



مرکز بررسی‌ها و مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



مدل عددی نیروی حاصل از امواج بر روی دیوارهای قائم با در نظر گرفتن اندرکنش موج و سازه

علی اصغر گلشنی
مرکز ملی اقیانوس شناسی

احسان ناصری
دانشگاه هرمزگان

agolshani@inco.ac.ir

nasseri.e@gmail.com

مقدمه

انتشار موج در بسیاری از موارد در مسائل مهندسی مورد توجه می‌باشد. به عنوان مثال در مهندسی زلزله شناخت کافی از جزئیات انتشار امواج دینامیکی زمین لرزه ضروری می‌نماید. از دیگر بارگذاریهای دینامیکی مورد توجه در سازه های ساحلی بارگذاری امواج دریا بر روی این سازه ها می‌باشد. تحقیقات بسیاری بر روی اندرکنش سیال-سازه تحت اثر امواج دینامیکی زلزله صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به تحقیقات شناخته شده وسترگارد^{۲۴} و شاران^{۱۹} اشاره کرد. همچنین روش سامرفیلد، روش المان‌های نامحدود، شرط مرزی شاران و برخی دیگر از تحلیل‌های ارائه شده همه سعی در برآورد شرایط مناسب در مدل سازی دامنه سیال و یا اثرات قطع دامنه سیال را دارند. یانگ^{۲۳}، سای^{۲۱} و همکاران تحلیلی در اندرکنش سد و سیال مخزن ارائه داده‌اند. با توجه به کفایت روش المان‌های مرزی در مدل سازی دامنه‌های نامحدود و با توجه به محدودیتهای موجود در روش المان‌های محدود، روش المان‌های مرزی در بارگذاری امواج دریا و مدل سازی دامنه سیال نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. میزوتانی^{۱۶} نیز اثر امواج دریا بر روی بستر سازه را با استفاده از روش المان‌های مرزی مورد بررسی قرار داده است. گلشنی^۵ نیز اندرکنش امواج و سازه های متقارن محوری را با استفاده از مرزهای گذرا در حوزه زمان بررسی کرده است.

خلاصه

در موج‌شکن ها یا دیوارهای قائم، بدون استهلاک قابل توجه انرژی، موج تابشی تقریباً به طور کامل منعکس می‌شود. در این حالت مقدار بار موج علاوه بر شرایط محیطی به واکنش‌های سازه و همچنین اثرات بازتابی از سازه نیز بستگی دارد. علت این امر آن است که مقدار بار وارده تابعی از عکس‌العمل‌ها و عکس‌العمل‌ها خود نیز مستقل از بار نمی‌باشند. در این مقاله رفتار هیدرودینامیکی سیال تحت اثر حملات امواج و برخورد آن به سازه‌های ساحلی مورد بررسی قرار گرفته است. برای ایجاد مدل از روش اجزای محدود استفاده شده است که در آن دامنه سیال به دو بخش حوزه دور و حوزه نزدیک تقسیم می‌شود. هرچند روش المان محدود قابلیت‌های فراوانی در مدل‌سازی مرزهای پیچیده و تحلیل‌های غیر خطی دارد اما با توجه به لزوم قطع دامنه مدل المان محدود، استفاده از یک مرز انتقالی که بتواند اثرات دامنه نامحدود سیال را برآورده کند ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین از محدودیتهای قابل توجه در روش المان محدود، مشکل موجود در برآوردن شرط انتشار امواج برای نقاط دور از جسم است که برای غلبه بر این مشکل در بخش حوزه دور برای ارضاء شرط میرایی تشعشع در مرز قطع شده از شرط بدست آمده برای مرزهای انتقالی در حوزه زمان استفاده می‌شود. شرط تشعشع بر اساس حل تحلیلی ارائه شده در دامنه حوزه دور برای سیال تراکم ناپذیر و نیز با توجه به وجود امواج سطحی حاصل شده است. معادله هیدرودینامیکی سیال با اعمال شرط تشعشع در مرزهای گذرا برای فشارهای گرهی تحلیل می‌شود. همچنین معادلات تجزیه شده المان محدود با استفاده از روشهای مستقیم انتگرال‌گیری مورد تحلیل قرار می‌گیرند. سرانجام توزیع فشارهای ناشی از حمله موج به سازه ساحلی در جلوی سازه و در دامنه مدل شده سیال مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: روش المان محدود، اندرکنش، مرز گذرا، دیوارهای قائم، شرط میرایی تشعشع.

معادلات اساسی

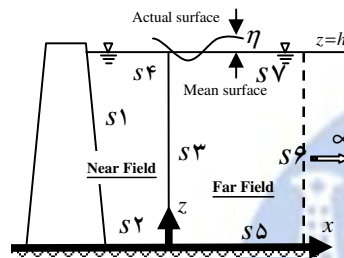
با استخراج فشار هیدرودینامیک از معادله حاکمه اولر، معادله حاکم بر این ترم از فشار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla P \quad (1)$$

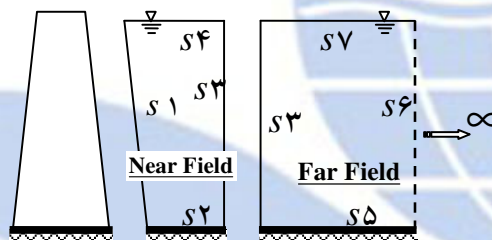
با فرض دامنه نوسان‌های کوچک و حذف اثرات ترم‌های جابه‌جایی و همچنین تعریف مدول حجمی الاستیک K به صورت نسبت فشار P به تغییرات درصدی حجم و نهایتاً فرض سیال تراکم ناپذیر، معادله حاکم همان معادله لاپلاس برای فشار خواهد بود.

مدل هیدرودینامیک سیال

در تحلیل سیستم اندرکنش سیال-سازه در اینجا هدف بررسی پاسخ سازه و بررسی تغییرات فشار در سیال ناشی از بارگذاریهای دینامیکی امواج می‌باشد. در این مطالعه مطابق شکل (۱) و (۲) حوزه سیال به دو بخش حوزه دور و حوزه نزدیک تقسیم شده است. هر شکل اختیاری در بخش بالادست سازه در بخش حوزه نزدیک سیال می‌تواند مفروض باشد. جهت بالادست حوزه دور در یک توصیف پیوسته زمانی و با گسسته سازی در عمق تحلیل می‌شود. علاوه بر این حوزه دور با یک عمق ثابت فرض می‌شود. بخش نامنظم حوزه نزدیک به روش المان‌های محدود مدل سازی شده و برای حوزه دور یک روش حل شبه تحلیلی در حوزه زمانی به دست می‌آید. تجزیه المانی حوزه نزدیک برای محاسبه مقادیر (P) گرهی با اعمال شرایط مرزی و اثرات بازتابی مدنظر قرار می‌گیرد. برای غلبه بر مشکل موجود در برآوردن شرط انتشار امواج برای نقاط دور از سازه از شرط بدست آمده برای مرزهای انتقالی در حوزه زمانی استفاده می‌شود.



شکل (۱) شمای کلی از سیستم دریا و سازه (دیوار ساحلی یا موج شکن)



شکل (۲) تقسیم سیال به دو بخش حوزه دور و نزدیک

بخش حوزه نزدیک سیال

با صرف نظر از لزجت درونی و فرض تراکم پذیری سیال و در دامنه نوسان‌های غیرچرخشی کوچک، معادله حاکم بر گسترش و توزیع فشار در سیال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla^2 P(x, z, t) = \frac{1}{c^2} \ddot{P}(x, z, t) \quad (2)$$

c سرعت انتشار موج در سیال است و برای سیال تراکم ناپذیر معادله به شکل زیر حاصل خواهد شد:

$$\nabla^2 P(x, z, t) = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

معادله فوق به معنای حذف تابعیت زمانی از فشارهای گرهی P نمی‌باشد. توزیع فشار هیدرودینامیک با حل معادله (۲) و بر اساس شرایط اولیه موجود و شرایط مرزی حاکم بر مسأله نیز به دست خواهد آمد. مطابق شکل (۲) خواهیم داشت:

۱. شرط مرزی در سطح $S1$ (فصل مشترک دامنه سیال با سازه) از برقراری تعادل دینامیکی المان سیال در مرز مشترک سیال و سازه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial P(x, z, t)}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_{n, S1}^t \quad (4)$$

۲. شرط مرزی در سطح $S2$ (بستر دریا) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial P(x, z, t)}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_{n_{s2}}^t \quad (5)$$

برای مرزهای صلب $\ddot{u}_n = 0$ و بنابراین $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ، که هر دو این شرایط باعث انعکاس موج بدون جذب انرژی خواهد شد. در مرز سیال و بستر

دریا با فرض صلیبیت بستر \ddot{u}_n یا شتاب ذرات در بستر صفر خواهد بود.

۳. شرط مرزی در سطح S_3 (فصل مشترک حوزه نزدیک و حوزه دور):

$$P(x, z, t) = P^*(x, z, t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial P(x, z, t)}{\partial n} = -\frac{\partial P^*(x, z, t)}{\partial n} \quad (7)$$

۴. شرط مرزی در سطح S_4 (سطح آزاد سیال):

با در نظر گرفتن امواج ثقلی سطحی و همچنین فرض مناسبی برای سطح آزاد سیال با نسبت η به سطح متوسط آزاد خواهیم داشت:

$$p = \rho g \eta \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (9)$$

با حذف η از دو معادله فوق شرط خطی شده امواج سطحی برای سطح آزاد سیال حاصل خواهد شد

$$\frac{\partial P(x, z, t)}{\partial n} = \frac{\partial P(x, z, t)}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial t^2} = -\frac{1}{g} \ddot{p} \quad (10)$$

شرایط اولیه یا سکون ابتدایی را نیز به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$P(x, z, t=0) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial P(x, z, t=0)}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

در معادلات فوق n بردار نرمال عمود بر مرز، ρ چگالی جرمی سیال، $\ddot{u}_{n_{s1}}^t$ شتاب کلی نرمال ذرات در سطح S_1 ، $\ddot{u}_{n_{s2}}^t$ شتاب کلی نرمال

ذرات در سطح S_2 ، P^* فشار هیدرودینامیک در فصل مشترک حوزه دور و حوزه نزدیک و $\frac{\partial P^*}{\partial n}$ مشتق نرمال فشار هیدرودینامیک در فصل

مشترک حوزه دور و حوزه نزدیک می‌باشند (علامت مثبت دلالت بر جهت خارج بر سطح حوزه دور دارد).

مدل المان محدود برای حوزه نزدیک سیال بر اساس گسسته‌سازی معادله (۲) به روش گالریکین به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$[\mathbf{G}]\{\ddot{\mathbf{P}}(t)\} + [\mathbf{H}]\{\mathbf{P}(t)\} = \{\mathbf{D}(t)\} \quad (13)$$

که در آن:

$$G_{ij} = \sum G_{ij}^e ; H_{ij} = \sum H_{ij}^e ; D_i(t) = \sum D_i^e(t) \quad (14)$$

ضرایب H_{ij}^e ، G_{ij}^e و $D_i^e(t)$ برای یک المان مشخص در سیال به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$H_{ij}^e = \int_{V_e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dV \quad (15)$$

$$G_{ij}^e = \frac{1}{c^2} \int_{V_e} N_i N_j dV \quad (16)$$

$$D_i^e(t) = \int_{S_e} N_i \frac{\partial P(t)}{\partial n} \quad (17)$$

که در روابط فوق V_e به دامنه درونی المان و S_e به مرزهای خارجی المان دلالت دارند، N_i نیز تابع شکل در گره i می‌باشد. با فرض سیال تراکم ناپذیر در محیط دریا $C = \infty$ بوده و در نتیجه ماتریس ضرایب $[G]$ صفر می‌شود. در نتیجه مدل المان محدود مساله به فرم زیر بیان خواهد شد:

$$[H]\{P(t)\} = \{D(t)\} \quad (18)$$

ماتریس $\{D(t)\}$ با توجه به شرایط مرزی دامنه سیال در حوزه نزدیک حاصل می‌شود. در مرز S_2 با توجه به فرض صلبیت بستر دریا $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ بوده و در نتیجه مقادیر $\{D(t)\}$ بر روی این مرز صفر خواهند بود. بدین ترتیب $\{D(t)\}$ را بر روی مرزهای S_1 ، S_3 و S_4 که دارای مقدار خواهد بود بررسی می‌کنیم:

$$\{D_{S_1}(t)\} = \sum \left\{ \int_{S_1} N_i \frac{\partial P(t)}{\partial n} ds \right\} = -\rho \sum \left\{ \int_{S_1} [N^{Fluid}]^T [N^{Structure}] ds \{\ddot{u}\} \right\} \quad (19)$$

$$= -\rho [S] \{\ddot{U}\}$$

ماتریس $[S]$ در رابطه فوق را ماتریس جفت شدگی اثرات متقابل سیال و سازه می‌نامیم که بردار نیروهای گرهی در المانهای سازه $\{f\}$ را به بردار فشارهای گرهی $\{P\}$ در المانهای سیال مربوط می‌کند. $\{\ddot{U}\}$ بردار شتابهای گرهی در المانهای سازه است.

$$[S]^T \{P\} = \{f\} \quad (20)$$

بر روی مرز S_4 ماتریس اثرات موج سطحی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\{D_{S_4}(t)\} = \sum \left\{ \int_{S_4} N_i \frac{\partial P(t)}{\partial n} ds \right\} = -\sum \left\{ \int_{S_4} \frac{1}{g} [N]^T [N] ds \{\dot{P}\}^e \right\} \quad (21)$$

$$= -\sum \left\{ [g] \{\dot{P}\}^e \right\} = -[G] \{\dot{P}\}^e$$

همانطور که از معادله (21) پیداست، در صورت وجود امواج ثقلی سطحی، $\{D_{S_4}(t)\}$ شامل مشتقات مرتبه دوم از فشارهای گرهی سطح می‌باشد که با انتقال آن به سمت چپ معادله، معادله (18) به فرم زیر تبدیل خواهد شد:

$$[G] \{\dot{P}(t)\} + [H] \{P(t)\} = -\rho [S] \{\ddot{U}\} + \{D_{S_3}(t)\} \quad (22)$$

بدین ترتیب در صورت وجود امواج ثقلی سطحی حتی اگر سیال تراکم پذیر در نظر گرفته شود، باز به علت شرط مرزی حاکم بر سطح، ماتریس $[G]$ حاوی درایه‌های غیر صفر خواهد بود.

بخش حوزه دور (دامنه نامحدود سیال)

برای مرز ۵۳ به دنبال تحلیلی هستیم تا بتوانیم اثرات ناشی از قطع سیال را بر روی این مرز اعمال کنیم. همچنین اثرات میرایی ارتعاش موج فشاری در مدل سازی دامنه نامحدود سیال در حوزه دور نیز مدنظر می باشد. اثرات قطع دامنه در محل مرز قطع شده باید به نحو صحیح و به گونه ای که بیانگر وجود دامنه نامحدود سیال باشد، اعمال شوند. بدین منظور به حل تحلیلی معادلات حاکمه در این حوزه با توجه به شرایط مرزی دامنه می-پردازیم. معادله حاکمه (معادله هلمهولتز) و شرایط مرزی دامنه سیال، مطابق شکل (۲) در حوزه دور سیال و برای سیال تراکم ناپذیر به صورت زیر بیان می شوند.

$$\nabla^2 P(x, z, t) = 0$$

(۲۳) برای سیال تراکم ناپذیر

شرایط مرزی در این حوزه نیز به صورت زیر بیان می شوند:

۱. شرط مرزی در سطح ۵۳ :

$$P(x, z, t) = P^*(x, z, t)$$

(۲۴)

$$\frac{\partial P(x, z, t)}{\partial n} = -\frac{\partial P^*(x, z, t)}{\partial n}$$

(۲۵)

۲. شرط مرزی در سطح ۵۵ (شرط مرزی در بستر حوزه دور):

$$\frac{\partial P(x, z, t)}{\partial n} = 0$$

(۲۶)

۳. شرط مرزی در سطح ۵۶ (مرز ۵۶ به سمت بی نهایت میل می کند):

$$P(x = \infty, z, t) = 0$$

(۲۷)

در واقع شرط فوق بیانگر آن است که امواج منتشره از سازه در انتشار به سمت مرز ۵۶ میرا شوند.

۴. شرط مرزی در سطح ۵۷ (سطح آزاد سیال با توجه به وجود امواج سطحی):

$$\frac{\partial P(x, z, t)}{\partial n} = \frac{\partial P(x, z, t)}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial t^2}$$

(۲۸)

نهایتاً با فرض سیال در حال سکون قبل از ورود موج، شرایط اولیه به صورت زیر بیان می شود:

$$P(x, z, t = 0) = 0$$

(۲۹)

$$\frac{\partial P(x, z, t = 0)}{\partial t} = 0$$

(۳۰)

تحلیل دامنه زمانی معادلات حوزه دور

برای حل معادلات لاپلاس با شرایط مرزی فوق، با توجه به اینکه می دانیم به دنبال یافتن جواب و مشتقات زمانی آن بر روی مرز برش خورده (در یک x ثابت) هستیم، تابعیت زمانی جواب P را در بخش $P(z)$ لحاظ می کنیم.

$$P(x, z, t) = P(x)P(z, t)$$

(۳۱)

که در آن $P(x)$ و $P(z,t)$ معادلات زیر را ارضاء می‌کنند.

$$\frac{\partial^2 P(z,t)}{\partial z^2} + \lambda^2 P(z,t) = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial^2 P(x)}{\partial x^2} - \lambda^2 P(x) = 0 \quad (32)$$

جواب معادله $P(x)$ که شرایط مرزی معادله (32) را ارضاء می‌کند به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P(x) = B e^{-\lambda x} \quad (33)$$

همچنین معادله $P(z,t)$ که شرایط مرزی بستر را ارضاء می‌کند، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P(z,t) = A(t) \cos(\lambda z) \quad (34)$$

در صورت صرفنظر کردن از امواج سطحی با فرض $A=1$ تعداد جواب نامتناهی $P_m(z)$ حاصل می‌شود. (h عمق آب می‌باشد).

$$\phi_m = P_m(z,t) = \cos(\lambda_m z) ; \quad \lambda_m = \frac{(2m-1)\pi}{2h} ; \quad m=1,2,\dots,M \quad (35)$$

جواب کلی، ترکیبی خطی از جوابها با ضرایب زمانی ثابت $a(t)$ خواهد بود و $\{P(t)\}$ بردار جواب $P(z,t)$ حاصل از ترکیب خطی جوابها می‌باشد.

$$\{P(t)\} = \sum_{m=1}^M a_m(t) \cos(\lambda_m z) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \lambda \cos \phi_m \quad (36)$$

در نتیجه بردار جواب $\{P(x,t)\}$ به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$\{P(x,t)\} = B \sum_{m=1}^M a_m(t) \cos(\lambda_m z) e^{-\lambda_m x} = \sum_{m=1}^M c_m(t) \cos(\lambda_m z) e^{-\lambda_m x} ; \quad \lambda_m = \frac{(2m-1)\pi}{2h} \quad (37)$$

با اعمال شرایط موج سطحی در معادله (28) جواب های معادله $P(x,z,t) = A(t) \cos(\lambda z) B e^{-\lambda x}$ به صورت زیر بیان خواهند شد:

$$A(t) = e^{i\Omega t} \quad (38)$$

$$\Omega^2 = -g \lambda \tan(\lambda h) \rightarrow \frac{\Omega^2}{g} + \lambda \tan(\lambda h) = 0 \quad (39)$$

از آنجا که Ω به عنوان ضریب زمان در جواب $A(t)$ وارد شده است و همچنین با توجه به قضیه یکتایی جوابها بنابراین ماهیت فرکانسی دارد. از

طرفی معادله (9) بیانگر این است که فرکانس ارتعاشی موج سطحی η و همچنین فرکانس نوسانات موج فشاری P در مدل باید با یکدیگر متنظر

باشند. جواب کلی $P(x,z,t)$ بر اساس یک ترکیب خطی از کلیه جوابهای حاصله بر اساس λ_m های مختلف می‌تواند به صورت زیر بیان شود. که

λ_m های مختلف جوابهای معادله (39) می‌باشند. λ_m ها را ویژه مقدارهای به دست آمده بر اساس شرایط مرزی، برای ویژه تابع

$P(x,z,t) = A(t) \cos(\lambda z) B e^{-\lambda x}$ می‌نامند.

$$\{P(x,t)\} = \sum_{m=1}^M a_m(t) A(t) \cos(\lambda_m z) B e^{-\lambda_m x} = \sum_{m=1}^M c_m(t) \phi_m e^{-\lambda_m x} \quad (40)$$

که $\phi_m = A(t) \cos(\lambda_m z)$ بردارهای ویژه حاصله برای معادله حاکم $P(z,t)$ می‌باشند. با جایگذاری رابطه (37) در (34) خواهیم داشت:

$$\ddot{P}(z,t) = -\Omega^2 e^{i\Omega t} \cos(\lambda z) = -\Omega^2 P(z,t) \quad (41)$$

به منظور تعمیم فرمولاسیون حوزه دور و انطباق با نتایج حوزه نزدیک معادله دیفرانسیل $\frac{\partial^2 P(z,t)}{\partial z^2} + \lambda^2 P(z,t) = 0$ را در مدل اجزاء محدود تجزیه

کرده و با اعمال شرایط مرزی در این امتداد، جوابها را بر روی گره‌های مرز مشترک حوزه دور و حوزه نزدیک به دست می‌آوریم. مدل المان محدود در امتداد هر مرز دلخواه Γ_z در امتداد Z در حوزه دور به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{1}{g}([\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}])_{z=h} \{\ddot{\mathbf{P}}(t)\}_{z=h} + [\mathbf{H}]_{\Gamma_z} \{\mathbf{P}(t)\}_{\Gamma_z} = \lambda^2 [\mathbf{G}]_{\Gamma_z} \{\mathbf{P}(t)\}_{\Gamma_z} \quad (42)$$

که در رابطه فوق:

$$H_{ij}^e = \int_{\Gamma_z^e} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dz \quad ; \quad G_{ij}^e = \int_{\Gamma_z^e} N_i N_j dz \quad (43)$$

در $z = h$ جمله اول در رابطه (42) می‌تواند به صورت $-\frac{\Omega^2}{g} \{P(t)\}_{z=h}$ تغییر یابد و در نتیجه ضرایب آن به ماتریس $[\mathbf{H}]_{\Gamma_z}$ اضافه خواهند شد. لذا خواهیم داشت:

$$[\mathbf{H}]_{\Gamma_z}^* \{\mathbf{P}(t)\}_{\Gamma_z} = \lambda^2 [\mathbf{G}]_{\Gamma_z} \{\mathbf{P}(t)\}_{\Gamma_z} \quad (44)$$

که $[\mathbf{H}]_{\Gamma_z}^*$ همان ماتریس $[\mathbf{H}]_{\Gamma_z}$ به علاوه اثرات ناشی از امواج سطحی می‌باشد. بنابراین جواب $\{\mathbf{P}(t)\}_{\Gamma_z}$ در مساله ویژه مقدار فوق می‌تواند به صورت یک ترکیب خطی از M ترم اولیه بیان شود.

$$\{\mathbf{P}(t)\} = \sum_{m=1}^M a_m(t) \phi_m \quad (45)$$

که در آن λ_m ها، m امین مقدار ویژه و ϕ_m ها، m امین بردار ویژه معادله (44) می‌باشند. بنابراین بردار جواب کلی فشارهای گرهی هیدرودینامیک $P(x, z, t)$ در هر امتداد Z و در فاصله x از مرز مشترک حوزه دور و حوزه نزدیک می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

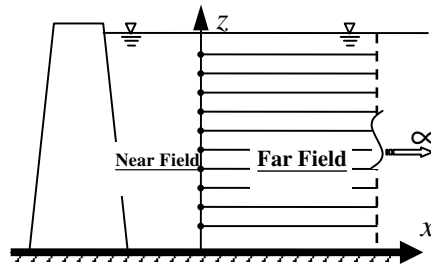
$$\{\mathbf{P}(x, t)\} = \sum_{m=1}^M a_m(t) e^{-\lambda_m x} \phi_m \quad (46)$$

معادله (46) و مشتقات فشارهای هیدرودینامیکی فوق را می‌توان به فرم ماتریسی به صورت روابط زیر بیان کرد:

$$\{\mathbf{P}(x, t)\} = [\Phi][\mathbf{e}(x)]\{\mathbf{a}(t)\} \quad (47)$$

$$\left\{ \frac{\partial \mathbf{P}(x, t)}{\partial x} \right\} = -[\Phi][\lambda][\mathbf{e}(x)]\{\mathbf{a}(t)\} \quad (48)$$

که در روابط فوق $[\Phi]$ ماتریس مودهای شکلی در امتداد سطح S^3 ، $[\lambda]$ ماتریس قطری $M \times M$ با درایه‌های برابر با λ_m ها و $[\mathbf{e}(x)]$ نیز ماتریس $M \times M$ قطری با m امین درایه‌های قطری $e^{-\lambda_m x}$ می‌باشند. همچنین $\{\mathbf{a}(t)\}$ نیز بردار ضرایب مجهولات می‌باشد. این ضرایب مجهول با تحمیل شرایط مرزی در فصل مشترک حوزه دور و نزدیک می‌توانند حاصل شوند. روابط فوق بیانگر آن هستند که دامنه سیال در بخش حوزه دور به لایه‌هایی با طول نامحدود تجزیه شده است و این لایه‌ها توسط خطوط گره‌ای در امتداد حوزه دور از یکدیگر مجزا می‌شوند (شکل ۳). در واقع تغییرات m امین خط گرهی در جهت x ، توسط m امین ترم تابع $P(x) = \exp(-\lambda_m x)$ بیان می‌شود.



شکل (۳) لایه‌های تجزیه شده در بخش حوزه دور

فشارهای هیدوردینامیک و مشتقات نرمال آنها در فصل مشترک حوزه دور و حوزه نزدیک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\{\mathbf{P}_{S3}(t)\} = \{\mathbf{P}(x=0, t)\} = [\Phi]\{\mathbf{a}(t)\} \quad (49)$$

$$\left\{ \frac{\partial \mathbf{P}_{S3}(t)}{\partial n} \right\} = \left\{ \frac{\partial \mathbf{P}(x=0, t)}{\partial x} \right\} = -[\Phi][\lambda]\{\mathbf{a}(t)\} \quad (50)$$

با توجه به معادله (۱۷)، شرایط مرزی در مرز S^3 به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\{\mathbf{D}_{S3}(t)\} = \int_{S3} [\mathbf{N}_{S3}]^T \frac{\partial P_{S3}(t)}{\partial n} ds = \int_{S3} [\mathbf{N}_{S3}]^T [\mathbf{N}_{S3}] ds \left\{ \frac{\partial \mathbf{P}_{S3}}{\partial n} \right\} \quad (51)$$

$$[\mathbf{G}]_{\Gamma_z} = [\mathbf{G}_{S3}] = \int_{S3} [\mathbf{N}_{S3}]^T [\mathbf{N}_{S3}] ds \quad (52)$$

با ادغام دو رابطه فوق و جایگذاری مقادیر مشتقات فشارهای گرهی از رابطه (۵۰) داریم:

$$\{\mathbf{D}_{S3}(t)\} = -[\mathbf{G}_{S3}][\Phi][\lambda]\{\mathbf{a}(t)\} \quad (53)$$

با توجه به تعامد مودها نسبت به $[\mathbf{G}_{S3}]$ و حذف بردار ضرایب مجهولات $\{\mathbf{a}(t)\}$ بین معادلات (۴۷) و (۵۳)، تحلیل فشار هیدوردینامیکی در بخش حوزه دور می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\{\mathbf{P}(x, t)\} = -[\Phi][\mathbf{e}(x)][\lambda]^{-1}[\Phi]^T \{\mathbf{D}_{S3}(t)\} \quad (54)$$

در نتیجه فشار هیدوردینامیکی $\{P_{S3}(t)\}$ در مرز برش خورده به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\{\mathbf{P}_{S3}(t)\} = -[\Phi][\mathbf{I}][\lambda]^{-1}[\Phi]^T \{\mathbf{D}_{S3}(t)\} \quad (55)$$

با فرض $[\mathbf{R}] = [\Phi][\mathbf{I}][\lambda]^{-1}[\Phi]^T$ خواهیم داشت:

$$\{\mathbf{D}_{S3}(t)\} = -[\mathbf{R}]^{-1}\{\mathbf{P}_{S3}(t)\} \quad (56)$$

با توجه به اینکه $\{\mathbf{D}_{S3}(t)\}$ بر فشارهای گرهی مرز مشترک دو حوزه اثر می‌کند، لذا به ماتریس $[\mathbf{H}]$ اضافه شده و در نتیجه معادله (۲۲) به فرم زیر بیان شود.

$$[\mathbf{G}]\{\ddot{\mathbf{P}}(t)\} + [\mathbf{H} + \mathbf{R}^{-1}]\{\mathbf{P}(t)\} = -\rho[\mathbf{S}]\{\ddot{\mathbf{U}}\} \quad (57)$$

لذا از این پس ماتریس $[\mathbf{H}]$ شامل اثرات $\{\mathbf{D}_{S3}(t)\}$ نیز می‌باشد. نهایتاً با توجه به فرضیات مسأله و با جداسازی مرزها و همچنین با به هم پیوستن گره‌های حوزه نزدیک با خطوط گرهی حوزه دور در فصل مشترک آنها، سیستم معادلات کل حوزه سیال در فرم جداسازی شده مرزها به صورت شماتیک می‌تواند به فرم زیر بیان شود، که زیرنویس‌های ۱ تا ۴ به ترتیب بیانگر مرزهای S^1 ، S^2 ، S^3 و S^4 می‌باشند:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{P}_1 \\ \ddot{P}_2 \\ \ddot{P}_3 \\ \ddot{P}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} + R^{-1} & H_{34} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\rho[\mathbf{S}]\{\ddot{\mathbf{U}}\} \\ \{D_{S2}(t)=0\} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (58)$$

$[G_{44}]$ ماتریس اثرات امواج سطحی و $\{\ddot{\mathbf{U}}\}$ بردار شتاب‌های گرهی سازه بوده که در صورت مدل‌سازی دینامیکی سازه وارد مدل تحلیل می‌شوند. در این صورت دستگاه معادلات سیستم کوپل به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{M}] & 0 \\ [\rho\mathbf{S}] & [\mathbf{G}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{\mathbf{U}}\} \\ \{\ddot{\mathbf{P}}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{\mathbf{U}}\} \\ \{\dot{\mathbf{P}}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}] & -[\mathbf{S}]^T \\ 0 & [\mathbf{H}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{U}\} \\ \{\mathbf{P}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{R}^{ext}\} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (59)$$

که در رابطه فوق $\{\mathbf{R}^{ext}\}$ بردار نیروهای خارجی (مآزاد بر بارگذاری ناشی از فشار سیال بر سطح سازه) اعمالی بر سازه می‌باشد. ماتریس $[\mathbf{M}]$ ، $[\mathbf{C}]$ و $[\mathbf{K}]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی کل در سازه هستند.

بارگذاری موج

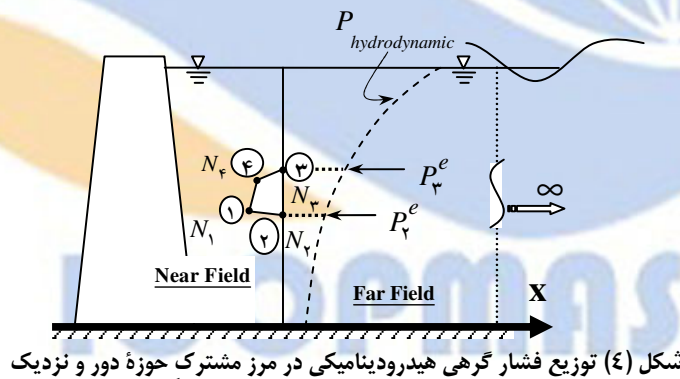
با به کارگیری پتانسیل سرعت، توزیع فشار هیدرودینامیک در ستون آب ناشی از عبور موج حاصل می‌شود. در اثر عبور موج از سطح آب و گذر از مرز مشترک حوزه دور و نزدیک این توزیع فشار هیدرودینامیکی در ستون آب توزیع می‌شود. از طرف دیگر در مدل المان محدود در بخش حوزه نزدیک، این توزیع فشار تبدیل به فشارهای گرهی می‌شود و به عنوان بارگذاری موج بر مدل اثر می‌کند. بنابراین بردار فشار در هر گام زمانی به صورت $\{\mathbf{P} + \mathbf{P}_{far}\}$ بیان می‌شود که \mathbf{P} دربرگیرنده مجموع اثرات توزیع فشار موج در درجات آزادی گرهی در گامهای زمانی گذشته خواهد بود و بردار \mathbf{P}_{far} فقط شامل بارگذاری موج در گام زمانی مورد بحث خواهد بود.

$$\{\mathbf{P}_{far}\} = \sum \int [\mathbf{N}]^T P_{hydrodynamic} t dz = \sum \left(\int [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] t dz \{\mathbf{P}\}^e \right) \quad (60)$$

بنابراین از آنجا که تنها بارگذاری اعمالی بر سازه، فشار سیال (موج) می‌باشد، $\{\mathbf{R}^{ext}\}$ برابر با صفر شده و با توجه به رابطه (59) سیستم معادلات کوپل سیال و سازه در گام زمانی $(i+1)$ به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{U}}\}_{i+1} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{U}}\}_{i+1} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\}_{i+1} = [\mathbf{S}]^T \{\mathbf{P}\}_{i+1} + [\mathbf{S}]^T \{\mathbf{P}_{far}\}_{i+1} \quad (61)$$

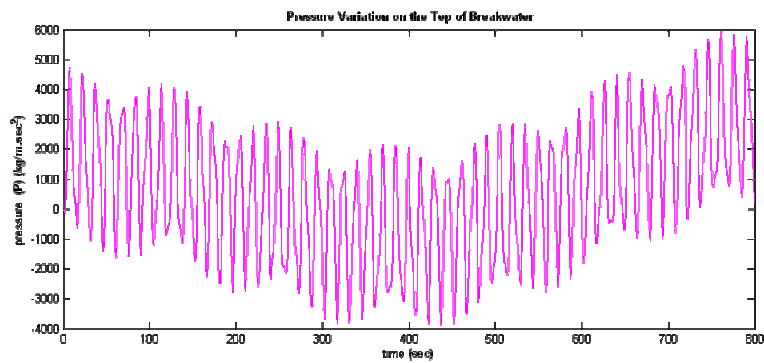
$$[\mathbf{G}]\{\ddot{\mathbf{P}}\}_{i+1} + [\mathbf{H}]\{\mathbf{P}\}_{i+1} = -\rho[\mathbf{S}]\{\ddot{\mathbf{U}}\}_{i+1} - [\mathbf{H}]\{\mathbf{P}_{far}\}_{i+1} \quad (62)$$



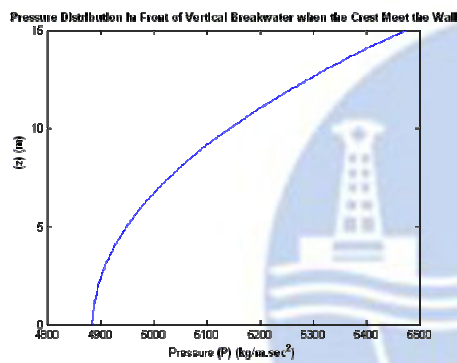
نتیجه و عملکرد مدل

فشارهای هیدرودینامیکی P_1 تا P_4 با حل معادله دینامیکی (58) به روش نیومارک حاصل می‌شوند. نتایج مدل در برخورد موج خطی به دیوار قائم بیانگر تشکیل امواج ایستا می‌باشد. توزیع فشار در جلو دیوار در حالات مختلف برخورد نیز بدست می‌آید. در یک مثال عددی رفتار هیدرودینامیک سیال و اثرات حمله موج به سازه‌ای به ارتفاع ۱۵ متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ارتفاع موج وارده به مدل ۴ متر و طول موج محاسبه شده ۸۱٫۷۹ متر خواهد بود.

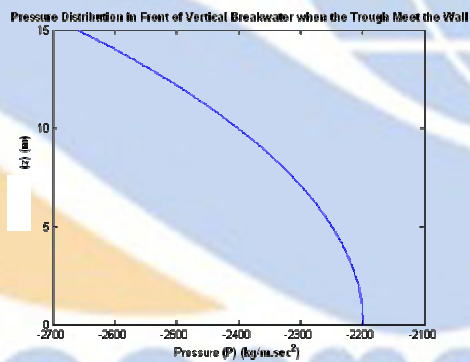
نتایج توزیع فشارهای حاصل از اجرای برنامه بر روی دیوار و در دامنه سیال در نمودارهای زیر مورد بررسی قرار گرفته است.



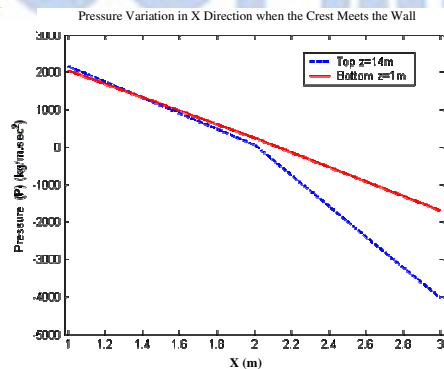
شکل (۵) تغییرات فشار و شماتیک امواج ایستا در بالای موج شکن قائم تحت بارگذاری موج اعمالی



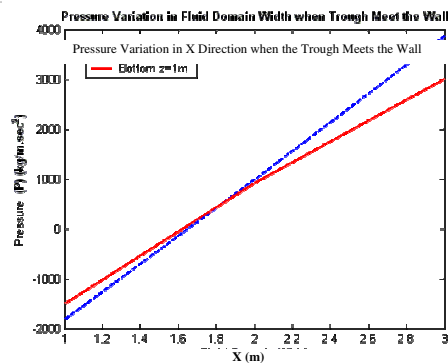
شکل (۶) توزیع فشار در جلوی دیواره قائم در هنگام برخورد تاج موج



شکل (۷) توزیع فشار در جلوی دیواره قائم در هنگام برخورد ناو موج (مکش یا فشار منفی)

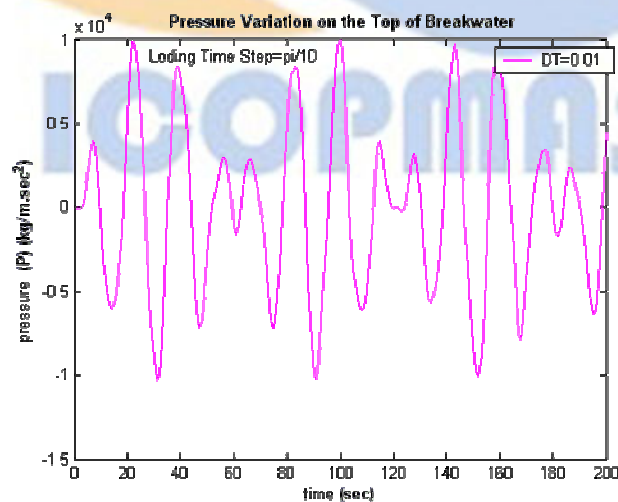


شکل (۸) تغییرات فشار در جهت طولی دامنه سیال حوزه نزدیک در لحظه برخورد تاج به دیواره



شکل (۹) تغییرات فشار در جهت طولی دامنه سیال حوزه نزدیک در لحظه برخورد ناو موج به دیواره

تا کنون روابط متفاوتی جهت بررسی توزیع فشار موج بر سازه ارائه شده است که نتایج بسیار متفاوتی را نیز ارائه می‌دهند. در این میان می‌توان به روابط هیریو، گودا، سین فلو و برخی دیگر از روابط در آیین نامه ها و استانداردها اشاره کرد. این روابط همچنین از ارتفاع‌های متفاوت موج در روابط خود استفاده می‌کنند. با توجه به اینکه در ارائه اکثر روابط نیز مشاهدات میدانی و یا آزمایشگاهی نقش داشته‌اند اما نتایج و توزیع‌های فشار متفاوتی برای موج برخوردی ارائه شده است. در ارائه این روابط طراحی پارامترهایی چون تاثیر لایه آر مور پی توده سنگی، تراز تاج موج شکن تا سطح آب، سر ریزی موج، لغزش موج شکن، زاویه تابش و نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است، که بررسی آنها در مدل عددی به سادگی میسر نمی‌باشد. در بررسی نتایج توزیع فشارها در این مدل عددی تشکیل امواج ایستا در شکل (۵) به صورت شماتیک قابل مشاهده است. همچنین توزیع ارتفاعی فشار در حالت برخورد تاج موج (شکل (۶)) و ناو موج (شکل (۷)) نیز در این مدل بررسی شده است. در حالت برخورد ناو همانطور که انتظار می‌رود فشارهای منفی و یا مکش به سمت دریا دیده می‌شود. تغییرات فشار در جهت طولی (X) در هر دو حالت برخورد تاج و ناو موج نیز تغییرات قابل انتظاری نشان می‌دهد. به عنوان مثال در لحظه برخورد ناو موج انتظار می‌رود که در جلو دیوار شاهد کمترین فشار (مکش) باشیم و هرچه در امتداد طولی دور می‌شویم فشارها بیشتر شود. علاوه بر بارگذاری موج خطی ابری که نتایج آن در فوق ارائه شد، مدل تحت بارگذاری موجی نا منظم نیز مورد بررسی قرار گرفت. این موج بدین صورت تولید شد که گام زمانی تحلیل در روش نیومارک، متفاوت با گام زمانی تغییرات بارگذاری در مدل در نظر گرفته شد.



شکل (۱۰) تغییرات فشار در بالای موج شکن قائم تحت بارگذاری موج نامنظم

شایان ذکر است که تغییرات بارگذاری در گام‌های زمانی بر اساس موج خطی ولی طول گام‌هایی متفاوت با گام زمانی در روش تحلیل نیومارک حاصل شده است. لذا موج حاصل نامنظم خواهد بود. نتایج تغییرات فشارهای حاصل از اجرای این مدل در جلو دیوار قائم نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است. موج ایستا وقتی به وجود می‌آید که دو موج پیشرونده با پرپود و ارتفاع مساوی در خلاف جهت یکدیگر منتشر شوند. با توجه به اینکه موج اتفاقی مدل شده دارای پرپود مشخصی نبوده و بر اساس تغییرات در گام زمانی بارگذاری و روش تحلیل حاصل شده لذا در این حالت به علت اینکه شکل موج کاملاً نامشخص و اتفاقی است بررسی تشکیل امواج ایستا به سادگی امکان پذیر نیست. اما نتایج مدل در ارتفاع مدل نشان دهنده کاهش فشارها در عمق می‌باشد.

مراجع:

۱. جورج آرفکن، روشهای ریاضی در فیزیک، جلد اول، ترجمه اعظم پورقازی، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۱.
۲. وحید چگینی، نظریه‌های موج، شرکت جهاد تحقیقات آب و آبخیزداری، ۱۳۷۷.
۳. وحید چگینی، راهنمای طراحی موج‌شکن‌ها، جلد اول، شرکت جهاد تحقیقات آب و آبخیزداری، ۱۳۷۷.
۴. اروین کرویت سیگ، ریاضیات مهندسی پیشرفته، ترجمه عبدالله شیدفر، حسین فرمان، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۲.
۵. علی اصغر گلشنی، اندرکنش امواج دریا با سازه‌های متقارن محوری در حوزه زمانی با استفاده از مرزهای گذرا، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۷.
۶. ویلیام ویور، پاول جانسون، اجزای محدود برای تحلیل سازه‌ها، تدوین و ترجمه شاپور طاحونی، انتشارات علم و ادب، ۱۳۷۵.
7. K.J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice-Hall of India, 1996.
8. A. Chorin, J.E. Marsden, A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics, 3rd ed., Springer-Verlag Publishing Company, Inc., New York, 1992.
9. R.D. Cook, D.S. Malkus, M.E. Plesha, R.J. Witt, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
10. R.G. Dean, R.A. Dalrymple, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World Scientific, Singapore, 1991.
11. L. Debnath, Nonlinear Water Wave, Academic Press, Inc., Boston, 1994.
12. M. Ghaemian, A. Ghobarah, Staggered Solution Schemes for Dam-Reservoir Interaction, Journal of Fluid and Structure, Vol. 12, 1998, pp. 933-948.
13. Y. Goda, Random Seas and Design of Maritime Structure, World Scientific, Singapore, 2000.
14. J.W. Kamphuis, Introduction to Coastal Engineering and Management, World Scientific, Singapore, 2000.
15. Y.W. Kwon, H. Bang, The Finite Element Method Using MATLAB. CRC Press, Boca Raton, 2000.
16. N. Mizutani, A.M. Mostafa, Dynamic Interaction of Nonlinear Waves and a Seawall over Sand Seabed. Int. Journal of Offshore and Polar Engineering. Vol. 8, No. 1, March 1998, pp. 30-38.
17. N.M. Newmark, A Method of Computation for Structural Dynamics, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 85, 1959, pp. 67-94.
18. P. Seshu, Textbook of Finite Element Analysis, Prentice-Hall of India, 2005.
19. S.K. Sharan, Time-Domain Analysis of Infinite Fluid Vibration, International Journal for Numerical Method in Engineering, Vol. 24, 1987, pp. 945-958.
20. R.M. Sorensen, Basic Coastal Engineering, 2nd ed., Chapman & Hall, New York, 1997.
21. C.S. Tsai, G.C. Lee, R.L. Ketter, A Semi-Analytical Method for Time-Domain Analysis as Dam-Reservoir Interactions. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 29, 1990, pp. 913-933.
22. H.M. Westergaard, Water Pressure on Dams During Earthquakes. Trans. ASCE, 98, 418-413 (1993).
23. R. Yang, C.S. Tsai, G.C. Lee, Explicit Time-Domain Transmitting Boundary for Dam-Reservoir Interaction Analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 36, 1993, pp. 1789-1804.

Numerical Model for Wave Force on Vertical Walls with Regard to Wave-Structure Interaction

*E. Naseri,
A. Golshani*

Abstract

Dissipation of waves is an important matter in engineering discussions. In seismic discussions, for instance, having insight into the mechanism by which waves dissipate is inevitable. Wave loading on structures is another important issue. Many studies have already been conducted on fluid-structure interactions as a result of seismic dynamic waves. Summerfield method, which is based on finite element, is a typical innovation in this regard. Given the capability of finite element method and also the disadvantages of it, this method has been focused in sea-wave loading and in modeling fluid range. In this article, researcher studied wave- structure interactions using boundary conditions in specified time span. It is recommended that this problem be paid serious attention by authors in order to conduct studies that can help revealing hidden aspects and introduce innovative models.

Keywords: *dissipation of wave, engineering discussions, seismic, fluid-structure interaction*