# بررسی اثر شکل هندسی حوضهٔ رسوبی و فرکانس موج تحریک بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین

ساسان نریمان‌نژاد، علیرضا جعفری‌ندوشن، علی معصومی*؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی
عبدالله سهرابی‌بیدار؛ دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکدهٔ زمین‌شناسی
علی قنبری؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۱/۲۳ پذیرش ۹٦/۰۱/۱٦

## چکیده

از آن‌جاکه اغلب شهرها در نزدیکی و یا روی دره‌های آبرفتی بنا شده‌اند، اثرهای هندسه حوضهٔ رسوبی بر حرکت زمین در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. انحنای حوضه‌ای که در آن خاک‌های آبرفتی نرم‌تر رسوب‌گذاری شده است، می‌تواند امواج حجمی را حبس کرده و موجب می‌شود که برخی از امواج حجمی برخوردی، به‌صورت امواج سطحی در لایه آبرفتی منتشر شوند، این امواج می‌توانند لرزش‌های شدیدتر و طولانی‌تری نسبت به آن‌چه در تحلیل یک بعدی با فرض انتشار قائم امواج برشی تخمین زده می‌شوند ایجاد کنند. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس چهار شکل حوضهٔ رسوبی شامل مستطیلی، ذوزنقه‌ای، بیضی و مثلثی در حوزه زمان تحلیل شدند و اثر شکل هندسی حوضه رسوبی و هم‌چنین اثر محتوای فرکانسی موج تحریک در هر یک از حوضه‌ها بررسی شد و نتایج آن با تحلیل یک بعدی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد پاسخ‌های تحلیل یک بعدی با دو بعدی اختلاف بسیاری دارد این اختلاف تا ۱/٤٥ برابر پاسخ شتاب تحلیل دوبعدی به یک بعدی در حوضهٔ مستطیل شکل است. مدل حوضه مستطیل شکل که در این تحقیق بررسی شده است در مقایسه با سایر حوضه‌ها پاسخ‌های بیش‌تری دارد.

**واژه‌های کلیدی:** اثر ساختگاه، اثر توپوگرافی، حوضه رسوبی، دره آبرفتی، بزرگ‌نمایی، ژئوتکنیک لرزه‌ای، حرکت حوزه آزاد، مرزهای جاذب انرژی، المان محدود

*نویسنده مسئول massumi@khu.ac.ir

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

## مقدمه

شرایط محلی ساختگاه برهمهٔ خصوصیات مهم حرکت نیرومند زمین شامل دامنه، محتوای فرکانسی و مدت زمان آن تأثیر چشم‌گیر می‌گذارند. میزان این تأثیر تابع هندسه، خواص مصالح لایه‌های زیرسطحی و توپوگرافی ساختگاه و خصوصیات حرکت ورودی است. تغییر در حرکت زمین بر اثر شرایط ساختگاه باعث شده است که محققان بسیاری در ارزیابی اثرها و آسیب‌های زلزله، اثرهای ساختگاهی را در درجه اول اهمیت قرار دهند. اثرهای ساختگاهی شامل دو بخش است:

- اثرهای لایه‌های نرم سطحی که بر اثر اختلاف سرعت بین لایه‌های خاکی ایجاد می‌شود.
- اثرهای توپوگرافی سطحی و زیرسطحی که باعث انعکاس و انکسار امواج بر اثر هندسه ساختگاه می‌شود که نتیجه آن بزرگ‌نمایی بیش‌تر است.

بهترین مثال از اثرهای توپوگرافی، با یک لرزه‌نگار که روی پایه سد «پاکویما» در جنوب کالیفرنیا نصب شده بود، ثبت شده است. لرزه‌نگار سد «پاکویما» شتاب‌های افقی حداکثری حدود ۱/۲۵ شتاب زمین در هر دو جهت عمود بر هم در زلزله ۱۹۷۱ سان فرناندو ($M_L$=٦,٤) را ثبت کرد. مقادیر ثبت شده برای زلزله‌ای با این بزرگا به میزان چشم‌گیری بزرگ‌تر از حد انتظار بود. لرزه‌نگار مذکور در تاج تپهٔ سنگی باریک در مجاورت سد نصب شده بود. تریفیناک و هادسون (۱۹۷۱) در تحقیق‌های بعدی در مورد این پدیده، بیشینه شتاب‌های بزرگ و نامتعارف ثبت شده را به پاسخ دینامیکی خود تپه که ناشی از اثر توپوگرافی بود، نسبت دادند [۱].

از آن‌جاکه اغلب شهرها در نزدیکی و یا روی حوضه‌های رسوبی بنا شده‌اند، در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای اثرهای حوضهٔ رسوبی بر حرکت زمین اهمیت ویژه‌ای دارد. انحنای حوضه‌ای که در آن خاک‌های آبرفتی نرمتر رسوب‌گذاری شده‌اند می‌تواند امواج حجمی را حبس کرده و موجب شود که برخی از امواج حجمی برخوردی، به‌صورت امواج سطحی در لایه آبرفتی منتشر شوند. این امواج می‌توانند لرزش‌های شدیدتر و طولانی‌تری نسبت به آن‌چه در تحلیل یک بعدی با فرض انتشار قائم امواج برشی تخمین زده می‌شوند ایجاد کنند. بارد و

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

بوچان[1] (۱۹۸۰) دره‌های آبرفتی را به‌صورت پارامتریک تحت امواج P, SV, SH بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که امواج سطحی به‌وسیلهٔ مرزهای دره ایجاد می‌شود و با انتشار آن در سطح دره آبرفتی باعث ایجاد بزرگ‌نمایی چشم‌گیر می‌شود [۲]، [۳]. کینگ و تاکر[2] (۱۹۸٤) حرکت‌های زمین را در امتداد پروفیل‌های عرضی و طولی دره «چوسل» در نزدیکی افغانستان در مرز اتحاد جماهیر شوروی سابق اندازه‌گیری کردند. تفسیر پاسخ یک سری زلزله‌های کوچک ($M_L \leq ٤$) نشان می‌دهد که تحلیل‌های پاسخ یک‌بعدی زمین متوسط پاسخ رسوب‌ها نزدیکی مرکز دره را مشخص می‌کنند و در گوشه‌ها و لبه‌های دره مشخص نمی‌شود. اختلاف زیاد بین توابع تشدید در مرکز و لبه‌ها دره، علت اختلاف قابل ملاحظه حرکت در این مکان‌ها است [٤]. اثرهای مشابهی نیز برای دره‌های دیگر در زلزله‌های مختلف مشاهده شده است (دره کاراکاس در زلزله سان فرناندو (۱۹٦۷) و (۱۹۷۱)، در لینین خان ارمنستان (۱۹۸۸). هارمسن وهاردین[3] (۱۹۸۱)، اوتساکی وهارومی[4] (۱۹۸۳) خاطر نشان کردند که لبه‌های دره آبرفتی که تحت امواج P قرار گرفته است باعث ایجاد امواج رایلی می‌شود [٥] و [٦]. بارد و گاریل[5] (۱۹۸٦) با استفاده از روشی تحلیلی، پاسخ دوبعدی دره‌های آبرفتی کم‌عمق تا عمیق را بررسی کردند. از مقایسه توابع تشدید محاسبه شده برای حالت دوبعدی با توابع تشدید با فرض انتشار یک بعدی امواج می‌توان دقت فرضیه‌های یک بعدی را نشان داد [۷]. پژوهش‌های تئوریک رایال[6] و همکاران (۱۹۹۲) برای یک دره عمیق نشان داد که سازگاری بین توابع تشدید یک و دوبعدی در مرکز دره بیش‌تر از کناره‌ها است اما این سازگاری در مرکز دره‌های کم عمق به نسبت عمیق بسیار بیش‌تر است. دره‌های آبرفتی با شکل نامنظم که متشکل از مناطق با پستی‌ها و بلندی‌ها است، امکان ایجاد حرکت‌های بسیار پیچیده و حتی مغشوش وجود آورد [۸]. ژانگ و پاپاجورجیا[7] (۱۹۹٦) پاسخ غیرخطی منطقه مارینا را طی زلزله لوما پریتا شبیه‌سازی کردند [۹].

1. Bard and Bouchon
2. King and Tucker
3. Harmsen and Harding
4. Ohtsuki and Harumi
5. Bard And Gareil
6. Rial
7. Zhang and Papageorgiou

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

کمالیان و همکاران (۲۰۰۷) تحلیل‌های پارامتری متعددی را روی دره به شکل نیم‌سینوسی تحت اثر امواج طولی و برشی منتشر شده در راستای قائم در حالت دوبعدی با استفاده از روش اجزای مرزی مستقیم در حوزه زمان انجام دادند که طول موج و هندسه ساختگاه، مشخصات مصالح، نوع موج ورودی و دیگر مشخصه‌های حاکم بر الگوی بزرگ‌نمایی این دره‌ها شناسایی شدند [۱۰]. گتمیری و همکاران (۲۰۰۸) آثار توپوگرافی دره‌های رسوبی روی امواج زلزله را با استفاده از ترکیب دو روش المان مرزی و المان محدود بهینه شده بررسی کردند. بر اساس این پژوهش، حرکت میدان نزدیک با المان محدود و حرکت میدان دور با المان مرزی مدل شد (به‌عبارتی محدودهٔ خود مدل که عوارض توپوگرافی است با المان محدود و سنگ بستر و مرزها (محیط نیمه بی‌نهایت) با المان مرزی انجام شده است) [۱۱]. سهرابی بیدار و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از روش اجزای مرزی سه‌بعدی مستقیم در حوزهٔ زمان پاسخ دره سه‌بعدی گوسی شکل را به‌صورت پارامتریک بررسی کردند، طول موج، هندسه ساختگاه و تا حدودی نوع موج مهاجم به‌عنوان پارامترهای مؤثر بر بزرگ‌نمایی این نوع تپه‌ها شناسایی شدند. توابع بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی دره‌های دوبعدی مقادیر کوچک‌تری به نسبت توابع بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی دره‌های سه‌بعدی با هندسه و ابعاد مشابه نشان می‌دهند [۱۲].

علی‌رغم اهمیت موضوع اثر دوبعدی ساختگاه در بسیاری از آئین‌نامه‌ها و استانداردهای لرزه‌ای دنیا گنجانده نشده است، زیرا این اثر به پارامترهایی نظیر هندسه ساختگاه، نوع تحریک موج ورودی، مشخصات مصالح و غیره بستگی دارد و همین موارد پیش‌بینی آن را سخت می‌سازد. در این تحقیق سعی می‌شود با مقایسهٔ پاسخ چهار حوضه رسوبی با هندسه‌های فرضی مستطیلی، ذوزنقه‌ای، بیضی و مثلثی شکل، اثر شکل هندسی حوضهٔ رسوبی بر پاسخ آن و میزان حساسیت پاسخ آن‌ها به فرکانس موج تحریک بررسی شود، در این پژوهش نسبت دهانه به عمق هر چهار حوضه ثابت و برابر در نظر گرفته شد تا صرفا اثر شکل هندسی این چهار حوضهٔ رسوبی تحت شرایط یک‌سان با یک‌دیگر بررسی شود.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

## مدل‌سازی

در این بخش به‌منظور بررسی اثر شکل هندسی حوضهٔ رسوبی و فرکانس موج تحریک بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، ابتدا روش مدل‌سازی با استفاده از نتایج معتبر پژوهش‌های پیشین صحت‌سنجی شده و سپس مدل‌های بررسی شده، معرفی می‌شود.

### ۱. صحت‌سنجی

به‌منظور صحت‌سنجی نرم افزار المان محدود آباکوس و روش مدل‌سازی، جابه‌جایی میدان آزاد سطح یک دره آبرفتی نیم‌دایره بر اساس پژوهش‌های کمالیان و همکاران (۲۰۰٦) [۱۳] و موسسیان و داروینسکی [1](۱۹۸۷) [۱٤] به‌دست آمد و با نتایج آن‌ها مقایسه شد. دره نیم‌دایره به شعاع ۱۰ متر در محیط ویسکوالاستیک بررسی شد. مشخصات مصالح به‌کار رفته در جدول ۱ آمده‌است.

**جدول ۱. خصوصیات مصالح**

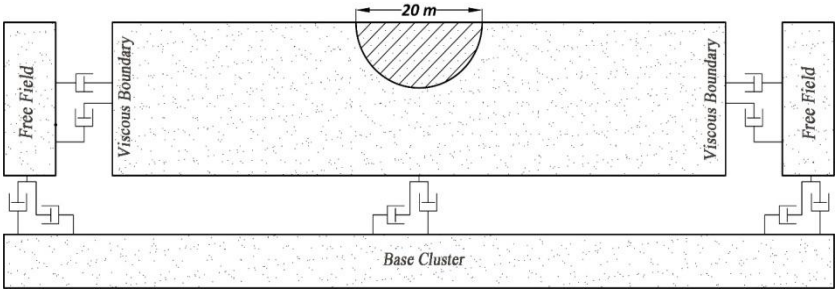
| لایه | ρ ($kg/m^3$) | E (MPa) | υ | $V_s$ ($m/s$) |
|---|---|---|---|---|
| حوضه رسوبی | ۱۳۳۳ | ٤۳,۳ | ۰,۳۳۳ | ۱۱۱,٦٦٥ |
| سنگ بستر | ۲۰۰۰ | ۲٦٦ | ۰,۳۳۳ | ۲۲۳,۳۳ |

برای آنالیز دینامیکی از حل‌گر ضمنی [2] استفاده شد. برای جذب امواج تابشی و جلوگیری از بازگشت آن‌ها به داخل مدل باید از مرز جاذب مناسب استفاده کرد. تاکنون انواع مرزهای جاذب مانند مرز ویسکوز، مرز ویسکوالاستیک، مرز المان بی‌نهایت، مرز میدان آزاد و انواع مرزهای دیگری را پژوهش‌گران معرفی کرده‌اند. در این تحقیق مرزهای کناری از ترکیب مرز میدان آزاد و ویسکوز و در مرز پایین از مرز ویسکوز استفاده شد. مرز میدان آزاد حرکت یک بعدی میدان آزاد را تولید می‌کند و به مدل اصلی انتقال می‌دهد و امواج بازگشتی مازاد به‌وسیلهٔ مرز ویسکوز جذب می‌شود [۱۵]، [۱٦]. شکل۱ به‌صورت شماتیک مدل را نشان می‌دهد.

مدل تحت تابش قائم موج ریکر SV با فرکانس غالب ۵,۵۸ هرتز قرار گرفت، شکل ۲ تحریک ورودی جابه‌جایی را نشان می‌دهد، سایر مشخصات موج ریکر در جدول ۲ آمده‌است. رابطه ۲، معادله ریکر استفاده شده برای تحریک ورودی را بیان می‌کند. شایان توجه است که

1. Mossessian and Dravinski
2. Implicit

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]




**شکل۱. نمای کلی مدل**

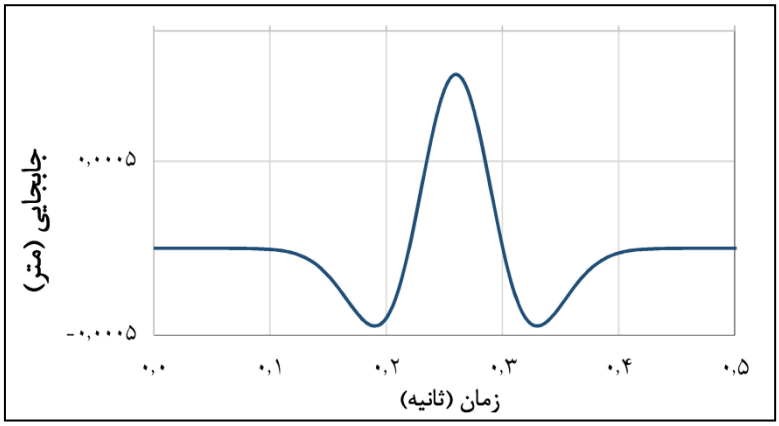
همهٔ المان‌های داخل مدل، باید تمامی فرکانس‌های موج تحریک را از خود عبور دهند، با توجه به فرکانس غالب موج و پراکندگی فرکانس بار تحریک، از فرکانس ۲۵ هرتز به بعد، تحریکی وجود ندارد. ابعاد المان با توجه به رابطهٔ (۱) و با در نظرگیری فرکانس ماکزیمم ۲۵ هرتز، برای مصالح آبرفتی ۰,٤ متر و سنگ بستر ۰,۷ متر انتخاب شد [۱۷] شکل ۳ چیدمان المان‌ها و نحوهٔ مدل‌سازی حوضهٔ رسوبی در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

$$\Delta L < \frac{\lambda}{10} \quad (۱)$$

$$f(t) = A_{max}\left[1 - 2\left(\pi f_p(t - t_0)\right)^2\right] e^{-\left(\pi f_p(t-t_0)\right)^2} \quad (۲)$$

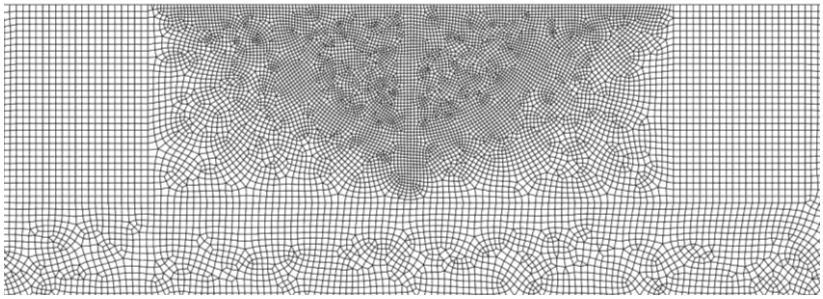
**جدول۲. مشخصات موج ریکر ورودی به مدل**

| $f_p$(Hz) | $t_0$(s) | $A_{max}$(m) |
|---|---|---|
| ۵,۵۸ | ۰,۲٦ | ۰,۰۰۱ |



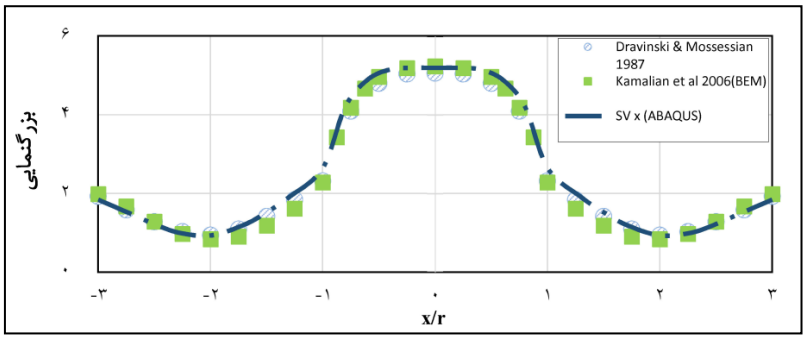

**شکل ۲. نمودار تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی موج ریکر ۵,۵۸ هرتز**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

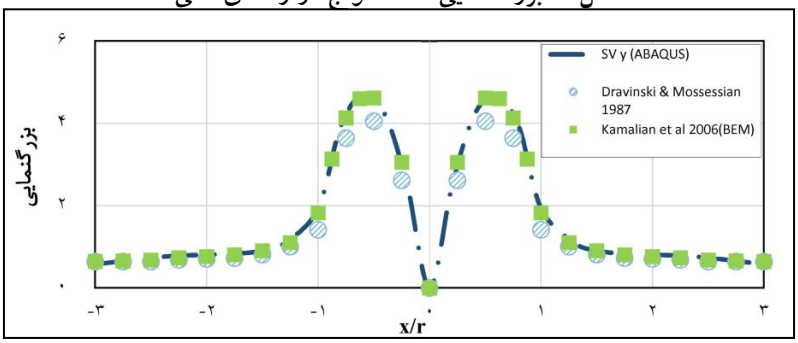


**شکل ۳. نمای نزدیک از شکل حوضهٔ رسوبی در نرم‌افزار آباکوس**

مدل با مشخصات فوق تحلیل شد و دامنهٔ بزرگ‌نمایی جابه‌جایی دو راستای افقی و قائم در فرکانس ۵/۵۸ هرتز محاسبه شد. نتایج به‌دست آمده در شکل‌های ٤ و ۵ با نتایج کمالیان و همکاران (۲۰۰٦) و موسسیان و داروینسکی (۱۹۸۷) مقایسه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود نتایج به‌دست آمده هماهنگی بسیار خوبی با نتایج مذکور دارد، بنابراین از این روش می‌توان با اطمینان برای تحلیل‌های بعدی استفاده کرد.




**شکل٤. بزرگ‌نمایی دامنه امواج در راستای افقی**

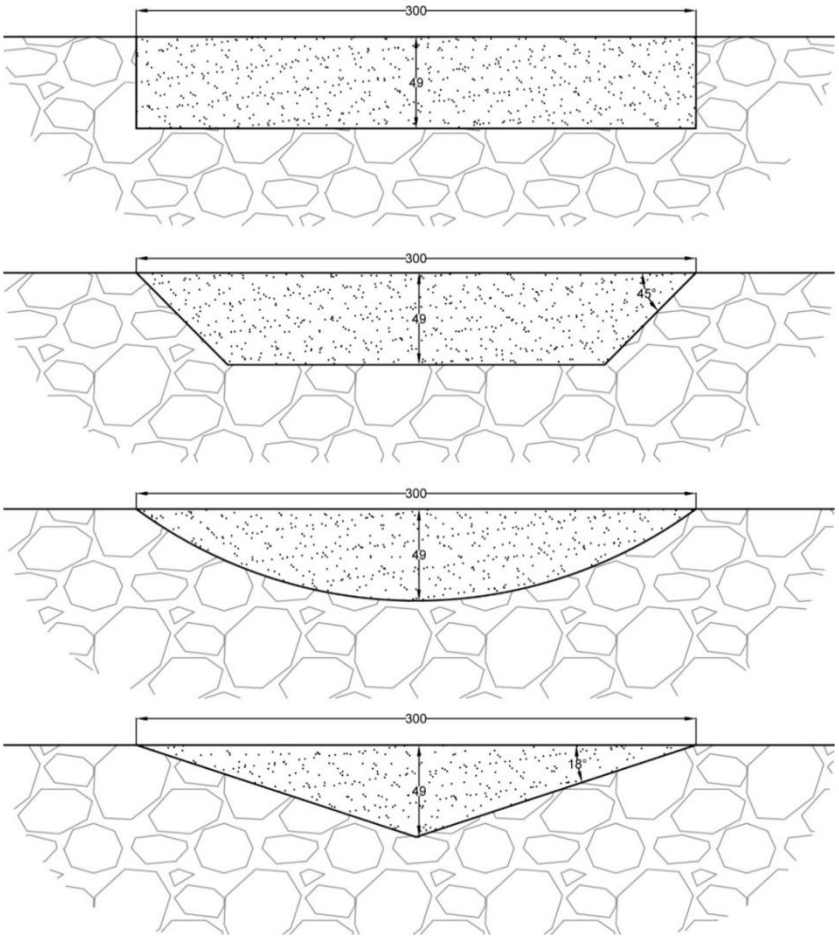



**شکل ۵. بزرگ‌نمایی دامنهٔ امواج در راستای قائم**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

## ۲. مشخصات هندسی مدل

در این تحقیق به‌منظور بررسی اثر هندسه حوضهٔ رسوبی بر پاسخ آن، چهار حوضهٔ رسوبی با فرکانس اصلی ۲/۰٤ هرتز با هندسه‌های مستطیلی، ذوزنقه‌ای، بیضی و مثلثی با نسبت دهانه به عمق ثابت (عمق ٤۹ متر و دهانه ۳۰۰ متر) به روش اجزا محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بررسی شد. شکل ٦ مشخصات هندسی حوضه‌های رسوبی را نشان می‌دهد.




**شکل٦. مشخصات هندسی حوضه‌های رسوبی**

## ۳. مشخصات مصالح و موج ورودی

برای آنالیز دینامیکی از روش ضمنی استفاده شد. مصالح از نوع ویسکوالاستیک و همگن

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

و مدل رفتاری خاک، خطی در نظر گرفته شد، جهت اختصاص میرایی از میرایی رایلی دو موده استفاده شد. نوع المان خاک از نوع کرنش صفحه‌ای و ابعاد المان با توجه به رابطهٔ (۱) به‌دست آمد. جدول ۳ مشخصات مصالح به‌کار رفته را نشان می‌دهد.

**جدول ۳. مشخصات مصالح**

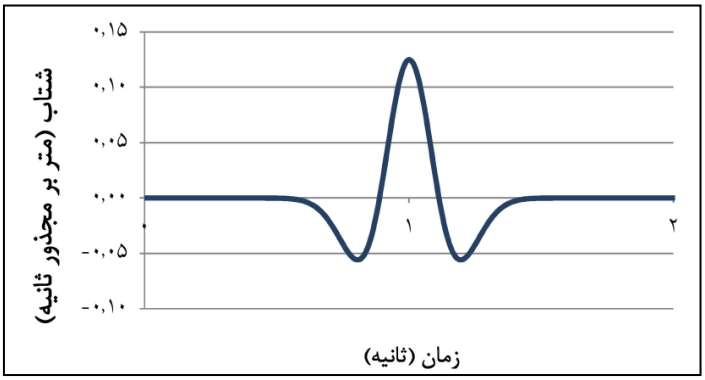
| لایه | $\rho(^{kg}/_{m^3})$ | E (MPa) | $Q_f$ | $\upsilon$ | $\Delta l_{max}$(m) | $V_s$(m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| حوضه رسوبی | ۲۰۰۰ | ۸۵۳٫۳۳ | ۲۰ | ۰٫۳۳۳ | ۱٫٤ | ٤۰۰ |
| سنگ بستر | ۲۳۰۰ | ۱۲۰۱۸ | ... | ۰٫۳۳۳ | ۷ | ۱٤۰۰ |

برای بارگذاری لرزه‌ای از امواج SV و از نوع موج ریکر که در راستای قائم انتشار می‌یابند استفاده شد. در این پژوهش‌ها برای تعریف الگوی موج تحریک معمولاً از امواج ریکر، هارمونیک، ضربه‌ای و رکوردهای واقعی زلزله استفاده می‌شود. موج ریکر نوعی موج لرزه‌ای است که تخمین بسیار زیادی از رکوردهای واقعی زلزله دارد (به‌ویژه رکوردهای حوضهٔ دور) و مدت زمان مؤثر تحریک آن غالباً نسبت به رکوردهای واقعی زلزله بسیار کم‌تر است و در نتیجه هزینهٔ محاسباتی را بسیار کاهش می‌دهد، هم‌چنین برای بررسی مدل در فرکانس‌های خاص، بهتر است از موج تحریک ریکر استفاده شود. به‌منظور بررسی عملکرد حوضهٔ رسوبی تحت فرکانس‌های متفاوت، سه موج ریکر شتاب با فرکانس غالب ۱و ۲ و ٤ هرتز انتخاب شد. مشخصات بارگذاری در جدول ٤ آمده است، هم‌چنین از رابطهٔ (۲) برای تعریف موج ریکر استفاده شد. شکل ۷ نمودار تاریخچه زمانی موج ریکر شتاب با فرکانس غالب ۲ هرتز را نشان می‌دهد.

**جدول ٤. مشخصات بارگذاری**

| $A_{max}(\frac{m}{s^2})$ | $t_0$(s) | $f_p$(Hz) |
|---|---|---|
| ۰٫۱۲۵ | ۲ | ۱ |
| ۰٫۱۲۵ | ۱ | ۲ |
| ۰٫۱۲۵ | ۰٫۵ | ٤ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]




**شکل ۷. نمودار تاریخچهٔ زمانی موج ریکر شتاب با فرکانس غالب ۲ هرتز**

## ٤. مرزهای دینامیکی

### ٤-۱. مرز ویسکوز

لایزمر و کوهلمیر[1] [۱۸] مرز جاذب ویسکوز معرفی کردند. این مرز قابلیت جذب تنش ناشی از امواج دینامیکی مطابق با روابط ۳ و ٤ دارد، عدم وابستگی به محتوای فرکانسی موج برخوردی از ویژگی‌های این مرز است به‌طوری‌که می‌تواند امواج‌هارمونیک و غیرهارمونیک را جذب کند. در واقع این مرز برای جذب امواج حجمی برای مسائل یک‌بعدی است، در مسائل دو و سه‌بعدی، در صورتی‌که زاویهٔ برخورد موج لرزه‌ای با راستای عمود بر مرز، بیش‌تر از ۳۰ درجه باشد این مرزها به‌خوبی قادر به‌جذب نیستند.

$$\sigma_n = -\rho V_p \frac{\partial u}{\partial t} + \sigma_n^0 \qquad (۳)$$

$$\tau = -\rho V_s \frac{\partial v}{\partial t} + \tau^0 \qquad (٤)$$

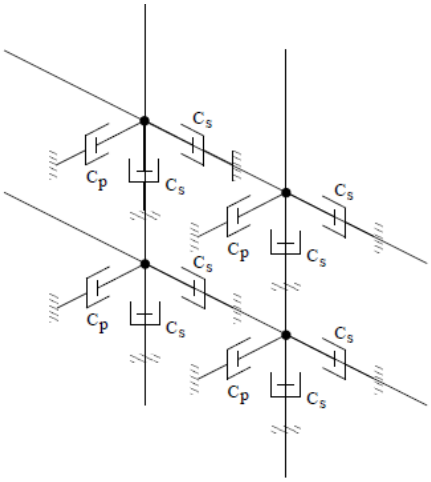
روابط ۵ و٦ ضرایب میرایی ویسکوز برای امواج برشی و طولی را بیان می‌کند. در این روابط $A$ مساحتی از گره است که میراگر به آن اختصاص می‌یابد، $\rho$ چگالی ماده در محل مرز است، $V_s$ سرعت موج برشی و $V_p$ سرعت موج طولی ماده است. ضرایب a وb بدون بعد هستند، مرز ویسکوز در صورتی‌که زاویهٔ موج برخوردی با مرز کم‌تر از ۳۰ درجه باشد، جذب بسیار زیادی داشته و در این حالت ضرایب a وb برابر یک هستند. شکل ۸ نحوهٔ قرارگیری مرز ویسکوز در مرز را نشان می‌دهد [۱۸].

1. Lysmer and Kuhlemeyer

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

$$C_s = a\rho V_s A \quad (۵)$$

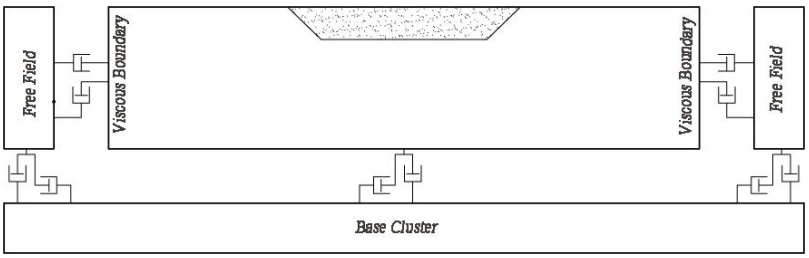
$$C_p = b\rho V_p A \quad (۶)$$




**شکل ۸. نحوهٔ قرارگیری مرز ویسکوز در مرز**

### ٤-۲. مرزهای جانبی

مرزهای کناری مدل (چپ و راست) از نوع ترکیبی مرز ویکسوز و مرز میدان آزاد است. برای عملکرد بهتر ستون‌های مرز میدان آزاد در جذب امواج، از ستون‌های سنگین استفاده شد، برای اعمال این شرط جرم و مدول الاستیسیته ستون‌ها ۱۰۰۰ برابر شد طوری که سرعت موج برشی ثابت می‌ماند. برای جذب بهتر امواج سطحی می‌توان میراگرهای برشی (مماسی) را به داخل مدل برد، در این تحقیق میراگرهای مماسی به اندازهٔ دو المان به داخل برده شدند [۱۹]. مرز پائین نیز از نوع ویسکوز است. شکل ۹ نحوهٔ قرارگیری حوضهٔ رسوبی در مدل و ترکیب مرزها را نشان می‌دهد.




**شکل ۹. مدل شماتیک و نوع مرزها**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

## نتایج مدل‌سازی

### ۱. تحلیل یک بعدی ساختگاه

به‌منظورتحلیل یک‌بعدی ساختگاه، یک ستون خاکی در نظر گرفته شد به‌طوری‌که همانند تیر برشی رفتار کند، شکل ۱۰ رفتار یک بعدی یک ستون خاکی تحت موج تحریک لرزه‌ای را در مقیاس بزرگ نشان می‌دهد، مطابق شکل مشاهده می‌شود که ستون خاکی رفتار برشی دارد. برای جذب امواج تابشی و جلوگیری از بازتاب امواج به داخل مدل، از مرز میدان آزاد در اطراف ستون استفاده شد، لایه خاکی به عمق ٤۹ متر بر سنگ بستر در نظر گرفته شد که مشخصات مصالح همانند جدول ۳ است. ستون تحت سه موج ریکر مطابق جدول ۲ قرار گرفت و پاسخ شتاب در بالای ستون خاکی قرائت شد و بیشینه شتاب افقی برای سه موج تحریک به‌دست آمد. نتایج در جدول ۵ آمده است.

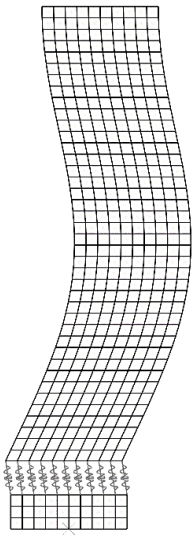
**جدول۵. نتایج تحلیل یک‌بعدی**

| $f_p$(Hz) | $A_{max\ (1D)}$ $(\mathrm{m}/s^2)$ |
|---|---|
| ۱ | ۰,۳۹٦ |
| ۲ | ۰,٤٦۳ |
| ٤ | ۰,۳٦٦ |

### ۲. اثر محتوای فرکانسی موج مهاجم بر پاسخ حوضهٔ رسوبی

به‌منظور بررسی اثر فرکانس بار ورودی بر پاسخ حوضهٔ رسوبی، یک موج خارج از محدودهٔ فرکانسی حوضه‌ها و دو موج ریکر در محدودهٔ فرکانسی حوضه‌ها اعمال شد. یک موج با فرکانس غالب ۱ هرتز (خارج از محدوده فرکانسی حوضه‌ها و کم‌تر از فرکانس اصلی چهار حوضه (۲/۰٤ هرتز)، و موج دیگر با فرکانس غالب ۲ هرتز که نزدیک به کم‌ترین

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]



**شکل۱۰. مدل‌سازی یک بعدی ستون خاکی**

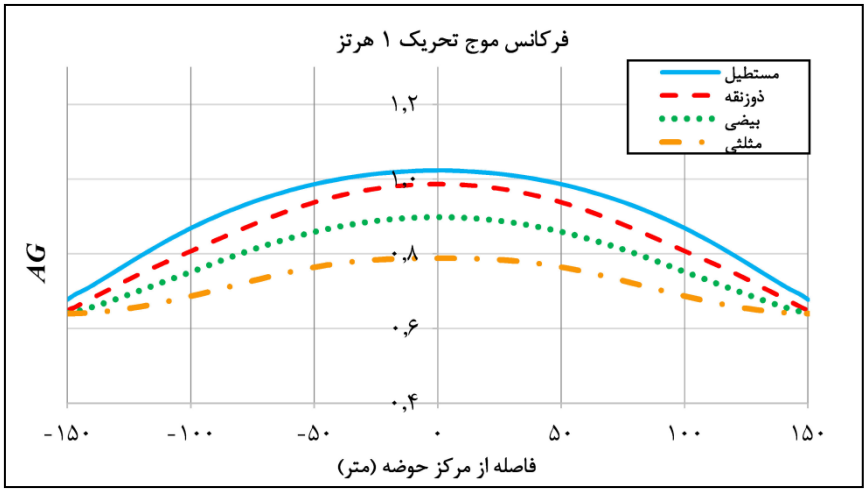
فرکانس اصلی حوضه‌ها است و دیگری موج با فرکانس غالب ٤ هرتز انتخاب شد. نتایج به‌دست آمده با نتایج تحلیل یک‌بعدی در حوزهٔ زمان مقایسه شد که برای مقایسه بیشینه شتاب افقی تحلیل دوبعدی به یک‌بعدی در طول حوضه از رابطه ۷ استفاده شد [۲۰]. باید توجه داشت که نسبت بیشینه شتاب افقی تحلیل دوبعدی به یک‌بعدی، از این رو، دارای اهمیت است که ساختار هندسی حوضه‌های رسوبی سبب انکسار و به دام افتادن امواج حجمی و هم‌چنین تولید و انتشار امواج سطحی می‌شود که عموماً منجر به بزرگ‌نمایی و مدت زمان تحریک بیش‌تر نسبت به آن‌چه که تحلیل یک‌بعدی تخمین می‌زند می‌شود، به‌طوری‌که در بسیاری از موارد با استفاده از تحلیل یک بعدی نمی‌توان خطر لرزه‌ای حوضه‌های رسوبی را تخمین زد.

$$AG = \frac{A_{max(2D)}}{A_{max\,(1D)}} \qquad (۷)$$

در شکل ۱۱ نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی در مقایسه با تحلیل یک‌بعدی برای موج ریکر ۱ هرتز با شکل‌های متفاوت حوضهٔ رسوبی آمده است. به‌منظور جلوگیری از پدیدهٔ تشدید، موج مهاجم ریکر با فرکانس غالب ۱ هرتز انتخاب شد که خارج از محدودهٔ فرکانسی حوضه‌های رسوبی است و از کم‌ترین فرکانس اصلی چهار حوضه ( ۲/۰٤ هرتز) کم‌تر است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

چنان‌که از نتایج پیداست زمانی‌که فرکانس موج مهاجم ورودی خارج از محدوده فرکانسی حوضه باشد (به‌عبارتی فرکانس موج ورودی کم‌تر از کوچک‌ترین فرکانس اصلی حوضه‌ها باشد) حوضه رسوبی موجب بزرگ‌نمایی و آشفتگی در پاسخ نخواهد شد و حتی ممکن است باعث کوچک‌نمایی نیز شود. در این مورد انتظار می‌رود که نتایج به‌دست آمده نشان‌گر اثر هندسه حوضه رسوبی در پاسخ آن نیز باشد.

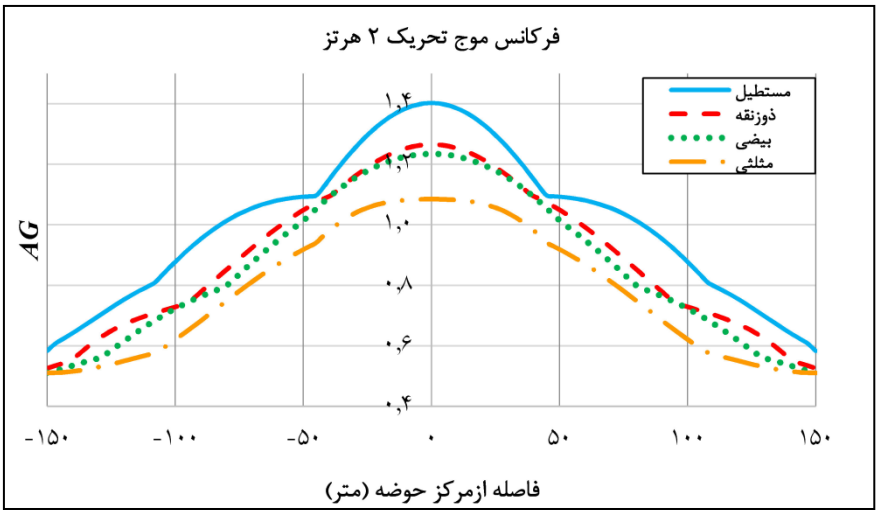



**شکل ۱۱. نتایج نسبت پاسخ‌های بیشینه شتاب افقی تحلیل دوبعدی به یک‌بعدی برای بار با فرکانس ۱ هرتز**

در شکل ۱۲ نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی در مقایسه با تحلیل یک‌بعدی برای موج ریکر ۲ هرتز برای شکل‌های متفاوت حوضهٔ رسوبی آمده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در مرکز حوضهٔ رسوبی پاسخ‌ها به‌مراتب بزرگ‌تر از تحلیل یک‌بعدی است برای مثال این مقدار در حوضهٔ مستطیلی تا ۱/٤ برابر پاسخی است که از تحلیل یک‌بعدی به‌دست آمده است که دلیل آن انکسار امواج حجمی به‌وسیلهٔ لبه‌های حوضه و هدایت آن‌ها به‌سمت مرکز حوضهٔ رسوبی و مشارکت سازنده این امواج انکساری در مرکز حوضه با امواج رایلی که به‌وسیلهٔ لبه‌ها تولید شده و امواج حجمی اولیه که مستقیماً به مرکز حوضه می‌رسد، است. به‌عبارتی امواج حجمی در برخورد با لبهٔ حوضه به‌سمت مرکز حوضه منکسر شده و به‌صورت هم‌زمان با امواج سطحی در مرکز حوضهٔ به یک‌دیگر می‌رسند و سبب تمرکز امواج و بزرگ‌نمایی در مرکز

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

حوضه می‌شوند. در مقابل در نزدیک به لبه‌های حوضه رسوبی کاهش پاسخ به نسبت تحلیل یک‌بعدی مشاهده می‌شود که آن هم به‌دلیل تفرق و انکسار امواج حجمی بر اثر هندسه لبه‌های حوضه است و مشخص است که با تغییر ابعاد حوضه (طول و عمق) و هم‌چنین طول موج ورودی امکان دارد پاسخ‌ها در این محدوده تغییر کند.

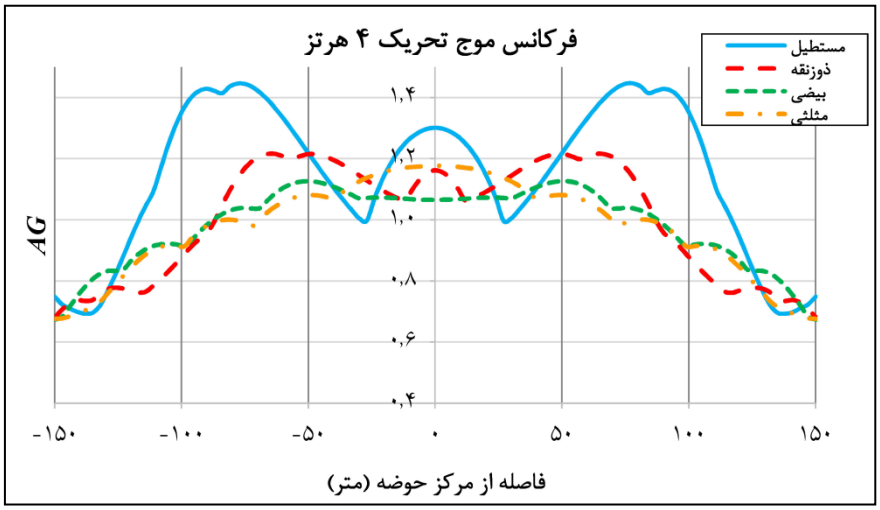



**شکل ۱۲. نتایج نسبت پاسخ‌های بیشینه شتاب افقی تحلیل دوبعدی به یک‌بعدی برای بار با فرکانس ۲ هرتز**

در شکل ۱۳ نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی در مقایسه با تحلیل یک‌بعدی برای موج ریکر ٤ هرتز با شکل‌های متفاوت حوضهٔ رسوبی آمده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در گسترهٔ وسیعی از مرکز حوضهٔ رسوبی پاسخ‌های به‌مراتب بیش‌تر از تحلیل یک‌بعدی مشاهده می‌شود این بازه برای حوضهٔ رسوبی مستطیل شکل از ۱۱۷- تا ۱۱۷+ متر و برای دیگر حوضه‌های رسوبی از ۸۷- تا ۸۷+ متر است به‌عبارتی تا ۷۸٪ از سطح حوضه شتاب‌هایی به‌مراتب بیش‌تر از شتابی که تحلیل یک بعدی پیش‌بینی شده است را تجربه می‌کند. هم‌چنین پاسخ‌ها به نسبت فرکانس ۲ هرتز بسیار متفاوت است و آشفتگی و کاهش انسجام در پاسخ‌ها مشاهده می‌شود، به‌خصوص در مورد حوضهٔ مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل، پاسخ‌ها دارای افت و خیزهای بسیاری در سطح حوضه است که این به‌دلیل مشارکت امواج حجمی انتشار یافته در راستای قائم و امواج حجمی منکسر شده به‌وسیلهٔ لبه‌های حوضه و امواج سطحی رایلی در طول حوضه است

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

که باعث تغییر در مکان وقوع بیشینه شتاب افقی در سطح حوضه شده است. به‌عبارتی امواج در سنگ بستر زودتر به سطح می‌رسند و با برخورد به دو لبهٔ حوضه به‌صورت امواج رایلی در سطح حوضه منتشر می‌شوند و امواج حجمی نیز در برخورد با لبهٔ حوضه به محدوده‌ای نزدیک به لبهٔ حوضه منکسر می‌شوند و به‌صورت هم‌زمان با امواج سطحی رایلی و حجمی در این نواحی سبب بزرگ‌نمایی می‌شود و سپس بخشی از این امواج حجمی در برخورد به سطح حوضه مجدداً به داخل حوضه باز می‌گردند و با برخورد به کف حوضه مجدداً تحت زاویه به سطح حوضه بازگشته و سبب بزرگ‌نمایی در مرکز می‌شود. این پتانسیل حرکت‌های نامتقارن بزرگ در چنین حوضه‌های رسوبی، اثر به‌سزایی در طرح سازه‌های با دهانه بلند همانند پل‌ها، خطوط لوله که اغلب از عرض دره‌های رسوبی عبور می‌کنند، دارد. حرکات نامتقارن می‌توانند منجر به بارگذاری‌های سنگین و نهایتاً خرابی عمده در این‌گونه سازه‌ها شوند.

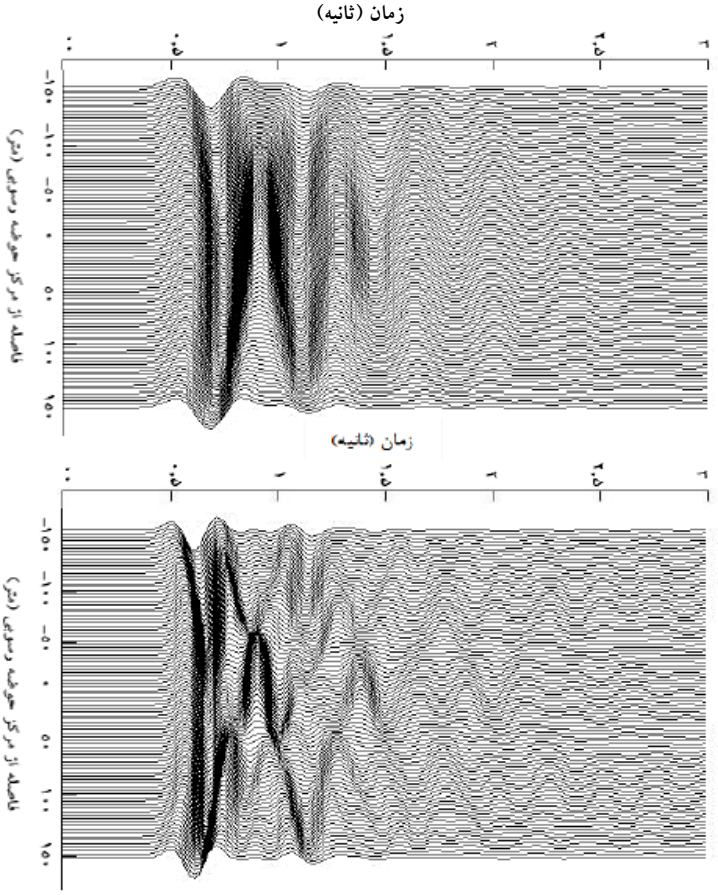



**شکل ۱۳. نتایج نسبت پاسخ‌های بیشینه شتاب افقی تحلیل دوبعدی به یک‌بعدی برای بار با فرکانس ٤ هرتز**

شکل ١٤ یک لرزه‌نگار مصنوعی است که شتاب‌نگاشت سطح حوضهٔ مستطیلی را در دو فرکانس ۲ هرتز (شکل آ) و فرکانس ٤ هرتز (شکل ب) نشان می‌دهد. این شکل ابزاری کارآمد برای تحلیل و تفسیر چگونگی پارامتر AG در نمودارهای شکل ۱۲ و ۱۳ است. در این

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

دو شکل تفاوت الگوی انتشار امواج سطحی و حجمی بر اثر فرکانس‌های متفاوت تحریک مشخص است. با تغییر فرکانس موج تحریک، طول موج تغییر می‌کند و در مواجهه با عارضه زیر سطحی امواج انکساری با زوایای متفاوتی به داخل حوضه منکسر می‌شوند و الگوهای متفاوتی از تداخل امواج حجمی به دام افتاده و امواج سطحی را به‌وجود می‌آورند.




**االف**

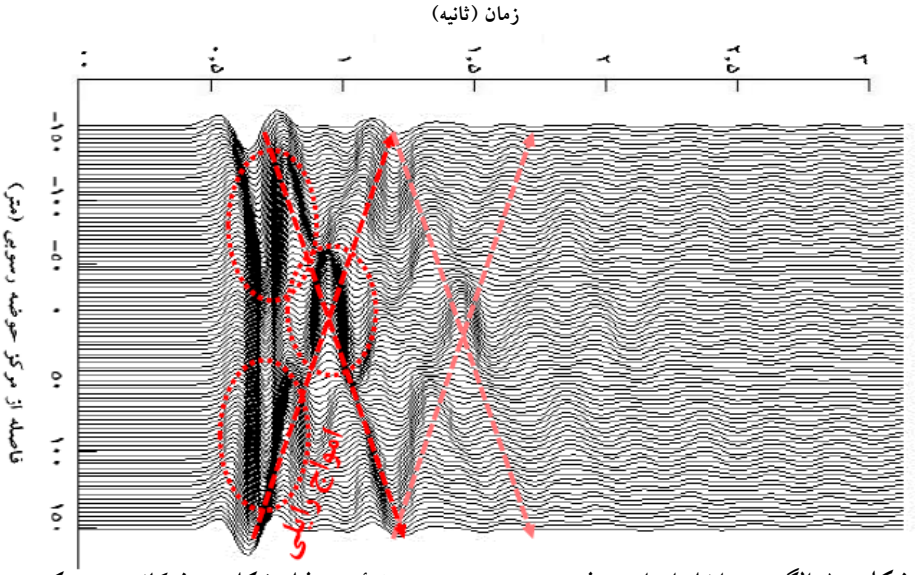
**ب**

**شکل ١٤. الف) شتابنگاشت سطح حوضه در فرکانس تحریک ۲ هرتز، ب) شتاب‌نگاشت سطح حوضه در ف رکانس تحریک ٤ هرتز**

در شکل ۱۵ الگوی تداخل امواج سطحی و حجمی در حوضهٔ مستطیلی شکل در فرکانس تحریک ٤ هرتز نشان داده شده است. نواحی تداخل امواج حجمی اولیه (که مستقیماً در داخل حوضه منتشر شده‌اند) و امواج حجمی ثانویه (امواج حجمی که به‌وسیلهٔ لبه حوضه انکسار

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

یافته‌اند) با دایره خط‌چین قرمزرنگ مشخص شده است و هم‌چنین انشار امواج رایلی که به‌وسیلهٔ لبه‌های حوضه به داخل حوضه منتشر می‌شود با خطوط قرمزرنگ نشان داده شده است. در شکل به‌خوبی مشخص است که امواج حجمی در برخورد با لبهٔ حوضه به محدوده‌ای نزدیک به لبهٔ حوضه منکسر می‌شوند و به‌صورت هم‌زمان با امواج سطحی رایلی و امواج حجمی اولیه، سبب بزرگ‌نمایی در این نواحی می‌شود و سپس بخشی از این امواج حجمی در برخورد به سطح حوضه مجددا به داخل حوضه باز می‌گردند و با برخورد به کف حوضه بخشی از آن‌ها مجدداً به سطح حوضه بازگشته و با تداخل با امواج سطحی سبب بزرگ‌نمایی در مرکز می‌شوند.




**شکل ۱۵. الگوی تداخل امواج سطحی و حجمی در حوضهٔ مستطیل شکل در فرکانس تحریک** ٤ هرتز

با توجه به‌شکل ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ می‌توان نتیجه گرفت در حالت کلی برای حوضه‌های رسوبی با ابعاد و مشخصات مصالح ارائه شده در این مقاله، حوضهٔ رسوبی مستطیل شکل نسبت به دیگر شکل‌های هندسی بیش‌ترین پاسخ را دارد و علت آن هم بیش‌ترین اندرکنش سازنده امواج سطحی رایلی و امواج حجمی نسبت به دیگر هندسه‌ها است. بنابراین به‌ترتیب حوضهٔ مستطیلی، ذوزنقه‌ای، بیضی و مثلثی شکل بیش‌ترین پاسخ‌ها را دارند.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

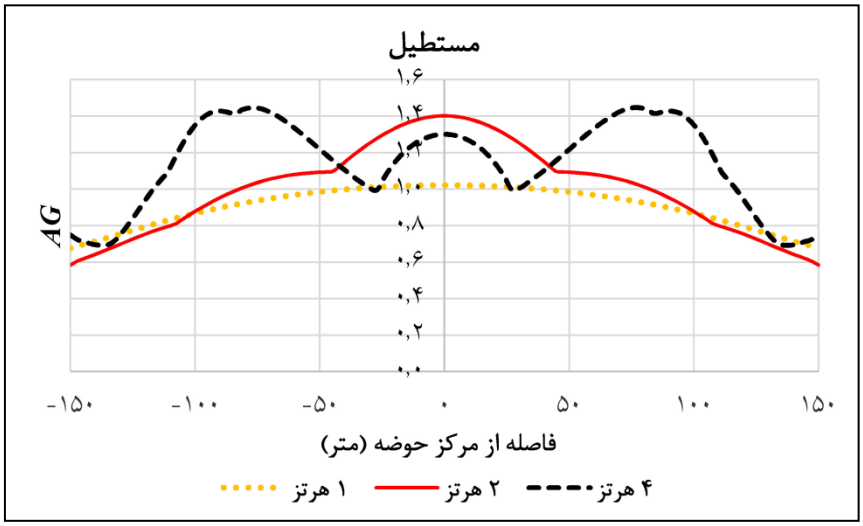
الگوی رفتار و پاسخی که برای حوضه‌های یاد شده در این پژوهش به‌دست آمده است، با نتایج سایر محققان در این زمینه هم‌خوانی دارد، سحر و همکاران (۲۰۱۵) [۲۱]، سه شکل فرضی حوضهٔ رسوبی مستطیل شکل، ذوزنقه و بیضی شکل را با ابعاد و مشخصات مصالح متفاوت نسبت به این مطالعه بررسی کردند، نتایج نشان داد که حوضهٔ مستطیلی گسترهٔ وسیع‌تری را به نسبت دو شکل هندسی دیگر تحت تأثیر بزرگ‌نمایی قرار می‌دهد و حوضه‌ی بیضی شکل نیز گسترهٔ کم‌تری را به نسبت حوضهٔ مستطیلی و ذوزنقه‌ای تحت تأثیر بزرگ‌نمایی قرار می‌دهد. گلاگوتی و همکاران (۲۰۱۰) [۲۰]، یک حوضهٔ رسوبی ذوزنقه تحت پارامترهای متفاوت بررسی کردند، نتایج آن‌ها نیز حاکی از این است که مشارکت امواج حجمی و سطحی و در نتیجه الگوی پاسخ شتاب در سطح حوضه به نسبت تحلیل یک بعدی، بسیار تحت تأثیر فرکانس بار ورودی است و پاسخ‌های متفاوت در فرکانس‌های متفاوت بارگذاری نتیجه شده است. نتایج سایر محققان مانند بارد و بوچان (۱۹۸۰) [۲۲]، سانچز سسما و همکاران (۱۹۹۲) [۲۳]، هیداسا و یاموتو (۱۹۹٦) [۲٤]، ایسان و خان‌بابازاده (۲۰۱۳) [۲۵] نیز با نتایج به‌دست آمده هم‌خوانی دارد.

لازم به ذکر است در این تحقیق مشخصات مصالح و نسبت دهانه به عمق هر چهار حوضه ثابت و برابر در نظر گرفته شده است تا شکل هندسی این چهار حوضهٔ رسوبی تحت شرایط یک‌سان و در برابر محتوای فرکانسی متفاوت موج تحریک با یک‌دیگر بررسی شود. مشخص است که رفتار هر حوضه به میزان زیادی به ابعاد هندسی آن (دهانه، عمق و زوایای شیب) و هم‌چنین مشخصات مصالح وابسته است، این نتایج به‌دست آمده برای حوضه‌هایی رسوبی با ابعاد مشخص و این مشخصات مصالح اشاره شده است و باید توجه داشت که تغییر در ابعاد و مشخصات مصالح منجر به پاسخ‌های متفاوتی خواهد شد اما آن‌چه‌که مشخص است شکل هندسی حوضهٔ رسوبی تأثیر بسیار زیادی بر پاسخ میدان امواج لرزه‌ای دارد و منجر به پاسخ‌های بسیار متفاوت نسبت به تحلیل یک‌بعدی ساختگاه می‌شود، بنابراین الگوی پاسخ امواج لرزه‌ای به‌میزان بسیار زیاد تحت تأثیر شکل‌هندسی و محتوای فرکانسی بار لرزه‌ای است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

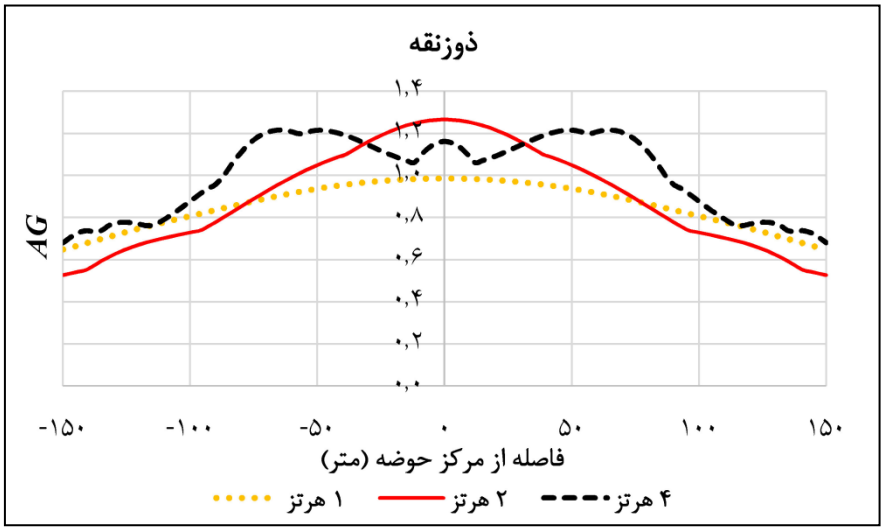
### ۳. بررسی میزان حساسیت پاسخ به شکل هندسی حوضه

در این پژوهش هدف از بررسی چند شکل هندسی حوضهٔ رسوبی به‌صورت هم‌زمان، نشان دادن تفاوت پاسخ و الگوی رفتاری آن‌ها با یک‌دیگر بوده است. در واقع در مواردی که جهت بررسی نمونه واقعی حوضهٔ رسوبی، از شکل هندسی معادل آن استفاده می‌شود، دقت در مورد انتخاب شکل هندسی مناسب بسیار حائز اهمیت است. در شکل‌های ١٦ الی ١٩ پاسخ‌های حوضه‌های رسوبی تحت امواج ١ و ٢ و ٤ هرتز به‌صورت جداگانه نشان داده شده است تا میزان حساسیت پاسخ هر حوضهٔ رسوبی به‌ازای هندسه آن‌ها مشخص شود، با توجه به نتایج مشخص است پاسخ حوضهٔ رسوبی مستطیلی و ذوزنقه‌ای نسبت به فرکانس بار ورودی بسیار حساس است و در مقابل حوضه‌های بیضی و مثلثی شکل الگو رفتاری یک‌نواخت‌تری در برابر فرکانس‌های متفاوت دارند.

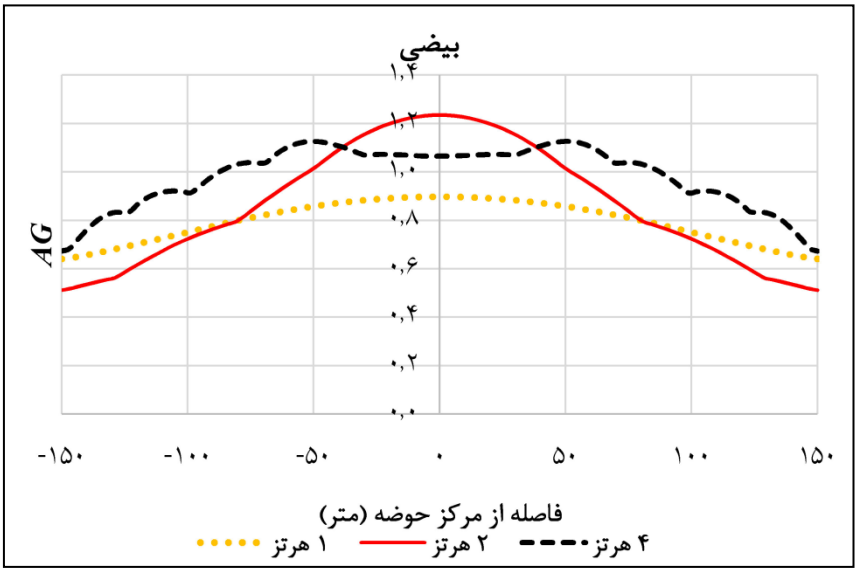



**شکل ١٦. نتایج نسبت پاسخ‌های بیشینه شتاب افقی تحلیل دوبعدی به یک‌بعدی برای حوضهٔ مستطیلی**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

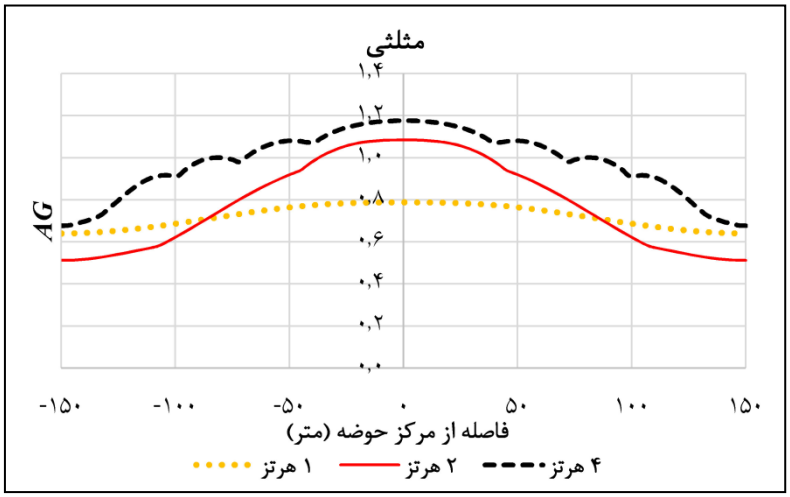



**شکل۱۷. نتایج نسبت پاسخ‌های بیشینه شتاب افقی تحلیل دوبعدی به یک‌بعدی برای حوضهٔ ذوزنقه‌ای**




**شکل ۱۸. نتایج نسبت پاسخ‌های بیشینهٔ شتاب افقی تحلیل دوبعدی به یک‌بعدی برای حوضهٔ بیضی شکل**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]




**شکل ۱۹. نتایج نسبت پاسخ‌های بیشینهٔ شتاب افقی تحلیل دوبعدی به یک‌بعدی برای حوضهٔ مثلثی شکل**

### ٤. اثر دو بعدی ساختگاه در مدت زمان حرکت زمین

در شکل‌های ۲۰ الی ۲۳ تاریخچه زمانی شتاب روی سطح زمین در مرکز حوضه‌های رسوبی در بارگذاری با فرکانس ۲ هرتز در برابر پاسخ یک بعدی رسم شده است. همان‌گونه که پیدا است اثر دوبعدی ساختگاه علاوه بر بزرگ‌نمایی قابل توجه باعث افزایش مدت زمان حرکت زمین نیز می‌شود.

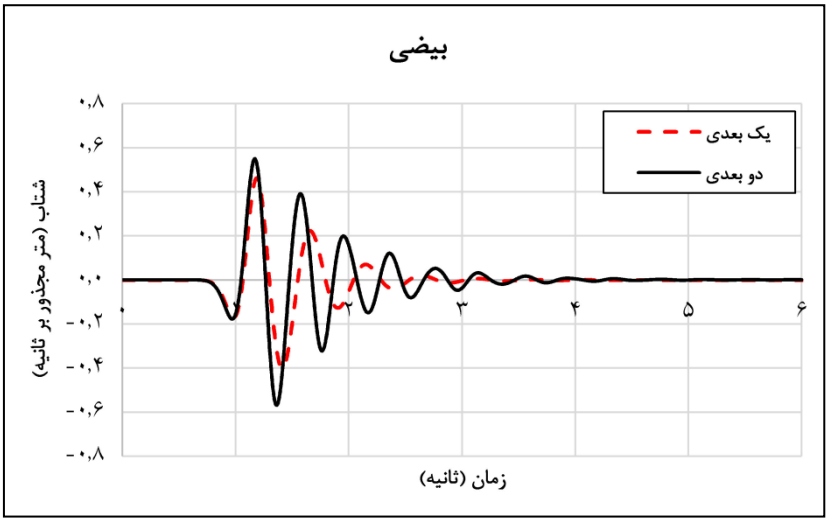



**شکل ۲۰. تاریخچه زمانی شتاب در مرکز حوضهٔ مستطیلی در فرکانس تحریک ۲ هرتز**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

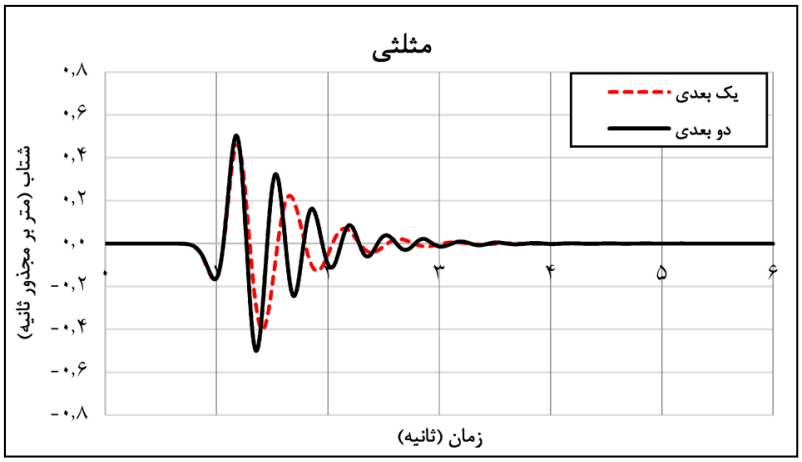



**شکل ۲۱. تاریخچه زمانی شتاب در مرکز حوضه ذوزنقه‌ای در فرکانس تحریک ۲ هرتز**




**شکل ۲۲. تاریخچه زمانی شتاب در مرکز حوضهٔ بیضی در فرکانس تحریک ۲ هرتز**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]




**شکل ۲۳. تاریخچهٔ زمانی شتاب در مرکز حوضهٔ مثلثی در فرکانس تحریک ۲ هرتز**

## نتیجه‌گیری

شکل هندسی حوضهٔ رسوبی تأثیر بسیار زیادی بر پاسخ میدان امواج لرزه‌ای دارد و منجر به پاسخ‌های بسیار متفاوت نسبت به تحلیل یک‌بعدی ساختگاه می‌شود.

- الگوی پاسخ امواج لرزه‌ای به‌میزان بسیار زیاد تحت تأثیر شکل‌هندسی و محتوای فرکانسی بار لرزه‌ای است.
- در بیشینهٔ پاسخ شتاب سطح زمین، نتایج تحلیل دوبعدی اختلاف بسیار زیادی را به نسبت تحلیل یک‌بعدی نشان می‌دهد، این اختلاف تا ۱/٤٥ برابر پاسخ یک‌بعدی برای حوضه مستطیلی، ۱/۲۸ برابر برای حوضهٔ ذوزنقه‌ای، ۱/۲۲ برابر برای حوضهٔ بیضی و ۱/۱۹ برابر حوضهٔ مثلثی شکل است.
- در فرکانس ۲ هرتز که تشدید رخ می‌دهد، بزرگ‌نمایی در مرکز حوضه نسبت به تحلیل یک‌بعدی رخ داده و کاهش پاسخ شتاب در نزدیکی لبه‌های حوضهٔ رسوبی مشاهده می‌شود. بزرگ‌نمایی در مرکز به نسبت تحلیل یک‌بعدی برای حوضهٔ مستطیلی۱/٤، برای حوضهٔ ذوزنقه‌ای ۱/۲۸، برای حوضهٔ بیضی ۱/۲۲، برای حوضهٔ مثلثی ۱/۱٥ به‌دست آمده است.
- در فرکانس ٤ هرتز تا ۷۸٪ سطح حوضه مستطیلی، ٥۳٪ سطح حوضهٔ ذوزنقه‌ای، ٦۰٪ سطح حوضهٔ بیضی، ٦۲٪ سطح حوضه مثلثی شتاب‌هایی به‌مراتب بیش‌تر از آن‌چه تحلیل

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

یک‌بعدی تخمین زده است را تجربه می‌کند. بیش‌ترین نسبت پاسخ شتاب دوبعدی به یک‌بعدی برای حوضهٔ مستطیلی ۱/٤٥، حوضهٔ ذوزنقه‌ای۱/۲، حوضهٔ بیضی ۱/۱٦، مثلثی ۱/۱۹ به‌دست آمده است.

- در فرکانس ٤ هرتز حوضهٔ رسوبی مستطیل و ذوزنقه‌ای شکل، پاسخ‌های ناهماهنگ و آشفته‌ای را در سطح حوضه نشان می‌دهند.
- در فرکانس ۱ هرتز که فرکانس موج تحریک ورودی خارج از محدودهٔ فرکانسی حوضه است (به‌عبارتی فرکانس موج ورودی کم‌تر از کوچک‌ترین فرکانس اصلی حوضه باشد) حوضهٔ رسوبی بر خلاف دو حالت قبل موجب بزرگ‌نمایی و آشفتگی نشده است و موجب کوچک‌نمایی شده است. در حوضهٔ مستطیلی و ذوزنقه با پاسخ برابر تحلیل یک‌بعدی در مرکز شروع شده و در لبهٔ حوضه به کوچک‌نمایی ۳۸٪ می‌رسد، در حوضهٔ بیضی شکل در مرکز کوچک نمایی ۱۰٪ و در لبهٔ حوضه به ۳۸٪ کوچک‌نمایی می‌رسد، در حوضهٔ مثلثی شکل در مرکز کوچک‌نمایی ۲۰٪ و در لبه حوضه به ۳۸٪ کوچک‌نمایی می‌رسد.
- مکان وقوع بیشینه شتاب افقی در طول حوضهٔ رسوبی در حوزه زمان به فرکانس موج تحریک وابسته است و جابه‌جا می‌شود.
- در مقابل تغییر فرکانس موج تحریک در ازای این هندسه مشخص و با در نظر گرفتن نسبت دهانه به عمق یک‌سان برای حوضه‌ها، حوضهٔ رسوبی مثلثی و بیضی‌شکل، الگوی رفتاری یک‌نواخت‌تری به نسبت حوضه رسوبی ذوزنقه و مستطیلی، نشان می‌دهند.
- در حالت کلی برای حوضه‌های رسوبی با ابعاد و مشخصات مصالح ارائه شده در این پژوهش و با در نظر گرفتن تنها اثر شکل هندسی حوضهٔ رسوبی، به‌ترتیب حوضهٔ مستطیلی، ذوزنقه‌ای، بیضی، مثلثی بیش‌ترین پاسخ‌ها را دارند.
- اثر دوبعدی ساختگاه علاوه بر بزرگ‌نمایی قابل توجه، باعث افزایش مدت زمان حرکت زمین نیز می‌شود.

## منابع

1. Trifunac M. D., Hudson D. E., "Analysis of the Pacoima Dam Accelerograms-San Fernando earthquake of 1971", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5 (1971) 1393-1411.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

2. Bard P. Y., Bouchon M. "The seismic response of sediment-filled valleys. Part I The case of incident SH waves", Bulletin of the Seismological Society of America. 70 (1980a) 1263-1286.
3. Bard P. Y., Bouchon M., "The seismic response of sediment-filled valleys. Part II. The case of incident P and SV waves", Bulletin of the Seismological Society of America 70 (1980b) 1921-1941
4. King J. L., Tucker B. E., "Dependence of sediment-filled valley response on the input amplitude and the valley properties", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 74, No. 1 (1984) 153-165.
5. Harmsen S. C., Harding S. T., "Surface motion over a sedimentary valley for incident plane P and SV waves", Bulletin of the Seismological Society of America,71 (1981) 655-670
6. Ohtsuki A., Harumi K., "Effect of topography and subsurface in homogeneities on seismic SV waves", Earthquake Engineering & Structural Dynamics11 (1983) 441-462.
7. Bard P. Y., Gareil J. C. "The seismic response of two dimensional sedimentary deposits with large vertical velocity gradients", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 76 (1986) 343-356.
8. Rial J. A., Saltzman N. G., Ling H., "Earthquake induced resonance in sedimentary basins", American Scientist, Vol. 80, No. 6 (1992) 566-578.
9. Zhang B., Papageorgiou A. S., "Simulation of the response of the Marina District Basin, San Francisco, California, to the 1989 Loma Prieta earthquake", Bulletin of the Seismological Society of America. 86 (1996) 1382-1400.
10. Kamalian M., Gatmiri B., Sohrabi-Bidar A., Khalaj A., "Amplification Pattern of 2D Semi-Sine-Shaped Valleys Subjected to Vertically

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

Propagating Incident Waves", Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol. 25 (2007) 871-887.

11. Gatmiri B., Arson C., Nguyen KV., "Seismic site effects by an optimized 2D BE/FE method I. Theory, numerical optimization and application to topographical irregularities", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28 (2008) 632-645.
12. Sohrabi-Bidar A., Kamalian M., Jafari M. K., "Seismic Response of 3-D Gaussian- Shaped Valleys to Vertically Propagating Incident Waves", Geophysical Journal International, Vol. 183 (2010) 1429-1442.
13. Kamalian M., Jafaria M., Sohrabi bidar A., Razmkhaha A., Gatmiri B., "Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid BE/FE method", Soil Dynamics and Earthquake Engineering (2006) 753-765.
14. Mossessian T. K., Dravinski M., "Application of a hybrid method for scattering of P, SV, and Rayleigh waves by near-surface irregularities", Bulletin of the Seismological Society of America (1987) 784-809

۱۵.جعفری ندوشن علیرضا، "بررسی اثر شهر بر پاسخ‌های لرزه‌ای حوضه‌های رسوبی"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مهندسی زلزله به راهنمایی دکتر علی معصومی، دانشگاه خوارزمی (۱۳۹٤).

۱٦. نریمان‌نژاد ساسان، "بررسی اثر حوضه‌های رسوبی در پاسخ‌های لرزه‌ای محیط‌های شهری"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مهندسی زلزله به راهنمایی دکتر علی معصومی، دانشگاه خوارزمی (۱۳۹٤).

17. Kuhlmeyer R. L., Lysmer J., "Finite element method accuracy for wave propagation problems", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division., ASCE99 (1973) 421-427.
18. Lysmer J., Kuhlemeyer R. L., "Finite dynamic model for infinite media", Journal of Engineering Mechanics Division. ASCE (1969) 859-877.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]

19. Ezzatyazdi P., Jahankhah H., "Practical suggestion for 2d finite element modeling of soil-structure interaction problems", Second European conference on Earthquake Engineering and Seismology, ISTANBOL (2014).
20. Gelagoti F., Kourkoulis R., Anastasopoulos I., Tazoh T., Gazetas G., "Seismic Wave Propagation in a Very Soft Alluvial Valley: Sensitivity to Ground-Motion Details and Soil Nonlinearity, and Generation of a Parasitic Vertical Component", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 100, No. 6 (2010) 3035-3054.
21. Sahar D., Narayan J. P., Kumar N., "Study of role of basin shape in the site–city interaction effects on the ground motion characteristics", Natural Hazards, vol. 75 (2015) 1167-1186.
22. Bard P.Y., Bouchon M., "The seismic response of sediment filled valley, part-II: the case of incident of SV waves", Bulletin of the Seismological Society of America 70 (1980) 1263-1286.
23. Sanchez-Sesma F., Romos-Martinez J., Campillo M., "Seismic response of alluvial valleys for incident P, S and Rayleigh waves: A boundary integral formulation", Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam (1992).
24. Hidasa Y., Yamamoto S., "One, Two, and Three-Dimensional Site in Sediment-Filled Basins", 11th, World Conference on Earthquake Engineering (1996).
25. Iyisan R., Khanbabazadeh H., "A Numerical study on the basin edge effect on soil amplification", Bulletin of Earthquake Engineering, 11 (2013) 1305-1323.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.6.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.345 ]