

شبیه سازی امواج سونامی به روش عددی و بررسی اثرات شیب بستر

و عرض ناحیه ساحلی بر ارتفاع این امواج

محمد جواد کتابداری^۱، مینوفر منصف^۲

Ketabdar@aut.ac.ir

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه هرمزگان

چکیده

امواج سونامی هر ساله در نقاط مختلف دریاها و اقیانوس های جهان بوقوع می پیوندند. این امواج با سرعت بسیار زیاد در جهات مختلف منتشر گردیده و در صورت رسیدن به ساحل خسارات جبران ناپذیری را بر این مناطق و سازه ها و تاسیسات واقع در آنها وارد می سازند. لذا درک این پدیده پیچیده و پیشبینی رفتار آن می تواند باعث کاهش خسارات وارده گردد. در تحقیق حاضر مطالعات شبیه سازی عددی پدیده سونامی انجام گرفت. هدف از تحقیق پیش بینی مشخصات موج سونامی هنگام رسیدن به ناحیه ساحلی بود. امواج سونامی با در نظر گرفتن آب دریا به صورت سیال لزج، معادلات ناویر-استوکس برای آب کم عمق به عنوان معادلات حاکم به همراه روش کسر حجم سیال برای شبیه سازی سطح آب در نرم افزار Flow3D مدل سازی گردید. تولید موج با شبیه سازی یک موجساز پیستونی در مرز جانبی ناحیه مورد مطالعه صورت گرفت. یک تک موج در آب عمیق تولید و به سمت ساحل منتشر گردید. نتایج شبیه سازی، افزایش قابل توجه ارتفاع موج سونامی را پس از ورود به ناحیه ساحلی نشان داد. نرخ این افزایش بر حسب شیب مورد محاسبه قرار گرفت. همچنین اثر کاهش عرض ناحیه ساحلی بر افزایش ارتفاع این امواج مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی:

سونامی، ارتفاع موج، شیب ساحل، عرض ساحل، شبیه سازی عددی

تاریخ دریافت مقاله : ۹۲/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۳/۶/۱۷

۱- مقدمه

سونامی پدیده ای طبیعی است و هنگامی ایجاد می شود که بستر دریا در مقیاس بزرگ بصورت عمودی حرکت کند و در نتیجه آب دریای عمیق به سرعت در مقیاس توده ای جابجا شود. این جابجایی ممکن است بر اثر یک ضربه ناگهانی در عمق اقیانوس مثل وقوع زمین لرزه، لغزش قطعات پوسته زمین، بروز آتش فشان در عمق دریاها، انفجارات اتمی یا حتی برخورد شدید یک شهاب سنگ بر پوسته زمین به وجود آید. اما مهمترین عامل وقوع این پدیده حرکت صفحات و ایجاد امواج زلزله است. آرایش طبیعی و مصنوعی و توپوگرافی مناطق کم عمق ساحلی در تغییرات امواج سونامی در حرکت از آب عمیق به آب کم عمق موثر هستند. لذا این امواج که دارای دامنه کمی در اقیانوسها و دریاها هستند تحت اثر پدیده هایی نظیر عمق کاستگی، انکسار و تشدید با دامنه زیاد در ساحل ظاهر گردیده و بالاروی امواج اتفاق می افتد. امواج سونامی امواجی با طول موج بسیار بلند هستند که به همین دلیل حتی در آبهای عمیق اقیانوسهای آزاد هم به صورت موج آبهای کم عمق عمل می کنند [۱].

زمانی که آب بر اثر اغتشاش بوجود آمده به سمت بالا رانده می شود، جاذبه بر روی آن عمل کرده و انرژی را به طور افقی به موازات سطح آب هدایت می کند. سپس انرژی از میان اعماق آب از مرکز اولیه جنبش به اطراف گسترش می یابد. نیروی عظیمی که بوسیله جنبش لرزه ای ایجاد می شود سرعت باورنکردنی سونامی را که حتی به بیش از ۸۰۰ کیلومتر در ساعت می رسد، ایجاد می کند. موجهای آبهای کم عمق، با سرعتی معادل ریشه دوم حاصل ضرب شتاب گرانش زمین در عمق آب حرکت می کنند. این رابطه با $c = \sqrt{gd}$ که d عمق آب است بیان می شود. از آنجائیکه سرعت این امواج تنها به عمق آب بستگی دارد با نزدیک شدن آنها به آبهای کم عمق ساحلی سرعت امواج کم شده و

با توجه به ثابت ماندن پیوند امواج و در نتیجه کم شدن طول موج به شدت بر ارتفاع آن افزوده شده و به شکل آشنای مرگبارش بدل می شود. سونامی که در محل تولید خود دارای انرژی فوق العاده ای است، حتی پس از طی مسافتهای زیاد انرژی خود را فقط به میزان ناچیزی از دست می دهد که خود بیانگر ثابت ماندن انرژی از محل تولید آن تا هنگام برخورد به ساحل است [۲].

۲- معادلات حاکم

با توجه به طول موج زیاد سونامی این امواج به عنوان امواج آبهای کم عمق شناخته می شوند. لذا از تئوری امواج بلند می توان برای مدلسازی آنها استفاده نمود. بر اساس تئوری امواج بلند، شتاب قائم ذرات آب در مقایسه با شتاب ثقل قابل صرف نظر بوده و فشار ستون آب به صورت فشار هیدرواستاتیکی تقریب زده می شود. در این صورت، سرعت ذرات آب مستقل از عمق آب بوده و در تمام ستون آب ثابت است [۳]. با توجه به توضیحات فوق، معادلات حاکم همان ناویر-استوکس هستند که با توجه به شرایط خاص مسئله به صورت زیر خلاصه می گردند [۴]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_x D = 0 \quad (2)$$

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

که در آنها:

$$M = U(h + \eta) = UD, N = V(h + \eta) = VD \quad (4)$$

$$\tau_x = \frac{gn^2}{D^{1/3}} M \sqrt{M^2 + N^2},$$

$$\tau_y = \frac{gn^2}{D^{1/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (5)$$

های سرعت (u,v,w) در مختصات کارتزین یا استوانه ای هستند. Ax و Ay و Az سطوح جزئی باز به سمت جریان به ترتیب در جهت x و y و z هستند. ضریب R بسته به انتخاب سیستم مختصات دارد. هنگامیکه مختصات استوانه ای استفاده می شود، مشتقات لا باید به مشتقات زاویه ای تبدیل شوند. معادلات حرکت مولفه های سرعت سیال در سه جهت مختصاتی به صورت ذیل بیان می گردند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y u^2}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y uv}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \quad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \quad (9)$$

در این معادلات (Gx,Gy,Gz) شتابهای جسم، (fx,fy,fz) شتابهای لزجی، (bx,by,bz) افتهای جریان در مسیر و ترمهای آخر برای تزریق جرم در سرعت صفر محاسبه می شوند. برای لزجت دینامیکی متغیر μ ، شتابهای لزجی بصورت زیر محاسبه می گردند:

$$\rho V_F f_x = w s_x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \xi (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \quad (10)$$

$$\rho V_F f_y = w s_y - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \xi (A_x + A_y \tau_{xy}) \right\} \quad (11)$$

در این معادلات، M و N مولفه های افقی شار در واحد عرض، U و V مولفه های سرعت افقی متوسط گیری شده در عمق، g شتاب ثقل، h عمق آب ساکن، η وضعیت سطح آب بالاتر از آب ساکن، D عمق کلی آب برابر با $\eta + h$ ، ضریب مانینگ و τ_x, τ_y مولفه های اصطکاک کف هستند.

در این مطالعه مدل سازی امواج بلندبه کمک نرم افزار FLOW3D که یک نرم افزار قوی در زمینه CFD است صورت گرفت. در این نرم افزار از دو تکنیک عددی برای شبیه سازی هندسی استفاده شده است:

- روش حجم سیال^۱ (VOF): از این روش برای مدل سازی سطح آزاد استفاده می گردد.
- روش کسر سطح - حجم مانع^۲ (FAVOR): که این روش برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد.

در ادامه به بیان معادلات استفاده شده در نرم افزار پرداخته می شود [۵]:

۲-۱- معادلات حرکت

معادلات دیفرانسیلی بصورت ترمهایی از مختصات کارتزین (x,y,z) یا استوانه ای (r,θ,z) نوشته می شوند معادله پیوستگی جرم کلی بصورت زیر است:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = RDIF + RSOR \quad (6)$$

که VF حجم جزئی باز به سمت جریان، ρ چگالی سیال، RDIF ترم نفوذ آشفستگی و RSOR منبع جرم است. مولفه

^۱Volume of Fluid

^۲Fractional Area/Volume Obstacle Representation

در این رابطه ضریب اغتشاش^۳ بصورت $v_f = C_f \mu / \rho$ تعریف می گردد که در آن C_f یک مقدار ثابت است. این ترم اغتشاش به ترکیب آشفتگی دو سیال که انتشارش توسط تابع f تعریف شده، حساس است. ترم FSOR مطابق با منبع چگالی RSOR در معادله ۶ است؛ با FSOR نرخ زمانی تغییر جزء حجمی سیال تعیین می گردد. تعریف F به نوع مسئله ای که حل می شود بستگی دارد. مسائل غیر قابل تراکم باید شامل یکی از دو حالت سیال تنها با سطح آزاد یا دو سیال و بدون سطح آزاد باشد. برای یک سیال، F جزء حجمی اشغال شده توسط سیال را ارائه می دهد. بنابراین سیال جایی وجود دارد که $F=1$ باشد، و مناطق خالی^۴ جایی است که برای آن $F=0$ باشد.

۳- مبانی عددی مدل سازی

نرم افزار بطور عددی معادلات مربوطه را با استفاده از روش تفاضل محدود یا حجم محدود حل می کند. مش بندی منطقه مورد مطالعه با سلولهای مستطیلیو در شبکه جابجا شده^۵ انجام می شود. برای هر سلول مقادیر متوسط محلی مربوطه از متغیرهای وابسته وجود دارد. همه متغیرها در مراکز سلولها واقع هستند به استثناء سرعتها که در وجوه سلولها قرار دارند. موانع منحنی شکل، مرزهای جدا کننده، یا دیگر صور هندسی در مش بندی بوسیله تعریف سطوح وجه جزئی، واحجام جزئی سلولها که در مسیر جریان آزاد هستند (روش FAVOR) معرفی می گردند. در این کد به منظور مدل سازی موانع منحنی شکل، شرایط مرزی دیوار و دیگر خصوصیات هندسی، مجموعه شبکه ها با استفاده از شبکه هائی که توسط جسم پر شده و شبکه هائی که در آن جریان سیال برقرار است مدل می شوند. برای گسسته سازی

$$\rho V_F f_z = \omega s z - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \xi \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) \right\} \quad (12)$$

که در آن

$$\tau_{xx} = -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (13)$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (14)$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (15)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \quad (16)$$

$$\tau_{xz} = -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \quad (17)$$

$$\tau_{yz} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \quad (18)$$

۲-۲- مدل سازی سطح آزاد

برای سطح آزاد سیال ترمهایی از تابع حجم سیال، تعریف شده اند. این تابع حجم سیال که با $F(x,y,z,t)$ نشان داده می شود مقادیری بین ۰ تا ۱ را برای هر واحد حجم ارائه می دهد و معادله زیر را ارضاء می نماید:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u + R \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) + \xi \frac{F A_x u}{x} \right] = FDIF + FSOR \quad (19)$$

که در آن:

$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (V_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} + R \frac{\partial}{\partial y} (V_F A_y R \frac{\partial F}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (V_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi \frac{V_F A_x F}{x} \right\} \quad (20)$$

^۳-Diffusion Coefficient

^۴-Void

^۵-Staggered Grid

شرایط مرزی فوق دارای دقت مرتبه ۱ است. در حالیکه استفاده از شرط مرزی انتقال حرارت میان سطح جسم و سیال با توجه به ابعاد شبکه دارای دقت مرتبه ۲ است. فرآیند حل مسئله با گام زمانی δt شامل سه مرحله زیر است:

• بیان صریح معادلات مومنتم، مقدار سرعت در گام زمانی جدید با استفاده از مقدار متغیرهایی که از گام زمانی قبل و یا شرایط اولیه در اختیار است، حدس زده می شود.

• به منظور ارضاء معادله پیوستگی مقدار فشار در هر سلول اصلاح شده و متناسب با آن مقدار سرعت نیز اصلاح می گردد. از آنجائیکه تغییر مقدار فشار در هر سلول باعث تغییر در میزان پارامترها در سلولهای اطراف آن می گردد لذا محاسبات می بایست در یک فرآیند تکراری تا رسیدن به همگرایی در تمامی سلولها ادامه یابد. در روش صریح ممکن است در هر سلول محاسبات به صورت تکراری صورت پذیرد.

• در نهایت در صورتی که در مسئله سطح آزاد وجود دارد لازم است موقعیت جدید سطح آزاد به کمک معادله مربوطه به دست آید. تکرار مراحل فوق جهت پیشبرد حل مسئله در گامهای زمانی مختلف صورت پذیرفته و لازم است شرایط مرزی در تمامی سلولها، موانع و سطح آزاد مورد نظر قرار گیرد.

۴- شبیه سازی موج به کمک موجساز

در آب کم عمق، آب جابجا شده توسط موجساز می بایست با حجم آب تاج موج پیشرونده برابر باشد. برای یک موجساز پیستونی با میزان حرکت S که در جلو آن عمق آب h ثابت است حجم جابجا شده آب Sh است (شکل ۱). از طرفی حجم آب در یک تاج موج $\frac{H}{8}$ است. با برابر قرار دادن دو حجم روابط به صورت زیر نوشته و ساده می شود:

معادلات حاکم، شبکه های مربوط به متغیرهای مختلف (شامل سرعت افقی، سرعت قائم و فشار) تعریف می شوند. برای هر حجم کنترل مقدار فلاکس سطحی، تنشهای سطحی و نیروهای حجمی بر اساس مقدار پارامترها محاسبه می گردد. سپس معادلات به دست آمده در قالب معادلات اندازه حرکت بیان می گردند. اغلب پارامترهای موجود در معادلات به دست آمده بر اساس مقدار پارامترها در زمان حال به دست می آیند. هرچند گزینه هائی نیز وجود دارد که در آن پارامترها به صورت ضمنی در معادلات به کار می رود. استفاده از مدلهای صریح روشی ساده و مؤثر است. اما به منظور حفظ پایداری مدل و کسب نتایج درست لازم است محدودیت هائی در میزان گام زمانی در محاسبات لحاظ گردد. یکی از استثنائات در استفاده از مدل صریح رفتار ترم فشار در معادلات حاکم است. ترم های فشار و سرعت در دو معادله مومنتم و پیوستگی با یکدیگر ترکیب می شود. استفاده از مدلهای نیمه ضمنی در روابط اختلاف محدود مربوط به معادلات حاکم، روشی مؤثر در حل جریانهای غیرقابل تراکم با سرعت کم است. در چنین شرایطی معادلات می بایست به روش تکراری حل شوند. در این کد از دو تکنیک استفاده شده است. روش اول روش SIMPLEST است که یک روش SOR است. در بعضی مسائل که نیاز به استفاده از روشی با درجه ضمنی بیشتر است، از روش دومی بنام SADI استفاده می شود. این روش با توجه به مشخصات مسئله در هر یک از جهات قابل استفاده است. در روش مورد استفاده در کد ترم های زمانی و مکانی با دقت مرتبه ۱ گسسته سازی می شوند. در صورت استفاده از شبکه متغیر لازم است احتیاط لازم جهت حفظ صحت مدل به کار برده شود. در این مدل امکان استفاده از دقت مرتبه ۲ نیز وجود دارد. در هر صورت، شرایط مرزی دارای حداقل دقت مرتبه ۱ هستند. به عنوان مثال در صورت استفاده از روش FAVOR در مدلسازی موانع،

سانتیمتر با موجسازی پیستونی در ابتدای آن که بر اساس تئوری موج سینوسی حرکت می کند استفاده گردید. موج سونامی با توجه به پریود زیادی که دارد یک موج بلند بوده لذا دریا حتی با عمق چند کیلومتر برای آن آب کم عمق محسوب می گردد. موج تولیدی توسط موجساز پیستونی نیز موج آب کم عمق است که شرایط مسئله را ارضا می کند. اما نکته مهم اینست که این پارو فقط یک حرکت رفت و برگشتی انجام میدهد. بنابراین نتیجه شبیه سازی یک تک موج است که در محل پارو تولید و به سمت ساحل حرکت می کند و تغییر شکل می دهد. روش معمول برای تولید موج بلند شامل تنظیم سرعت پیستون در زمان با سرعت افقی است که در این تحقیق از تئوری گالوین استفاده گردید.

ارتفاع موج سونامی از مهمترین مشخصه های آن است. در یک منطقه محلی بسته به توپوگرافی کف دریا، جهت گیری، سطح جز و مد و بزرگی موج سونامی میتواند بسیار متفاوت باشد [۶].

در این تحقیق به بررسی اثرات شیب ساحل که به کم شدن عمق آب منجر می گردد و کم شدن عرض منطقه ساحلی بر ارتفاع امواج سونامی پرداخته شده است. لذا سه مدل در نظر گرفته شد. در مدل A ساحل با شیب ۰.۳ در انتهای تانک مدل گردیده است. در مدل B یک کانال با عرض متغیر در ساحل در نظر گرفته شد. در مدل C اثر همزمان شیب و تغییرات عرض ساحل مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از یک شبکه ۲۳ × ۱۲۰ × ۹۳۶ که دارای تعداد کل ۲۵۸۳۳۶۰ نقطه است، استفاده شده است. به منظور بررسی شرایط موج در مدل، تعدادی نقاط مرجع در قبل از شروع شیب و روی آن انتخاب شده که موقعیت آنها برای سه مدل در اشکال ۲ تا ۴ مشاهده می شود:

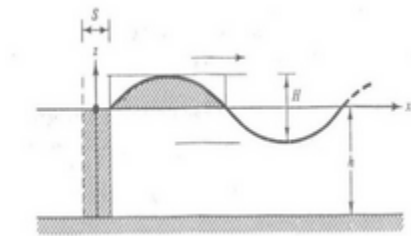
$$Sh = H/k = \frac{H}{\lambda} = \frac{H}{L/\lambda} = \frac{H}{\lambda} \frac{\lambda}{L} = \frac{H}{L} \quad (21)$$

$$\left(\frac{H}{S}\right)_{\text{piston}} = kh \quad (22)$$

اگر $S(z)$ میزان حرکت موجساز باشد، جابجایی افقی آن بارابطه زیر قابل بیان است:

$$x = \frac{S(z)}{\lambda} \sin \omega t \quad (23)$$

این رابطه در منطقه آب کم عمق صادق بوده و در آن فرکانس زاویه ای موجساز است. سطح موجساز با تابع زیر بیان می گردد:



شکل (۱) شمای موجساز پیستونی در آب کم عمق

$$F(x, z, t) = x - \frac{S(z)}{\lambda} \sin \omega t \quad (24)$$

تابع تغییر مکان پاروی موج و پروفیل سرعت بکار رفته برای پیستون در مدل های حاضر بصورت زیر است:

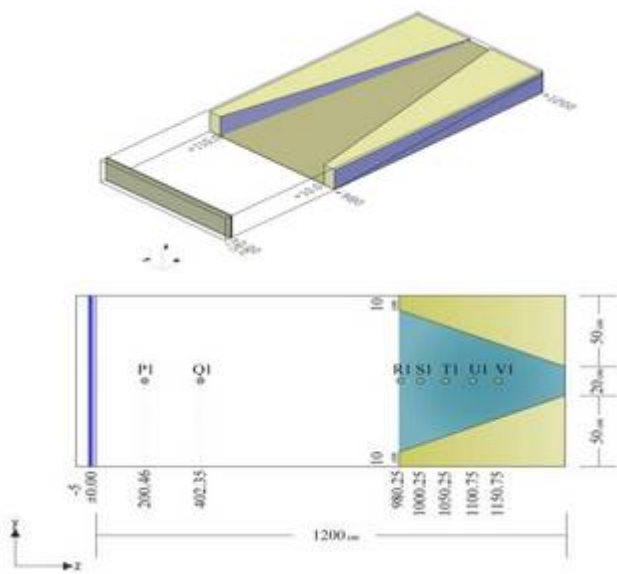
$$x(t) = \frac{+0.22544}{\lambda} \sin \frac{\pi}{4} t$$

$$v(t) = \frac{-0.22544}{\lambda} \left(\frac{\pi}{4}\right) \cos \frac{\pi}{4} t \quad (25)$$

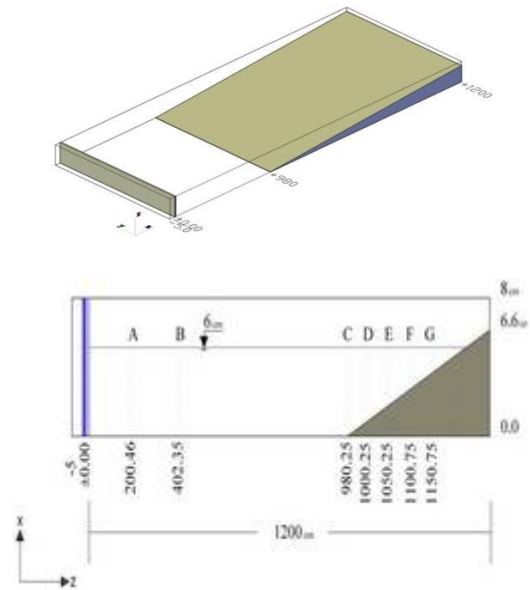
طبق این معادلات می توان موجهای خطی را با استفاده از روابط سرعت سینوسی که به پیستون اعمال می شود، در تانک موج ایجاد کرد.

۵- مدل سازی منطقه مورد مطالعه

حوزه ای با ابعاد تقریبی ۶۰ کیلومتر در امتداد عمود بر ساحل و ۶ کیلومتر در طول ساحل به عنوان حوزه انتخابی با مقیاس ۱/۵۰۰۰ مدل گردید. برای این منظور تانک موج عددی با ابعاد ۸ × ۱۲۰ × ۱۲۰۰



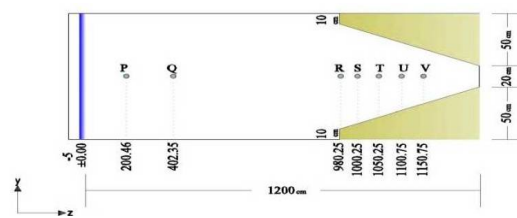
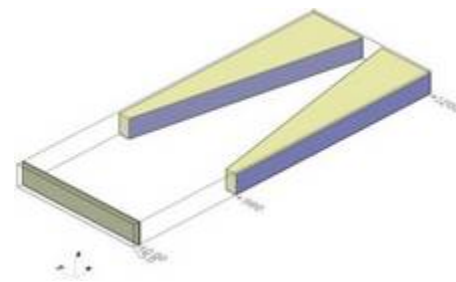
شکل (۴) تانک مدل C و موقعیت نقاط مرجع



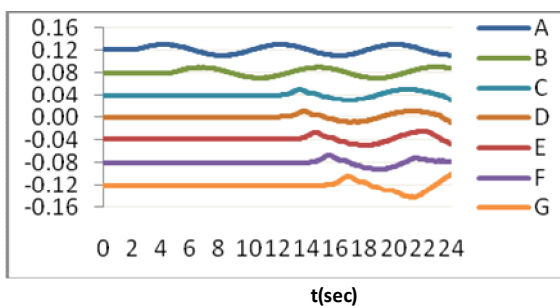
شکل (۲) تانک مدل A و موقعیت نقاط مرجع

۶- نتایج

شکل ۵ تاریخچه زمانی امواج را در نقاط مرجع مدل A نمایش می دهد. مشاهده می شود که ارتفاع موج در طول مسیر از آب عمیق به کم عمق و تحت اثر تغییر شیب ساحل بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در شکل ۶ تغییرات ارتفاع موج نسبت به عمق در این مدل دیده می شود. شکل ۷ نمودار تغییرات ارتفاع موج نسبت به عرض در مدل B و شکل ۸ همین تغییرات را نسبت به کاهش عمق و عرض ناحیه ساحلی نشان می دهد.



شکل (۳) تانک مدل B و موقعیت نقاط مرجع



شکل (۵) تاریخچه زمانی امواج برای نقاط مرجع مدل A

در این رابطه H ارتفاع موج، b عرض و d عمق آب بوده و زیر نویس صفر نشان دهنده مقادیر در مقطع مرجع (آب عمیق) است اشکال ۹ الی ۱۱ نتایج تغییرات ارتفاع موج بین مدل و تئوری آب کم عمق را با هم مقایسه می کنند. بر اساس این مقایسه خطایی حدود ۱.۵ درصد ۳ درصد و ۱.۳ درصد بین نتایج مدل‌های B ، A و C با رابطه گرین وجود دارد. بنابراین می توان گفت که سازگاری مناسبی بین نتایج مدل و تئوری وجود دارد.

۶- نتیجه گیری و بحث

انتشار امواج سونامی به سمت ساحل و اثر گذاری پدیده های مختلف در این ناحیه بر این امواج از اهمیت بالایی در مطالعات مهندسی سواحل و بنادر برخوردار است. با توجه به اهمیت تغییرات ارتفاعی موج سونامی بر اثر عوارض ساحلی و دور از ساحل از جمله شیب ساحل که می تواند رخدادی تهدید آمیز برای سواحل، ساکنان و تاسیسات واقع در آنها محسوب شود، در این مقاله تغییر ارتفاع یک موج سونامی بر اثر شیب ساحلی مورد شبیه سازی عددی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی مدلها به کمک عبور بهترین خط از میان دیتاها بصورت روابط ریاضی قابل بیان است. بنابراین نرخ افزایش ارتفاع موج با کاهش عمق آب و عرض ناحیه ساحلی با روابط زیر قابل بیان است:

تغییرات ارتفاعی موج نسبت به عمق آب در مدل A:

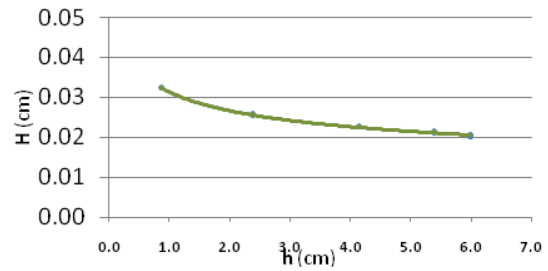
$$H = 0.031 h^{-0.24} \quad (27)$$

تغییرات ارتفاع موج نسبت به عرض در مدل B:

$$H = 0.28 b^{-0.61} \quad (28)$$

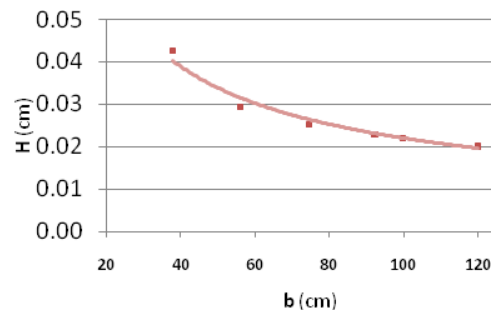
رابطه حاصل از تغییر نسبی ارتفاع بر حسب عرض در مدل C:

$$H = 297.0 B^{-0.67} h \quad (29)$$

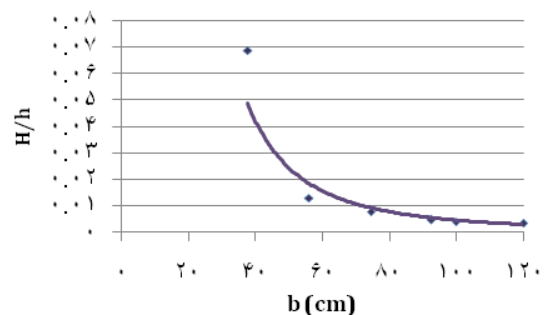


شکل (۶) نمودار تغییرات ارتفاع موج نسبت به عمق

در مدل A



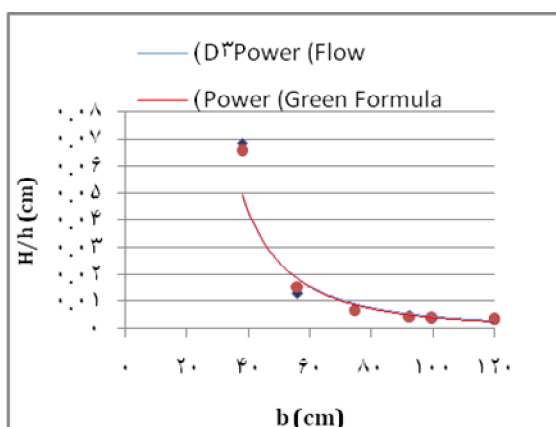
شکل (۷) نمودار تغییرات ارتفاع موج نسبت به عرض در مدل B



شکل (۸) نمودار تغییرات H/h نسبت به عرض در مدل C

جهت معتبر سازی مدل نتایج تغییر ارتفاع موج با رابطه گرین مقایسه گردیده اند. رابطه گرین به صورت زیر قابل بیان است [۴]:

$$H/H_0 = (b/b_0)^{1/2} (d_0/d)^{1/4} \quad (26)$$



شکل (۱۱) مقایسه نتایج مدل C و

تئوری آب کم عمق

بنابراین در این تحقیق مدلی عددی برای سونامی بر اساس حل عددی معادلات ناویر استوکس برای سیال لزج و اعمال شرایط مرزی مناسب ساخته شد. رابطه تحلیلی موجود قبلی یعنی مدل تحلیلی گرین برای حالت‌های بسیار ساده از جمله شیب کف و دیواره ثابت کاربرد دارد. بنابراین نوآوری مدل تهیه شده نسبت به مدل تحلیلی موجود اینست که این مدل قادر به پیشبینی تغییرات موج سونامی روی ساحل با هندسه پیچیده منجمله تغییرات غیر تدریجی و غیر خطی کف و دیواره ها نیز هست.

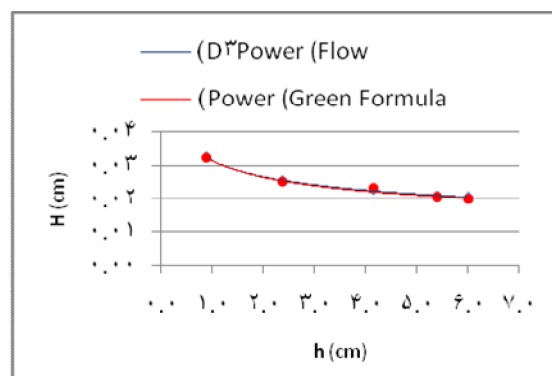
۷- مراجع

[1] NOAA, USGS, FEMA, NSF, Alaska, California, Hawaii, Oregon, and Washington. Designing for Tsunamis, Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards, (2001).

[2] Helal, M.A., Mehanna, M.S., "Tsunami From Nature To Physics", Chaos, Soliton And Fractals. 36, (2008), 787 - 796.

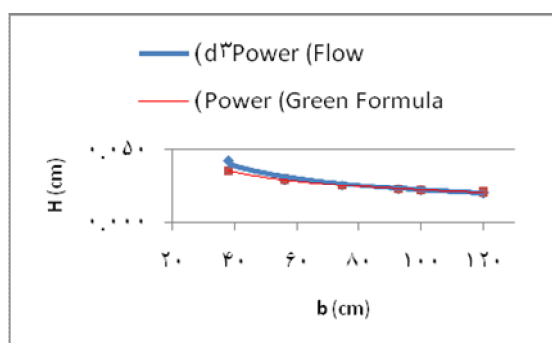
[3] SORENSEN R. M., Basic Coastal Engineering, Wiley, New York, 3rd Edition, (2006).

در مدل A در نقاط دور از سطح شیبدار تغییری در ارتفاع موج دیده نمی شود. پس از ورود موج به ناحیه شیبدار تغییر ناچیزی در ارتفاع مشاهده می شود که با پیشروی موج به سمت ساحل و در نتیجه کم شدن عمق آب مطابق رابطه ۲۷ افزایش در ارتفاع موج قابل مشاهده است. در مدل B نیز قبل از ورود موج به کانال تغییری در ارتفاع موج دیده نمی شود. ارتفاع موج پس از ورود آن به ناحیه کم عرض ساحلی بتدریج افزایش می یابد. رابطه ۲۸ بیانگر این حالت است. در مدل C که در ناحیه ساحلی اثر همزمان کم شدن عمق آب و عرض ساحل وجود دارد، افزایش ارتفاع موج با پیشروی به سمت ساحل با شدت بیشتری صورت می گیرد.



شکل (۹) مقایسه نتایج مدل A

و تئوری آب کم عمق



شکل (۱۰) مقایسه نتایج مدل B و تئوری آب کم عمق

[4] Dean R. G., Dalrymple R.A., "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", London: Word Scientific Publishing Co., (1993).

[5] New Mexico corporation, "FLOW 3D Manual", Ver 8.2, (2008).

[6] Zahibo N., Pelinovsky E., Talipova T., Kozelkov A., Kurkin A., "Analytical and Numerical Study of Nonlinear Effects at Tsunami Modeling", Applied Mathematics and Computation, 174, (2006), 795-809