02394-y).
- [7] S. Assier-Rzadkiewicz, P. Heinrich, P. C. Sabatier, B. Savoye, and J. F. Bourillet, "Numerical modelling of a landslide-generated Tsunami: The 1979 nice event," *Pure Appl. Geophys.*, vol. 157, no. 10, pp. 1707–1727, 2000, doi: [10.1007/PL00001057](https://doi.org/10.1007/PL00001057).
- [8] K. Sassa, K. Dang, H. Yanagisawa, and B. He, "A new landslide-induced tsunami simulation model and its application to the 1792 Unzen-Mayuyama landslide-and-tsunami disaster," *Landslides*, vol. 13, pp. 1405–1419, 2016, doi: [10.1007/s10346-016-0691-9](https://doi.org/10.1007/s10346-016-0691-9).
- [9] P. Lynett and P. L.-F. Liu, "A Numerical Study of Submarine-Landslide-Generated Waves and Run-Up," in *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 458, no. 2028, pp. 2885–2910, 2002, doi: [10.1098/rspa.2002.0973](https://doi.org/10.1098/rspa.2002.0973).
- [10] D. Naef, D. Rickenmann, P. Rutschmann, and B. W. McArdell, "Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 6, pp. 155–165, 2006, doi: [10.5194/nhess-6-155-2006](https://doi.org/10.5194/nhess-6-155-2006).
- [11] L.T. Mai và P. V. Khôi, "Nghiên cứu phát triển mô hình số mô phỏng sóng thần do sạt lở đất đáy biển dùng nhất quán dạng bảo toàn của hệ phương trình phi tuyến nước nông," *Tạp chí Giao thông vận tải*, pp. 79–82, 2023.

- [12] V. K. Pham, C. Lee, and V. N. Vu, "Numerical simulation of subaerial and submarine landslides using the finite volume method in the shallow water equations with (b, s) coordinate," *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 229–239, 2019, doi: [10.9765/KSCOE.2019.31.4.229](https://doi.org/10.9765/KSCOE.2019.31.4.229).
- [13] S. A. Rzadkiewicz, C. Mariotti, and P. Heinrich, "Numerical simulation of submarine landslides and their hydraulic effects," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 123, no. 4, pp. 149–157, 1997, doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1997\)123:4\(149\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1997)123:4(149)).
- [14] V. K. Pham, C. Lee, and V. N. Vu, "Submarine landslide-induced tsunami model using nonlinear shallow water equations in (b, s) coordinate and extended Boussinesq equations," *Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 40+41, pp. 139–145, 2021. [Online]. Available: <https://jtst.ut.edu.vn/articles/61ffdb04ea77ad151025dd1d>
- [15] P. V. Khôi, "Mô hình số tích hợp mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần: ứng dụng cho bài toán một chiều," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải*, số 71, tr. 68-72, 8. 2022. [Online]. Available: <https://vjol.info.vn/index.php/vimaru/article/view/77250>