

# THỦ NGHIỆM ÁP DỤNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH PHÁT TRIỂN VÀ LAN TRUYỀN CỦA SÓNG THẦN TẠI VIỆT NAM

TS. Trần Hồng Lam, ThS. Nguyễn Bá Thuỷ  
ThS. Hoàng Trung Thành, CN. Bùi Mạnh Hà  
CN. Nguyễn Thanh Trang  
Trung tâm Khí tượng Thuỷ văn Biển

## 1. Mở đầu

Sóng thần là một loạt các đợt sóng được hình thành khi một khối nước bị dịch chuyển nhanh chóng trên một quy mô lớn. Các trận động đất, các dịch chuyển địa chất lớn bên trên hay bên dưới mặt nước, hiện tượng núi lửa phun trào hoặc những vụ va chạm thiên thạch đều có khả năng gây ra sóng thần.

Một trong những đặc tính của sóng thần là chứa năng lượng rất lớn và khả năng lan truyền nhanh, kể cả tại những vùng xa. Lấy ví dụ Nhật Bản là đất nước có tần suất động đất mạnh và nguy cơ chịu ảnh hưởng bởi sóng thần vào hàng nhất thế giới. Tuy nhiên, Nhật Bản không những phải đối mặt với thảm họa sóng thần gây ra bởi những trận động đất ngay tại vùng biển của mình mà còn phải đối diện với nguy cơ sóng thần đến từ khu vực rất xa như Hawaii-Alasca, rãnh chìm bên bờ Thái Bình Dương của Nam Mỹ. Trận động đất với cường độ 9.5 độ richter vào ngày 24 tháng 5 năm 1960 tại Chile đã gây nên sóng thần và sau 17 giờ đã lan truyền qua Thái Bình Dương vào bờ biển Nhật Bản gây nên sóng leo có độ cao hơn 5m và ít nhất có gần 129 người thiệt mạng và mất tích, 2183 ngôi nhà bị phá huỷ.

Trận động đất Ấn Độ Dương năm 2004 với cường độ ước lượng khoảng từ 8.9-9.3 trên thang độ Richter đã gây ra một loạt các cơn sóng thần khủng khiếp ngày 26 tháng 12 năm 2004 cướp đi sinh mạng khoảng 230.000

người, riêng Indonesia là 168.000 người, biến nó trở thành trận sóng thần gây nhiều thiệt hại về người nhiều nhất trong lịch sử. Cơn sóng thần này đã giết hại nhiều người dân ở cả vùng lân cận như Thái Lan, Malaysia cho tới những nơi cách xa hàng nghìn kilimét tại Bangladesh, Ấn Độ, Sri Lanka và thậm chí tới cả Somali, Kenya và Tanzania ở Đông Phi.

Với tính chất nghiêm trọng và cấp bách của hiện tượng, để giảm thiểu thiệt hại do sóng thần gây ra chúng ta cần biết được thời gian, độ cao của sóng thần và mức độ ngập lụt do sóng thần khi lan truyền đến vùng biển ven bờ để từ đó có thể đưa ra các phương án di dời và phòng tránh. Mục đích của bài báo này là phát triển mô hình toán mô phỏng lan truyền và ngập lụt do sóng thần gây ra. Áp dụng mô hình tính toán cho một số kịch bản động đất gây sóng thần nhằm đánh giá khả năng của mô hình trong việc mô phỏng sóng thần.

## 2. Nguy cơ động đất và sóng thần tại Việt Nam

Theo số liệu thống kê nhiều năm (1790-1990) thì có tới 90.3% trận sóng thần được gây nên bởi động đất. Tại Việt Nam đã có nhiều câu chuyện lưu truyền về sóng thần xuất hiện như tại Huế ngày 11 tháng 9 năm 1904, tại Đà Nẵng năm 1964. Một hiện tượng đáng chú ý nữa đã xảy ra ở Tuy Hoà - Nha Trang ngày 4 tháng 5 năm 1991, trước ngày núi lửa Pinatubo - Philippin phun trào. Nước biển rút ra nhanh,

---

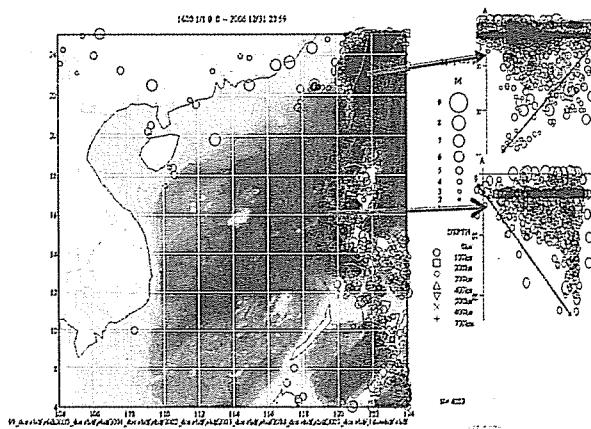
Người phản biện: TS. Nguyễn Ngọc Huấn

khoảng 2m so với bình thường. Tuy nhiên, hiện vẫn chưa có bằng chứng rõ ràng để khẳng định hay phủ nhận những thông tin này.

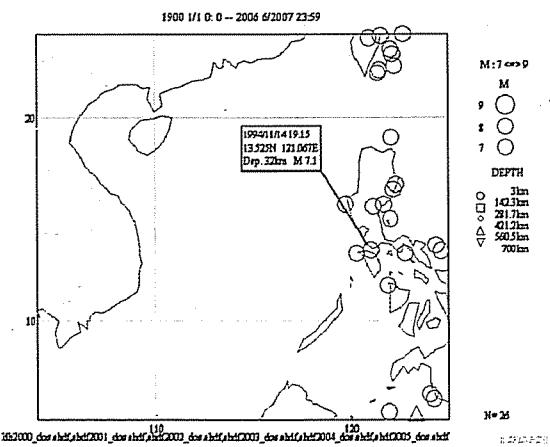
Thực tế trong dân gian nhiều khi vẫn nhầm lẫn sóng thần với hiện tượng nước dâng cao do các yếu tố khí tượng. Nếu dựa trên các số liệu thống kê mực nước ven bờ thì với độ tuổi của các trạm hải văn nước ta (có tuổi từ đầu những năm 1960) thì không thể khẳng định là Việt Nam không có sóng thần nếu chưa quan trắc thấy có sóng thần tại các trạm này. Vì theo luận điểm của giáo sư Ando một chuyên gia hàng đầu về địa chấn thuộc Đại học Nagoya-Nhật Bản thì để xem xét một khu vực nào đó liệu có sóng thần hay không thì cần

phải có số liệu quan trắc về địa chấn và mực nước trong khoảng thời gian 500 năm mới có thể khẳng định được?

Hình 1 mô tả các trận động đất tại Việt Nam và khu vực lân cận từ năm 1600 đến 2005, hình 2 mô tả phân bố các trận động đất có cường độ từ 7.0 Richter trở lên (mức cường độ có khả năng gây sóng thần). Những số liệu này khẳng định rằng mặc dù không nằm trong khu vực vành đai lửa hay nói cách khác là khả năng sóng thần sinh ra tại vùng thềm lục địa Việt Nam là rất nhỏ nhưng tiềm ẩn về nguy cơ xuất hiện sóng thần do động đất mạnh tại rãnh chìm phía tây Manila - Philipines và Đài Loan cũng rất cao.



**Hình 1. Phân bố động đất tại Việt Nam và khu vực lân cận từ 1600-2005**



**Hình 2. Phân bố các trận động đất có cường độ từ 7.0 độ Richter trở lên**

Nếu nói về bằng chứng sóng thần thì rất có thể những trận động đất lớn (cường độ lớn hơn 7.0 độ Richter) kể trên đã gây sóng thần tại Việt Nam nhưng chúng ta không có tài liệu nào ghi nhận được. Trận động đất 7.1 độ Richter tại đảo Mindoro - Philippines ngày 14 tháng 11 năm 1994 đã gây sóng thần cao tới 7m và làm gần 100 người chết. Thủ giả thiết rằng nếu tâm của trận động đất này dịch lên phía trên hoặc xuống dưới đảo Mindoro thì có thể Việt Nam sẽ ghi nhận được sóng thần. Theo kết quả nghiên cứu của các nhà địa chấn học tại Nhật Bản và Philippines cùng chung kết quả nhận định với các nhà khoa học Việt

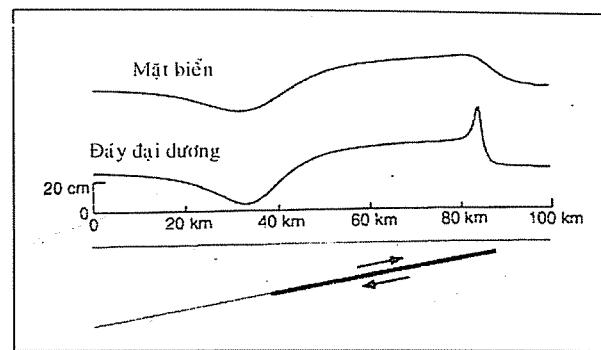
Nam thì khả năng động đất lớn nhất tại rãnh chìm Philippines có thể đạt tới 9.0 độ Richter.

Từ những phân tích và nhận định nêu trên có thể khẳng định rằng Việt Nam cần thiết phải đầu tư cho nghiên cứu, tính toán mô phỏng sóng thần theo các kịch bản động đất kết hợp với hệ thống trạm quan trắc địa chấn, các trạm quan trắc mực nước tự động và hệ thống trạm phao ngoài khơi đủ dày để từ đó xây dựng hệ thống cảnh báo là việc làm rất cần thiết.

## 2. Mô hình số trị mô phỏng sóng thần tại Việt Nam

### a. Mô hình động đất sinh ra sóng thần

Không phải trận động đất nào cũng gây sóng thần, khả năng tạo ra sóng thần phụ thuộc vào nhiều yếu tố như độ sâu của tâm chấn, hướng của động đất, góc trượt cũng như quy mô và kích cỡ của trận động đất. Mô hình mô phỏng quá trình động đất gây sóng thần đã được Okada (1985) mô phỏng theo các tham số động đất nói trên. Đây là mô hình chuẩn và hầu hết các tính toán đều áp dụng.



Hình 3. Mô phỏng động đất gây sóng thần

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{1/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{1/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Trong đó: h: là độ cao sóng được tính từ mực trung bình; D: tổng bề dày lớp nước ( $D = h + h'$ ); g: gia tốc trọng trường; x, y: trục theo kinh và vĩ độ; t: thời gian; M, N : dòng toàn phần theo hướng x và y; n: hệ số ma sát đáy.

Các phương trình chuyển động ở trên là các phương trình phi tuyến được áp dụng cho vùng nước nông ven bờ. Tại vùng nước sâu khi mà độ cao sóng rất nhỏ so với độ sâu, lúc đó bài toán có thể sử dụng lý thuyết biên độ nhỏ và bỏ qua ảnh hưởng của ma sát đáy khi đó hệ phương trình được rút gọn như sau:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Đây là phương trình tuyến tính thường được áp dụng cho mô phỏng sóng thần vùng nước sâu. Trong vùng nước nông ven bờ, hệ phương trình phi tuyến ban đầu sẽ được áp dụng.

Điều kiện ban đầu: nguồn xung dâng nước do động đất được xác định theo mô hình Okada (1985), trong đó sự nâng hạ đột ngột của đáy biển do động đất gây ra được sử dụng để xác định độ dâng mực nước ban đầu.

Điều kiện biên: do vùng mô phỏng lan truyền sóng thần là vùng biển hữu hạn nên tồn tại các “biên lỏng giả định” nối giữa vùng nghiên cứu với vùng nước phía ngoài, sử dụng điều kiện phát xạ tự do của sóng dài:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

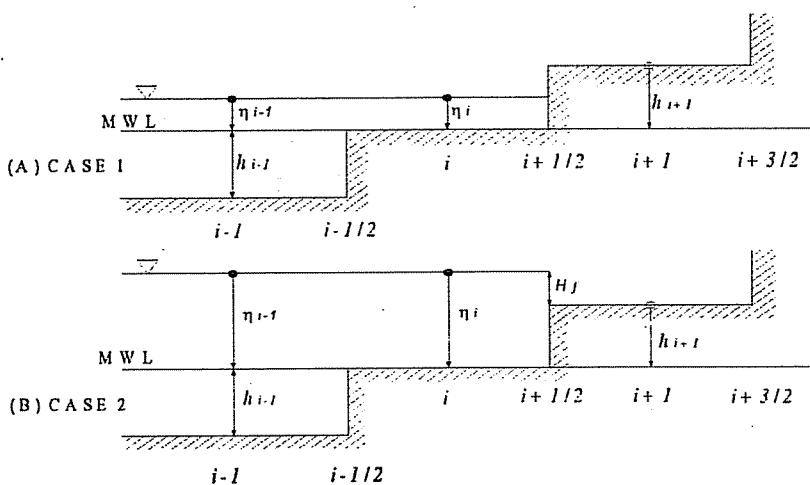
Sơ đồ số: sử dụng phương pháp sai phân hữu hạn để giải hệ phương trình xuất phát, trong đó sơ đồ Leap-frog được sử dụng cho đạo hàm thời gian và sơ đồ sai phân ngược dòng sử dụng cho các thành phần phi tuyến không gian.

Với hệ số ma sát đáy thì trong nghiên cứu và tính toán sóng thần yếu tố này vẫn chưa được nghiên cứu nhiều cho từng khu vực. Cũng cần nói thêm rằng hiện tượng sóng đó đã không được mô phỏng trong mô hình, vẫn

đề phức tạp này có thể sẽ được trình bày trong bài báo sau.

### b. Xử lý biên di động tính ngập lụt do sóng thần gây ra

Để mô phỏng sự ngập lụt gây bởi sóng thần, điều kiện về biên di động đã được sử dụng. Trên hình 4 phác họa quá trình xử lý biên di động cho trường hợp một chiều theo phương x, theo phương y quá trình này diễn ra tương tự. Trong đó  $H_f$  biểu diễn độ ngập lụt, giá trị độ sâu là dương tại các “điểm ướt” và âm tại các “điểm khô”. Trong mô hình, đường bờ được xác định là danh giới giữa “điểm khô” và “điểm ướt”, tại các điểm này độ cao mực nước tổng cộng được cập nhật sau mỗi bước thời gian tính toán. Khi độ cao mực nước tổng cộng lớn hơn độ cao tại “điểm khô” cận kề thì đường biên được di chuyển vào sâu vùng đất khô.



**Hình 4. Phác họa biên di động dùng trong mô hình**

- Nếu  $H_{i+1} \leq 0$  và  $h_{i+1} + \eta_i \leq 0$ , đường danh giới vẫn nằm giữa điểm  $i$  và  $\eta_{i+1}$ , dòng toàn phần tại  $i+1/2$  bằng không;

- Nếu  $H_{i+1} \leq 0$  và  $h_{i+1} + \eta_i > 0$ , đường danh giới được dịch chuyển vào 1 vị trí nào đó giữa điểm  $i+1$  và  $i+2$ , dòng đi qua đây xuất hiện và độ cao ngập lụt được tính:  $H_f = h_{i+1} + \eta_i$ ;

- Nếu  $H_{i+1} \geq 0$ , đường danh giới dịch chuyển vào vị trí giữa  $i+1$  và  $i+2$ , dòng qua đây khác không và độ sâu ngập lụt:

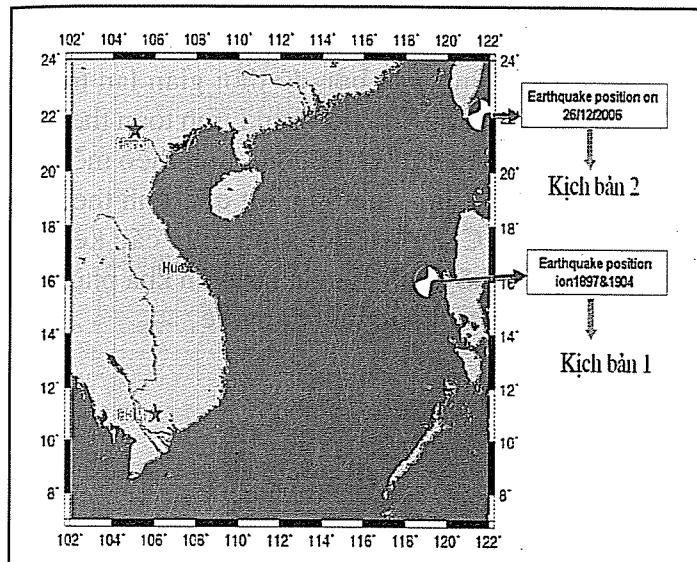
$$H_f = \max(h_{i+1} + \eta_i, h_{i+1} + \eta_{i+1}).$$

### 3. Một số kết quả mô phỏng sóng thần tại Việt Nam

Miền tính trong mô hình mô phỏng sóng thần tại Việt Nam được giới hạn trong phạm vi  $6^{\circ}\text{N} - 24^{\circ}\text{N}$  và  $104^{\circ}\text{E} - 122^{\circ}\text{E}$ . Trường độ sâu sử dụng trong mô hình được lấy từ trường địa hình do Đại học California, Sandiego thiết lập với bước lưới 2 phút (Etopo2).

Do tại Việt Nam chúng tôi không có các thông tin chính xác về sóng thần nên không có các số liệu về địa chấn cũng như mực nước quan trắc để kiểm chứng các mô hình tính toán. Như đã phân tích thì nguy cơ sóng thần lớn nhất tại Việt Nam là bắt nguồn từ hai khu vực có hoạt động địa chấn mạnh là phía tây Philipines và Đài Loan. Trong bài báo này, Nhóm tác giả đã sử dụng hai kịch bản về động

đất gây sóng thần tại hai này để mô phỏng sóng thần lan truyền vào Việt Nam, xác định thời gian lan truyền cũng như độ cao sóng tại các vùng ven bờ và hải đảo ứng với mỗi kịch bản về động đất. Hai vị trí động đất đã chọn được lấy trùng với vị trí các trận động đất lớn trong lịch sử. Trong đó, ở vị trí phía tây Philippines là trận động đất năm 1904 mà nhiều lưu truyền là đã gây sóng thần tại Việt Nam, còn kịch bản tại Đài Loan là vị trí trận động đất ngày 26 tháng 12 năm 2006, mặc dù không gây sóng thần nhưng lần đầu tiên Việt Nam đưa ra cảnh báo sóng thần. Các tham số về động đất này sẽ tương đương với trận động đất có cường độ 8.5 Richter ở độ sâu 10km, đây là cường độ thường gây ra sóng thần tại phía tây Philipines. Vị trí cùng các thông số về động đất ứng với hai kịch bản để mô phỏng sóng thần lan truyền vào Việt Nam được thể hiện trong hình 5 và bảng 1



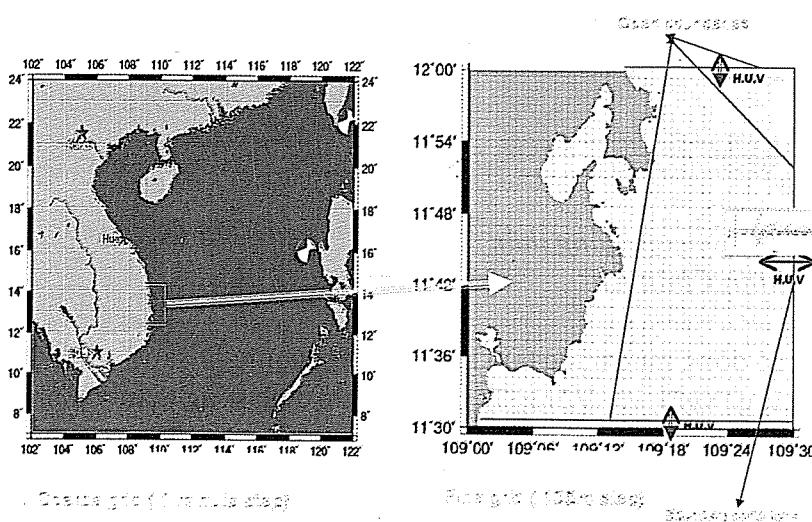
**Hình 5. Vị trí hai kịch bản động đất gây sóng thần để mô phỏng**

**Bảng 1. Các tham số của hai kịch bản động đất gây sóng thần để mô phỏng**

Kịch bản	Hướng dịch ( $^{\circ}$ )	Góc trượt ( $^{\circ}$ )	Chiều dài (km)	Chiều rộng (m)	Độ dịch chuyển ngang (m)	Độ dịch chuyển thẳng đứng (m)
1	180	45	300	80	12	7
2	195	45	300	80	12	7

Để mô phỏng quá trình ngập lụt gây bởi sóng thần tại vùng ven bờ thì một lưới tính có độ phân giải cao (bước lưới là 100m) khá chi tiết về địa hình vùng ven bờ cũng như trên bờ đã được thiết lập. Mô hình đã sử dụng lưới

lồng với các kết quả tính toán của lưới thô sẽ làm biên đầu vào cho lưới tinh. Tại các biên, các giá trị về độ cao sóng, dòng toàn phần hướng x và y theo thời gian sẽ là các giá trị biên cho lưới tinh tinh. Theo kịch bản I, tức là

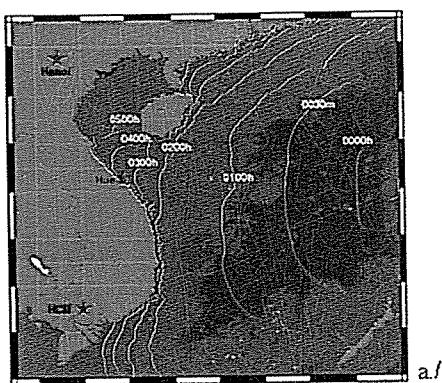


**Hình 6. Mô phỏng lưới lồng tinh kịch bản ngập lụt**

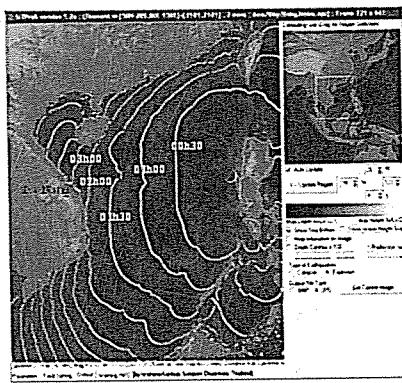
nếu có động đất gây sóng thần tại phía tây Philippines thì sau khoảng một giờ sóng sẽ lan truyền vào khu vực quần đảo Hoàng Sa và Trường Sa. Khoảng hai giờ sau sóng sẽ vào đến vùng biển Miền Trung, từ vĩ tuyến  $11^{\circ}\text{N}$  đến vĩ tuyến  $14^{\circ}\text{N}$ . Ngoài ra, do ảnh hưởng của địa hình và đường bờ, thời gian sóng đến các khu vực phía bắc vĩ tuyến  $14^{\circ}\text{N}$  và nam vĩ

tuyến  $11^{\circ}\text{N}$  sẽ chậm hơn.

Trên hình 7 là bản đồ thời gian lan truyền sóng thần ứng với kịch bản I tính toán theo mô hình nghiên cứu và kết quả tính theo mô hình của Thái Lan, hình 8 là kết quả tính theo mô hình của Châu Âu. So sánh giữa các kết quả này cho thấy thời gian lan truyền khá phù hợp, không có sự khác biệt đáng kể.

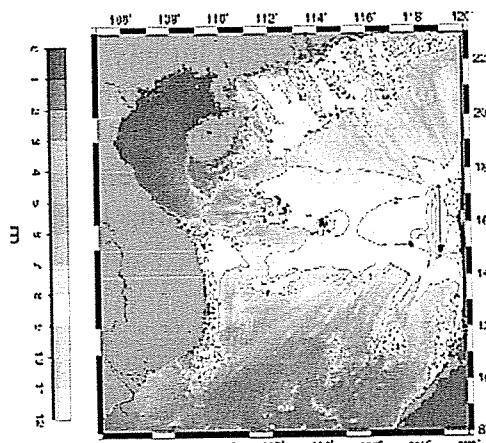
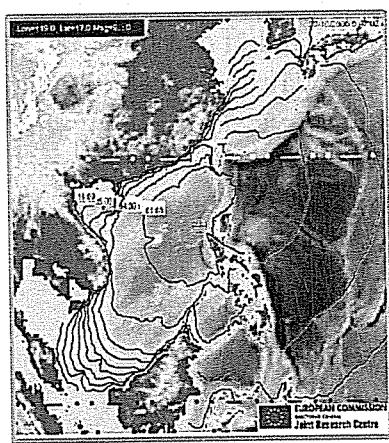


a./



b./

**Hình 7. Thời gian lan truyền của sóng thần với kịch bản I**  
a. Kết quả mô hình nghiên cứu; b. Kết quả mô hình của Thái Lan

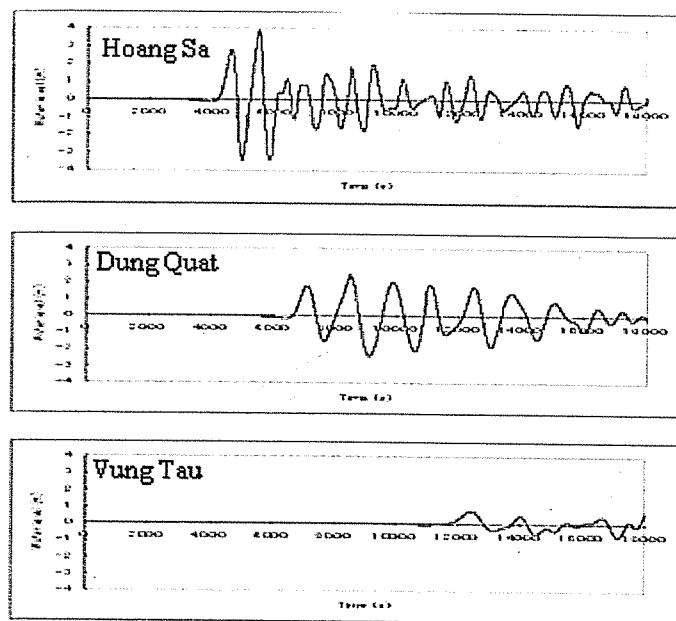


**Hình 8. Thời gian lan truyền của sóng thần với kịch bản I - Mô hình Châu Âu**

**Hình 9. Trường độ cao sóng thần cực đại với kịch bản I**

Trên hình 10 là dao động mực nước tại khu vực Hoàng Sa, Quảng Ngãi và Vũng Tầu. Khi có động đất xảy ra tại khu vực Philippines (kịch bản I), thì khoảng gần 1 giờ sau thì sóng thần lan truyền đến khu vực Hoàng Sa. Ban đầu nó gây ra hiện tượng nước rút với biên độ không lớn lắm và khoảng 30

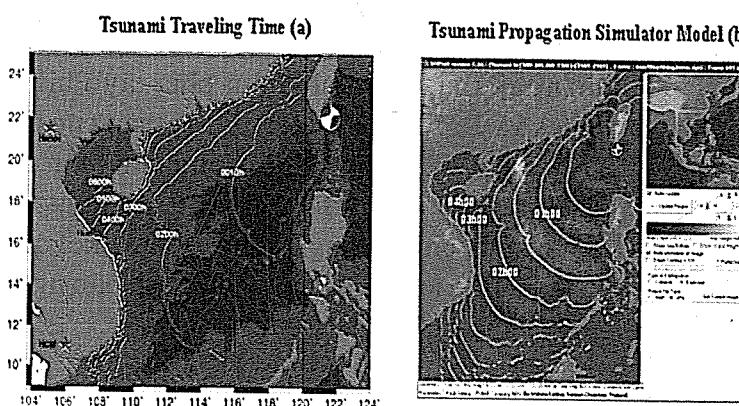
phút sau, tức là sau 1 giờ 30 phút khi có động đất thì đỉnh sóng thần lớn nhất tràn đến với độ cao khoảng 4m. Vùng ven bờ khu vực Quảng Ngãi độ cao sóng thần cực đại vào khoảng gần 3m, tại Vũng Tầu có độ cao khá nhỏ, khoảng 1m do năng lượng sóng đã bị phân tán và tiêu tán.



**Hình 10. Dao động mực nước tại 03 điểm dự báo - kịch bản I (Hoàng Sa - Dung Quất và Vũng Tàu)**

Với kịch bản II, động đất xuất hiện tại Đài Loan thì sau khoảng hai giờ sóng sẽ đến quần đảo Hoàng Sa và Trường Sa và khoảng ba giờ sẽ vào đến vùng biển Miền Trung và tiếp tục lan truyền đến các vùng phía trên và phía dưới khu vực này. Vì vị trí tâm trấn (kịch bản II) ở xa vùng biển Việt Nam hơn so với kịch bản I và do ảnh hưởng của địa hình, đường bờ, sóng thần tại Đài Loan sẽ vào đến bờ biển nước ta chậm hơn sóng thần tại Philippines khoảng một giờ.Thêm vào đó là sự tồn tại của quần đảo

Hoàng Sa đã làm giảm đi đáng kể năng lượng sóng thần cũng như làm chậm thời gian truyền sóng trước khi nó tiếp cận vào bờ biển Việt Nam. Cũng cần nhấn mạnh rằng tại các khu vực nước sâu, vận tốc lan truyền của sóng thần chỉ phụ thuộc vào độ sâu của cột nước mà không phụ thuộc vào độ cao sóng ban đầu. Tuy nhiên, khi vào vùng nước nông ven bờ thì vận tốc lan truyền không còn chỉ còn phụ thuộc vào độ sâu nữa.



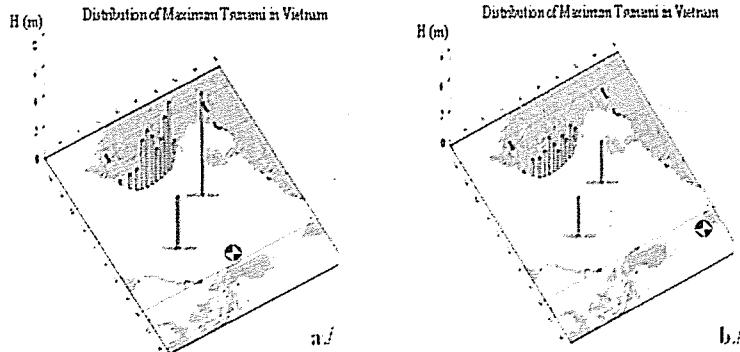
**Hình 11. Thời gian lan truyền của sóng thần với kịch bản II**  
a./ Mô hình nghiên cứu;  
b./ Mô hình của Thái Lan

Về phân bố độ cao sóng thần tính theo kịch bản I thì khu vực quần đảo Hoàng Sa và Trường Sa cũng như khu vực ven bờ từ vĩ tuyến  $11^{\circ}\text{N}$  đến vĩ tuyến  $14^{\circ}\text{N}$  sẽ có sóng rất to. Theo kịch bản này thì tại Hoàng Sa sóng

thần cao tới 6,5m, tại Trường Sa là 3,5m và Quảng Ngãi là 4,5m. Với kịch bản sóng thần xuất hiện tại Đài Loan - kịch bản II thì độ cao sóng khi vào đến vùng ven bờ và hải đảo Việt Nam thấp hơn với so với sóng thần xuất hiện

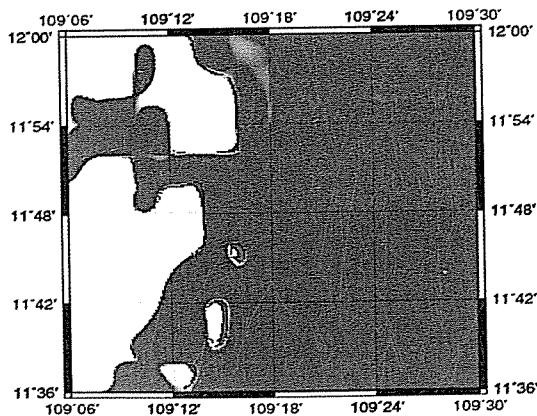
tại Philippines - kịch bản I (hình 12). Điều này cũng dễ hiểu bởi khi lan truyền sóng thần chịu nhiều tác động của địa hình, đường bờ và

hướng truyền sóng và sự mất mát năng lượng sóng do ma sát.



**Hình 12. Phân bố độ cao sóng thần lớn nhất tại Việt Nam**  
a./ Tính theo kịch bản I; b./ Tính theo kịch bản II

Rất khó có thể đánh giá mức độ định lượng của mô hình khi mà chúng ta không có các số liệu thực tế để kiểm chứng. Nhưng về mặt định tính, mô hình cũng đã phản ánh được bức tranh phân bố độ cao sóng thần, thời gian lan truyền vào Việt Nam ứng với các kịch bản động đất khác nhau. Điều này sẽ giúp ích cho việc xây dựng các bản đồ cảnh báo nguy cơ sóng thần và tiến tới xây dựng hệ thống cảnh báo.



**Hình 13. Kết quả tính toán ngập lụt do sóng thần bản II**

Với tính toán ngập lụt, mô hình đã mô phỏng được bức tranh phân bố ngập lụt tại khu vực nghiên cứu khi sóng thần lan truyền vào vùng ven bờ. Tuy nhiên, đây mới chỉ là một ví dụ giả định nhằm mục đích kiểm chứng sự

mô phỏng. Để có đánh giá đúng thực tế bức tranh ngập lụt cho một khu vực nào đó chúng ta cần có bản đồ chi tiết về địa hình khu vực đó.

#### 4. Kết luận

Mô hình sóng dài hai chiều kết hợp với mô hình động đất gây sóng thần của Okada đã mô phỏng được bức tranh sóng thần tại Việt Nam với các kịch bản khác nhau và cho kết quả đáng tin cậy. Những kết quả nghiên cứu, tính toán mô phỏng cho thấy mặc dù nguy cơ sóng thần xuất hiện tại vùng thềm lục địa nước ta là rất nhỏ, tuy nhiên Việt Nam cần đối phó với nguy cơ về khả năng động đất lớn gây sóng thần tại khu vực rãnh chìm phía tây Philippines và Đài Loan. Độ cao sóng thần cực đại có thể đạt trên 7.0m, thời gian lan truyền tới vùng ven bờ kể từ khi động đất xảy ra tương đối nhanh, chỉ khoảng 02 giờ. Những kết quả này sẽ giúp ích cho phân vùng cảnh báo nguy cơ sóng thần tại Việt Nam.

Do không có số liệu chính xác về độ cao trên cạn nên phần tính toán ngập lụt chỉ là mô phỏng. Để hiểu biết về sóng thần chúng ta cần phân tích, đánh giá khả năng phát sinh, quá trình phát triển, lan truyền và nguy cơ gây ngập lụt cho từng kịch bản khác nhau từ đó phân vùng quy hoạch cũng như cảnh báo sóng thần.

## Tài liệu tham khảo

1. Y. Okada (1985). *Surface Deformation due to shear and tensile faults in a half-space*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, No. 4, pp. 1135 - 1154.
2. K. Satake (1995). *Linear and Nonlinear Computations of the 1992 Nicaragua Earthquake Tsunami*. Vol. 144, No. 3/4.
3. K. Satake and Y. Tnioka (1999). *Sources of Tsunami and Tsunamigenic Earthquakes in Subduction Zones*. Pure appl. Geophys. 154 (1999) 467 - 483.
4. Yamazaki Y., et al. (2006). *Forecast of Tsunamis from Japan-Kuril-Kamchatka Source Region*. Natural Hazards, Springer, Vol. 38. pp 411 - 435.