



DỰ BÁO KHOẢNG TÍNH KHÔNG CHO CÁC GIÀN KHOAN BÁN CHÌM, SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH TUYẾN TÍNH TRONG MIỀN TẦN SỐ

Phạm Hồng Đức¹, Phạm Hiền Hậu²

Tóm tắt: Trong bài báo này nhóm tác giả đã nghiên cứu dự báo khoảng tính không cho các giàn khoan bán chìm nói riêng và khái quát cho các công trình biển nổi nói chung (giàn bán chìm, giàn neo đứng, ...) bằng cách thực hiện tính toán tuyến tính trong miền tần số sử dụng phần mềm HydroStar của Hãng kiểm Pháp [1, 2]. Phương pháp “mô hình phổ dải hẹp” (Narrow Band Model) đề xuất bởi Bert Sweetman [4] được nhóm nghiên cứu áp dụng lập trình trên Matlab để hiệu chỉnh kết quả tính nhằm kể đến ảnh hưởng phi tuyến bậc hai của độ dâng bề mặt sóng. Các kết quả tính toán bằng phần mềm số sau đó sẽ được so sánh với thí nghiệm mô hình vật lý để kiểm chứng.

Từ khóa: Khoảng tính không; giàn bán chìm; HydroStar; hàm truyền bậc nhất.

Summary: This paper presents the actual common used approach of predicting air gap demands for floating structures (Semi-submersible, TLP, ...) based on linear analysis in frequency domain by using HydroStar software [1], [2]. The “Narrow Band Model” method proposed by Bert Sweetman [4] is applied (by programming in Matlab) as a correction method considering second order non-linear effects of the wave amplification. The numerical results are then compared with model test data.

Keywords: Airgap; semi-submersible; HydroStar; linear transfer function.

Nhận ngày 23/11/2015, chỉnh sửa ngày 14/12/2015, chấp nhận đăng 07/01/2016



1. Đặt vấn đề

Công trình biển khai thác bán chìm hay gọi là giàn bán chìm Semi-submersible hay Semi-FPSs/FPU (Semi-Floating Production Systems/Units) có hình ảnh như Hình 1, được cấu tạo gồm 3 phần: thượng tầng chứa các thiết bị để khoan, khai thác, xử lý dầu, phần nổi gồm các cột và pontoon đủ trọng lượng để cho công trình luôn nổi cân bằng ở trạng thái thẳng đứng và hệ thống neo gồm các dây neo xiên và neo để giữ cho công trình ổn định trong quá trình hoạt động (khoan khai thác). Việc xác định khoảng tính không cho các giàn khoan bán chìm có ý nghĩa quan trọng, đặc biệt là trong điều kiện biển khắc nghiệt, vấn đề này hiện đang được nghiên cứu, hoàn thiện và đưa vào ứng dụng trong thực tế.

Trong các phần mềm số hiện nay, các tính toán tuyến tính trong miền tần số đã được tích hợp sử dụng rộng rãi với quy trình cụ thể để dự báo khoảng tính không cho công trình biển nổi. Tuy nhiên, mô hình tuyến tính hầu như cho kết quả dự báo độ dâng bề mặt sóng nhỏ hơn thực tế đối với những điều kiện biển khắc nghiệt (với độ dốc sóng lớn) khi các ảnh hưởng phi tuyến của sóng là đáng kể. Gần đây các phần mềm số như: Wamit của MIT, LAMP của SAIC, HydroStar của Bureau Veritas... đã phát triển các tính toán dựa trên những phương pháp sử dụng mô hình hai đầy đủ. Tuy nhiên, nhược điểm của những phương pháp này là khó áp dụng và vẫn tồn tại sai số so với mô hình vật lý. Ngược lại với mô hình tuyến tính, mô hình bậc hai đầy đủ thường cho những kết quả dự báo độ dâng bề mặt sóng lớn hơn bất thường so với các kết quả nhận được từ thí nghiệm mô hình vật lý.

¹ThS, Khoa Xây dựng Công trình biển và Dầu khí. Trường Đại học Xây dựng. E-mail: ducph@nuce.edu.vn.

²TS, Khoa Xây dựng Công trình biển và Dầu khí. Trường Đại học Xây dựng.

Nghiên cứu này sẽ thực hiện tính toán tuyến tính trong miền tần số sử dụng phần mềm HydroStar của Bureau Veritas để dự báo khoảng tĩnh không cho giàn khoan bán chìm (Semi-submersible). Phương pháp “mô hình phổ dải hẹp” (Narrow Band Model) đề xuất bởi Bert Sweetman [4] được áp dụng như một phương pháp hiệu chỉnh để kể đến ảnh hưởng phi tuyến bậc hai của độ dâng bề mặt sóng. Theo đó, nhóm tác giả đã lập trình bằng ngôn ngữ Matlab để thực hiện tính toán tuyến tính bằng phương pháp phổ đồng thời có kể đến hiệu ứng phi tuyến bậc hai bằng cách sử dụng công thức gần đúng của phương pháp “mô hình phổ dải hẹp”.

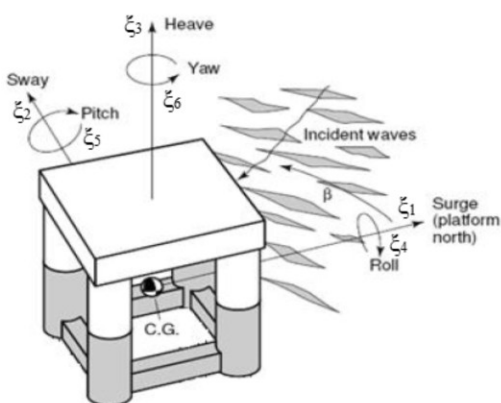


Hình 1. Hình ảnh giàn khoan bán chìm

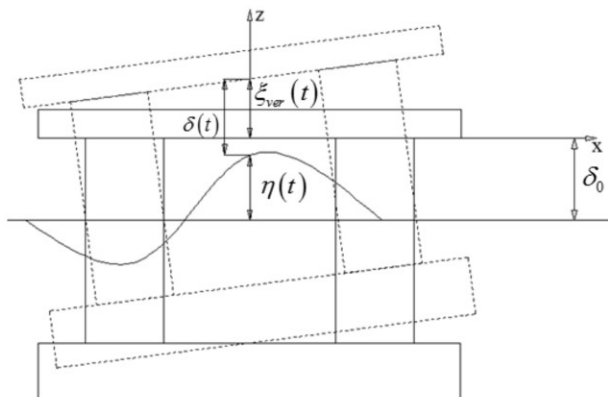
Các tính toán độ dâng bề mặt sóng sẽ được so sánh với thí nghiệm mô hình vật lý thực hiện tại Viện Nghiên cứu Sao Paulo (IPT), Brazil [3]. Từ việc tính toán độ dâng bề mặt sóng, ta sẽ dự báo được các vị trí đặc biệt trên công trình biển dạng nổi có khoảng tĩnh không âm, có thể gây ảnh hưởng bất lợi đến an toàn của kết cấu và điều kiện làm việc của các trang thiết bị trên thượng tầng và từ đó đưa ra các giải pháp gia cố cục bộ tại các vị trí đó.

2. Cơ sở lý thuyết tính toán khoảng tĩnh không cho các công trình biển nổi

2.1 Khoảng tĩnh không của công trình biển nổi



Hình 2. Các dạng dao động của một công trình nổi



Hình 3. Định nghĩa khoảng tĩnh không

Các dạng dao động của công trình nổi bao gồm: ξ_1 - Surge - Chuyển vị dọc (chuyển vị tịnh tiến theo phương x); ξ_2 - Sway - Chuyển vị ngang (chuyển vị tịnh tiến theo phương y); ξ_3 - Heave - Chuyển vị đứng (chuyển vị tịnh tiến theo phương z); ξ_4 - Roll - Lắc dọc (chuyển vị xoay quanh trục x); ξ_5 - Pitch - Lắc ngang (chuyển vị xoay quanh trục y); ξ_6 - Yaw - Lắc đứng (chuyển vị xoay quanh trục z).

Khoảng tĩnh không tức thời của một điểm - $\delta(t)$ được xác định bằng khoảng cách giữa vị trí của điểm đó tại đáy của sàn công tác so với độ dâng bề mặt sóng cục bộ $\eta(t)$ là một đại lượng ngẫu nhiên thay đổi theo thời gian t.

$$\delta(t) = \delta_0 + \xi_{ver}(t) - \eta(t) = \delta_0 - \eta_{rel}(t) \quad (1)$$

trong đó: δ_0 là khoảng tĩnh không trong trường hợp mực nước tĩnh; $\xi_{ver}(t)$ là chuyển vị theo phương đứng của sàn và $\eta_{rel}(t)$ là độ dâng bề mặt sóng tương đối;

$$\xi_{ver} = \xi_3 + y \sin \xi_4 - x \sin \xi_5 \quad (2)$$

$$\eta_{rel}(t) = \eta(t) - \xi_{ver}(t) \quad (3)$$

2.2 Cơ sở lý thuyết áp dụng trong dự báo khoảng tính không đối với những công trình biển dạng nổi

2.2.1 Phản ứng độ dâng bề mặt sóng

Giả sử chất lỏng là chất lỏng lý tưởng có chuyển động không xoáy, thế vận tốc tổng thể của dòng chất lỏng ở độ sâu nước vô hạn có thể viết dưới dạng hàm số phụ thuộc vào thời gian, Φ :

$$\Phi(x, y, z) = \Phi_I + \Phi_D + \Phi_R \quad (4)$$

trong đó Φ_I, Φ_D, Φ_R tương ứng là hàm thế của sóng tới, sóng nhiễu xạ và bức xạ.

Sau khi giải được hàm thế vận tốc Φ , ta có thể tính toán được áp lực (độ dâng bề mặt sóng) tại một điểm cần quan tâm theo phương trình Bernoulli - Lagrange tại mặt thoáng:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\|\vec{v}\|^2}{2} + g\eta = 0 \quad M \in (SL) \quad (5)$$

Độ dâng bề mặt sóng $\eta(t)$ với sự có mặt kết cấu nổi được coi là tổng hợp của các thành phần sóng tới $\eta_I(t)$, sóng nhiễu xạ $\eta_D(t)$ và sóng bức xạ $\eta_R(t)$ theo công thức (6):

$$\eta(t) = \eta_I(t) + \eta_D(t) + \eta_R(t) \quad (6)$$

Ở đây chỉ kể đến các thành phần bậc nhất của sóng theo công thức (7):

$$\eta(t) = \eta^1(t) = \eta^1_I(t) + \eta^1_D(t) + \eta^1_R(t) \quad (7)$$

2.2.2 Phương pháp phổ áp dụng cho mô hình bậc nhất

a. Định nghĩa: Xét hàm mật độ phổ $S_\omega(\omega)$ biểu diễn phân phối theo tần số ω của năng lượng sóng, RAO là hàm truyền của một đại lượng bậc nhất bất kì như chuyển vị, gia tốc, độ dâng bề mặt sóng, ứng suất... Hàm mật độ phổ của một đại lượng R - phản ứng của kết cấu (ở đây là độ dâng bề mặt sóng tương đối) được xác định bởi:

$$S_R(\omega) = RAO^2(\omega) * S_\omega(\omega) \quad (8)$$

b. Các thống kê ngắn hạn (short term statistic): Ngắn hạn ở đây ứng với một trạng thái biển (thường là 3h), trong khoảng thời gian này trạng thái biển được coi là dừng. Ta xét một biến ngẫu nhiên R là một cực trị của phản ứng độ dâng bề mặt sóng tương đối. Giả sử rằng phổ phản ứng là dải hẹp, hàm mật độ xác suất của R tuân theo luật phân phối Rayleigh:

$$p(R) = \frac{R}{4m_0} \exp\left(\frac{-R^2}{8m_0}\right) \quad (9)$$

Hàm phân phối xác suất có dạng:

$$P(R) = 1 - \exp\left(\frac{-R^2}{8m_0}\right) \quad (10)$$

Các định nghĩa về cực trị:

- Xét một phản ứng ngắn hạn cực trị với một nguy cơ α trong một trạng thái biển kéo dài một khoảng thời gian D_{ss} .

Trong N chu kỳ, hàm phân phối xác suất được xác định bởi:

$$P(R) = \left(1 - e^{\frac{-R^2}{8m_0}}\right)^N \quad (11)$$

Với $\alpha = 1 - P(R)$, cực trị của phản ứng (được tính bằng 2 lần biên độ):

$$R_{\max}(D_{ss}, RT_z, \alpha) = 2\sqrt{2m_0 \ln\left(\frac{1}{(1-\alpha)^{1/N} - 1}\right)} \quad (12)$$

N được xác định bởi $N = D_{ss} / RT_z$ - RT_z là chu kỳ cắt không.

- Giá trị trung bình của cực trị

Giá trị trung bình của cực trị xuất hiện trong một trạng thái biển, với một giá trị N đủ lớn, được xác định (bằng 2 lần biên độ) bởi biểu thức:

$$\bar{R}_{\max}(D_{ss}, RT_z) = 2 \left(\sqrt{2 \ln N} + \frac{g}{\sqrt{2 \ln N}} \right) \sqrt{m_o} \quad (13)$$

trong đó γ là hằng số Euler ($\gamma = 0.5772$).

2.2.3 Phương pháp “mô hình phổ dải hẹp” (Narrow Band Model)

Ứng dụng của giả thuyết phổ dải hẹp vào bài toán khoảng tính không được đề xuất bởi Bert Sweetman [4].

Thành phần bậc nhất của độ dâng bề mặt sóng $\eta_1(t)$:

$$\eta_1(t) = a(t) \cos[\omega t + \theta_1(t)] \quad (14)$$

Với sự thay đổi rất nhỏ của biên độ $a(t)$ và pha $\theta_1(t)$. (Tần số ω cũng có thể được coi là thay đổi rất nhỏ). Thành phần bậc hai của độ dâng bề mặt sóng $\eta_2(t)$ có thể viết dưới dạng:

$$\eta_2(t) = a^2(t) H^{(2+)}(\omega, \omega) \cos(2[\omega t + \theta_2(t)]) \quad (15)$$

trong đó $H^{(2+)}(\omega, \omega)$ là hàm truyền bậc hai tần số cao của độ dâng bề mặt sóng được tính gần đúng theo lý thuyết sóng Stokes bậc 2. Với giả thuyết độ sâu nước là vô hạn (phù hợp với mục đích sử dụng của các công trình biển nổi thường ở những độ sâu nước lớn) ta có:

$$H^{(2+)}(\omega, \omega) = \frac{k}{2}. \text{ Với } k \text{ là số sóng, } k = \frac{\omega^2}{g}$$

Với giả thiết phổ dải hẹp ta có $\theta_1(t) = \theta_2(t)$. Ở chu trình lớn nhất, các thành phần bậc nhất và bậc hai được giả thiết đạt đỉnh cùng một lúc.

Khi đó $a(t) = \eta_{1,\max}$, giá trị trung bình của cực trị độ dâng bề mặt sóng $\eta = \eta_1 + \eta_2$ được tính bởi:

$$E[\eta_{\max}] = E[\eta_{1,\max}] + E[\eta_{1,\max}^2] H^{(2+)}(\omega, \omega) \approx E[\eta_{1,\max}] + E[\eta_{1,\max}^2] \frac{k}{2} \quad (16)$$

$$\text{Với: } E[\eta_{1,\max}^2] = E[\eta_{1,\max}]^2 + \sigma_{\eta_{1,\max}}^2 \approx \sigma_{\eta_1}^2 \left[2 \ln \left(\frac{N}{0.562} \right) + \frac{\pi^2}{6} \frac{1}{2 \ln N} \right] \quad (17)$$

trong đó σ_{η_1} là độ lệch chuẩn của độ dâng bề mặt sóng thành phần bậc nhất.

Nhóm nghiên cứu đã ứng dụng các lý thuyết của phương pháp “mô hình phổ dải hẹp” được trình bày tóm tắt trên đây để lập trình Matlab nhằm hiệu chỉnh độ dâng bề mặt sóng tuyến tính có kể đến ảnh hưởng phi tuyến.

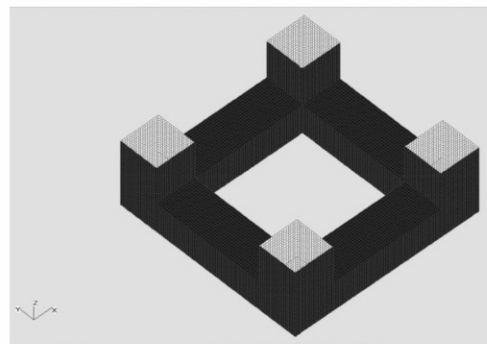


3. Tính toán độ dâng bề mặt sóng và so sánh kết quả tính toán với thí nghiệm mô hình vật lý

3.1 Tính toán độ dâng bề mặt sóng tuyến tính theo HydroStar và hiệu chỉnh kết quả bằng Matlab sử dụng “mô hình phổ dải hẹp”

Nhóm nghiên cứu sử dụng chương trình HydroStar thực hiện tính toán chuyển vị của giàn bán chìm và độ dâng bề mặt sóng tuyến tính dưới tác dụng của sóng nhiễu xạ, bức xạ bậc nhất, sau đó sử dụng kết quả RAO xuất ra từ chương trình HydroStar làm đầu vào cho chương trình do nhóm tác giả viết bằng Matlab dựa trên phương pháp “mô hình phổ dải hẹp” (Narrow band model) nhằm hiệu chỉnh độ dâng bề mặt sóng có kể đến ảnh hưởng phi tuyến. Sơ đồ các bước tính toán được trình bày ở Hình 5.

Các số liệu kích thước giàn bán chìm sử dụng mô phỏng trong HydroStar là số liệu thực tế (tỉ lệ 1:1) cho trong Bảng 1:



Hình 4. Mô hình giàn bán chìm trong HydroStar

Bảng 1. Các kích thước giàn bán chìm sử dụng mô phỏng trong HydroStar

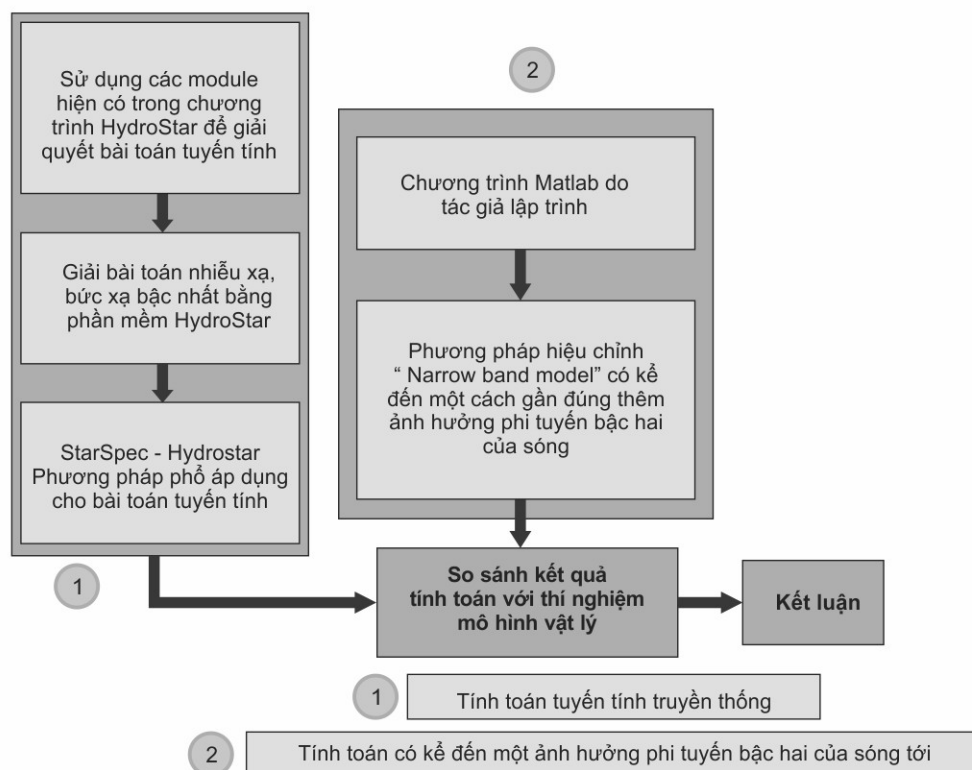
Tên	Ký hiệu	Giá trị
Chiều dài (m)	L	85
Chiều rộng (m)	B	85
Mớn nước (m)	T	27.5
Khối lượng (kg)	Δ	7791*E4
Bề ngang cột x (m)		17.5
Bề ngang cột y (m)		17.5
Chiều cao pontoon (m)		12
Bề ngang pontoon (m)		17.5
Trọng tâm (phương x) (m)	LCG	0
Trọng tâm (phương y) (m)	VCG	25
Chiều cao khuynh tâm (m)	GM	5
Bán kính xoay ngang (m)	Rx	35.2
Bán kính xoay dọc (m)	Ry	37

Bảng 2. Các thông số về phổ sóng

Trạng thái biển	Hs(m)	Tp(s)	γ	Sp
SS1	5.78	10	2	0.034
SS2	6.72	12	2.655	0.03
SS3	7.09	15	1.722	0.022

Bảng 3. So sánh các chu kỳ dao động riêng và hệ số cản

Chu kỳ DDR	HydroStar	Mô hình vật lý	ζ (%)
Chuyển vị đứng	23.712	22.9	6
Lắc dọc	31.446	31.9	3



Hình 5. Các bước tính toán độ dâng bề mặt sóng thực hiện trong nghiên cứu

3.2 Số liệu mô hình vật lý [3]

Thí nghiệm được thực hiện tại bể thử của Viện Nghiên cứu Sao Paulo, Brazil. Bề dài 240m, rộng 6m và độ sâu 5m. Một hệ thống kết cấu đỡ được thiết lập để hỗ trợ các điểm neo [3].

Các thí nghiệm được thực hiện với sự xếp đặt hệ thống neo đơn giản với 4 đường neo như trên Hình 6. Độ cứng của mỗi dây neo và góc tại fairlead được bố trí sao cho có thể mô tả được giá trị đặc trưng của các độ cứng theo các phương giống như một giàn thực tế. Tỷ lệ của mô hình vật lý là 1:100 với các thông số chính được mô tả trong Bảng 4 dưới đây.

Bảng 4. Các kích thước chính của mô hình thí nghiệm vật lý giàn bán chìm (tỉ lệ 1 : 100)

Tên	Ký hiệu	Giá trị
Chiều dài (m)	L	0.85
Chiều rộng (m)	B	0.85
Mớn nước (m)	T	0.275
Khối lượng (kg)	Δ	77.91
Bề ngang cột x (m)		0.175
Bề ngang cột y (m)		0.175
Chiều cao pontoon (m)		0.12
Bề ngang pontoon (m)		0.175
Trọng tâm (phương x) (m)	LCG	0
Trọng tâm (phương y) (m)	VCG	0.25
Chiều cao khuynh tâm (m)	GM	0.05
Bán kính xoay ngang (m)	Rx	0.352
Bán kính xoay dọc (m)	Ry	0.37

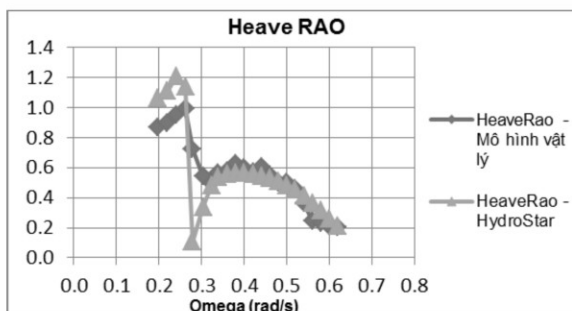
Bảng 5. Thông số hệ dây neo kích thước theo tỉ lệ của mô hình

Tên	Giá trị
Vị trí của Fairlead (m)	($\pm 0.341; \pm 0.445; -0.060$)
Vị trí của neo (m)	($\pm 2.875; \pm 1.646; -3.413$)
Độ cứng của dây neo (N/m)	25.09

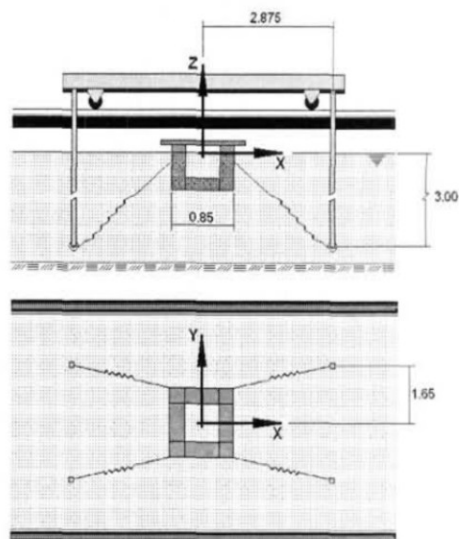
3.3 So sánh các kết quả tính toán với thí nghiệm mô hình vật lý

3.3.1 So sánh các hàm truyền của chuyển vị

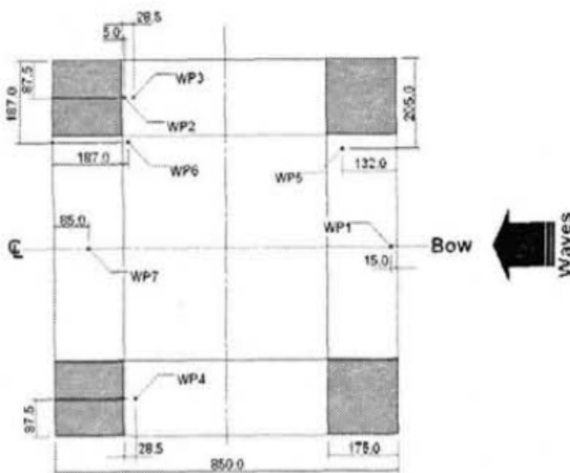
Từ các kết quả so sánh các hàm truyền bậc nhất của chuyển vị thẳng đứng (Heave) và chuyển vị lắc dọc (Pitch) tính toán bằng phần mềm HydroStar và kết quả hàm truyền thực đo từ thí nghiệm mô hình vật lý (với đầu vào là con sóng đơn vị - biên độ $a = 1\text{m}$) (Hình 8 và Hình 9) ta thấy được các hàm truyền bậc nhất xây dựng bằng phần mềm HydroStar miêu tả khá giống hàm truyền thực tế từ thí nghiệm mô hình vật lý.



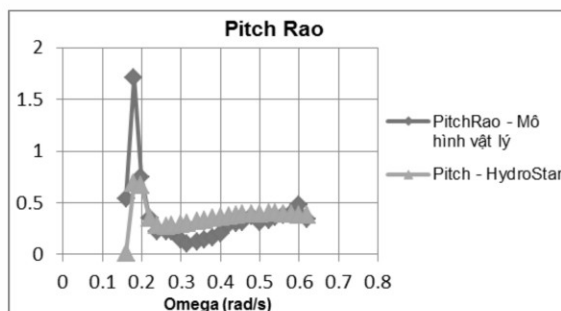
Hình 8. Hàm truyền chuyển vị tịnh tiến theo phương đứng (Heave)



Hình 6. Kích thước và bố trí neo cho giàn bán chìm trong bể thử (đơn vị: mét)



Hình 7. Vị trí đặt các ống đo sóng, 7 điểm (mm)

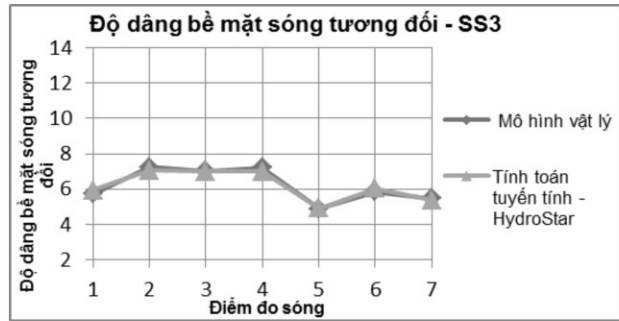


Hình 9. Hàm truyền dao động lắc ngang (Pitch)

3.3.2 So sánh các độ dâng bề mặt sóng tương đối

Hình 10, 11, 12 đưa ra so sánh độ dâng bề mặt sóng tương đối giữa tính toán tuyến tính sử dụng phần mềm HydroStar và kết quả thực đo từ thí nghiệm mô hình vật lý cho 3 trạng thái biển SS1, SS2, SS3.

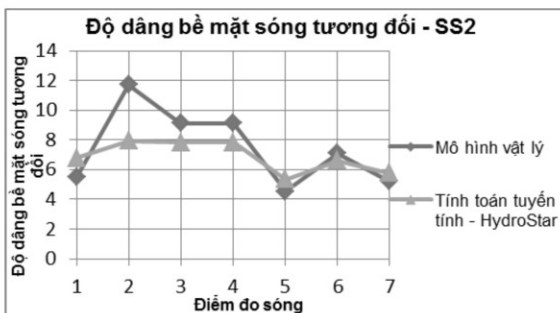
Đối với trạng thái biển SS3 (với độ dốc của sóng nhỏ - $S_p = 0.022$) ảnh hưởng phi tuyến của sóng là không đáng kể, dễ thấy rằng tính toán tuyến tính sử dụng mô hình số cho kết quả dự báo rất tốt so với kết quả thực đo từ thí nghiệm mô hình vật lý.



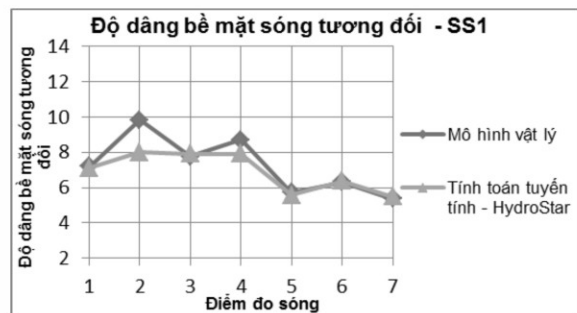
Hình 10. Độ dâng bề mặt sóng tương đối - Trạng thái biển SS3

Tuy nhiên, đối với các trạng thái biển SS1 và SS2 (với độ dốc của sóng lớn hơn $S_p = 0.03$ và 0.034) ta thấy mô hình số cho kết quả dự báo độ dâng bề mặt sóng tương đối nhỏ hơn so với kết quả thực đo. Một nguyên nhân dễ thấy là với các độ dốc sóng lớn, tính chất phi tuyến của sóng là đáng kể và mô hình tuyến tính đã không kể đến được những ảnh hưởng phi tuyến này.

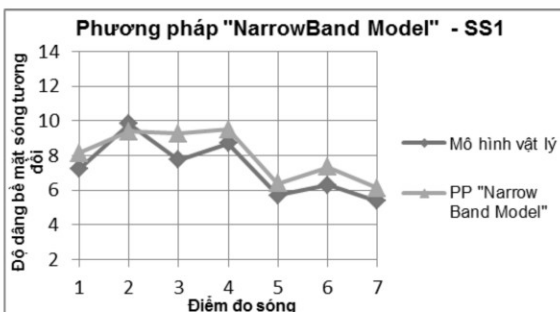
Các điểm 2, 3, 4 là những điểm có độ sai khác trong dự báo lớn nhất. Giải thích cho điều này là do các điểm này đều thuộc hướng đón sóng và gần với các cột trụ là những vị trí mà ảnh hưởng của hiện tượng nhiễu xạ, bức xạ phi tuyến và hiệu ứng sóng leo là đáng kể và mô hình tuyến tính đã không kể đến được những hiệu ứng này.



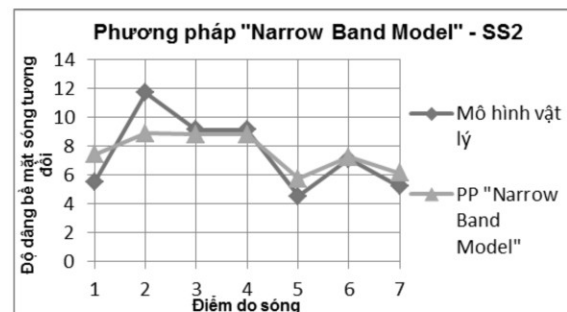
Hình 11. Độ dâng bề mặt sóng tương đối - Trạng thái biển SS2



Hình 12. Độ dâng bề mặt sóng tương đối - Trạng thái biển SS1



Hình 13. Độ dâng bề mặt sóng tương đối sử dụng phương pháp "mô hình phổ dải hẹp" (Narrow Band Model) - Trạng thái biển SS1



Hình 14. Độ dâng bề mặt sóng tương đối sử dụng phương pháp "mô hình phổ dải hẹp" (Narrow Band Model) - Trạng thái biển SS2

Hình 13 và 14 thể hiện kết quả dự báo độ dâng bề mặt sóng tương đối cho hai trạng thái biển SS1 và SS2 sử dụng phương pháp "mô hình phổ dải hẹp" đề xuất bởi Bert Sweetman so với kết quả thực đo từ thí nghiệm mô hình vật lý. Kết quả dự báo cho thấy phương pháp "mô hình phổ dải hẹp" cho kết quả dự báo tốt hơn mô hình tuyến tính thuần túy và khá gần với kết quả thực đo từ thí nghiệm.



4. Kết luận

Trong bài báo này, trước tiên các tác giả đã thực hiện phương pháp tính toán tuyến tính trong miền tần số sử dụng phần mềm HydroStar của Bureau Veritas để xác định độ dâng bề mặt sóng tương đối từ đó dự báo được khoảng tính không cho công trình biển bán chìm (Semi-submersible). Các kết quả tính toán bằng mô hình số đã được so sánh với kết quả thực đo từ thí nghiệm mô hình vật lý. So sánh cho thấy mô hình tuyến tính cho dự báo tin cậy đối với trường hợp độ dốc của sóng là nhỏ (khoảng 1/50). Tuy nhiên, tính toán tuyến tính tỏ ra không phù hợp đối với các trường hợp độ dốc sóng lớn hơn (khoảng 1/30). Các hạn chế của tính toán tuyến tính bằng phần mềm số hiện nay: chưa kể các ảnh hưởng phi tuyến của sóng (bao gồm các thành phần sóng tới, nhiễu xạ, bức xạ), ảnh hưởng phi tuyến của độ cứng của hệ dây neo, hiệu ứng sóng leo tại vị trí gần các cột và poonton... Tiếp theo, phương pháp “mô hình phổ dải hẹp” đề xuất bởi Bert Sweetman [4] được nhóm tác giả áp dụng để lập trình Matlab để hiệu chỉnh kết quả tuyến tính từ chương trình HydroStar, cho kết quả dự báo độ dâng bề mặt sóng tương đối gần với kết quả đo từ thí nghiệm mô hình vật lý hơn so với mô hình tuyến tính thuần túy do bắt đầu nắm bắt được tính chất phi tuyến của độ dâng bề mặt sóng. Tuy nhiên, đây chỉ là một phương pháp gần đúng nên chưa mô tả được hoàn toàn chính xác sự khuếch đại của độ dâng bề mặt sóng. Do đó, những hạn chế trên đây sẽ là những đối tượng được quan tâm trong những nghiên cứu tiếp theo.

Tài liệu tham khảo

1. Marine Division - Bureau Veritas (2013), *Starspec_manual*.
2. Research Department - Bureau Veritas (2014), *HydroStar manual*.
3. Alexandre N. Simos, André L. C. Fajarra, João V. Sparano, Carlo H. Umeda, Ronaldo R. Rossi, (2006), “Experimental evaluation of the dynamic air gap of a large-volume semi-submersible platform”, *Proceeding of OMAE2006 - 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Volume 1, OMAE2006-92352, pages 393 - 400.
4. Bert Sweetman (2002), “Practical airgap prediction for offshore structures”, *Preprint submitted to Elsevier Science*.
5. A R J M Lloyd (1998), *Sea keeping: Ship behavior in rough weather*, A R J M Lloyd, 26 Spithead Avenue, Gosport, Hampshire, United Kingdom.
6. Phạm Hiền Hậu (2012), *Công trình biển mềm và phương tiện nổi*, Bộ môn Kỹ thuật Xây dựng Công trình biển và đường ống bể chứa, Khoa XDCTB & Dầu khí - Trường Đại học Xây dựng.