

# MÔ HÌNH SỐ TÍCH HỢP MÔ PHÒNG SẠT LỞ ĐẤT NGẦM TẠO SÓNG THẦN: ỨNG DỤNG CHO BÀI TOÁN MỘT CHIỀU

## INTEGRATED NUMERICAL MODEL OF SUBMARINE LANDSLIDE- INDUCED TSUNAMI: APPLICATION TO ONE - DIMENSIONAL DOMAIN

PHẠM VĂN KHÔI

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: khoipv.ctt@vimaru.edu.vn

### Tóm tắt

Sóng thần do sạt lở đất ngầm ngày càng xảy ra phổ biến hơn ở thềm lục địa của các quốc gia có biển hoặc các hòn đảo ở những nơi có biến động địa chấn. Bài báo này dùng mô hình số tích hợp sạt lở đất ngầm tạo sóng thần một chiều để mô phỏng cho miền tính toán thực tế. Kết quả mô phỏng số cho thấy sóng thần hình thành và lan truyền về vùng nước sâu và vùng nước nông với hình dạng và chiều cao sóng khác nhau. Thành phần lực cản do ma sát trong của đất và lực cản do ma sát bề mặt sạt trượt được phân tích để thấy rõ ảnh hưởng của chúng tới đặc tính của sóng hình thành.

**Từ khóa:** Mô hình số, mô hình tích hợp một chiều, sạt lở đất ngầm, sóng thần, miền tính toán thực tế.

### Abstract

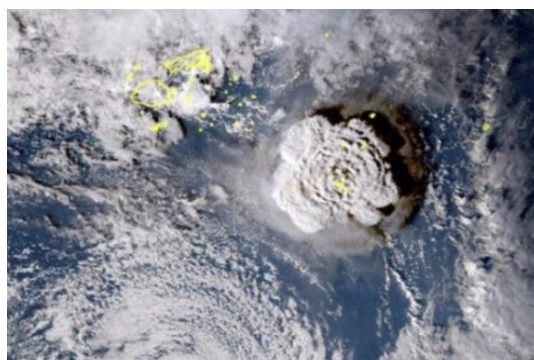
Tsunami due to the submarine landslide occur more usual in the coastal areas and islands in the seismic zones. This paper uses the one-dimensional integrated numerical model of submarine landslide - induced tsunami to simulate the real domain. The numerical results show that the tsunami waves are generated and propagated to the shallow water area and the deep water area with the different wave forms and heights. The internal friction component and the surface friction component of the soil source are investigated to understand their effects on the properties of waves generated.

**Keywords:** Numerical model, one-dimensional integrated model, submarine landslide, tsunami, real domain.

## 1. Giới thiệu

Sạt lở đất ngầm tạo sóng thần ngày càng phổ biến hơn do các hoạt động địa chấn như động đất [1] hay núi lửa phun trào [2]. Gần đây, từ ngày 14 tháng 1 năm 2022, núi lửa Hunga Tonga-Hunga Ha'apai ở quốc đảo

Tonga nằm giữa Thái Bình Dương phun trào đã gây ra sóng thần tại chính quốc gia này, các nước gần như Fiji, New Zealand [3] và thậm chí là đất nước cách xa 10.000km ở bên kia Thái Bình Dương như Chile [4]. Các núi lửa [2, 3] phun trào làm cho đất ngầm dưới đáy biển sạt lở dẫn tới hình thành những cơn sóng thần có chiều cao và năng lượng lớn gây ra thảm họa khủng khiếp ở những vùng gần hoặc rất xa nơi núi lửa phun trào.



Hình 1. Sóng thần do núi lửa phun trào tại quốc đảo Tonga [5]

Trong nghiên cứu này, mô hình số tích hợp sạt lở đất ngầm tạo sóng thần một chiều đã được thiết lập và kiểm chuẩn trong nghiên cứu [6] được ứng dụng để mô phỏng cho miền tính toán thực tế. Các thành phần nguồn do ma sát trong của đất và ma sát bề mặt sạt trượt được phân tích như nguyên nhân hình thành và phát triển của sóng thần.

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

Theo nghiên cứu [6], mô hình số tích hợp được thiết lập từ mô hình số mô phỏng sạt lở đất ngầm và mô hình số mô phỏng sóng thần với mối liên hệ giữa bề mặt đất sạt trượt và chiều sâu nước.

### 2.1. Hệ phương trình mô phỏng sạt lở đất ngầm

Hệ phương trình chủ đạo mô phỏng sạt lở đất ngầm được sử dụng là dạng hệ phương trình phi tuyến nước nông một chiều [7], [8]:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial(s-b)u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(s-b)u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (s-b)u^2 + \frac{1}{2}g(s-b)^2 \right] = g(s-b)(S_0 - S_f) \quad (2)$$

Trong đó, hai ẩn số  $s$  và  $u$  tương ứng là chiều cao bề mặt sạt lở đất ngầm và lưu tốc trung bình theo phương đứng của đất bị sạt lở theo phương ngang Ox,  $b$  là chiều cao đáy không xói,  $g$  là gia tốc trọng trường. Hai thành phần nguồn  $S_0$  và  $S_f$  tương ứng là độ dốc đáy không xói và độ dốc của các thành phần lực cản do ma sát.  $S_0$  ( $= -\partial b / \partial x = \tan \theta$ ) được xác định theo góc dốc  $\theta$  của đáy không xói,  $S_f$  được xác định từ góc ma sát trong  $\phi$  ( $\tan \phi = \mu$  là hệ số ma sát trong) và hệ số nhám Manning  $n$  (ma sát bề mặt sạt trượt) như sau:

$$S_f = S_{f1} + S_{f2} = \tan \phi \cos \theta + \frac{n^2 u |u|}{(s-b)^{4/3}} \quad (3)$$

Để mô phỏng sạt lở đất ngầm, hệ phương trình vi phân chủ đạo (1) và (2) được giải theo không gian và thời gian. Vi phân theo thời gian sử dụng phương pháp tường minh Runge-Kutta 3 bước bậc 3 [9]. Vi phân theo không gian sử dụng phương pháp hỗn hợp thể tích hữu hạn - sai phân hữu hạn [10].

### 2.2. Hệ phương trình mô phỏng sóng thần

Hệ phương trình chủ đạo mô phỏng sóng thần được sử dụng là hệ phương trình Boussinesq mở rộng một chiều với điều kiện biên đáy thay đổi theo thời gian [8], [11]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta) \bar{u}] + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{h^2}{6} \frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial x^2 \partial t} - \left( \frac{1}{2} + \gamma \right) h \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( h \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \right) \quad (5)$$

$$- \gamma g h \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( h \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) - \frac{h}{2} \frac{\partial^3 h}{\partial x \partial t^2} = 0$$

Trong đó, hai ẩn số  $\zeta$  và  $\bar{u}$  tương ứng là tung độ mặt nước và lưu tốc dòng chảy trung bình theo chiều sâu theo phương Ox.  $\gamma$  ( $=1/15$ ) là hệ số điều chỉnh giúp mô hình có thể tính toán mở rộng ra vùng

nước sâu hơn.  $h(x,t)$  là độ sâu nước thay đổi theo không gian và thời gian. Các đại lượng đã chú thích được thể hiện ở Hình 2. Hai thành phần cuối của phương trình (4) và (5) được coi như thành phần nguồn sạt lở đất ngầm gây ra sóng và có liên hệ với cao độ bề mặt sạt lở đất ngầm trong hệ phương trình (1), (2) như sau:

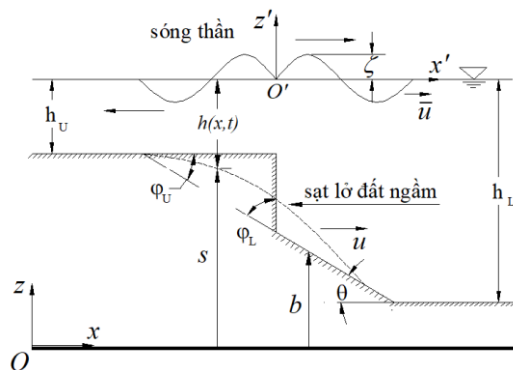
$$\frac{\partial h}{\partial x} = - \frac{\partial s}{\partial x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial s}{\partial t} \quad (7)$$

Hệ phương trình vi phân chủ đạo (4) và (5) được giải theo thời gian và không gian bằng phương pháp sai phân hữu hạn bậc cao để đảm bảo ổn định của mô hình Boussinesq [8], [12], [13].

Mô hình số tích hợp là kết hợp của hệ bốn phương trình (1), (2), (4), (5) với bốn ẩn số  $s$ ,  $u$ , và  $\zeta$ ,  $\bar{u}$  (Hình 2). Mô hình được kiểm chuẩn với số liệu thí nghiệm mô hình vật lý mô phỏng khối cát sạt lở dưới mặt nước và tạo sóng trong nghiên cứu [14]. Chi tiết kết quả kiểm chuẩn được thể hiện trong nghiên cứu [6] của tác giả.

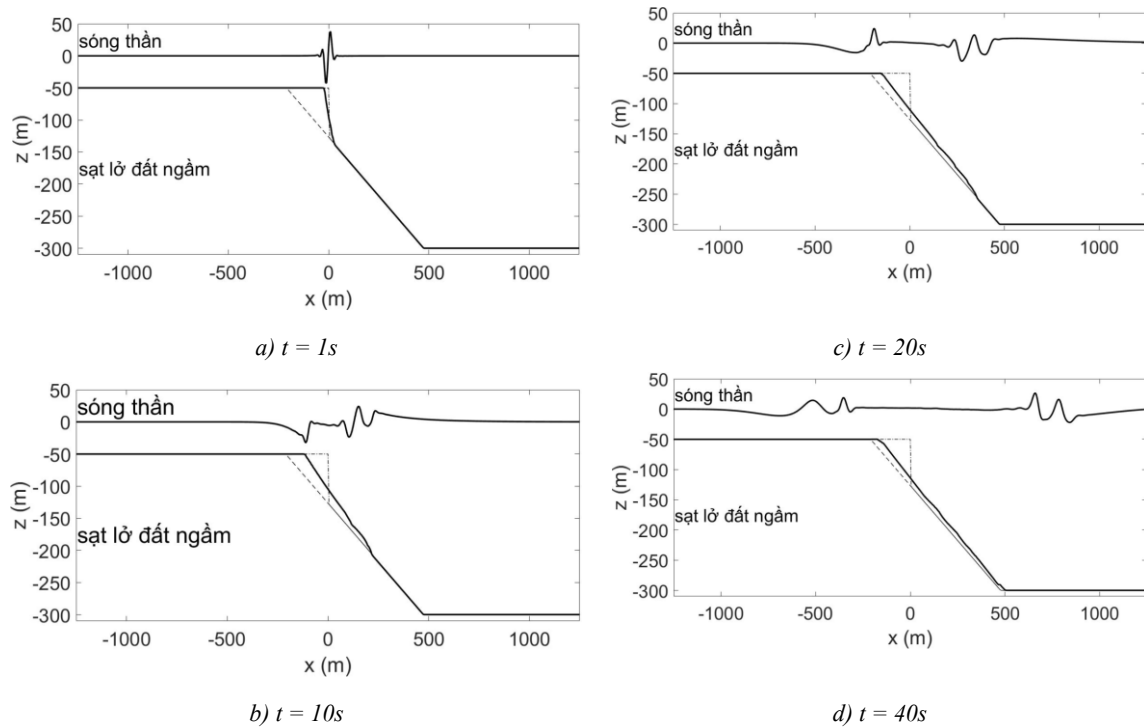
### 3. Ứng dụng mô phỏng bài toán sạt lở đất ngầm tạo sóng thần một chiều trong thực tế



**Hình 2. Miền tính toán áp dụng cho mô hình sạt lở đất ngầm tạo sóng thần**

Trong thực tế, sạt lở đất ngầm thường xảy ra ở những mái dốc có độ dốc lớn, khối đất sạt hướng về phía vùng nước sâu. Miền tính toán và các tham số được thể hiện ở Hình 2.

Trong đó,  $h_U = 50\text{m}$  là độ sâu nước ở vùng nước nông và  $h_L = 300\text{m}$  là độ sâu nước ở vùng nước sâu. Hình dạng các khối đất ngầm trong thực tế là khác nhau, trong nghiên cứu này tác giả dựa theo hình dạng khối đất đã thực hiện trong thí nghiệm vật lý [14] đã



Hình 3. Tung độ bề mặt sạt lở đất và sóng thần

được kiểm chuẩn trong nghiên cứu [6] để đảm bảo độ tin cậy của mô hình số. Khối đất ngầm có góc trên  $\varphi_U = 20^\circ$ , góc dưới  $\varphi_L = 70^\circ$  và chiều dài hai cạnh góc vuông theo phương ngang và phương đứng tương ứng là 210m và 76,4m. Khối đất ngầm hình tam giác vuông sạt xuống mái dốc nghiêng  $\theta = 20^\circ$ . Góc ma sát trong của đất là  $\phi = 24^\circ$  và hệ số nhám Manning  $n = 0,12 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  tiếp tục được sử dụng từ kết quả kiểm chuẩn mô hình trong nghiên cứu [6].

Kết quả mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần được thể hiện trên Hình 3 (a, b, c, d) tương ứng tại các thời điểm  $t = 1\text{s}$ ,  $10\text{s}$ ,  $20\text{s}$ ,  $40\text{s}$ . Trong mỗi hình, sóng thần được thể hiện phía bên trên và sạt lở đất ngầm được thể hiện phía bên dưới. Đường nét liền thể hiện bề mặt sóng và bề mặt sạt lở đất, đường nét đứt và đường nét chấm - gạch tương ứng thể hiện đáy không xói và bề mặt khối đất ngầm ban đầu ( $t = 0\text{s}$ ). Để thể hiện được rõ miền sóng thần và miền sạt lở đất ngầm trong cùng một hình vẽ, riêng biên độ sóng trong bài báo này đã được tăng lên 3 lần so với kết quả mô phỏng thực tế.

Ngay khi bề mặt khối đất ngầm sạt xuống ( $t = 1\text{s}$ ), mặt nước dao động rất nhanh và hình thành con sóng có biên độ khoảng 15m (Hình 3(a)). Sau đó, khi khối đất ngầm sạt xuống một nửa mái dốc tại thời điểm  $t = 10\text{s}$  (Hình 3(b)), con sóng chia tách thành hai thành phần. Thành phần sóng thứ nhất lan truyền về phía bên phải (nước sâu) với hai bụng sóng, thành

phần sóng thứ hai lan truyền về phía bên trái (nước nông) với một bụng sóng. Sóng lan truyền ở vùng nước sâu có biên độ lớn hơn sóng lan truyền ở vùng nước nông. Đó là vì khối đất ngầm sạt lở trên mái dốc hướng về vùng nước sâu, do đó năng lượng của khối đất ngầm sạt xuống được truyền nguyên vẹn cho thành phần sóng lan truyền ở vùng nước sâu này. Ngược lại, thành phần sóng lan truyền ở vùng nước nông có biên độ sóng nhỏ hơn và số bụng sóng tăng lên như thể hiện trên Hình 3(c) và Hình 3(d).

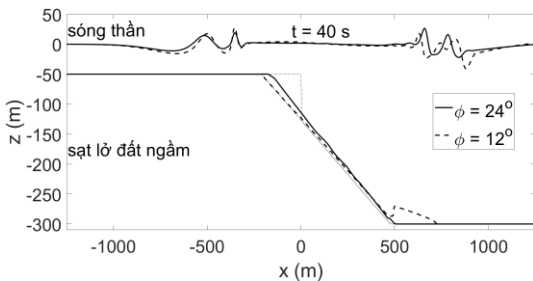
#### 4. Phân tích độ nhạy thành phần lực cản ma sát của sạt lở đất ngầm tới đặc điểm sóng thần

Hai thành phần lực cản do ma sát được đặc trưng bởi góc ma sát trong  $\phi$  và hệ số nhám Manning  $n$ . Hai giá trị này được lấy theo thí nghiệm kiểm chuẩn với số liệu từ mô hình vật lý sạt lở cát ngầm tạo sóng trong nghiên cứu [6]. Trong thực tế, tùy theo tính chất của loại đất sạt lở và bề mặt đáy không xói của địa hình đáy biển, các giá trị này có thể thay đổi. Trong nghiên cứu này, khi khảo sát độ nhạy của các thành phần lực cản ma sát này, các giá trị góc ma sát trong và hệ số nhám được giả sử giảm đi đến mức có thể dễ dàng quan sát được sự tăng của tung độ mặt sóng (do biên độ sóng ở mục 3 đã được tăng 3 lần để dễ quan sát trong cùng miền với sạt lở đất ngầm). Từ đó, hai kịch bản phân tích được đưa ra như Bảng 1.

**Bảng 1. Các kịch bản phân tích độ nhạy thành phần lực cản ma sát của sạt lở đất tới sóng thần**

Kịch bản		$\phi$ (°)	$n$ ( $m^{-1/3}s$ )
KB1	TH1	24	0,12
	TH2	12	
KB2	TH1	24	0,12
	TH3		0,06

Kịch bản 1 giữ nguyên giá trị hệ số nhám Manning  $n = 0,12m^{-1/3}s$ , khảo sát giá trị của góc ma sát trong  $\phi = 24^\circ$  (TH1) và giá trị của góc ma sát trong giảm đi 2 lần  $\phi = 12^\circ$  (TH2). Tương tự, kịch bản 2 giữ nguyên giá trị góc ma sát trong  $\phi = 24^\circ$ , khảo sát giá trị hệ số nhám Manning  $n = 0,12m^{-1/3}s$  (TH1) và  $n = 0,06m^{-1/3}s$  (TH3).



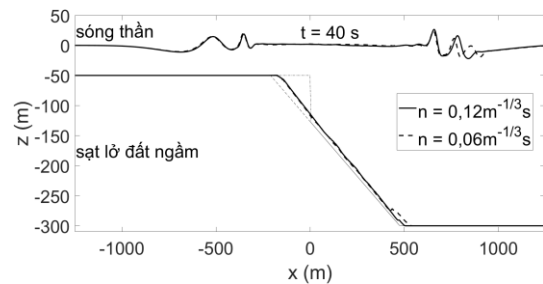
**Hình 4. Tung độ bề mặt sạt lở đất ngầm và sóng thần trong hai trường hợp góc ma sát trong  $\phi = 24^\circ$  (nét liền) và  $\phi = 12^\circ$  (nét đứt) tại thời điểm  $t = 40s$**

Hình 4 thể hiện tung độ bề mặt sạt lở đất ngầm và tung độ mặt sóng cho kịch bản 1 tại thời điểm  $t = 40s$ . Đường nét liền thể hiện cho kết quả TH1 và đường nét đứt thể hiện cho kết quả TH2. Về tung độ sạt lở đất ngầm, trường hợp góc ma sát trong của đất lớn (TH1), khối đất vẫn còn tiếp tục sạt trên mái dốc. Nhưng với trường hợp góc ma sát trong nhỏ kém 2 lần (TH2), dẫn đến thành phần lực cản do ma sát trong giảm đi làm tăng vận tốc sạt, khối đất sạt đã gần như nằm hoàn toàn trên mặt phẳng ngang ở vùng nước sâu. Do đó, vận tốc sạt lở đất nhanh hơn đã truyền năng lượng lớn hơn đến sóng, làm cho chiều cao sóng lớn nhất tăng gấp 1,6 lần ở vùng nước nông và 1,3 lần ở vùng nước sâu.

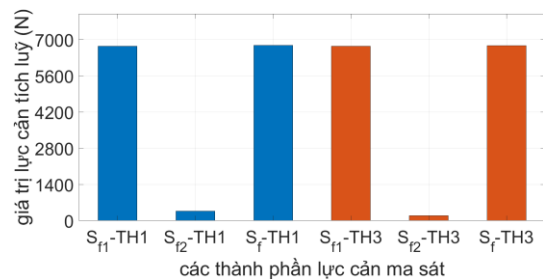
Hình 5 thể hiện tung độ bề mặt sạt lở đất ngầm và tung độ mặt sóng cho kịch bản 2 cũng tại thời điểm  $t = 40s$ .

Giá trị hệ số nhám cũng được giả sử giảm đi 2 lần ở TH3 (giả sử bề mặt mái dốc sạt nhẵn hơn), nhưng có thể thấy tung độ bề mặt sạt lở đất (nét đứt) không thay đổi nhiều so với trường hợp chưa thay đổi hệ số nhám (nét liền). Do đó, năng lượng sạt lở đất truyền đến năng lượng sóng gần như nhau, dẫn tới kết quả

chiều cao sóng trong trường hợp hệ số nhám nhỏ (TH3) không thay đổi nhiều so với trường hợp hệ số nhám lớn (TH1). Điều này được lý giải do ảnh hưởng của thành phần ma sát bề mặt sạt trượt ( $S_{f2}$ ) là nhỏ so với ảnh hưởng của ma sát trong ( $S_{f1}$ ) của đất ngầm dưới đáy biển trong tổng lực cản chuyển động của đất ngầm ( $S_f$ ) được thể hiện trong phương trình (3) và (2). Hình 6 thể hiện mức độ ảnh hưởng của hai thành phần lực cản này trong kịch bản 2 cho hai trường hợp  $n = 0,12m^{-1/3}s$  (TH1) và  $n = 0,06m^{-1/3}s$  (TH3) tại thời điểm  $t = 40s$ . Để có thể hiển thị các giá trị trên cùng một hình vẽ, vì giá trị thành phần lực cản ma sát bề mặt nhỏ, các giá trị  $S_{f2}$ -TH1 và  $S_{f2}$ -TH3 đã được nhân lên 10 lần.



**Hình 5. Tung độ bề mặt sạt lở đất ngầm và sóng thần trong hai trường hợp hệ số Manning  $n = 0,12 m^{-1/3}s$  (nét liền) và  $n = 0,06 m^{-1/3}s$  (nét đứt) tại thời điểm  $t = 40s$ .**



**Hình 6. Ảnh hưởng của các thành phần lực cản ma sát trong hai trường hợp hệ số Manning  $n = 0,12 m^{-1/3}s$  và  $n = 0,06 m^{-1/3}s$  tại thời điểm  $t = 40s$ .**

Trong trường hợp  $n = 0,12m^{-1/3}s$ , giá trị tích lũy của thành phần lực cản ma sát trong ( $S_{f1}$ -TH1) lớn hơn 186 lần so với giá trị tích lũy thành phần lực cản ma sát bề mặt ( $S_{f2}$ -TH1). Đặc biệt khi giá trị  $n = 0,06m^{-1/3}s$  (độ nhám giảm đi 2 lần), giá trị tích lũy năng lượng thành phần lực cản ma sát trong ( $S_{f1}$ -TH3) lớn hơn 350 lần so với giá trị tích lũy thành phần lực cản ma sát bề mặt ( $S_{f2}$ -TH3). Do đó, khi giá trị độ nhám bề mặt thay đổi thì tung độ bề mặt sạt lở đất ngầm cũng như chiều cao sóng hình thành thay đổi không đáng kể như phân tích ở Hình 5.



## 5. Kết luận

Trong bài báo này, mô hình số tích hợp sạt lở đất ngầm tạo sóng thần một chiều ứng dụng mô phỏng miền tính toán thực tế được giới thiệu. Mô hình này là sự kết hợp giữa mô hình sạt lở đất ngầm sử dụng hệ phương trình phi tuyến nước nông và mô hình sóng sử dụng hệ phương trình Boussinesq mở rộng. Mô hình sạt lở đất ngầm xét tới lực cản ma sát trong của đất ngầm và lực cản ma sát bề mặt trượt đất ngầm trong phương trình động lượng. Kết quả mô phỏng cho miền tính toán thực tế thể hiện tung độ bề mặt sạt lở đất ngầm và tung độ bề mặt sóng thần hình thành và lan truyền theo thời gian ở vùng nước nông và vùng nước sâu là khác nhau. Ảnh hưởng động lực học của thành phần lực cản ma sát trong của đất ngầm và lực cản ma sát bề mặt trượt tới tung độ mặt sóng được phân tích trong bài báo này. Trong đó, thành phần lực cản do ma sát bề mặt ảnh hưởng không lớn tới kết quả mô phỏng sạt lở đất ngầm cũng như chiều cao sóng thần. Mô hình hai chiều sẽ được phát triển trong tương lai để có thể mô phỏng dự báo chính xác cho các địa hình phức tạp hơn trong thực tế.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. R. Tappin et al. (2014), *Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami?*, Mar. Geol., Vol.357, pp.344-361.  
doi: 10.1016/j.margeo.2014.09.043.
- [2] A. Paris et al. (2019), *Numerical modeling of the December 22, 2018 Anak Krakatau landslide and the following tsunami in Sunda Strait, Indonesia*, in OCEANS 2019 - Marseille, Marseille, France, pp.1-6.  
doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867270.
- [3] Nguyệt Anh (2022), *Núi lửa Tonga phun trào gây ra sóng thần tại các quốc gia ở Nam Thái Bình Dương*-baodantoc.vn,[Online].  
Available: <https://baodantoc.vn/nui-lua-tonga-phun-trao-gay-ra-song-than-tai-cac-quoc-gia-o-nam-thai-binh-duong-1642321006886.htm>
- [4] Văn Khoa (2022), *Sóng thần cao 15 m do núi lửa phun trào tàn phá 3 đảo ở Tonga*, thanhnien.vn, [Online].  
Available: <https://thanhnien.vn/song-than-cao-15-m-do-nui-lua-phun-trao-tan-pha-3-dao-o-tonga-post1422954.html>
- [5] Hồng Anh (2022), *Vụ phun trào núi lửa 'nghìn năm có một' ở Tonga có thể kéo theo nhiều thảm họa*, vov.vn, [Online].  
Available: <https://vov.vn/the-gioi/quan-sat/vu-phun-trao-nui-lua-nghin-nam-co-mot-o-tonga-co-the-keo-theo-nhieu-tham-hoa-post919075.vov>

- phun-trao-nui-lua-nghin-nam-co-mot-o-tonga-co-the-keo-theo-nhieu-tham-hoa-post919075.vov
- [6] P. Văn Khôi (2022), *Mô hình số tích hợp mô phỏng sạt lở đất ngầm tạo sóng thần: Kiểm chuẩn cho bài toán một chiều*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 69 (01/2022), tr.62-66.
- [7] V. K. Pham, C. Lee, and V. N. Vu (2019), *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.  
doi: 10.9765/KSCOE.2019.31.4.229.
- [8] V. K. Pham, V. N. Vu, and C. Lee (2019, 2020), *Numerical simulation of tsunami due to submarine landslide using extended Boussinesq equations*, Proc. 10th Int. Conf. Asian Pac. Coasts APAC 2019 Hanoi Vietnam Sept.
- [9] S. Gottlieb, C.-W. Shu, and E. Tadmor (2001), *Strong Stability-Preserving High-Order Time Discretization Methods*, SIAM Rev., Vol.43, No.1, pp.89-112.  
doi: 10.1137/S003614450036757X.
- [10] D. Dutykh, T. Katsaounis, and D. Mitsotakis (2011), *Finite volume schemes for dispersive wave propagation and runup*, J. Comput. Phys., Vol.230, No.8, pp.3035-3061.  
doi: 10.1016/j.jcp.2011.01.003.
- [11] C. Lee and V. N. Vu (2015), *Development of extended Boussinesq equations to simulate tsunami generation and propagation*, Proc. Coast. Ocean Eng. Korea South Korea, pp.1-3.
- [12] G. Wei and J. T. Kirby (1995), *Time-Dependent Numerical Code for Extended Boussinesq Equations*, J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng., Vol.121, No.5, pp.251-261.  
doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1995)121:5(251).
- [13] V. N. Vu, C. Lee, and T.-H. Jung (2018), *Extended Boussinesq equations for waves in porous media*, Coast. Eng., Vol.139, pp.85-97.  
doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.04.023.
- [14] S. A. Rzedkiewicz (1997), C. Mariotti, and P. Heinrich, *Numerical Simulation of Submarine Landslides and Their Hydraulic Effects*, J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng., Vol.123, No.4, pp.149-157.  
doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1997)123:4(149).

Ngày nhận bài:	04/3/2022
Ngày nhận bản sửa lần 01:	14/3/2022
Ngày nhận bản sửa lần 02:	12/4/2022
Ngày duyệt đăng:	08/5/2022