

$$\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (1.9)$$

Mặt khác, vì chất lỏng được giả sử là không nén được, nên mật độ, ρ , không phụ thuộc vào áp suất, chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ, T , và độ mặn, s , và phương trình trạng thái có dạng:

$$\rho = \rho(T, s) \quad (1.10)$$

Phương trình trạng thái UNESCO sẽ được sử dụng (xem UNESCO, 1981).

c. Phương trình vận chuyển nhiệt lượng và muối

Sự vận chuyển của nhiệt lượng và muối được mô phỏng bằng phương trình tải-khuếch tán có dạng tổng quát là:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (1.12)$$

Trong đó: D_v là hệ số khuếch tán rối thẳng đứng. \hat{H} là số hạng nguồn nhiệt do trao đổi nhiệt với khí quyển. T_s và s_s là nhiệt độ và độ mặn của nguồn nước chảy vào vùng nghiên cứu. F là số hạng khuếch tán ngang được định nghĩa bởi công thức:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (2.13)$$

Trong đó: đây D_h là hệ số khuếch tán rối theo phương ngang. Hệ số khuếch tán rối liên quan đến hệ số nhớt rối sau:

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T} \text{ và } D_h = \frac{V_t}{\sigma_T} \quad (2.14)$$

Trong đó: σ_T là số Prandtl. Trong nhiều ứng dụng, số Prandtl có thể xem là hằng số [(xem Rodi (1984)].

Các điều kiện biên tại bề mặt nước và tại đáy cột nước đối với trường nhiệt là:

Tại mặt cột nước, $z = \eta$:

$$D_h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_n}{\rho_0 c_p} + T_p \hat{P} - T_e \hat{E} \quad (1.15)$$

Tại đáy bể nước, $z = -d$:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1.16)$$

Ở đây Q_n là dòng nhiệt tổng cộng tại bề mặt nước và $c_p = 4217 J / (kg \cdot ^\circ K)$ là nhiệt dung riêng của nước. Một số miêu tả chi tiết về \hat{H} và Q_n được trình bày trong mục I.2.10.

Điều kiện biên tại mặt cột nước và tại đáy cột nước cho độ mặn là:

Tại mặt cột nước, $z = \eta$:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0. \quad (1.17)$$

Tại đáy cột nước $z = -d$:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0. \quad (1.18)$$

Khi tính đến trao đổi nhiệt với khí quyển, thì tốc độ bốc hơi nước được xác định bởi công thức:

$$\hat{E} = \begin{cases} \frac{q_v}{\rho_0 l_v} & q_v > 0 \\ 0 & q_v < 0 \end{cases} \quad (1.19)$$

Trong đó q_v là dòng nhiệt ẩn và $l_v = 2.5 \cdot 10^6$ là đương lượng nhiệt hóa hơi của nước.

d. Phương trình bảo toàn vật chất

Phương trình bảo toàn một chất vô hướng bất kỳ có dạng chung là:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = F_C + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + k_p C + C_s S \quad (1.20)$$

Ở đây C là nồng độ (hàm lượng) chất, k_p là tốc độ phân rã của vật chất, C_s là nồng độ của vật chất tại nguồn và D_v là hệ số khuếch tán thẳng đứng. F_C là số hạng khuếch tán rối chất được định nghĩa bởi:

Handwritten mark

$$F_c = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C \quad (2.21)$$

Điều kiện biên tại mặt cột nước và tại đáy cột nước là:

Tại mặt cột nước, $z = \eta$:

$$\frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (1.20a)$$

Tại đáy cột nước $z = -d$:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0. \quad (1.20b)$$

e. Các mô hình động lực rối

Hiệu ứng chuyển động rối được tham số bởi khái niệm **hệ số rối** (hay hệ số nhớt rối). Hệ số rối thường được xác định riêng cho vận chuyển theo phương đứng và vận chuyển theo phương ngang. Một số mô hình rối được áp dụng thực tế bao gồm: (1) Hằng số tại mỗi vị trí địa lý; (2) Công thức tính hệ số rối có dạng phân bố parabolic theo chiều thẳng đứng; (3) Mô hình động lực rối 2 tham số chuẩn $k-\varepsilon$ (Rodi, 1984).

Hệ số nhớt rối theo chiều thẳng đứng

Công thức parabolic tính hệ số nhớt rối theo phương thẳng đứng có dạng:

$$v_t = U_r h \left(c_1 \frac{z+d}{h} + c_2 \left(\frac{z+d}{h} \right)^2 \right) \quad (1.22)$$

Trong đó: $U_r = \max(U_{rs}, U_{rb})$ và c_1 và c_2 là hai hằng số. U_{rs} và U_{rb} là vận tốc ma sát mặt và đáy xác định theo ứng suất ma sát mặt nước và đáy, $c_1 = 0.41$ và $c_2 = -0.41$ cho dạng phân bố parabolic chuẩn.

Trong khối nước phân lớp, ảnh hưởng của sự phân tầng được tham số hóa số Richardson. Khi độ phân tầng ổn định tăng, giá trị của hệ số rối giảm (và ngược lại), và được tính theo công thức Munk-Anderson (Munk và Anderson, 1948).

$$v_t = v_t^* (1 + aRi)^{-b} \quad (1.23)$$

Trong đó: v_t^* là hệ số rối khi không có sự phân tầng và Ri là số Richardson gradient và

$$Ri = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)^{-1} \quad (1.24)$$

Handwritten mark

Trong đó: $a = 10$ và $b = 0.5$ là những hằng số kinh nghiệm.

Trong mô hình rối $k-\varepsilon$, hệ số rối theo phương đứng được tính theo động năng rối k và tốc độ tiêu tán động năng rối ε theo công thức:

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1.25)$$

Trong đó: k là động năng rối trên một đơn vị khối lượng (TKE), ε là tốc độ tiêu tán của TKE và c_μ là hằng số thực nghiệm.

Động năng rối, k , và độ tiêu tán động năng rối, ε , được ra tính từ các phương trình:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \varepsilon \quad (1.26)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} = F_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon}P + c_{3\varepsilon}B - c_{2\varepsilon}\varepsilon) \quad (1.27)$$

Trong đó: Nguồn động năng rối do trượt vận tốc, P , và hiệu ứng phân tầng khối nước, B , được tính bởi các công thức:

$$P = \frac{\tau_{xz}}{\rho_0} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\tau_{yz}}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial z} \approx v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (1.28)$$

$$B = -\frac{V_t}{\sigma_t} N^2 \quad (1.29)$$

Với tần số Brunt-Väisälä, N , được định nghĩa bởi quan hệ:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (1.30)$$

Trong đó: σ_t là số Prandtl rối và $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}$ và $c_{3\varepsilon}$ là những hằng số thực nghiệm.

F là số hạng khuếch tán rối ngang và được định nghĩa bởi công thức:

$$(F_k, F_\varepsilon) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (k, \varepsilon) \quad (1.31)$$

Hệ số khuếch tán rối ngang được cho bởi: $D_h = A/\sigma_k$ và $D_h = A/\sigma_\varepsilon$, tương ứng.

Nhiều hệ số thực nghiệm của mô hình rối $k-\varepsilon$ đã được xác định một cách cẩn thận với giá trị được liệt kê trong Bảng 1.1 (xem Rodi, 1984).

Bảng 1.1 Những hằng số thực nghiệm trong mô hình $k-\varepsilon$

R

c_μ	$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$	$c_{3\varepsilon}$	σ_t	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	0	0.9	1.0	1.3

Điều kiện biên cho các phương trình (1.26 và 1.27);

Tại mặt cột nước, $z = \eta$, động năng rối và tốc độ tiêu tán của nó phụ thuộc vào ứng suất gió, U_{rs} và được xác định bởi các công thức sau:

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} U_{rs}^2 \quad (1.32)$$

$$\varepsilon = \frac{U_{rs}^2}{\kappa \Delta z_b} \text{ cho } U_{rs} > 0 \quad (1.33)$$

$$\frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad \varepsilon = \frac{(k \sqrt{c_\mu})^{3/2}}{a \kappa h} \text{ cho } U_{rs} = 0$$

Trong đó: $\kappa = 0.4$ là hằng số Karman, $a = 0.07$ là hằng số thực nghiệm và Δz_b là khoảng cách từ mặt nước tới vị trí áp điều kiện biên (*trên trục thẳng đứng*).

Tại đáy cột nước, $z = -d$, động năng rối và tốc độ tiêu tán nó chỉ phụ thuộc vào ma sát đáy, nên:

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} U_{tb}^2 \quad \varepsilon = \frac{U_{tb}^3}{\kappa \Delta z_b} \quad (1.34)$$

Trong đó: Δz_b là khoảng cách từ đáy thủy vực đến vị trí áp điều kiện biên.

Hệ số nhớt rối theo phương nằm ngang

Trong nhiều ứng dụng, hệ số rối theo phương ngang tại vị trí nào đó được cho bởi hằng số. Các lựa chọn khác là sử dụng công thức Smagorinsky (1963), trong đó hệ số rối hiệu dụng được xác định qua cỡ độ dài đặc trưng theo quan hệ:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (1.35)$$

Trong đó: c_s là một hằng số, l là cỡ độ dài đặc trưng và

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (1.36)$$

1.1.2 Các phương trình HD trong tọa độ Decartes và tọa độ Sigma

Các phương trình nêu trên sẽ được giải qua phép biến đổi σ theo phương thẳng đứng:

$$\sigma = \frac{z - z_b}{h}, x' = x, y' = y \quad (1.37)$$

Trong đó: σ biến thiên từ 0 tại đáy cột nước và bằng 1 tại mặt cột nước. Sự biến đổi tọa độ này dẫn đến các mối quan hệ sau:

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (1.38)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial x'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial x} + \sigma \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma}, \frac{\partial}{\partial y'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial y} + \sigma \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \quad (1.39)$$

Trong hệ tọa độ Sigma, các phương trình mô hình HD có dạng sau:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial hw}{\partial \sigma} = hS \quad (1.40)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial huv}{\partial y'} + \frac{\partial hwu}{\partial \sigma} = \quad (1.41)$$

$$-f_v h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + hF_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + hu_s S$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x'} + \frac{\partial hv^2}{\partial y'} + \frac{\partial h w v}{\partial \sigma} = \quad (1.42)$$

$$-f_u h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + hF_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + hv_s S$$

$$\frac{\partial hT}{\partial t} + \frac{\partial huT}{\partial x'} + \frac{\partial hvT}{\partial y'} + \frac{\partial hwT}{\partial \sigma} = hF_T + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + h\hat{H} + hT_s S \quad (1.43)$$

$$\frac{\partial hs}{\partial t} + \frac{\partial hus}{\partial x'} + \frac{\partial hvs}{\partial y'} + \frac{\partial hws}{\partial \sigma} = hF_s + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial s}{\partial \sigma} \right) + hs_s S \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial huk}{\partial x'} + \frac{\partial hvk}{\partial y'} + \frac{\partial hwk}{\partial \sigma} = hF_k + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_i}{\partial_k} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + h(P + B - \varepsilon) \quad (1.45)$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hu\varepsilon}{\partial x'} + \frac{\partial hv\varepsilon}{\partial y'} + \frac{\partial hw\varepsilon}{\partial \sigma} = hF_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + h \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (1.46)$$

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x'} + \frac{\partial hvC}{\partial y'} + \frac{\partial hwC}{\partial \sigma} = hF_C + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) - hk_p C + h_s C_s S \quad (1.47)$$

Mô hình tính vận tốc theo chiều thẳng đứng có dạng:

Handwritten mark

$$\omega = \frac{1}{h} \left[w + u \frac{\partial d}{\partial x'} + v \frac{\partial d}{\partial y'} - \sigma \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x'} + v \frac{\partial h}{\partial y'} \right) \right] \quad (1.48)$$

Vận tốc theo chiều đứng bây giờ là vận tốc xuyên qua trục giao với mặt σ hằng số.

Những số hạng khuếch tán ngang được định nghĩa lại như sau:

$$hF_u \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(2hA \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (1.49)$$

$$hF_v \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2hA \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (1.50)$$

$$h(F_T, F_s, F_k, F_\varepsilon, F_c) \approx \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s, k, \varepsilon, C) \quad (1.51)$$

Điều kiện biên tại mặt cột nước và tại đáy được cho theo sau

Tại mặt cột nước, $\sigma=1$, ta có:

$$\omega=0, \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (1.52)$$

Tại đáy, $\sigma=0$, ta có:

$$\omega=0, \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (1.53)$$

Phương trình xác định độ sâu cột nước không thay đổi so với phương trình (1.6).

1.1.3. Các phương trình HD trong tọa độ cầu và tọa độ Sigma

Trong tọa độ cầu, những biến độc lập là kinh độ, λ , và vĩ độ, ϕ .

Trường vận tốc theo phương ngang (u, v) được định nghĩa

$$u = R \cos \phi \frac{d\lambda}{dt} \quad v = R \frac{d\phi}{dt} \quad (1.54)$$

Trong đó: R là bán kính trái đất.

Trong hệ thống tọa độ mới, các phương trình cơ bản có dạng:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial hu}{\partial \lambda} + \frac{\partial hv \cos \phi}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = hS \quad (1.55)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial hu^2}{\partial \lambda} + \frac{\partial hvu \cos \phi}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = \left(f + \frac{u}{R} \tan \phi \right) vh \quad (1.56)$$

Handwritten mark

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial hu v}{\partial \lambda} + \frac{\partial hv^2 \cos \phi}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = - \left(f + \frac{u}{R} \tan \phi \right) uh \quad (1.57)$$

$$- \frac{1}{R} \left(gh \frac{\partial \eta}{\partial \phi} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial \phi} + \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial \phi} dz \right) + hF_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + hv_s S$$

$$\frac{\partial hT}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial huT}{\partial \lambda} + \frac{\partial hvT \cos \phi}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial h\omega T}{\partial \sigma} = hF_T + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + h\hat{H} + hT_s S \quad (1.58)$$

$$\frac{\partial hs}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial hus}{\partial \lambda} + \frac{\partial hvs \cos \phi}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial h\omega s}{\partial \sigma} = hF_s + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial s}{\partial \sigma} \right) + hs_s S \quad (1.59)$$

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial huk}{\partial \lambda} + \frac{\partial hvk \cos \phi}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial h\omega k}{\partial \sigma} = hF_k + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + h(P + B - \varepsilon) \quad (1.60)$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial hu\varepsilon}{\partial \lambda} + \frac{\partial hv\varepsilon \cos \phi}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial h\omega\varepsilon}{\partial \sigma} = \quad (1.61)$$

$$hF_\varepsilon + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + h \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} b - c_{2\varepsilon} \varepsilon)$$

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial huC}{\partial \lambda} + \frac{\partial hvC \cos \phi}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial h\omega C}{\partial \sigma} = hF_C + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) - hk_p C + hC \quad (1.62)$$

Công thức tính vận tốc theo chiều thẳng đứng trong tọa độ này là:

$$\omega = \frac{1}{h} \left[w + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial d}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial d}{\partial y} - \sigma \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial h}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial h}{\partial \phi} \right) \right] \quad (1.63)$$

Phương trình xác định độ sâu cột nước trong tọa độ cầu sẽ là:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial h\bar{u}}{\partial \lambda} + \frac{\partial h\bar{v} \cos \phi}{\partial \phi} \right) = hS \quad (1.64)$$

I.2 PHƯƠNG TRÌNH TRÌNH CƠ BẢN 2 CHIỀU

I.2.1 Các phương trình HD 2 chiều trong hệ tọa độ Decartes

I.2.1.1 Các phương trình nước nông

Tích phân các phương trình chuyển động và phương trình liên tục theo phương thẳng đứng trên khoảng độ sâu $h = \eta + d$ cho ta các phương trình nước nông 2 chiều dạng:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1.65)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \quad (1.66)$$

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \quad (1.67)$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S$$

Dấu gạch trên chỉ giá trị trung bình theo độ sâu h . Ví dụ, \bar{u} và \bar{v} là những giá trị vận tốc trung bình theo độ sâu được định nghĩa bởi quan hệ:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (1.68)$$

Các ứng suất trên mặt bên khối nước T_{ij} bao gồm: (1) ma sát nhớt, (2) ma sát rối và trượt vận tốc và được xác định qua hệ số nhớt rối và gradient vận tốc trung bình độ sâu dạng:

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad (1.69)$$

1.2.1.2 Các phương trình vận chuyển nhiệt và muối

Lấy tích phân các phương trình vận chuyển nhiệt và muối 3 chiều theo phương đứng trên toàn độ sâu cột nước, ta có các phương trình vận chuyển nhiệt và muối dạng:

$$\frac{\partial h\bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{T}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{T}}{\partial y} = hF_T + h\hat{H} + hT_s S \quad (1.70)$$

$$\frac{\partial h\bar{s}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{s}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{s}}{\partial y} = hF_s + hs_s S \quad (1.71)$$

Trong đó: \bar{T} và \bar{s} là nhiệt độ và độ muối trung bình theo độ sâu cột nước.

1.2.1.3 Phương trình vận chuyển vật chất

Tương tự, tích phân phương trình vận chuyển vật chất 3 chiều theo phương đứng trên độ sâu h , ta có phương trình vận chuyển vật chất 2 chiều dạng:

$$\frac{\partial h\bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{C}}{\partial y} = hF_C - hk_p \bar{C} + hC_s S \quad (1.72)$$

Trong đó: \bar{c} là hàm lượng chất trung bình theo độ sâu.

1.2.2 Mô hình HD 2 chiều trong hệ tọa độ cầu:

Các biến không gian độc lập trong hệ tọa độ cầu là kinh độ λ và vĩ độ ϕ . Trường vận tốc theo phương nằm ngang (u, v) được xác định bởi công thức:

$$\bar{u} = R \cos \phi \frac{d\lambda}{dt} \quad \bar{v} = R \frac{d\phi}{dt} \quad (1.73)$$

Trong đó: R là bán kính trái đất.

Hệ phương trình của mô hình HD 2 chiều trong tọa độ cầu có dạng:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial h \bar{u}}{\partial \lambda} + \frac{\partial h \bar{v} \cos \phi}{\partial \phi} \right) = 0 \quad (1.74)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h \bar{u}}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial h \bar{u}^2}{\partial \lambda} + \frac{\partial h \bar{v} \bar{u} \cos \phi}{\partial \phi} \right) &= \left(f + \frac{\bar{u}}{R} \tan \phi \right) \bar{v} h - \\ &\frac{1}{R \cos \phi} \left(gh \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial \lambda} + \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial \lambda} + \cos \phi \frac{\partial s_{xy}}{\partial \phi} \right) \right) + \end{aligned} \quad (1.75)$$

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial \rho_0} - \frac{\partial \tau_{bx}}{\partial \rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} (h T_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h T_{xy}) + h u_s S$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h \bar{v}}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial h \bar{u} \bar{v}}{\partial \lambda} + \frac{\partial h \bar{v}^2 \cos \phi}{\partial \phi} \right) &= - \left(f + \frac{\bar{u}}{R} \tan \phi \right) \bar{u} h - \\ &\frac{1}{R} \left(gh \frac{\partial \eta}{\partial \phi} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial \phi} + \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial \phi} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial s_{yx}}{\partial \lambda} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial \phi} \right) \right) + \end{aligned} \quad (1.76)$$

$$\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial \rho_0} - \frac{\partial \tau_{by}}{\partial \rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} (h T_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h T_{yy}) + h v_s S$$

$$\frac{\partial h \bar{T}}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial h \bar{u} \bar{T}}{\partial \lambda} + \frac{\partial h \bar{v} \bar{T} \cos \phi}{\partial \phi} \right) = h F_T + h \hat{H} + h T_s S \quad (1.77)$$

$$\frac{\partial h \bar{s}}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial h \bar{u} \bar{s}}{\partial \lambda} + \frac{\partial h \bar{v} \bar{s} \cos \phi}{\partial \phi} \right) = h F_s + h s_s S \quad (1.78)$$

$$\frac{\partial h \bar{C}}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial h \bar{u} \bar{C}}{\partial \lambda} + \frac{\partial h \bar{v} \bar{C} \cos \phi}{\partial \phi} \right) = h F_C - h k_p \bar{C} + h C_s S \quad (1.79)$$

I.3 CÁC PHƯƠNG TRÌNH PHỤ TRỢ

Ngoài các phương trình cơ bản, mô hình HD còn cần đến rất nhiều các mô hình bán kinh nghiệm để khép kín hệ thống, nhất là tại các biên là mặt và đáy cột nước.

I.3.1 Công thức xác định ứng suất ma sát tại đáy cột nước

Ứng suất ma sát đáy $\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ được xác định bởi định luật ma sát bậc hai dạng:

$$\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \vec{u}_b |\vec{u}_b| \quad (1.80)$$

Trong đó: c_f là hệ số ma sát đáy và $\vec{u}_b = (u_b, v_b)$ là vận tốc dòng gần đáy.

Vận tốc ma sát liên hệ với ứng suất ma sát đáy bởi công thức:

$$U_{\tau b} = \sqrt{c_f |u_b|^2} \quad (1.81)$$

Trong mô hình 2 chiều, \vec{u}_b là vận tốc trung bình theo độ sâu và hệ số ma sát đáy có thể xác định theo hệ số Chezy, C , hay hệ số nhám Manning, M , qua các công thức:

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad (1.82)$$

$$c_f = \frac{g}{(Mh^{1/6})^2} \quad (1.83)$$

Trong mô hình 3 chiều \vec{u}_b là vận tốc tại vị trí cách Δz_b so với độ sâu đáy cột nước và hệ số ma sát được xác định bằng công thức (xuất phát từ luật phân bố loga của tốc độ dòng chảy tại lớp cận đáy thủy vực):

$$c_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\Delta z_b}{z_0} \right) \right)^2} \quad (1.84)$$

Trong đó: $\kappa = 0.4$ là hằng số von Karman và z_0 là hệ số gồ ghề đáy, phụ thuộc vào chiều cao gồ ghề, k_s và được tính theo công thức:

$$z_0 = mk_s \quad (1.85)$$

Trong đó: m xấp xỉ là 1/30. Hệ số Manning có thể được ước tính theo chiều dài gồ ghề đáy theo công thức:

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}} \quad (1.86)$$

1.3.2 Công thức tính ứng suất ma sát gió tại mặt cột nước

Ứng suất gió tác động gió lên mặt cột nước nước $\bar{\tau}_b = (\tau_{xx}, \tau_{yy})$ được xác định bởi công thức thực nghiệm:

$$\bar{\tau}_b = \rho_a c_d |u_w| \bar{u}_w \quad (1.87)$$

Trong đó: ρ_a là mật độ không khí, c_d là hệ số ma sát của không khí lên mặt nước, và $\bar{u}_w = (u_w, v_w)$ là các thành phần vận tốc gió trên độ cao 10 m so với mặt nước. Vận tốc ma sát gió liên hệ với ứng suất ma sát gió tại mặt cột nước được tính ra theo công thức:

$$U_{rs} = \sqrt{\frac{\rho_a c_f |u_w|^2}{\rho_0}} \quad (1.88)$$

Hệ số ma sát gió có thể là hằng số hoặc có thể phụ thuộc vào tốc độ gió. Công thức kinh nghiệm do Wu (1980, 1994) đề xuất sẽ được sử dụng để tính hệ số ma sát gió như sau:

$$c_f = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} < w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{cases} \quad (1.89)$$

Trong đó: c_a, c_b, w_a và w_b là hệ số kinh nghiệm và w_{10} là vận tốc gió 10 m trên mặt nước. Trị số mặc định của chúng là: $c_a = 1.255 \cdot 10^{-3}$, $c_b = 2.425 \cdot 10^{-3}$, $w_a = 7$ m/s và $w_b = 25$ m/s. Kết quả sẽ tốt cho vùng biển khơi. Đối với vùng biển ven bờ, cửa sông, sông và hồ, trị số của chúng lớn hơn vùng biển khơi 20-30% [Xem Geerneck và Plant (1990)].

1.3.3 Ảnh hưởng ứng suất bức xạ sóng lên động lực dòng nước

Ảnh hưởng của ứng suất phát xạ do sóng vỡ tại vùng nước nông có thể được đưa vào mô hình HD thông qua gradient của các số hạng: S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} . Đây là một lựa chọn tùy ý của người sử dụng mô hình MIKE 21/3 coupled Model FM bằng cách tích hợp

module phổ sóng làm việc đồng thời với module HD. Công thức tính S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} như trong chương II). Do đó, việc tích hợp mô hình thủy động lực học và phổ sóng để giải đồng thời là rất quan trọng đối với vùng biển nước nông, nhất là trong bài toán bồi xói.

I.3.4 Ảnh hưởng bồi xói lên động lực dòng nước

Bồi xói dẫn đến thay đổi địa hình đáy và bờ dẫn đến biến đổi chế độ thủy động lực học tại vùng nghiên cứu. Do đó việc tích hợp mô hình thủy động lực học với mô hình vận chuyển bùn cát và bồi xói cũng là hướng tiếp cận rất thực tế và đúng đắn để giải quyết bài toán thủy động lực biển ven bờ và các cửa sông.

I.3.5 Tham số hóa trao đổi nhiệt với khí quyển lên dòng chảy

Trao đổi nhiệt giữa cột nước với không khí được thực hiện qua 4 quá trình vật lý:

1. Dòng nhiệt ẩn nhiệt do bốc hơi nước;
2. Dòng nhiệt do đối lưu;
3. Cân bằng năng lượng bức xạ sóng ngắn;
4. Cân bằng năng lượng bức xạ sóng dài.

Chúng xảy ra trên mặt và bên trong cột nước.

Cường độ dòng năng lượng bức xạ tại độ sâu d được xấp xỉ bằng định luật Beer có dạng:

$$I(d) = (1 - \beta) I_0 e^{-\lambda d} \quad (1.90)$$

Trong đó: $I(d)$ là cường độ tại độ sâu d dưới bề mặt; I_0 là cường độ bức xạ sóng ngắn tại mặt nước; β là một đại lượng để chỉ phần năng lượng tia bị mặt nước hấp thụ (tia hồng ngoại); λ là hệ số tắt dần của ánh sáng. Những giá trị cho β và λ tương ứng là $0.2 - 0.6$ và $0.5 - 1.4 \text{ m}^{-1}$. Giá trị mặc định là $\beta = 0.3$ và $\lambda = 1.0 \text{ m}^{-1}$. Phần năng lượng ánh sáng được hấp thụ gần bề mặt là βI_0 . Năng lượng bức xạ sóng ngắn, $q_{sr,net}$, bị tắt dần theo của định luật Beer. Do đó, dòng nhiệt qua mặt nước được xác định theo công thức:

$$Q_n = q_v + q_c + \beta q_{sr,net} + q_{lr,net} \quad (1.91)$$

Cho mô hình 3 chiều, số hạng nguồn \hat{H} tính theo quan hệ:

$$\hat{H} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{q_{sr,net} (1-\beta) e^{-\lambda(\eta-z)}}{\rho_0 c_p} \right) = \frac{q_{sr,net} (1-\beta) e^{-\lambda(\eta-z)}}{\rho_0 c_p} \quad (1.92)$$

Cho mô hình 2 chiều, số hạng nguồn \hat{H} tính theo công thức:

$$\hat{H} = \frac{q_v + q_c + q_{sr,net} + q_{lr,net}}{\rho_0 c_p} \quad (1.93)$$

Các mô hình tính dòng nhiệt ẩn, dòng nhiệt đối lưu, cân bằng năng lượng tia sóng ngắn và sóng dài như ở dưới đây.

1.3.5.1 Bốc hơi nước và dòng nhiệt ẩn do bốc hơi

Định luật Dalton về sự mất nhiệt do bốc hơi được thể hiện qua công thức:

$$q_v = LC_e (a_1 + b_1 W_{2m}) (Q_{water} - Q_{air}) \quad (1.94)$$

Trong đó: $L = 2.5 \cdot 10^6 J/kg$ là đương lượng nhiệt hóa hơi; $C_e = 1.32 \cdot 10^{-3}$ là hệ số truyền ẩm (hay hệ số Dalton); W_{2m} là tốc độ gió tại độ 2m trên mặt nước; Q_{water} là độ ẩm cận mặt nước; Q_{air} là độ ẩm trong không khí; a_1 và b_1 là các hệ số có giá trị mặc định là $a_1 = 0.5$ và $b_1 = 0.9$. Trị số Q_{water} và Q_{air} tính theo áp suất riêng của hơi nước qua công thức:

$$Q_i = \frac{0.2167}{T_i + T_k} e_i \quad (1.95)$$

Chỉ số i dùng chung cho cả môi trường mặt nước và không khí. Áp suất hơi tại mặt nước, e_{water} , có thể xác định với giả thiết cho rằng, không khí tại đây đã bão hòa hơi nước và có nhiệt độ như nhiệt độ mặt nước, theo công thức:

$$e_{water} = 6.11 e^K \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{water} + T_k} \right) \quad (1.96)$$

Trong đó: $K = 5,418^0 K$ và $T_K = 273,15^0 K$ là nhiệt độ tại $0^0 C$.

Tương tự, áp suất hơi trong không khí, e_{air} , có thể tính theo của nhiệt độ không khí và độ ẩm tương đối R theo công thức:

$$e_{air} = R \cdot 6.11 e^K \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{air} + T_k} \right) \quad (1.97)$$

Thay thế Q_{water} và Q_{air} bởi các biểu thức trên, ta có công thức xác định dòng nhiệt ẩn do bốc hơi qua nhiệt độ nước và nhiệt độ không khí như sau:

$$q_v = -P_v(a_1 + b_1 W_{2M}) \left(\frac{\exp\left(K\left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{water} + T_k}\right)\right)}{T_{water} + T_k} - \frac{R \cdot \exp\left(K\left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{air} + T_k}\right)\right)}{T_{air} + T_k} \right) \quad (1.98)$$

Trong đó: tất cả các hằng số đã được gộp lại bởi một hằng số: $P_v = 4370 J \cdot ^\circ K / m^3$. Dòng nhiệt ẩn do bốc hơi có tác động khá lớn vì nó làm giảm nhiệt độ mặt nước, trị số của nó có thể lên đến $100 W / m^2$.

1.3.5.2 Dòng nhiệt do đối lưu

Dòng nhiệt do đối lưu, $q_c (W / m^2)$, phụ thuộc vào động lực lớp biên giữa mặt nước và khí quyển. Nhìn chung lớp biên này là biên rối, trong đó dòng nhiệt do đối lưu có thể xác định theo công thức bán kinh nghiệm:

$$q_c = \begin{cases} \rho_{air} c_{air} c_{heating} W_{10} (T_{air} - T_{water}) & T_{air} \geq T_{water} \\ \rho_{air} c_{air} c_{cooling} W_{10} (T_{air} - T_{water}) & T_{air} < T_{water} \end{cases} \quad (1.99)$$

Trong đó: ρ_{air} là mật độ không khí $1.225 kg/m^3$; $c_{air} = 1007 J / (kg \cdot ^\circ K)$ là nhiệt dung riêng của không khí; $c_{heating} = 0.0011$ và $c_{cooling} = 0.011$, tương ứng là hệ số truyền nhiệt; T_{water} là nhiệt độ nước tại mặt cột nước; T_{air} là nhiệt độ không khí ở độ cao 2m so với mặt nước. Trị số tiêu biểu của dòng nhiệt đối lưu là từ 0 đến $100 W / m^2$.

1.3.5.3 Dòng nhiệt do bức xạ sóng ngắn

Bức xạ mặt trời bao gồm các sóng điện từ có bước sóng từ 1000 đến 30000 Å. Phần lớn năng lượng của chúng bị hấp thụ trong tầng ozone, một phần năng lượng của chúng tới được mặt trái đất. Phần của chúng sau khi xuyên qua khí quyển đến mặt nước. Phần lớn tia hồng ngoại và tia cực tím bị hấp thụ, nên bức xạ mặt trời trên mặt đất là ánh sáng trắng với bước sóng từ 400 đến 9000 Å. Chúng là các thành phần chính của bức xạ sóng ngắn. Cường độ dòng bức xạ sóng ngắn tại 1 điểm phụ thuộc vào khoảng cách đến mặt trời, góc nghiêng, vĩ độ địa lý, bức xạ ngoài khí quyển, lượng mây và lượng hơi nước trong khí quyển (xem Iqbal, 1983).

Đầu tiên là công thức tính độ lệch tâm trong quỹ đạo mặt trời, E_0 :

$$\begin{aligned} E_0 &= \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1.000110 + 0.034221 \cos(\Gamma) + 0.001280 \sin(\Gamma) \\ &= 0.000719 \cos(2\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma) \end{aligned} \quad (1.100)$$

Trong đó: r_0 là khoảng cách trung bình đến mặt trời, r là khoảng cách thực và góc ngày Γ (rad) được định nghĩa bởi

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (1.101)$$

và d_n là ngày dương lịch của năm.

Kế đến là góc nghiêng của quỹ đạo, δ (rad), biến đổi theo mùa, được tính theo công thức:

$$\begin{aligned} \delta &= 0.006918 - 0.399912 \cos(\Gamma) + 0.07257 \sin(\Gamma) - 0.006758 \cos(2\Gamma) \\ &\quad + 0.000907 \sin(2\Gamma) - 0.002697 \cos(3\Gamma) + 0.00148 \sin(\Gamma) \end{aligned} \quad (1.102)$$

Chiều dài của ngày, n_d , biến thiên theo góc nghiêng δ và được tính theo công thức:

$$n_d = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \quad (1.103)$$

Góc mặt trời mọc, ω_{sr} (rad), và góc mặt trời lặn ω_{ss} (rad) được xác định theo quan hệ:

$$\omega_{sr} (rad) = \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \text{ và } \omega_{ss} = \omega_{sr} \quad (1.104)$$

Cường độ của bức xạ sóng ngắn trên mặt phẳng song song với mặt cột nước phụ thuộc vào góc tới. Cường độ này cao nhất khi mặt trời đạt đỉnh và thấp nhất trong khoảng từ hoàng hôn đến bình minh. Kết quả tích phân cường độ bức xạ sóng ngắn cho điểm nằm trên bên ngoài khí quyển cho một ngày, H_0 ($MJ/m^2/day$), là:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} q_{sc} E_0 \cos(\phi) \cos(\delta) (\sin(\omega_{sr}) - \omega_{sr} \cos(\omega_{sr})) \quad (1.105)$$

Trong đó: $q_{sc} = 4.9212$ ($MJ/m^2/h$) là hằng số mặt trời. Năng lượng bức xạ sóng ngắn hằng ngày khi có mây, H ($MJ/m^2/day$), được tính theo các quan hệ như sau:

$$\frac{H}{H_0} = a_2 + b_2 \frac{n}{n_d} \quad (1.106)$$

Với n là tổng số giờ nắng và n_d là tổng số giờ nắng cực đại trong ngày. a_2 và b_2 là hệ số do người dùng xác định. Các giá trị mặc định là: $a_2 = 0.295$ và $b_2 = 0.371$.

Bức xạ sóng ngắn trung bình hằng ngày, q_s ($MJ/m^2/h$), tính ra theo công thức:

$$q_s = \left(\frac{H}{H_0} \right) q_0 (a_3 + b_3 + \cos(\omega_i)) \quad (1.107)$$

$$a_3 = 0.4090 + 0.5016 \sin\left(\omega_{sr} - \frac{\pi}{3}\right) \quad (1.108)$$

$$b_3 = 0.6609 + 0.4767 \sin\left(\omega_{sr} - \frac{\pi}{3}\right) \quad (1.109)$$

Cường độ bức xạ sóng ngắn bên ngoài khí quyển, q_0 ($MJ/m^2/h$) và góc giờ ω_i được xác định theo các công thức sau:

$$q_0 = q_{sc} E_0 \left(\sin(\phi) \sin(\delta) + \frac{24}{\pi} \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega_i) \right) \quad (1.110)$$

$$\omega_i = \frac{\pi}{12} \left(12 + \Delta t_{displacement} + \frac{4}{60} (L_S - L_E) - \frac{E_i}{60} - t_{local} \right) \quad (1.111)$$

$\Delta t_{displacement}$ là độ lệch giờ vì thời gian mùa hè và mùa đông và L_S là kinh độ chuẩn của đới thời gian. $\Delta t_{displacement}$ và L_S do người dùng chỉ định. Giá trị mặc định là $\Delta t_{displacement} = 0(h)$ và $L_S = 0(deg)$. L_E là kinh độ địa phương. $E_i(s)$ là sự khác nhau trong thời gian do quỹ đạo mặt trời thay đổi trong năm, được xác định theo công thức:

$$E_i = \begin{pmatrix} 0.000075 + 0.001868 \cos(\Gamma) - 0.032077 \sin(\Gamma) \\ -0.014615 \cos(2\Gamma) - 0.04089 \sin(2\Gamma) \end{pmatrix} \cdot 229.18 \quad (1.112)$$

Và t_{local} là thời gian địa phương theo giờ. Bức xạ mặt trời khi chạm vào mặt nước không xuyên qua hết để đi vào trong khối nước. Phần phản xạ trở lại khí quyển và bị mất nếu chúng không được trả lại từ vùng bao quanh vị trí nghiên cứu. Sự phản xạ của năng lượng mặt trời được tham số hóa qua albedo. Lượng năng lượng bị mất do phản xạ, tùy thuộc vào góc tới và góc phản xạ. Hệ số phản xạ từ mặt nước phẳng là đại lượng:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)} \right) \quad (1.113)$$

Trong đó: i là góc tới, r là góc phản xạ và α là hệ số phản xạ có giá trị nằm trong khoảng 5 đến 40%. Hệ số phản α có thể được xấp xỉ bởi các quan hệ:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\text{altitude}}{5} \cdot 0.48 & \text{altitude} < 5 \\ \frac{30 - \text{altitude}}{25} (0.48 - 0.05) & 5 \leq \text{altitude} \leq 30 \\ 0.05 & \text{altitude} > 30 \end{cases} \quad (1.114)$$

Trong đó: *Altitude* là độ cao mặt trời tính bằng độ và được xác định theo công thức:

$$\text{altitude} = 90 - \left(\frac{180}{\pi} \arccos(\sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega_i)) \right) \quad (1.115)$$

Cuối cùng, cân bằng bức xạ sóng ngắn, $q_{s,net}$ (W/m^2) được tính theo công thức:

$$q_{s,net} = (1 - \alpha) q_s \frac{10^6}{3600} \quad (1.116)$$

1.3.5.4 Công thức xác định cân bằng bức xạ sóng dài

Bức xạ sóng dài từ mặt nước và khí quyển có bước sóng nằm trong khoảng từ 9000 đến 25000 Å. Hiệu năng lượng bức xạ sóng dài từ mặt nước và bức xạ sóng dài từ khí quyển đến mặt nước gọi là cân bằng bức xạ sóng dài. Nó phụ thuộc vào độ che phủ của mây, nhiệt độ không khí, áp suất hơi và độ ẩm tương đối và nhiệt độ nước mặt. Cân bằng năng lượng bức xạ sóng dài, $q_{lr,net}$ (W/m^2), tính theo phương trình Brunt (xem Lind and Falkenmark, 1972):

$$q_{lr,net} = -\sigma_{sb} (T_{air} + T_K)^4 (a - b\sqrt{e_d}) \left(c + d \frac{n}{n_d} \right) \quad (1.117)$$

Trong đó: e_d là áp suất hơi tại nhiệt độ điểm sương (md); n là số giờ chiếu sáng, n_d là số giờ chiếu sáng lớn nhất ngày; $\sigma_{sb} = 5.6697 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ là hằng số Stefan Boltzman; T_{air} ($^{\circ}C$) là nhiệt độ không khí. Các hệ số a , b , c và d có giá trị như sau:

$$a = 0.56; b = 0.077mb^{-1/2}; c = 0.10; d = 0.90 \quad (1.118)$$

Áp suất hơi được xác định theo quan hệ:

$$e_d = 10 \cdot R e_{saturated} \quad (1.119)$$

Trong đó: R là độ ẩm tương đối và $e_{saturated}$ (kPa) là áp suất hơi bão hòa khi độ ẩm tương đối là 100%. Trong khoảng nhiệt độ không khí từ -51 đến $52^\circ C$, có thể tính $e_{saturated}$ (kPa) theo công thức:

$$e_{saturated} = 3.38639 \cdot \left((7.38 \cdot 10^{-3} \cdot T_{air} + 0.8072)^2 - 1.9 \cdot 10^{-5} |1.8 \cdot T_{air} + 48| + 1.316 \cdot 10^{-3} \right) \quad (1.120)$$

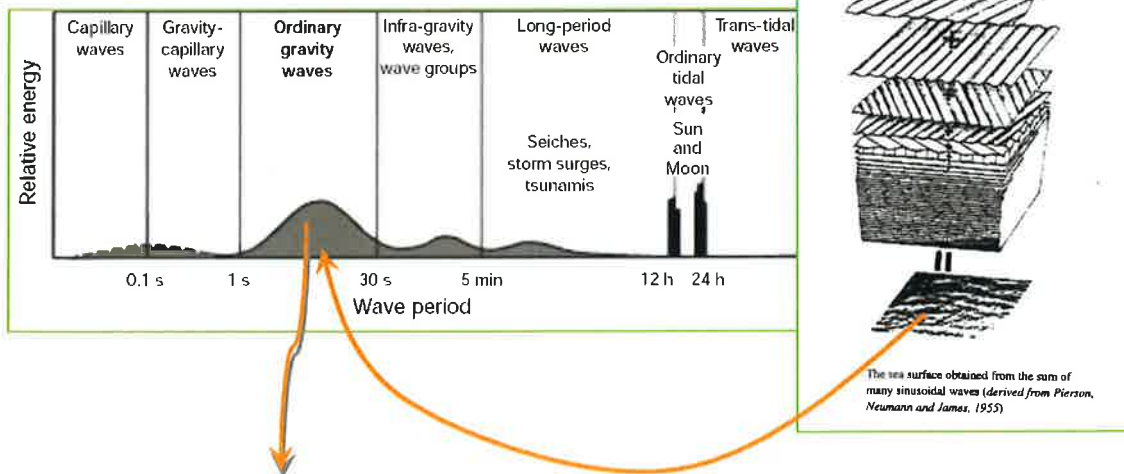
II. Module phổ sóng biển

II.1 Các phương trình cơ bản

II.1.1 Các khái niệm

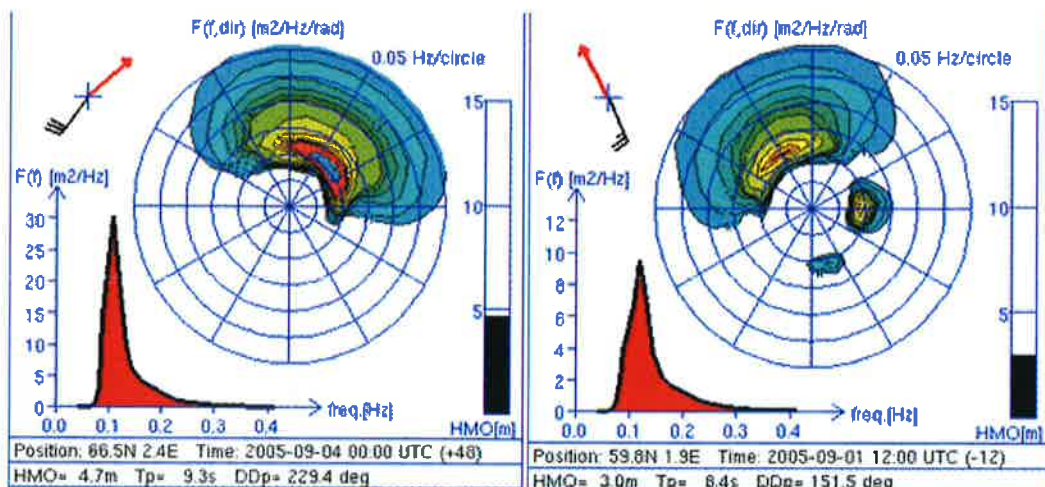
Sóng biển là một trong các hiện tượng tự nhiên liên quan mật thiết với đời sống và hoạt động của loài người và được con người phản ánh qua nhiều sản phẩm văn hóa-nghệ thuật (thơ, văn, nhạc, họa...) và khoa học công nghệ với các lãnh vực chính là: (1) Đo đạc khảo sát, tính toán, mô tả, dự báo sóng theo nghĩa sóng biển là một hiện tượng cơ học ngẫu nhiên trong môi trường liên tục; (2) Xây dựng công trình, thiết kế các thiết bị, các giải pháp và quy trình nhằm giảm thiểu tác động tiêu cực và khai thác tác động tích cực của sóng; (3) Thiết lập các thiết bị công nghệ hoạt động trong điều kiện chung sống với sóng biển và hơn thế là khai thác năng lượng sóng biển.

Về phương diện hình thái, sóng biển là một quá trình ngẫu nhiên, tổng hợp từ nhiều sóng thành phần với chu kỳ, biên độ, hướng, khuôn dạng và bước sóng khác nhau. Dải phổ theo chu kỳ của sóng biển hẹp, ổn định và nằm trong khoảng từ 0,1 giây đến 30,0 giây. Mặt khác, sóng là hiện tượng cơ học có hướng, do đó phổ sóng tại mỗi vị trí địa lý



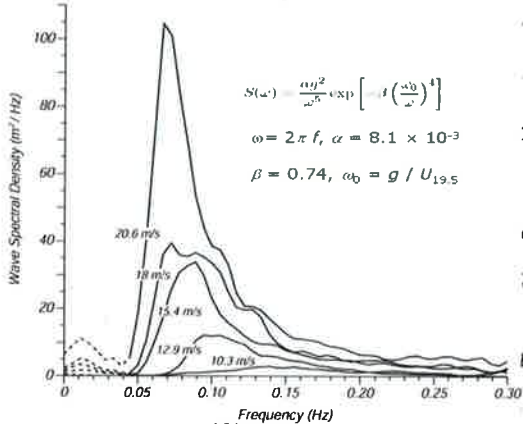
Hình 2.1. Sóng biển, phổ sóng biển và giới hạn chu kỳ của sóng sẽ nghiên cứu

là hàm có hai đối số là chu kỳ (*hay tần số*) và hướng, và được gọi phổ hai chiều (xem hình 2.2. và 2.3). Lát cắt phổ sóng hai chiều theo một hướng là phổ sóng một chiều (xem hình 2.4 và 2.5). Phổ sóng sóng đã phát triển và sóng đang phát triển khác nhau. Như vậy, phổ sóng là hàm của 6 đối số là: chu kỳ, hướng, thời gian và 3 tọa độ không gian (x, y, z).

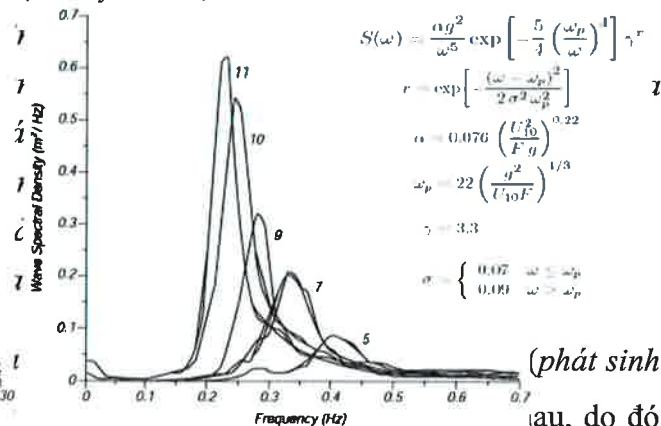


Về phương diện quan hệ nhân-quả, sóng được hình thành bởi tác động tổng hợp của 7 cơ chế chính là: Hình 2.3 Phổ sóng tổng hợp sóng gió và sóng lừng 2 chiều (2-D)

- Năng lượng sóng từ các miền lân cận truyền đến;



Hình 2.4 Mô hình mô phỏng sóng 1 chiều của sóng gió đã phát triển của Mitsui (1964)

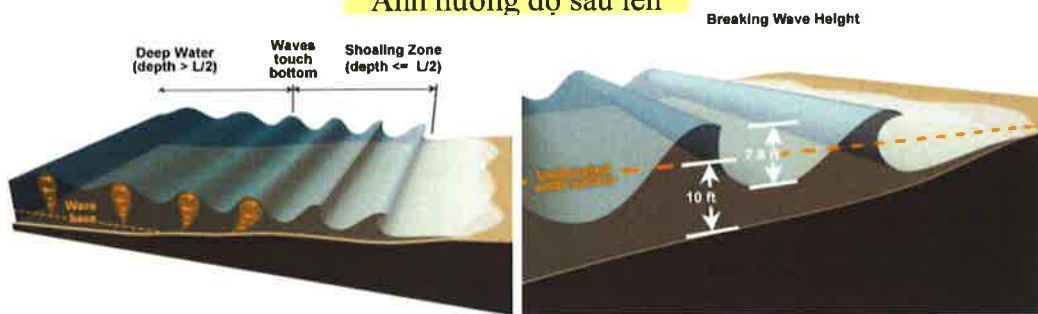


Hình 2.5 Mô hình mô phỏng sóng 1 chiều của sóng gió đã phát triển của Hasselmann (1973). (JONSWAP spectrum)

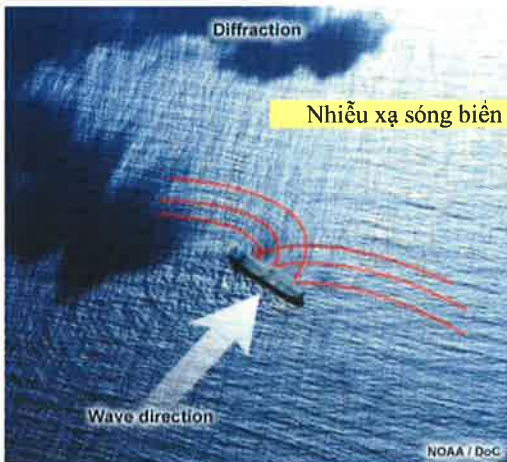
Mitsui (1964) đã xây dựng được nhiều phương pháp xác định khả chính xác giá trị của hầu hết các đặc trưng sóng, trong số đó phương pháp số trị giải các mô hình toán tắt định (*dựa vào các quy luật quan hệ nhân-quả*) trên máy tính số là phương pháp hiện đại và tối ưu

2

Wave Shoaling Ảnh hưởng độ sâu lên

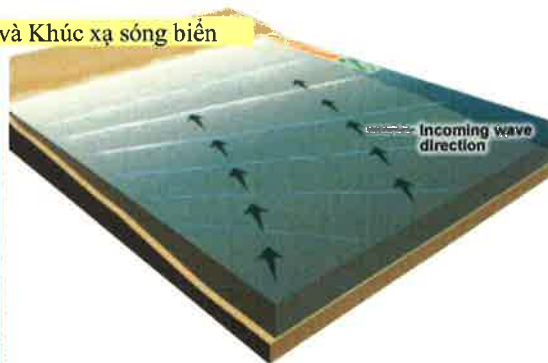


Diffraction



Nhiều xạ sóng biển và Khúc xạ sóng biển

Refraction



Ảnh hưởng dòng chảy lên sóng biển

Khi hướng sóng và dòng chảy cùng chiều và Khi hướng sóng và dòng chảy ngược chiều



Ocean Current

Ocean Current

Handwritten signature

Học thuyết động lực sóng trọng lực hiện đại được mô tả bởi phương trình **vận chuyển mật độ tác động sóng** N . N biến thiên theo thời gian và không gian, là một hàm của hai tham số pha sóng, có thể là số sóng vector \vec{k} với độ lớn, k , và hướng, θ . Tham số sóng cũng có thể là hướng sóng θ và tần số góc tương đối (nội tại) $\sigma = 2\pi f_r$, hay tần số góc tuyệt đối $\omega = 2\pi f_a$. Mật độ tác động sóng N liên quan đến mật độ năng lượng E sóng bởi công thức:

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (2.1)$$

Đối với các ứng dụng quy mô nhỏ, mô hình phổ sóng thường được thiết lập trong hệ tọa độ Decartes, trong khi hệ tọa độ cầu được sử dụng cho các ứng dụng quy mô lớn.

Đối với sự lan truyền sóng qua miền độ sâu thay đổi chậm và tốc độ dòng chảy nhỏ, mối quan hệ giữa tần số góc tương đối (*quan sát thấy trong khung quy chiếu chuyển động với vận tốc dòng chảy*) và tần số tuyệt đối góc, ω , (*quan sát thấy trong khung cố định*) được cho bởi quan hệ phân tán tuyến tính dạng:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (2.2)$$

Ở đây: g là gia tốc trọng trường, d là độ sâu nước và \vec{U} là vector vận tốc dòng chảy. Độ lớn của vận tốc nhóm c_g tương đối của sóng so với dòng được cho bởi

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} \quad (2.3)$$

Vận tốc pha c tương đối của sóng so với dòng chảy được cho bởi quan hệ:

$$c = \frac{\sigma}{k} \quad (2.4)$$

Phổ tần số được giới hạn trong phạm vi giữa một tần số tối thiểu, σ_{\min} , và tần số tối đa, σ_{\max} . Phổ tần số được chia ra thành 2 phần: (1) Phần tắt định với tần số thấp hơn tần số

giới hạn; (2) Phần phân tích chuẩn đoán với tần số cao hơn tần số giới hạn. Trị số của tần số giới hạn phụ thuộc vào tốc độ gió địa phương và tần số trung bình thường dùng như trong mô hình WAM thể hệ 4 [xem WAMDI Group (1988) và Komen (1994)]. Phần tắt định của phổ sóng được xác định bằng lời giải phương trình vận chuyển mật độ tác động sóng. Đối với tần số cao hơn tần số giới hạn tối đa, tham số cuối được áp dụng là đại lượng năng lượng sóng:

$$E(\sigma, \theta) = E(\sigma_{\max}, \theta) \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^{-m} \quad (2.5)$$

Ở đây: m là một hằng số, $m = 5$. Tần số tắt định tối đa, được xác định như sau:

$$\sigma_{\text{cut-off}} = \min [\sigma_{\max}, \max(2.5 \bar{\sigma}, 4\sigma_{PM})] \quad (2.6)$$

Ở đây: σ_{\max} là tần số tối đa sử dụng trong mô hình sóng tắt định, $\bar{\sigma}$ là tần số tương đối trung bình và $\sigma_{PM} = g / (28U_{10})$ là tần số tại đỉnh phổ sóng phát triển Pierson-Moskowitz (U_{10} là tốc độ gió ở 10 m trên mực nước biển).

II.2 Phương trình bảo toàn mật độ tác động sóng

Trong hệ tọa độ Decartes, phương trình bảo tồn mật độ tác động sóng có dạng:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2.7)$$

Ở đây $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ là mật độ tác động, t là thời gian, $\vec{x} = (x, y)$ là hệ tọa độ Decartes, $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ là vận tốc lan truyền sóng trong không gian pha bốn chiều \vec{x}, σ, θ , và S là số hạng nguồn của phương trình cân bằng mật độ tác động sóng. ∇ là toán tử vi phân trong không gian bốn chiều. Bốn tốc độ lan truyền đặc trưng được cho bởi các công thức:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad (2.8)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + U \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \cdot \vec{k} \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \quad (2.9)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad (2.10)$$

Ở đây, s là tọa độ trong không gian với hướng sóng θ và m là tọa độ vuông góc với s .
 ∇_x là toán tử vi phân hai chiều không gian (x, y) .

Trong hệ tọa độ cầu, tính chất bảo toàn là mật độ tác động sóng $\hat{N}(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$. Ở đây, $\vec{x} = (\phi, \lambda)$ là tọa độ địa lý, ϕ là vĩ độ và kinh độ là λ . \hat{N} liên quan với N thông qua $\hat{N} d\sigma d\theta d\phi d\lambda = N d\sigma d\theta dx dy$, hoặc

$$\hat{N} = NR^2 \cos \phi = \frac{ER^2 \cos \phi}{\sigma} \quad (2.11)$$

Trong đó: R là bán kính trái đất.

Trong hệ tọa độ cầu, phương trình cân bằng mật độ tác động sóng có dạng:

$$\frac{\partial \hat{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi} c_\phi \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_\lambda \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta \hat{N} = \frac{\hat{S}}{\sigma} \quad (2.12)$$

Ở đây $\hat{S}(\vec{x}, \sigma, \theta, t) = SR^2 \cos \phi$ là nguồn phát sinh và tiêu tán mật độ tác động sóng.

Bổn tốc độ lan truyền đặc trưng được cho bởi các công thức:

$$c_\phi = \frac{d\phi}{dt} = \frac{c_g \cos \theta + u_\phi}{R} \quad (2.13)$$

$$c_\lambda = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{c_g \sin \theta + u_\lambda}{R \cos \phi} \quad (2.14)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} - \frac{d}{R} \left(\frac{1}{\cos \phi} \frac{du_\lambda}{d\lambda} + \frac{du_\phi}{d\phi} - u_\phi \tan \phi \right) \right] - \frac{kc_g}{R} \left[\frac{\cos \theta (\sin \theta \frac{du_\lambda}{d\phi} + \cos \theta \frac{du_\phi}{d\phi}) + \frac{\sin \theta}{\cos \phi} (\sin \theta \frac{du_\lambda}{d\lambda} + \cos \theta \frac{du_\phi}{d\lambda})}{\cos \theta \tan \phi (u_\lambda \sin \phi + u_\phi \cos \theta)} \right] \quad (2.15)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{c_g \sin \theta \tan \phi}{R} + \frac{1}{Rk} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\sin \theta \frac{\partial d}{\partial \phi} - \frac{\cos \theta}{\cos \phi} \frac{\partial d}{\partial \lambda} \right) + \frac{\sin \theta}{R} \left(\sin \theta \frac{\partial u_\lambda}{\partial \phi} + \cos \theta \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right) - \frac{\cos \theta}{R \cos \phi} \left(\sin \theta \frac{\partial u_\lambda}{\partial \lambda} + \cos \theta \frac{\partial u_\phi}{\partial \lambda} \right) \quad (2.16)$$

Ở đây: (u_λ, u_ϕ) là các thành phần vận tốc dòng chảy \vec{U} . Đối với hướng sóng θ , ta dùng quy ước chung là góc theo chiều kim đồng hồ được xác định từ cực Bắc và hướng sóng từ là đầu tới vị trí khảo sát.

R

II.3 Nguồn năng lượng sóng

Số hạng nguồn năng lượng sóng, S , bao gồm tổng các nguồn thành phần:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (2.17)$$

Trong đó: S_{in} đặc trưng cho nguồn từ năng lượng gió; S_{NL} là việc chuyển giao năng lượng sóng do tương tác phi tuyến tính của các sóng với nhau; S_{DS} là tiêu tán năng lượng sóng do sóng bậc đầu; S_{bot} là tiêu tán năng lượng sóng do ma sát đáy và S_{surf} là tiêu tán năng lượng sóng do sóng đổ tại vùng sóng vỗ bờ.

II.3. 1 Nguồn năng lượng sóng từ gió

Các nghiên cứu của Janssen (1989,1991), cho thấy, tốc độ tăng trưởng của sóng do gió phụ thuộc vào tuổi sóng vì nó phụ thuộc của lực cản khí động học của mặt biển.

Nguồn S_{in} được cho bởi quan hệ:

$$S_{in}(f, \theta) = \gamma E(f, \theta) \quad (2.18)$$

Ở đây: γ là tốc độ tăng trưởng. Theo Janssen (1991), thì:

$$\gamma = \epsilon \beta \sigma x^2 \quad (19)$$

Ở đây: ϵ là tỷ số mật độ của không khí vào nước ρ_a / ρ_w và σ là tần số góc tương đối và x được xác định theo công thức:

$$x = \frac{u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) \quad (2.20)$$

Trong đó: u_* là vận tốc ma sát gió, c là pha vận tốc và θ , θ_w là tương ứng là hướng sóng và hướng gió. Cuối cùng, β được tính theo công thức:

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu \leq 1 \quad (2.21)$$

$$\beta = 0 \quad \mu > 1$$

Trong đó: κ là hằng số von Karman, $\kappa = 0.41$ và μ là độ cao tới hạn không thứ nguyên:

$$\mu = kz_c \quad (2.22)$$

Ở đây: k là số sóng và z_c là độ cao tới hạn được định nghĩa là độ cao kể từ mặt nước biển, mà tại đó tốc độ gió là bằng tốc độ pha của sóng. Giả sử, tốc độ gió phân bố theo quy luật lôgarit, thì độ cao tới hạn được tính theo công thức:

$$z_c = z_0 \exp(\kappa / x) \quad (2.23)$$

Trong mô hình WAM, phương trình (2.20) được điều chỉnh như sau:

$$x = \left(\frac{u_*}{c} + z_a\right) \cos(\theta - \theta_w) \quad (2.24)$$

Trong đó: $z_a = 0,011$.

Sử dụng các phương trình (2.21) → (2.24), ta có công thức tính tốc độ tăng trường sóng do gió như sau:

$$\gamma = \begin{cases} \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \left(\frac{1,2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu\right) \sigma \left[\left(\frac{u_*}{c} + z_a\right) \cos(\theta - \theta_w)\right] & \mu \leq 1 \\ \gamma = 0 & \mu > 1 \end{cases} \quad (2.25)$$

Ở đây:

$$\mu = \kappa z_0 \exp(\kappa / x) \quad (2.26)$$

Đối với tốc độ và hướng đã cho, tốc độ tăng trường của sóng có tần số và hướng nhất định phụ thuộc vào tốc độ ma sát gió u_* và độ nhám của mặt biển z_0 . Để tính toán u_* , Janssen giả định tốc độ gió $u(z)$ phân bố theo độ cao theo hàm logarit dạng:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z + z_{ow}}{z_{ob} + z_{ow}}\right) \quad (2.27)$$

Trong đó: z_{ob} tham số hóa hiệu quả của các sóng trọng lực-mao dẫn (độ nhám nền) và z_{ow} tham số hóa hiệu quả tác dụng của sóng ngắn trọng lực. z_{ob} được tính theo công thức Charnock dạng:

$$z_{ob} = z_{\text{Charnock}} u_*^2 / g \quad (2.28)$$

Ở đây: z_{Charnock} là tham số Charnock và $z_{\text{Charnock}} = 0,01$. Thông thường, z_{ow} rất nhỏ, nên ta có công thức đơn giản để tính tốc độ ma sát gió như sau:

$$u_* = \frac{\kappa u(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.29)$$

Có ba công thức tính toán u_* và z_0 như sau:

1. **Công thức thứ nhất** dựa vào luật trở kháng của gió trên mặt nước, trong đó mối quan hệ giữa tốc độ gió $U_w = u(z)$ ở mức $z = z_{\text{wind}}$ và vận tốc ma sát gió là một công thức thực nghiệm đơn giản dạng:

$$u_*^2 = C_D \cdot U_w^2, \quad C_D = \alpha_{\text{drag}} + \beta_{\text{drag}} \cdot U_w \quad (2.30)$$

Trong đó α_{drag} và β_{drag} là hai hằng số. Các giá trị mặc định là $z_{\text{wind}} = 10$ m, $\alpha_{\text{drag}} = 6.3 \cdot 10^{-3}$ and $\beta_{\text{drag}} = 6.6 \cdot 10^{-5}$ (theo Smith, 1975). Tiếp theo, z_0 theo công thức (2.29).

2

$$z_0 = z_{wind} \exp\left(\frac{\kappa U_w}{u_*}\right) \quad (2.31)$$

2. **Công thức thứ hai** dựa vào mô hình Charnock. Nếu z_{ow} giả định là nhỏ so với z_{ob} , thì độ nhám tính theo công thức:

$$z_0 = z_{ob} = z_{charnock} u_*^2 / g \quad (2.32)$$

Đối với tốc độ gió đã biết $u(z)$ ở mức $z = z_{win}$, ta có tính ra u_* bằng cách giải hệ phương trình (2.29) và (2.32) bằng phương pháp lặp.

3. **Công thức thứ ba** là mô hình kết nối. Độ nhám được tính theo công thức:

$$z_o = z_{ob} + z_{ow} = z_{ob} \left(1 - \frac{\tau_w}{\tau}\right)^{-1/2} = \frac{z_{charnock} u_*^2}{g} \left(1 - \frac{\tau_w}{\rho_{air} u_*^2}\right)^{-1/2} \quad (2.33)$$

Trong đó: τ_w là ứng suất do sóng, và τ là ứng suất tổng cộng $\tau = \rho_{air} u_*^2$. Đối với tốc độ gió cho trước $u(z)$ tại mức $z = z_{wind}$ và ứng suất sóng đã biết, ta có thể để tìm ra trị số cho cặp (u_*, z_o) bằng cách giải hệ phương trình (2.29) và (2.33) bằng phương pháp lặp. Ứng suất sóng τ_w trong (2.33) được tính theo công thức:

$$\tau_w = \int \left. \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} \right|_{wind} df d\theta \quad (2.34)$$

Trong đó \bar{P} là động lượng sóng cho bởi quan hệ

$$\bar{P} = \rho_w \sigma E(f, \theta) \vec{i} \quad (2.35)$$

Ở đây: \vec{i} là vectơ đơn vị hướng sóng ($\vec{i} = \vec{k} / k$). Từ PT (2.18), ta có:

$$\left. \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} \right|_{wind} = \rho_w \sigma \left. \frac{\partial E}{\partial t} \right|_{wind} \vec{i} = \rho_w \sigma \gamma F \vec{i} \quad (2.36)$$

Trong đó: γ là tốc độ tăng trưởng của sóng do gió. Tách tích phân là 2 thành phần: phần tần số thấp và phần tần số cao, thu được

$$\vec{\tau}_w = \vec{\tau}_{w,prognostic} + \vec{\tau}_{w,diagnostic} \quad (2.37)$$

Trong đó:
$$\vec{\tau}_{w,prognostic} = \int_0^{f_{max}} \int_{\theta} \rho_w \gamma E 2\pi f df d\theta \vec{i} \quad (2.38)$$

$$\bar{\tau}_{w,diagnostic} = \int_{f_{max}}^{\infty} \int_{\theta} \rho_w \gamma E 2\pi f d f d \theta \quad (2.39)$$

Trong đó f_{max} là tần số cực đại. Phần tần số thấp $\bar{\tau}_{w,prognostic}$ được tính bằng cách tích phân (3.38) theo tần số. Phần tần số cao $\bar{\tau}_{w,diagnostic}$ được tính theo công thức phổ sóng nước sâu dạng:

$$\bar{\tau}_{w,diagnostic} = \frac{(2\pi)^4}{g^2} \cdot f_{max}^5 \cdot \rho_a u_*^2 \int_{\theta} E(f_{max,\theta}) \cos^2(\theta - \varphi) \cdot I_{\tau_w} d\theta \quad (2.40)$$

Ở đây:

$$I_{\tau_w} = \int_{f_{max}}^{\infty} \beta \frac{df}{f} \quad (2.41)$$

Bằng cách thay đổi biến số f trong công thức (3.41) bằng biến y mới:

$$y = 2\pi f \sqrt{z_o / g} \quad (2.42)$$

Phương trình (2.41), được viết lại như sau :

$$I_{\tau_w} = \int_{y_{max}}^1 \beta \frac{dy}{y} \quad (2.43)$$

Trong đó $y_{max} = 2\pi f_{max} \sqrt{z_o / g}$ và giới hạn trên sẽ là 1. Giả sử $z_{charnock} = 0.0185$, giới hạn trên này sẽ ứng với tần số có trị số vào khoảng 180 lần tần số đỉnh phổ Pierson Moskowitz. Phương trình (2.43), được viết lại như sau :

$$I_{\tau_w} = \int_{y_{max}}^1 \frac{1.2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu \frac{dy}{y} \quad (2.44)$$

Ở đây:

$$\mu = \kappa z_0 \exp(\kappa / x) = y^2 \exp(\kappa / x) \quad (2.45)$$

$$x = \left(\frac{u_*}{C} + z_\alpha \right) \cos(\theta - \varphi) = \left(\frac{u_*}{\sqrt{gz_0}} \cdot y + z_\alpha \right) \cos(\theta - \varphi) \quad (2.46)$$

Thay thế (2.46) vào (2.45), chúng ta có:

$$\mu = y^2 \exp \left\{ \frac{\kappa}{\left(\frac{u_*}{\sqrt{gz_0}} \cdot y + z_\alpha \right) \cos(\theta - \varphi)} \right\} \quad (2.47)$$

Từ đó, công thức tính $\bar{\tau}_{w,diagnostic}$ có dạng:

$$\bar{\tau}_{w,diagnostic} = \frac{(2\pi)^4}{g^2} \cdot f_{max}^5 \cdot \rho_a u_*^2 \int_{\theta=\varphi-\pi/2}^{\varphi+\pi/2} E(f_{max}, \theta) \cos^2(\theta - \varphi) \cdot I_{\tau_w} d\bar{\theta} \quad (2.48)$$

Trong đó I_{τ_w} được cho bởi (2.44) và μ được cho bởi (2.47).

Từ các phương trình (2.44) và (2.47) khi cho trước z_0 , u_* và $(\theta - \theta_w)$, thì trị số $I_{\tau_w}(z_0, u_*, (\theta - \theta_w))$ sẽ được tính.

Ở đây, có một số khác biệt đáng kể giữa các thủ tục được mô tả ở trên và những gì được dùng mô hình WAM thế hệ 4. Mô hình WAM xấp xỉ (2.48) như sau:

$$\bar{\tau}_{w,diagnostic} = \frac{(2\pi)^4}{g^2} \cdot f_{max}^5 \cdot \rho_a u_*^2 \int_{\theta=\varphi-\pi/2}^{\varphi+\pi/2} E(f_{max}, \theta) \cos^3(\theta - \varphi) \cdot I'_{\tau_w}(\alpha, u_*) d\bar{\theta} \quad (2.49)$$

Trong đó

$$I'_{\tau_w}(\alpha, u_*) = \int_{y_{max}}^1 \frac{1.2}{\kappa^2} \mu' \ln^4 \mu' \frac{dy}{y} \quad (2.50)$$

$$\mu' = y^2 \exp \left\{ \frac{\kappa}{\left(\frac{u_*}{\sqrt{gz_0}} y + z_\alpha \right)} \right\} \quad (2.51)$$

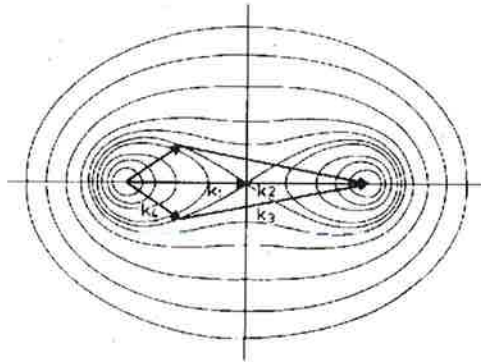
Và \bar{m} là vectơ đơn vị theo hướng gió. Các thiếu sót của số hạng cosin trong (2.51) dường như là một lỗi [so sánh (2.47) và (2.51)]. Lỗi này không thể bù bằng việc sử dụng \cos^3 trong (3,49) thay vì \cos^2 trong (2.48). Hơn nữa, ở đây không rõ lý do tại sao các hướng $\bar{\tau}_w$ được thay bằng hướng gió thay vì hướng sóng.

1.3.2 Tiêu tán năng lượng do tương tác phi tuyến tính sóng-sóng

Các tính toán chính xác theo công thức tích phân Boltzmann ba chiều phi tuyến để xác định S_{NL} (Hasselmann, 1962) cần quá nhiều thời gian, không phù hợp cho mô hình sóng tổng quát. Thay vào đó sẽ là một công thức tham số hóa. Xấp xỉ tương tác rời rạc (DIA) là cách tham số hóa thường dùng trong mô hình sóng thế hệ thứ ba. DIA là do Hasselmann đề xuất vào năm 1985.

Hasselmann (1985) đã xây dựng toán tử tương tác phi tuyến do chùng xếp một số ít cấu hình tương tác rời rạc tổ hợp từ thành phần lân cận và ở khoảng cách hữu hạn. Tác giả cho thấy, các trao đổi phi tuyến chính xác được mô phỏng đủ tốt bởi một cặp cấu

hình đối xứng gương. Trong mỗi cấu hình, lấy hai số sóng đồng nhất: $\vec{k}_1 = \vec{k}_2 = \vec{k}$, trong khi \vec{k}_3 và \vec{k}_4 ($\neq \vec{k}$) lập thành một góc nào đó với \vec{k} để thỏa mãn điều kiện cộng hưởng ($\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 - \vec{k}_4 = 0$ và $\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4 = 0$). Cấu hình thứ hai được lập ra từ cấu hình thứ nhất bằng cách phản xạ số sóng k_3 và k_4 đối xứng qua trục k (xem thêm hình dưới). Quy mô và hướng của số sóng giao thoa có thể thay đổi liên tục trong không gian số sóng (xem hình 2.7).



Hình 2.7 Hai cấu hình tương tác được sử dụng trong sơ đồ DIA.

Đường đồng mức biểu diễn điểm cuối có thể của các vector k_1 và k_4 (Từ Komen, 1994)

Đối với các cấu hình, ta có các quan hệ:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_2 = \omega \\ \omega_3 &= \omega(1 + \lambda) = \omega_+ \\ \omega_4 &= \omega(1 - \lambda) = \omega_- \end{aligned} \quad (2.52)$$

Ở đây: $\lambda = 0,25$, đối số thỏa mãn các tính toán chính xác đã được công nhận. Từ các điều kiện cộng hưởng, các góc θ_3, θ_4 của số sóng $k_3(k_+)$ và $k_4(k_-)$ liên quan đến k có trị số là $\theta_3=11.5^\circ$, $\theta_4=-33.6^\circ$. DIA có dạng đơn giản nhất đối với tốc độ thay đổi của mật độ tác động sóng theo thời gian là:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} N \\ N_+ \\ N_- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ +1 \\ +1 \end{pmatrix} Cg^8 f^{-19} [N^2(N_+ + N_-) - 2NN_+N_-] \Delta k, \quad (2.53)$$

Ở đây $\partial N/\partial t$, $\partial N_+/\partial t$, $\partial N_-/\partial t$ là các tốc độ thay đổi tác động tại các số sóng, k, k_+ , k_- do các tương tác rời rạc. Mô hình xác định S_{nl} sẽ nhận được bằng cách lấy tổng (2.53) cho tất cả các số sóng, hướng sóng và cấu hình tương tác.

Theo nghĩa mật độ năng lượng phổ sóng $E(f_r, \theta)$, các số gia nguồn $S_{nl}(f_r, \theta)$ ($=\partial E/\partial t$) tại 3 số sóng tham gia tương tác (Hasselmann, 1985) được tính theo các công thức:

$$\begin{cases} \delta S_{nl} \\ \delta S_{nl+} \\ \delta S_{nl-} \end{cases} = \begin{cases} -2 \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f \Delta \theta} \\ (1 + \lambda) \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f_+ \Delta \theta} \\ (1 - \lambda) \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f_- \Delta \theta} \end{cases} \phi(f, E, E_+, E_-) \quad (2.54)$$

Trong đó:

$$\phi(f, F, F_+, F_-) = C' g^{-4} f^{11} \left[E^2 \left(\frac{E_+}{(1 + \lambda)^4} + \frac{E_-}{(1 - \lambda)^4} \right) - \frac{2EE_+E_-}{(1 - \lambda^2)^4} \right] \quad (2.55)$$

Ở đây C' là một hằng số tỷ lệ thuận với C , $=3.010^7$; Δf , Δf_+ , Δf_- là độ phân giải phổ rời rạc tương ứng tại các tần số f_r , f_{r+} , và f_{r-} . Các gia số góc $\Delta \theta$ tại $\theta_1, \theta_3, \theta_4$ là được lấy như nhau, trong khi sự phụ thuộc tần số vào Δf là được phép, tức là $\Delta f_+ \neq \Delta f_- \neq \Delta f$. Phương trình (2.54) được tổng cộng cho tất cả các tần số, hướng và cấu hình tương tác để nhận được giá trị thực của S_{nl} . Các phân tích trên thực hiện cho vùng nước sâu. Hiệu chỉnh cho vùng nước có độ sâu hữu hạn được tham số hóa qua một hệ số tỉ lệ R :

$$S_{nl}(\text{finite depth}) = R(\bar{k} h) S_{nl}(\text{infinite depth}), \quad (2.56)$$

Ở đây \bar{k} là số sóng trung bình. Trong điều kiện, $\bar{k} h > 1$, biểu thức tính R có dạng:

$$R(x) = 1 + \frac{5.5}{x} \left(1 - \frac{5x}{6}\right) \exp\left(-\frac{5x}{4}\right), \quad (2.57)$$

Với $x = (3/4) \bar{k} h$. Xấp xỉ này được sử dụng trong mô hình WAM.

Đối với lưới chia tần số đều, phương trình (2.54) có dạng:

$$\begin{cases} \delta S_{nl} \\ \delta S_{nl+} \\ \delta S_{nl-} \end{cases} = \begin{cases} -2 \\ 1 + \lambda \\ 1 - \lambda \end{cases} \phi(f, E, E_+, E_-) \quad (2.58)$$

Đối với lưới chia tần số logarit, phương trình (2.54) trở thành:

$$\begin{cases} \delta S_{nl} \\ \delta S_{nl+} \\ \delta S_{nl-} \end{cases} = \begin{cases} -2 \\ 1 \\ 1 \end{cases} \phi(f, E, E_+, E_-) \quad (2.59)$$

Giá trị đóng góp vào các số hạng gradient ($\partial S_{nl}/\partial E$) tại số sóng tương tác sẽ nhận được từ biểu thức:

$$\begin{cases} \delta(\partial S_{nl} / \partial E) \\ \delta(\partial S_{nl} / \partial E_+) \\ \delta(\partial S_{nl} / \partial E_-) \end{cases} = \begin{cases} -2 \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f \Delta \theta} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial E} \\ (1 + \lambda) \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f_+ \Delta \theta} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial E_+} \\ (1 + \lambda) \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f_- \Delta \theta} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial E_-} \end{cases} \quad (2.60)$$

Cũng như (2.54), đóng góp toàn phần cho $\partial S_{nl} / \partial E$ ở một tần số cho trước f , và hướng θ sẽ được tìm ra bằng cách lấy tổng các đóng góp từ tất cả các tần số, hướng và hai cấu hình (cấu hình sơ cấp và cấu hình đối xứng).

Cần phải có các giả định bổ sung khi tính theo (2.54) và (2.60) ở trên. Lý do của việc này là: Đối với các tương tác phi tuyến, chúng ta luôn coi sự trao đổi năng lượng giữa các sóng trong không gian tần số-hướng như: (f, θ) , $(f_+, \theta \pm \theta_3)$ và $(f_-, \theta \pm \theta_4)$ và các tần số f_+ và f_- được cho bởi quan hệ:

$$f_+ = (1 + \lambda)f \quad (2.61)$$

$$f_- = (1 - \lambda)f \quad (2.62)$$

Trong đó $\lambda = 0,25$. Bây giờ, chúng ta rời rạc chúng trong không gian tần số từ một tần số thấp hữu hạn, f_1 đến một tần số cao hữu hạn, f_{\max} . Như vậy, sẽ có vấn đề với việc đánh giá (2.54) và (2.60) ở hai đầu miền không gian tần số. Câu hỏi là nên làm gì khi $f_+ > f_{\max}$ hoặc $f_- < f_1$. Để trả lời câu hỏi này, hai giả định bổ sung đã được đưa vào:

Trường hợp 1: $f_+ > f_{\max}$: Thứ nhất, phổ năng lượng trong các vùng $f > f_{\max}$ được giả định là theo đoạn đuôi f^{-5} vì đây là khu vực chắn đoán. Thứ hai, trong vùng lân cận của f_{\max} , có các đóng góp cho S_{nl} từ tần số cao hơn tần số cao nhất trong mô hình. Tần số cao nhất f_{upper} , có thể được xác định từ điều kiện:

$$f_- = (1 - \lambda)f_{\text{upper}} = f_{\max} \quad (2.63)$$

hoặc:

$$f_{\text{upper}} = f_{\max} / (1 - \lambda) \quad (2.64)$$

Trường hợp 2: $f_- < f_1$. Khi đó, giả định rằng $E(f, \theta) = 0$. Đây là một giả thiết hợp lý nếu miền không gian tần số sóng được lựa chọn cẩn thận để bao gồm tất cả tần số đều có năng lượng. Vì giả thiết $E = 0$ ở vùng $f < f_1$, nên sự đóng góp từ khu vực này đến dải tần số sẽ là zero.

II.2.4 Tiêu tán năng lượng do sóng bậc đầu

Mô hình sóng bạc đầu bắt nguồn các nghiên cứu của Hasselmann (1974). Với giả thiết cho rằng: cơ chế tiêu tán do sóng bạc đầu là áp suất gây ra phân huỷ sóng, ông đã xây dựng được công thức tính phần năng lượng sóng bị phân tán dạng:

$$S_{ds} \approx -\omega E \quad (2.65)$$

Tiếp theo, các nhà khoa học đã nhận thấy rằng có cơ chế quan trọng khác. Các cơ chế này là sự tắt dần của sóng ngắn bởi sóng bạc đầu mạnh và mức độ phủ sóng bạc đầu trên vùng nghiên cứu. Tổ hợp các quá trình nêu trên, Komen (1984) đề xuất công thức tính S_{ds} có dạng như sau:

$$S_{ds} = -C'_{ds} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^m \frac{k}{\bar{k}} \bar{\sigma} E \quad (2.66)$$

Trong đó: C'_{ds} , m và n là các thông số thực nghiệm, $\bar{\sigma}$ là tần số góc tương đối trung bình, \bar{k} là số sóng trung bình, $\hat{\alpha}$ là độ dốc chung của trường sóng và $\hat{\alpha}_{PM}$ là giá trị của $\hat{\alpha}$ đối với phổ sóng Pierson-Moskowitz. Độ dốc chung được định nghĩa là:

$$\hat{\alpha} = \bar{k} \sqrt{E_{tot}} \quad (2.67)$$

Trong đó: E_{tot} là tổng năng lượng của phổ năng lượng và $\hat{\alpha}_{PM} = (2.02 \times 10^{-3})^{1/2}$. Trong mô hình WAM thế hệ thứ 3, $m = 4$ và $C'_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$ (Komen, 1984 và nhóm WAMDI, 1988). Phương trình (2.66) đã được cải tiến bởi Komen (1994) và ứng dụng trong mô hình WAM thế hệ thứ 4 có dạng:

$$S_{ds}(f, \theta) = -C_{ds} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^m \left\{ (1 - \delta) \frac{k}{\bar{k}} + \delta \left(\frac{k}{\bar{k}} \right)^2 \right\} \bar{\sigma} E(f, \theta) \quad (2.68)$$

Trong đó: C_{ds} , δ và m là các hằng số với các trị số tương ứng là $4,1 \times 10^{-5}$; 0,5 và 4.

II.3.5 Tiêu tán do ma sát đáy

Tốc độ tiêu tán năng lượng sóng do ma sát đáy được cho bởi công thức (Komen, 1994):

$$S_{bot}(f, \theta) = -(C_f + f_c (\bar{u} \bar{k})/k) \frac{k}{\sin 2kd} E(f, \theta) \quad (2.69)$$

Trong đó: C_f là hệ số ma sát, k là số sóng, d là độ sâu của cột nước, f_c là hệ số ma sát của dòng chảy và \bar{u} là vận tốc dòng chảy. Các hệ số C_f thường là 0,001-0,01 m/s phụ thuộc vào mặt đệm đáy và điều kiện dòng chảy. Giá trị mặc định cho f_c là 0 tương ứng với loại trừ ảnh hưởng của dòng chảy lên ma sát đáy.

Có bốn mô hình để xác định các hệ số phân tán:

1) Đơn giản nhất là một hằng số cho hệ số ma sát C_f . Các thử nghiệm (Komen, 1994) đã chỉ ra rằng giá trị của $C_f = 2 \cdot 0.38/g = 0.0077$ m/s là thích hợp cho các trường hợp gió tốc độ vừa phải. Giá trị mặc định cho C_f là 0,0077 m/s.

2) Hệ số ma sát là đại lượng tỷ lệ với tốc độ quỹ đạo hạt nước tại đáy

$$C_f = f_w u_b \quad (2.70)$$

Trong đó u_b là tốc độ hạt nước theo quỹ đạo sóng ở đáy được xác định theo công thức:

$$u_b = \left[2 \int_{f_1}^{f_{\max}} \int_{\theta} \frac{\bar{\sigma}^2}{\sinh^2(kh)} E(f, \theta) d\theta df \right]^{1/2} \quad (2.71)$$

Giá trị mặc định cho f_w là 0.021.

3) Hệ số ma sát được tính theo độ gồ ghề mặt đáy k_N theo đề nghị của Weber (1991) trong đó hệ số f_w trong công thức (2.70) được tính theo biểu thức:

$$f_w = e^{-5.977+5.213(a_b/k_N)^{-0.194}} \quad a_b / k_N \geq 2.016389 \quad (2.72)$$

$$f_w = 0.24 \quad a_b / k_N < 2.016389$$

Ở đây: a_b là dịch chuyển quỹ đạo tại đáy được xác định bởi quan hệ:

$$a_b = \left[2 \int_{f_1}^{f_{\max}} \int_{\theta} \frac{1}{\sinh^2(kh)} E(f, \theta) d\theta df \right]^{1/2} \quad (2.73)$$

Giá trị mặc định cho k_N là 0,04 m. Giá trị này được đề xuất bởi Weber (1991) ứng với điều kiện có dòng chảy và cho sóng lừng và sóng gió.

4) Hệ số nhám tính theo kích thước hạt bùn cát đáy thông qua đường kính trung bình D_{50} do Tolman (1996) đề xuất, trong đó hệ số ma sát được tính theo vận tốc quỹ đạo sóng vận tốc tại đáy và D_{50} . Giá trị mặc định cho D_{50} là 0,00025 m. Thông tin chi tiết của việc xây dựng ma sát đáy có thể được tìm thấy trong tài liệu Johnson, 1997.

II.3.6 Sóng vỡ

Sự phân hủy sóng do sóng vỡ tại vùng nước nông được tính theo công thức tính toán sóng vỡ của Battjes và Janssen (1978) có dạng:

$$S_{surf}(f, \theta) = -\frac{2\alpha_{RJ} Q_b \bar{f}}{X} E(f, \theta) \quad (2.74)$$

Trong đó $\alpha_{BJ} \approx 1.0$ là một hằng số hiệu chỉnh, Q_b là phần năng lượng của các sóng vỡ, \bar{f} là tần số trung bình và X là tỷ lệ của tổng năng lượng của chuỗi sóng ngẫu nhiên với năng lượng trong chuỗi sóng có độ cao tối đa có thể, được định nghĩa như sau:

$$X = \frac{E_{tot}}{(H_m^2/8)} = \left(\frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 \quad (2.75)$$

Ở đây E_{tot} là tổng năng lượng sóng, H_m là chiều cao sóng lớn nhất, và $H_{rms} = \sqrt{8E_{tot}}$. Trong vùng nước nông có độ sâu d , chiều cao sóng lớn nhất có thể được tính từ $H_m = \gamma d$ trong đó γ là tham số sóng vỡ. Giá trị của γ dao động từ $0,5 \rightarrow 1,0$ phụ thuộc vào độ dốc đáy và các thông số sóng. Giá trị mặc định của α_{BJ} và γ tương ứng là $1,0$ và $0,55$. Trong chuỗi sóng ngẫu nhiên có quy luật phân phối Raleigh cắt cụt đối với các độ cao sóng, phần năng lượng do sóng vỡ Q_b được xác định từ quan hệ:

$$\frac{Q_b - 1}{\ln Q_b} = X = \left(\frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 \Leftrightarrow Q_b = \exp\left(\frac{-(1-Q_b)}{(H_{rms}/H_m)^2}\right) \quad (2.76)$$

Trị số Q_b là nghiệm của phương trình phi tuyến (2,76) được tìm ra bằng cách phương pháp lặp Newton-Raphson với giá trị lần lặp đầu tiên (Hersbach, 1.996) là đại lượng:

$$\begin{aligned} Q_b &= (1 + 2x^2)\exp(-1/x) & x < 0.5 \\ &= 1 - (2.04z)(1 - 0.44z); & z = 1 - x; 0.5 < x < 1 \\ &= 1 & x \geq 1 \end{aligned} \quad (2.77)$$

II.5 Tương tác giữa sóng và dòng chảy và dao động mực nước

Tác động của dòng chảy lên sóng được thể hiện như trên hình 2.6 và các công thức động học (2.2, 2.3) qua trị số và hướng vận tốc dòng chảy. Ảnh hưởng dao động mực nước lên sóng thể hiện qua độ sâu cột nước d . Đối với vùng nước nông, biển ven bờ và cửa sông, ảnh hưởng của dòng chảy và mực nước lên sóng là rất đáng kể.

Ảnh hưởng của sóng lên dòng chảy được thể hiện qua dòng động lượng phát sinh bởi gradient các ứng suất bức xạ sóng tại vùng biển nông gồm S_{xy} , S_{xx} , S_{yx} và S_{yy} :

$$S_{xx} = \frac{1}{2} g(f_{u2} + f_{pp}) \quad (2.78)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{1}{2} g(f_{uv}) \quad (2.79)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{2} g(f_{v2} + f_{pp}) \quad (2.80)$$

Trong đó

$$f_{pp} = \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{2\pi\infty} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) E(f, \theta) df d\theta$$

$$f_{u2} = \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{2\pi\infty} \cos^2\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) E(f, \theta) df d\theta$$

$$f_{uv} = \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{2\pi\infty} \cos\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \sin\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) E(f, \theta) df d\theta$$

$$f_{v2} = \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{2\pi\infty} \sin^2\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) E(f, \theta) df d\theta$$

Do đó, việc tích hợp mô hình thủy động lực học và phổ sóng để giải đồng thời là rất quan trọng đối với vùng biển nước nông, nhất là trong bài toàn bồi xói.

II.6 Tương tác giữa động lực sóng và quá trình bồi xói

Tác động bồi xói lên sóng được thể hiện sự thay đổi địa hình đáy và bờ sẽ dẫn đến biến dạng các yếu tố sóng và ngược lại các thông số sóng là các yếu tố động lực quan trọng nhất dẫn đến bồi xói. Do đó, việc tích hợp mô hình vận chuyển bùn cát, bồi xói, mô hình thủy động lực học và mô hình phổ sóng để giải đồng thời, cập nhật liên tục sự ảnh hưởng qua lại giữa chúng là các tiếp cận hợp lý nhất đối với vùng biển nước nông, nhất là trong bài toàn bồi xói.

II.7. Mô hình số và thuật toán giải

II.7.1 Phương trình cơ bản của phương pháp thể tích hữu hạn

Phương pháp thể tích hữu hạn sẽ được dùng để giải mô hình phổ sóng trên lưới tính phi cấu trúc (xem chương I) xấp xỉ miền tính toán trong không gian địa lý (hình học). Mật độ sóng tác động $N(\bar{x}, \sigma, \theta)$ đại diện cho mỗi phần tử và được đặt tại tọa độ là trung tâm hình học của phần tử.

Trong không gian tần số, lưới sai phân là lưới dạng lôgarít sẽ được dùng, trong đó:

$$\sigma_l = \sigma_{\min} \quad \sigma_l = f_\sigma \sigma_{l-1} \quad \Delta\sigma_l = \sigma_{l+1} - \sigma_{l-1} \quad l = 2, N_\sigma \quad (2.81)$$

Trong đó f_σ là một yếu tố cho trước, σ_{\min} là mức tối thiểu tần số góc và N_σ là bước tần số cần rời rạc.

Trong không gian hướng, một lưới sai phân cách đều được sử dụng, trong đó:

$$\theta_m = (m - 1)\Delta\theta \quad \Delta\theta_m = 2\pi / N_\theta \quad m = 1, N_\theta \quad (2.82)$$

Ở đây N_θ là số hướng cần rời rạc. .

N được là hằng số trên các khoảng sai phân theo tần số và hướng: $\Delta\sigma_l$ và $\Delta\theta_m$.

Tích phân (2.7) trên diện tích A_i của phần tử thứ i , các số gia tần số $\Delta\sigma_l$ và các số gia $\Delta\theta_m$, ta sẽ nhận được phương trình cơ bản để áp dụng phương pháp thể tích hữu hạn:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta\theta_m} \int_{\Delta\sigma_l} \int_{A_i} N d\Omega d\sigma d\theta - \int_{\Delta\theta_m} \int_{\Delta\sigma_l} \int_{A_i} \frac{S}{\sigma} d\Omega d\sigma d\theta = \int_{\Delta\theta_m} \int_{\Delta\sigma_l} \int_{A_i} \nabla \cdot (\bar{F}) d\Omega d\sigma d\theta \quad (2.83)$$

Trong đó: Ω là một biến tích phân được định nghĩa trên A_i và $\bar{F} = (F_x, F_y, F_\sigma, F_\theta) = \bar{v} N$ là dòng đối lưu. Vế trái của (2.83) được xấp xỉ bởi quy tắc cầu phương một điểm. Sử dụng định lý phân kỳ, vế phải tích phân (2.83) có thể được thay thế bằng tích phân quanh biên của thể tích in không gian \bar{x} , σ , θ và các tích phân được đánh giá bằng cách sử dụng quy tắc cầu phương điểm giữa cạnh. Do đó, (2.83), có thể được viết như sau:

$$\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} = - \frac{1}{A_i} \left[\sum_{p=1}^{NE} (F_n)_{p,l,m} \Delta l_p \right] - \frac{1}{\Delta\sigma_l} [(F_\sigma)_{i,l+1/2,m} - (F_\sigma)_{i,l-1/2,m}] - \frac{1}{\Delta\theta_m} [(F_\theta)_{i,l,m+1/2} - (F_\theta)_{i,l,m-1/2}] + \frac{S_{i,l,m}}{\sigma_l} \quad (2.84)$$

Ở đây: NE là tổng số cạnh của phần tử ($NE = 3$ cho tam giác). $(F_n)_{p,l,m} = (F_x n_x + F_y n_y)_{p,l,m}$ là thông lượng trực giao cạnh p trong không gian địa lý với chiều dài Δl_p . $\bar{n} = (n_x, n_y)$ là véc tơ đơn vị trực giao hướng ra ngoài biên trong không gian địa lý. $(F_\sigma)_{i,l+1/2,m}$ và $(F_\theta)_{i,l,m+1/2}$ là các thông lượng đi qua các mặt trong không gian tần số và hướng.

Trong không gian địa lý, thông lượng trực giao tại cạnh giữa phần tử i và phần tử j là đại lượng:

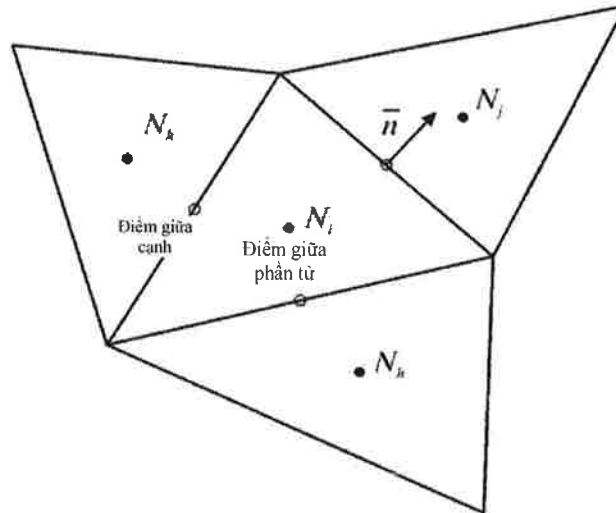
$$F_n = c_n \left(\frac{1}{2} (N_i + N_j) - \frac{1}{2} \frac{c_n}{|c_n|} (N_i - N_j) \right) \quad (2.85)$$

Trong đó c_n là tốc độ lan truyền trực giao tới mặt phần tử.

$$c_n = \frac{1}{2} (\bar{c}_i + \bar{c}_j) \cdot \bar{n} \quad (2.86)$$

Việc áp dụng sơ đồ ngược gió bậc 1 có thể dẫn đến khuếch tán số (Tolman, 1991, 1992). Trong các ứng dụng quy mô nhỏ, biên ven bờ và ưu thế là gió địa phương, sơ

đồ này có độ chính xác chấp nhận được. Tuy nhiên, đối với trường hợp lan truyền lờng trên khoảng cách dài, cần sử dụng sử đồ xấp xỉ bậc hơn bậc 1.



II.7.2 Tích phân theo thời gian

Phép tích phân theo thời gian được thực hiện theo sơ đồ hiện phân đoạn thời gian. Đầu tiên, bước lan truyền sóng được thực hiện để tính toán lời giải gần đúng đúng N^* tại thời điểm $t_{(n+1)}$ bằng cách giải (2.83) mà không có các điều kiện nguồn. Bước thứ hai, là bước xác định các số hạng nguồn và tính toán các nghiệm N^{n+1} từ lời giải ước tính N^* để tính các số hạng nguồn.

Bước lan truyền được thực hiện bởi sơ đồ Euler hiện dạng:

$$N_{i,l,m}^* = N_{i,l,m}^n + \Delta t \left(\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} \right)^n \quad (2.87)$$

Trong đó $(\partial N_{i,l,m} / \partial t)^n$ được cho bởi (2.83) với $S_{i,l,m} = 0$ và Δt là bước thời gian tổng thể. Để đảm bảo sự ổn định, theo Vilsmeier và Hanel (1995), điều kiện của số CFL là:

$$Cr_{i,l,m} = \left| c_x \frac{\Delta t}{\Delta x_i} \right| + \left| c_y \frac{\Delta t}{\Delta y_i} \right| + \left| c_\sigma \frac{\Delta t}{\Delta \sigma_l} \right| + \left| c_\theta \frac{\Delta t}{\Delta \theta_m} \right| < 1 \quad (2.88)$$

Ở đây $Cr_{j,l,m}$ là số Courant và Δx_i , và Δy_i là chiều dài đặc trưng theo phương x và y cho các phần tử thứ i. Số Courant lớn nhất $Cr_{max,i}$, được xác định cho từng phần tử trong không gian địa lý và các bước thời gian lớn nhất, $\Delta t_{max,i}$ của phần tử thứ i:

$$\Delta t_{max,i} = \Delta t / Cr_{max,i} \quad (2.89)$$

2

Để đảm bảo độ chính xác trong thời gian, các bước trung gian phải đồng bộ. Vì vậy, các phân đoạn f_g của bước thời gian cục bộ để lập ra bước thời gian toàn cục được chọn là lũy thừa của $1/2$

$$f_g = \left(\frac{1}{2}\right)^{g-1}, \quad g = 1, 2, 3, \dots \quad (2.90)$$

Bước thời gian cục bộ Δt_i , sau đó được xác định như là bước thời gian với giá trị tối đa của chỉ số g thỏa mãn điều kiện:

$$\Delta t_i f_g < \Delta t_{max,i} \quad (2.91)$$

Hai phần tử kề nhau không cho phép có sự khác biệt chỉ số g lớn hơn một. Các cạnh nhận chỉ số thấp nhất của hai phần tử mà chúng được cấp.

Việc tính toán được thực hiện qua việc sử dụng khái niệm nhóm, trong đó các nhóm của các phần tử được chỉ định bởi chỉ số g của chúng. Trị số tối đa của g là 32.

Các số hạng nguồn được thực hiện bằng phương pháp ẩn:

$$N_{i,j,m}^{n+1} = N_{i,j,m}^* + \Delta t \left[\frac{(1-\alpha)S_{i,j,m}^* + \alpha S_{i,j,m}^{n+1}}{\sigma_i} \right] \quad (2.92)$$

Trong đó α là trọng số xác định loại phương pháp sai phân hữu hạn. Sử dụng chuỗi Taylor để tính gần đúng S^{n+1} và bỏ qua các số hạng đường chéo trong đạo hàm $\partial S / \partial E$, nên phương trình (2.92) có thể được đơn giản hóa như sau:

$$N_{i,j,m}^{n+1} = N_{i,j,m}^* + \frac{(S_{i,j,m}^* / \sigma_i) \Delta t}{(1 - \alpha \gamma \Delta t)} \quad (2.93)$$

Đối với sóng đang lớn ($\gamma > 0$), sơ đồ sai phân hiện tiến sẽ được dùng ($\alpha = 0$), trong khi đối với cho sóng đang phân rã ($\gamma < 0$), sơ đồ sai phân ẩn lùi ($\alpha = 1$) sẽ được áp dụng.

Đặc biệt, đối với các phần tử bé, vấn đề ổn định có thể xảy ra. Do đó, cần đưa ra giới hạn trên cho mức độ tăng cực đại của mật độ tác động giữa hai bước thời gian kế tiếp.

Giới hạn do Hersbach và Janssen (1999) đề xuất sẽ được áp dụng có dạng:

$$\Delta N_{max} = \frac{3 \times 10^{-7}}{(2\pi)^3} g \tilde{u}_* \sigma_i^{-4} \sigma_{max} \Delta t \quad (2.94)$$

Trong đó σ_{max} là tần số tối đa và \tilde{u}_* được xác định bởi

$$\tilde{u}_* = \max(u_*, (\sigma_{PM} / \sigma)) \quad (2.95)$$

Ở đây u_* là tốc độ ma sát gió.

II.8 Điều kiện biên

Tại biên là bờ đất, điều kiện hấp thụ hoàn toàn được áp dụng. Các thành phần thông lượng trực giao với cạnh phần tử bờ đất được gán bằng zero.

Khi thông lượng có hướng rời khỏi vùng tính toán, không cho có điều kiện biên.

Tại biên mở, cần cho thông lượng đến. Do đó, phổ năng lượng phải cho trước trên các đoạn biên mở. Trong không gian tần số sóng, các biên là hấp thụ toàn phần.

Không cần điều kiện biên trong không gian hướng sóng.

II.9 Dữ liệu đầu ra bao gồm:

1. Phổ sóng theo hướng
2. Phổ sóng theo tần số
3. Phổ sóng 2 chiều hướng và tần số
4. Chiều cao sóng có nghĩa H_{m0} (m)
5. Chiều cao sóng lớn nhất H_{max} (m)
6. Chu kỳ đỉnh phổ sóng T_p (s)
7. Chu kỳ trung bình T_{01} (s)
8. Hướng sóng tại đỉnh phổ θ_p (độ)
9. Hướng sóng trung bình $\bar{\theta}$ (độ)
10. Độ lệch chuẩn định hướng sóng σ (độ)
11. Thành phần vector độ lớn sóng
12. Ứng suất bức xạ S_{xx} , S_{xy} và S_{yy} (m^3/s^2)
13. Mực nước (m)
14. Độ sâu cột nước D (m)
15. Vận tốc dòng chảy U (m/s)
16. Tốc độ gió ở độ cao 10 mét trên mặt biên U10 (m/s)
17. Hướng gió θ_w (độ)
18. Hệ số ma sát (m^2/s)
19. Thông số vỡ sóng gamma
20. Số CFL
21. Chiều dài sóng (m)
22. Tốc độ ma sát gió (m/s)
23. Độ nhám

24. Hệ số trở kháng
25. Năng lượng sóng
26. Tác động sóng tác động

III.3 Module vận chuyển bùn MIKE21 MT

Bùn cấu thành từ các hạt phù sa mịn (đường kính hạt $<0,063\text{mm}$) kết dính (có nguồn gốc từ hệ sinh thái rừng ngập mặn, từ bãi triều nằm lân cận VNC và phù sa lơ lửng từ các sông đổ vào VNC và lân cận. Bùn thường được tìm thấy tại các khu vực được che chắn và được bảo vệ bởi tác động của sóng mạnh và dòng chảy mạnh. Ví dụ là khúc thượng du và khúc giữa của vùng cửa sông, đầm phá và vịnh ven bờ. Kết quả phân tích mẫu bùn cát lớp mặt đáy tại VNC và lân cận cho thấy: Sét (đường kính hạt $<2\mu\text{m}$) chiếm tỷ lệ khoảng $10\rightarrow25\%$ và bùn (đường kính hạt $4-63\mu\text{m}$) chiếm tỷ lệ khoảng $20\rightarrow35\%$. Vì VNC nằm trong vùng có tốc độ dòng chảy không lớn và khá lặng sóng, nên động thái bồi xói bởi bùn sẽ có vai trò rất quan trọng.

Bùn có tốc độ rơi trong nước rất nhỏ, do đó nó được dòng chảy tải đi qua các khoảng cách khá dài trước khi kịp rơi lên đáy thủy vực. Mặt khác, hạt sét có cấu trúc hình đĩa và trên mặt có phủ các hạt khoáng tích điện âm. Trong nước, chúng hút các ion dương, tạo ra lớp mây các phân tử ion dương bao quanh các hạt sét, nên chúng đẩy nhau (Van Olphen, 1963). Tuy nhiên, trong nước mặn các hạt lại kết tụ với nhau mặc dù có lực đẩy nhau. Đó là vì trong nước mặn, lớp điện tích kép quanh hạt bị nén và lực hút Waals tác động lên cặp nguyên tử trở thành lực hoạt động. Sự kết tụ sẽ gia tăng khi hàm lượng các hạt sét gia tăng, vì các hạt có cơ hội gặp nhau nhiều hơn. Rồi cũng đóng vai trò rất quan trọng, ở mức nào đó, nó gia tăng khả năng tiếp xúc các hạt, gia tăng tốc độ kết tụ, mặt khác, khi rối mạnh, nó là lực góp phần xé bỏ các kết tụ trở lại trạng thái các hạt lơ lửng rời rạc (Dyer, 1986). Tính kết dính của chúng dẫn đến quá trình keo tụ thành các khối (flocs) có tốc độ rơi lớn hơn rất nhiều so với tốc độ rơi của mỗi hạt bùn (Krone, 1986; Burt, 1986). Đó là phương thức bồi đáy của bùn tại các khu vực các hạt bùn riêng rẽ không thể rơi tới đáy và đọng lại lên đáy. Quá trình kết keo và phân rã các khối floc phụ thuộc hàm lượng bùn lơ lửng và tính chất xáo trộn rối của

dòng chảy. Do đó, để tính bồi xói tại VNC, mô hình vận chuyển bùn cát kết dính phải là một module riêng biệt.

Trầm tích lơ lửng hạt mịn có vai trò quan trọng trong môi trường vùng cửa sông. Trầm tích hạt mịn bị tung vào trạng thái lơ lửng và di chuyển là do tác động của sóng và dòng chảy. Tại cửa sông, các cơ chế vận chuyển tác động lên vật liệu hạt mịn có xu hướng tập trung chúng và bồi tụ chúng lên các khu vực được che chắn và nằm bên trong cửa sông (Postma, 1967; Pejrup, 1988). Vùng có hàm lượng các hạt lơ lửng cao được gọi là cực đại độ đục, có vị trí thay đổi trong cửa sông phụ thuộc vào chu kỳ triều và lượng nước ngọt từ những con sông chảy đến v.v... (Dyer, 1986).

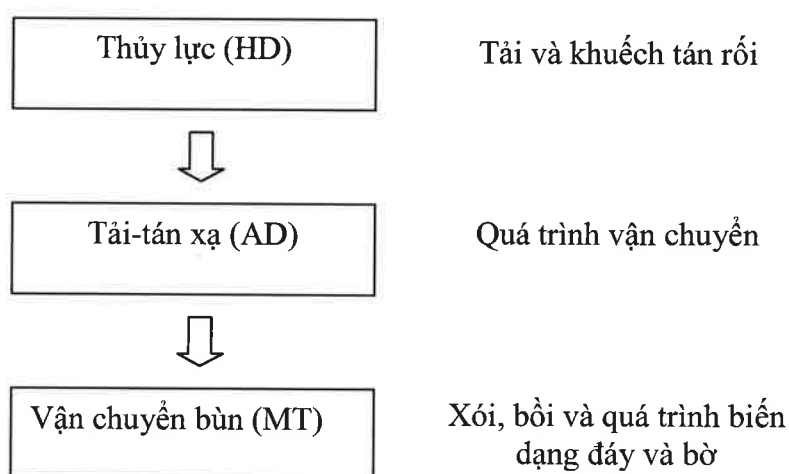
Trầm tích hạt mịn được phân loại theo kích thước của hạt theo bảng dưới đây.

Bảng 3.1 Phân loại hạt trầm tích

Kiểu trầm tích	Kích thước hạt
Đất sét	$< 4 \mu m$
Bùn (phù sa)	$4 - 63 \mu m$
Cát mịn	$63 - 125 \mu m$

III.3.1 Nội dung vật lý bài toán vận chuyển bùn

Để tính vận chuyển bùn, trong mô hình phức hợp MIKE 21/3 coupled model FM, ta cần làm việc ít nhất với 3 module: Module MIKE 21 HD, module MIKE 21 AD và module MIKE 21 MT. Chúng liên kết với nhau như trên hình 3.2.



Hình 3.2: Hệ thống tối thiểu để tính vận chuyển bùn

Trong trường hợp tổng quát hơn, ta cần dùng thêm thêm 2 module khác là MIKE 21 SW và MIKE 21 ST để cập nhập các ảnh hưởng qua lại giữa sóng, dòng chảy, độ sâu cột nước, tình trạng đá và bờ VNC. Như vậy, khác module MIKE 21 HD và MIKE 21 SW, module MIKE 21 MT không thể là việc một các độc lập trong mô hình MIKE 21/3 coupled model FM.

Tất cả chúng phải làm việc đồng thời vì đầu ra của module này có thể là đầu vào của module kia và ngược lại trong một hệ thống liên hoàn

Dưới đây chúng ta chỉ bàn đến module MIKE 21 MT. Về mặt vật lý, module này sẽ xử lý các vấn đề sau đây:

- Tính toán vận chuyển bùn có nhiều thành phần (tối đa là 8);
- Tính toán bồi xói cho đáy cấu tạo nhiều lớp (tối đa 12 lớp);
- Ảnh hưởng của tương tác sóng – dòng chảy;
- Tính đến hiệu ứng kết bông, keo tụ;
- Sự cản trở lắng đọng bùn cát;
- Vận chuyển một phần của cát mịn;
- Trượt;
- Sự đan kết các lớp bùn cát;
- Mô hình hình thái đơn giản.

Các tính năng trên bao gồm trong hầu hết các trường hợp áp dụng mô hình 2D. Trong trường hợp đặc biệt có sự phân tầng mạnh, người ta sẽ áp dụng module MIKE 3 MT.

Sự vận chuyển bùn được mô phỏng bởi phương trình bảo toàn vật chất đã được mô tả trong chương I gọi là module MIKE 21 AD, trong đó hàm lượng mỗi thành phần bùn trong nước được tính theo phương trình:

$$\frac{\partial h\bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial hu\bar{c}}{\partial x} + \frac{\partial hv\bar{c}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (hD_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (hD_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}) + Q_L C_L + S \quad (1.1)$$

Ở đây các số liệu đầu vào chính để giải (3.1) là các đại lượng:

Số hạng nguồn bùn do xói hoặc bồi (kg/m³/s). Khi S>, quá trình xói đáy và bờ xây ra và ngược lại, khi S<0, quá trình bồi lấp đáy và bờ.

Q_L Lưu lượng nguồn trên một đơn vị diện tích ($m^3/s/m^2$)

C_L Hàm lượng lưu lượng nguồn (kg/m^3)

Trong trường hợp có nhiều thành phần bùn, phương trình được mở rộng cho tất cả các thành phần, trong đó quá trình lắng đọng và xói lở là riêng cho thành phần.

Phương trình (3.1) được giải bằng phương pháp thể tích hữu hạn theo không gian trên lưới phi cấu trúc và phương pháp tích phân trên sơ đồ hiện Euler (xem chương I).

Nội dung chủ yếu của module MIKE 21/3 MT là các giải pháp xác định đại lượng S trong phương trình (3.1) từ các dữ liệu và thông số về:

- Tính chất lý-hóa-sinh của bùn ở trong nước (tốc độ lắng đọng, hàm lượng, ứng suất tới hạn vất đầu bồi lên đáy, bờ);
- Tính chất đáy và bờ thủy vực (chất liệu sa bồi, ứng suất tới hạn bắt đầu xói, địa hình đáy và bờ) ;
- Sự phụ thuộc của S vào các thông số thủy động lực (vận tốc, mực nước, phân bố vận tốc theo phương theo không gian)
- Tác động của phổ sóng;

Một mô hình tất định xác định về hành vi của trầm tích kết dính là chưa được phát triển. Do đó, các mô tả toán học về xói và bồi do vận chuyển bùn về bản chất là mang tính kinh nghiệm, mặc dù vậy chúng được dựa trên các nguyên tắc vật lý vững chắc.

Việc vận chuyển và bồi tụ của vật liệu hạt mịn được quy định bởi thực tế là vận tốc lắng đọng diễn ra chậm hơn so với cát. Do đó, hàm lượng của vật liệu bị lơ lửng không điều chỉnh ngay lập tức theo các điều kiện thủy lực. Nói cách khác, hàm lượng trầm tích tại một thời điểm và vị trí là phụ thuộc vào các điều kiện thượng nguồn của vị trí này tại thời điểm trước đó. Postma (1967) lần đầu tiên mô tả quá trình này. Đây là yếu tố chính giải thích vì sao độ đục tối đa ở vùng cửa sông.

III.3.2 Các quá trình bồi xói do vận chuyển bùn

Quá trình bồi/xói đáy được khảo sát bởi phương pháp tiếp cận "đa lớp đáy". Ví dụ với 3 lớp đáy như trên hình 3.2.

III.3.2.1 Sự bồi tụ bùn cát kết dính lên đáy và bờ

Krone (1962) đề nghị xác định tốc độ bồi tụ theo công thức: $S_D = w_s c_b p_d$, trong đó:

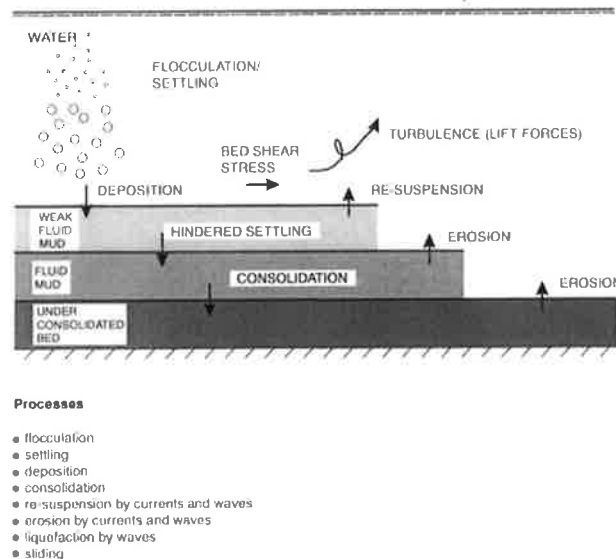
w_s vận tốc lắng đọng (m/s);

c_b hàm lượng gần đáy (kg/m^3);

p_d xác suất bồi tụ $= 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}$, $\tau_b \leq \tau_{cd}$;

τ_b ứng suất trượt đáy (N/m^2);

τ_{cd} ứng suất trượt đáy tới hạn bắt đầu bồi tụ (N/m^2).



Hình 3.3: Mô hình đa lớp và quá trình vật lý

Vấn đề cơ bản ở đây là công thức để xác định **tốc độ lắng đọng** w_s .

Đối với bùn kết bông, tốc độ lắng w_s phụ thuộc vào kích thước hạt hoặc kích thước của tổ hợp kết bông (floc), nhiệt độ, hàm lượng của vật chất lơ lửng và thành phần của vật chất hữu cơ. Thông thường, có sự phân biệt giữa chế độ 1: tốc độ lắng đọng lên đáy tăng theo hàm lượng bùn (quá trình kết bông phát triển) và chế độ 2: tốc độ lắng đọng giảm khi hàm lượng bùn tăng (còn gọi sự hãm lắng đọng). Chế độ 1 phổ biến hơn chế độ 2.

Theo Rijn (1989), w_s trong nước mặn ($> 5 \text{ ppt}$) có thể tính theo công thức:

$$w_s = kc^\gamma \text{ cho } c \leq 10 \text{ kg/m}^3 \quad (3.2)$$

Ở đây:

w_s tốc độ lắng đọng của các floc (m/s)

k, γ những hệ số và có giá trị $\gamma \rightarrow 2$

Handwritten signature

Biểu thức trên giải thích cơ chế kết bông các hạt là dựa vào các va chạm: hàm lượng càng cao thì khả năng các hạt kết tụ lại càng lớn. Khi $c > 10 \text{ kg/m}^3$, bắt đầu chế độ hãm lắng đọng, khi đó các hạt nằm sát vào nhau và không rơi tự do đi qua nước được.

Một số công thức lắng đọng khác có thể như sau:

Công thức của Richardson và Zaki (1954):

$$w_s = w_{s,r} \left(1 - \frac{c}{c_{gel}} \right)^{w_{s,n}} \quad (3.3)$$

Trong đó: $w_{s,r}$ là giá trị đối chiếu, $w_{s,n}$ là hệ số và c_{gel} hàm lượng mà tại đó các floc bắt đầu tạo thành dạng đặc quánh.

Winterwerp (1999) đề nghị áp dụng công thức:

$$w_s = w_{s,r} \frac{(1 - \Phi_*) (1 - \Phi_p)}{1 + 2.5\Phi} \quad (3.4)$$

ở đây

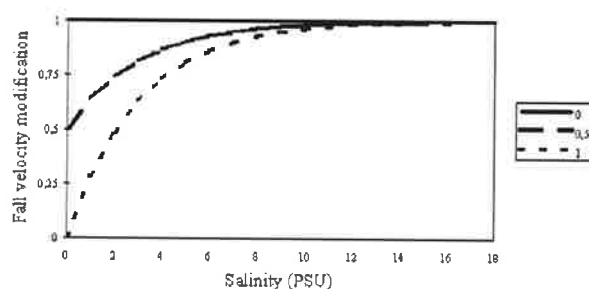
$$\Phi_p = \frac{c}{\rho_s} \quad (3.5)$$

và ρ_s là mật độ khô của những hạt trầm tích.

Quá trình keo tụ gia tăng bởi hàm lượng chất hữu cơ cao bao gồm cả lớp phủ hữu cơ, vv (Van Leussen, 1988; Eisma, 1993). Trong nước ngọt, quá trình kết bông phụ thuộc vào thành phần chất hữu cơ, trong khi tại vùng nước mặn, sự kết tụ do muối cũng xảy ra. Sự ảnh hưởng của muối lên kết bông đặc biệt quan trọng ở những nơi mà nước ngọt gặp nước mặn như vùng cửa sông. Các biểu thức sau đây được dùng để diễn tả sự biến thiên của tốc độ lắng đọng phụ thuộc vào độ mặn.

$$w_s = w_s (1 - C_1 e^{C_2}) \quad (3.6)$$

Ở đây C_1 và C_2 là các hệ số. Trên 3.4 là ví dụ cho $C_1 = \{0, 0.5, 1\}$ và $C_2 = -1/3$.



Hình 3.4: Tốc độ lắng đọng và sự phụ thuộc độ mặn

Gibbs (1985) chỉ ra rằng, trong môi trường tự nhiên, keo tụ phụ thuộc vào lớp phủ hữu cơ nhiều hơn.

III.3.2.2 Phân bố hàm lượng bùn theo phương đứng.

Hai biểu thức xác định phân bố hàm lượng bùn có thể được áp dụng: (1) biểu thức dựa trên lời giải gần đúng với thông lượng trầm tích theo chiều đứng trong quá trình bồi (Teeter); (2) biểu thức rút ra từ giả thiết cho rằng có sự cân bằng giữa thông lượng trầm tích đi lên và xuống (Rouse).

Công thức Teeter (1986) này dựa vào giả thiết: Hàm lượng gần đáy c_b tỷ lệ thuận với hàm lượng trung bình theo độ sâu \bar{c} và có liên quan với vận chuyển theo chiều thẳng đứng, tức là tỷ số dòng đối lưu và dòng khuếch tán theo phương thẳng đứng được thể hiện qua số Peclet dạng:

$$P_e = \frac{C_{rc}}{C_{rd}} \quad (3.7)$$

Trong đó:

$$C_{rc} \quad \text{số Courant đối lưu} = w_s \frac{\Delta t}{h}$$

$$C_{rd} \quad \text{số Courant khuếch tán} = \bar{D}_z \frac{\Delta t}{h^2}$$

\bar{D}_z là hệ số khuếch tán nhớt trung bình theo độ sâu;

Hàm lượng gần đáy được C_b quan hệ với hàm lượng lấy trung bình theo độ sâu \bar{c} bằng biểu thức sau (Teeter, 1986).

$$\beta = \frac{c_b}{\bar{c}} \quad (3.8)$$

Trong đó:

$$\beta = 1 + \frac{P_e}{1.25 + 4.75 p_d^{2.5}} \quad (1.9)$$

$$P_e - \text{Petlec number} = \frac{w_s h}{\bar{D}_z} = \frac{6w_s}{\kappa U_f} \quad (1.10)$$

p_d xác suất lắng đọng

Công thức Rouse. Theo Rouse, có sự cân bằng giữa khuếch tán và lắng đọng có thể được thể hiện như sau:

$$-\varepsilon \frac{dC}{dz} = wC \quad (3.11)$$

Trong đó:

- ε là hệ số khuếch tán rối thẳng đứng;
- C là hàm lượng bùn là hàm của z ;
- z là tọa độ theo phương thẳng đứng ;
- w là tốc độ lắng đọng trung bình của trầm tích.

Với ε được xấp xỉ công thức phân bố parabolic theo độ cao dạng:

$$\varepsilon = \kappa U_f z \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (3.12)$$

Trong đó: κ số Von Karman, U_f vận tốc ma sát đáy và:

$$U_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (3.13)$$

với ρ mật độ chất nước.

Thế (3.12 và (3.13) vào (3.11) và giải (3.11), ta có được công thức để tính phân bố hàm lượng C theo phương thẳng đứng như sau:

$$C = C_a \left[\frac{a}{h-a} \frac{h-z}{z} \right]^R, a \leq z \leq h \quad (3.14)$$

Trong đó: C_a hàm lượng tham chiếu tại $z = a$; a mức tham chiếu; Z khoảng cách từ đáy biển; R là số Rouse:

$$R = \frac{w}{\kappa U_f} \quad (3.15)$$

Có thể chọn độ biến thiên hàm lượng bùn cát lơ lửng theo chiều thẳng đứng để xác định khoảng cách lắng đọng. Độ sâu trung bình, h^* mà các hạt lắng đọng phải đi qua để đến vị trí bồi tụ được cho bởi công thức:

$$\frac{h^*}{h} = \frac{\int_0^1 s \left(\frac{1}{s} - 1\right)^R ds}{\int_0^1 \left(\frac{1}{s} - 1\right)^R ds} \quad (3.16)$$

Trong đó: $s = h/z$, và số hạng $\frac{h^*}{h}$ có tên gọi là chiều cao tương đối tâm.

Hàm lượng bùn cát lơ lửng c_b liên hệ với hàm lượng trung bình theo độ sâu \bar{c} theo công thức Rouse qua công thức:

$$c_b = \frac{\bar{c}}{RC} \quad (3.17)$$

Trong đó RC là chiều cao tương đối tâm.

III.3.2.3 Sự xói đáy là bờ thủy vực

Xói đáy và bờ có thể được bằng hai cách tùy thuộc vào loại đáy: (1) đáy đặc và bền chặt; (2) mềm và ít bền chặt (1989).

Đối với đáy đặc và bền chặt, tốc độ xói được tính theo công thức:

$$S_E = E(\tau_b / \tau_{ce} - 1)^n, \tau_b > \tau_{ce}$$

Trong đó:

E Khả năng xói ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)

τ_{ce} ứng suất đáy trượt tới hạn của xói (N/m^2)

n Cường độ lượng xói.

Đối với đáy mềm, ít bền chặt, tốc độ xói được tính theo công thức:

$$S_E = E \exp[\alpha(\tau_b - \tau_{ce})^{1/2}], \tau_b > \tau_{ce}$$

Trong đó: α hệ số thực nghiệm ($\text{m/N}^{1/2}$)

III.3.2.4 Các thông số công thức xói đáy và bờ

Mỗi lớp đáy được đặc tả bởi: ứng suất xói tới hạn, $\tau_{ce,j}$, cường độ xói, n_j , mật độ khô, ρ_i , và hệ số sỏi, E_j , và các hệ số α_j mộ các riêng biệt.

Bùn cát đầu tiên lắng đọng lên lớp trên cùng. Các lớp này là lớp bùn lỏng yếu, lỏng và sự chưa bền chặt (Mehta, 1989) và được cho các cỡ thời gian khác nhau.

Mô hình đòi hỏi phải cho trước độ dày ban đầu của mỗi lớp. Quá trình bền chặt được mô phỏng bởi sự chuyển tiếp trầm tích giữa các lớp (Teisson, 1992).

Do sóng tác động, dẫn đến hóa lỏng lớp bùn non trên đáy. Điều này gây tăng xói bề mặt (Delo và Ockenden, 1992).

Tại các nơi gradient địa hình lớn, có thể xảy trượt trảm tích từ vùng cao đến vùng thấp. Khởi đầu của quá trình trượt phụ thuộc vào độ dốc của địa hình α , mật độ khô của lớp đất, ρ_t , so với độ dốc cân bằng (α_e) của đất. Mối quan hệ này là

Trượt khi $\alpha \geq \alpha_e$ và Không trượt khi $\alpha < \alpha_e$

Trong đó:

$$\alpha_e = \arctan \left[2.5 \cdot 10^{-13} \left(\frac{\rho_t}{1000} \right)^{4.7} \right] \quad (3.18)$$

Hiệu quả của quá trình trượt được mô hình hóa bởi phương trình tán xạ dạng:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = K_{sx} \frac{\partial^2 z_b}{\partial x^2} + K_{sy} \frac{\partial^2 z_b}{\partial y^2} \quad (3.19)$$

Trong đó:

z_b là cao trình đất;

K_{sx}, K_{sy} là những hệ số tán xạ theo phương x, y được xác định theo công thức

Grishanin và Lavygin (1987) dạng:

$$\bar{K}_s = \frac{9.8 \cdot 10^{-8}}{1 - \varepsilon} \sqrt{(s-1)gd_{50}} \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{\frac{1}{6}} \frac{h\bar{v}}{(gv)^{\frac{2}{3}}} \quad (3.20)$$

Trong đó: $\bar{K}_s = (K_{sx}, K_{sy})$; ε là hệ số rỗng trung bình; s là tỉ trọng tương đối của vật liệu đất; d_{50} đường kính trung bình của lớp đất; h là độ sâu nước; $\bar{v} = (V_x, V_y)$ những thành phần vận tốc dòng chảy trung bình theo độ sâu; g là gia tốc trọng trường. Các thông số (ε, s) là thông số hiệu chỉnh mô hình.

III.3.3 Các quá trình bồi xói do vận chuyển cát mịn

Vận chuyển cát mịn rời có các khác biệt rất lớn so với vận chuyển trảm tích có kết dính. Trong module MT, cho phép sử dụng các công thức vận chuyển cát cho trường hợp khi một tỷ lệ nhất định của vật liệu đất là cát mịn với đường kính hạt nằm giữa 63 và 125 μm có thể được vận chuyển trong trạng thái lơ lửng và tại đáy.

Hàm lượng cát cân bằng \bar{c}_e được định nghĩa là đại lượng

$$\bar{c}_e = \frac{q_s}{\bar{u}h} \quad (3.21)$$

Handwritten mark