آنالیزدینامیکی رفتارمتقابل آب وسازه‌های دریائی

حسین میرمحمدصادقی* ـ امیرمسعودکی نیـــا**

چکیـــده

برای آنالیزتقریبی ارتعاش پایه ها درآب مدل خطی ســـاده از نوع اجزاء محدود ارائه میشود. مشخصات این مدل با مساوی‌قراردادن کارنیروهای غیرخطی ارتعاش پایه درآب وکارنیروهای اســتهلاکـــی در مدل خطی نظیربدست می‌آیند. دراین مقاله مشخصات مدل خطی معـادل به‌صورت روابط به فرم بسته ارائه شده ودقت آن موردارزیابی قـرار می‌گیرد. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهدکه به‌کمک مدل پیشنهادی تاثیر آب درارتعاش پایه را می‌توان باافزایش جرم پایه وافزایش استهلاک ارتعاشات درنظرگرفت.

مقدمه

دردودههٔ اخیرمطالعات وتحقیقات دامنه‌داری درموردتحلیـــل دینامیکی سازه‌های دریایی انجام شده‌است. اغلب این مطالعات در ارتباط باشناخت وبررسی نیروهای ناشی ازامواج، تعیین ضرائـــب هیدرودینامیکی وروشهای مناسب برای حل معادلات غیرخطی ارتعـــاش سازه‌های دریایی بوده‌است.

بیان ریاضی حرکت دوبعدی امواج سطحی برای اولین بارتوسط ایری [۱] درسال ۱۸۴۵ ارائه‌شد. این تئوری موج به‌تئوری مـــوج سینوسی یاموج ایری معروف‌است. درهمین رابطه استوکس[۲] مسئله رابا وسعت بیشتری موردبررسی قرارداده وتئوریهای موج رابه‌صـــورت

---

* مربی دانشکده فنی وزارت نیرو

** دانشیاردانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان

نشریه تحقیقاتی فنی ـ مهندسی استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۷، تابستان ۶۸

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

غیرخطی ارائه‌کرد . این تئوریهاکه برای آبهای عمیق ونیمه‌عمیق کاربرددارندبه‌تئوریهای موج استوکس مرتبهٔ دو ، سه وپنج معروف‌اند.

برای تعیین نیروی هیدرودینامیک ناشی ازامواج برموانع لاغر (مانندپایه‌های اسکله‌ها وسکوهای دریایی)موریسون و همکارانش[۳] درسال ۱۹۵۰ معادله‌ای ارائه کردندکه درآن نیروی دوقسمت تشکیل می‌شود: قسمت اول مربوط به نیروی اینرسی وقسمت دوم مربوط به‌نیروی دراگ[1] است . این دوقسمت با ضرائب تجربی به نامهای ضریب اینرسی وضریب دراگ همراه‌اند. ازآنجاکه این ضرائب نقش مهمی درمقدارنیروی حاصل ازمعادلهٔ موریسون دارندمحققین متعددی به‌بررسی وتجزیه‌وتحلیل این ضرائب پرداختندکه‌ازآن جمله، کولیگان وکارپنتر[۴] درسال ۱۹۵۸ باآزمایشهای بسیاربستگی این ضرائب رابه عددکولیگان ـ کارپنتر[2] وعددرینولدز نشان دادند. همچنین سارپکایا[۵] اثرات زبری سطح پایه ، نوع امواج ونوع جریان رامورددبررسی قرارداده ونتایج رابه‌صورت گرافهایی ارائه کرد. درهمین زمینه چاکرابارتی[۶] درسالهای اخیرتحقیقاتی برای تعیین ضرائب هیدرودینامیکی انجام دادواثرات انواع جریان باعدد کولیگان ـ کارپنتر وعددرینولدز وهمچنین اثرگروه پایه‌هارامورد بررسی قرارداد.

تحلیل دینامیکی سازه‌های دریایی استواربرپایه‌های لاغرنیز موضوع تحقیقات بسیاری ازمحققین بوده‌است . دراین ارتباط می‌توان به مطالعات پنزین وهمکارانش[۷] اشاره‌کرد. دراین مطالعات پنزین وهمکارانش عبارت غیرخطی دراگ درمعادلهٔ حرکت رابه‌وسیلهٔ روشهای آماری وتصادفی[3] به‌عبارت خطی تبدیل کردند. ازسوی دیگر، استفاده ازروشهای عددی برای حل معادلات ارتعاش پایه‌ها درآب موضوع تحقیقات انجام شده‌توسط افرادی نظیراندرسون وماتسون[۸]،استوکارد

---

1. Drag 2. Keulegan-Carpenter Number 3. Stochastic

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

[۹] ، لیووپنزین [۱۰] وجاین وداتا [۱۱] بوده‌است . برخی ازاین محققین ازروشهای آنالیزدرحوزهٔ زمان[1] و برخی دیگرازآنالیز در حوزهٔ فرکانس[2] استفاده‌کرده‌اند. درهمین رابطه ، ویلیامسون[۱۲] دستکاه یک درجهٔ آزادمعادلهٔ غیرخطی حرکت رابرای امواج خطی (سینوسی) باتبدیل معادلات حرکت به معادلات خطی معادل تنها درحالت تشدیدارتعاش پایه‌حل کرد.

شکل اصلی درحل معادلهٔ ارتعاش پایه ها درآب وجودعبارت غیر خطی نیروی دراگ است . راه‌حلهای متفاوتی برای حل این مسئله پیشنهادشده‌اندکه دراغلب آنها ازروشهای عددی حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی استفاده می‌شود. بدین ترتیب نمی‌توان ازروشهای کلاسیک ارتعاشات سازه ها برای این منظوراستفاده‌کرد، مگراینکه معادلات‌غیر خطی حرکت به‌نحوی به‌صورت خطی درآورده‌شوند. هدف ازاین مقاله تحقیق دریک روش خطی کردن این معادلات است . بدین ترتیب‌که یک معادلهٔ خطی معادل برای ارتعاشات پایه درنظرگرفته می‌شودوضرائب نیروهای استهلاک دراین معادله طوری تعیین می‌شودکه معادلهٔ حاصل ازنظررفتارمشابه معادلهٔ غیرخطی اولیه‌باشد. مزیت چنین مدلی نسبت به مدلهای موجوداین است‌که به‌کمک آن می‌توان مسئله ارتعاش پایه‌های محصوردرآب رابسادگی وبابکارگیری گامهای[3] سازه‌حل کرد و یک تصور مهندسی ازاثرمتقابل آب وسازه های دریایی درذهن مجسم کرد.

نیروهای هیدرودینامیک ناشی ازامواج

ذرات آب دراثرتشکیل موج دارای سرعت ، شتاب وتغییرمکان درجهات مختلف اند. وجودموانع باعث تغییردرسرعت ، شتاب ، تغییر مکان وجهت حرکت ذرات ودرنتیجه سبب ایجادنیروبرموانع می‌شود. طبق

---

1. Time Domain 2. Frequency Domain 3. Modes

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

تحقیقات موریسون و همکارانش [۳] درمواردی که نسبت قطرمقطع پایه به طول موج از ۰/۱ کمتراست وجودپایه تاثیری برمیدان امواج نمی‌گذارد. دراین صورت نیروی هیدرودینامیکی وارد از سوی امواج برپایه های استوانه‌ای ازرابطهٔ زیربدست می‌آید [۳] :

$$F = 0.5\rho DC_d \dot{u}_w|\dot{u}_w| + 0.25\rho\pi D^2 c_m \ddot{u}w \qquad (۱)$$

که درآن D قطرمقطع‌پایه ، ρ جرم‌واحدحجم‌آب ، C_m ضریب اینرسی ، C_d ضریب دراگ ، $\dot{u}_w$ سرعت ذرات آب درجریان پایدار و $\ddot{u}_w$ شتاب یکنواخت ذرات آب است .

همانطورکه دراین رابطه مشاهده می‌شودنیروازجمع دوجمله تشکیل شده‌است : اولین جمله بیان کننده نیروی دراگ ومتناسب با مجذور سرعت ذرات آب ودومین جمله متناسب با شتاب ذرات آب وبیان کنندهٔ نیروی اینرسی است .

رابطهٔ (۱) برای عضواستوانه‌ای شکل درحالت سکون کاربرد دارد. امادرحالتی که پایه‌خوددارای حرکت باشدبایدازسرعت وشتاب نسبی درمحاسبهٔ نیرواستفاده‌شود، بنابراین :

$$F = 0.5\rho DC_d(\dot{u}_w - \dot{u})\,\dot{u}_w - \dot{u} + 0.25\rho\pi D^2 C_m \ddot{u}_w - 0.25\rho\pi D^2 (C_m - 1)\ddot{u} \qquad (۲)$$

که درآن $\dot{u}$ و $\ddot{u}$ به ترتیب سرعت وشتاب مطلق پایه‌است . سومین جمله طرف راست رابطهٔ فوق نیزمعرف نیروی اینرسی ناشی ازحرکت پایه است (مانندا ینکه پایه درداخل آب ساکن ارتعاش کند). علامت منفی ناشی ازاین واقعیت است که نیروی اینرسی سیال درجهت شتاب دادن به پایه وعکس جهت نیروهای دراگ واینرسی ناشی ازحرکت امواج در اطراف پایه عمل می‌کند.

درمعادلهٔ موریسون اثرات لزجت ، زبری سطح پایه ، نوع جریان واثرگروه پایه‌ها ، که‌حتی بعضی تاکنون دقیقا "مشخص نشده اند

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

توسط ضرائب اینرسی ودراگ درنظرگرفته می‌شوند. لذا تعیین این ضرائب با توجه به مشخصات سیال وپایه یکی ازمشکل ترین ومهم‌ترین مسائل درمحاسبهٔ نیروتوسط معادله فوق است.

ازسوی دیگر، برای استفاده ازمعادلهٔ موریسون بایدبتوان توسط یک تئوری موج مناسب، سرعت وشتاب u_w و $\dot{u}_w$ و $\ddot{u}_w$ ذرات آب را بدست آورد. ازاین رودراینجا مختصرا "به‌پدیدهٔ امواج نیزاشاره می‌شود.

امواج ممکن است دراثرتردد کشتی ها، انفجاروعوامل طبیعی نظیرزلزله، جزرومدویا بادپدیدآیند. امواج ناشی ازباد به‌وسیلهٔ انتقال انرژی حرکت هوا به‌سطح آب بوجودمی‌آیند، لذا دراین مورد مشخصات موج تابع‌سرعت باد است. ولی بایدتوجه داشت که فقط پس از آنکه باد با سرعت مشخص برای مدت معینی بوزدموجی تشکیل می‌شودکه دارای مشخصات مربوط به‌این سرعت باد خواهدبود.

پارامترهای معرف یک موج را می‌توان با توجه به‌شکل (۱) به صورت زیربیان کرد:

L = طول موج، یعنی فاصلهٔ بین دونقطهٔ اوج یا قعرمتوالی.

H = ارتفاع موج، یعنی فاصلهٔ بین اوج وقعرمتوالی.

C = L/T، سرعت موج.

T = پریودموج، یعنی فاصلهٔ زمانی گذشتن دواوج متوالی‌ازیک نقطه.

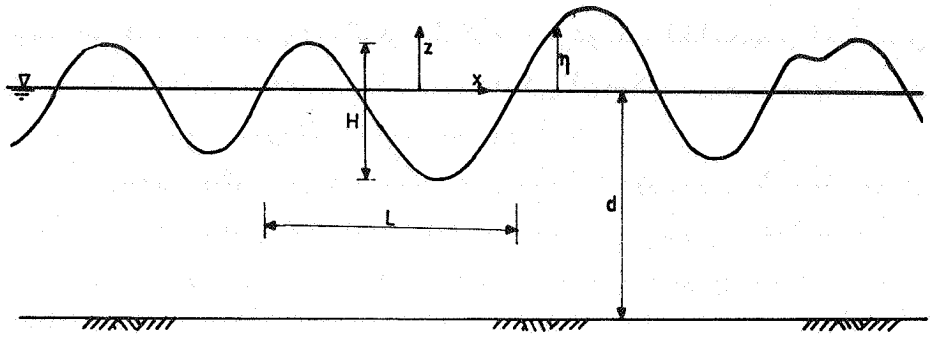
ω = فرکانس موج.

d = عمق آب درحالت سکون.

همانطورکه درشکل صفحهٔ بعدمشاهده می‌شودکمیتهای مستقل موج L، H، d و یا T، H و d هستند. بنابراین اگراین کمیتها برای هر منطقه تعیین شوندمعادله‌حرکت ذرات آب را می‌توان توسط تئوریهای مختلف موج بدست‌آورد. درحالت طبیعی امواج تغییرات زیادی در ارتفاع، طول وپریوددارندامادرمحاسبات معمولا" مقادیرمناسبی برای هرمنطقه انتخاب می‌شوند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]



شکل (۱) ـ کمیتهای معرف مـــوج

برای تعیین سرعت وشتاب ذرات آب ($\dot{u}_w$ و $\ddot{u}_w$) دراین مقاله ازتئوری موج خطی (یاتئوری موج ایری)[۱] استفاده‌شده‌است . با استفاده ازاین تئوری مقداردامنهٔ حرکت ذرات به صورت زیرنوشته می‌شود:

$$\eta = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t) \qquad (۳)$$

همچنین ، به‌کمک این تئوری سرعت وشتاب افقی ذرات آب درنقطه‌ای به‌فاصلهٔ z ازسطح آب باروابط زیرتعیین می‌شوند:

$$\dot{u}_w = \omega \frac{H}{2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \qquad (۴)$$

$$\ddot{u}_w = \omega^2 \frac{H}{2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \qquad (۵)$$

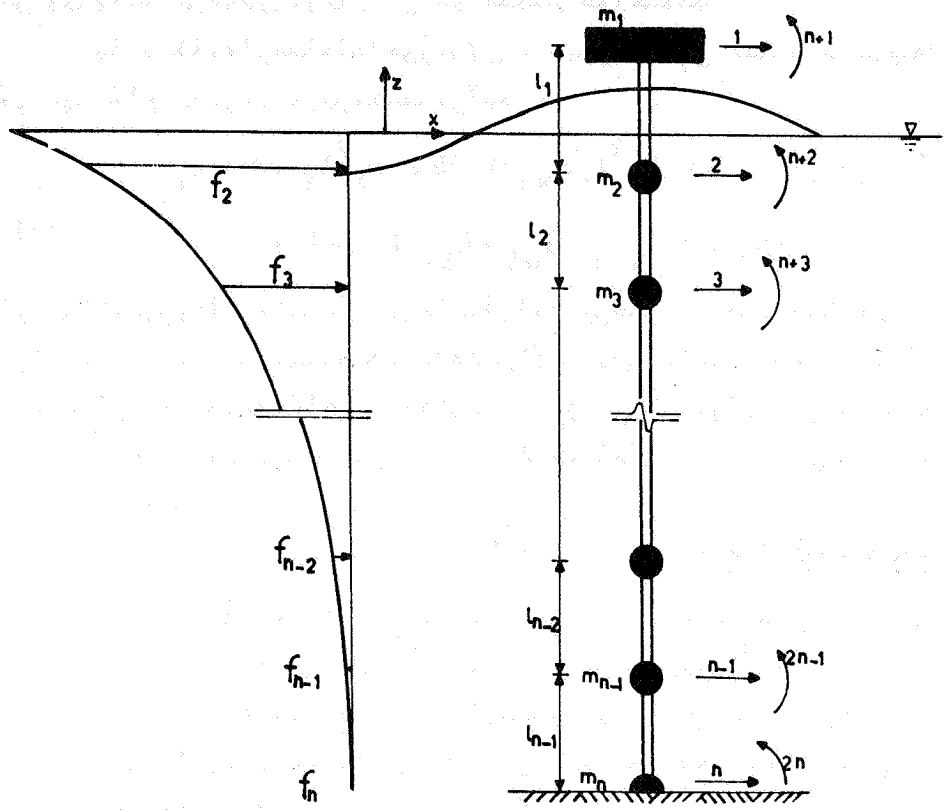
که درآنها $k = 2\pi/L$ عددموج[1] نام‌دارد.

معادلات حرکت پایه

پایهٔ استوانه‌ای که می‌تواندمعرف پایهٔ یک اسکله یاسکوی دریایی

1. Wave Number

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]



شکل (۲) ـ مدل اجزاء محدودبا جرمهای متمرکز

باشدمطابق شکل (۲) باجرمهای متمرکز[1] مدل شده ودرجات آزادی برای هرکره (محل جرم متمرکز) به‌صورت انتقالی وچرخشی درنظرگرفته می‌شود. این درجات به‌ترتیبی شماره‌گذاری می‌شوندکه دردرجهٔ آزادی شمارهٔ n + 1 به‌ترتیب مربوط به تغییرمکان وچرخش بالای پایه و درجات آزادی شمارهٔ n و 2n نیزبه‌ترتیب مربوط به تغییرمکان وچرخش پایین پایه باشند. اثرات خاک (یعنی سختی و استهلاک فونداسیون)

1. Lumped Mass

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

برروی پایه درهمین درجات آزادی منعکس خواهندشد.

با استفاده ازمعادلهٔ موریسون ، نیروی افقی متناظربا درجهٔ آزادی ni به‌ترتیب زیربدست می‌آید :

$$f_i(z_i,t_i)=0.25\rho\pi D_i^2 l_i \ddot{u}_{wi}-0.25\rho\pi D_i^2 l_i (cm-1)\ddot{u}_i$$
$$+0.5\rho D_i l_i c_d |\dot{u}_{wi}-\dot{u}_i|(\dot{u}_{wi}-\dot{u}_i) \qquad (۶)$$

ازآنجاکه نیروهای متناظربا درجات آزادی چرخشی (یعنی لنگرها) برابرصفرندمناسب است که به وسیلهٔ متراکم‌کردن[1] ماتریس سختی تعداد درجات آزادی به نصف کاهش داده‌شود. بدین ترتیب برای مدل با n درجه آزادی انتقالی (شکل ۲) دستگاه معادلهٔ حرکت را می‌توان به صورت زیرنوشت :

$$\underset{\sim}{m}\ddot{\underset{\sim}{u}} + \underset{\sim}{C}\dot{\underset{\sim}{u}} + \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{F} \qquad (۷)$$

که درآن $\underset{\sim}{u}$ ، $\dot{\underset{\sim}{u}}$ و $\ddot{\underset{\sim}{u}}$ به‌ترتیب بردارهای تغییرمکان، سرعت وشتاب‌مطلق گره‌های پایه ، $\underset{\sim}{m}$ ماتریس قطری جرم ، $\underset{\sim}{C}$ ماتریس استهلاک و $\underset{\sim}{K}$ ماتریس سختی متراکم شده‌است . $\underset{\sim}{F}$ نیزبردارنیروهای خارجی ناشی ازامواج است که‌اجزاء آن باتوجه به‌شکل (۲) به‌وسیلهٔ معادلهٔ (۶) بدست‌می‌آید.

با استفاده ازرابطهٔ زیربرای تغییرمکان نسبی

$$u_r = u - u_w \qquad (۸)$$

وروابط مشابه‌برای سرعت وشتاب نسبی و باقراردادن معادلهٔ (۶)در معادلهٔ ماتریسی زیرحاصل می‌شود :

$$(\underset{\sim}{m}_a+\underset{\sim}{m})\ddot{\underset{\sim}{u}}_r + \underset{\sim}{C}\dot{\underset{\sim}{u}}_r + \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_r + \underset{\sim}{G}\{\text{diag.}|\dot{u}_r|\}\dot{u}_r$$
$$= (\underset{\sim}{m}_a + \underset{\sim}{m} - \underset{\sim}{m}')\ddot{\underset{\sim}{u}}_w + \underset{\sim}{C}\dot{\underset{\sim}{u}}_w + \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_w \qquad (۹)$$

که درآن $\underset{\sim}{m}'$ ، $\underset{\sim}{m}_a$ و $\underset{\sim}{G}$ ماتریسهای قطری‌اند که‌اجزاء آنها عبارتنداز :

---

1. Condensation

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

$$m'_{ii} = 0.25\rho\pi D_i^2 l_i \qquad (۱۰)$$

$$m_{aii} = 0.25\rho\pi D_i^2 l_i \ (\ cm-1\ ) \qquad (۱۱)$$

$$G_{ii} = 0.25\ \rho\ D_i l_i C_d \qquad (۱۲)$$

ماتریس $\underset{\sim}{m}_a$ که در رابطهٔ (۹) مستقیما "به ماتریس جرم پایه اضافه شده است اصطلاحا "ماتریس جرم افزوده [1] نام دارد.

با استفاده از تئوری موج خطی (روابط ۳ تا ۵) ،معادلهٔ حرکت پایه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\underset{\sim}{M}\ddot{\underset{\sim}{u}}_r + \underset{\sim}{C}\dot{\underset{\sim}{u}}_r + \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_r + \underset{\sim}{G}\{diag.|\dot{\underset{\sim}{u}}_r|\}\dot{\underset{\sim}{u}}_r = \underset{\sim}{M'}\ddot{\underset{\sim}{u}}_w + \underset{\sim}{C}\dot{\underset{\sim}{u}}_w + \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_w = \underset{\sim}{A}\sin(kx-\omega t) + \underset{\sim}{B}\cos(kx-\omega t) \qquad (۱۳)$$

که در آن $\underset{\sim}{M} = \underset{\sim}{m} + \underset{\sim}{m}_a$ ، $\underset{\sim}{M'} = \underset{\sim}{m} + \underset{\sim}{m}_a - \underset{\sim}{m'}$ (ماتریس جرم افزوده) ، $\underset{\sim}{A} = (\omega^2\underset{\sim}{M'} - \underset{\sim}{K})\underset{\sim}{a}$ و $\underset{\sim}{B} = \omega\underset{\sim}{C}\underset{\sim}{a}$ است و اجزاء بردار $\underset{\sim}{a}$ به صورت $a_i = \frac{H}{2}\ \frac{\cosh[\,k\ (z_i + d)\,]}{\sinh\ (kd)}$ است.

درحل معادلهٔ (۱۳) به روش تحلیلی مشکل اساسی وجود جمله غیرخطی $\underset{\sim}{G}\{diag.|u_r|\}|u_r|$ است. حال اگر فرض شود که معادلهٔ غیرخطی فوق از نظر رفتاری مشابه معادلهٔ دیفرانسیل خطی زیر باشد

$$\underset{\sim}{M}\ddot{\underset{\sim}{u}}_r + \underset{\sim}{C'}\dot{\underset{\sim}{u}}_r + \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_r = \underset{\sim}{A}\sin(kx-\omega t) + \underset{\sim}{B}\cos(kx-\omega t) \qquad (۱۴)$$

با مساوی قرار دادن کار انجام شده توسط بردار نیروهای استهلاکی در این معادلات (روابط ۱۳ و ۱۴) در یک پریود موج می‌توان ماتریس استهلاک معادل C را در معادلهٔ خطی (۱۴) بدست آورد. بنابراین

$$W_c = \int_0^T d\,\underset{\sim}{u}_r^T\,\underset{\sim}{C'}\,\dot{\underset{\sim}{u}}_r = \int_0^T d\,\dot{\underset{\sim}{u}}_r^T\,(\underset{\sim}{C} + \underset{\sim}{G}\{diag.|\dot{\underset{\sim}{u}}_r|\})\,\dot{\underset{\sim}{u}}_r \qquad (۱۵)$$

---

1. Added Mass Matrix

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

چنانچه جواب پایدار[1] معادلات (۱۴) به صورت زیر نوشته شود

$$\underset{\sim}{u}_r = \underset{\sim}{\lambda} \sin (kx - \omega t) + \underset{\sim}{\lambda}' \cos (kx - \omega t) \qquad (۱۶)$$

می‌توان نشان داد که رابطهٔ (۱۵) به صورت زیر ساده خواهد شد [۱۳] :

$$W_c = \pi \omega (\underset{\sim}{\lambda}^T \underset{\sim}{C}' \underset{\sim}{\lambda} + \underset{\sim}{\lambda}'^T \underset{\sim}{C}' \underset{\sim}{\lambda}') \qquad (۱۷)$$

$$= \pi\omega (\underset{\sim}{\lambda}^T \underset{\sim}{L} \underset{\sim}{\lambda} + \underset{\sim}{\lambda}'^T \underset{\sim}{L} \underset{\sim}{\lambda}') + \pi \omega (\underset{\sim}{\lambda}^T \underset{\sim}{C} \underset{\sim}{\lambda} + \underset{\sim}{\lambda}'^T \underset{\sim}{C} \underset{\sim}{\lambda}')$$

که در آن $\underset{\sim}{L}$ ماتریس قطری با اجزاء زیر است :

$$L_{ii} = \frac{8\omega}{3\pi} G_{ii} (\lambda_i^2 + \lambda'^2_i)^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۸)$$

حال با قرار دادن رابطهٔ (۱۶) و مشتقات در رابطهٔ (۱۴) می‌توان بردارهای $\underset{\sim}{\lambda}$ و $\underset{\sim}{\lambda}'$ را بدست آورده و در رابطهٔ (۱۷) جایگزین کرد. این محاسبات معادلهٔ ماتریسی غیرخطی زیر را نتیجه می‌دهد [۱۳] :

$$\underset{\sim}{\lambda}^T (\underset{\sim}{C}' - \underset{\sim}{C} - \underset{\sim}{L}) - \omega^2 \underset{\sim}{C}'^T (\underset{\sim}{K} - \omega^2 \underset{\sim}{M})^T (\underset{\sim}{C}' - \underset{\sim}{C} - \underset{\sim}{L}) (\underset{\sim}{K} - \omega^2 \underset{\sim}{M}) \underset{\sim}{C}'$$

$$+ \underset{\sim}{B}^T (\underset{\sim}{K} - \omega^2 \underset{\sim}{M})^T (\underset{\sim}{C}' - \underset{\sim}{C} - \underset{\sim}{L}) (\underset{\sim}{K} - \omega^2 \underset{\sim}{M}) \underset{\sim}{B} = \underset{\sim}{0} \qquad (۱۹)$$

جواب این معادله عبارت است از [۱۳] :

$$\underset{\sim}{C}' = \underset{\sim}{C} + \underset{\sim}{L} \qquad (۲۰)$$

این نتیجه به تنهائی برای خطی کردن معادلات ارتعاش پایه در آب کافی است. با این وجود برای مقاصد مهندسی مناسب است این نتیجه در ارتباط با روش اجتماع گامها[2] نیز مطرح شده و به صورت ساده تری درآید. برای این منظور بردار $\underset{\sim}{u}_r$ را می‌توان با استفاده از گام شکلهای[3] سازهٔ اصلی (پایه) به صورت زیر بیان کرد

$$\underset{\sim}{u}_r = \sum_{i=1}^{n} q_i (t) \underset{\sim}{\phi}_i \qquad (۲۱)$$

---

1. Steady - State 2. Mode Superposition 3. Mode Shapes

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

که درآن $\underset{\sim}{\phi}_i$ بردار گام شکل i ام و $q_i(t)$ مختصات طبیعی گام i ام است. با بکاربردن رابطهٔ فوق در رابطهٔ (۱۴) و استفاده از خاصیت تعامد گامها و نیز استفاده از روابط سرعت و شتاب مطابق تئوری موج خطی و قبول این فرض ساده کننده که شکل گامهای سازه در آب تفاوت چندانی با شکل گامهای سازه اصلی ندارد معادله گام i ام به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\ddot{q}_i + 2\xi'_i\omega_{ni}\dot{q}_i + \omega^2_{ni}q_i = A_i\sin(kx-\omega t) + B_i\cos(kx-\omega t) \quad (۲۲)$$

که درآن

$$A_i = \frac{\underset{\sim}{\phi}_i^T(\omega^2\underset{\sim}{M}'-\underset{\sim}{K})\underset{\sim}{a}}{\underset{\sim}{\phi}_i^T\underset{\sim}{M}\underset{\sim}{\phi}_i} \quad (۲۳)$$

$$B_i = \frac{\underset{\sim}{\phi}_i^T\underset{\sim}{M}\underset{\sim}{a}}{\underset{\sim}{\phi}_i^T\underset{\sim}{M}\underset{\sim}{\phi}_i}\,2\xi_i\omega_{ni}\omega \quad (۲۴)$$

و $\underset{\sim}{a}$ بردار ضرائب حرکت موج خطی است که اجزاء آن به صورت زیر می‌باشد:

$$a_i = \frac{H}{2}\,\frac{\cosh k(z_i+d)}{\sinh(kd)} \quad (۲۵)$$

همچنین ω_{ni} فرکانس طبیعی و ξ_i نسبت استهلاک گام i ام سازه و ξ'_i نسبت استهلاک معادل درگام i ام مجموعهٔ سازه و آب است.

با قراردادن جواب پایدار معادلهٔ دیفرانسیل (۲۲) در رابطهٔ (۲۱) واستفاده از رابطهٔ (۱۶) می‌توان بردارهای $\underset{\sim}{\lambda}$ و $\underset{\sim}{\lambda}'$ ودرنتیجه با توجه به رابطهٔ (۱۸) اجزاء ماتریس قطری $\underset{\sim}{L}$ را بدست آورد. با قراردادن این ماتریس در رابطهٔ (۲۰) وبه کمک عملیات جبری می‌توان رابطهٔ زیر را بدست آورد [۱۳]:

$$\underset{\sim}{\xi}' = \underset{\sim}{\xi} + \underset{\sim}{S}\,\underset{\sim}{R} \quad (۲۶)$$

که درآن بردارهای $\underset{\sim}{\xi}$ و $\underset{\sim}{\xi}'$ بردارهائی‌اند که مولفه‌های آنها (یعنی $\underset{\sim}{\xi}_i$ و $\underset{\sim}{\xi}'_i$) مقادیر نسبتهای استهلاک درگامهای سازهٔ اصلی وسازهٔ محصور در آب است. مولفه‌های بردار $\underset{\sim}{R}$ واجزاء ماتریس $\underset{\sim}{S}$ نیز با روابط صفحه بعد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

تعیین می‌شوند.

$$R_i = \left(1 - \Omega_i^2 \right)^2 + \left(2 \xi'_i \Omega_i \right)^2 \quad ^{-\frac{1}{2}} \qquad (۲۷)$$

$$S_{ij} = \frac{4}{3\pi} \frac{\Omega_i}{m_i} \underset{\sim}{\phi}_i^T \{ \text{diag.} \phi_i \} \underset{\sim}{G} \underset{\sim}{\phi}_j \frac{\beta_j}{\omega^2_{nj}} \qquad (۲۸)$$

در این روابط $\Omega_i = \omega / \omega_{ni}$ نسبت فرکانس، $m_i = \underset{\sim}{\phi}_i^T \underset{\sim}{M} \underset{\sim}{\phi}_i$, $\beta_j = (A_j^2 + B_i^2)^{\frac{1}{2}}$ است.

برای تعیین مقادیر ξ'_i از رابطهٔ (۲۶) باید از روشهای آزمون وخطا استفاده کرد (زیرا مقادیر ξ'_i به صورت غیرخطی در هر دو طرف رابطه وجود دارند). اما به علت قطری بودن ماتریس $\underset{\sim}{G}$ و خواص گام شکلها مقادیر غیرقطری ماتریس $\underset{\sim}{S}$ بسیار کوچکتر از مقادیر قطری‌اند ولذا با تقریب رضایت بخشی می‌توان از اجزاء غیرقطری این ماتریس صرف نظر کرد. در نتیجه بدون نیاز به حل معادلهٔ غیرخطی (۲۶) می‌توان مقادیر ξ'_iها را از رابطهٔ زیر بدست آورد:

$$\frac{\beta_i}{\omega^2_{ni}} \frac{\underset{\sim}{\phi}_i^T \{ \text{diag.} \phi_i \} \underset{\sim}{G} \underset{\sim}{\phi}_i}{\underset{\sim}{\phi}_i^T \underset{\sim}{M} \underset{\sim}{\phi}_i} = \frac{\pi 3}{4} (\xi'_i - \xi_i) \frac{(1 - \Omega^2_i)^2 + (2 \xi_i \Omega_i)^2 \quad ^{\frac{1}{2}}}{\Omega_i} \qquad (۲۹)$$

با ساده‌تر کردن رابطهٔ (۲۹) رابطهٔ زیر نتیجه می‌شود:

$$\frac{|\beta_i \nu_i|}{\omega^2_{ni}} = \frac{3\pi}{4} (\xi'_i - \xi_i) \frac{(1 - \Omega^2_i)^2 + (2 \xi'_i \Omega_i)^2 \quad ^{\frac{1}{2}}}{\Omega_i} \qquad (۳۰)$$

که در آن $\nu_i = \sum_{i=1}^{n} \Phi_{ji} G_{ij} / m_i$ و $\underset{\sim}{\Phi}$ ماتریس گامها (یعنی ماتریسی که ستونهای آن گامهای سازه است) می‌باشد.

مقادیر ξ'_i را می‌توان با استفاده از دیاگرامهائی که براساس معادلهٔ فوق تنظیم می‌شوند بسادگی تعیین کرد. شکل (۳) یک نمونه از این دیاگرامها را نشان می‌دهد.

بدین ترتیب مشاهده می‌شود که وجود آب در اطراف پایه علاوه بر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

اینکه به طورظاهری جرم پایه را افزایش می‌دهدسبب افزایش نسبت استهلاک درگامهای ارتعاشی نیزمی‌شود (یعنی نسبت استهلاک درهرگام به جای ξ برابر ξ' خواهدبود). به‌کمک مدل تحلیلی فوق علاوه برآنکه با سادگی بیشتری می‌توان پایه‌ها درآب را تحلیل کرد تصویر روشن‌تری نیز می‌توان ازعملکردمتقابل آب وسازه‌های آبی بدست آورد .

نتایج مدل تحلیلی

بررسی معادلهٔ (۲۶) نشان می‌دهدکه ماتریس $\underset{\sim}{S}$ رابسته به دقت موردنظرمی‌توان دردوحالت به‌شرح زیردرنظرگرفت :

حالت اول : دراین حالت کلیه اجزاء ماتریس $\underset{\sim}{S}$ مطابق رابطهٔ (۲۸)در نظرگرفته می‌شود ، که برای این منظوربایدمعادلهٔ ماتریسی (۲۶) به صورت آزمون وخطاحل شود . باحل این معادله وتعیین مقادیر ξ'_i معادلهٔ (۲۲)را می‌توان براحتی توسط یک روش عددی (مثل روش شتاب ثابت) حل کرده وجواب کامل را با استفاده ازروش اجتماع گامها بدست آورد .

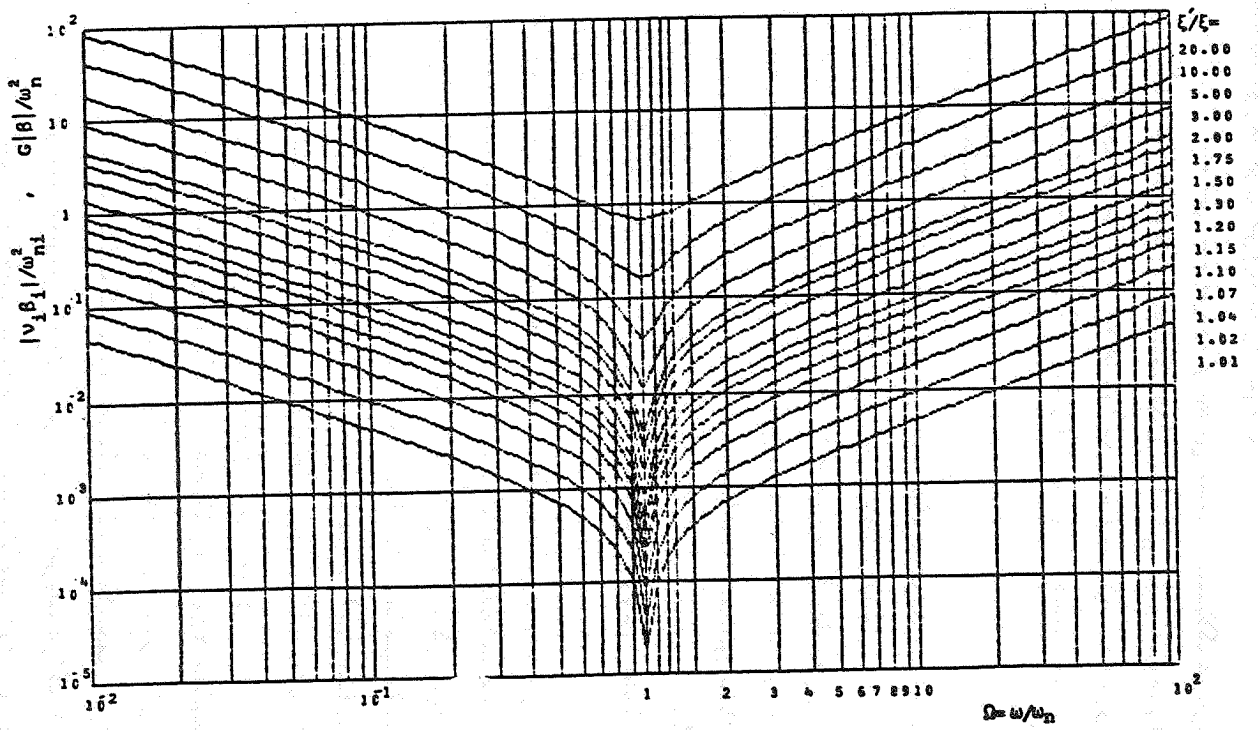
حالت دوم : دراین حالت فقط اجزاء قطری ماتریس $\underset{\sim}{S}$ درنظرگرفته می‌شوندودرنتیجه تعیین مقادیر ξ'_i به‌کمک معادلهٔ ساده (۲۹) یا (۳۰) انجام می‌گیرد (برای سهولت محاسبه می‌توان ازدیاگرامهایی نظیرشکل (۳) نیز استفاده‌کرد). بقیه مراحل محاسبات مانندحالت اول است.

برای ارزیابی روش تحلیلی ارائه‌شده دراین مقاله ونشان‌دادن کاربردآن ازیک مدل ساده برای پایه‌های یک اسکله تحت اثرامواج استفاده شده‌است . مشخصات مدل به‌شرح زیراست :

پایه‌ها ازلوله‌های فولادی توخالی به‌قطرخارجی ۳۵۰ میلیمتروضخامت جدار ۱۲ میلیمترساخته‌شده‌اند. طول پایه‌ها ۱۵ متر، ارتفاع آب ۱۳ متر، جرمی ازعرشه اسکله‌که توسط هریک ازپایه‌ها تحمل می‌شود ۴۳۲۹۰ کیلوگرم ، ضریب اینرسی (Cm) برابر ۲، ضریب دراگ (Cd) برابر واحدونسبت استهلاک داخلی پایه برای تمام‌گامها ۰/۰۲ و ۰/۰۵ فرض

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9] [Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]



شکل (۳)ـ تعیین نسبت استهلاک معادل 'ξ ، (برای ξ = 0.02)

می‌شود.

قبل از هرچیزلازم است دقت روش تحلیلی ارائه‌شده در این مقاله موردارزیابی قرارگیرد. برای این منظورنتایج حاصل ازاین روش برای اسکلهٔ فوق الذکرتحت اثرامواج باپریودهای مختلف بدست آمد وبانتایج حاصل ازیک روش عددی[۱۴] مبتنی برحل معادلهٔ غیرخطی (۱۳) مقایسه‌شد. نتایج این مقایسه درجدول (۱) آورده‌شده‌است. این جدول نشان می‌دهدکه روش پیشنهادی ازدقت خوبی برخورداراست و می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش عددی، که معمولا"با محاسبات پرهزینه همراه‌است، باشد.

جدول ۱ – مقایسه نتایج حاصل ازروش تحلیلی وعددی برای موجها با پریودمختلف

پریودموج (ثانیه)	۱	۲	۴	۶	۱۶
نسبت‌فرکانس $\Omega_1 = \omega / \omega_{nl}$	۴/۲۶	۲/۱۳	۱/۰۶	۰/۷۱۳	۰/۲۶۶
حداکثرتغییرمکان عرشه در روش تحلیلی (سانتیمتر)	$۱/۸۷\times۱۰^{-۳}$	۰/۸۱	۱۰/۲۴	۵/۳۹	۳/۲۸
حداکثرتغییرمکان عرشه در روش‌عددی (سانتیمتر)	$۱/۸\times۱۰^{-۳}$	۰/۸۹	۱۱/۵۹	۵/۹۵	۳/۵۲

به منظور مقایسه نتایج مربوط به دوحالت اول ودوم وهمچنین بررسی همگرایی نتایج با افزایش درجات آزادی، اسکله موردنظربا نسبت استهلاک ۰/۰۲ درتمام گامها تحت اثرموجی با پریود ۸ ثانیه تحلیل شد، که نتایج این تحلیل درجدول (۲) خلاصه‌شده‌است.

همانطورکه این جدول نشان می‌دهدنتایج حالات اول ودوم بسیار نزدیک به هم انددرنتیجه می‌توان برای تعیین مقادیر ξ'_i با دقت خوبی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

جدول ۲ ـ مقایسه نتایج حالات اول و دوم و همگرائی جوابها

درجهٔ آزادی (= تعداد المانها + ۱)	۳	۴	۵	۶
فرکانس طبیعی گام اول ω_{n1}	۱/۴۷۸	۱/۴۷۵	۱/۴۷۳	۱/۴۷۱
نسبت فرکانس در گام اول $\Omega_1 = \omega_1 / \omega_{n1}$	۰/۵۳۱	۰/۵۳۲	۰/۵۳۳	۰/۵۳۴
حداکثر تغییر مکان عرشه برای حالت اول (سانتیمتر)	۲/۴۳۴	۳/۵۸	۳/۸۵	۴/۰۳
حداکثر تغییر مکان عرشه برای حالت دوم (سانتیمتر)	۲/۴۳۳	۳/۵۱	۳/۸۱	۳/۹۹

از روابط سادهٔ (۲۹) یا (۳۰) استفاده کرد و نیازی به حل معادلهٔ ماتریسی غیرخطی (۲۶) برای این منظور نیست. همچنین نتایج حاصل از این روش، با افزایش تعداد درجات آزادی، همگرایی نسبتاً سریعی دارد که این موضوع در کاهش هزینهٔ محاسبات، بخصوص در سیستمهای بزرگ، اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارد.

موضوع قابل توجه در رفتار متقابل آب و سازه‌های آبی پدیدهٔ تشدید در ارتعاشات سازه است. جدول (۱) نشان می‌دهد که هرقدر نسبت فرکانس موج به فرکانس طبیعی پایه کوچکتر باشد واکنش پایه خفیف‌تر و با افزایش این نسبت واکنش پایه نیز شدیدتر می‌شود به طوری که در حالتی که این نسبت به ۱/۰ برسد حداکثر واکنش حاصل می‌شود و با افزایش این نسبت چنانچه بزرگتر از ۱/۰ گردد باز واکنش پایه کمتر می‌گردد. بنابراین در طرح سازه‌های آبی باید توجه خاصی به پریود موج طرح و اجتناب از حالت تشدید داشت.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

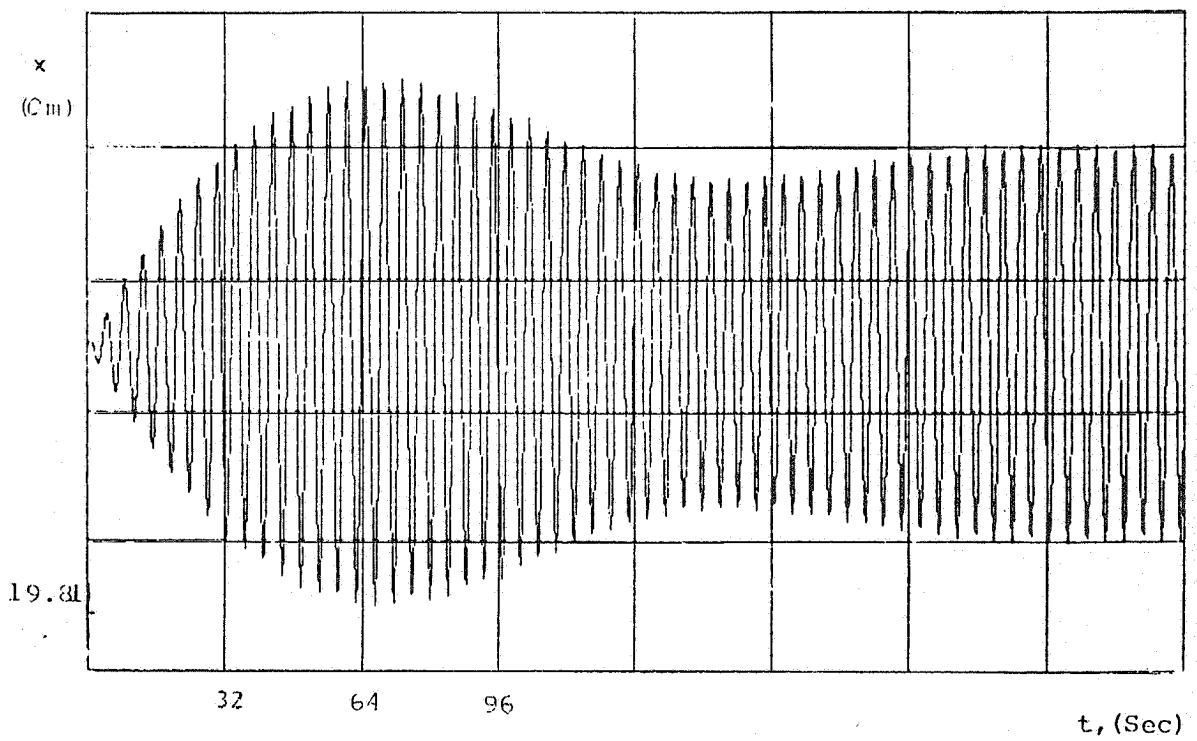
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

واکنش سازه‌های آبی درحالت تشدیدبا واکنش درسایرحالات تفاوت اساسی دارد (صرف نظرازشدت واکنش). بدین ترتیب که درحالت تشدید، واکنش دینامیکی سازه پدیدهٔ ضربان را ازخودبروزمی‌دهد. با افزایش استهلاک سازه، ضمن کاهش حداکثرواکنش، ازشدت این پدیده نیزبه تدریج کاسته می‌شود. اشکال (۴) تا (۶) تغییرات حرکت عرشه اسکله موردنظررا درحالت تشدیدبرابرمقادیرمختلف ξ (از ۰/۰۱ تا ۰/۰۳) نشان می‌دهد.

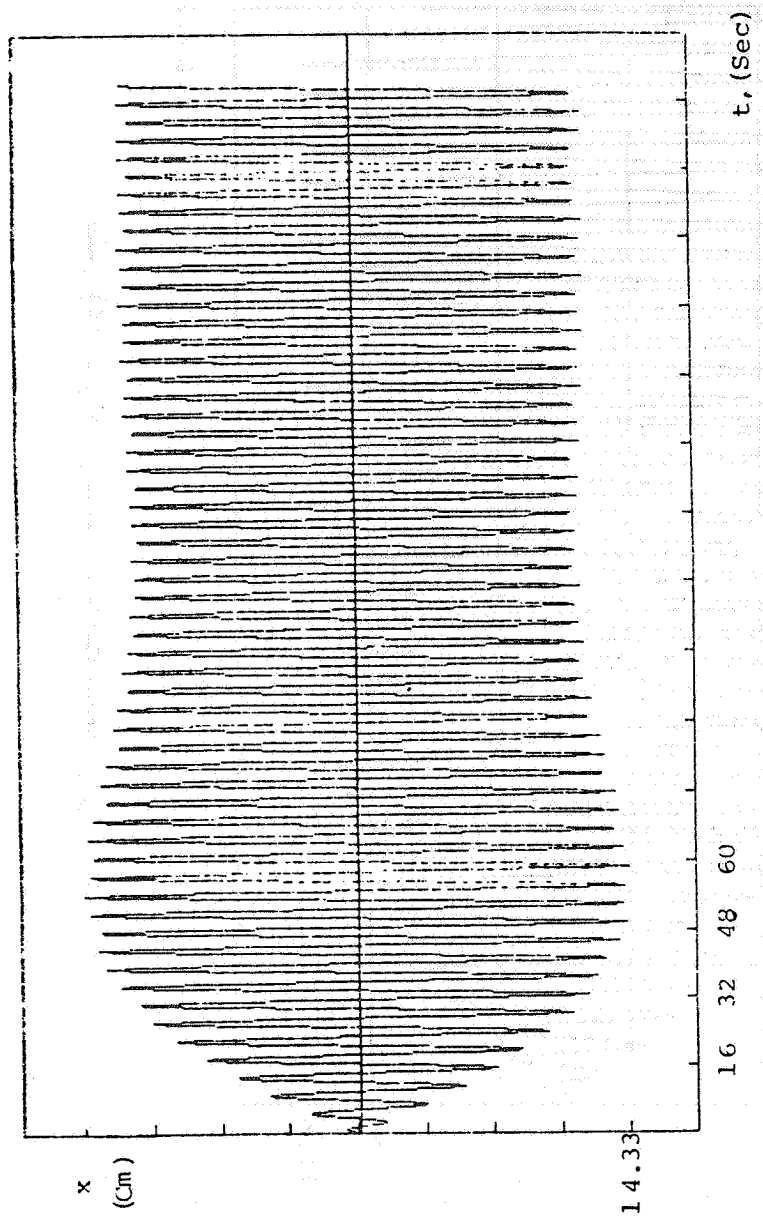
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9] [Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]



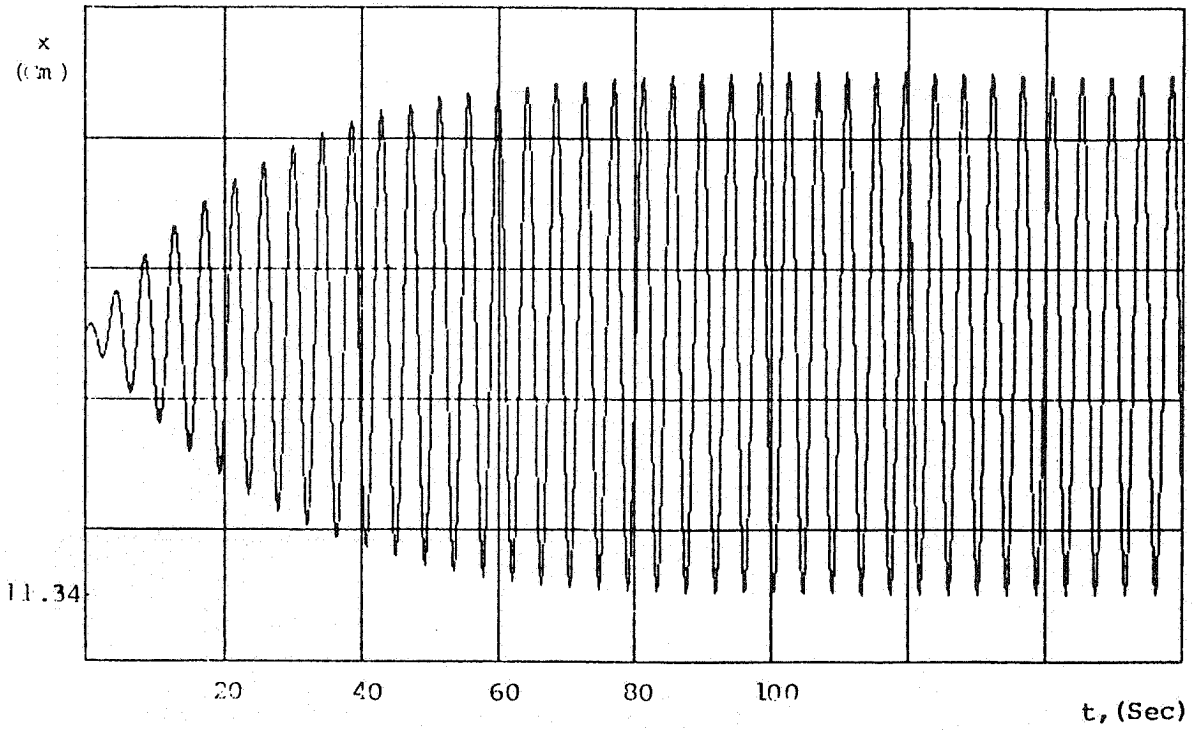
شکل (۴) ـ واکنش عرشه‌درحالت تشدیدبرای $\xi = 0.01$



شکل (۵) – واکنش عرشه در حالت تشدید برای $\xi = 0.02$

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9] [Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]



شکل (۶) ـ واکنش عرشه درحالت تشدیدبرای $\xi = 0.03$

خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله یک روش تقریبی برای خطی کردن معادلات غیرخطی ارتعاش پایه ها در آب ارائه شد. اساس این روش مساوی قرار دادن کار نیروهای غیرخطی در آن معادلات و کار نیروهای خطی نظیر در معادلات جایگزین بوده است. با استفاده از این روش شکل کلی معادلات خطی ارتعاش برای یک مجموعهٔ سازه ـ آب بدست آمد و با استفاده از آن معادلهٔ هرگام ارتعاشی تعیین شد. این مطالعه نشان داد وجود آب علاوه بر اینکه به طور ظاهری سبب افزایش جرم سازه می‌شود مقدار استهلاک ارتعاش را نیز افزایش می‌دهد.

مزیت مهم روش تحلیلی پیشنهاد شده در این مقاله این است که به کمک آن می‌توان مسئله ارتعاش یک سازهٔ محصور در آب را با بکارگیری گام شکل‌های سازه و با استفاده از تکنیک اجتماع گامها بسادگی حل کرد و بدین ترتیب، علاوه بر افزایش سرعت محاسبات و کاهش هزینه آن، یک برداشت فیزیکی از اثر متقابل آب و سازه‌های دریایی در ذهن بوجود آورد.

نتایج تحلیلهای مختلف نشان داد که نسبت فرکانس موج به فرکانس طبیعی سازه مهمترین نقش را در رفتار سازه‌های آبی دارد و باید در طرح اینگونه سازه‌ها بدقت مورد توجه قرار گیرد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

مراجع

1 . Airy, C. B., " Tides and Waves, " Encyc. Metrop., Art. 192 , PP. 241-396, 1845 .

2 . Stokes , G. G., " On the Theory of Oscillatory Waves. " Trans. Camb. Phil. Soc., vol. 8 , PP. 441-455 , 1847

3 . Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., and Schaaf, S. A., " The Forces Exerted by Surface Waves on Piles," Petroleum Trans., AIME, Vol. 189. PP 149-157 , 1950 .

4 . Keulegan, G. H. and Carpenter, L. H., " Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, " National Bureau of Standards Report, No. 4821, 1956 .

5 . Sarpkaya, T., and Isaacson, M., Mechanics of wave Forces on Offshore Structures, Van Nosrand Reinhold Co., 1981 .

6 . Chakrabarti, S. K., " Hydrodynamic Coefficients for a Vertical Tube in an Array, " Marine Research, Chicago Bridge and Iron co. Plainfield, IL., 1982 .

7 . Penzien, J. " Structural Dynamics of Fixed Offohore Structures, " Proc. First Int. conf. on the Behavior of

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

Offshore Structures, Trondheim, Norway, vol. 1, PP. 581-592, 1976 .

8 . Anderson, L., and Mattson, B. " Analysis of offshore Structures with ADINA, " J. of computers and Structures, vol. 17, No. 5-6 PP. 737-748, 1983 .

9 . Stockard, D. M., " Effect of Pile-Soil-Water Interaction on the Dynamic Response of a seismically Excited Offshore Structure, " Offshore Tech. Conf., OTC 2672, 1976 .

10. Liou, D. N. and Penzien, J., " Seismic Analysis of an Offshore Structure Supported on Pile Foundations, " Report No. UCB/EERC 77/25, Univ. of Calif., Berkley, Nov. 1977 .

11. Jain, A. K. and Datla, T. K., " Nonlinear Dynamic Analysis of Offshore Tawers in Frequency Domain, " J. of Eng. Mech., vol. 113, No. 4, April 1987 .

12. Williamson, C. H. K., " In-Line Response of a Cylinder in Oscillatory Flow, " J. of Applied Ocean Research, vol. 7, No. 2, 1985 .

۱۳- میرمحمدصادقی، حسین ، "آنالیزدینامیکی رفتارمتقابل آب و وسازه‌های دریایی " . پایان نامه‌کارشناسی‌ارشد ،دانشکده‌عمران،

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]

دانشگاه صنعتی اصفهان ، ۱۳۶۶ .

۱۴ـ ملک ، امیرمسعود ،" تحلیل دینامیکی اسکله تحت اثر امواج و زلزله "، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشکده عمران ، دانشگاه صنعتی اصفهان ، ۱۳۶۶ .

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.1.9]