

## تحلیل دینامیکی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز، مخزن و پی

علیرضا صناعی‌ها\*، بابک امیدوار\*\* و محمد رحیمیان\*\*\*  
دانشکده مهندسی عمران، پردیس، دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران  
دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۴/۱۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۳/۲۵)

چکیده -

(SV SH P) ( )

/

واژگان کلیدی :

---

\*\*\* - استاد

\*\* - دانشیار

\* - دانشجوی دکتری

# Dynamic Analysis of Morning Glory Spillways Considering Foundation and Reservoir Interaction

A. Sanaeiha, B. Omidvarand M. Rahimian

Faculty of Civil Engineering, University of Tehran

Faculty of Environment, University of Tehran

**Abstract:** Experience of the past earthquakes indicates that topographic magnification and surroundings of structure contribute to the destruction of structures after the earthquake. In this article, the dynamic interaction formulation of structures is presented. The method is based on the boundary element method in frequency domain. In order to assess the accuracy and efficiency of the proposed formulations for the dynamic interaction of structures, several problems are considered. Also, the structural analysis of morning glory spillway of Barzu dam located in Shirvan was investigated. For this purpose, every domain placed around the structure was modeled and analyzed separately, and then a model incorporating all the domains was presented. For realistic analysis, the problems were modeled and analyzed three-dimensionally. In this study, the effects of parameters such as shape irregularities, mechanical properties of materials (density, Poisson coefficient, shear modulus), stimulation frequency, incident wave type ( $P$ ,  $SH$ ,  $SV$ ), azimuth and angle of incident wave on dynamic analysis of mentioned structure were considered. The results show that the foundation flexibility causes stiffness reduction and thus reduction of frequency vibrational modes of the system. The fluid-structure interaction brings about a high change in seismic response of the system in a way that the values of the displacements increase at frequencies lower than the 1.5 times of the first vibration mode and decrease at higher frequencies. The fluid in contact with structure increases the effective mass and reduces vibration frequencies of the system.

**Keywords:** Dynamic interaction, Boundary element method, Morning glory spillways, Frequency domain.

## ۱- مقدمه

این حالت نه تنها پی بلکه آب به عنوان محیط نامحدود دیگر، بر روی رفتار لرزه‌ای سازه اثر زیادی می‌گذارد. تیسای و لی [۹] در مطالعاتشان نشان داده‌اند که در فرکانسهای بالاتر از فرکانس طبیعی مخزن، معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم کاملاً درگیر بوده و تأثیر تراکم‌پذیری سیال قابل توجه خواهد بود. لذا در این‌گونه مسائل، مدل‌های رفتاری ساده شده در برخی از فرمولبندیهای مورد استفاده با استفاده از روش اجزای محدود، مانند روش جرم افزوده، کارایی خود را از دست خواهند داد. در بررسی اثر اندرکنش سازه-آب، سازه-پی و آب-پی، در نظر گرفتن مدلی که اندرکنش سه محیط را در کنار هم داشته باشد الزامی است. هنگامی که زلزله‌ای اتفاق می‌افتد محیط‌های کنار هم تشکیل سیستمی را می‌دهند، که نباید برای تحلیل، آنها را به طور جدا از هم در نظر گرفت. همچنین ممکن است تغییرات خصوصیات پی یا شکل مخزن اثر مهمی بر پاسخ لرزه‌ای سازه داشته باشد.

سازه‌های با شکل دلخواه و با شرایط مرزی وابسته به زمان به دلیل پیچیدگی زیاد، نیازمند تحلیل با روشهای عددی‌اند.

به طور کلی هرگاه زلزله‌ای به وقوع پیوسته، سازه‌های قرار گرفته در مجاورت نامنظمیهای سطح زمین تحت اثر حرکات شدیدتر قرار گرفته‌اند. از جمله زلزله‌های مخرب می‌توان به زلزله‌های ۱۹۰۹ فرانسه در لمبوسک، ۱۹۷۶ و ۱۹۸۰ ایتالیا در فریولی و ایرپینیا، ۱۹۸۵ مکزیک در میچوکان، ۱۹۸۵ شیلی، ۱۹۹۴ نرتریج، ۱۹۹۵ ژاپن در کوبه و ۱۹۹۵ یونان در آگیون اشاره کرد [۸-۱].

مراجع فوق حاوی نمونه‌هایی هستند که در آنها بزرگنمایی حاصل از توپوگرافی و جنس خاک اطراف سازه، در خرابیهای مشاهده شده در اثر زلزله نقش زیادی داشته‌اند. در واقع حرکت امواج در یک محیط علاوه بر خواص مکانیکی آن، تا حد زیادی به شرایط مرزی موجود بستگی دارد. در راستای کاهش خطرات ناشی از زلزله، بررسی اثر محیط اطراف سازه بر روی پاسخ دینامیکی آن الزامی به نظر می‌رسد. از طرف دیگر بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌هایی که در تماس با آب هستند (مانند سدها)، در مسائل اندرکنش پی، مخزن و سازه موضوع مهمی است. در

بررسی نحوه مدل‌سازی اندرکنش دینامیکی سازه‌ها با محیط اطرافشان از دیرباز مورد توجه محققان بوده است. روشهای مختلفی توسط پژوهشگران برای در نظر گرفتن اثر محیط اطراف سازه بر روی رفتار دینامیکی آنها به کار گرفته شده است که در میان آنها، روشهای اجزای محدود و اجزای مرزی فراگیرترند.

از جمله سازه‌هایی که در تماس با آب هستند، سدهای وزنی‌اند که تا حد خیلی زیادی سیستم سازه-آب-خاک به شکل یک مسئله دو بعدی عمل می‌کند. در بیشتر حالات می‌توان مدل آن را به صورت دو بعدی در نظر گرفت. در مورد کارهایی که در این زمینه انجام شده است می‌توان به کارهای چپرا و همکارانش [۱۰-۱۳] اشاره کرد. همچنین لطفی و همکارانش [۱۴] با استفاده از روش اجزای مدلی را ارائه کردند که اثرات اندرکنش در این مدل، دقیقتر از روشهای قبلی در نظر گرفته شده است و پی به صورت محیط لایه‌بندی شده مدل شده است. در حالی که چپرا محیط خاک را به عنوان یک محیط همگن در نظر گرفته بود.

روش اجزای مرزی برای مدل‌سازی اندرکنش مایع-جامد در حالت دو بعدی توسط بعضی از محققان به کار گرفته شده است. کاکودا و توساکا [۱۵] اندرکنش سیستم مایع-جامد را در فضای فرکانسی بررسی کردند در حالی که انتس و ون استورف [۱۶] اندرکنش خاک-مایع و سد-مایع را در فضای زمانی مطالعه کردند. مدینا و دومینگوآز [۱۷-۱۹] در فضای فرکانسی با استفاده از روش اجزای مرزی، مدل دو بعدی از سدهای وزنی را ارائه کردند. در این مدل معادلات تعادل و شرایط سازگاری به طور کامل در نظر گرفته شده است که در این روش نامنظمیهای خاک بستر و ناهمسانی لایه‌های خاک زیر زمینی قابل اعمال است.

با توجه به هندسه سدهای قوسی، نمی‌توان آنها را به صورت دو بعدی مدل کرد و نیازمند مدل‌سازی سه بعدی است. تحقیقات بسیاری بر روی رفتار لرزه‌ای این نوع سازه‌ها انجام گرفته است که در اکثر این تحقیقات فشار هیدرو دینامیکی وارد

بر دیواره سدها با استفاده از روشهای عددی مختلف به دست آمده است. هال و چپرا [۲۰] از روش اجزای محدود، تیسای ولی [۲۱] از روش اجزای مرزی و همچنین وانگ و هونگ [۲۲] از روش تفاوت‌های محدود برای ارزیابی این نوع سازه‌ها استفاده کرده‌اند. فوک و چپرا [۲۳ و ۲۴] مدل سه بعدی را ارائه کردند که در آن سه محیط خاک-آب-سد در نظر گرفته شده بود. با این حال این مدل حاوی بعضی ساده‌سازیها بود که باعث می‌شد مدل غیر واقعی باشد. بعضی از این ساده‌سازیها شامل: پی بدون جرم، سطح مقطع یکنواخت مخزن از نزدیکی سد تا بینهایت بود. دومینگوآز و ماسو [۲۵-۲۶] مدل اجزای مرزی که شامل سه محیط بود را ارائه کردند. با توجه به خصوصیات روش اجزای مرزی، مدل ارائه شده شامل: توپوگرافی واقعی مخزن و پی، مدل‌سازی پی به عنوان جسم ویسکو الاستیک و اثرات اندرکنش بود.

ماسو و همکاران [۲۷] روشی را برای بررسی مسئله اندرکنش سد، مخزن و پی با در نظر گرفتن اثرات جذب انرژی مابین سیال و رسوبات زیرین ارائه کرده‌اند. آرنارز و همکاران [۲۸] مدل کاملی از اندرکنش سازه-پی-سیال را ارائه کردند که در آن به بررسی اثرات لایه‌های رسوبی بر پاسخ دینامیکی سدهای قوسی پرداخته شده است. همچنین اخیراً تحلیل سه بعدی دینامیکی سد کرج با استفاده از روش اجزای مرزی و با در نظر گرفتن اندرکنش سازه با آب و محیط لایه‌ای خاک اطراف سازه توسط مصاحبی و همکاران [۲۹-۳۰] صورت گرفته است.

در روش اجزای مرزی معادلات دیفرانسیلی حاکم به معادلات انتگرالی تبدیل می‌شود که روی مرز اعمال می‌شود. سپس مرز به قطعات مرزی (اجزای‌های مرزی) تقسیم‌بندی می‌شود و انتگرال‌گیری عددی روی اجزای مرزی انجام می‌شود. همانند روشهای عددی دیگر، با ارضای شرایط مرزی، سیستم معادلات خطی جبری حاصل می‌شود که از حل آن جواب یکتای مسئله به دست می‌آید.

مزیت اصلی استفاده از روش اجزای مرزی در مسائل

اندرکنش بر پایه دو موضوع است:

۱- تنها مرز مدل نیاز به جزءبندی دارد

۲- محیط بینهایت به طور طبیعی در تحلیل در نظر گرفته می‌شود. این دو مزیت، روش اجزای مرزی را به روشی قوی و مناسب برای تحلیل دینامیکی سازه‌هایی که در تماس یا مدفون در خاک یا محیطهای دیگر همچون آب هستند، تبدیل می‌کند. در این تحقیق ابتدا فرمولبندی حاکم بر مسئله ارائه شده و سپس به منظور بررسی صحت فرمولبندیهای ارائه شده، مثالهایی بررسی شده است. در نهایت در این تحقیق تحلیل دینامیکی سه‌بعدی سرریز نیلوفری مربوط به سد بارزو شیروان به عنوان مطالعه موردی ارائه شده است. لازم به ذکر است که در تمامی مثالهای ارائه شده در این مقاله، محیط سازه و شالوده به صورت همگن، خطی و الاستیک فرض شده است. همچنین محیط مخزن با فرض تراکم‌پذیر بودن و غیرویسکوز بودن سیال و با صرف‌نظر از امواج سطحی به صورت محیط نیمه‌بینهایت مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- فرمولبندی روش اجزای مرزی در فضای

### فرکانسی

در این قسمت خلاصه‌ای از فرمولبندی روش اجزای مرزی در فضای فرکانسی ارائه می‌شود. روش اجزای مرزی استفاده شده در این تحقیق با استفاده از حل اساسی استوکس در محیط بینهایت الاستودینامیک با فرض خطی و همگن بودن محیط به دست آمده است. در حل مسائل الاستودینامیک معادله حاکم بر محیط معادله ناویر است [۳۱].

$$(\lambda + \mu)u_{i,jj} + \mu u_{j,ii} + \rho b_j = \rho \ddot{u}_j \quad (1)$$

معادله فوق، معادله حاکم بر رفتار یک جسم الاستیک ایزوتروپ با حجم  $V$  و سطح  $\Gamma$  است. در این معادله  $\lambda$  و  $\mu$  ضرایب لامه،  $u$  تغییر مکان،  $b$  نیرو در واحد حجم و  $\rho$  چگالی مصالح است با تعریف سرعت انتشار موج فشاری (طولی) به شکل  $C_1^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho$  و موج برشی به شکل  $C_2^2 = \mu / \rho$  معادله

(۱) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$(C_1^2 - C_2^2)u_{i,jj} + C_2^2 u_{j,ii} + b_j = \ddot{u}_j \quad (2)$$

حال حجم  $V$  را که در قسمت قبل فرض شد، با سطح  $\Gamma$  در نظر بگیرید. با استفاده از قضیه تقابل بتی، معادله حاکم بر حجم مسئله (۷) را می‌توان به معادله حاکم بر مرز محیط ( $\Gamma$ ) تبدیل کرد. معادله (۳) نشان دهنده معادله حاکم بر مرز مسائل فیزیکی است [۳۱].

$$c^i u_s^i + \int_{\Gamma} u_s t^* d\Gamma = \int_{\Gamma} t_s u^* d\Gamma \quad (3)$$

در این معادله  $\Gamma$  مرز مسئله،  $u^*$  و  $t^*$  به ترتیب پاسخهای اساسی جابه‌جایی و بردار تنش و  $u_s$  و  $t_s$  به ترتیب بردار جابه‌جایی و بردار تنش مرزی برای هر نقطه روی مرز حوزه‌اند. در روش اجزای مرزی ابتدا مرز  $\Gamma$  به NE جزء مرزی تقسیم می‌شود. هر جزء مرزی از  $n$  گره تشکیل شده است و تعداد کل رهاها  $N$  است. با استفاده از روش روی هم‌گذاری نقاط، معادله انتگرال مرزی (۳) برای نقطه  $i$  ام به صورت زیر در می‌آید:

$$c^i u_s^i + \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} u_s t^* d\Gamma \right\} = \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} t_s u^* d\Gamma \right\} \quad (4)$$

که در این معادله  $\Gamma_j$  سطح اجزای  $j$ ام،  $u^*$  و  $t^*$  به ترتیب ماتریس پاسخهای اساسی جابه‌جایی و بردار تنش و  $u_s$  و  $t_s$  به ترتیب بردار جابه‌جایی و بردار تنش مرزی برای هر نقطه روی مرز حوزه‌اند.

برای هر مؤلفه  $k$ ، مقادیر  $u_k$  و  $t_k$  در هر نقطه از جزء مرزی بر حسب مقادیر گرهی  $u_k^j$  و  $t_k^j$  تعیین می‌شود. بدین منظور از توابع شکلی  $\Phi$  که بر حسب مختصات طبیعی  $\xi_1$  و  $\xi_2$  است  $(-1 \leq \xi_k \leq 1)$ ، استفاده می‌شود. این توابع در مرجع [۳۱] ارائه شده‌اند.

در شکل (۱) تبدیل سیستم مختصات کلی  $x-y-z$  به مختصات طبیعی  $\xi_1 - \xi_2$  نشان داده شده است. با استفاده از توابع شکلی درجه دو،  $u_s$  و  $t_s$  روی هر اجزای برحسب مقادیر گرهی آن جزء در سه جهت دستگاه مختصات به صورت زیر تقریب زده می‌شوند:

که در این معادله  $M$  تعداد گره‌های جزء  $z/j$  است. به این ترتیب انتگرالهای معادله (۴) روی اجزای  $j$  به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$\int_{\Gamma_j} u_s \mathbf{t}^* d\Gamma = \left\{ \int_{\Gamma_j} \Phi \mathbf{t}^* d\Gamma \right\} u_s^j \quad \text{و}$$

$$\int_{\Gamma_j} t_s \mathbf{u}^* d\Gamma = \left\{ \int_{\Gamma_j} \Phi \mathbf{u}^* d\Gamma \right\} t_s^j \quad (۶)$$

در معادله فوق انتگرالهای داخل آکولاد به روش عددی گوس محاسبه می‌شوند. در نهایت معادله انتگرال مرزی تغییر مکانی (۴) با استفاده از تقریبهای فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$c^i u_s^i + \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} \Phi \mathbf{t}^* d\Gamma \right\} u_s^j = \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} \Phi \mathbf{u}^* d\Gamma \right\} t_s^j \quad (۷)$$

$u_s^j$  و  $t_s^j$  در معادله فوق بردارهای تغییر مکان و تنش مرزی اند. به دلیل آنکه فرمولبندی عددی بر حسب مختصات طبیعی  $\xi_1$  و  $\xi_2$  است، تبدیل دیفرانسیل سطح در مختصات کارتزین یعنی  $d\Gamma$  به سیستم مختصات طبیعی لازم است:

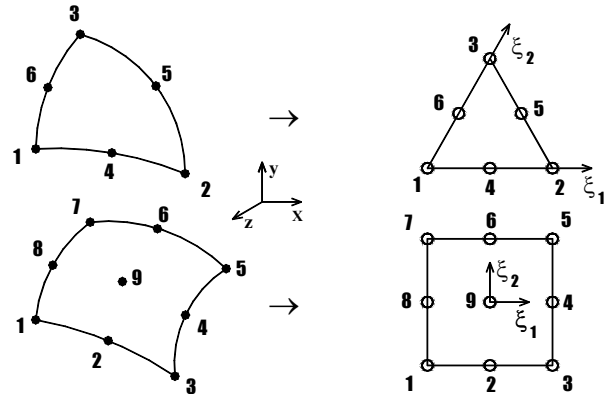
$$d\Gamma = \left| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi_1} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi_2} \right| d\xi_1 d\xi_2 = |J| d\xi_1 d\xi_2 \quad (۸)$$

در این معادله  $J$ ، ژاکوبین تبدیل مختصات محلی به کلی و اندازه آن یعنی  $|J|$ ، اندازه بردار عمود بر سطح در نقطه مورد نظر است. همچنین جزییات محاسبه معادله (۸) به تفصیل در مرجع [۳۱] ارائه شده است. در نهایت معادله انتگرال مرزی تغییر مکانی (۷) با استفاده از فرمولبندیهای عددی فوق، به صورت زیر در می‌آید:

$$c^i u_s^i + \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Phi \mathbf{t}^* |J| d\xi_1 d\xi_2 \right\} u_s^j = \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Phi \mathbf{u}^* |J| d\xi_1 d\xi_2 \right\} t_s^j \quad (۹)$$

با فرض هر گره به عنوان گره رویهم‌گذاری<sup>۲</sup> (نقطه اعمال بار) و انتگرال‌گیری عددی روی اجزای مرزی، معادلات انتگرال مرزی به سیستم معادلات جبری خطی تبدیل می‌شوند:

$$\mathbf{H} u_s = \mathbf{G} t_s \quad (۱۰)$$



شکل ۱- اجزای مرزی درجه دو مثلثی و چهارضلعی و تبدیل از سیستم مختصات کلی  $x-y-z$  به مختصات طبیعی  $\xi_1-\xi_2$

$$u_s = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & 0 & \dots & \phi_M & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & \dots & 0 & \phi_M & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & \dots & 0 & 0 & \phi_M \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{Bmatrix} u_1^j \\ u_2^j \\ u_3^j \\ \vdots \\ u_1^M \\ u_2^M \\ u_3^M \end{Bmatrix} = \Phi u_s^j$$

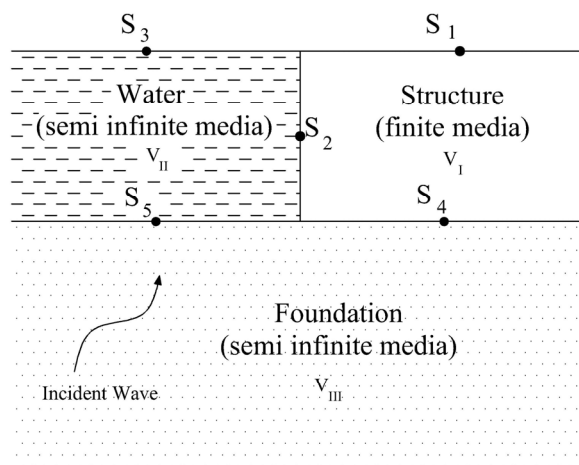
$$t_s = \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{Bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & 0 & \dots & \phi_M & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & \dots & 0 & \phi_M & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & \dots & 0 & 0 & \phi_M \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{Bmatrix} t_1^j \\ t_2^j \\ t_3^j \\ \vdots \\ t_1^M \\ t_2^M \\ t_3^M \end{Bmatrix} = \Phi t_s^j$$

و

(۵)



شکل ۲ - نمایی از اندرکنش سه محیط سازه، پی و سیال

ماتریسهای تأثیر  $H^3$  و  $G$  شامل انتگرالی با هسته‌های  $t^*$  و  $u^*$  هستند. به تعداد نقاط رویهم‌گذاری (گره‌های مرزی) معادله خواهیم داشت. با مرتب سازی معادله ماتریسی فوق یعنی قرار دادن تمامی مقادیر معلوم در سمت راست و بردن مجهولات گرهی به سمت چپ، دستگاه معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$A X = B \quad (11)$$

### ۳- فرمولبندی اندرکنش دینامیکی سازه‌ها با محیط

#### اطرافشان با استفاده از روش اجزای مرزی

به منظور تحلیل اندرکنش دینامیکی سازه‌ها با محیط اطرافشان باید روابط تعادل و سازگاری در مرز محیطهای مسئله اعمال شود. در این تحقیق فرض شده است که سازه کاملاً در آب مستغرق نیست و آب به داخل سرریز جریان ندارد. با توجه به اینکه سه محیط وجود دارد، برای هر محیط باید مقادیر بردار تنش و جابه‌جایی در مرز آن مشخص شد. بر این اساس اگر سه محیط مطابق با شکل (۲) با علامت I برای سازه، علامت II برای سیال و علامت III برای پی، در کنار هم قرار گیرند،

می‌توان پنج مرز به شرح زیر در نظر گرفت:

۱. مرز آزاد سازه  $S_1$
۲. مرز مشترک سازه-سیال  $S_2$
۳. مرز آزاد سیال  $S_3$

۴. مرز مشترک سازه-پی  $S_4$

۵. مرز مشترک سیال-پی  $S_5$

اگر بردار تنش و تغییرمکان در مرز  $S_a$  از محیط  $V_b$  را به ترتیب با علامتهای  $T_a^b$  و  $U_a^b$  نشان دهیم، برای هر یک از محیطها، متغیرهای مسئله به شرح زیر قابل بیان می‌باشند:

برای سازه (حجم  $V_I$ ):

تغییرمکانها و بردار تنشها مربوط به سطح  $S_1$ :  $U_1^I, T_1^I$

تغییرمکانها و بردار تنشها مربوط به سطح  $S_2$ :  $U_2^I, T_2^I$

تغییرمکانها و بردار تنشها مربوط به سطح  $S_4$ :  $U_4^I, T_4^I$

برای سیال (حجم  $V_{II}$ ):

تغییرمکانها و بردار تنشها مربوط به سطح  $S_2$ :  $U_2^{II}, T_2^{II}$

تغییرمکانها و بردار تنشها مربوط به سطح  $S_3$ :  $U_3^{II}, T_3^{II}$

تغییرمکانها و بردار تنشها مربوط به سطح  $S_5$ :  $U_5^{II}, T_5^{II}$

برای حجم (پی  $V_{III}$ ):

تغییرمکانها و بردار تنشها مربوط به سطح  $S_4$ :  $U_4^{III}, T_4^{III}$

تغییرمکانها و بردار تنشها مربوط به سطح  $S_5$ :  $U_5^{III}, T_5^{III}$

به منظور محاسبه هر یک از متغیرهای مرزی ابتدا باید روابط حاکم بر هر محیط به طور مجزا نوشته شود. سپس با استفاده از معادلات سازگاری و شرایط تعادل حاکم بر مرزها معادلات مجزا در هر محیط به یک رابطه کلی حاکم بر سیستم درگیر<sup>۴</sup> سازه - سیال - پی تبدیل شود.

معادلات حاکم بر محیط I، II و III به ترتیب در معادلات (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است.

$$\begin{bmatrix} H_{11}^I & H_{12}^I & H_{13}^I \\ H_{21}^I & H_{22}^I & H_{23}^I \\ H_{31}^I & H_{32}^I & H_{33}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^I \\ U_2^I \\ U_3^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}^I & G_{12}^I & G_{13}^I \\ G_{21}^I & G_{22}^I & G_{23}^I \\ G_{31}^I & G_{32}^I & G_{33}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^I \\ T_2^I \\ T_3^I \end{bmatrix} \quad (12)$$

و برای محیط  $V_{II}$ :

$$\begin{bmatrix} H_{22}^{II} & H_{23}^{II} & H_{25}^{II} \\ H_{32}^{II} & H_{33}^{II} & H_{35}^{II} \\ H_{52}^{II} & H_{53}^{II} & H_{55}^{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2^{II} \\ U_3^{II} \\ U_5^{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{22}^{II} & G_{23}^{II} & G_{25}^{II} \\ G_{32}^{II} & G_{33}^{II} & G_{35}^{II} \\ G_{52}^{II} & G_{53}^{II} & G_{55}^{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_2^{II} \\ T_3^{II} \\ T_5^{II} \end{bmatrix} \quad (13)$$

و در نهایت برای محیط  $V_{III}$  خواهیم داشت:

$$\rho \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = -\nabla p^w \quad (18)$$

که  $\rho$  دانسیته آب است. با ضرب طرفین معادله (۱۸) در بردار عمود بر سطح جامد  $n$  و با جایگذاری مشتق  $u_n^w$  نسبت به زمان در معادله (۱۸) شرط اصلی سازگاری جامد و سیال حاصل می‌شود.

$$u_n^w = \frac{1}{\rho \omega^2} \frac{\partial p^w}{\partial n} \quad (19)$$

با توجه به معادلات (۱۶) و (۱۹) در مرز  $S_2$ ، معادله (۲۰) برقرار است.

$$T_2^I = -P_2^{II} = -T_2^{II} = T_2 \quad (20)$$

$$U_2^I = -\frac{q_2^{II}}{\rho \omega^2} = U_2^{II} = U_2$$

شرط مرزی برای سطح آزاد سیال در مرز  $S_3$ :

$$P_3^{II} = 0 \quad (21)$$

معادلات سازگاری و شرط تعادل در مرز  $S_4$ :

$$T_4^I = -T_4^{III} = T_4 \quad (22)$$

$$U_4^I = U_4^{III} = U_4$$

معادلات سازگاری و شرط تعادل در مرز  $S_5$ :

بر اساس معادلات (۱۶) و (۱۹) در مرز  $S_5$  معادلات سازگاری و شرط تعادل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$U_5^{III} = -\frac{q_5^{II}}{\rho \omega^2} = U_5^{II} = U_5 \quad (23)$$

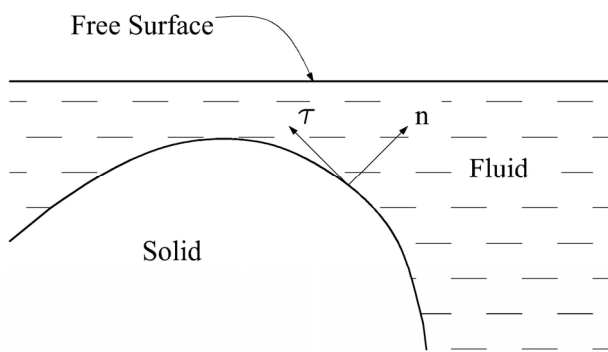
$$T_5^{III} = -P_5^{II} = -T_5^{II} = T_5$$

که در این معادلات  $\rho$  چگالی وزنی سیال،  $\omega$  فرکانس تحریک بارگذاری و  $q_5^{II}$  و  $q_2^{II}$  به ترتیب جریان سیال در مرز شماره (۲) و (۵) است. از طرفی در محیط بینهایت معادلات (۲۴) و (۲۵) و (۲۵) برقرار است.

$$T_S = T_0 - T \quad (24)$$

$$U_S = U_0 - U \quad (25)$$

در این معادلات  $T$  بردار تنش کل بوده که با استفاده از اصل جمع آثار قوا از مجموع  $T_0$ ، بردار تنش حاصل از حرکت آزاد زمین در محیط نیمه‌بینهایت و  $T_s$ ، بردار تنش حاصل از امواج



شکل ۳- نمایش شرط سازگاری آب - جامد

$$\begin{bmatrix} H_{44}^{III} & H_{45}^{III} \\ H_{54}^{III} & H_{55}^{III} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U_S)_4^{III} \\ (U_S)_5^{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{44}^{III} & G_{45}^{III} \\ G_{54}^{III} & G_{55}^{III} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (T_S)_4^{III} \\ (T_S)_5^{III} \end{bmatrix} \quad (14)$$

در این معادلات  $G$  و  $H$  به ترتیب ماتریسهای ضرایب بردار تنش و جابه‌جایی بوده که بر اساس هندسه مسئله محاسبه می‌شود.

شرایط مرزی برای هر یک از مرزهای مسئله به شکل زیر

نوشته می‌شود:

شرط مرزی برای سازه در مرز  $S_1$ :

$$T_1^I = 0 \quad (15)$$

معادلات سازگاری و شرط تعادل در مرز  $S_2$ :

با توجه به اینکه آب غیرلزج فرض شده است، بردار تنش برشی در سطح مشترک آب و سازه صفر می‌شود. همچنین شرط اصلی تعادل دو محیط سیال و سازه برابر بودن فشار سیال با بردار تنش عمود بر جامد است. این شرط با توجه به شکل (۳) عبارت است از:

$$-p^w = p^s n \quad (16)$$

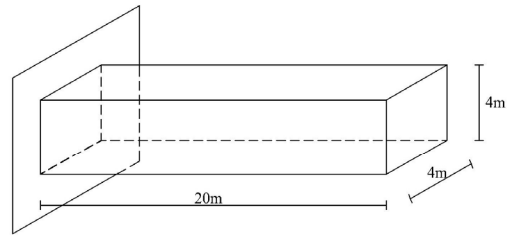
از طرفی تغییر مکان عمودی سطح جامد و مایع برابر است:

$$u_n^w = u_n^s \quad (17)$$

در این معادلات  $n$  بردار واحد نرمال عمود بر جامد،  $\tau$  بردار واحد مماس بر سطح جامد،  $p^w$  فشار آب،  $u_n^w$  تغییر مکان سیال در جهت  $n$  و  $p^s$  و  $u_n^s$  به ترتیب بردار تنش و تغییر مکان جامدند. ارتباط سرعت سیال با مشتق فشار به صورت معادله (۱۸) تعریف می‌شود [۳۱]:

#### ۴- تأیید نتایج

بر اساس فرمولبندی ارائه شده نرم افزاری توسط مؤلفان مقاله به زبان فورترن نوشته شده است و به منظور تأیید نتایج، مثالهایی مورد بررسی و نتایج تحلیل با نتایج سایر مراجع مقایسه شده است.



#### ۴-۱- تأیید نتایج تحلیل الاستودینامیک سه بعدی

##### محیطهای محدود در فضای فرکانسی

##### ۴-۱-۱- تیر طره در معرض حرکت واحد تکیه گاهی

در این مثال تیر طره‌ای به طول ۲۰ متر و سطح مقطع ۴×۴ متر مربع که در معرض حرکت واحد تکیه گاهی در راستای قائم است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. هندسه مسئله و نحوه جزءبندی این تیر در شکل (۴) نشان داده شده است. مشخصات مصالح به کار رفته به شرح مقابل است: دانسیته=۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت پواسون=۰/۳، مدول برشی=۸×۱۰<sup>۱۱</sup> نیوتن وزن بر متر مربع، نسبت میرایی=۰/۰۵. تغییر مکانهای نقطه میانی در مقطع انتهایی کنسول بر حسب فرکانسهای بی‌بعد شده نسبت به فرکانس طبیعی ( $\omega_1 = 52.66 \text{ S}^{-1}$ ) در شکل (۵) رسم شده است. در این مثال نتایج به دست آمده در تحقیق موجود با نتایج مرجع [۳۱] مقایسه شده است.

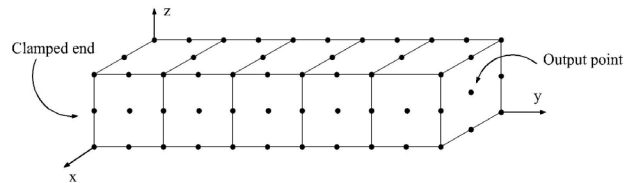
#### ۴-۲- تأیید نتایج اندرکنش محیط محدود و محیط

##### نیمه‌بینهایت در تفرق امواج

##### ۴-۲-۱- انتشار امواج در دره رسوبی نیم کره با یک لایه

##### رسوبی

در این مثال اثر لایه‌بندی خاک و ضخامت و جنس خاک هر لایه بر روی تشدید امواج زلزله، مورد بررسی قرار می‌گیرند. هندسه و نحوه جزءبندی این مثال در شکل (۶) نشان داده شده است. شعاع داخلی این دره رسوبی  $a=1$  و ضخامت لایه رسوبی آن  $t=0.4$  است. این دره رسوبی تحت برخورد قائم امواج P، SH و SV قرار داده می‌شود. مشخصات مکانیکی



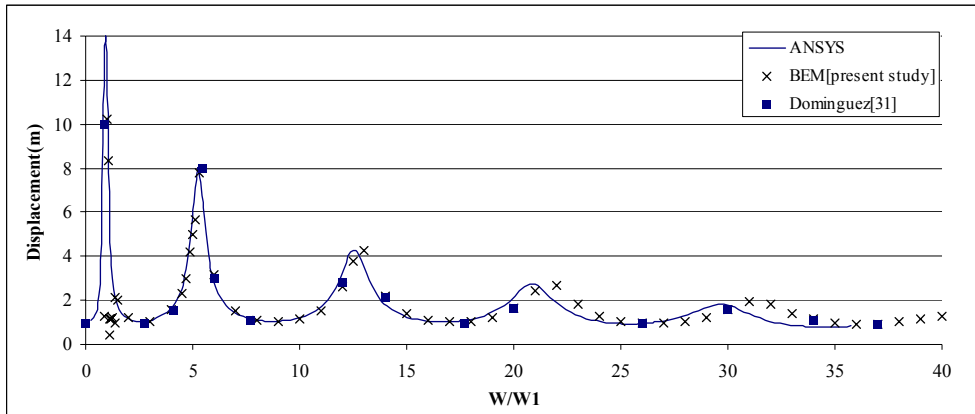
شکل ۴- نحوه جزءبندی تیر طره با حرکت واحد

##### تکیه گاهی در راستای قائم

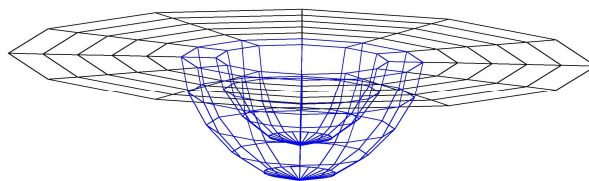
تفرق یافته، به دست می‌آید. همچنین  $U$  میدان جابه‌جایی کل بوده که از مجموع  $U_0$ ، جابه‌جایی ناشی از حرکت آزاد زمین در محیط نیمه‌بینهایت و  $U_s$ ، جابه‌جایی ناشی از امواج تفرق یافته، به دست می‌آید. با جایگذاری دو معادله (۲۴) و (۲۵) در معادله (۱۴) و با استفاده از شرایط مرزی، معادلات (۱۵) و (۲۱)، و معادلات تعادل و سازگاری حاکم بر مرزهای مسئله، معادلات (۲۰)، (۲۲) و (۲۳)، رابطه حاکم برای سیستم درگیر سازه، سیال و پی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} H_{11}^I & H_{12}^I & 0 & H_{14}^I & 0 & -G_{12}^I & -G_{14}^I & 0 \\ H_{21}^I & H_{22}^I & 0 & H_{24}^I & 0 & -G_{22}^I & -G_{24}^I & 0 \\ H_{41}^I & H_{42}^I & 0 & H_{44}^I & 0 & -G_{42}^I & -G_{44}^I & 0 \\ 0 & H_{22}^{II} & H_{23}^{II} & 0 & H_{25}^{II} & G_{22}^{II} & 0 & G_{25}^{II} \\ 0 & H_{32}^{II} & H_{33}^{II} & 0 & H_{35}^{II} & G_{32}^{II} & 0 & G_{35}^{II} \\ 0 & H_{52}^{II} & H_{53}^{II} & 0 & H_{55}^{II} & G_{52}^{II} & 0 & G_{55}^{II} \\ 0 & 0 & 0 & -H_{44}^{III} & -H_{45}^{III} & 0 & -G_{44}^{III} & G_{45}^{III} \\ 0 & 0 & 0 & -H_{54}^{III} & -H_{55}^{III} & 0 & -G_{54}^{III} & G_{55}^{III} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^I \\ U_2 \\ U_3^II \\ U_4 \\ U_5 \\ T_2 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -H_{44}^{III} & -H_{45}^{III} & G_{44}^{III} & G_{45}^{III} \\ -H_{54}^{III} & -H_{55}^{III} & G_{54}^{III} & G_{55}^{III} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U_0)_4^{III} \\ (U_0)_5^{III} \\ (T_0)_4^{III} \\ (T_0)_5^{III} \end{bmatrix} \quad (26)$$

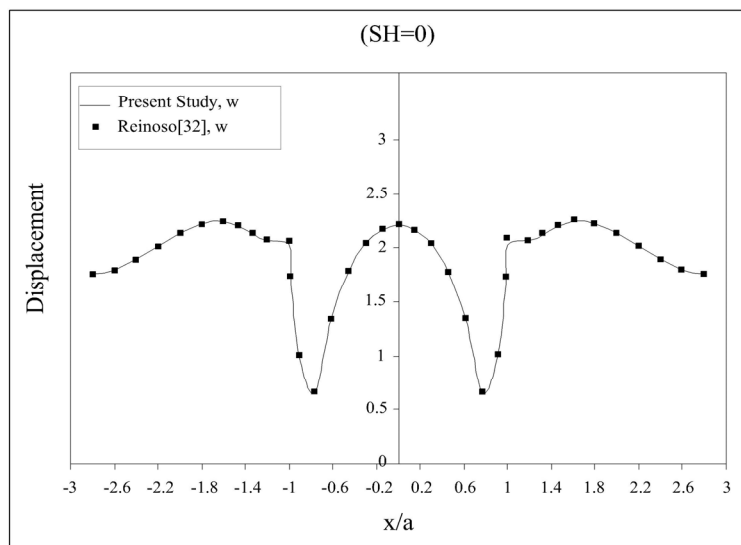




شکل ۵- تغییر مکانهای نقطه میانی در مقطع انتهایی کنسول در معرض حرکت واحد تکیه گاهی



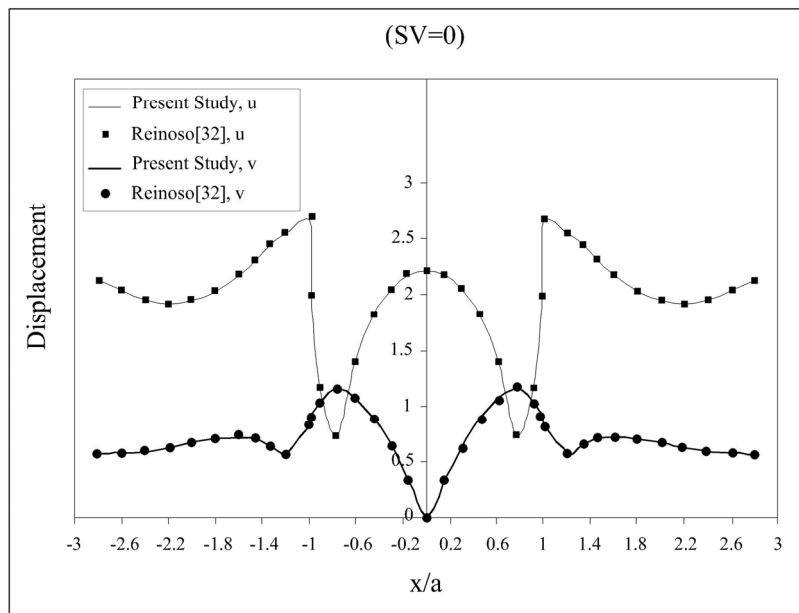
شکل ۶- نمایش جزء بندی دره (محیط نیمه بینهایت) و رسوب (محیط محدود)



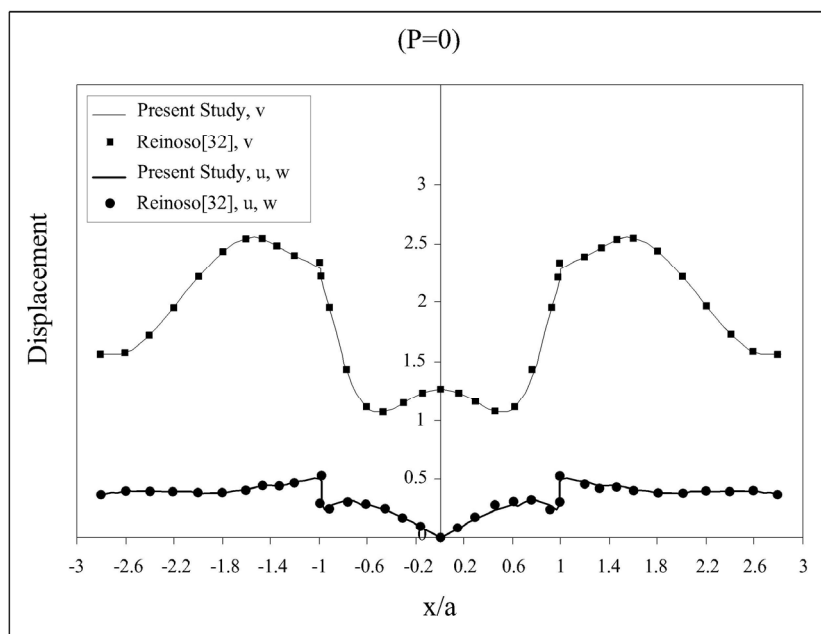
شکل ۷ - بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی تحت برخورد قائم موج SH با زاویه صفر درجه و فرکانس بی‌بعد  $\eta_s = 0.75$  برای ضخامت  $t = 0.4$ . نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۳۲] به ترتیب با خطوط ممتد و نقاط مربع شکل نشان داده شده است

برای این دره رسوبی در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده با نتایج مرجع [۳۲] مقایسه شده است. همچنان‌که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر تطابق خوبی با نتایج مرجع [۳۲] دارد.

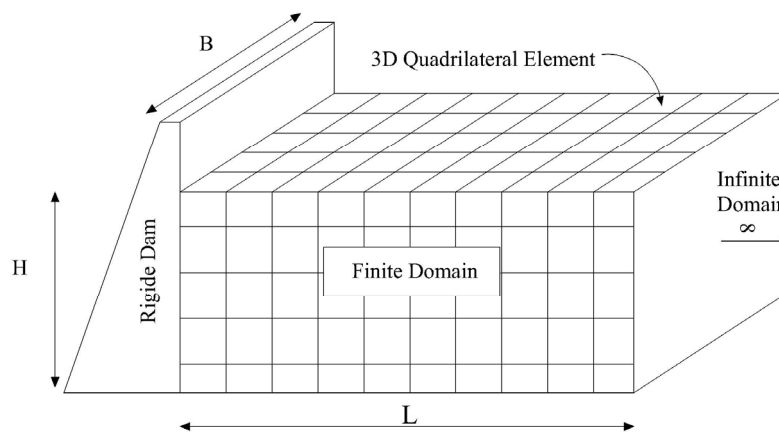
محیط نیمه بینهایت  $\mu_{hs} = \rho_{hs} = 1$  و  $\nu_{hs} = 1/3$  و مقادیر مربوط به لایه رسوبی  $\mu_v = 1.5$ ،  $\rho_v = 1$ ، و  $\nu_v = 1/3$  است. مؤلفه‌های جابه‌جایی سطحی برای نقاط در راستای محور  $x$  برای فرکانس بی‌بعد  $\eta_p = 0.75$  (نسبت به  $a$ ) و ضخامت  $t = 0.4$



شکل ۸- بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی تحت برخورد قائم موج SV با زاویه صفر درجه و فرکانس بی‌بعد  $\eta_s = .75$  برای ضخامت  $t = .4$ . نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۳۲] به ترتیب با خطوط ممتد و نقاط مربع شکل نشان داده شده است



شکل ۹- بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی تحت برخورد قائم موج P با زاویه صفر درجه و فرکانس بی‌بعد  $\eta_s = .75$  برای ضخامت  $t = .4$ . نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۳۲] به ترتیب با خطوط ممتد و نقاط مربع شکل نشان داده شده است



شکل ۱۰- نمایی از سد با دیواره‌های صلب

هیدرودینامیک به صورت  $p^* = p / (\rho H)$  بی‌بعد شده است. همچنین مقدار فرکانس نیز با مقدار  $\omega_1 = \pi c / 2H$  بی‌بعد شده است. در این معادله  $\omega_1$  فرکانس طبیعی اول سد است.

### ۵- تحلیل دینامیکی مدل سرریز نیلوفری سد بارزو

#### شیروان

### ۱-۵- تحلیل دینامیکی مدل سرریز نیلوفری بدون در نظر گرفتن محیط اطراف

در این مثال تحلیل دینامیکی مدل سرریز نیلوفری بدون در نظر گرفتن محیط اطراف آن در فضای فرکانسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. هندسه مسئله و نحوه جزءبندی این سرریز در شکل (۱۳) نشان داده شده است. مشخصات مصالح به کار رفته بدین شرح است: دانسیته  $= 2400$  کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت پواسون  $= 0.2$ ، مدول برشی  $= 7/5 \times 10^9$  نیوتن وزن بر متر مربع، نسبت میرایی  $= 0.05$ .

به منظور بررسی محیط اطراف سرریز نیلوفری بر پاسخ دینامیکی آن، قسمتی از سرریز که در داخل خاک قرار دارد در دو راستا  $(y, z)$  کاملاً مقید می‌شود و در راستای سوم  $(x)$  تغییر مکان واحد اعمال می‌شود. تغییر مکان بالاترین نقطه سرریز در راستایی که تغییر مکان واحد اعمال شده است  $(x)$ ، در فرکانسهای مختلف بررسی می‌شود. تغییر مکانها بر حسب فرکانس بی‌بعد شده نسبت به فرکانس طبیعی

### ۳-۴- تأیید نتایج اندرکنش محیط محدود، محیط

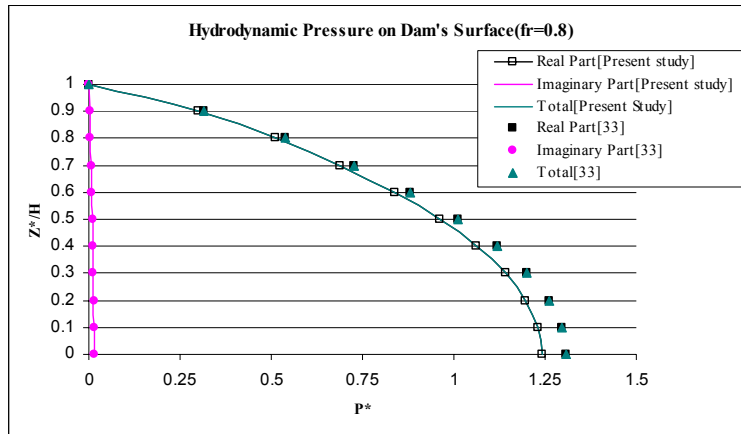
### نیمه‌بینه‌ای پی و محیط نیمه‌بینه‌ای سیال در تفرق امواج

### ۱-۳-۴- فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد با دیواره‌های صلب

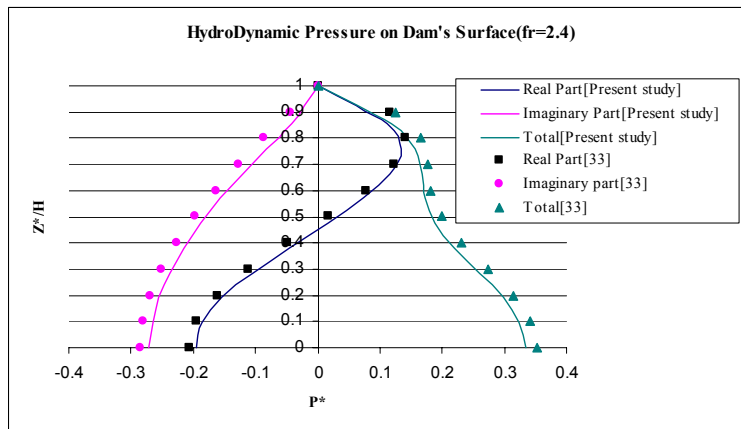
به منظور بررسی صحت برنامه تهیه شده برای اندرکنش سه محیط سازه، آب و خاک، همچنانکه در شکل (۱۰) نشان داده شده است، سد با دیواره صلب مدل شده و نتایج به دست آمده از برنامه اندرکنش ترکیبی سه محیط با نتایج مرجع [۳۳] مقایسه شده است. عمق آب در این سد  $H = 100m$  بوده و عرض دیواره سد نیز  $B = 80m$  است. در این مثال چگالی آب و سرعت موج در آب به ترتیب برابر  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  و  $c = 1440 \text{ m/s}$  می‌باشد. مقادیر مدول برشی مصالح به کار رفته به منظور مدلسازی به گونه‌ای انتخاب شده که بیان کننده دیواره صلب برای سد و مخزن باشد. مشخصات مصالح به کار رفته به صورت زیر است:

دانسیته  $= 2400$  کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت پواسون  $= 0.2$ ، مدول برشی  $= 7/5 \times 10^9$  نیوتن وزن بر متر مربع و نسبت میرایی  $= 0.05$ .

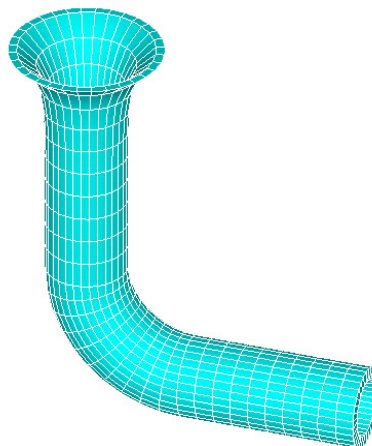
موج SV با زاویه صفر درجه و دامنه واحد به این سد تابیده شده است. فشار هیدرودینامیکی وارد بر خط مرکزی دیواره سد که ناشی از زمین‌لرزه در راستای جریان بالادست به پایین دست سد است، همچنانکه در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است، در بعضی از فرکانسها محاسبه شده است. مقادیر فشار



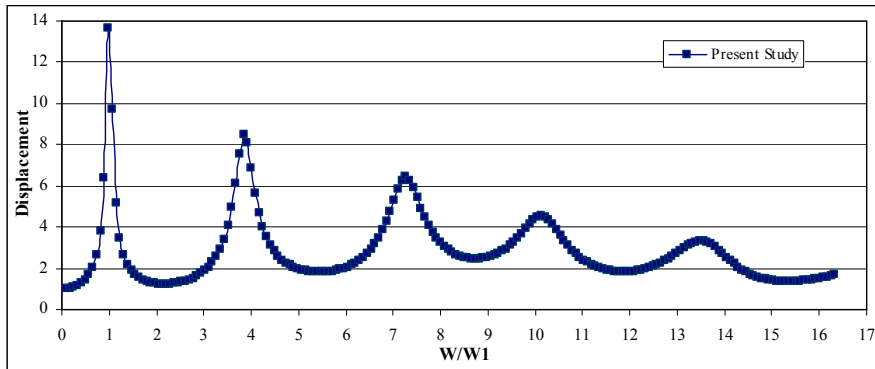
شکل ۱۱- فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد با دیواره‌های صلب، ناشی از زمین لرزه در راستای جریان بالادست به پایین دست (موج SV فرکانس بی بعد  $fr=0.8$ )



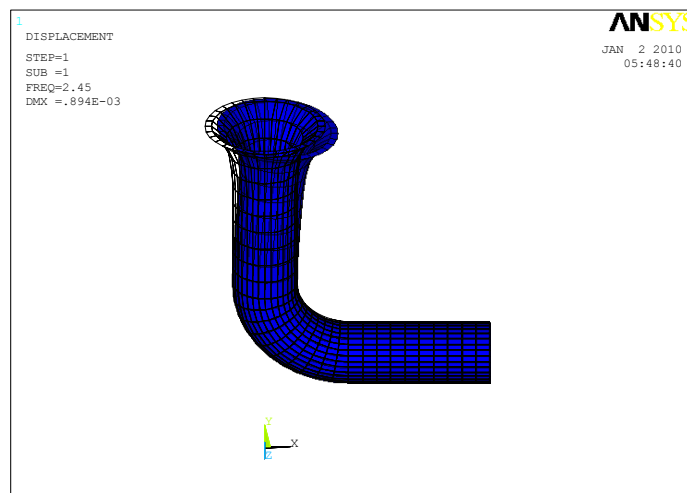
شکل ۱۲- فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد با دیواره‌های صلب، ناشی از زمین لرزه در راستای جریان بالادست به پایین دست (موج SV فرکانس بی بعد  $fr=2.4$ )



شکل ۱۳- هندسه و نحوه جزءبندی سرریز نیلوفری در معرض حرکت واحد تکیه‌گاهی



شکل ۱۴- تغییر مکان نقطه بالای سرریز در معرض حرکت واحد تکیه‌گاهی در مقابل فرکانسهای بی‌بعد شده



شکل ۱۵- نمایی از تغییر شکل مد اول سرریز مدل شده در نرم افزار ANSYS

پس از آن قطر داخلی سرریز ثابت و برابر ۸ متر می‌شود و به همین شکل تا رقوم ۱۵۱/۸۵ متر ادامه داشته و سپس با یک قوس دایروی به شعاع ۱۶ متر به تونل انحراف متصل می‌شود. هندسه مدل تهیه شده برای سیستم ترکیبی سازه، پی و آب در شکل (۱۷) نشان داده شده است. در برنامه نوشته شده اجزای مربوط به مرز سازه و پی، اجزای ایزوپارامتریک ۹ گره‌ای‌اند. همچنین اجزای مربوط به مرز سیال اجزای ثابت ۱ گره‌ای‌اند. شکل (۱۸) هندسه و جزءبندی سیال اطراف سرریز را نشان می‌دهد. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده در مدلسازی به شرح زیر است:

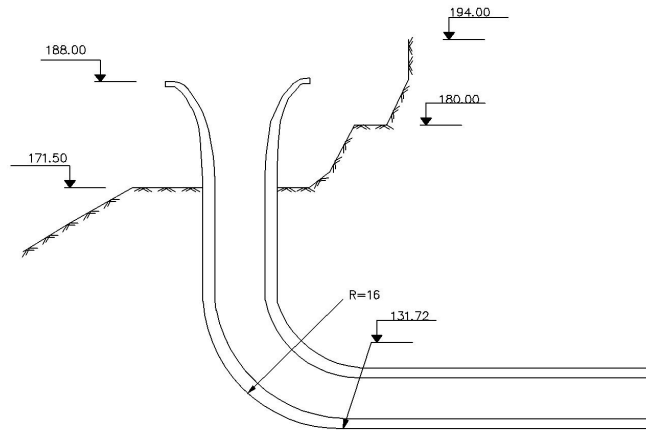
#### سرریز نیلوفری

بتن با دانسیته=۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت پواسون=

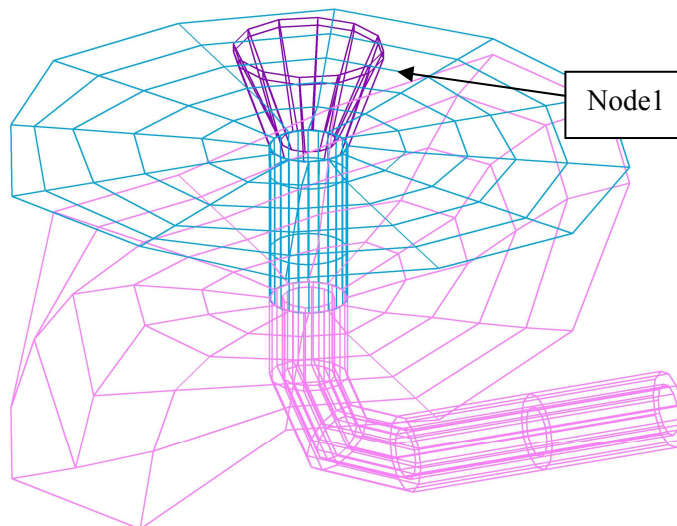
$(\omega_1 = 15.386 \text{ s}^{-1})$  در شکل (۱۴) رسم شده است. همچنین لازم به ذکر است که فرکانس طبیعی اول سازه مطابق شکل (۱۵) از نرم‌افزار ANSYS به دست آمده است.

#### ۲-۵- تحلیل دینامیکی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با مخزن و پی

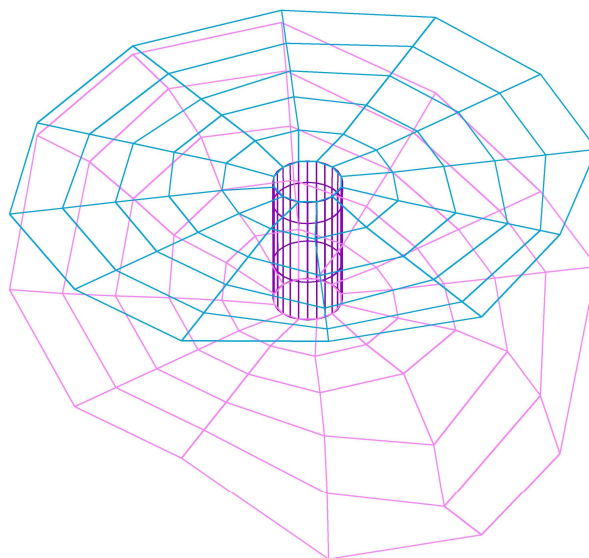
در این مثال به بررسی تحلیل دینامیکی مدل سرریز نیلوفری سد بارزو شیروان با در نظر گرفتن اندرکنش خاک، سازه و آب در فضای فرکانسی پرداخته شده است. همچنان‌که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، تاج این سرریز در رقوم ۱۸۸ متر بوده و دارای قطر دهانه ۲۳ متر است و پروفیل قیف سرریز تا تراز ۱۷۱/۵ متر ادامه دارد و



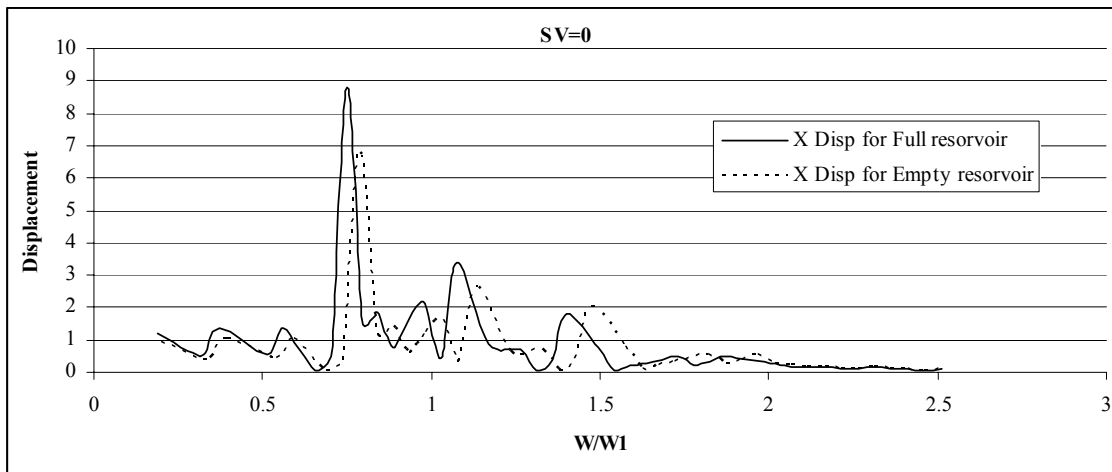
شکل ۱۶- نمایی از پروفیل سرریز نیلوفری سد بارزو شیروان



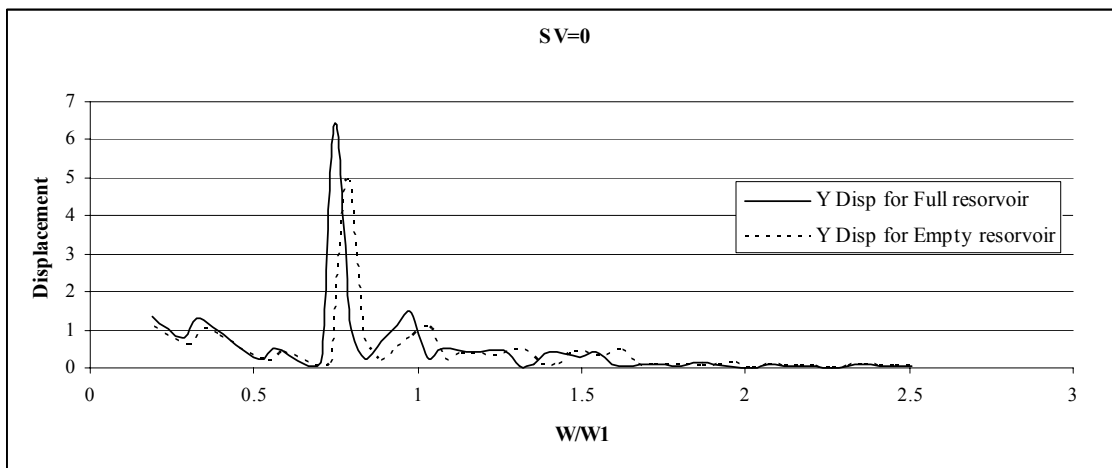
شکل ۱۷ - نمایش تلفیق سه محیط و محل قرارگیری گره شماره ۱



شکل ۱۸ - جزءبندی سیال اطراف سرریز



شکل ۱۹- بزرگنمایی مؤلفه X میدان جابه‌جایی سطحی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با شالوده و آب در گره ۱ تحت برخورد موج SV با زاویه و آزیموت صفر درجه



شکل ۲۰- بزرگنمایی مؤلفه Y میدان جابه‌جایی سطحی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با شالوده و آب در گره ۱ تحت برخورد موج SV با زاویه و آزیموت صفر درجه

۰/۲، مدول برشی =  $7/5 \times 10^9$  نیوتن وزن بر متر مربع و نسبت میرایی = ۰/۰۵.

#### شالوده

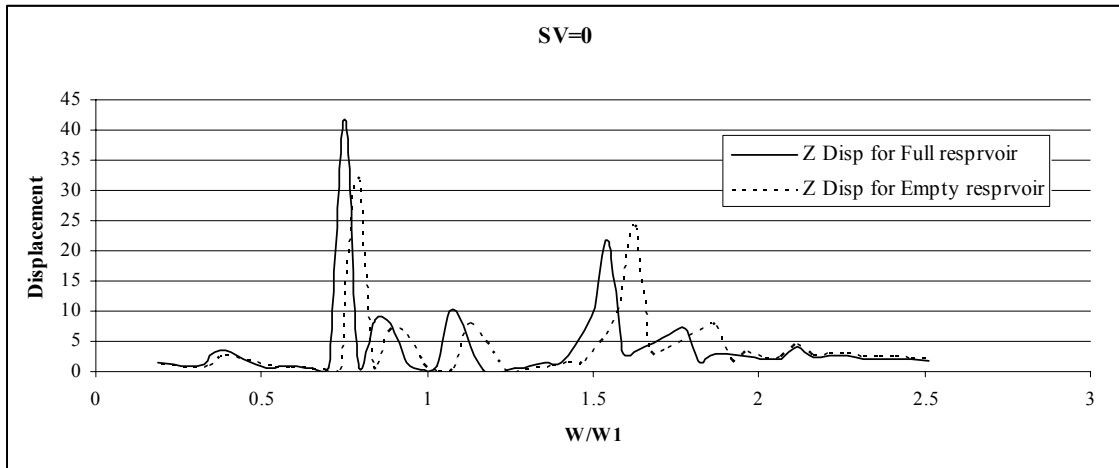
سنگ آهک دارای لایه‌های شیلت با دانسیته = ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت پواسون = ۰/۳، مدول برشی =  $9 \times 10^9$  نیوتن وزن بر متر مربع و نسبت میرایی = ۰/۰۵.

#### سیال

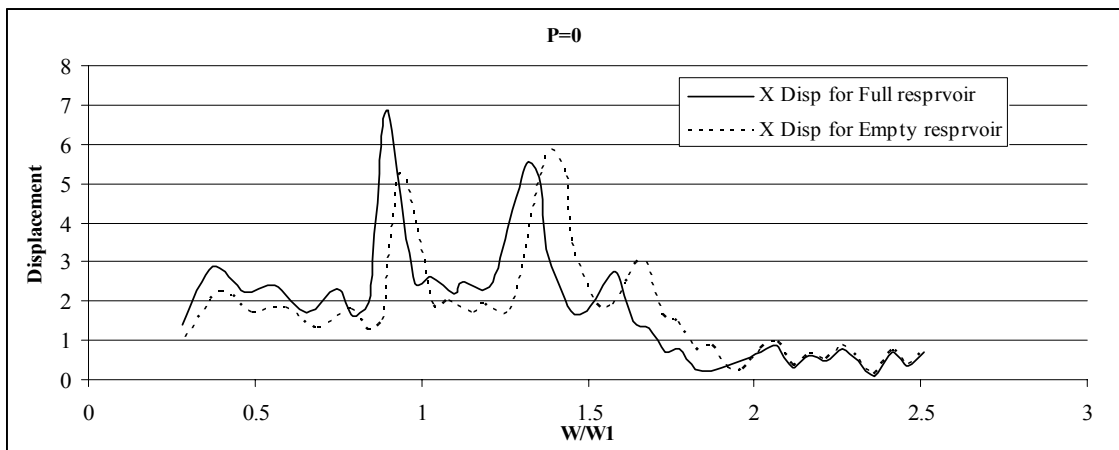
آب با دانسیته = ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سرعت موج

برشی = ۱۴۴۰ متر بر ثانیه، تراکم‌پذیر و غیرلزج.

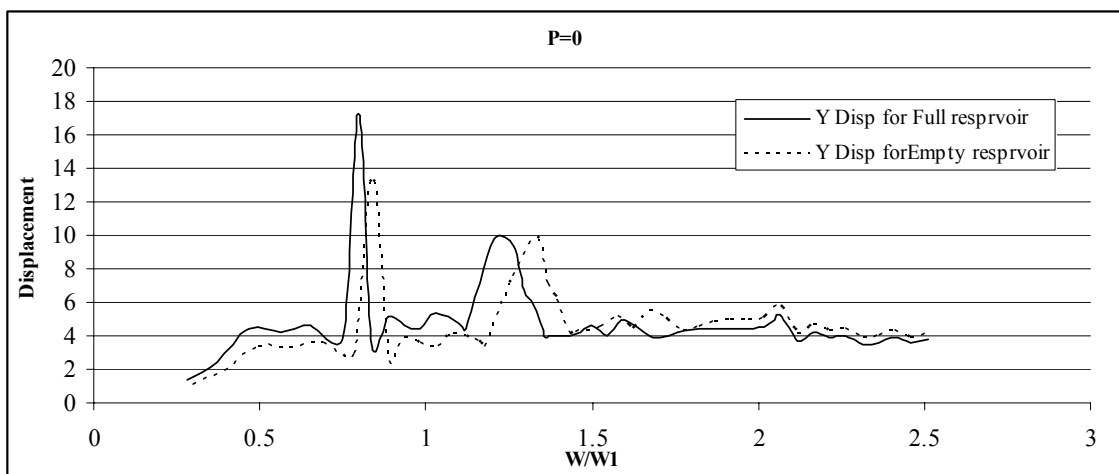
مدل تهیه شده تحت برخورد امواج P، SH و SV با زاویه صفر درجه مورد بررسی قرار گرفته است. مؤلفه‌های جابه‌جایی سطحی برای نقطه بالای سرریز در دو حالت مخزن پر و خالی به دست آمده و با هم مقایسه شده که در شکل‌های (۱۹) الی (۲۷) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این شکل‌ها فرکانسهای موج تابیده شده با فرکانس طبیعی اول سازه (fh=2.54 Hz) نرمال شده است. همچنان‌که در این شکل‌ها



شکل ۲۱ - بزرگنمایی مؤلفه Z میدان جابه‌جایی سطحی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با شالوده و آب در گره ۱ تحت برخورد موج SV با زاویه و آزیموت صفر درجه

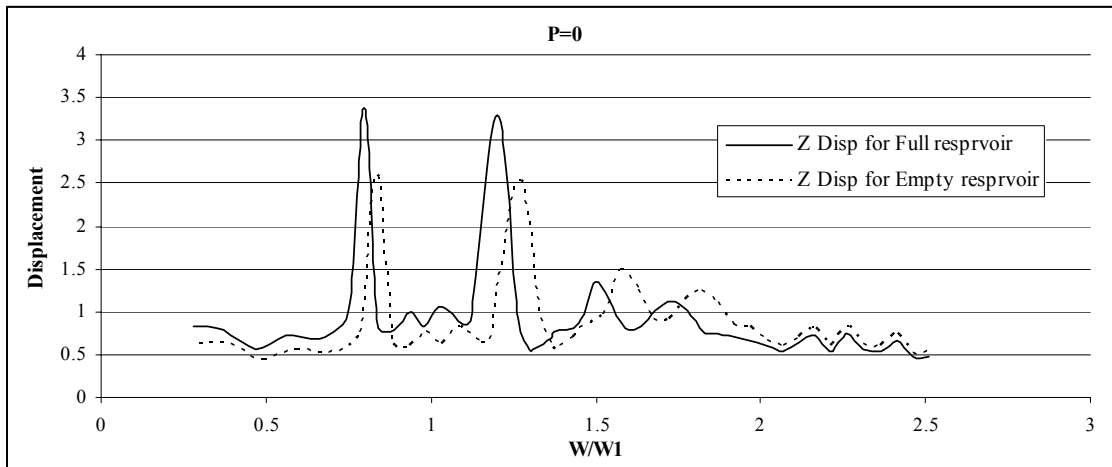


شکل ۲۲ - بزرگنمایی مؤلفه X میدان جابه‌جایی سطحی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با شالوده و آب در گره ۱ تحت برخورد موج P با زاویه و آزیموت صفر درجه

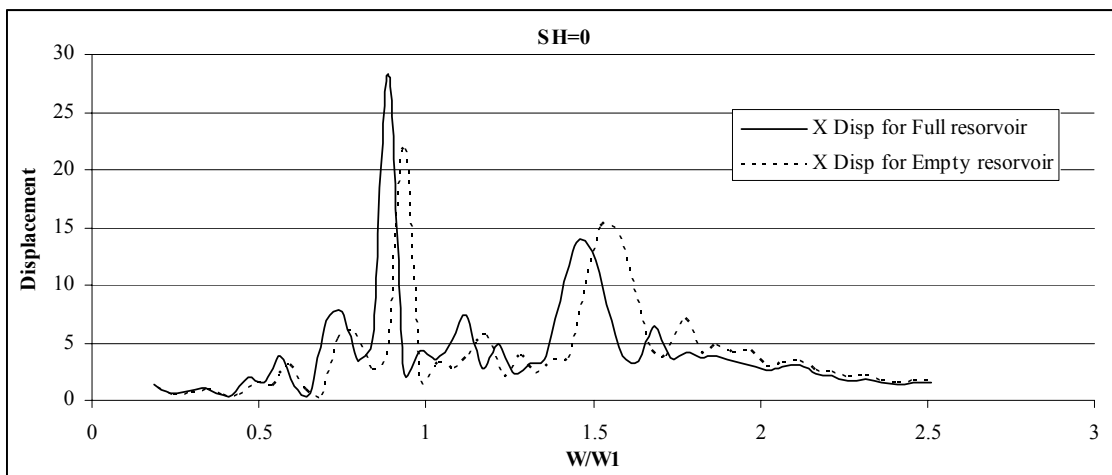


شکل ۲۳ - بزرگنمایی مؤلفه Y میدان جابه‌جایی سطحی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با شالوده و آب در گره ۱ تحت برخورد موج P با زاویه و آزیموت صفر درجه

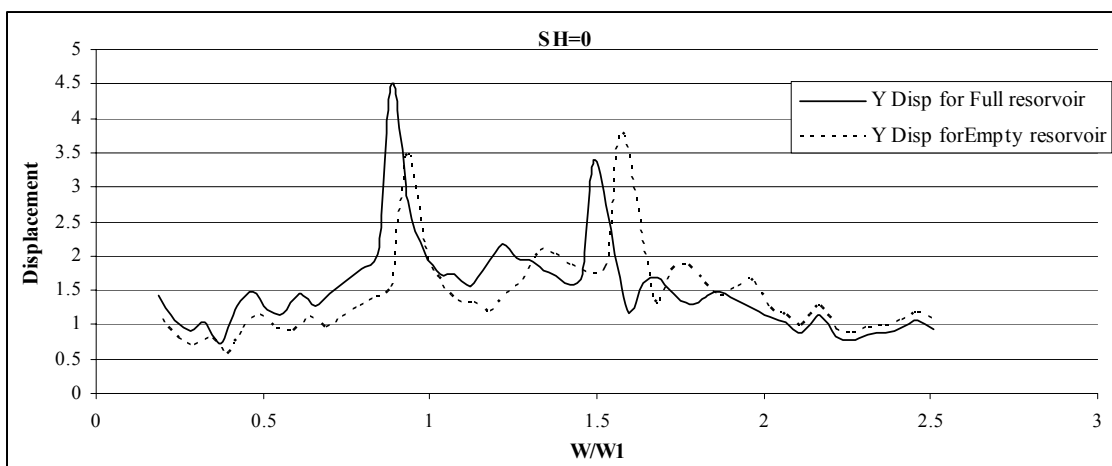




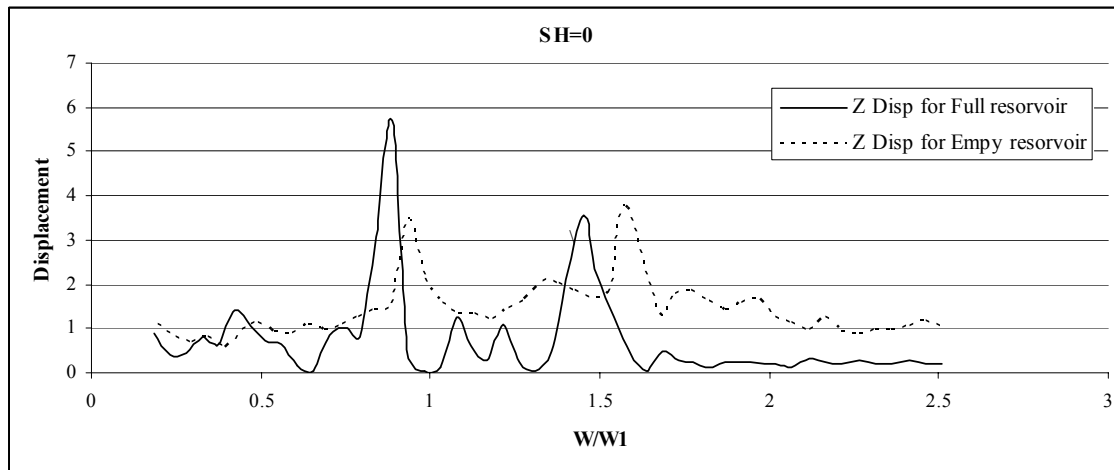
شکل ۲۴ - بزرگنمایی مؤلفه Z میدان جابه‌جایی سطحی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با شالوده و آب در گره ۱ تحت برخورد موج P با زاویه و آزیموت صفر درجه



شکل ۲۵ - بزرگنمایی مؤلفه X میدان جابه‌جایی سطحی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با شالوده و آب در گره ۱ تحت برخورد موج SH با زاویه و آزیموت صفر درجه



شکل ۲۶ - بزرگنمایی مؤلفه Y میدان جابه‌جایی سطحی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با شالوده و آب در گره ۱ تحت برخورد موج SH با زاویه و آزیموت صفر درجه



شکل ۲۷ - بزرگنمایی مؤلفه Z میدان جابه‌جایی سطحی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با شالوده و آب در گره ۱ تحت برخورد موج SH با زاویه و آزیموت صفر درجه

بعدی پرداخته شد.

به منظور بررسی صحت تحقیق حاضر، مثالهایی ارائه شد. سرریز نیلوفری سد بارزو شیروان به عنوان مثال مورد استفاده شد. سپس به منظور بررسی سازه مذکور در ابتدا فرکانس طبیعی این سازه به دست آمد و پاسخ این سازه در اثر حرکت تکیه‌گاه صلب مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت پاسخ سازه با در نظر گرفتن اندرکنش سه محیط مورد بررسی قرار گرفت.

لازم به ذکر است که در تمامی مثالهای ارائه شده در این تحقیق محیط سازه و شالوده به صورت همگن، خطی و الاستیک فرض شد. همچنین محیط مخزن با فرض تراکم‌پذیر و غیرویسکوز بودن سیال و با صرف‌نظر از امواج سطحی به صورت محیط نیمه‌بینهایت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثرات ناشی از توپوگرافی و نامنظمی زمین و تفرق امواج نیز در روند حل این مسئله در نظر گرفته شده است.

به دلیل وقوع پدیده میرایی تشعشعی و تغییرات در مشخصه‌های دینامیکی سیستم، پاسخها در حالت وجود بستر نیمه‌نامحدود همگن در مقایسه با حالت بستر صلب عموماً کاهش می‌یابند. انعطاف‌پذیری بستر باعث کاهش سختی سیستم و در نتیجه کاهش در فرکانسهای مدهای ارتعاشی سیستم می‌شود.

مشاهده می‌شود، مقادیر پاسخها در زمانی که مخزن پر است و اندرکنش آب با سازه در نظر گرفته شده است در فرکانسهای پایتتر از ۱/۵ برابر فرکانس مد اول ارتعاش سرریز، افزایش یافته و در فرکانسهای بالاتر از آن، کاهش یافته است. همچنین فرکانس تحریک سازه در زمانی که مخزن پر است کمتر از حالتی است که مخزن خالی است. همچنین در این شکلها اثرات مدهای ارتعاشی محیطهای سازه-سیال-پی مشاهده می‌شود.

جهت محورهای مختصات در نظر گرفته شده در این مسئله مطابق آنچه که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. بر این اساس زمانی که موجهای SV، SH و P با زاویه صفر به سازه برخورد می‌کنند به ترتیب پاسخها در راستای X، Y و Z بیشترین مقادیر را خواهند داشت. همچنین در برخورد موجهای SV و SH به سازه، فرکانس اول سازه بیشتر تحریک شده درحالی که در برخورد موج P، تحریکات فرکانس اول و دوم سازه نسبت به یکدیگر تفاوت کمتری دارند.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش اجزای مرزی در فضای فرکانسی به بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-پی، پی-سیال و سیال-سازه به صورت سه

کاهش فرکانسهای ارتعاشی سیستم می‌شود. همچنان‌که مد اول ارتعاشی سازه حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. اثرات ناشی از توپوگرافی سطحی، پاسخهای لرزه‌ای سازه را دستخوش تغییرات قرار داده و باعث ایجاد تحریکات موضعی در پاسخ لرزه‌ای سازه می‌شود. همچنین در اثر برخورد امواج S به سازه، مد ارتعاشی اول سازه غالب می‌شود.

اندرکنش سیال با سازه، تغییرات اساسی در پاسخ لرزه‌ای سیستم خواهد گذاشت. به گونه‌ای که مقادیر پاسخها در فرکانسهای پایتتر از ۱/۵ برابر فرکانس بی‌بعد سازه، حدود ۱۵ درصد افزایش یافته و در فرکانسهای بالاتر از ۱/۵ برابر فرکانس بی‌بعد سازه، بین ۵ تا ۱۵ درصد کاهش یافته است. همچنین وجود سیال در تماس با بدنه سازه باعث افزایش جرم مؤثر و

## واژه نامه

1. method of collocation
2. collocation point

3. influence matrices
4. coupled system

## مراجع

1. Angat, A., "Le tremblement de Terre de Province, Annals du Bureau Central Meterologique de France," Memories, pp. 37-93, 1909.
2. Brambati, A., Faccioli, E., Carulli, E. B., Culchi, F., Onofri, R., Stefanni, S., and Ulcigrai, F., "Studio de Microzonizzaione Sismica Dell'area di Tarcento (Friuli)," Editore da Regiona Autonoma Friuli Venesia Giulia, 1980.
3. Siro, L., "Southern Italy November 23 1980 earthquake," *Proceeding of the 7<sup>th</sup> European conference on earthquake engineering*, Athens, Greece, pp. 20-25, September 1982.
4. Singh, S. K., Lermo, J., Dominguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J. M., Mena, E., and Quaas, R., "The Mexico earthquake of September 19, 1985, A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site," *Earthquake Spectra*, Vol. 4, pp. 653-673, 1988.
5. Celebi, M., and Hanks, T., "Unique Site Response Condition of Two Major Earthquakes of 1985: Chile and Mexico," *Proceedings of the International Symposium of Engineering Geology Problems in Seismic Areas, Bari, Italy*, 4 April 1986.
6. Finn, W. D. L., Ventura, C. E., and Schuster, N. D., "Ground motions during the 1994 Northridge Earthquake," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 300-315, 1995.
7. Hiroshi, K., "The Cause of the Damage Belt in Kobe: the Basin-Edge Effect Constructive Interference of the Direct S-Wave with the Basin-Induced Diffracted/Rayleigh Waves," *Seis. Res. Lett.*, Vol. 67, No. 5, pp. 25-30, 1996.
8. Athanasopoulos, G. A., Pelkis, P. C., and Leonidou, E. A., "Effect of Surface Topography on Seismic Ground Response in the Egeion (Greece) 15 June 1995 Earthquake," *Int. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, pp. 135-149, 1999.
9. Tsai, C. S., and Lee, G. C., "Time Domain Analysis of Dam-Reservoir System. II: Substructure Method," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, pp. 2007-2026, 1991.
10. Chopra, A. K., and Chakrabarti, P., "Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Water-Foundations Rock Interaction," *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 9, pp. 363-383, 1981.
11. Hall, J. F., and Chopra, A. K., "Two-Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Gravity and Embankment Dams Including Hydrodynamic Effects," *Earthquake Eng. And Struct. Dyn.*, 10, pp. 305-332, 1982a.
12. Hall, J. F., and Chopra, A. K., "Hydrodynamic Effects in the Response of Concrete Gravity Dams," *Earthquake Eng. And Struct. Dyn.*, Vol. 10, pp. 333-345, 1982b.
13. Fenves, G., and Chopra, A. K., "Effects of Reservoir Bottom Absorption and Dam-Water-Foundation Rock Interaction on Frequency Response Functions for Concrete Gravity Dams," *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 13, pp. 13-31, 1985.
14. Lotfi, V., Roesset, J. M., and Tassoulas, J., "A Technique for the Analysis of the Response of Dams to Earthquakes," *Earthquake Eng. And Struct. Dyn.*, Vol. 15, pp. 463-490, 1987.
15. Kakuda, K., and Tosaka, N., *Numerical Analysis of Coupled Fluid-Elasticity Systems using the BEM, in Boundary Elements*, Springer-Verlag, Berlin.
16. Antes, H., and Von Estorff, O., "Analysis of Absorption Effects on the Dynamic Response of Dam Reservoir Systems by Element Methods," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 15, pp. 1023-1036, 1987.

17. Medina, F., and Dominguez, J., "Boundary Elements for the Analysis of the Seismic Response of Dams Including Dam-Water-Foundation Interaction Effects. I," *Eng. Analysis with B.E.*, Vol.6, pp. 151-157, 1989.
  18. Dominguez, J., and Medina, F., "Boundary Elements for the Analysis of the Seismic Response of Dams Including Dam-Water-Foundation Interaction Effects. II," *Eng. Analysis with B.E.*, Vol.6, pp. 158-163, 1989.
  19. Medina F., Dominguez J., and Tassoulas J. L., "Response of Dams to Earthquakes Including Effects of Sediments," *Journal of Struct. Eng. ASCE*, Vol. 116, pp. 3108-3121, 1990.
  20. Hall, J. F., and Chopra, A. K., "Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects," *Journal of Eng. Mech. Div., ASCE*, Vol. 109, pp. 149-163, 1983.
  21. Tsai, C. S., and Lee, G. C., "Arch Dam-Fluid Interactions by FEM-BEM and Substructure Concept," *Int. Journal of Num. Meth. Eng.*, Vol. 24, pp. 2367-2388, 1987.
  22. Wang, M. H., and Hung, T. K., "Three-Dimensional Analysis of Pressures on Dams," *Journal of Eng. Mech., ASCE.*, Vol.116, pp. 1290-1304, 1990.
  23. Fok, K., and Chopra, A. K., "Hydrodynamic and Foundation Flexibility Effects in Earthquake Response of Arch Dams," *Journal of Struct. Eng. ASCE*, Vol.112, pp.1810-1828, 1986c.
  24. Fok, K., and Chopra, A. K., "Water Compressibility in Earthquake Response of Arch Dams," *Journal of Struct. Eng.*, Vol.113, pp. 958-975.
  25. Maeso, O., and Dominguez, J., "Earthquake Analysis of Arch Dams. I: Dam-Water-Foundation Interaction," *Journal of Eng. Mech., ASCE*, Vol. 119, pp. 496-512, 1993.
  26. Dominguez, J., and Maeso, O., "Earthquake Analysis of Arch Dams. II: Dam-Water-Foundation Interaction," *Journal of Eng. Mech., ASCE*, Vol. 119, pp. 513-530, 1993.
  27. Maeso, O., Aznarez, J. J., and Dominguez, J., "Three-Dimensional of Reservoir Sediment and Effects on the Seismic Response of Arch Dams," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, pp. 1103 – 1123, 2004.
  28. Aznarez, J. J., Maeso, O., and Dominguez, J., "BE Analysis of Bottom Sediments in Dynamic Fluid-Structure Interaction Problems," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 30, pp. 124–136, 2006.
  29. Mosahebi, P., Noorzad, A., Rahimian, M., and Omidvar, B., "The Effect of Interaction between Reservoir and Multi-Layer Foundation on the Dynamic Response of a Typical Arch Dam (Karaj Dam) to "P" and "S" Waves," *The Arabian Journal For Science and Engineering*, Vol. 34, pp. 91-107, 2009.
۳۰. مصاحبی، پ.، "تحلیل دینامیکی سدهای دوقوسی بتنی با درنظر گرفتن اندرکنش مخزن و پی لایه‌ای با استفاده از روش اجزای مرزی،" رساله دکتری، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
31. Dominguez, J., "Boundary Elements in Dynamics," Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K., 1993.
  32. Reinoso, E., "Scattering of seismic waves: applications to the Mexico City valley," WIT Press: London, 2002.
  33. Fahjan, Y. M., Borekci, O. S., and Erdik, M., "Earthquake-Induced Hydrodynamic Pressures on a 3D Rigid Dam-Reservoir System using DRBEM and a Radiation Matrix," *Int. Journal of Numer. Meth. Engg.*, Vol. 56, pp. 1511–1532, 2003.