

## رفتار دینا میکی اسکله ها تحت اثر امواج زلزله

امیر مسعود ملک\* و امیر مسعود کی نیا\*\*

### چکیده

هدف مقاله حاضر فرموله کردن معادلات حاکم بر اثرات دینا میکی متقابل بین آب و اعضاء کم قطر قرار گرفته در آن، و نیز ارائه روش عددی مناسبی برای حل این معادلات میباشد.

مدل تحلیلی بکار رفته بصورت پایه ای در نظر گرفته شده که قسمتی از آن در خاک و بخشی در آب قرار گرفته است. در قسمت فوقانی پایه جرم متمرکزی قرار گرفته و از حرکت چرخشی در آن نقطه بطور کامل جلوگیری شده است تا بدین طریق اثرات صلبیت زیاد عرشه بر پایه منظور گردد. پایه متشکل از مجموعه ای از المانهای تیر فرض شده، و اثرات نرمی خاک (اثرات متقابل بین قسمت مدفون پایه و خاک) با در نظر گرفتن سختی دینا میکی برای پایه در معادلات وارد شده است.

نیروی هیدرو دینا میکی ناشی از امواج و نیز حرکت پایه در آب، از طریق معادله موریسون تخمین زده شده است. با توجه به اینکه معادله مزبور دارای عبارت غیر خطی هم جهت با سرعت نسبی پایه و آب میباشد برای حل معادله از انتگرال گیری عددی استفاده شده است، که در آن سرعت سازه در هر مرحله با سرعت در مرحله قبل تخمین زده می شود. دقت این تقریب با مطالعات پارامتریک مورد بررسی قرار گرفته است.

با استفاده از مدل مزبور، نوسانات اسکله در مقابل امواج و نیز واکنش آن در مقابل زلزله مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این مطالعه مشخص شد که حداکثر واکنش اسکله تحت اثر امواج هنگامی اتفاق

\*مربی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان

\*\*استادیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان

می‌افتد که فرکانس موج با فرکانس سازه برابر باشد. همچنین با بررسی چند حالت محدود، ملاحظه شد و اکنش یک اسکله خاص تحت اثر زلزله فقط بمقدار جزئی به وجود آب در اطراف پایه بستگی دارد و بنا بر این هنگام تحلیل این نوع اسکله‌ها تحت اثر زلزله، در اغلب حالات می‌توان از اثرات وجود آب در اطراف پایه‌ها چشم‌پوشی کرد.

#### مقدمه

در سالهای اخیر مطالعات زیادی در زمینه‌های مختلف مربوط به سازه‌های دریایی صورت گرفته است. بخش مهمی از این مطالعات در زمینه تعیین بارهای وارده بر این سازه‌ها در اثر عوامل طبیعی، و نیز ارائه روشهایی برای تحلیل آنها بوده است.

از جمله سازه‌های دریایی، سازه‌های استوار بر قابهای صفحه‌ای یا فضایی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به اسکله‌ها و سکوها دریایی اشاره کرد. آنچه در ارتباط با آنالیز این سازه‌ها اهمیت خاصی دارد تعیین بارهای ناشی از امواج و تحلیل سازه برای آن بارها، یا عبارت دیگر بررسی مسئله اثرات متقابل آب و سازه<sup>۱</sup> می‌باشد.

در سال ۱۹۵۰، موریسون و همکارانش [۱] معادله‌ای برای تخمین نیروهای وارده از امواج بر پایه‌های عمودی کم‌قطر ارائه کردند که خود زیر بنای مطالعات بعدی قرار گرفت. این معادله بر ضرایبی تجربی استوار است که تخمین این ضرایب موضوع تحقیق بسیاری از محققین دیگر نظیر کولیگان و کارپنتر [۲]، [۳] و سارپ‌کایا [۴] قرار گرفته است. بررسی معادله در حالتیکه حرکات خود پایه نیز در نظر گرفته شود توسط افرادی چون نیومن [۵] دنبال شده است.

برای استفاده از معادله موریسون باید بتوان با استفاده از تئوری موج مناسبی مشخصات هیدرودینامیکی ذرات آب را بدست آورد. تئوری موج خطی اولین بار توسط ایری در سال ۱۸۴۵ ارائه شد و سپس توسط

#### 1. Fluid-Structure Interaction

استوکس [۶] تئوری دقیق تری پیشنهاد گردید. از آن تاریخ به بعد مقالات بسیاری در زمینه تئوری‌های امواج و نتایج حاصل از آن نوشته شده که از آن - جمله می‌توان به کارهای لمب، ویگل و استوکرا اشاره کرد [۴].

بدلیل وجود عبارت غیرخطی نیروی دراگ در معادله موریسون، رفتار دینامیکی این نوع سازه‌ها تحت اثر امواج غیرخطی است. بهمین دلیل حل مسایل دینامیکی آنها پیچیده تر از مسایل متداول است. محققین زیادی درصدد تعیین روشهایی برای حل مشکل غیرخطی بودن معادلات حرکت بوده‌اند که از آن جمله می‌توان به روشهای ارائه شده توسط پنزین [۷] و نیز دائو و پنزین [۸] اشاره کرد.

استفاده از روشهای عددی برای حل معادلات ارتعاش پایه درآب موضوع تحقیقات انجام شده توسط افرادی نظیر اندرسون و ماتسون [۹]، استوکارد [۱۰]، لیو و پنزین [۱۱]، وجاین و داتا [۱۲] بوده است. برخی از این محققین از روشهای آنالیز در حوزه زمان<sup>۱</sup>، برخی دیگر از آنالیز در حوزه فرکانس<sup>۲</sup> استفاده کرده‌اند.

در این مقاله، اثرات هیدرودینامیکی امواج بر سازه‌های استوار بر پایه‌های واقع در آب، مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف اصلی از این مقاله ارائه یک مدل مناسب، فرموله کردن معادلات حرکت و تبیین متدولوژی حل آنهاست. در ادامه برای مشخص تر شدن جنبه‌های کاربردی تحقیق، جزئیات مدل برای آنالیز دینامیکی اسکله تحت اثر امواج و زلزله ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که در مورد اسکله‌ها مسائل متعددی از جمله شکست امواج، طرح اعضاء با توجه به مسائلی نظیر خستگی، نحوه انتخاب موج یا زلزله طراحی، تعدد پایه‌ها و تاثیر متقابل آنها بر یکدیگر، مطرح است [۱۳] که با استفاده از متدولوژی که برای تحلیل اسکله‌ها در این مقاله ارائه می‌شود می‌توان تاثیر این عوامل را در

---

1. Time Domain    2. Frequency Domain

مطالعات خاص هریک مورد بررسی قرار داد .  
 برای بررسی رفتار دینامیکی اسکله ، هریک از پایه ها بصورت یک عضو خمشی عمودی در نظر گرفته شده و با استفاده از تکنیک اجزای محدود مدل می شود . برای تعیین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پایه از شکل توسعه یافته معادله موریسون (با منظور داشتن حرکات پایه ) استفاده میشود . بعلت غیرخطی بودن این معادله ، معادله دیفرانسیل حرکت نیز بصورت غیرخطی در می آید که برای حل آن از روش عددی شتاب متوسط ثابت همراه با یک روش مناسب برای جا یگزینی قسمت غیرخطی استفاده می شود . به کمک این مدل تاثیر پیوند موج بر رفتار سازه بررسی خواهد شد .  
 بعلاوه اثر وجود آب در اطراف پایه بر رفتار آن تحت اثر زلزله مورد مطالعه قرار گرفته و نتیجه گیری های عملی صورت خواهد گرفت .

#### نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پایه های اسکله

مسئله اساسی که بررسی دینامیکی اسکله را از سازه های متداول متمایز می کند ، وجود آب در اطراف پایه هاست . وجود آب نه تنها سبب وارد شدن نیروی هیدرودینامیکی ناشی از امواج بر پایه ها می شود بلکه بر ارتعاش اسکله تحت اثر نیروهای دیگر (مثلا " نیروهای حاصل از زلزله ) نیز تاثیر می گذارد .

برای تعیین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پایه از معادله موریسون [ ۱ ] استفاده می شود . این معادله برای مواردی که نسبت قطر پایه به طول موج از ۱/۵ تا ۱/۱۰ کوچکتر است قابل استفاده بوده و در حالت کلی بصورت زیر نوشته می شود :

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D |\dot{U}_w - \dot{U}| (\dot{U}_w - \dot{U}) + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \ddot{U}_w - \rho (C_M - 1) \frac{\pi D^2}{4} \ddot{U} \quad (1)$$

که در آن :

$F$  = نیروی افقی وارد بر واحد طول پایه

$\rho$  = جرم مخصوص آب

$D$  = قطر پایه

$$C_M = \text{ضریب اینرسی ۱}$$

$$C_D = \text{ضریب دراگ ۲}$$

$$\dot{U}_w, \ddot{U}_w = \text{سرعت و شتاب افقی ذرات آب در محل محاسبه نیروها ۳}$$

$$\dot{U}, \ddot{U} = \text{سرعت و شتاب افقی پایه در محل محاسبه نیروها ۴}$$

لازم به تذکر است که ضرایب دراگ و اینرسی ( $C_D, C_M$ ) ضرایبی تجربی می‌باشند که به عوامل متعددی نظیر عدد رینولدز<sup>۳</sup> و عدد کولیگان-کارپنتر<sup>۴</sup> و شرایط فیزیکی پایه بستگی دارند. در این مقاله مقدار این ضرایب در طول پایه ثابت فرض شده است.

همانطوری که از شکل کلی معادله موریسون استنباط می‌شود در حل معادلات حرکت دو مشکل اصلی بروز می‌کند: اولاً، نیروی وارد بر پایه در هر لحظه تابعی از سرعت نسبی بین آب و پایه است که مقدار این سرعت نسبی قبل از حل معادلات حرکت مجهول است، بدین ترتیب مسئله فوق از نوع مسایل عمل متقابل<sup>۵</sup> می‌باشد. ثانیاً، با توجه به علامت قدر مطلق جهت نیروی وارده در مراحل مختلف ارتعاش پایه تغییر می‌کند و بعلاوه نیروهای وارده در هر لحظه بصورت تابعی غیر خطی می‌باشند. از این روست که معمولاً برای حل معادلات حرکت این نوع سازه‌ها از روش‌های عددی استفاده می‌شود.

همانطور که در معادله (۱) مشاهده می‌شود برای استفاده از معادله موریسون لازم است سرعت و شتاب ذرات آب در نقاط مختلف پایه محاسبه شوند و برای این منظور باید از یکی از تئوری‌های موج استفاده کرد. تئوری‌های مختلفی برای امواج ارائه شده است که از آن جمله می‌توان تئوری موج خطی، تئوری امواج استوکس و تئوری موج تروکوئیدی را نام برد [۴]، [۱۳]، [۱۴].

امروزه بدلیل سهولت بیشتر و وسعت دامنه کاربرد از تئوری موج

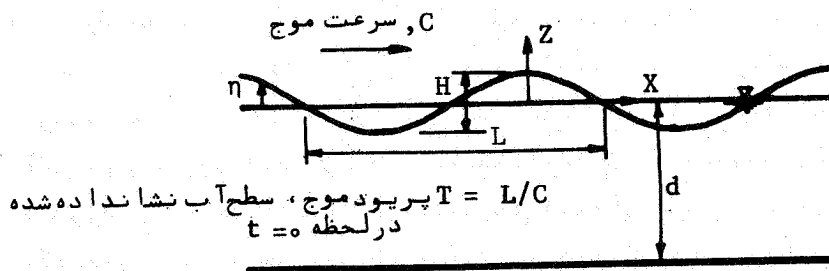
- 
1. Inertial Coefficient, 2. Drag Coefficient, 3. Reynolds Number
  4. Keulegan-Carpenter Number, 5. Interaction

خطی بیش از سایر تئوریها استفاده می‌شود که در این مقاله نیز از همی-تئوری استفاده شده است.

در تئوری موج خطی، که تئوری موج ایری<sup>۱</sup> نیز نامیده می‌شود، یک موج بوسیله کمیت‌های زیر معرفی می‌شود (شکل ۱):

$H$  = دامنه موج  
 $T$  = پریود موج  
 $L$  = طول موج  
 $K$  = عدد موج<sup>۲</sup>  
 $C$  = سرعت انتشار موج  
 $\omega$  = فرکانس زاویه‌ای موج  
 که این کمیت‌ها بوسیله روابط زیر با یکدیگر مرتبطند:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad K = \frac{2\pi}{L}, \quad C = \frac{\omega}{K}$$



شکل ۱- سطح آب در لحظه  $t=0$  و معرفی کمیت‌های مختلف موج

علاوه بر روابط فوق، مطابق تئوری موج خطی سرعت موج و طول موج نیز از یکدیگر مستقل نبوده و رابطه زیر که رابطه پراکندگی خطی<sup>۳</sup> نامیده می‌شود بین آنها برقرار است [۴]، [۱۴]:

$$\omega^2 = g k \tanh(kd) \quad (2)$$

1. Airy, 2. Wave Number, 3. Linear Dispersion Relation,

ویا :

$$c^2 = \frac{g}{k} \operatorname{tgh}(kd) \quad (۳)$$

بنابراین برای مشخص کردن یک موج بخصوص می‌توان از  $(L, d, H)$  ویا  $(T, d, H)$  استفاده کرد. هرگاه محورهای  $x$  و  $z$  مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شوند، معادله سطح آب مطابق تئوری موج خطی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (۴)$$

همچنین سرعت و شتاب افقی ذرات آب در نقاط مختلف پایه از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$\dot{U}_w = \frac{\pi H}{T} \frac{\operatorname{Cosh}(k(z+d))}{\operatorname{Sinh}(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (۵)$$

$$\ddot{U}_w = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\operatorname{Cosh}(k(z+d))}{\operatorname{Sinh}(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (۶)$$

#### تا شیر انعطاف پذیری خاک در واکنش پایه‌ها

پایه‌های اسکله‌ها غالباً از نوع لوله‌های فولادی توخالی است که بعد از کوبیده شدن بوسیله بتن پرمی‌شوند. همچنین گاهی از شمعی‌های بتنی پیش ساخته استفاده می‌شود. پایه‌ها تا عمق مشخصی در خاک فرو می‌روند، لذا به علت انعطاف پذیری خاک لازم است در تحلیل اسکله اثرات دینامیکی قسمت مدفون پایه‌ها و خاک اطراف آن در محاسبات منظور شود، و یا به عبارت ساده تر لازم است سختی فوندانسیون (که در این حالت متشکل از شمعی‌های مجزا است) در نظر گرفته شود.

برای این منظور می‌توان از روابط تقریبی بدست آمده برای سختی و استهلاک شمعی‌ها در خاک استفاده کرد در این مقاله از روابط پیشنهاد شده توسط بلینی [۱۵] استفاده شده است.

منشاء استهلاک در ارتعاش شمعی‌ها، وجود استهلاک داخلی در جسم

## استقلال

شمع و خاک و نیز تشعشع انرژی حاصل از ارتعاش شمع است. معمولاً سهم عامل اخیر از سهم مربوط به استهلاك داخلی بیشتر است و لذا در این مقاله از استهلاك داخلی خاک و شمع صرف نظر شده است. در این صورت می‌توان با استفاده از روابط پیشنهاد شده توسط بلینی [۱۵]، ماتریس‌های سختی و استهلاك شمع متناظر با دودرجه آزادی انتقالی و دورانی را بصورت زیر نوشت:

$$\mathcal{K} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{x\theta} \\ k_{\theta x} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathcal{C} = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{x\theta} \\ C_{\theta x} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن:

$$k_{xx} = 2 \frac{E_p I}{R^3} \left(\frac{E_s}{E_p}\right)^{.75} \quad (9)$$

$$k_{x\theta} = -1.2 \frac{E_p I}{R^2} \left(\frac{E_s}{E_p}\right)^{.5} \quad (10)$$

$$k_{\theta\theta} = 1.6 \frac{E_p I}{R} \left(\frac{E_s}{E_p}\right)^{.25} \quad (11)$$

$$C_{xx} = \frac{2R}{V_s} k_{xx} \quad (12)$$

$$C_{x\theta} = \frac{1.5R}{V_s} k_{x\theta} \quad (13)$$

$$C_{\theta\theta} = \frac{.5R}{V_s} k_{\theta\theta} \quad (14)$$



در این روابط  $E_p$  مدول الاستیسیته شمع،  $E_s$  مدول الاستیسیته خاک،  $I$  ممان اینرسی مقطع شمع،  $R$  شعاع شمع و  $v_s$  سرعت امواج برشی در خاک است که با روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$v_s = \frac{\sqrt{G_s}}{\sqrt{\rho_s}} \quad (15)$$

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+v_s)} \quad (16)$$

در این روابط  $\rho_s$  و  $v_s$  به ترتیب دانسیته جرمی و ضریب پواسون خاک است. بنابراین برای وارد کردن اثرات دینامیکی شمع و خاک اطراف آن در ارتعاش پایه کافیت مقادیر فوق به اعضای متناظر در ماتریس‌های سختی و استهلاک پایه افزوده شوند (شکل ۲).

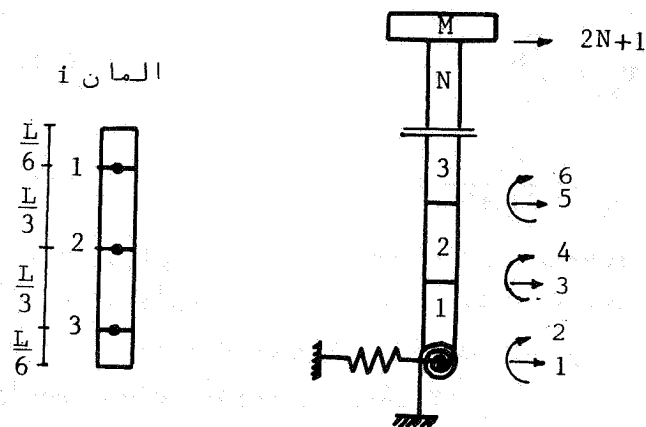
#### فرموله کردن معادلات حرکت و حل آنها

هدف اصلی در این مقاله بررسی ارتعاشات اسکله‌های استوار بر شمع است. برای این منظور و نیز برای کاهش حجم محاسبات تنه‌ایکی از پایه‌های اسکله همراه با جرم متمرکزی در انتهای آن، که معرف سهم هر پایه از جرم کل عرشه است، در نظر گرفته شد. این پایه بر روی فنرهایی که معرف سختی و استهلاک فونداسیون است و مقدار آنها از روابط ۹ تا ۱۴ بدست می‌آیند قرار داده شد. به علاوه با توجه به سختی زیاد عرشه و صرف نظر کردن از تغییر طول پایه‌ها، دوران پایه در محل عرشه تقریباً " صفر است. شکل ۲ این مدل تحلیلی را نشان می‌دهد. این مدل با استفاده از روش اجزای محدود به مجموعه‌ای از المان‌های تیر با جرم و سختی گسترده تقسیم شد که معادلات حرکت آن در ادامه این مقاله ارائه شده است.

از آنجا که معادلات حرکت بصورت غیرخطی می‌باشند، برای حل مسئله نمی‌توان از روش اجتماع گامها استفاده کرد. در این حال لازم است روشهای عددی قدم به قدم مورد استفاده قرار گیرد، بنابراین

#### 1. Mode Superposition

با یدما تریس استهلاک کل سازه بدست آید. در این مقاله برای تشکیل ما تریس استهلاک از روش ریلی [۱۶]، [۱۷] استفاده شده است.



شکل ۲ - مدل تحلیلی برای بررسی ارتعاش سازه

هما نظوریکه قبلا" توضیح داده شد، برای حل معادلات حرکت از روش شتاب متوسط ثابت استفاده شده است. برای حذف عبارت غیرخطی در نیروهای وارده، لازم بوده است تخمینی از سرعت دستگاه در هر لحظه در نظر گرفته شود. در این مقاله برای تخمین این مقدار از سرعت دستگاه در لحظه قبل استفاده شده و با توجه به کوتاه بودن فواصل زمانی بین لحظاتی مختلف که معادلات در آن زمانها حل می شود این تقریب با دقت مناسب جوابگویی و نتایج بدست آمده (که در ادامه ارائه خواهد شد) این موضوع را تأیید کرده است.

معادله ما تریسی حرکت برای دستگاه چند درجه آزاد (مدل نسیان داده شده در شکل ۲) به صورت زیر نوشته می شود:

$$\ddot{M}\ddot{U} + \dot{C}\dot{U} + kU = R(t) \quad (17)$$

که در آن  $K$  و  $M$  و  $C$  به ترتیب ماتریسهای سختی، جرم و استهلاک پایه، و  $\ddot{U}$  و  $\dot{U}$  و  $U$  به ترتیب بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب در درجات آزادی دستگاه ارتعاشی است.

برای تعیین بردار نیروهای گره‌ای،  $R_i(t)$ ، لازم است نیروهای وارد بر المانهای پایه بدست آید. برای تعیین نیروهای وارد بر هر المان  $i$ ،  $R_{ni}(t)$ ، روی المان سه نقطه بفواصل  $\frac{L}{6}$ ،  $\frac{L}{4}$ ،  $\frac{L}{6}$  (طول المان) از ابتدا (یا انتها) در نظر گرفته شده و با استفاده از معادله موریسون مقدار نیروی وارده بر واحد طول، در هر یک از این نقاط بدست آمده و برای محدوده‌ای به اندازه  $\frac{L}{6}$  از بالا و پایین این نقاط نیروی وارده یکنواخت فرض شده است. برای چنین محاسبه‌ای نیاز به سرعت و شتاب نقاط مذکور می‌باشد. در صورتی که  $\ddot{U}_{ni}$ ،  $\dot{U}_{ni}$ ،  $U_{ni}$  به ترتیب بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب این نقاط باشند، می‌توان نوشت [۱۸]:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ni} &= T_{ni} U_{ni} \\ \dot{\bar{U}}_{ni} &= T_{ni} \dot{U}_{ni} \\ \ddot{\bar{U}}_{ni} &= T_{ni} \ddot{U}_{ni}\end{aligned}\quad (18)$$

که در آن:

$$T_{ni} = \begin{bmatrix} \frac{25}{27} & \frac{25L}{216} & \frac{2}{27} & -\frac{5L}{216} \\ \frac{1}{2} & \frac{L}{8} & \frac{1}{2} & -\frac{L}{8} \\ \frac{2}{27} & \frac{5L}{216} & \frac{25}{27} & -\frac{25L}{216} \end{bmatrix}\quad (19)$$

و در صورتی که  $F_{ni}$  بردار نیروی هیدرودینامیکی المان  $i$  در سه نقطه فوق‌الذکر باشد، نیروهای معادل در درجات آزادی المان با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$R_i = T_{ni}^T F_{ni}\quad (20)$$

بنابراین با استفاده از معادله موريسون (رابطه ۱) و روابط فوق بردار نیروهای  $R_i(t)$  برای المان  $i$  در حالت کلی بصورت زیر بدست می‌آید [۱۸]:

$$R_i = R_{IN} - R_{AD} + R_{DR} \quad (21)$$

که در آن:

$$R_{IN} = \frac{L}{3} \frac{\rho \pi D^2}{4} C_M T^T \ddot{U}_{wi} \quad (22)$$

$$R_{AD} = (C_M - 1) \frac{\rho \pi D^2}{4} \frac{L}{3} T^T T \ddot{U}_i \quad (23)$$

$$R_{DR} = \frac{\rho D C_D}{2} \frac{L}{3} T^T (\dot{U}_{wi} - T \dot{U}_i) \quad (24)$$

در روابط فوق بردارهای  $\ddot{U}_{wi}$ ،  $\dot{U}_{wi}$  سرعت و شتاب ذرات آب در سه نقطه فوق الذکر می‌باشند که مقدار آنها با استفاده از تئوری موج خطی تعیین می‌شود (روابط ۶ و ۵). بردار  $R_i(t)$  از سوار کردن بردارهای  $R_i(t)$  برای المانهای مختلف پایه بدست می‌آید. با استفاده از روش شتاب ثابت متوسط، معادله بازگشتی زیر برای جوابهای لحظه  $(t_{i+1})$  بر حسب لحظه قبلی  $(t_i)$  در معادله ۱۷ حاصل می‌شود:

$$U_i(t_{i+1}) = (k C_M)^{-1} \left[ (I + C_M) U_i(t_i) + \left(-\frac{1}{2} C_M + I\right) \dot{U}_i(t_i) \Delta t + \frac{\Delta t}{2} F_F(t_i) + \frac{\Delta t}{2} F_M R_i(t_{i+1}) \right] \quad (25)$$

$$\dot{U}_i(t_{i+1}) = (I + C_M)^{-1} \left[ \dot{U}_i(t_i) - F_F(t_i) + F_M R_i(t_{i+1}) - k M U_i(t_{i+1}) \right] \quad (26)$$

ماتریس‌های بکار رفته در روابط فوق عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 C_{\mathcal{M}} &= \frac{1}{2} M'^{-1} C \Delta t \\
 K_{\mathcal{M}} &= \frac{1}{2} M'^{-1} K \Delta t \\
 F_{\mathcal{M}} &= \frac{1}{2} M'^{-1} \Delta t \\
 F_{\mathcal{F}} &= \frac{1}{2} M'^{-1} (C\dot{U} + KU - R) \Delta t \\
 K_{\mathcal{CM}} &= K_{\mathcal{M}} \frac{\Delta t}{2} + I + C_{\mathcal{M}}
 \end{aligned} \tag{27}$$

که در آن‌ها ماتریس  $M'$  مجموع ماتریس جرم ( $M$ ) و جرم افزوده شده بوده و از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$M' = M + (CM - 1) \frac{\rho \pi D^2}{4} \frac{L}{3} \frac{T}{\mathcal{M}} \frac{T}{\mathcal{M}} \tag{28}$$

در مواردی که بررسی اثرات زلزله مورد نظر باشد می‌توان نشان داد که کافیت در هر لحظه بردار زیر به بردار نیروهای وارده بردار جات آزادی مورد نظر ( $R$ ) اضافه شود [۱۸]:

$$F_{\mathcal{L}}^* = C \frac{L}{\mathcal{M}} \dot{U}_{\mathcal{G}}(t) + K \frac{L}{\mathcal{M}} U_{\mathcal{G}}(t) \tag{29}$$

که در آن  $U_{\mathcal{G}}(t)$  و  $\dot{U}_{\mathcal{G}}(t)$  به ترتیب تغییر مکان و سرعت زمین است و بردار  $I_{\mathcal{L}}$  نیز عبارت است از:

$$I_{\mathcal{L}} = [1, 0, 1, 0, \dots, 1, 0]^T \tag{30}$$

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی

بر اساس مطالب تئوریک فوق، یک برنامه کامپیوتری تدوین شد و با استفاده از آن واکنش یک اسکله مشخص تحت اثر امواج مختلف زلزله مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش نتایج حاصل ارائه می‌شود.

اسکله انتخاب شده دارای مشخصات زیر است:

پایه‌ها از لوله‌های فولادی توخالی با قطر خارجی ۳۵۰ میلی‌متر و ضخامت

جداره ۱۲ میلی‌متر، طول پایه‌ها ۱۵ متر، ارتفاع آب ۱۳ متر، جرمی از عرشه که توسط هریک از پایه‌ها تحمل می‌شود ۴۳۹۲۰ کیلوگرم، ضریب اینرسی ( $C_M$ ) برابر با ۲، ضریب دراگ ( $C_D$ ) برابر واحد، ضریب استهلاک داخلی سازه در گام‌های اول و دوم مساوی با ۵٪.

مشخصات خاک برای این مثال بصورت زیر در نظر گرفته شد:

سرعت امواج برشی در خاک ( $V_g$ ) برابر با ۱۰۰ متر بر ثانیه، دانسیته خاک ( $\rho_g$ ) برابر با ۱۷۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب پواسون خاک ( $\nu_g$ ) مساوی ۰/۴.

چون در این مطالعه از روش اجزای محدود استفاده شده است، لازم بود که ابتداء همگرایی جوابها با افزایش تعداد المانها کنترل شود. این موضوع در مثالهای متعددی بررسی شد. مثلاً برای حالتی که پریود موج ۸ ثانیه و دامنه موج ۳ متر باشد و با مشخصاتی که قبلاً برای اسکله و خاک بیان شد، نتایج حاصل در جدول ۱ آورده شده است. همانطوریکه در ستونهای چهارم و پنجم جدول مشاهده می‌شود، همگرایی جوابها با افزایش تعداد المانها کاملاً مشخص است.

جدول ۱ - کنترل همگرایی جوابها با افزایش تعداد المانهای بکار رفته

حالت	تعداد المانها	طول المانها (متر)	حداکثر تغییر مکان عرشه (سانتیمتر)	حداکثر تغییر مکان پایه در سطح آب (سانتیمتر)
I	۲	۱۳۰۲	۳/۵۸۹	۳/۴۷۱
II	۳	۲×۶/۵۰۲	۳/۶۵۴	۳/۵۳۱
III	۴	۳×۴/۳۳۰۲	۳/۶۶۶	۳/۵۴۳
IV	۵	۴×۳/۲۵۰۲	۳/۶۷۰	۳/۵۴۷

همچنین به دلیل استفاده از روش عددی و نیز تقریبات بکار رفته در این روش، یعنی جایگزینی سرعت هر لحظه با سرعت لحظه قبل (برای حذف جمله غیرخطی)، لازم بود دقت و همگرایی جوابها، با زای کاهش فواصل زمانی ( $\Delta t$ ) نیز بررسی شود. مشخصات اصلی سازه و موج نظیر حالت قبل در نظر گرفته شده و برای فواصل زمانی متفاوت  $\Delta t$ ، آنالیز دینامیکی انجام گرفت. شکل منحنی نوسان حاصل در تمامی حالات تقریباً "یکسان و مقدار تغییر مکان حداکثر عرشه مطابق جدول ۲ بدست آمد. لازم به ذکر است که با مشخصات یاد شده، پریود گام اول ارتعاش سازه ( $t_1$ ) برابر ۴/۲۸ ثانیه بوده است.

جدول ۲- کنترل همگرایی جوابها با کاهش فواصل زمانی  $\Delta t$

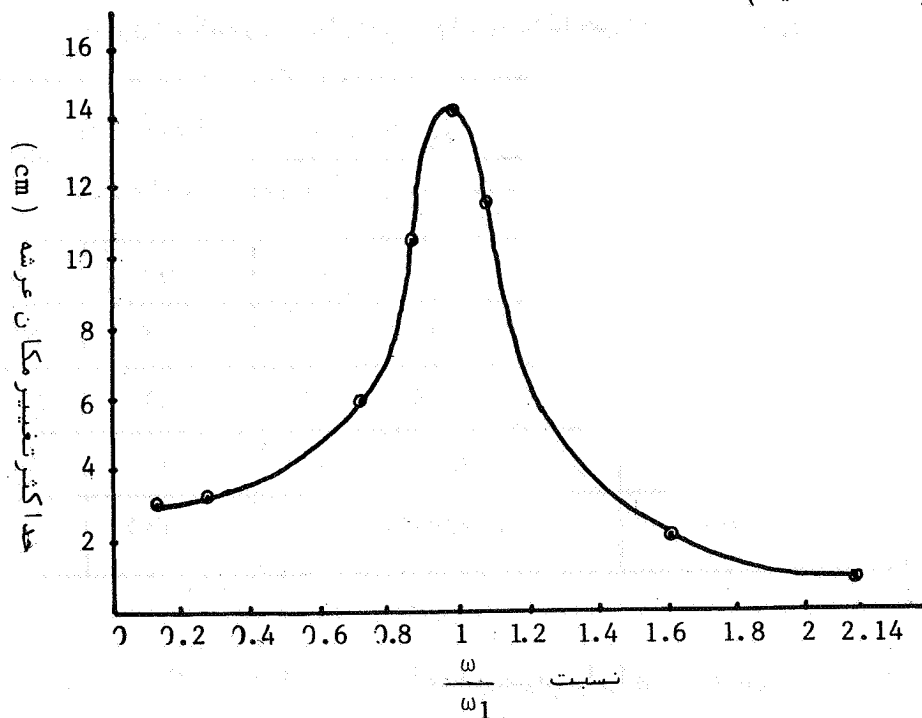
حداکثر تغییر مکان عرشه (سانتیمتر)	$\Delta t$		حالت
	فواصل زمانی $\Delta t$ (ثانیه)	پریود گام اول ارتعاش سازه ( $T_1$ )	
۳/۹۹۷	۰/۸	۰/۲	I
۳/۷۳۰	۰/۴	۰/۱	II
۳/۵۹۸	۰/۲	۰/۰۵	III
۳/۵۹۲	۰/۱	۰/۰۲۵	IV
۳/۵۹۲	۰/۰۵	۰/۰۱۲۵	V

همانطوریکه از جدول فوق مشاهده میشود به زای مقادیر  $\Delta t < 0/05 T_1$

جوابها تقریباً " همگرا شده و مستقل از فاصله زمانی است.

به زای  $\Delta t = 0/1 T_1$  خطایی در حدود ۴% وجود دارد که قابل اغماض است.

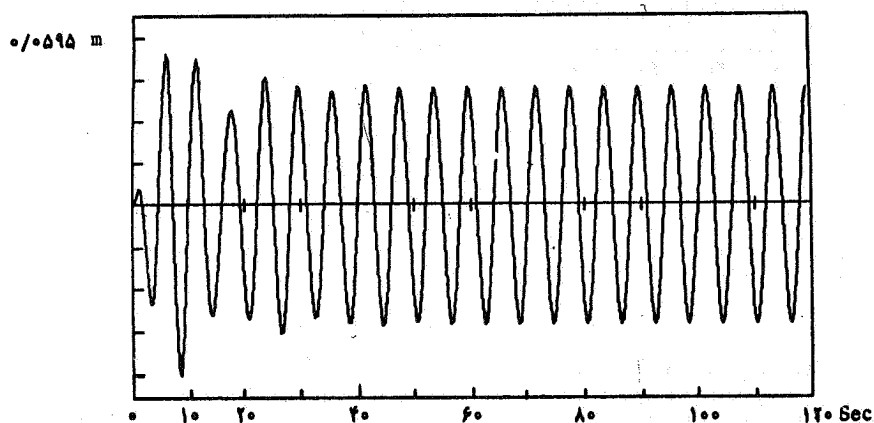
بنابراین شرط  $\Delta t < \omega / T_1$  که برای تضمین دقت کافی در روش شتاب ثابت متوسط ذکر شده است، برای این نوع مطالعات هم مناسب بنظر می‌رسد. بررسی رفتار دینامیکی اسکله تحت اثر امواج با پریودهای مختلف بخشی از این مطالعه بوده است. با مشخصاتی که قبلاً ذکر شد کوچکترین فرکانس زاویه‌ای طبیعی برای مدل بکا رفته ( $\omega_1$ ) مساوی  $1/466$  رادیان بر ثانیه بدست آمد. برای بررسی اثرات پریود موج بر واکنش، برنامه برای دامنه موج ۳ متر و پریود موجهای مختلف بین ۱ تا ۳۲ ثانیه اجرا شد. شکل ۳ تغییرات حداکثر جابجایی عرشه را بر حسب نسبت فرکانس زاویه‌ای موج به  $\omega_1$  نشان می‌دهد. همانطوریکه در این تصویر مشاهده می‌شود این تغییرات دارای مقدار حداکثری در حوالی نسبت واحد می‌باشد (حالت تشدید).



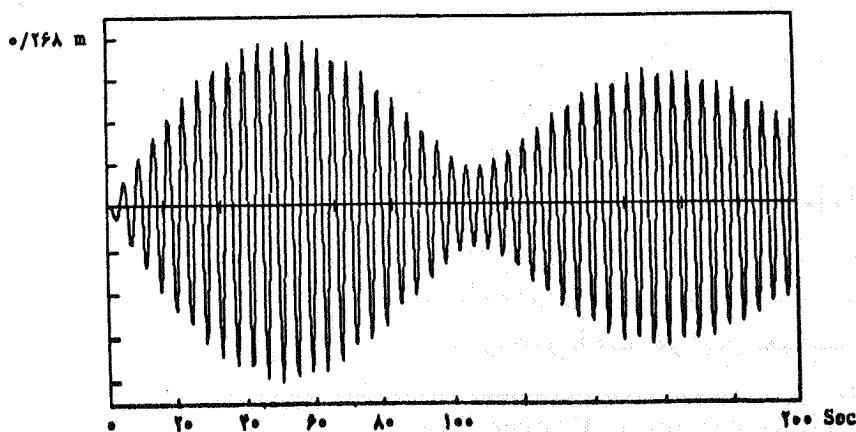
شکل ۳- منحنی تغییرات دامنه نوسان بر حسب تغییرات پریود موج



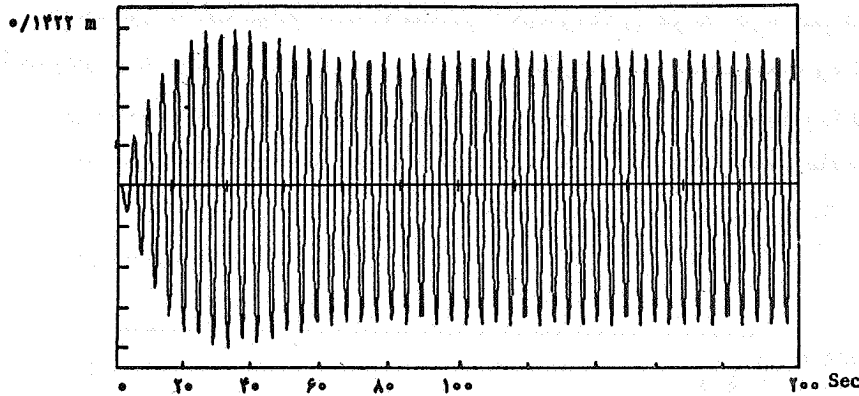
همچنین جالب توجه است که منحنی تغییر مکان عرشه در حالت تشدید تا حدودی متفاوت از سایر حالات است. در شکل ۴-الف منحنی تغییر مکان عرشه برای پریود موج ۶ ثانیه و در شکل ۴-ب برای پریود موج ۴/۲۸ - ثانیه (حالت تشدید) و نسبت‌های استهلاک داخلی صفر و ۵ درصد ملاحظه می‌شود. تاثیر استهلاک داخلی سازه بر منحنی نوسان در حالت تشدید در شکل ۴-ب مزبور دیده می‌شود.



الف - پریود موج ۶ ثانیه



ب - پریود موج ۴/۲۸ ثانیه ( $\xi=0$ )

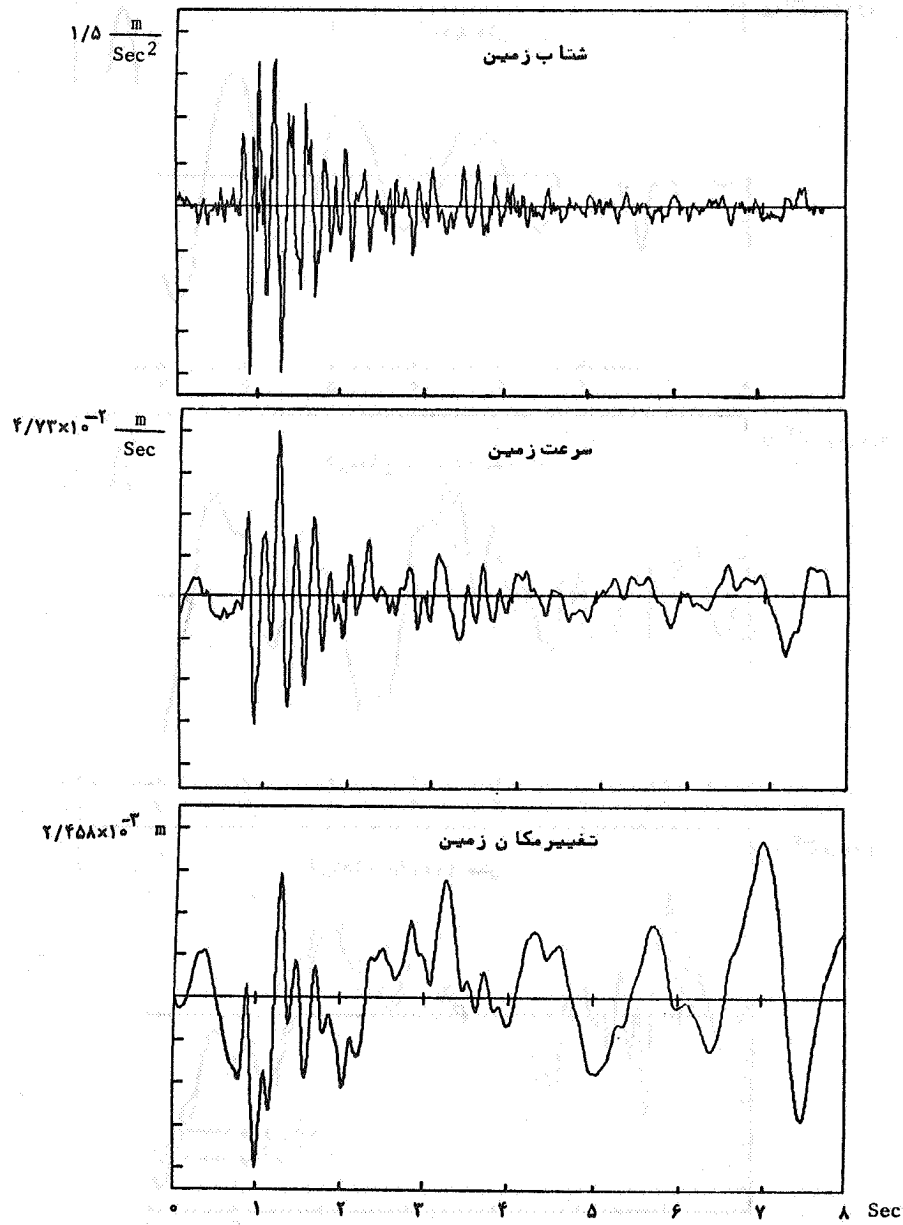


ج - پریود موج ۲۸/۴ ثانیه ( $\xi=0/05$ )

شکل ۴- منحنی تغییر مکان عرشه بر حسب زمان برای پریود موجهای محصف

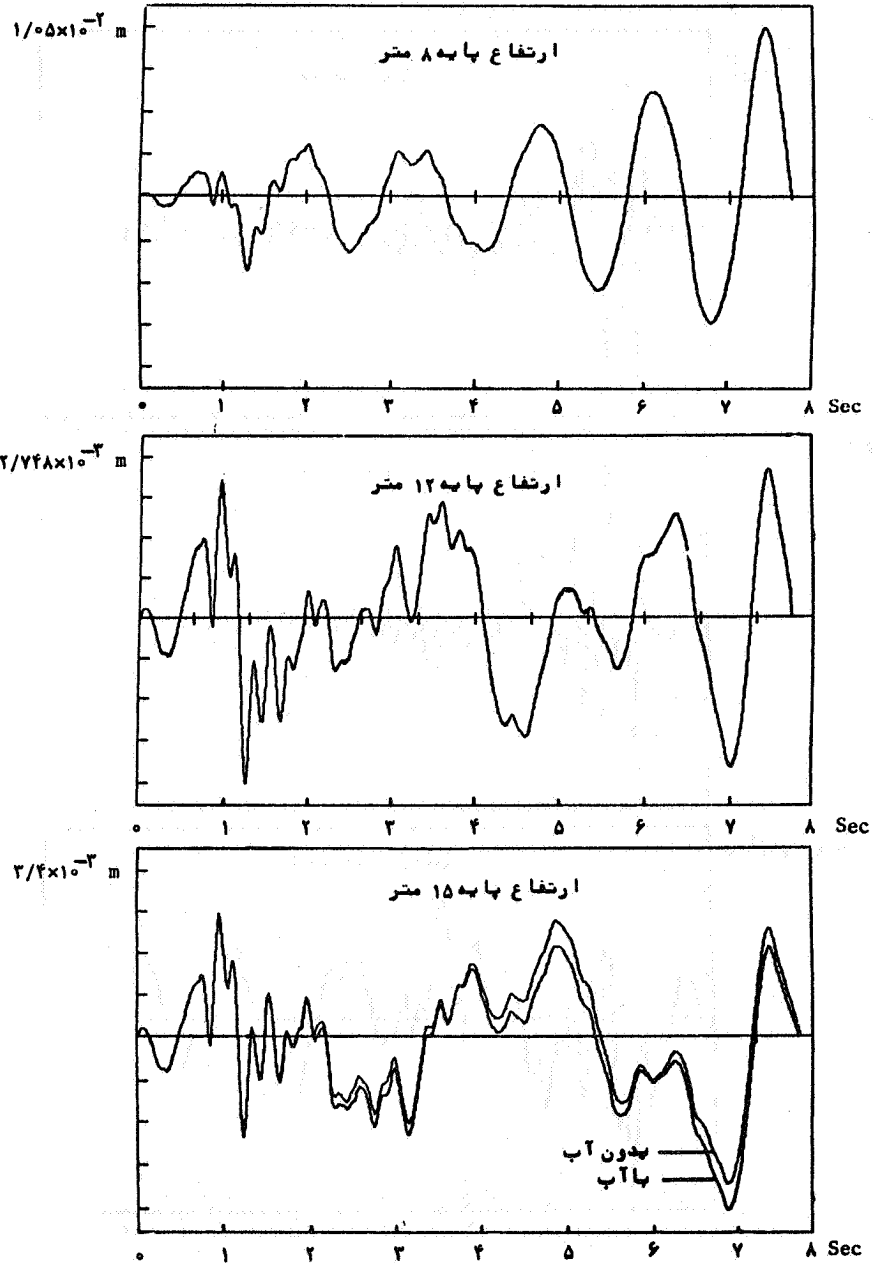
برای بررسی رفتار دینامیکی اسکله تحت اثر زلزله، فرض شد که پایه در محل کف بصورت گیردار باشد، بعبارت دیگر اثرات متقابل خاک و سازه (تاثير رفتار دینامیکی پی بر رفتار سازه) صرف نظر شد. جهت بررسی اثرات زلزله از رکورد کوتاه مدتی مربوط به زلزله الاصنام (الجزایر) استفاده شد [۱۹] که منحنیهای شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین برای این زلزله بخصوص در شکل ۵ نشان داده شده است. اثرات زلزله برای اسکله مذکور و با ارتفاعهای ۸، ۱۲، ۱۵ متر در دو حالت مختلف با آب و بدون وجود آب در اطراف پایه بررسی شد و منحنیهای نوسان عرشه در شکل ۶ آورده شده است. همانطوریکه در شکل ۶ ملاحظه می شود هر گاه طول پایه کوتاه باشد اثرات وجود آب اطراف پایه در ارتعاش اسکله ناچیز است، لیکن با افزایش ارتفاع این اثرات بیشتر شده و باعث افزایش تغییر

## 1. Soil-Structure Interaction



شکل ۵- منحنیهای شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین برای زلزله مورد بررسی

استقلال



شکل ۶- منحنی تغییر مکان عرشه در دو حالت با آب و بدون آب برای ارتفاعهای مختلف پایه

مکان عرشه نسبت به حالت بدون آب می‌شود. بنابراین می‌توان گفت برای این اسکله خاص اثرات وجود آب اطراف پایه (خصوصاً "برای ارتفاعهای کوتاه پایه) قابل اغماض می‌باشد. بدیهی است نتیجه‌گیری کلی در این مورد بستگی به مشخصات اسکله دارد.

#### خلاصه و نتیجه‌گیری:

همانطوریکه بیان شد مسئله اساسی که تحلیل دینا میکی سازه‌های واقع بر پایه‌های عمیق در آب را از تحلیل سازه‌های معمولی جدا می‌سازد، غیر خطی بودن نیروهای هیدرودینا میکی وارد بر پایه از یکسو و همجهت بودن این نیروها با سرعت نسبی بین آب و پایه از سوی دیگر می‌باشد. در این مقاله، با استفاده از تکنیک اجزاء محدود، مدل مناسبی بصورت مجموعه‌ای از المانهای خمشی تیر برای پایه در نظر گرفته شده، سپس با استفاده از توابع شکل و تخمینی از سرعت پایه در هر لحظه بردار نیروی وارد بر درجات آزادی در هر لحظه تعریف شده است. معادله‌ای که برای تعیین این نیروها بکار رفته شکل کلی معادله موریسون بوده و برای تعیین مشخصات هیدرودینا میکی امواج از تئوری موج خطی استفاده شده است. با استفاده از روش عددی شتاب متوسط ثابت، معادلات حرکت حل شده است. برای آنکه بتوان مثالی کاربردی از این مدل ارائه کرد، رفتار دینا میکی اسکله تحت اثر امواج و زلزله مورد بررسی قرار گرفت. برای یک اسکله بخصوص اثرات پریود موج بر ارتعاش بررسی شد و مطابق انتظار ملاحظه شد که شدیدترین واکنش در حالت تشدید، یعنی حالتی که فرکانس موج با فرکانس طبیعی اسکله یکسان باشد، اتفاق می‌افتد. بعلاوه شکل منحنی ارتعاش در حالت تشدید نشان‌دهنده بروز حالت ضربانی در ارتعاش است. علاوه بر اثرات امواج، واکنش تحت اثر زلزله نیز مورد بررسی قرار گرفت. اثرات وجود آب در اطراف پایه‌ها در ارتعاش اسکله تحت اثر زلزله در حالات مختلف موضوع مورد توجه بوده است. از نتایج حاصل اینطور استنباط می‌شود که هرگاه طول پایه کوتاه باشد وجود آب تاثیر محسوسی در

ارتعاش ندارد، لیکن با افزایش ارتفاع این تاثیر شدیدتر می‌شود. لازم به تذکر است که برای هر سازه مشخص و زلزله خاص، این مطالعه باید مستقلاً انجام شود زیرا علاوه بر شرایط سازه، مشخصات زلزله نظیر محتوای فرکانسی و زمان آن نیز بر رفتار سازه اثر دارد و نتیجه‌گیری فوق فقط در محدوده مواردی که انجام شد کاربرد دارد و هدف بیان یک نتیجه عمومی نیست. بعلاوه در یک آنالیز و طراحی کامل اسکله، همانطوریکه در مقدمه نیز ذکر شد، مسائل کاربردی متعددی مانند طرح اعضاء با توجه به اثرات خستگی، انتخاب موج و شرایط خاص موج در آبهای کم عمق مطرح است، لیکن چون هدف از این مقاله ارائه معادلات حرکت و بیان روشی برای حل این معادلات بوده است از وارد شدن در جزئیات مذکور صرف نظر شد. بدیهی است با مدل ارائه شده می‌توان هر یک از موارد فوق را بطور اخص مورد بررسی و تحقیق بیشتر قرار داد.

مراجع:

۱۸. ملک، امیرمسعود، "تحلیل دینا میکی اسکله تحت اثر امواج و زلزله"،  
پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان،  
۱۳۶۶.

1. 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, PP149-157, 1950.
2. Keulegan, G. H. and Carpenter L. H., "Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid", National Bureau of Standards Report, No. 4821, 1956.
3. Keulegan, G. H. and Carpenter L. H., "Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid", Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 60, No. 5, pp' 423-440, 1958.
4. Sarpkaya, T. and Isaacson, M.: Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Litton Educational publishing, Inc., 1981.
5. Newman, J. N.: Marine Hydrodynamics, MIT press, camb., Mass, 1977.
6. Stokes, G. G. "On the theory of Oscillatory Waves" Trans. Camb. Phil. Soc, Vol. 8, PP141-455, 1847.

7. Penzien, J., "Structural Dynamics of Fixed Offshore Structures", Proc. First Int. Conf. on the Behaviour of Offshore Structures, Trondheim, Norway, 1, 581-592, 1976.
8. Dao, B. V., and Penzien, J., "Comparison of Treatments of Nonlinear Drag Forces Acting on Fixed Offshore Platforms", J. Applied Ocean Research, 4(2), 66-72, 1982.
9. Anderson, L. and Mattson, B. "Analysis of Offshore Structures With Adina", J. of Computers and Structures Vol. 17, No. 5-6, PP737-748, 1983.
10. Stockard D. M., "Effects of Pile-Soil-Water Interaction on the Dynamic Response of a Seismically Excited Offshore Structure", Offshore Technology Conference, Paper No. CTC 2672, 1976.
11. Liou, D. N. and Penzien, J., "Seismic Analysis of an Offshore Structure Supported on Pile Foundations", Report No. UCB/EERC-77/25, Univ. of California, Berkeley, Nov. 1977.
12. Jain, A. K. and Datta, T. K., "Nonlinear Dynamic Analysis of Offshore Towers in Frequency Domain", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 113, No. 4, April, 1987.
13. Quinn, A.: "Design and Construction of Ports and Marine



- Structures", McGraw-Hill Book Company, Second Edition, 1972.
14. Dawson, T. H.: "Offshore Structural Engineering", Prentice-Hall INC. New Jersey, 1983.
  15. Blaney, G. W., Kausel, E. and Rosset J. M., "Dynamic Stiffness of Piles", Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Virginia, June 1976.
  16. Bathe, K-J. and Wilson, E. L.: "Numerical Methods in Finite Element", Prentice-Hall Inc., Newjersey, 1976.
  17. Clough, R. W. and Penzien, J.: "Dynamics of Structures", McGraw-Hill Book Company, 1975.
  19. Petrovski, J., " Corrected Accelerograms and Grøund Velocity and Displacement Curves for Selected Strong Motion Records Taken in Elasmam, Algeria", Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University" Kiril and Metodij" - Skopje, 1981.