

بررسی عددی میدان موج تحت اثر ترکیب پدیده‌های انکسار و تفرق

دکتر خسرو برگی

استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

مهندس جواد ملک

کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی

چکیده

پدیده‌های انکسار و تفرق در نزدیکی سواحل، بویژه هنگام برخورد موج به سر موج‌شکنها در ورودی حوضچه‌های بنادر، و ترکیب این پدیده‌ها در داخل حوضچه، از مسائل مهم در طراحی سازه‌های دریایی بشمار می‌روند. پیچیدگی پدیده‌های فوق و ترکیب آنها، عملاً مشکلات عمده‌ای در تامین مدل ریاضی مناسب و حل آنها پدید می‌آورد. در این مقاله نمونه‌ای از روش عددی بررسی دستگاه معادلات شیب ملایم تابع زمان به روش تفاوتهای محدود، که مدل ریاضی مناسبی برای ترکیب انکسار و تفرق امواج را بیان می‌نماید، ارائه شده است. براساس این الگوی عددی، نرم‌افزار مربوط تهیه شده و میزان دقت نتایج در مقایسه با روشهای تحلیلی و سایر روشهای عددی، و یا بصورت کیفی، مورد بررسی قرار گرفته و قابلیت‌های روش مورد بحث نشان داده شده است.

۱- مقدمه

و دیگر موانع نظیر موج شکنها رابطور همزمان بر روی موج ورودی اعمال نمود.

این رابطه و آنچه که باید مورد بررسی قرار گیرد، «ترکیب انکسار و تفرق امواج» نامیده میشود. تا قبل از سال (۱۹۷۲) ترکیب این دو پدیده برای منطقه نزدیک ساحل که دارای امواج بزرگ بودند با استفاده از معادلات دوبعدی آب کم عمق [۱]، مدل می‌شد. در سال (۱۹۷۲)، معادله شیب ملایم^۱ که ترکیب انکسار و تفرق را برای امواج با دامنه کم بیان می‌سازد توسط برکف^۲، ارائه شده است. این معادله علی‌رغم مدلسازی دقیق ترکیب این دو پدیده، مشکلاتی را از

طراحی بنادر و لنگرگاهها در جهت دستیابی به اهداف مورد نظر هنگامی مطلوب است که امکان تحلیل مشخصات و خصوصیات موج در منطقه مورد مطالعه وجود داشته باشد. بطور کلی عوامل هندسی که باعث دگرگونی موج میشوند را می‌توان ناشی از توپوگرافی بستر و ساحل دریا دانست. دیگر موانع در مسیر موج میتواند سازه‌های مورد نیاز تاسیسات ساحلی و بندری باشد. در طراحی بنادر، شناخت وضعیت موج در بندر و اطمینان از آرامش لازم جهت پهلوگیری شناورها، از اهمیت نسبی برخوردار است. این شناخت هنگامی دقیق است که بتوان اثرات توپوگرافی کف حوضچه

۲- معادلات حاکم بر ترکیب انکسار و تفرق امواج

۲-۱- معادله شیب ملایم

«معادله شیب ملایم»، بصورت ذیل توسط برکف، برای بیان میدان موج^۵ داده شده است:

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \phi) + \sigma^2 (C_g / C) \phi = 0 \quad (1)$$

که در آن $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$ ، C سرعت فاز موج، C_g سرعت گروه موج و σ فرکانس زاویه‌ای است. ϕ پتانسیل سرعت نامیده میشود و تابعی است که حاوی اطلاعات دامنه و بعد مکانی فاز موج می‌باشد. همچنین:

$$C^2 = \left(\frac{g}{k}\right) \tanh(kh), \quad C_g = nc \quad (2)$$

$$n = \frac{1}{2} + kh / \sinh(2kh)$$

که در آن، g شتاب ثقل، k عدد موج و h عمق آب است. فرضیاتی که در استخراج معادله (۱) بکار گرفته شده است، بر مبنای شیب ملایم کف مطرح شده و لذا به عنوان «معادله شیب ملایم» نامیده می‌شود. این معادله تا شیب کف ۱:۳ برای امواج پیشرونده کاربرد دارد. معادله (۱) از نوع معادلات دیفرانسیل بیضوی^۶ است و با استفاده از روش اجزاء محدود حل شده است.

۲-۲- معادلات شیب ملایم تابع زمان

معادلات شیب ملایم تابع زمان توسط ماریویاما و واتانابه در سال ۱۹۸۶ ارائه گردید. این معادلات با انتگرال‌گیری از معادلات حرکت و پیوستگی^۷، روی عمق قابل دستیابی است. در این معادله بردار جریان^۸ در واحد عرض (Q) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = (Q_x, Q_y); \quad Q_x = \int_{-h}^0 u dz; \quad Q_y = \int_{-h}^0 v dz \quad (3)$$

که u و v برتریب سرعت اربیتالی ذرات آب در جهات x و

نظر تأمین شرایط مرزی به همراه دارد. بعلاوه، روش اجزاء محدود برای حل این معادله در مناطق باز از لحاظ محاسباتی غیر اقتصادی است.

لذا مطالعات متعددی بمنظور کاهش این مشکلات بعمل آمد که از آن میان میتوان ارائه معادلات پارابولیک رادر^۱، در سال (۱۹۷۹) را نام برد. این معادلات با استفاده از تقریب معادله شیب ملایم مطرح شده و حرکت موج اصلی بسمت ساحل را با حذف امواج منعکس شده منظور میکنند. این روش علیرغم ساده کردن یا عملی کردن «معادله شیب ملایم» موجب از دست دادن دقت معادله خواهد شد.

مطالعه دیگری که توسط ماریویاما^۲ و واتانابه^۳، در سال (۱۹۸۶) ارائه شد، منجر به معرفی مدل ریاضی، تحت عنوان «دستگاه معادلات شیب ملایم تابع زمانی»^۴ گردید. این دستگاه معادلات، ضمن اینکه با «معادله شیب ملایم» معادل هستند، تأمین شرایط مرزی در آنها نیز از سهولت بیشتری نسبت به معادله شیب ملایم برخوردار است. علاوه بر آن با بکارگیری روش تفاوتهای محدود در حل این معادلات، مشکل محدودیت منطقه مورد مطالعه از نظر محاسباتی نیز به نحو قابل قبولی برطرف می‌گردد.

هدف از مطالعه حاضر، ارائه نمونه‌ای از حل دستگاه معادلات شیب ملایم تابع زمانی، با استفاده از روش عددی تفاوتهای محدود است. در این ارتباط، نتایج محاسبه شده برای انکسار و تفرق امواج، با نتایج روشهای تحلیلی و سایر روشهای عددی مقایسه شده، و در مواردی نیز از نظر کیفی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

Q_y و Q_x دارد. در این رابطه Δt نشان دهنده یک گام زمانی است. شکل (۱) شبکه متناوب مکانی را نشان میدهد. معادلات (۶) را می توان بصورت تفاوتهای محدود به شکل زیر نوشت:

$$\xi_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \xi_{i,j}^{t-\frac{\Delta t}{2}} - \left(\frac{\Delta t}{\Delta s}\right) (Q_{x_{i+1,j}}^t - Q_{x_{i,j}}^t + Q_{y_{i,j+1}}^t - Q_{y_{i,j}}^t)$$

$$Q_{x_{i,j}}^{t+\Delta t} = Q_{x_{i,j}}^t - \frac{(C_{x_{i,j}})^2}{n_{x_{i,j}}} \left(\frac{\Delta t}{\Delta s}\right) (n_{i,j} \xi_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - n_{i-1,j} \xi_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}})$$

$$(V)$$

$$Q_{y_{i,j}}^{t+\Delta t} = Q_{y_{i,j}}^t - \frac{(C_{y_{i,j}})^2}{n_{y_{i,j}}} \left(\frac{\Delta t}{\Delta s}\right) (n_{i,j} \xi_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - n_{i,j-1} \xi_{i,j-1}^{t+\frac{\Delta t}{2}})$$

که در آن $C_{x_{i,j}}, n_{x_{i,j}}, C_{y_{i,j}}$ و $n_{y_{i,j}}$ بترتیب مقادیر C سرعت فاز و n ضریب تبدیل سرعت فاز به سرعت گروه موج در نقطه‌ای که $Q_{x_{i,j}}$ و $Q_{y_{i,j}}$ تعریف میشوند، میباشدند. $n_{i,j}$ برابر مقدار n در نقطه‌ای است که $\xi_{i,j}^t$ تعریف میشود. برای پایدار شدن نتایج در همه نقاط شبکه مورد مطالعه، لازم است که محاسبات در چندین حلقه زمانی (هر حلقه شامل یک پررود موج)، تکرار شود.

ابعاد شبکه Δs در مقایسه با طول موج باید کوچک باشد، تا نتایج دقیق تری برای میدان موج بدست آید. در نزدیکی ساحل با توجه به کم شدن عمق، طول موج کاهش می یابد. اگر Δs در ارتباط با این طول موج انتخاب شود، ممکن است مقدار کوچکی برای ابعاد شبکه بدست آید که بکارگیری آن برای همه ناحیه منطقی نباشد. بنابراین، توصیه شده است [۵] که ابعاد شبکه با توجه به رابطه ذیل تعیین گردد:

$$\Delta s = \left(\frac{1}{20} \text{ تا } \frac{1}{40}\right) L_b \quad (8)$$

که در آن، L_b طول موج در منطقه شکست موج می باشد.

y هستند. دستگاه معادلات شیب ملایم تابع زمان عبارت است از:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{C^2}{n} \nabla(n\xi) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \nabla \cdot Q = 0$$

که در آن، ξ معرف رقوم سطح آب و t بیانگر زمان است. از سوی دیگر، معادله «پخش شدن» بصورت زیر از تئوری امواج خطی بدست می آید:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (5)$$

دستگاه معادلات (۴) همراه با معادله (۵)، بصورت عددی قابل حل بوده و میدان موج، بدست خواهد آمد. در این مقاله نشان داده خواهد شد که تأمین شرایط مرزی در این معادلات با سهولت بیشتر نسبت به روش شیب ملایم انجام پذیر است.

۳- محاسبات عددی

۳-۱- جداسازی معادلات حاکم

دستگاه معادلات (۴) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{C^2}{n} \frac{\partial(n\xi)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{C^2}{n} \frac{\partial(n\xi)}{\partial y} = 0$$

محورهای x و y بترتیب جهات بطرف ساحل و در امتداد ساحل را نشان می دهند. در جداسازی معادلات (۶) از شکل صریح^۲ استفاده میشود. منطقه مورد مطالعه به شبکه هائی^۳ به ابعاد Δs در جهات x و y تقسیم میشوند. شبکه بندی مکانی مورد استفاده از نوع «متناوب»^۴ می باشد. بدین نحو که، نقاط مورد مطالعه از نظر مکانی به فاصله $\frac{\Delta s}{2}$ از یکدیگر قرار گرفته و از نظر زمانی نیز مقادیر ξ اختلافی برابر $\frac{\Delta t}{2}$ نسبت به مقادیر

$$Q_x^t(x_0, y_0) = Q_x^t(x_0, y_0) + Q_{XR}^t(x_0, y_0) \quad (11)$$

$$Q_x^t(x_0 - \Delta s, y_0) = Q_x^t(x_0 - \Delta s, y_0) + Q_{XR}^t(x_0 - \Delta s, y_0)$$

در ضمن Q_{XR} و Q_{XI} با استفاده از تئوری امواج با دامنه کم و با فرض ثابت بودن عمق آب بطور موضعی بیان می‌گردد. روابط زیر برای اینگونه مرزها، در صورتی که موازی محور y باشند، بدست می‌آید:

$$Q_x^t(x_0, y_0) = A \cdot Q_x^{t-\tau}(x_0 - \Delta s, y_0) \quad (12)$$

$$A = (1 - K_R) / [1 + K_R^2 - 2K_R \cos(2k \Delta s \cos \alpha_n)]^{1/2}$$

$$\tan(\sigma\tau) = (1 + k_R) / (1 - k_R) \tan(k \Delta s \cos \alpha_n)$$

روابط (۱۲) بیانگر این امر است که جریان در نقطه (x_0, y_0)

روی مرز در زمان t برابر با حاصلضرب جریان در نقطه

داخلی $(x_0 - \Delta s, y_0)$ در زمان $t - \tau$ ، در ضریب A است. مطابق

شکل (۲-ب)، برای مرز موازی محور x مؤلفه y جریان

بطور مشابه قابل محاسبه است:

$$Q_y^t(x_0, y_0) = A \cdot Q_y^{t-\tau}(x_0, y_0 - \Delta s) \quad (13)$$

مقدار زمانی τ ، برای هر نقطه روی مرز قابل محاسبه

است. زاویه α_n زاویه موضعی موج برای هر نقطه است.

۳-۲-۳- مرز مستهلک کننده موج

مرزهای جانبی و مرز ساحلی منطقه مورد مطالعه را

می‌توان نمونه‌هایی از این نوع مرز بحساب آورد. این مرز

اجازه عبور آزاد به موج را داده و برای آن $(K_R = 0)$ است. با

قرار دادن این مقدار از K_R در روابط (۱۲)، برای مرز موازی

محور y روابط زیر بدست خواهد آمد:

$$Q_x^t(x_0, y_0) = Q_x^{t-\tau}(x_0 - \Delta s, y_0) \quad (14)$$

$$\tau = \Delta s \cdot \cos \alpha_n / C$$

و برای مرز موازی محور x نتیجه می‌شود:

از سوی دیگر، چون از شکل صریح برای منقطع کردن معادلات استفاده نموده‌ایم، برای جلوگیری از ناپایداری باید مقدار گام زمانی Δt در رابطه ذیل، که همان شرط پایداری است، صدق نماید:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{2\sqrt{2}C_{\max}} \quad (9)$$

که در آن C_{\max} حداکثر مقدار سرعت فاز موج در منطقه

مورد مطالعه می‌باشد.

۳-۲-۳- شرایط مرزی

برای مرزهای داخلی و خارجی محدوده مورد مطالعه،

حالت‌های زیر را می‌توان در نظر گرفت:

۳-۲-۳-۱- مرز با انعکاس کامل

هر مانعی که در مسیر موج قرار گرفته، و موجب انعکاس

کامل موج گردد، را مرز با انعکاس کامل می‌نامند. در این

حالت ضریب انعکاس K_R که نسبت ارتفاع موج منعکس شده

به ارتفاع موج برخورد کننده است، برابر واحد می‌باشد.

روابطی که بیانگر این مرز است را می‌توان بصورت زیر

نوشت:

$$Q_x^t(x_0, y_0) = 0; \quad Q_y^t(x_0, y_0) = 0 \quad (10)$$

که در آن x_0, y_0 معرف مختصات نقاط واقع بر مرز و Q^t

بیانگر مؤلفه‌های نرخ جریان در هر زمان معین (دبی) است.

۳-۲-۳-۲- مرز با انعکاس مشخص

مرزهای داخلی منطقه مورد مطالعه در مواردی لازم است

که با استفاده از این نوع مرز مدل گردد. در این حالت، ضریب

انعکاس مربوط به مرز بصورت $(0 < K_R < 1)$ مطرح است.

با توجه به شکل (۲-الف)، مؤلفه جریان در نقطه (x_0, y_0) و

در نقطه دیگری به مختصات $(x_0 - \Delta s, y_0)$ را می‌توان با روابط

ذیل و بصورت جمع جریان امواج ورودی و انعکاسی، یعنی

Q_{XR} و Q_{XI} نوشت:

(۱۹)

$$Q_{XR}^t(x_0 + \Delta s, y_0) = Q_x^t(x_0 + \Delta s, y_0) - a_1 C \cos \alpha_1 \sin [k(x_0 + \Delta s) \cos \alpha_1 + ky_0 \sin \alpha_1 - \omega t]$$

رابطه (۱۹)، بیان می‌دارد که، دبی منعکس شده در نقاط جلوی مرز ورودی برابر با تفاضل دبی کلی این نقاط، که از حل شبکه بدست می‌آید، و دبی موج اصلی در این نقاط میباشد. با تعیین این دبی و با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۶) مقدار دبی مرز ورودی برای هر نقطه در هر گام زمانی قابل محاسبه است.

۳-۳- محاسبه مشخصه‌های موج

هدف نهایی از محاسبات بر روی شبکه، تعیین مشخصه‌های موج از نظر ارتفاع H و جهت θ می‌باشد. منظور از زاویه θ ، زاویه‌ای است که خط عمود بر جبهه موج با محور x ، که جهت بطرف ساحل را مشخص می‌نماید، می‌سازد.

ارتفاع موج، در نقاطی از شبکه که رقوم سطح آب ξ تعریف شده، پس از گذشت یک پریود، با محاسبه جذر متوسط مربعات مقادیر ξ در پریود مربوط قابل محاسبه است:

$$H = 2 \cdot (2\bar{\xi})^{1/2} \quad (20)$$

جهت موج نیز پس از گذشت هر پریود، بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\theta = \text{Arc tan} \left[\left(\frac{\bar{Q}_y}{\bar{Q}_x} \right)^{1/2} \right] \quad (21)$$

۴- بحث و بررسی مثالهای کاربردی

بمنظور بررسی مستقلی در مورد کارآئی معادلات شیب ملایم تابع زمان، چندین محاسبه عددی توسط نرم‌افزار تهیه شده [۹] تحت شرایط مختلف با فرض $\Delta s = 5\text{m}$ و $\Delta t = 0.1\text{sec}$ بعمل آمده و از آنجا، میدان موج تعیین شده است. دقت مدل از طریق مقایسه نتایج مربوط به انکسار و تفرق با حلهای

$$Q_y^t(x_0, y_0) = Q_y^{t-\tau}(x_0, y_0 - \Delta s) \quad (15)$$

۳-۲-۴- مرز ورود موج

مشخصه‌های موج ورودی، با استفاده از روابط این مرز در منطقه مورد مطالعه اعمال میشود. جریان روی این مرز فقط ناشی از موج ورودی نیست. در حالت کلی علاوه بر موج ورودی، موج خروجی نیز بدلیل امواج انعکاسی ناشی از حضور سازه‌ها و ساحل در منطقه مورد مطالعه بوجود می‌آیند. این مرز باید بتواند، علاوه بر عبور موج ورودی، امواج خروجی که به این مرز می‌رسند را، بدون اینکه تأثیری روی موج ورودی بگذارند، از خود عبور بدهد. در شکل (۳)، موقعیت موج ورودی با دامنه a_1 و زاویه α_1 همراه با امواج خروجی نشان داده شده است. مقدار مولفه دبی برای یک نقطه دلخواه x_0, y_0 روی این مرز بصورت ذیل خواهد بود.

(۱۶)

$$Q_x^t(x_0, y_0) = a_1 C \cos \alpha_1 \sin(kx_0 \cos \alpha_1 + ky_0 \sin \alpha_1 - \omega t) + Q_{XR}^t(x_0, y_0)$$

سمت راست رابطه (۱۶) مجموع دبی ناشی از موج اصلی و دبی ناشی از امواج انعکاسی را بیان می‌نماید. این مرز باید اجازه عبور آزاد به امواج انعکاسی را بدهد. لذا با استفاده از رابطه مشابه با رابطه (۱۴) برای مولفه جریان منعکس شده روی این مرز عبارت زیر نتیجه می‌شود:

$$Q_{XR}^t(x_0, y_0) = Q_{XR}^{t-\tau}(x_0 + \Delta s, y_0) \quad (17)$$

که در آن

$$\tau = \Delta s \cdot \cos \alpha_1 / C \quad (18)$$

مولفه دبی منعکس شده در نقطه داخلی در زمان t بصورت زیر تعریف میشود.

موج ورودی از نظر پرید و ارتفاع بترتیب برابر ۱۶ ثانیه و یک متر در نظر گرفته شده است.

۴-۲-۱- تفرق برای موج شکن منفصل با زاویه برخورد ۹۰°

در این حالت نتایج محاسبه شده بصورت منحنی های تراز ارتفاع موج با حل تحلیلی مسئله که توسط آقایان پنی^۱ و پریس^۲، ارائه شده است، در شکل (۷) مورد مقایسه قرار گرفته اند. با توجه به شکل تطابق خوبی بین نتایج عددی و تحلیلی مشاهده میشود.

۴-۲-۲- تفرق برای موج شکن منفصل با زاویه برخورد ۱۳۵°

نتایج حل عددی، بصورت منحنی سه بعدی پروفیل سطح آب در شکل (۸)، و منحنی های تراز ارتفاع موج در شکل (۹) نمایش داده شده است. برای بررسی این نتایج، از نمودار تفرق ارائه شده در مرجع شماره [۷]، که در شکل (۱۰) نشان داده شده است استفاده میشود. این نمودار نتایج را با همان مشخصه های موج ورودی مورد نظر ارائه کرده و مستقیماً^۳ میتواند برای مقایسه مورد استفاده قرار بگیرد. در شکل (۱۰) نتایج به سه صورت «تحلیلی»، «حل با روش اجزاء محدود» و «مدل شعاعی» نشان داده شده است، که میتواند با نتایج محاسبه شده مورد مقایسه قرار بگیرد. بنظر میرسد که الگوی جریان هماهنگی بیشتری با نتایج روش اجزاء محدود داشته باشد.

۴-۲-۳- تفرق برای موج شکن با دو بازو

در این حالت دو موج شکن نیمه بینهایت با فاصله ای برابر نصف طول موج، از یکدیگر در نظر گرفته شده اند. نتایج محاسبه شده تفرق، بصورت منحنی سه بعدی پروفیل سطح آب در شکل (۱۱) و منحنی های تراز ارتفاع موج در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

از سوی دیگر، حل تحلیلی مسئله در این حالت نیز با

تحلیلی و مقایسه نتایج ترکیب انکسار و تفرق با نتایج سایر روشهای عددی و یا بصورت کنترل کیفی آن، مورد بحث قرار گرفته است.

۴-۱-۱- انکسار موج

در محاسبات انکسار موج، برای توپوگرافی کف، شرایط شیب خطی (۱:۵۰) و تغییرات شیب بصورت سهمی با تقعر بسمت بالا در نظر گرفته شده است. در این رابطه قسمتی از سهمی که در شروع ۱۵ متر عمق و در فاصله ۴۴۰ متری ۵/۶ متر عمق دارد، مورد نظر است. موج ورودی با ارتفاع ۱ متر و پرید ۱۶ ثانیه از قسمتی که دارای عمق ۱۵ متر است، بطور عمود بر ساحل وارد منطقه میشود. در این حالت زاویه برخورد موج ۹۰ درجه، و زاویه θ برابر صفر است. محاسبات عددی با بکارگیری معادلات (۴) انجام گرفته و نتایج بصورت خطوط تراز ارتفاع موج در شکلها (۴) و (۵) بترتیب برای شیب کف بصورت خطی و سهمی ارائه شده است.

از نظر بررسی کیفی، همانطور که انتظار می رود، با کاهش عمق بطرف ساحل ارتفاع موج افزایش می یابد. برای بررسی کمی نتایج، ارتفاع موج برای نقاط با اعماق مختلف بصورت تحلیلی محاسبه شده و با نتایج تجربی [۶] مورد مقایسه قرار گرفته اند. در دو حالت مذکور نتایج تحلیلی و تجربی، انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. شکل (۶) مقایسه این نتایج را برای حالت شیب خطی کف نشان میدهد.

۴-۲-۴- تفرق موج

در این قسمت، تفرق موج در چند حالت مختلف از نظر آرایش موج شکن و جهت موج ورودی مورد بررسی قرار می گیرد. عمق آب ثابت و برابر ۱۵ متر است. مشخصه های

(۱۶) نشان داده شده است، استفاده میشود. باید متذکر شد که توپوگرافی کف در مرجع مذکور بصورت مقعر^۱ قید شده است، اما تعبیر بکار گرفته شده برای کف مقعر بصورت اعمال شیب سهمی در مدل بوده است. مقایسه اشکال (۱۵) و (۱۶)، تطابق خوبی بین خطوط تراز مربوط به ضریب انکسار و تفرق (۵/۰) تا (۱۰/۰) نشان میدهد، این در حالی است که در نزدیکی مرز انتهائی موج شکن در ساحل، افزایش ارتفاع بیشتری نسبت به نتایج مرجع دیده میشود.

۴-۳-۳- میدان موج در اطراف موج شکن با یک دهانه (با دو بازو)

در این بخش، برای بررسی ترکیب انکسار و تفرق، شیب خطی بمیزان ۱:۵۰ در محاسبات استفاده شده است. نتایج حاصل بصورت خطوط تراز ارتفاع موج در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. افزایش ارتفاع موج بدلیل وارد شدن اثر انکسار در مقایسه با شکل (۱۲) مشهود است. برای مشاهده بهتر، دو نمودار «تفرق خالص» و «ترکیب انکسار و تفرق» بر یکدیگر منطبق گردیده و در شکل (۱۸) ارائه گردیده است.

۵- نتیجه گیری کلی

نمونه‌ای از بررسی عددی با استفاده از روش تفاوتهای محدود، در ارتباط با صحت و کارایی معادلات شیب ملایم تابع زمان ارائه شده است. در این رابطه، نتایج انکسار و تفرق با نتایج روشهای تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفته، و نتایج ترکیب انکسار و تفرق نیز با نتایج سایر روشهای عددی مقایسه شده و یا اینکه بصورت کیفی بررسی گردیده‌اند. با توجه به نتایج و مباحث مطروحه، مدل مورد نظر میتواند بعنوان ابزاری قابل استفاده و در عین حال مطمئن در تعیین میدان موج تحت اثر انکسار و تفرق بکار گرفته شود.

استفاده از مرجع شماره [۸]، بر روی شکل (۱۲) نشان داده شده است. متقارن بودن منحنی‌های تراز نسبت به محور گذرنده از وسط دهانه، و کاهش ارتفاع با دور شدن از محل ورود موج، نشان‌دهنده صحت کیفی نتایج عددی است. علاوه بر آن، مقایسه نتایج تحلیلی و عددی نیز با توجه به شکل (۱۲)، تطابق رضایت‌بخشی را نشان میدهد.

۴-۳- ترکیب انکسار و تفرق موج

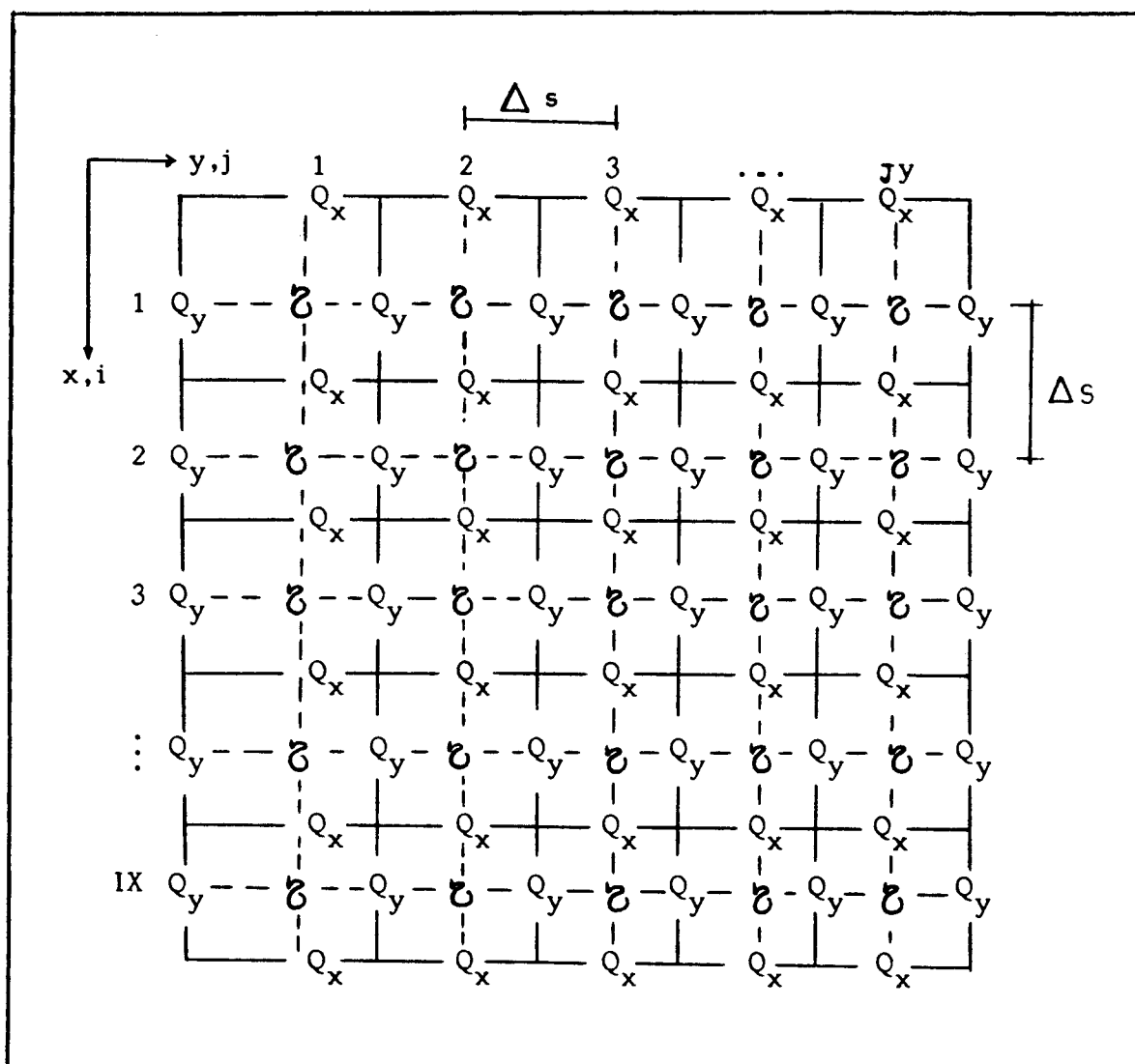
در این بخش با توجه به اثر توپوگرافی کف در حالتهای مورد بحث در بخش ۴-۲، ترکیب انکسار و تفرق مورد بررسی قرار میگیرد. مشخصه‌های موج ورودی از نظر پریود و ارتفاع همانند قسمت (۴-۲) است.

۴-۳-۱- میدان موج در اطراف موج شکن منفصل

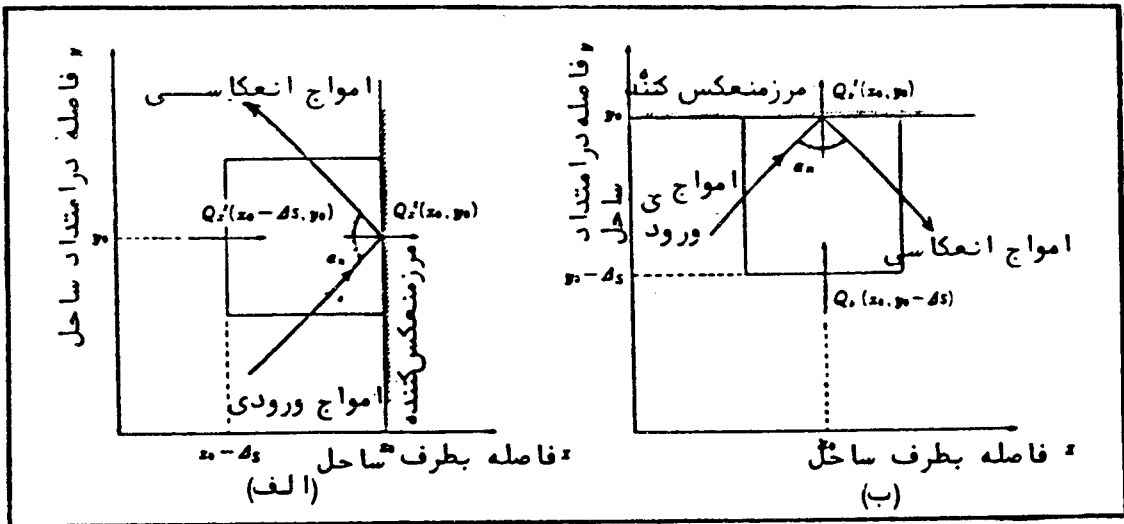
در شکل (۱۳)، خطوط تراز ارتفاع موج در حالت تفرق با کف ثابت و حالت ترکیب انکسار و تفرق بترتیب با اعمال شیب خطی ۱:۶۰ و ۱:۵۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در اثر شیب کف و کاهش عمق بطرف ساحل، ارتفاع موج در منطقه افزایش داشته و از سوی دیگر با ازدیاد شیب، ارتفاع موج نیز افزایش می‌یابد.

۴-۳-۲- میدان موج در اطراف موج شکن منفصل (زاویه برخورد ۱۳۵°)

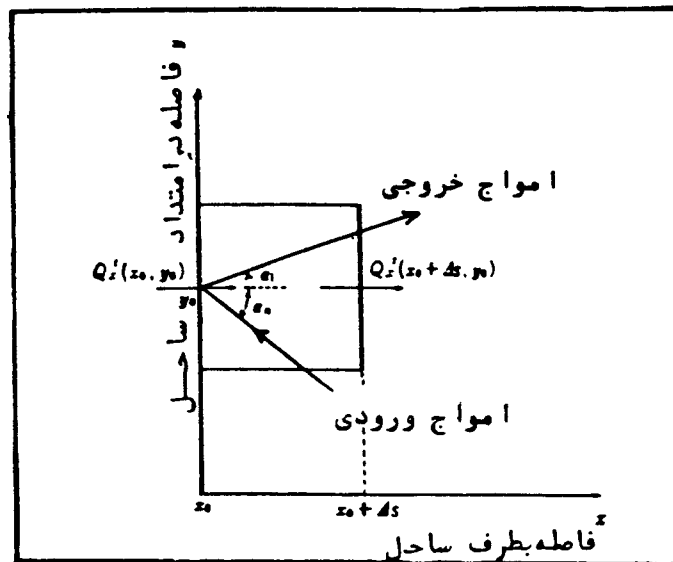
در این بخش، برای توپوگرافی کف، تغییراتی بصورت سهمی مشابه بخش ۴-۱ در نظر گرفته شده است. نتایج محاسبه شده بصورت منحنی سه بعدی پروفیل سطح آب و خطوط تراز ارتفاع موج بترتیب در شکلهای (۱۴) و (۱۵) نمایش داده شده است. از لحاظ کیفی، افزایش ارتفاع موج در منطقه، بدلیل کاهش عمق، از طریق مقایسه شکل (۱۵) و (۹) قابل مشاهده است. برای بررسی کمی نتایج، از نمودار مربوط به همین حالت، ارائه شده در مرجع شماره [۷]، که در شکل



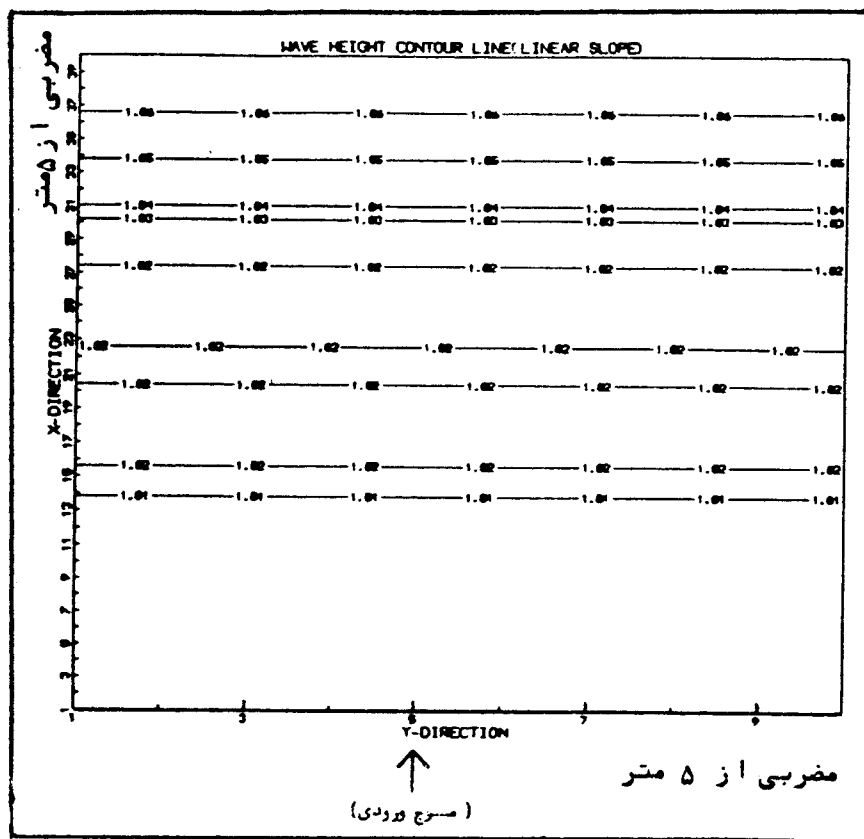
شکل ۱- شبکه متناوب مکانی



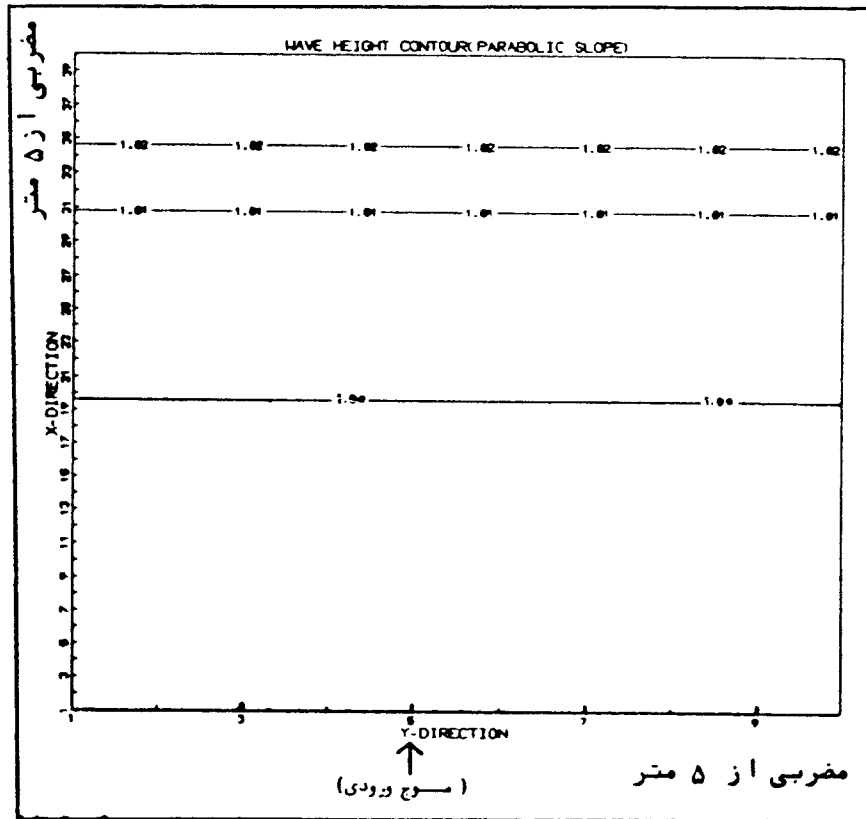
شکل ۲ - مرز با انعکاس اختیاری



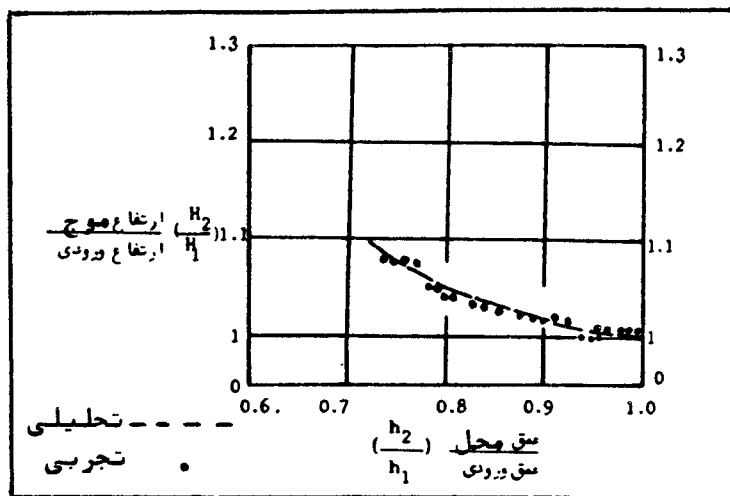
شکل ۳ - مرز باز ورودی



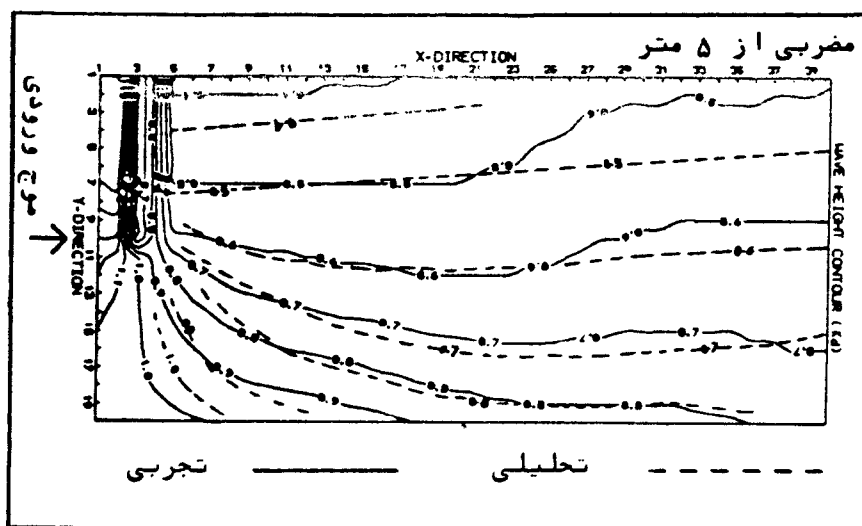
شکل ۴ - خطوط تراز ارتفاع موج (شیب خطی ۱:۵۰، زاویه 90°)



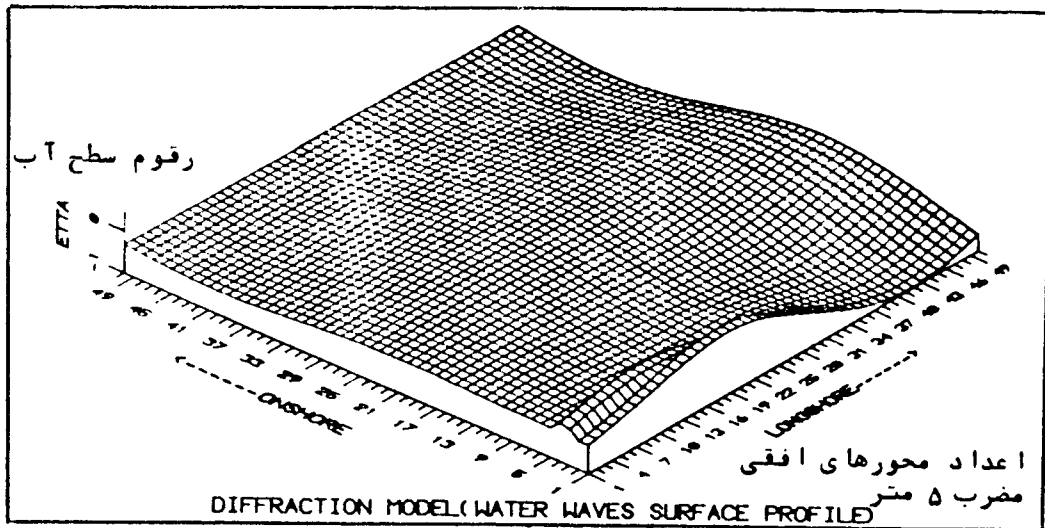
شکل ۵ - خطوط تراز ارتفاع موج (شیب سهموی ، زاویه 90°)



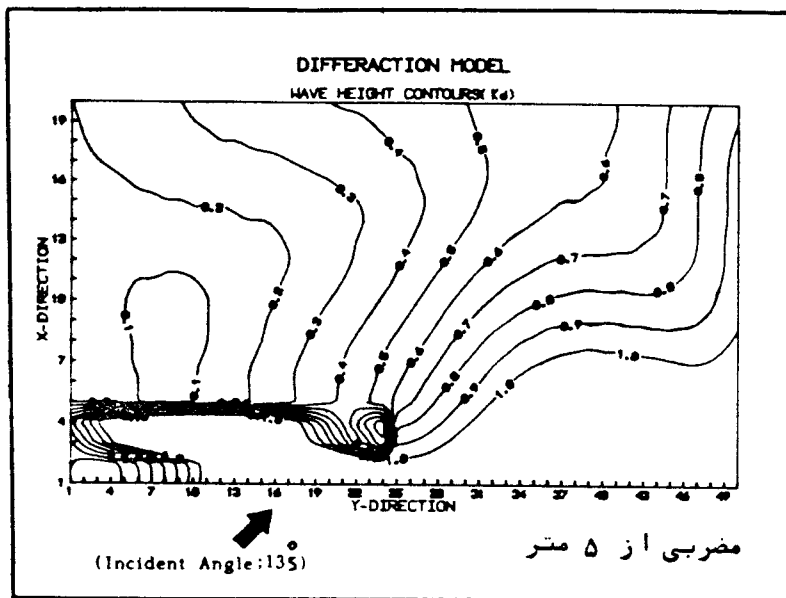
شکل ۶ - مقایسه حل عددی و تحلیلی (شیب ۱:۵۰)



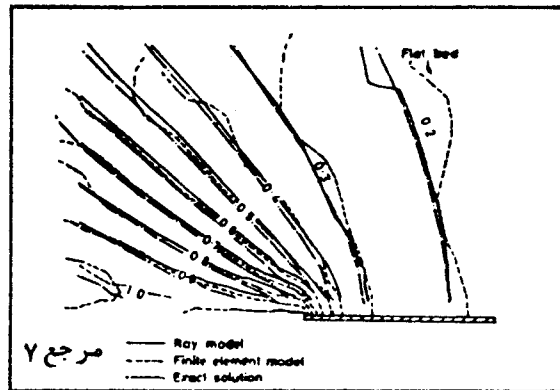
شکل ۷ - ضرایب تفرق موج (موج شکن نیمه محدود)



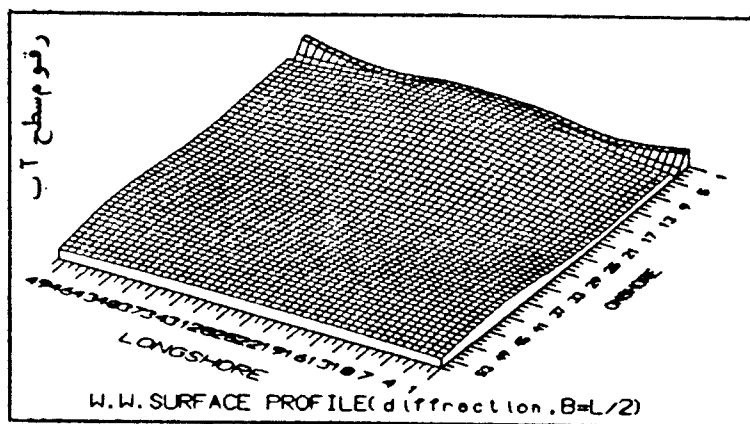
شکل ۸ - پروفیل سطح آب در حالت کف دریا بصورت صاف



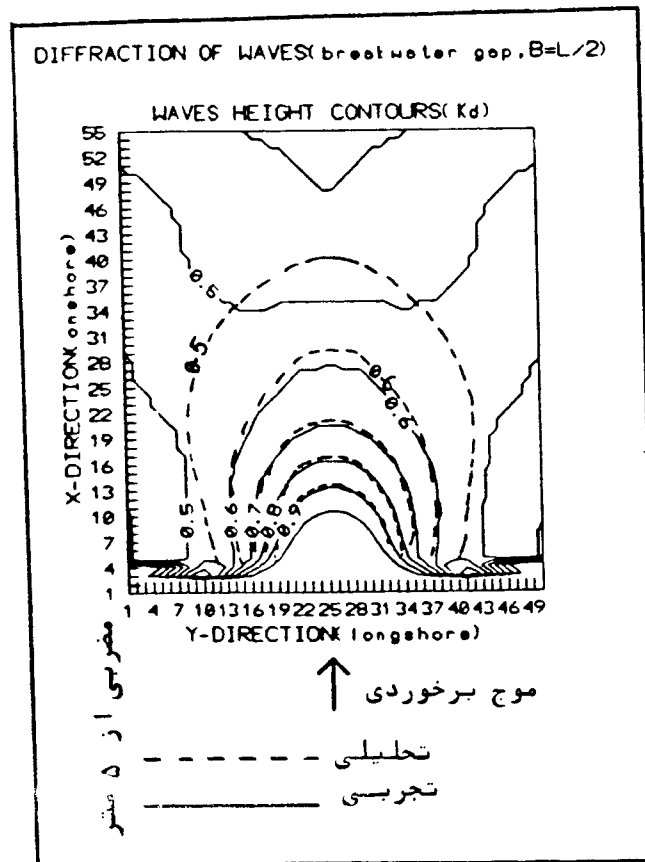
شکل ۹ - ضرایب تفرق در حالت موج برخوردی ۱۳۵°



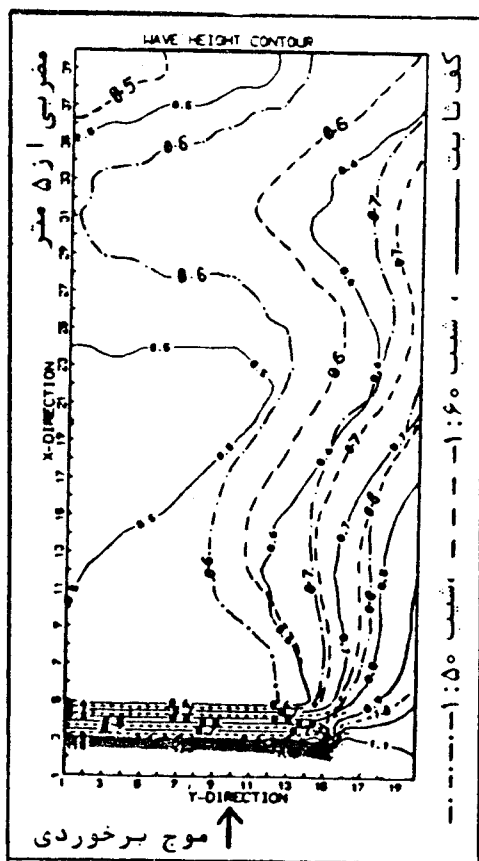
شکل ۱۰ - نمودار تفرق بر اساس مرجع ۷، کف مسطح
 پرپود ۱۶ ثانیه - زاویه برخورد 135°



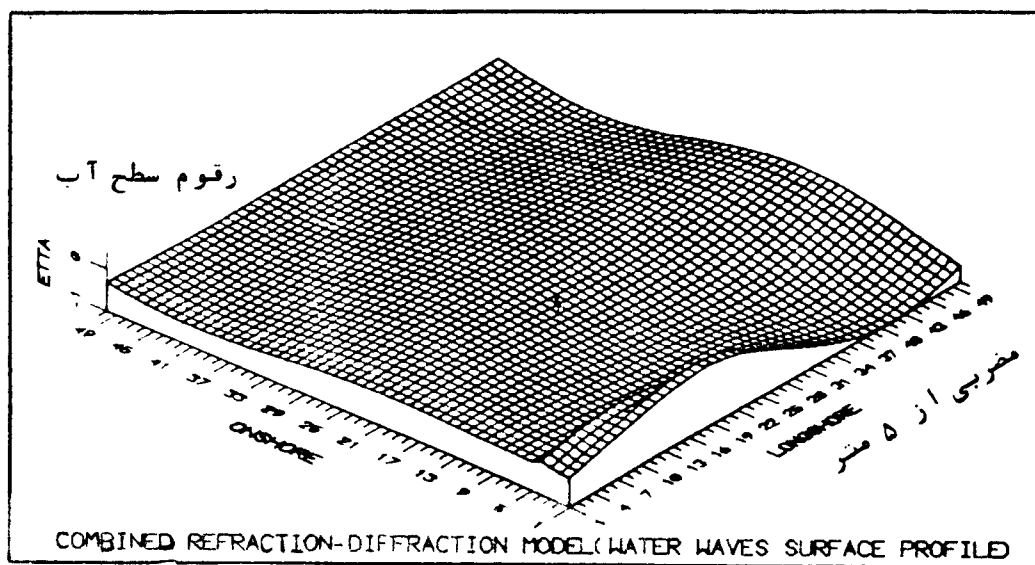
شکل ۱۱ - پروفیل سطح آب در حالت تفرق برای $B = \frac{L}{2}$



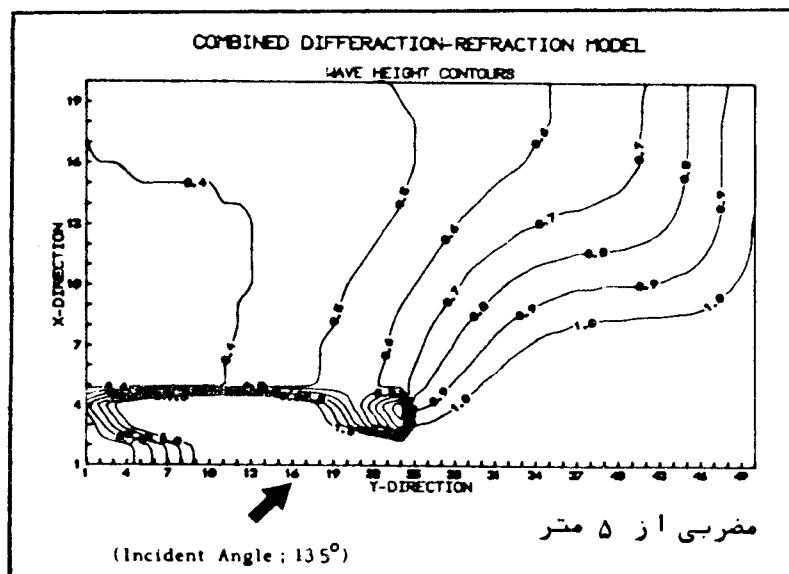
شکل ۱۲ - ضرایب تفرق موج در حالت $B = \frac{L}{2}$



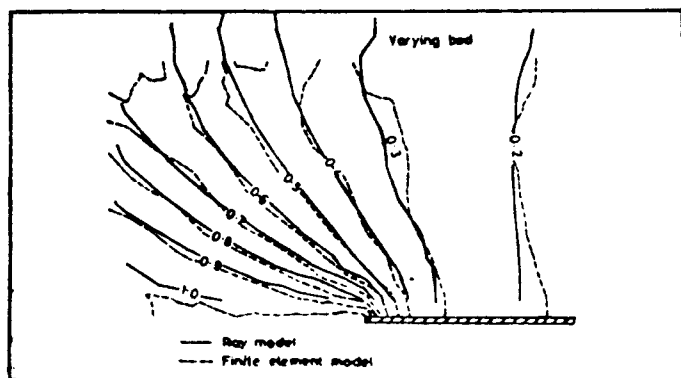
شکل ۱۳ - خطوط هم ارتفاع موج در شیبهای مختلف



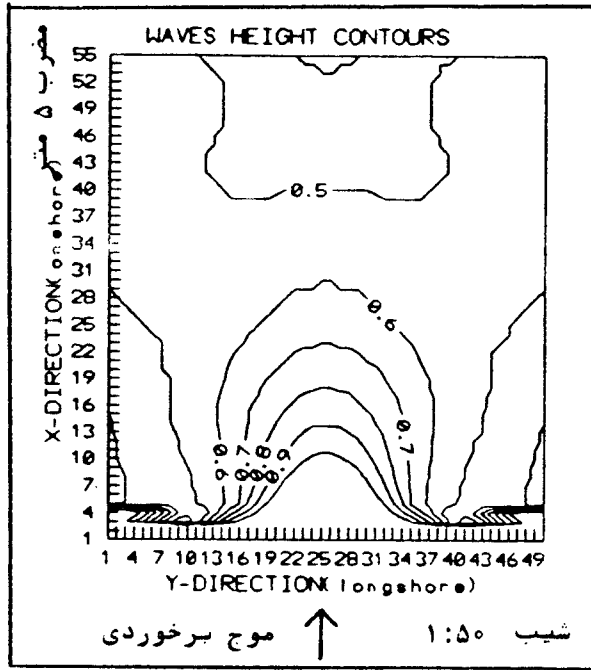
شکل ۱۴ - پروفیل سطح آب در حالت کف سهموی



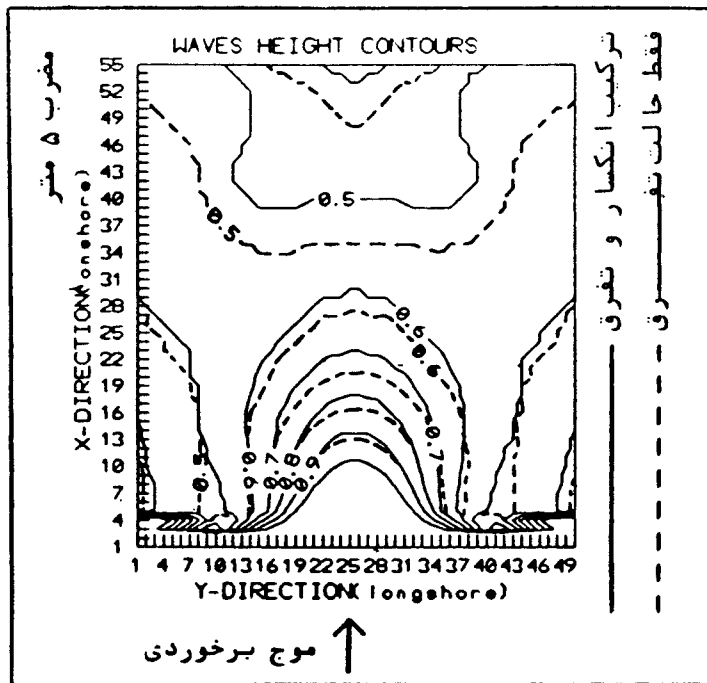
شکل ۱۵ - ترکیب انکسار و تفرق در کف سهمی



شکل ۱۶ - نمودار ترکیب انکسار و تفرق (مرجع ۷)
کف دریا سهمی - پریود ۱۶ ثانیه وزاویه برخورد ۱۳۵°



شکل ۱۷ - خطوط هم ارتفاع موج ، ترکیب انکسار و تفرق ، $B = \frac{L}{2}$



شکل ۱۸ - مقایسه تفرق و ترکیب انکسار و تفرق امواج

فهرست منابع

- 1- Stoker, J.J., 1957: Water Waves; interscience Publishers inc, Newyork.
- 2- Berkhoff, J.C.W., 1972: Computation of combined Refraction Diffraction, Proc, 13th coastal Eng. Conf., ASCE
- 3- Radder, A.C., 1979: On the parabolic equation method for water-wave propagation, J.fluid Mech., Vol.72
- 4- Watanabe, A., and K.Maruyama, 1984: Numerical analysis of combined Refraction, Diffraction and Breaking, Proc, 31 St Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE
- 5- Horikawa, K., 1989: Nearshore Dynamics and coastal Processes, University of Tokyo Press.
- 6- Wiegel, R.L., 1964: Oceanographical Engineering, Prentice Hall-Newjersey.
- 7- Southgate, N.H., 1985: A harbour ray model of wave Refraction Diffraction, J. waterway , Port, Coastal and ocean Engineering, vol. 111, No.1
- 8- U.S. Army coastal Eng, 1977: Shore protection Manual, vol.1.

- ۹- بررسی ترکیب پدیده انکسار و تفرق امواج دریا - پایان نامه کارشناسی ارشد - رشته مهندسی سازه های هیدرولیکی دانشکده فنی دانشگاه تهران، از جواد ملک با راهنمایی دکتر خسرو برگی - سال ۱۳۷۱.
- ۱۰- نوشتار کارهای دریایی، خسرو برگی - دانشکده فنی دانشگاه تهران - ۱۳۶۹.