

## آنالیز دینامیکی رفتار متقابل آب و سازه های دریایی

حسین میرمحمدصادقی\* - امیرمسعودکی نیسا\*\*

### چکیده

برای آنالیز تقریبی ارتعاش پایه ها در آب مدل خطی ساده از نوع اجزاء محدود ارائه می شود. مشخصات این مدل با مساوی قرار دادن کارنیروهای غیرخطی ارتعاش پایه در آب و کارنیروهای استهلاکی در مدل خطی نظیر بدست می آیند. در این مقاله مشخصات مدل خطی معادل به صورت روابط به فرم بسته ارائه شده و دقت آن مورد ارزیابی قرار می گیرد. نتیجه این تحقیق نشان می دهد که به کمک مدل پیشنهادی تاثیر آب در ارتعاش پایه را می توان با افزایش جرم پایه و افزایش استهلاک ارتعاشات در نظر گرفت.

### مقدمه

در دودهمه اخیر مطالعات و تحقیقات دامنه داری در مورد تحلیل دینامیکی سازه های دریایی انجام شده است. اغلب این مطالعات در ارتباط با شناخت و بررسی نیروهای ناشی از امواج، تعیین ضرائب هیدرودینامیکی و روشهای مناسب برای حل معادلات غیرخطی ارتعاش سازه های دریایی بوده است.

بیان ریاضی حرکت دوبعدی امواج سطحی برای اولین بار توسط ایری [۱] در سال ۱۸۴۵ ارائه شد. این تئوری موج به تئوری موج سینوسی یا موج ایری معروف است. در همین رابطه استوکس [۲] مسئله را با وسعت بیشتری مورد بررسی قرار داده و تئوریهای موج را به صورت

\* مربی دانشکده فنی وزارت نیرو

\*\* دانشیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان

غیرخطی ارائه کرد. این تئوریهاکه برای آبهای عمیق و نیمه عمیق کاربرد دارند به تئوریهای موج استوکس مرتبه دو، سه و پنج معروفاند. برای تعیین نیروی هیدرودینامیک ناشی از امواج بر موانع لاغر (مانند پایه های اسکله ها و سکوهای دریایی) موریسون و همکارانش [۳] در سال ۱۹۵۰ معادله ای ارائه کردند که در آن نیرو از دو قسمت تشکیل می شود: قسمت اول مربوط به نیروی اینرسی و قسمت دوم مربوط به نیروی دراگ<sup>۱</sup> است. این دو قسمت با ضرائب تجربی به نامهای ضریب اینرسی و ضریب دراگ همراه اند. از آنجا که این ضرائب نقش مهمی در مقدار نیروی حاصل از معادله موریسون دارند محققین متعددی به بررسی و تجزیه و تحلیل این ضرائب پرداختند که از آن جمله، کولیگان و کارپنتر [۴] در سال ۱۹۵۸ با آزمایشهای بسیار بستگی این ضرائب را به عدد کولیگان - کارپنتر<sup>۲</sup> و عدد رینولدز نشان دادند. همچنین سارپکایا [۵] اثرات زبری سطح پایه، نوع امواج و نوع جریان را مورد بررسی قرار داده و نتایج را به صورت گرافهایی ارائه کرد. در همین زمینه چاکر ابارتی [۶] در سالهای اخیر تحقیقاتی برای تعیین ضرائب هیدرودینامیکی انجام داد و اثرات انواع جریان با عدد کولیگان - کارپنتر و عدد رینولدز و همچنین اثر گروه پایه ها را مورد بررسی قرار داد.

تحلیل دینامیکی سازه های دریایی استوار بر پایه های لاغرنیز موضوع تحقیقات بسیاری از محققین بوده است. در این ارتباط می توان به مطالعات پنزین و همکارانش [۷] اشاره کرد. در این مطالعات پنزین و همکارانش عبارت غیرخطی دراگ در معادله حرکت را به وسیله روشهای آماری و تصادفی<sup>۳</sup> به عبارت خطی تبدیل کردند. از سوی دیگر، استفاده از روشهای عددی برای حل معادلات ارتعاش پایه ها در آب موضوع تحقیقات انجام شده توسط افرادی نظیر اندرسون و ماتسون [۸]، استوکارد

---

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

[۹] ، لیووپنزی [۱۰] و جاین و داتا [۱۱] بوده است . برخی از این محققین از روشهای آنالیز در حوزه زمان<sup>۱</sup> و برخی دیگر از آنالیز در حوزه فرکانس<sup>۲</sup> استفاده کرده اند . در همین رابطه ، ویلیامسون [۱۲] دستگاه یک درجه آزادی معادله غیرخطی حرکت را برای امواج خطی (سینوسی) با تبدیل معادلات حرکت به معادلات خطی معادل تنها در حالت تشدید ارتعاش پایه حل کرد .

شکل اصلی در حل معادله ارتعاش پایه ها در آب وجود عبارت غیر خطی نیروی دراگ است . راه‌حلهای متفاوتی برای حل این مسئله پیشنهاد شده اند که در اغلب آنها از روشهای عددی حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی استفاده می‌شود . بدین ترتیب نمی‌توان از روشهای کلاسیک ارتعاشات سازه‌ها برای این منظور استفاده کرد ، مگر اینکه معادلات غیر خطی حرکت به نحوی به صورت خطی درآورده شوند . هدف از این مقاله تحقیق در یک روش خطی کردن این معادلات است . بدین ترتیب که یک معادله خطی معادل برای ارتعاشات پایه در نظر گرفته می‌شود و ضرایب نیروهای استهلاک در این معادله طوری تعیین می‌شود که معادله حاصل از نظر رفتار مشابه معادله غیرخطی اولیه باشد . مزیت چنین مدلی نسبت به مدل‌های موجود این است که به کمک آن می‌توان مسئله ارتعاش پایه‌های محصور در آب را بسادگی و با بکارگیری گامهای<sup>۳</sup> ساده حل کرد و یک تصور مهندسی از اثر متقابل آب و سازه‌های دریایی در ذهن مجسم کرد .

### نیروهای هیدرودینامیک ناشی از امواج

ذرات آب در اثر تشکیل موج دارای سرعت ، شتاب و تغییر مکان در جهات مختلف اند . وجود موانع باعث تغییر در سرعت ، شتاب ، تغییر مکان و جهت حرکت ذرات و در نتیجه سبب ایجاد نیرو بر موانع می‌شود . طبق

1. Time Domain

2. Frequency Domain

3. Modes

## استقلال

تحقیقات موریسون و همکارانش [۳] در مواردی که نسبت قطر مقطع پایه به طول موج از  $0.1$  کمتر است وجود پایه تأثیری بر میدان امواج نمی‌گذارد. در این صورت نیروی هیدرودینامیکی وارد از سوی امواج بر پایه‌های استوانه‌ای از رابطه زیر بدست می‌آید [۳]:

$$F = 0.5 \rho D C_d \dot{u}_w |\dot{u}_w| + 0.25 \rho \pi D^2 C_m \ddot{u}_w \quad (1)$$

که در آن  $D$  قطر مقطع پایه،  $\rho$  جرم واحد حجم آب،  $C_m$  ضریب اینرسی،  $C_d$  ضریب دراگ،  $\dot{u}_w$  سرعت ذرات آب در جریان پایدار و  $\ddot{u}_w$  شتاب یکنواخت ذرات آب است.

همانطور که در این رابطه مشاهده می‌شود نیرو از جمع دو جمله تشکیل شده است: اولین جمله بیان‌کننده نیروی دراگ و متناسب با مجذور سرعت ذرات آب و دومین جمله متناسب با شتاب ذرات آب و بیان‌کننده نیروی اینرسی است.

رابطه (۱) برای عضو استوانه‌ای شکل در حالت سکون کاربرد دارد. اما در حالتی که پایه خود دارای حرکت باشد باید از سرعت و شتاب نسبی در محاسبه نیرو استفاده شود، بنا بر این:

$$F = 0.5 \rho D C_d (\dot{u}_w - \dot{u}) \dot{u}_w - \dot{u} + 0.25 \rho \pi D^2 C_m \ddot{u}_w \quad (2)$$

$$- 0.25 \rho \pi D^2 (C_m - 1) \ddot{u}$$

که در آن  $\dot{u}$  و  $\ddot{u}$  به ترتیب سرعت و شتاب مطلق پایه است. سومین جمله طرف راست رابطه فوق نیز معرف نیروی اینرسی ناشی از حرکت پایه است (مانند اینکه پایه در داخل آب ساکن ارتعاش کند). علامت منفی ناشی از این واقعیت است که نیروی اینرسی سیال در جهت شتاب دادن به پایه و عکس جهت نیروهای دراگ و اینرسی ناشی از حرکت امواج در اطراف پایه عمل می‌کند.

در معادله موریسون اثرات لزجت، زبری سطح پایه، نسوع جریان و اثر گروه پایه‌ها، که حتی بعضی تاکنون دقیقاً مشخص نشده‌اند

توسط ضرائب اینرسی و دراک در نظر گرفته می‌شوند. لذا تعیین این ضرائب با توجه به مشخصات سیال و پایه یکی از مشکل ترین و مهم ترین مسائل در محاسبه نیرو توسط معادله فوق است.

از سوی دیگر، برای استفاده از معادله موریسون باید بتوان توسط یک تئوری موج مناسب، سرعت و شتاب  $\dot{u}_w$  و  $\ddot{u}_w$  ذرات آب را بدست آورد. از این رو در اینجا مختصراً "به پدیده" امواج نیز اشاره می‌شود.

امواج ممکن است در اثر تردد کشتی‌ها، انفجار و عوامل طبیعی نظیر زلزله، جزر و مد و یا با دید آیند. امواج ناشی از باد به وسیله انتقال انرژی حرکت هوا به سطح آب بوجود می‌آیند، لذا در این مورد مشخصات موج تابع سرعت باد است. ولی باید توجه داشت که فقط پس از آنکه باد با سرعت مشخص برای مدت معینی بوزد موجی تشکیل می‌شود که دارای مشخصات مربوط به این سرعت باد خواهد بود. پارامترهای معرف یک موج را می‌توان با توجه به شکل (۱) به صورت زیر بیان کرد:

$L$  = طول موج، یعنی فاصله بین دو نقطه اوج یا قعر متوالی.

$H$  = ارتفاع موج، یعنی فاصله بین اوج و قعر متوالی.

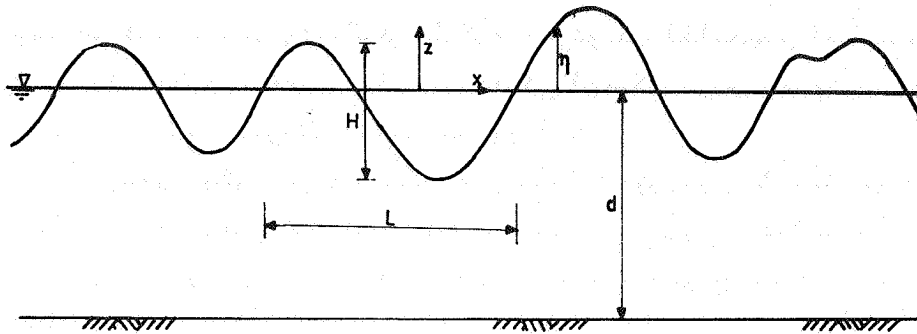
$C = L/T$ ، سرعت موج.

$T$  = پریود موج، یعنی فاصله زمانی گذشتن دو اوج متوالی از یک نقطه.

$\omega$  = فرکانس موج.

$d$  = عمق آب در حالت سکون.

همانطور که در شکل صفحه بعد مشاهده می‌شود کمیت‌های مستقل موج  $d$ ،  $L$ ،  $H$  و یا  $T$ ،  $H$  و  $d$  هستند. بنابراین اگر این کمیت‌ها برای هر منطقه تعیین شوند معادله حرکت ذرات آب را می‌توان توسط تئوری‌های مختلف موج بدست آورد. در حالت طبیعی امواج تغییرات زیادی در ارتفاع، طول و پریود دارند اما در محاسبات معمولاً "مقادیر مناسبی برای هر منطقه انتخاب می‌شوند".



شکل (۱) - کمیت‌های معرف موج

برای تعیین سرعت و شتاب ذرات آب ( $\dot{u}_w$  و  $\ddot{u}_w$ ) در این مقاله از تئوری موج خطی (یا تئوری موج ایری) [۱] استفاده شده است. با استفاده از این تئوری مقدار دامنه حرکت ذرات به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

همچنین، به کمک این تئوری سرعت و شتاب افقی ذرات آب در نقطه‌ای به فاصله  $z$  از سطح آب با روابط زیر تعیین می‌شوند:

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

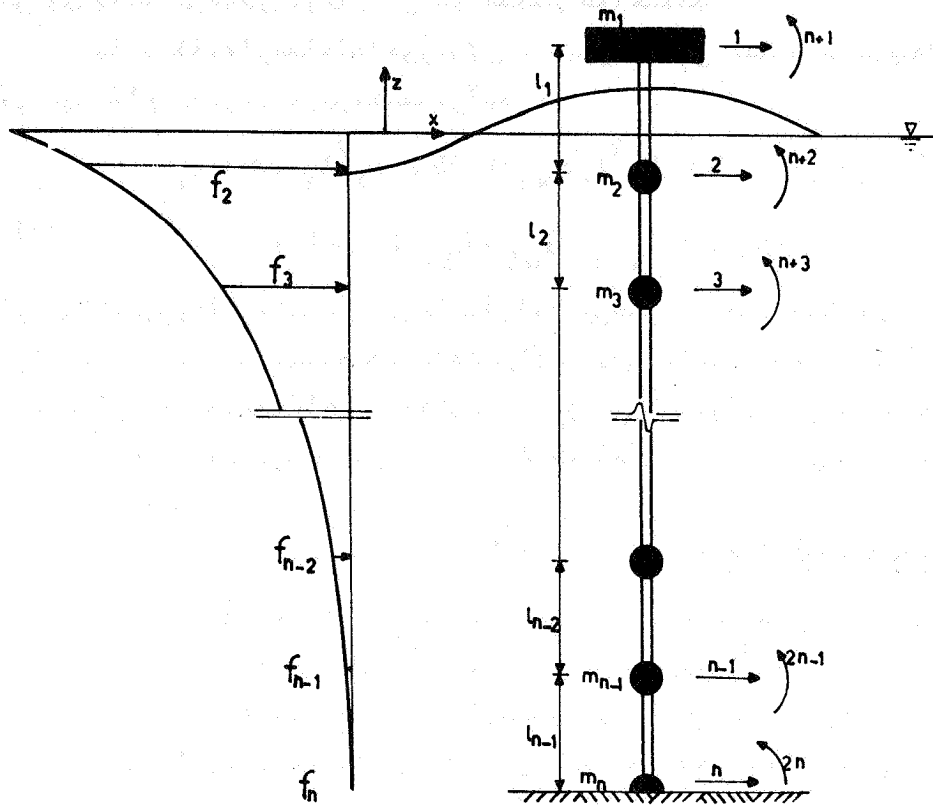
$$\ddot{u}_w = \omega^2 \frac{H}{2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (۵)$$

که در آن‌ها  $k = 2\pi/L$  عدد موج نام دارد.

#### معادلات حرکت پایه

پایه استوانه‌ای که می‌تواند معرف پایه یک اسکله یا سکوی دریایی

#### 1. Wave Number



شکل (۲) - مدل اجزاء محدود با جرمهای متمرکز

باشد مطابق شکل (۲) با جرمهای متمرکز<sup>۱</sup> مدل شده و درجات آزادی برای هر کره (محل جرم متمرکز) به صورت انتقالی و چرخشی در نظر گرفته می شود. این درجات به ترتیبی شماره گذاری می شوند که در درجه آزادی شماره  $n + 1$  به ترتیب مربوط به تغییر مکان و چرخش بالای پایه و درجات آزادی شماره  $n$  و  $2n$  نیز به ترتیب مربوط به تغییر مکان و چرخش پایین پایه باشند. اثرات خاک (یعنی سختی و استهلاک فونداسیون)

### 1. Lumped Mass

بر روی پایه در همین درجات آزادی منعکس خواهند شد. با استفاده از معادله مورسون، نیروی افقی متناظر با درجه آزادی  $i$  ام به ترتیب زیر بدست می‌آید:

$$f_i(z_i, t_i) = 0.25 \rho \pi D_i^2 l_i \ddot{u}_{wi} - 0.25 \rho \pi D_i^2 l_i (cm-1) \ddot{u}_i + 0.5 \rho D_i l_i c_d |\dot{u}_{wi} - \dot{u}_i| (\dot{u}_{wi} - \dot{u}_i) \quad (6)$$

از آنجاکه نیروهای متناظر با درجات آزادی چرخشی (یعنی لنگرها) برابر صفرند مناسب است که به وسیله متراکم کردن<sup>۱</sup> ماتریس سختی تعداد درجات آزادی به نصف کاهش داده شود. بدین ترتیب برای مدل با  $n$  درجه آزادی انتقالی (شکل ۲) دستگاه معادله حرکت را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + K u = F \quad (7)$$

که در آن  $u$ ،  $\dot{u}$  و  $\ddot{u}$  به ترتیب بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب مطلق گره‌های پایه،  $m$  ماتریس قطری جرم،  $c$  ماتریس استهلاک و  $K$  ماتریس سختی متراکم شده است.  $F$  نیز بردار نیروهای خارجی ناشی از امواج است که اجزای آن با توجه به شکل (۲) به وسیله معادله (۶) بدست می‌آید. با استفاده از رابطه زیر برای تغییر مکان نسبی

$$u_r = u - u_w \quad (8)$$

و روابط مشابه برای سرعت و شتاب نسبی و با قرار دادن معادله (۶) در معادله ماتریسی زیر حاصل می‌شود:

$$(m_a + m) \ddot{u}_r + c \dot{u}_r + K u_r + G \{ \text{diag.} | \dot{u}_r | \} \dot{u}_r = (m_a + m - m') \ddot{u}_w + c \dot{u}_w + K u_w \quad (9)$$

که در آن  $m'$ ،  $m_a$  و  $G$  ماتریسهای قطری اند که اجزای آنها عبارتند از:

## 1. Condensation



$$m'_{ii} = 0.25 \rho \pi D_i^2 l_i \quad (10)$$

$$m_{a_{ii}} = 0.25 \rho \pi D_i^2 l_i \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (11)$$

$$G_{ii} = 0.25 \rho D_i l_i C_d \quad (12)$$

ماتریس  $m_a$  که در رابطه (۹) مستقیماً به ماتریس جرم پایه اضافه شده است اصطلاحاً "ماتریس جرم افزوده" نام دارد.

با استفاده از تئوری موج خطی (روابط ۳ تا ۵)، معادله حرکت

پایه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \ddot{\underline{u}}_R + \underline{C} \dot{\underline{u}}_R + \underline{K} \underline{u}_R + \underline{G} \{ \text{diag.} | \dot{\underline{u}}_R | \} \dot{\underline{u}}_R \\ = \underline{M} \ddot{\underline{u}}_W + \underline{c} \dot{\underline{u}}_W + \underline{K} \underline{u}_W = \underline{A} \sin(kx - \omega t) + \underline{B} \cos(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (13)$$

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

در حل معادله (۱۳) به روش تحلیلی مشکل اساسی وجود جمله غیرخطی

$\underline{G} \{ \text{diag.} | \dot{\underline{u}}_R | \} \dot{\underline{u}}_R$  است. حال اگر فرض شود که معادله غیرخطی فوق از نظر رفتاری مشابه معادله دیفرانسیل خطی زیر باشد

$$\ddot{\underline{u}}_R + \underline{C} \dot{\underline{u}}_R + \underline{K} \underline{u}_R = \underline{A} \sin(kx - \omega t) + \underline{B} \cos(kx - \omega t) \quad (14)$$

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 معادله خطی (۱۴) بدست آورد. بنابراین

$$W_C = \int_0^T \dot{\underline{u}}_R^T \underline{C} \dot{\underline{u}}_R = \int_0^T \dot{\underline{u}}_R^T (\underline{C} + \underline{G} \{ \text{diag.} | \dot{\underline{u}}_R | \}) \dot{\underline{u}}_R \quad (15)$$

## 1. Added Mass Matrix

## استقلال

چنانچه جواب پایدار<sup>۱</sup> معادلات (۱۴) به صورت زیر نوشته شود

$$\underline{u}_r = \underline{\lambda} \sin(kx - \omega t) + \underline{\lambda}' \cos(kx - \omega t) \quad (16)$$

می‌توان نشان داد که رابطه<sup>۲</sup> (۱۵) به صورت زیر ساده خواهد شد [۱۳]:

$$W_c = \pi \omega (\underline{\lambda}^T \underline{C}' \underline{\lambda} + \underline{\lambda}'^T \underline{C}' \underline{\lambda}) \quad (17)$$

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

که در آن  $\underline{L}$  ماتریس قطری با اجزاء<sup>۳</sup> زیر است:

$$L_{ii} = \frac{8\omega}{3\pi} G_{ii} (\lambda_i^2 + \lambda_i'^2)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

حال با قراردادن رابطه<sup>۴</sup> (۱۶) و مشتقاتش در رابطه<sup>۵</sup> (۱۴) می‌توان بردارهای  $\underline{\lambda}$  و  $\underline{\lambda}'$  را بدست آورده و در رابطه<sup>۶</sup> (۱۷) جایگزین کرد. این محاسبات معادله<sup>۷</sup> ماتریسی غیرخطی زیر را نتیجه می‌دهد [۱۳]:

$$\underline{\lambda}^T (\underline{C}' - \underline{C} - \underline{L}) - \omega^2 \underline{C}'^T (\underline{K} - \omega^2 \underline{M})^T (\underline{C}' - \underline{C} - \underline{L}) (\underline{K} - \omega^2 \underline{M}) \underline{C}' + \underline{B}^T (\underline{K} - \omega^2 \underline{M})^T (\underline{C}' - \underline{C} - \underline{L}) (\underline{K} - \omega^2 \underline{M}) \underline{B} = \underline{0} \quad (19)$$

جواب این معادله عبارت است از [۱۳]:

$$\underline{C}' = \underline{C} + \underline{L} \quad (20)$$

این نتیجه به تنهایی 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<sup>۲</sup> نیز مطرح شده و به صورت ساده تری درآید. برای این منظور بردار  $\underline{u}_r$  را می‌توان با استفاده از گام‌شکل‌های<sup>۳</sup> سازه<sup>۴</sup> اصلی (پایه) به صورت زیر بیان کرد

$$\underline{u}_r = \sum_{i=1}^n q_i(t) \underline{\phi}_i \quad (21)$$

که در آن  $\phi_i$  بردار گام شکل  $i$  ام و  $q_i(t)$  مختصات طبیعی گام  $i$  ام است. با بکار بردن رابطه فوق در رابطه (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 می شود:

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i' \omega_{ni} \dot{q}_i + \omega_{ni}^2 q_i = A_i \sin(kx - \omega t) + B_i \cos(kx - \omega t) \quad (22)$$

که در آن

$$A_i = \frac{\phi_i^T (\omega_{ni}^2 M_i - K_i) a}{\phi_i^T M_i \phi_i} \quad (23)$$

$$B_i = \frac{\phi_i^T M_i a}{\phi_i^T M_i \phi_i} - 2\xi_i' \omega_{ni} \omega \quad (24)$$

و  $a$  بردار ضرائب حرکت موج خطی است که اجزاء آن به صورت زیر می باشد:

$$a_i = \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z_i + d)}{\sinh(kd)} \quad (25)$$

همچنین  $\omega_{ni}$  فرکانس طبیعی و  $\xi_i'$  نسبت استهلاک گام  $i$  ام سازه و  $\xi_i'$  نسبت استهلاک معادل در گام  $i$  ام مجموعه سازه و آب است.

با قرار دادن جواب پایدار معادله دیفرانسیل (۲۲) در رابطه (۲۱) و استفاده از رابطه (۱۶) می توان بردارهای  $\lambda$  و  $\lambda'$  و در نتیجه با توجه به رابطه (۱۸) اجزاء ماتریس قطری  $L$  را بدست آورد. با قرار دادن این ماتریس در رابطه (۲۵) و به کمک عملیات جبری می توان رابطه زیر را بدست آورد [۱۳]:

$$\xi_i' = \xi_i + S_i R_i \quad (26)$$

که در آن بردارهای  $S$  و  $R$  بردارهایی اند که مولفه های آنها (یعنی  $\xi_i$  و  $\xi_i'$ ) مقادیر نسبت های استهلاک در گامهای سازه اصلی و سازه محصور در آب است. مولفه های بردار  $R$  و اجزاء ماتریس  $S$  نیز با روابط صفحه بعد

تعیین می‌شوند.

$$R_i = (1 - \Omega_i^2)^2 + (2 \xi_i' \Omega_i)^2 \quad (27)$$

$$S_{ij} = \frac{4}{3\pi} \frac{\Omega_i}{m_i} \phi_i^T \{ \text{diag. } \phi_i \} G \phi_j \frac{\beta_j}{\omega_{nj}^2} \quad (28)$$

در این روابط  $\Omega_i = \omega / \omega_{ni}$  نسبت فرکانس،  $m_i = \phi_i^T M \phi_i$ ،  $\beta_j = (A_j^2 + B_j^2)^{1/2}$  است.

برای تعیین مقادیر  $\xi_i$  از رابطه (۲۶) باید از روشهای آزمون و خطا استفاده کرد ( زیرا مقادیر  $\xi_i$  به صورت غیرخطی در هر دو طرف رابطه وجود دارند). اما به علت قطری بودن ماتریس  $G$  و خواص گام شکلها مقادیر غیرقطری ماتریس  $S$  بسیار کوچکتر از مقادیر قطری اند و لذا با تقریب رضایت بخشی می‌توان از اجزای غیرقطری این ماتریس صرف نظر کرد. در نتیجه بدون نیاز به حل معادله غیرخطی (۲۶) می‌توان مقادیر  $\xi_i$  ها را از رابطه زیر بدست آورد:

$$\frac{\beta_i}{\omega_{ni}^2} \frac{\phi_i^T \{ \text{diag. } \phi_i \} G \phi_i}{\phi_i^T M \phi_i} = \frac{\pi 3}{4} (\xi_i - \xi_i) \frac{(1 - \Omega_i^2)^2 + (2 \xi_i' \Omega_i)^2}{\Omega_i} \quad (29)$$

با ساده تر کردن رابطه (۲۹) رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$\frac{|\beta_{ii}|}{\omega_{ni}^2} = \frac{3\pi}{4} (\xi_i' - \xi_i) \frac{(1 - \Omega_i^2)^2 + (2 \xi_i' \Omega_i)^2}{\Omega_i} \quad (30)$$

که در آن  $v_i = \sum_{j=1}^n \phi_{ji} G_{ij} / m_i$  و  $\xi_i$  ماتریس گامها (یعنی ماتریسی که ستونهای آن گامهای سازه است) می‌باشد.

مقادیر  $\xi_i$  را می‌توان با استفاده از دیاگرامهای که بر اساس معادله 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

اینکه به طور ظاهری جرم پایه را افزایش می‌دهد سبب افزایش نسبت استهلاک درگامهای ارتعاشی نیز می‌شود (یعنی نسبت استهلاک در هر گام به جای  $\xi$  برابر  $\xi'$  خواهد بود). به کمک مدل تحلیلی فوق علاوه بر آنکه بسا سادگی بیشتری می‌توان پایه‌ها در آب را تحلیل کرد تصویر روشن‌تری نیز می‌توان از عملکرد متقابل آب و سازه‌های آبی بدست آورد.

### نتایج مدل تحلیلی

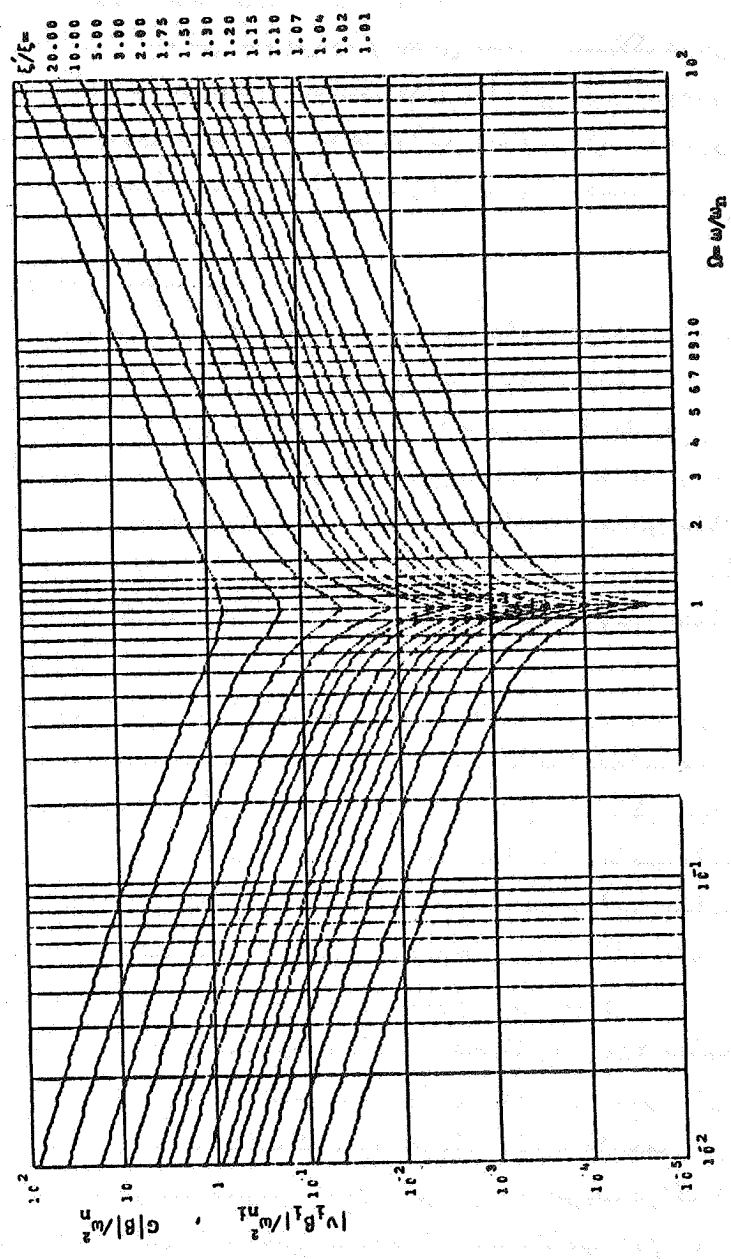
بررسی معادله<sup>۲۶</sup> (۲۶) نشان می‌دهد که ماتریس  $\xi$  را بسته به دقت مورد نظر می‌توان در دو حالت به شرح زیر در نظر گرفت:

حالت اول: در این حالت کلیه اجزاء ماتریس  $\xi$  مطابق رابطه<sup>۲۸</sup> (۲۸) در نظر گرفته می‌شود، که برای این منظور باید معادله<sup>۲۶</sup> ماتریسی (۲۶) به صورت آزمون و خطا حل شود. با حل این معادله و تعیین مقادیر  $\xi_1$  و  $\xi_2$  معادله<sup>۲۲</sup> (۲۲) را می‌توان براحتی توسط یک روش عددی (مثل روش شتاب ثابت) حل کرده و جواب کامل را با استفاده از روش اجتماع گامها بدست آورد.

حالت دوم: در این حالت فقط اجزاء قطری ماتریس  $\xi$  در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه تعیین مقادیر  $\xi_1$  و  $\xi_2$  به کمک معادله<sup>۲۹</sup> ساده<sup>۳۰</sup> (۲۹) یا (۳۰) انجام می‌گیرد (برای سهولت محاسبه می‌توان از دیاگرامهای نظیر شکل (۳) نیز استفاده کرد). بقیه مراحل محاسبات مانند حالت اول است. برای ارزیابی روش تحلیلی ارائه شده در این مقاله و نشان دادن کاربرد آن از یک مدل ساده برای پایه‌های یک اسکله تحت اثر امواج استفاده شده است. مشخصات مدل به شرح زیر است:

پایه‌ها از لوله‌های فولادی توخالی به قطر خارجی ۳۵۰ میلی‌متر و ضخامت جدار ۱۲ میلی‌متر ساخته شده‌اند. طول پایه‌ها ۱۵ متر، ارتفاع آب ۱۳ متر، جرمی از عرشه اسکله که توسط هر یک از پایه‌ها تحمل می‌شود ۴۳۲۹۰ کیلوگرم، ضریب اینرسی (Cm) برابر ۲، ضریب دراگ (Cd) برابر واحد و نسبت استهلاک داخلی پایه برای تمام گامها ۰/۰۲ و ۰/۰۵ فرض

استقلال



شکل (۳) - تعیین نسبت استهلاك معادل  $\xi'$  ، (برای  $\xi = 0.02$ )

می‌شود.

قبل از هر چیز لازم است دقت روش تحلیلی ارائه شده در این مقاله مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور نتایج حاصل از این روش برای اسکله فوق‌الذکر تحت اثر امواج با پریودهای مختلف بدست آمد و با نتایج حاصل از یک روش عددی [۱۴] مبتنی بر حل معادله غیرخطی (۱۳) مقایسه شد. نتایج این مقایسه در جدول (۱) آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از دقت خوبی برخوردار است و می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش عددی، که معمولاً با محاسبات پرهزینه همراه است، باشد.

جدول ۱ - مقایسه نتایج حاصل از روش تحلیلی و عددی برای موجها با پریود مختلف

۱۶	۶	۴	۲	۱	پریود موج (ثانیه)
۰/۲۶۶	۰/۷۱۳	۱/۰۶	۲/۱۳	۴/۲۶	نسبت فرکانس $\Omega_1 = \omega / \omega_{n1}$
۳/۲۸	۵/۳۹	۱۰/۲۴	۰/۸۱	$۱/۸۷ \times ۱۰^{-۳}$	حداکثر تغییر مکان عرشه در روش تحلیلی (سا نتیمتر)
۳/۵۲	۵/۹۵	۱۱/۵۹	۰/۸۹	$۱/۸ \times ۱۰^{-۳}$	حداکثر تغییر مکان عرشه در روش عددی (سا نتیمتر)

به منظور مقایسه نتایج مربوط به دو حالت اول و دوم و همچنین بررسی همگرایی نتایج با افزایش درجات آزادی، اسکله مورد نظر با نسبت استهلاک ۰/۰۲ در تمام گامها تحت اثر موجی با پریود ۸ ثانیه تحلیل شد، که نتایج این تحلیل در جدول (۲) خلاصه شده است. همانطور که این جدول نشان می‌دهد نتایج حالات اول و دوم بسیار نزدیک به هم اند در نتیجه می‌توان برای تعیین مقادیر  $\xi_1$  با دقت خوبی

جدول ۲ - مقایسه نتایج حالات اول و دوم وهمگرایی جوابها

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

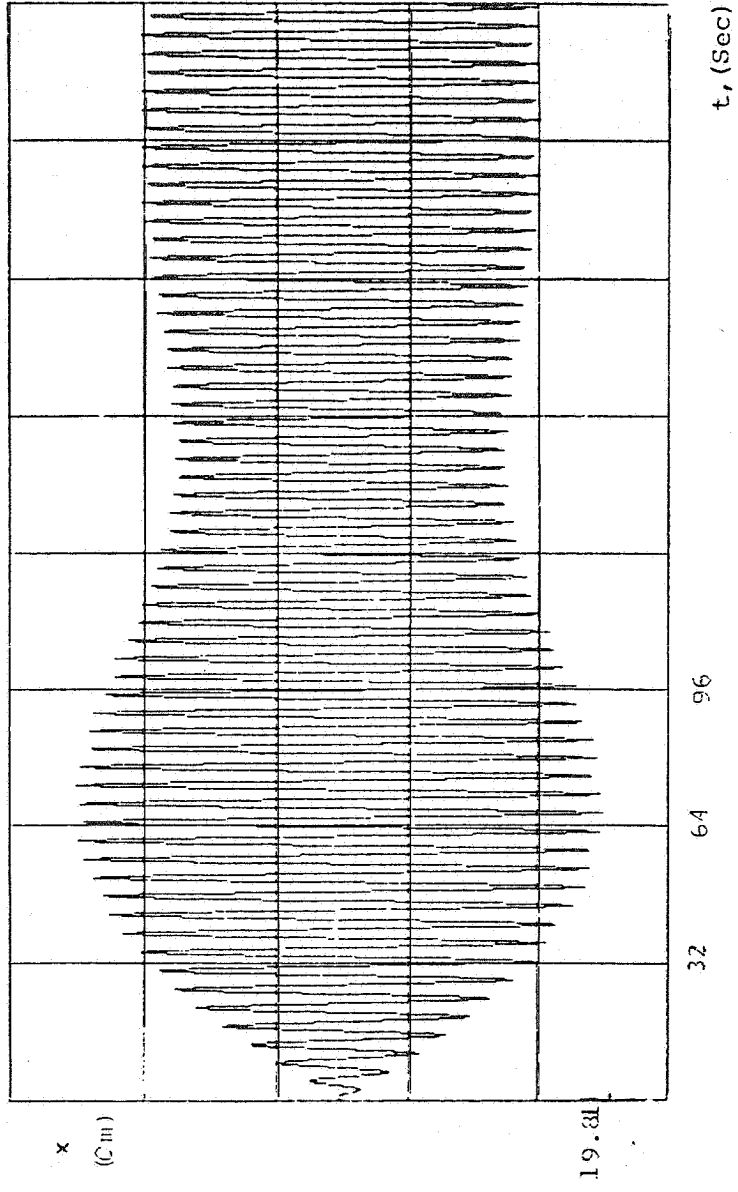
از روابط ساده<sup>۶</sup> (۲۹) یا (۳۰) استفاده کرد و نیازی به حل معادله ماتریسی غیرخطی (۲۶) برای این منظور نیست. همچنین نتایج حاصل از این روش، با افزایش تعداد درجات آزادی، همگرایی نسبتاً سریعی دارد که این موضوع در کاهش هزینه محاسبات، بخصوص در سیستمهای بزرگ، اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارد.

موضوع قابل توجه در رفتار متقابل آب و سازه‌های آبی پدیده<sup>۶</sup> تشدید در ارتعاشات سازه است. جدول (۱) نشان می‌دهد که هر قدر 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 پدیده موج طرح و اجتناب از حالت تشدید داشت.

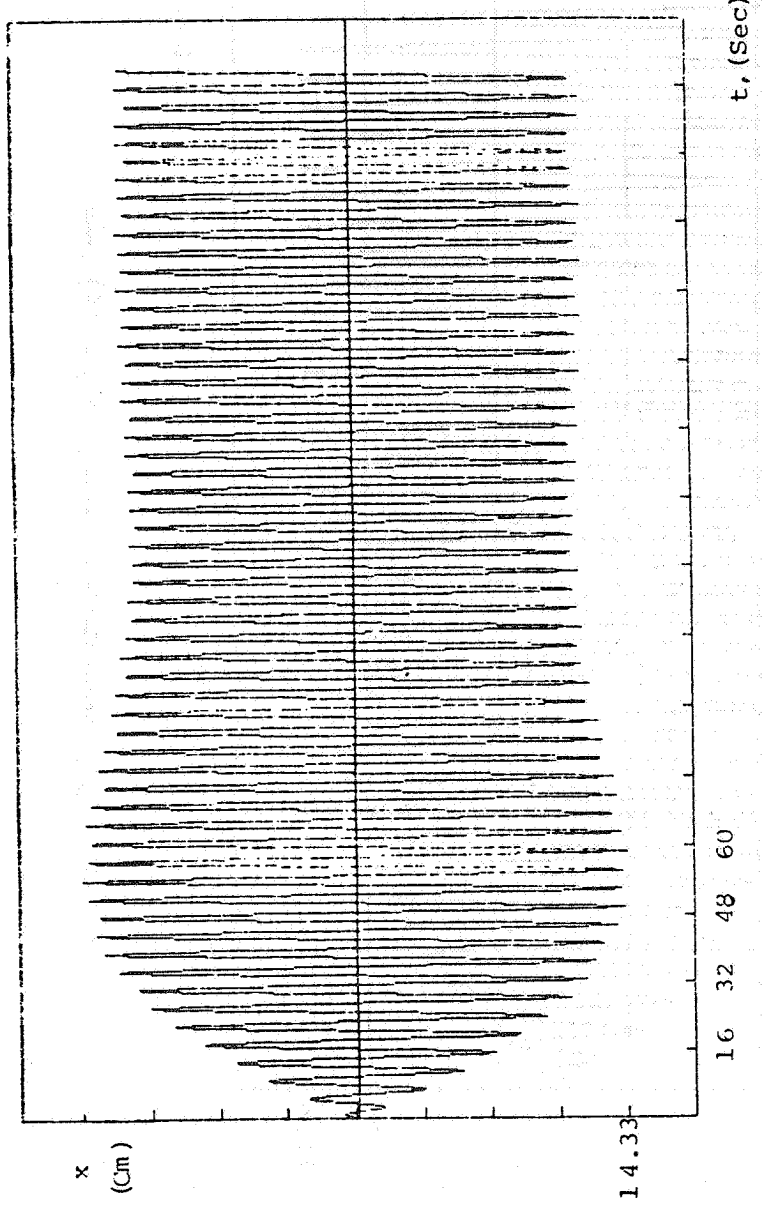


واکنش سازه‌های آبی در حالت تشدید با واکنش در سایر حالات تفاوت اساسی دارد (صرف نظر از شدت واکنش). بدین ترتیب که در حالت تشدید، واکنش دینامیکی سازه پدیدهٔ ضربان را از خود بیروزمی‌دهد. با افزایش استهلاک سازه، ضمن کاهش حداکثر واکنش، از شدت این پدیده نیز به تدریج کاسته می‌شود. اشکال (۴) تا (۶) تغییرات حرکت عرشه اسکله مورد نظر را در حالت تشدید برابرمقادیر مختلف  $\xi$  (از ۰/۰۱ تا ۰/۰۳) نشان می‌دهد.

استقلال

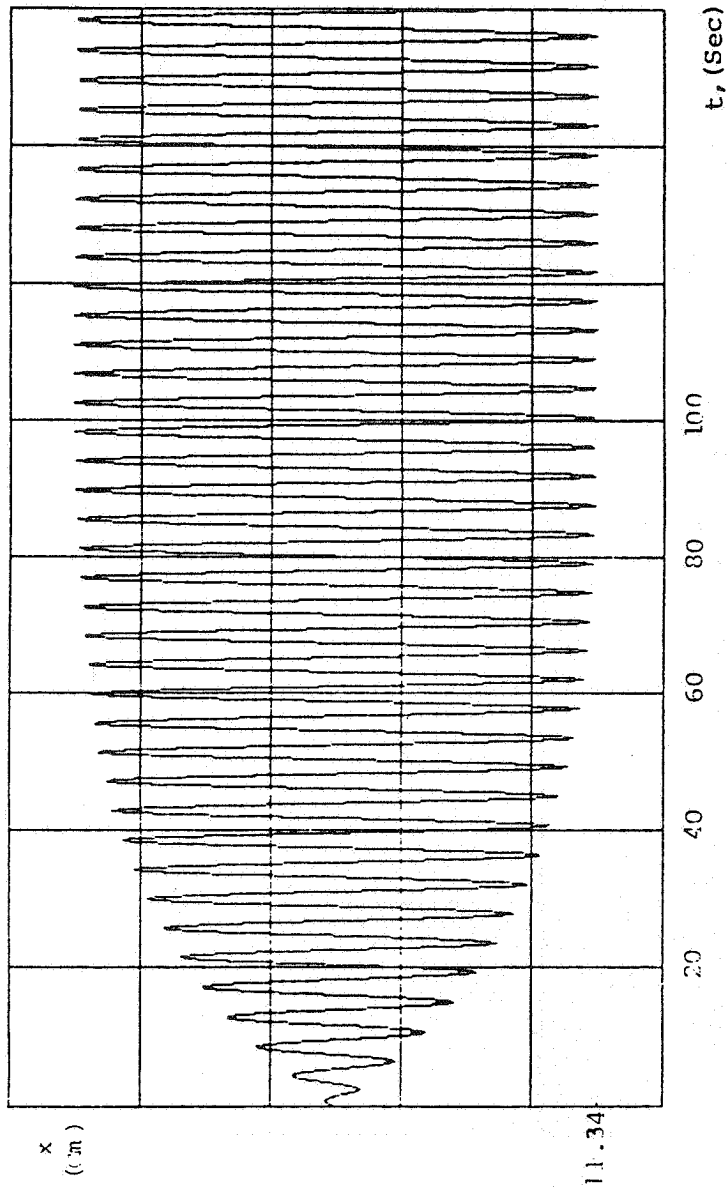


شکل (۴) - واکنش عرشه در حالت تشدید برای  $\xi = 0.01$



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

استقلال



شکل (۶) - واکنش عرشه در حالت تشدید برای  $\xi = 0.03$

## خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله یک روش تقریبی برای خطی کردن معادلات غیرخطی ارتعاش پایه‌ها 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 مجموعه سازه - آب بدست آمد و با استفاده از آن معادله 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 سازه 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.

## 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 Offshore Structures, " Proc. First Int. conf. on the Behavior of

- 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 Towers 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- میر محمد صادقی، حسین، "آنالیز دینامیکی رفتار متقابل آب و سازه‌های دریایی". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران،

دانشگاه صنعتی اصفهان ، ۱۳۶۶ .

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