

TÍNH TOÁN TRƯỜNG SÓNG TRONG BÃO BẰNG MÔ HÌNH MIKE 21

TS. Trần Hồng Thái, CN. Nguyễn Anh Ngọc
Viện Khí Tượng Thủy Văn Và Môi Trường

Sử dụng mô hình số trị tính toán trường sóng trong bão để mô phỏng và dự báo diễn biến của sóng do bão gây ra là một phương pháp rất hiệu quả nhằm cảnh báo kịp thời phục vụ công tác dự báo sóng và giúp các nhà quản lý có được cái nhìn tổng thể, từ đó đưa ra các giải pháp phòng ngừa và hạn chế tác động của sóng. Bài báo này trình bày kết quả ứng dụng mô hình MIKE 21 (module Spectral Wave) trong việc tính toán trường sóng cho khu vực vịnh Bắc Bộ trong hai cơn bão DAMREY và KAITAK năm 2005. Kết quả tính toán cho thấy trong điều kiện có bão trường sóng biến đổi rất mạnh, độ cao sóng trung bình gần tâm bão đạt từ 6-8m, rất nguy hiểm cho các tàu thuyền hoạt động ngoài khơi và các công trình ven biển.

1. Giới thiệu

Sóng biển là một trong các yếu tố hết sức quan trọng đối với các hoạt động trên đại dương, sóng tác động lên tàu thuyền, công trình và các phương tiện trên biển. Đối với vùng ven bờ, sóng lại càng trở nên quan trọng. Sóng tạo ra các dòng vận chuyển trầm tích dọc bờ và ngang bờ làm thay đổi địa hình đáy.

Do nhu cầu phát triển kinh tế biển và ven bờ trong thời kỳ đổi mới ở nước ta, vấn đề tính toán trường sóng ven bờ để phục vụ cho việc thiết kế các công trình ven bờ, các công trình bảo vệ bờ cũng như công tác nghiên cứu và quản lý ven bờ là rất quan trọng. Một mô hình số trị tính toán trường sóng ven bờ phải thỏa mãn được các yêu cầu là có thể tính toán được trường sóng cho vùng ven bờ với địa hình đáy rất phức tạp có sự hiện diện của các công trình biển với độ chính xác cho phép nhưng đòi hỏi một thời gian tính toán đủ ngắn và một dung lượng bộ nhớ đủ nhỏ để có thể áp dụng được cho điều kiện nước ta. Mặc dù có những đòi hỏi thực tế, nhưng ở nước ta vẫn còn thiếu một mô hình đáp ứng được các yêu cầu trên.

Các mô hình số trị tính toán trường sóng ven bờ hiện đang được sử dụng ở nước ta có thể phân chia thành hai loại: loại thứ nhất là các mô hình sóng tuyến tính cho phép tính được trường sóng ven bờ có tính đến các hiệu ứng khúc xạ, nước nông, sóng

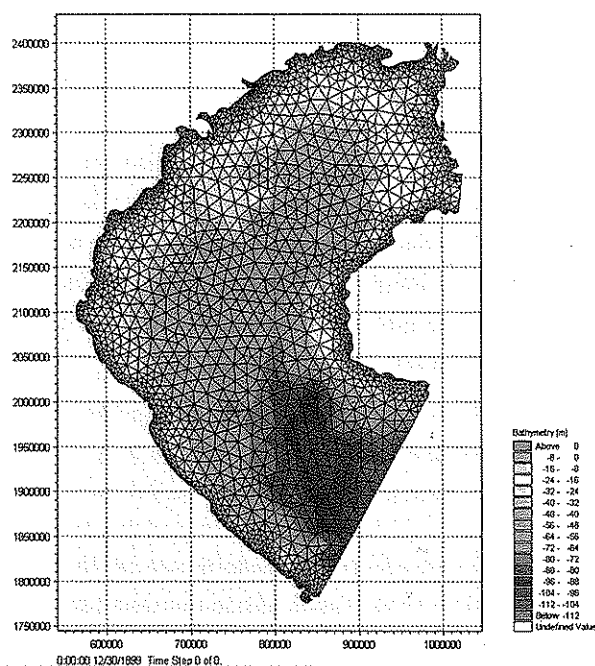
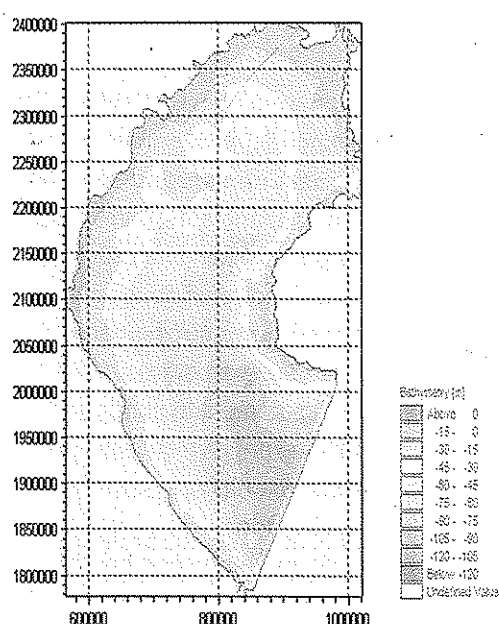
vỡ và nhiễu xạ yếu (như mô hình RCPWAVE, Ebersole, 1985), hoặc là không tính đến nhiễu xạ nhưng lại tính đến sự phát sinh năng lượng sóng do gió (như mô hình phổ năng lượng sóng). Vì không tính được sự nhiễu xạ và phản xạ sóng một cách đầy đủ, loại mô hình này chỉ có thể được áp dụng cho những vùng nước ven bờ với những đường đẳng sâu rất đơn giản và không có sự hiện diện của các công trình biển. Vì vậy không thể áp dụng những mô hình loại này để tính toán sóng phục vụ cho việc tính toán dự báo sự thay đổi của địa hình đáy biển và đường bờ hay thiết kế các công trình biển và ven bờ. Loại mô hình thứ hai là các mô hình sóng phi tuyến giải các phương trình truyền sóng phi tuyến cho vùng nước nông (như loại mô hình truyền sóng dài) hay nước tương đối nông (như mô hình xấp xỉ Boussinesq). Một thí dụ điển hình của mô hình loại này là mô hình MIKE21. Loại mô hình này có thể tính đầy đủ sóng nhiễu xạ, khúc xạ, phản xạ, nước nông sóng vỡ, thậm chí sóng leo nhưng đòi hỏi thời gian tính toán dài và bộ nhớ máy tính lớn. Hơn nữa các mô hình loại này chỉ có thể được áp dụng cho một vùng nước nông hay rất nông ở ven bờ (có độ sâu nhỏ hơn 0.15 bước sóng với mô hình nước nông hay nhỏ hơn 0.35 bước sóng đối với mô hình xấp xỉ Boussinesq do Madsen và Sorensen đề xuất) [6]. Như vậy, giới hạn áp dụng của loại mô hình này rất hẹp và rất khó được áp dụng để tính toán sự lan

truyền sóng cho những vùng bờ sâu. Xuất phát từ những lý do trên xây dựng một mô hình số trị cho phép tính toán tất cả các hiện tượng sóng ven bờ như nhiễu xạ, khúc xạ, phản xạ, nước nông, sóng vỡ với độ chính xác cao trong mọi điều kiện địa hình đáy biển và có sự hiện diện rất phức tạp của các công trình biển nhưng lại đòi hỏi thời gian tính toán đủ ngắn và bộ nhớ máy tính đủ nhỏ để có thể áp dụng tiện lợi cho công tác tư vấn là rất khó.

Bài báo này trình bày một số kết quả tính toán trường sóng trong khu vực vịnh Bắc Bộ bằng mô đun Spectral Wave của bộ mô hình Mike21 trong hai cơn bão DAMREY và KAITAK năm 2005.

2. Khu vực nghiên cứu

Vịnh Bắc Bộ là một trong các vịnh lớn ở Đông Nam Á, là một vịnh nửa kín, nước nông. Vịnh được bao bọc bởi lục địa Việt Nam và Trung Quốc ở phía tây, phía bắc và đảo Hải Nam ở phía đông. Vịnh nằm trong khoảng kinh độ từ 105040'-1100 Đông, vĩ độ từ 170-21030' Bắc. Diện tích vịnh Bắc Bộ khoảng 126.250 km², chiều ngang của vịnh nơi rộng nhất khoảng 310 km, nơi hẹp nhất ở cửa vịnh rộng khoảng 220 km. Chiều dài bờ biển phía Việt Nam khoảng 763 km, phía Trung Quốc khoảng 695 km. Độ sâu trung bình của vịnh dưới 100m, đặc điểm địa hình đặc trưng của vịnh là có đường đẳng sâu song song với đường bờ [1].



Hình 1. Địa hình (a) và lưới tính (b) khu vực Vịnh Bắc Bộ

Vịnh Bắc Bộ có vị trí chiến lược quan trọng đối với nước ta cả về kinh tế lẫn quốc phòng. Vịnh là nơi có nhiều tiềm năng về hải sản và dầu khí. Tuy nhiên khu vực này cũng đang đối mặt với những thách thức không nhỏ về phát triển kinh tế, quản lý bền vững tài nguyên thiên nhiên và bảo vệ môi trường.

Miền tính Vịnh Bắc Bộ thiết lập bằng lưới tính phi cấu trúc với 4295 ô lưới và 2510 nút ở đường bờ (hình 1b).

3. Cơ sở lý thuyết

Trong nghiên cứu này lựa chọn ứng dụng module Spectral Wave (M21SW) trong bộ mô hình MIKE21 để tính toán trường sóng. M21SW là mô đun phổ năng lượng sóng tính toán các đặc trưng của trường sóng trong vùng ven bờ, trong các hồ và cửa sông từ các điều kiện gió, địa hình đáy và dòng chảy. Mô đun dựa trên phương trình cân bằng tác động sóng (hoặc phương trình cân bằng năng lượng trong trường hợp không có dòng chảy) với các nguồn cung cấp và tiêu tán năng lượng.

Trong trường hợp quy mô tính toán nhỏ sử dụng hệ tọa độ Đề Các, với quy mô lớn sử dụng hệ tọa độ cầu.

Phương trình cân bằng tác động phổ trong hệ tọa độ Đề Các:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Trong đó: t là thời gian; c_x, c_y , và c_σ , c_θ là vận tốc truyền nhóm sóng theo các hướng x, y và theo σ (tần số góc), θ (hướng sóng); N là mật độ tác động sóng; S là hàm nguồn.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_\lambda N + (\cos \varphi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi} c_\varphi \cos \varphi + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

Trong đó: t là thời gian; c_λ, c_φ , và c_σ , c_θ là vận tốc truyền nhóm sóng theo các hướng λ (tính tuyến), φ (vĩ tuyến) và theo σ (tần số góc), θ (hướng sóng); N là mật độ tác động sóng; S là hàm nguồn.

Trong phương trình (1) và (2), thành phần đầu tiên trong vế trái biểu thị lượng thay đổi địa phương của mật độ tác động theo thời gian, thành phần thứ hai và ba biểu thị sự truyền tác động trong không gian địa lý. Thành phần thứ tư biểu thị thay đổi của tần số tương đối do thay đổi độ sâu và dòng chảy. Thành phần thứ năm đưa ra sự khúc xạ do độ sâu và dòng chảy. Các biểu thức đối với các tốc độ truyền sóng được rút ra từ lý thuyết sóng tuyến tính. Giá trị S trong vế phải của phương trình là giá trị hàm nguồn năng lượng tổng cộng tạo ra từ các hiệu ứng tạo sóng, ma sát, tiêu tán sóng và tương tác giữa các sóng.

Năng lượng cung cấp bởi gió (Sin):

Sự tăng trưởng của sóng do gió được mô tả bởi:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (3)$$

với: A - hệ số tăng tuyến tính,

BE - hệ số tăng theo hàm mũ.

Tốc độ gió quan trắc lấy tốc độ gió tại độ cao 10 m (U_{10}), trong khi tính toán sử dụng tốc độ ma sát U^* , công thức chuyển từ U_{10} sang U^* nhận được như sau:

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (4)$$

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \cdot 10^{-3} & U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.0655 \cdot \ln^2 U_{10}) \cdot 10^{-3} & U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5)$$

Tiêu tán năng lượng sóng (Sds):

Sóng bạc đầu gây ra do độ dốc của sóng vượt quá giới hạn sóng vỡ. Quá trình sóng bạc đầu được mô tả bằng mô hình mạch động của Hasselmann (1974). Các giá trị của số sóng được sử dụng trong vùng có độ sâu nước giới hạn.

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \frac{k}{\sigma} E(\sigma, \theta) \quad (6)$$

ở đây σ và k là tần số và số sóng trung bình và Γ là hệ số phụ thuộc vào độ dốc sóng tổng hợp.

Ma sát đáy:

Mô hình ma sát đáy trong mô hình phổ năng lượng sóng là mô hình thực nghiệm của JONSWAP, mô hình sức kéo của Collin và mô hình nhót xoáy của Madsen(1988). Công thức của các mô hình trên như sau:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (7)$$

ở đây C_{bottom} là hệ số ma sát, thường phụ thuộc vào tốc độ quỹ đạo chuyển động tại đáy U_{rms} .

$$U_{rms}^2 = \iint \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

Sóng vỡ do độ sâu:

Năng lượng tiêu tán của trường sóng ngẫu nhiên do hiện tượng sóng vỡ, trong mô hình phổ năng lượng sóng sử dụng mô hình Bore của Battjes và Jansen. Tỷ lệ tiêu tán năng lượng trung bình trên một đơn vị bề ngang phụ thuộc vào độ vỡ của sóng D_{tot} .

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) H_m^2 \quad (5)$$

ở đây $\bar{\sigma}$ và $\bar{k}$ là phân số sóng vỡ được xác định bằng phương trình:

$$\frac{1-Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (6)$$

Ma sát đáy:

Mô hình ma sát đáy trong mô hình phổ năng lượng sóng là mô hình thực nghiệm của JONSWAP, mô hình sức kéo của Collin và mô hình nhót xoáy của Madsen(1988). Công thức của các mô hình trên như sau:

$$S_{\sigma,\theta}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(ka)} E(\sigma, \theta) \quad (7)$$

Ở đây C_{bottom} là hệ số ma sát, thường phụ thuộc vào tốc độ quỹ đạo chuyển động tại đáy Urms.

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{\sinh^2(ka)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (8)$$

Sóng vỡ do độ sâu:

Năng lượng tiêu tán của trường sóng ngẫu nhiên do hiện tượng sóng vỡ, trong mô hình phổ năng lượng sóng sử dụng mô hình Bore của Battjes và Jansen. Tỷ lệ tiêu tán năng lượng trung bình trên một đơn vị bề ngang phụ thuộc vào độ vỡ của sóng D_{tot} .

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) H_m^2 \quad (9)$$

ở đây α_{BJ} và Q_b là phân số sóng vỡ được xác định bằng phương trình:

$$\frac{1-Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (10)$$

Ở đây H_m là độ cao sóng cực đại có thể tồn tại trong độ sâu đó và $\bar{\sigma}$ là tần số sóng trung bình.

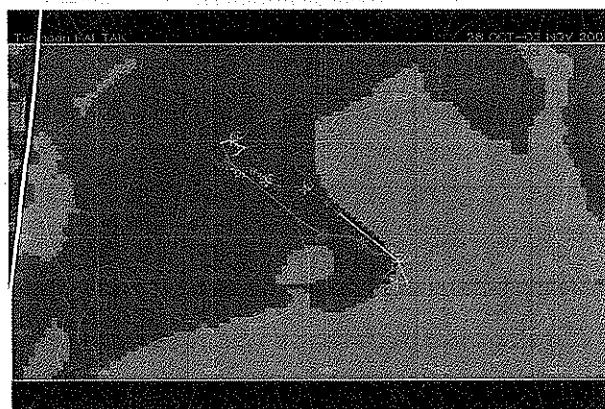
$$\bar{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sigma E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (11)$$

Trường gió trong bão:

Trong nghiên cứu này sử dụng module Mike 21 Toolbox trong bộ mô hình MIKE21 để tính toán trường gió đầu vào từ các tham số của bão: tọa độ (x,y) của tâm bão, bán kính gió cực đại, vận tốc gió cực đại, tốc độ di chuyển của bão.



Hình 2. Quỹ đạo bão DAMREY



Hình 3. Quỹ đạo bão KAITAK

Trường gió trong bão được tính thông qua các công thức:

$$V_r = V_{max}(R/R_m) \cdot \exp(7(1-R/R_m)) \quad \text{nếu } R < R_m \quad (12)$$

$$V_r = V_{max} \cdot \exp((0.0025R_m + 0.05)(1-R/R_m)) \quad \text{nếu } R \geq R_m \quad (13)$$

$$V_t = -0.5V_r(-\cos \varphi) \quad (14)$$

$$V = V_r + V_t \quad (15)$$

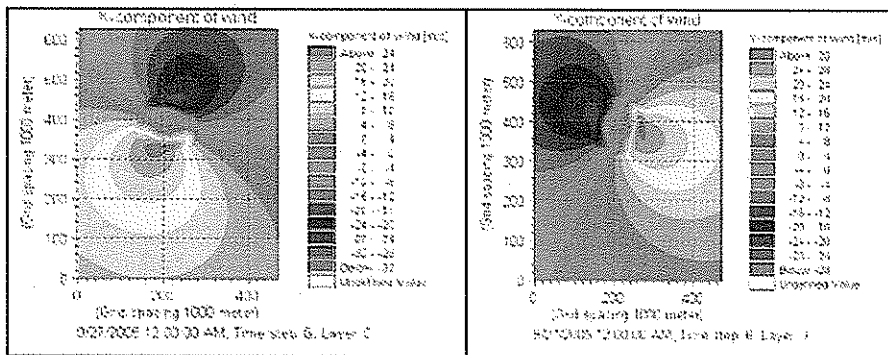
Trong đó: V là vận tốc gió tại điểm cách tâm bão một khoảng R , R_m là bán kính gió cực đại, V_{max} là vận tốc gió cực đại, V_r là vận tốc xoáy của bão, V_t là vận tốc tịnh tiến của bão, V_f là tốc độ di chuyển của bão, φ là hướng di chuyển của bão so với hướng tây.

4. Kết quả ứng dụng mô hình tính sóng trong điều kiện có bão

Số liệu đầu vào là trường gió áp hai cơn bão Damrey và Kaitak như sau:

Bảng 1. Số liệu cơn bão Damrey tương ứng các khoảng thời gian

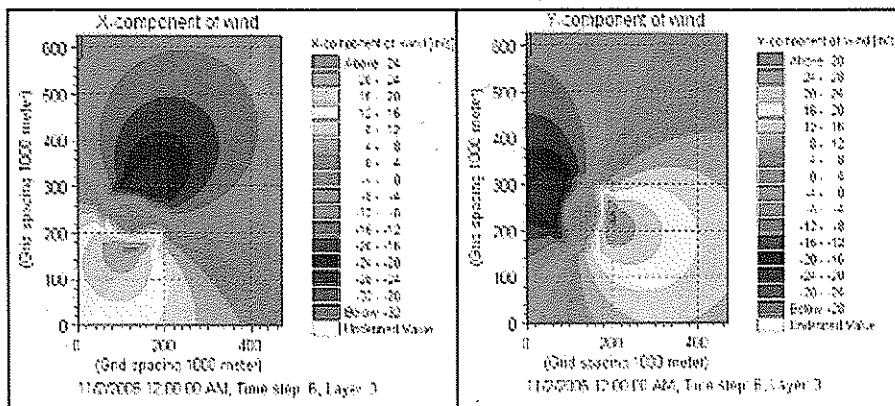
T(h)	X(km)	Y(km)	Rmax(km)	Vmax(m/s)	Pc(hPa)	Pn(hPa)
0	475	275	96	39	973	1005
12	276	334	64	28	973	1005
18	210	388	64	28	973	1005
30	-51	386	64	23	973	1005



Hình 4. Trường gió áp ngày 27/9/2005

Bảng 2. Số liệu cơn bão Kaitak tương ứng các khoảng thời gian

T(h)	X(km)	Y(km)	Rmax(km)	Vmax(m/s)	Pc(hPa)	Pn(hPa)
0	368	-5	96	33	973	1005
6	328	58	96	33	973	1005
18	298	323	64	23	973	1005
30	-12	450	64	18	973	1005



Hình 5. Trường gió áp ngày 2/11/2005

Đầu ra của mô hình chỉ tính đến ba yếu tố cơ bản của sóng đó là độ cao, chu kỳ và hướng sóng (các hình từ 6- 11)

a. Tính toán trường sóng trong bão DAMREY

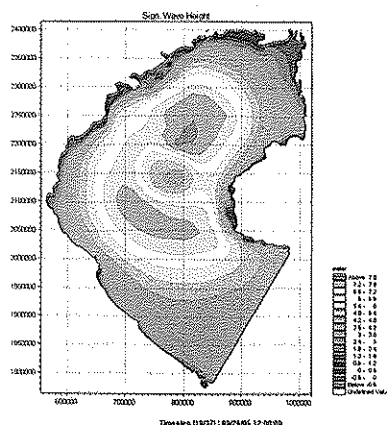
Bão Damrey di chuyển từ phía Tây Thái Bình Dương qua đảo Hải Nam vào Vịnh Bắc Bộ rồi đổ bộ vào khu vực tỉnh Thanh Hóa, bão Damrey là cơn bão mạnh di chuyển chủ yếu theo hướng Tây từ ngày 21 đến ngày 27 tháng 9 năm 2005.

Kết quả tính toán trường sóng trong bão Damrey cho thấy, trong vùng ảnh hưởng của bão, trường sóng có sự phân hóa mạnh. Khi bão ở ngoài khơi, sóng có độ cao lớn nhất trong khu vực gió bão mạnh nhất ở hai bên đường đi của bão (hình 6). Hướng sóng phân hóa đều theo các hướng, ở khu vực bán kính gió cực đại, hướng sóng phân bố tạo thành xoáy tương ứng với xoáy bão (hình 7). Lúc 12h ngày 26/9/2005 độ cao sóng cực đại đạt 7.8(m) ở phía bên phải tâm bão, phía trái tâm bão độ cao sóng khoảng 7.2(m), ở vùng biển Thanh Hóa sóng chỉ cao

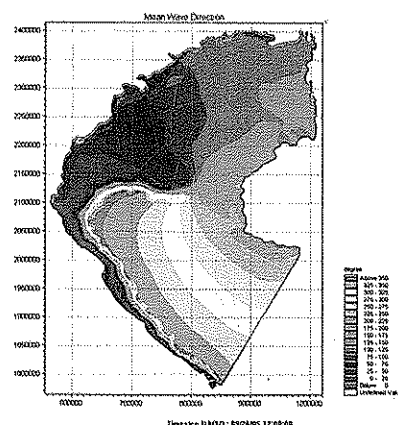
0.8 -1.2(m), chu kỳ sóng lớn nhất là 11.2(s), hướng sóng phân hóa đều theo hướng gió. Lúc 6h ngày 27/9/2005, khi bão di chuyển vào vùng nước nông, độ cao sóng giảm do các hiệu ứng trong vùng nước nông làm suy giảm năng lượng của sóng, độ cao sóng cực đại đạt 5.2(m), hướng sóng phân bố chủ yếu theo các đường đẳng sâu.

Khi bão đổ bộ, tỉnh Nam Định nằm trong khu vực chịu tác động mạnh nhất của bão và các quá trình nước dâng và sóng trong bão. Độ cao sóng lớn nhất tại khu vực tỉnh Nam Định vào khoảng 4(m), mặt khác bão Damrey đổ bộ vào đúng thời kỳ triều cường, do đó sự kết hợp giữa quá trình nước dâng và sóng tạo ra sức phá hoại rất lớn đối với khu vực ven biển Nam Định. Đây là nguyên nhân chính gây vỡ đê biển và xói lở một số đoạn bờ biển khu vực Hải Hậu năm 2005.

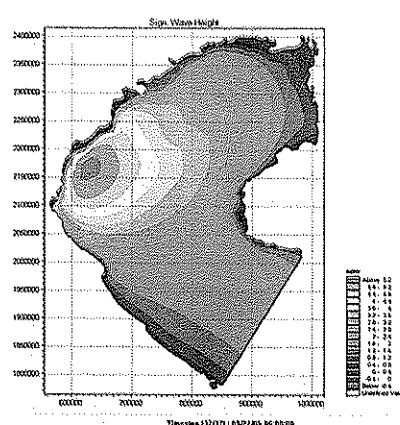
Từ hình 6 đến 11 dưới đây trình bày kết quả tính toán về độ cao, hướng và chu kỳ sóng trong bão Damrey tại một số thời điểm.



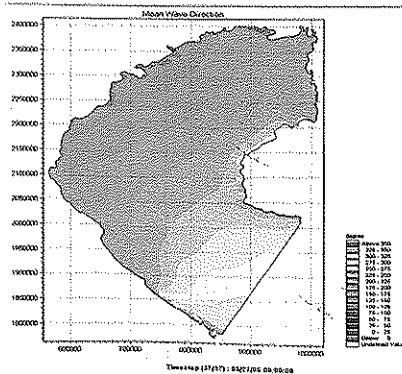
Hình 6. Độ cao sóng lúc 12h ngày 26/9



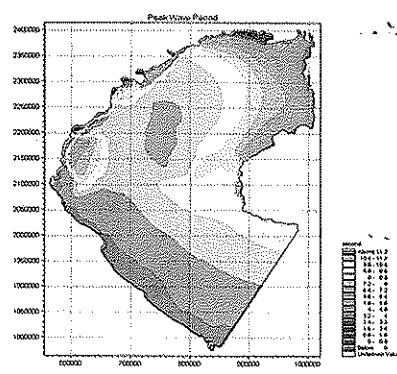
Hình 7. Hướng sóng lúc 12h ngày 26/9



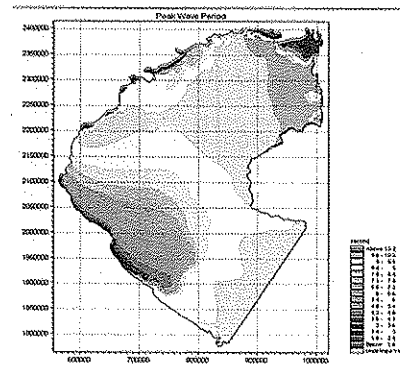
Hình 8. Độ cao sóng lúc 6h ngày 27/9



Hình 9. Hướng sóng lúc 6h ngày 27/9



Hình 10. Chu kỳ sóng lúc 12h ngày 26/9



Hình 11. Chu kỳ sóng lúc 6h ngày 27/9

b. Tính toán trường sóng trong bão KAITAK

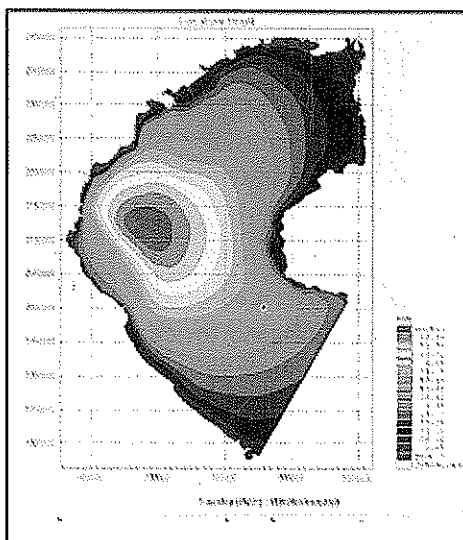
Bão Kaitak di chuyển từ phía Tây Thái Bình Dương đi dọc bờ biển Việt Nam từ biển Đà Nẵng vào vùng biển Thanh Hóa từ ngày 28 tháng 10 đến ngày 2 tháng 11 năm 2005.

Dựa vào kết quả tính toán sóng trong bão Kaitak ta thấy trong vùng ảnh hưởng của bão độ cao sóng lớn nhất lên tới 9(m), cụ thể vào lúc 12h ngày 01/11/2005 phía bên phải gần tâm bão độ cao sóng đạt cực đại xấp xỉ 9(m); vùng ven bờ do ảnh hưởng của yếu tố địa hình nên độ cao sóng chỉ khoảng 1.2-

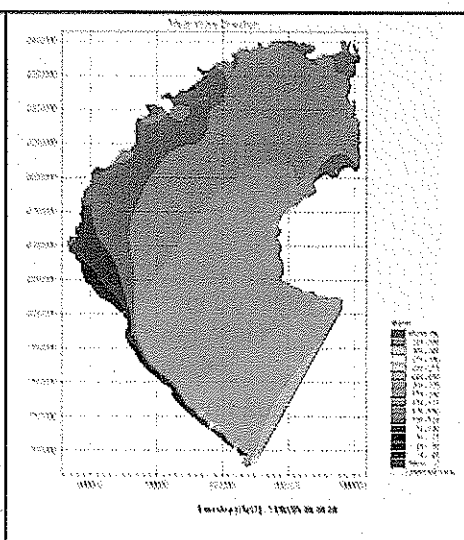
1.8(m). Chu kỳ sóng đạt cực đại là 10.8(s) ở vùng ngoài khơi biển Đà Nẵng. Sóng di chuyển theo hướng 50o – 70o là chủ yếu.

Lúc 6h ngày 02/11/2005 bão đã di chuyển lên phía Tây Bắc và tiến sát vùng biển Nam Định-Hà Tĩnh. Độ cao sóng lớn nhất ở khu vực này là 8.4(m), chu kỳ lớn nhất là 12.8(s), hướng sóng phân bố tương đối đều so với các hướng.

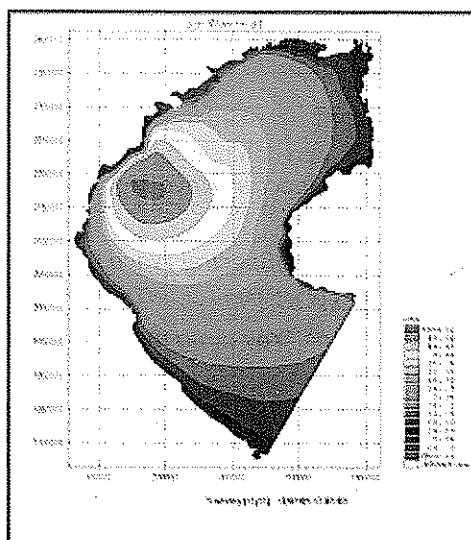
Từ hình 12 đến hình 17 dưới đây trình bày các kết quả tính toán về độ cao, chu kỳ và hướng sóng trong bão Kaitak tại một số thời điểm.



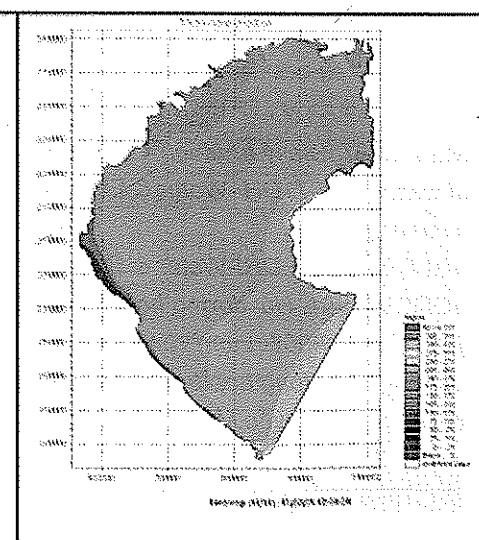
Hình 12. Độ cao sóng lúc 6h ngày 02/11



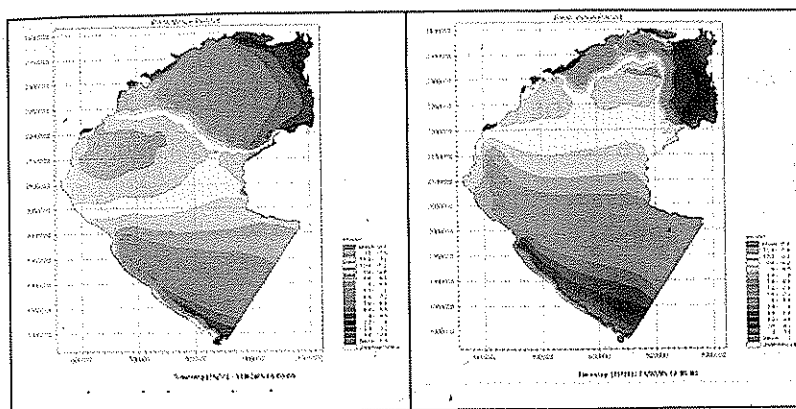
Hình 13. Hướng sóng lúc 6h ngày 02/11



Hình 14. Độ cao sóng lúc 12h ngày 02/11



Hình 15. Hướng sóng lúc 12h ngày 02/11



Hình 16. Chu kỳ sóng lúc 6h ngày 02/11 **Hình 17. Chu kỳ sóng lúc 12h ngày 02/11**

Kết quả tính toán của hai cơn bão cho ta thấy tại khu vực vùng biển Nam Định độ cao sóng luôn ở mức khá cao. Đồng thời theo thống kê của Trung tâm Khí tượng Thủy văn Quốc gia tính từ năm 1961 đến nay có khoảng 10 cơn bão đổ bộ vào khu vực Nam Định, đây là một con số khá cao khiến bờ biển khu vực này bị phá hủy nghiêm trọng.

5. Kết luận

Nhìn chung dựa vào kết quả tính toán bằng mô hình số trị qua hai cơn bão này rút ra một số nhận xét cơ bản: Độ cao sóng ở phía bên phải gần tâm bão bao giờ cũng cao hơn độ cao sóng ở phía trái hướng di chuyển của bão, ở vùng ven bờ độ cao sóng thường giảm nguyên nhân là do địa hình đáy

ở những khu vực này thường nông. Vùng biển Hải Hậu- Nam Định thường xuyên bị sóng tác động rất mạnh (do độ cao sóng lớn). Hiện nay vùng biển này đang bị sạt lở nghiêm trọng tại một số đoạn bờ, vì vậy cần phải có những biện pháp kịp thời để ngăn chặn khả năng phá hủy của sóng. Qua tính toán cũng đã bước đầu nhận thấy những ảnh hưởng đáng kể của sóng tới các vùng biển ven bờ Việt Nam mà đặc biệt là tới các công trình biển như cảng, đê chắn sóng... Vì vậy hiện nay việc nghiên cứu các tác động của sóng làm ảnh hưởng tới đời sống dân cư vùng biển và nền kinh tế nước nhà nói chung là vô cùng quan trọng.

Tài liệu tham khảo

1. Bộ GD&ĐT. 2007. Địa lý tự nhiên Việt Nam
2. DHI Software. 2007. DHI-Water & Environment, MIKE 21- Spectral Wave Module, Scientific Documentation.
3. DHI Software. 2007. DHI-Water & Environment, MIKE 21 SW- Spectral Wave Module, User Guide.
4. N. I.EGOROV. 1981. Hải dương học vật lý. Nhà xuất bản ĐHQGHN.
5. Dương Văn Phúc. 2007. Luận văn thạc sĩ khoa học với chủ đề "Xây dựng mô hình lưới lồng hai chiều tính toán dòng chảy tổng hợp trong Vịnh Bắc Bộ".
6. Nguyễn Thọ Sáo, Nguyễn Mạnh Hùng. 2005. Giáo trình mô hình tính sóng vùng ven bờ. Nhà xuất bản ĐHQGHN.
7. Đỗ Thiển. 1998. Động lực sóng biển. Nhà xuất bản ĐHQGHN.