

مدل سازی عددی فشار هیدرودینامیک جریان در بدنه سدها

عماد الدین امین عباسی¹، غلامعباس بارانی²

¹دانشجوی کارشناسی ارشد سازه هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

emadaddinaminabbasi@yahoo.com

²استاد بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

gab@mail.uk.ac.ir

چکیده

به دلیل اهمیت سدها به عنوان یک جز استراتژیک و پدافند غیرعامل در کشورها، برآورد دقیق نیروهای وارده و تغییر شکل های ایجاد شده در آنها ضروری به نظر می رسد. در این مقاله سعی شده که جنبه های مهم برای مدل سازی فشار هیدرودینامیک جریان ناشی از اثر زلزله در بدنه سدها مورد بررسی قرار گیرد. معادله فشار هیدرودینامیک با المان 8 گره ای ایزوپارامتریک به صورت کرنش صفحه ای در دو بعد گسسته شده است. شرایط مرزی مناسب در بالادست، سطح مشترک بین اجزا سد، پاسخ فرکانسی و تراکم پذیری آب به عنوان عوامل موثر بر نتایج ایجاد شده از مدل سازی عددی در نظر گرفته شده و با استفاده از این رویکردها، نتایج حاصل شده با جواب های تحلیلی، مطابقت بهتری را نشان می دهد.

واژگان کلیدی: فشار هیدرودینامیک، سد، مدل سازی عددی

مقدمه

لازمه طراحی و ارزیابی مناسب سدها برآورد دقیق نیروهای وارد بر آنها خصوصاً هنگام وقوع زمین لرزه می باشد. شکست احتمالی سدها که به عنوان سرمایه ملی یک کشور می باشند، می تواند موجب خسارت مالی و جانی فراوانی گردد. در نتیجه به دلیل نگرانی از ایمنی لرزه ای سدها، مطالعه رفتار لرزه ای سدهای بتنی، موضوع

مطالعات جامعی بوده است. تحلیل دینامیکی سدهای بتنی تحت بار زلزله به دلیل تفاوت رفتاری آب مخزن با مصالح تشکیل دهنده بدنه سد و یا پی آن، نسبت به سایر سازه‌ها از پیچیدگی بیشتری برخوردار می‌باشد. مطالعات تحقیقی و تجربه‌های واقعی زمین لرزه‌های مختلف، بروز مشکلات فراوانی در سدهای بتنی را نشان می‌دهد. فشارهای هیدرو دینامیک موثر بر وجه بالادست سدهای بتنی تحت اثر زلزله یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی این سازه‌ها در مناطق زلزله خیز می‌باشد. در نتیجه تحقیقات باید توانایی ارزیابی تغییر مکان‌ها و تنش‌های سد با در نظر گرفتن اندرکنش مخزن و پی آن را دارا باشد. محاسبه فشار هیدرو دینامیک وارد بر سدها از مهمترین مسایل هیدرو دینامیکی مطرح در مهندسی زلزله می‌باشد که بصورت بارگذاری فوق‌العاده در هنگام وقوع زلزله مد نظر قرار می‌گیرد [9].

رفتار لرزه‌ای سدها به صورت گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته و روش‌های آنالیز متعددی مانند سودواستاتیک¹ (شبه استاتیک)، تیر برشی و اجزاء محدود دینامیکی توسعه یافته‌اند. پیشرفت‌های چشم‌گیری راجع به خصوصیت دینامیکی سدهای ویسکو-الاستیک ناهمگن و پاسخ غیرخطی لرزه‌ای الاستو-پلاستیک سدها ایجاد شده است. هر چند که بیشتر آنالیزها از فشار هیدرو دینامیک مخزن در بالادست سد صرف نظر کرده و فقط قسمت هیدرواستاتیک آنها را در نظر می‌گیرند [8].

زمانی که سیستم سد-مخزن در معرض زلزله قرار می‌گیرد، فشار هیدرو دینامیکی علاوه بر فشار هیدرواستاتیکی بر وجه بالادست سدها که در تماس با سیال می‌باشند اعمال می‌گردد. این فشار هیدرو دینامیک در اثر ارتعاش سد و آب ذخیره شده در مخزن ایجاد می‌شود و باید توجه داشت که به دلیل نیروی پرشی ناچیز مابین کف مخزن و محیط سیال، حجم عظیم آب موجود در مخزن سد مستقیماً تحت تاثیر حرکت زمین قرار نمی‌گیرد و تنها در اثر ارتعاش سدها در محیط مخزن، امواج فشار هیدرو دینامیک ایجاد شده به سمت بالادست منتشر می‌شوند. سدهای قوسی بخش بزرگی از فشار هیدرو دینامیکی و سایر نیروهای وارده را با انتقال به دیواره‌های جانبی تکیه‌گاه‌ها با عملکرد قوسی خود، تحمل می‌کنند.

¹ pseudostatic

فشار هیدرودینامیک در سدها در طول زلزله اولین بار توسط وسترگارد¹ برای یک سد صلب با وجه بالادست عمودی تحت بار هارمونیک افقی زمین مورد بررسی قرار گرفت. زانگار² و چوانگ³ سدها را با وجه بالادست شیب دار و لیو⁴ آن‌ها را با پایه مخزن شیب دار در نظر گرفتند [6]. بوستامانت⁵ نشان داد که در سدهای متعارف که نسبت طول به عمق مخزن آنها بیش از 3 است فرض نامحدود بودن طول مخزن خطایی کمتر از پنج درصد نسبت به حالتی که مخزن با طول واقعی خود تحلیل شود، در پی خواهد داشت. وی همچنین خطای ناشی از نادیده گرفتن تاثیر امواج سطحی بر فشار هیدرودینامیک پشت سد را به شکل تابعی از عمق مخزن و فرکانس ارتعاش زمین محاسبه نمود [2].

چوپرا⁶ با بررسی تاثیر تراکم پذیری آب بر پاسخ فشار هیدرودینامیک مخزن نشان داد که برای سیال تراکم ناپذیر، حل وسترگارد در کلیه فرکانس های بارگذاری صادق است اما در سدهای بلند، تراکم پذیری آب بر پاسخ هیدرودینامیک در فرکانس های بالا اثر گذار خواهد بود [1]. به علاوه مطالعات چوپرا به تخمین فشار هیدرودینامیک تحت بارگذاری شتاب تصادفی و جواب به فرم بسته تصمیم یافت و در مقاله ای دیگر اثر اندرکنش سد با مخزن و پی نیمه بی نهایت را مورد بررسی قرار داد. نت⁷ مساله را با به کارگیری تکنیک تفاضلات محدود و با صرف نظر کردن از اثرات میرایی تشعشی بررسی نمود. در ادامه محققین متعددی مساله را در حوزه فرکانس و حوزه زمانی با استفاده از روش المان محدود مطالعه نمودند [3].

راه حل های تحلیلی متعددی با پوشش جنبه های گوناگون از مساله (مانند زاویه شیب تراکم پذیری آب و طبیعت بار) ارائه شد و جواب های گسترده ای برای مقادیر و توزیع فشار هیدرودینامیک در سدها توسعه یافت. هر چند که این جواب ها از فرضیات و محدودیت های بسیاری رنج می برند (مانند هندسه ساده و شکل ناپذیری

¹ Westergaard

² Zangar

³ Chwang

⁴ Liu

⁵ Bustamate

⁶ Chorpa

⁷ Nath

سدها). برای حل مسایل دشوارتر که با سدهای ناهمگن و شکل پذیر و با هندسه پیچیده درگیرند، نیازمند گسسته سازی محیط مخزن هستند، تا اندرکنش سد-مخزن به صورت کامل تحلیل گردد. متعاقباً اندرکنش سد و آب مخزن و اندرکنش سد و صخره سنگی پی دو پارامتر بسیار مهم و تاثیرگذار در بررسی پاسخ دینامیکی سدهای قوسی در طی زمین لرزه می باشد. بنابراین پاسخ دینامیکی واقعی سدهای قوسی در برابر بارهای لرزه ای مساله ای بسیار پیچیده و وابسته به پارامترها و عوامل متعددی است. جهت بررسی این پدیده دیدگاه های متفاوتی مطرح است که سه دیدگاه اصلی به شرح زیر معرفی می شود

(1) مدل جرم افزوده¹ که ساده ترین مدل است.

(2) دیدگاه اولری در بررسی اندرکنش سد-مخزن: در این روش مجهول اصلی در قلمرو سازه تغییر مکان های گره ای و در قلمرو سیال فشارهای گره ای در نظر گرفته می شود.

(3) دیدگاه لاگرانژی در بررسی اندرکنش سد-مخزن: در این روش مجهول اصلی در هر دو حوزه سازه و سیال تغییر مکان های گره ای در نظر گرفته می شود [7].

بیان مساله

مساله مورد مطالعه به صورت شماتیکی در شکل 1 نمایش داده شده است. تحت اثر شرایط دینامیکی لرزه ای مخزن، فشار هیدرو دینامیک را روی وجه بالا دست (AB) سد تحریک می کند. فشار ایجاد شده در سد به مقدار و فرکانس مشخصه بار و نیز ویژگی های سد، پی و مخزن بستگی دارد.

معادله مورد بررسی برای فشار هیدرو دینامیک ناشی از حرکت زمین، بصورت زیر است

$$\nabla^2 p = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

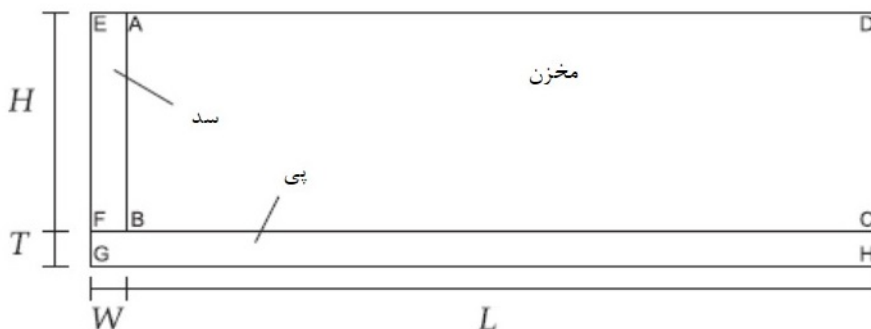
در معادله بالا C سرعت صوت در آب و ∇^2 عملگر لاپلاس در دو بعد است. این معادله با المان 8 گره-

ای ایزوپارامتریک به صورت کرنش صفحه ای در دو بعد گسسته شده است. ارتفاع مخزن با وجه بالادست عمودی

$H=180\text{m}$ و طول مخزن با پنج مقدار متفاوت 240m و 180m و 126m و 96m و 54m (یعنی $1/3$ و $1/2$ و $2/3$ و $3/4$ و 1)

¹ Added mass model

و $L/H = 3$ برای محاسبات انتخاب گردید. عرض سد صلب W و ضخامت فونداسیون T ، برابر ۱۸ متر در نظر گرفته شده در حالی که حداکثر بعد المان d ، $(H/40) = 4/5m$ است.



شکل ۱. هندسه سیستم مخزن سد

به منظور کارایی و اقتصادی بودن مدل فشار هیدرودینامیک، باید مخزن بالا دست به فاصله‌ای از سد محدود گردد (C-D). به همین ترتیب خاک فونداسیون نیز در فاصله‌ای از مخزن و سد قطع می‌گردد (F-G-C-H). در مرزهای مخزن و خاک، شرایط مرزی جاذب^۱ و ویژه‌ای برای اجتناب از بازتابش امواج خروجی لازم است.

۳.۱- شرط مرزی بالادست

در پی فعالیت‌های کوچو کارسلان^۲ [4]، سد نشان داده شده در شکل 1، توسط پلکانوس^۳ [10] با المان 8

گره‌ای ایزوپارامتریک به صورت کرنش صفحه‌ای دینامیکی در دو بعد مدل گشته است. با محدود کردن مقدار جابجایی عمودی به صفر، چهار شرط مرزی زیر برای مرز بالادست مخزن مورد بررسی واقع شد:

- شرط مرزی آزاد^۴ که در آن تنش‌ها و جابجایی‌ها در جهت افقی و قائم صفر در نظر گرفته می‌شوند.
- شرط مرزی چسبنده^۱ که دارای تنش داشپوت^۲ در جهت افقی و جابجایی صفر در جهت قائم بود.

¹ absorbing

² Küçükarslan

³ Pelecanos

⁴ Free

• شرط مرزی مخروطی^۳ که در امتداد افقی تنش‌های داشپوت و اشپرینگ^۴ و در امتداد قائم، جابجایی صفر دارد.

• شرط مرزی چسبنده با فشار هیدرواستاتیک ثابت.

آب مخزن به صورت مصالح خطی مدل گردیده و خصوصیات آن مدول بالک $k_w = 2.2 \times 10^6 \text{ KPa}$ و تنش برشی $G_w = 100 \text{ KPa}$ هستند. این مقدار اسمی مدول برشی، برای اجتناب از ناپایداری عددی بدون ایجاد انتشار موج برشی غیر واقعی در آب، اتخاذ گردیده است. فونداسیون سد به صورت صلب در نظر گرفته شده پس مدول بالک $K_d = 10^8 \text{ KPa}$ خواهد شد. تنش‌های داشپوت و اشپرینگ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma = \rho V_p \dot{U} \quad (۱)$$

$$\sigma = \rho \frac{V_p^2}{2r} U \quad (۲)$$

در عبارت‌های زیر σ تنش عمود بر مرز، ρ چگالی مصالح اعمال شده در شرط مرزی مورد نظر (یعنی در این حالت، آب)، U_p موج فشاری آب ($c=1483 \text{ m/s}$)، r فاصله مرز از منبع محرک (که به صورت معادل با طول L از مخزن در نظر گرفته می‌شود)، U و \dot{U} هم به ترتیب جابجایی و سرعت در جهت افقی هستند.

شکل‌های ۲ تا ۵، فشار هیدرودینامیک رادر پایه سد (نقطه B) بر حسب زمان برای چهار شرط مرزی مختلف نشان می‌دهد. نتایج عددی با جواب تحلیلی که با استفاده از رابطه چوپرا (3) محاسبه شده، مقایسه گردید.

$$P(y, t) = \frac{4\gamma_w V_p}{\pi g} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n-1} \cos(\lambda_n y) \int_0^t u_g(\tau) J_0[\lambda_n V_p(t-\tau)] d\tau \quad (۴)$$

با توجه به نمودار، نوسانات فشار برای شرط مرزی آزاد از فشار ناشی از آنالیز تحلیلی بزرگتر است. دامنه

نوسانات برای دو حالت چسبنده و مخروطی در شرایط مرزی با جواب تحلیلی بیشتر قابل مقایسه است.

¹ Viscous

² dashpot

³ Cone

⁴ spring

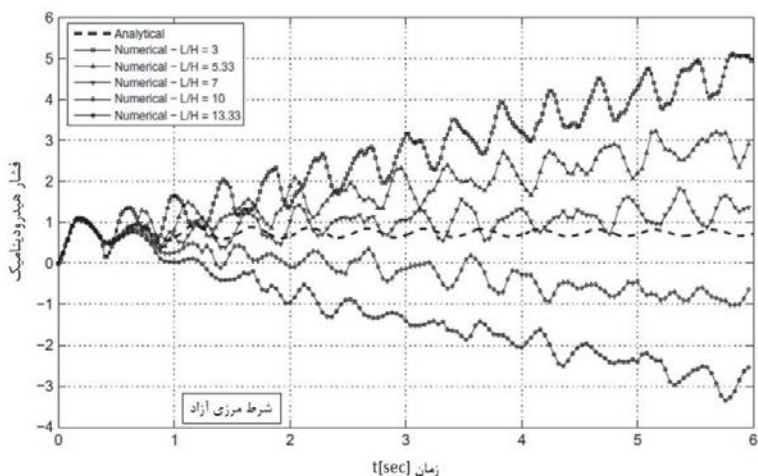
۳.۲- سطح مشترک مخزن و سد و مخزن ویی

آنالیز پس از تعریف المان سطح مشترک (رابط) ایزوپارامتریک با ضخامت صفر در سطح مشترک

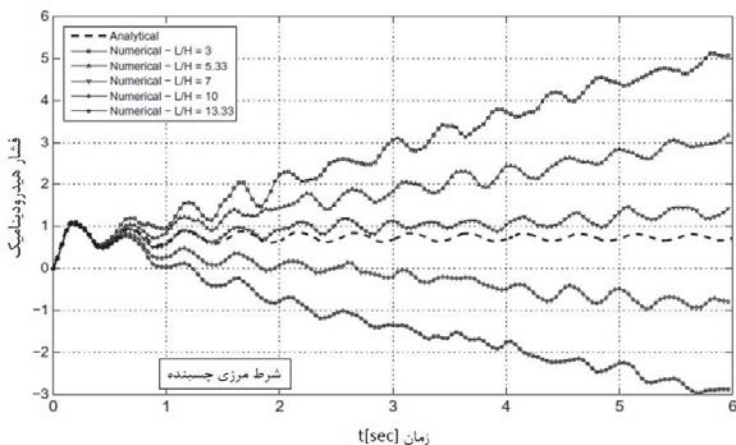
مخزن-سد و مخزن-پی توسط پلکانوس تکرار شد. دلیل تعریف این المان، اجازه دادن به جابجایی نسبی بین مخزن

و مصالح جامد است. به همین منظور یک سختی برشی بسیار کم ($K_S = 1 \text{ KN/m}$) و بسیار زیاد (

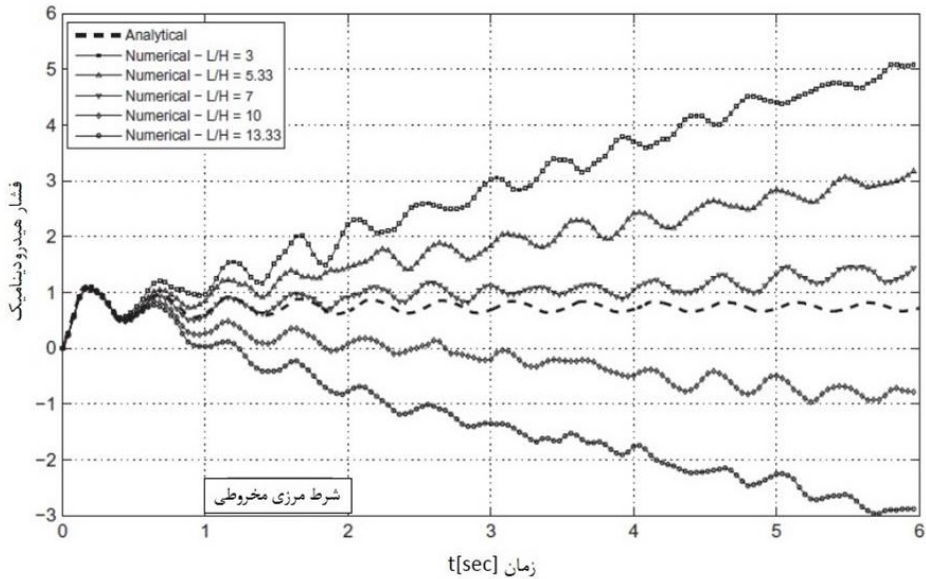
$K_S = 10^5 \text{ KN/m}$) به این المانها اختصاص یافت تا جابجایی برشی نسبی ایجاد شود.



شکل ۲. فشار هیدرودینامیک در پایه سد برای شرط مرزی آزاد [10]

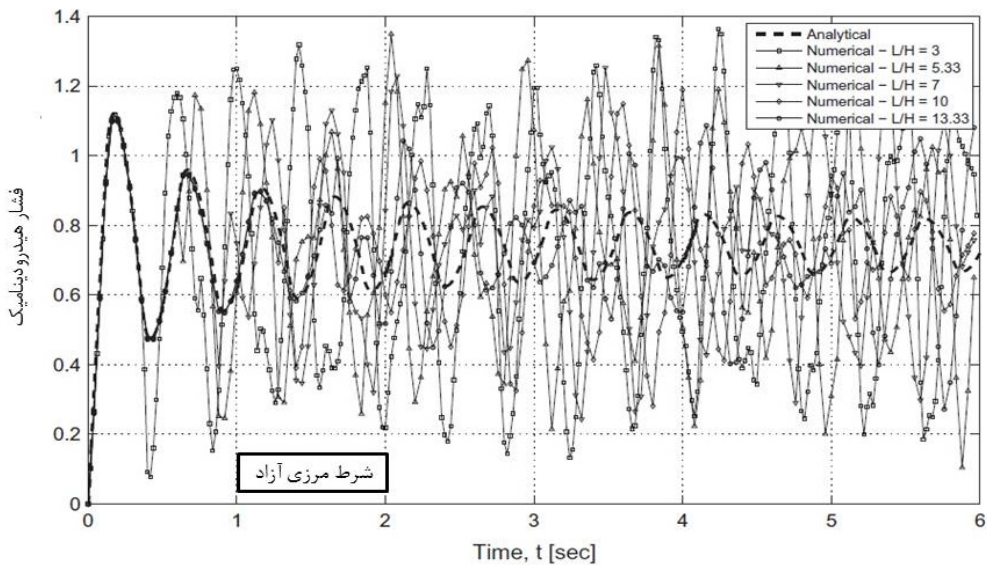


شکل ۳. فشار هیدرودینامیک در پایه سد برای شرط مرزی چسبنده [10]

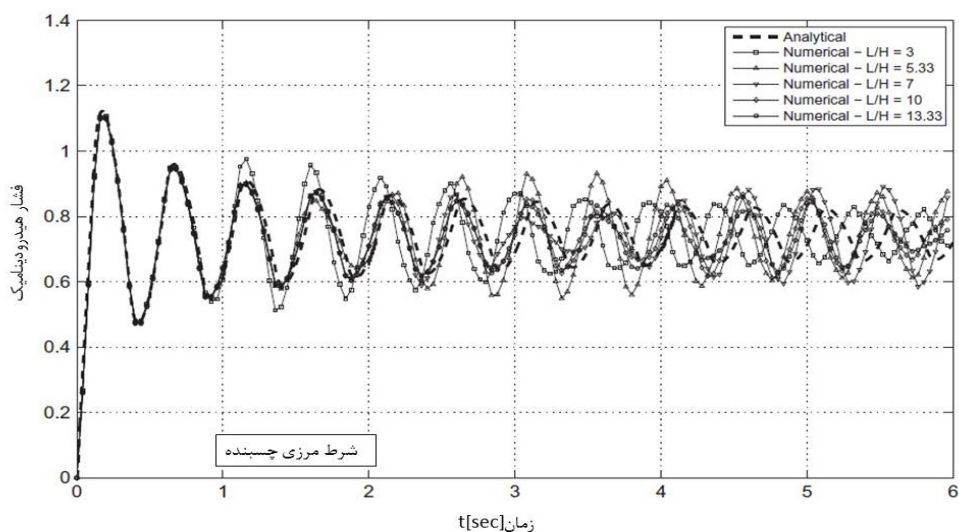


شکل ۴. فشار هیدرودینامیک در پایه سد برای شرط مرزی مخروطی [10]

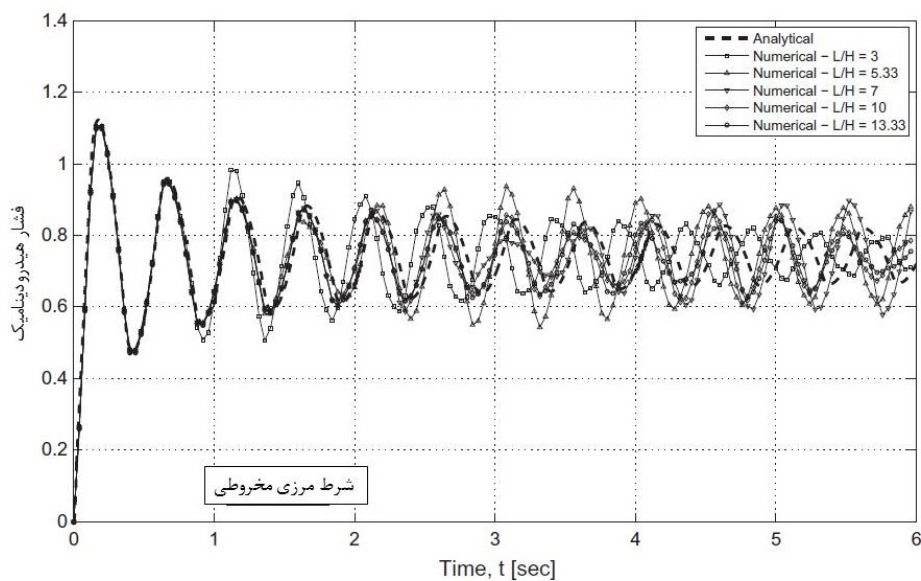
پلکانوس در شکل های ۵ تا ۷ تکامل فشار هیدرودینامیک را در پایه سد (نقطه B) بر حسب زمان برای سه شرط مرزی معرفی شده، نشان داد. همانگونه که مشاهده می شود، نتایج تطابق بهتری با راه حل تحلیلی دارد.



شکل ۵. فشار هیدرودینامیک در پایه سد با شرط مرزی آزاد با همان رابط [10]



شکل 6. قشار هیدرودینامیک در پایه سد با شرط مرزی چسبنده با المان رابط [10]

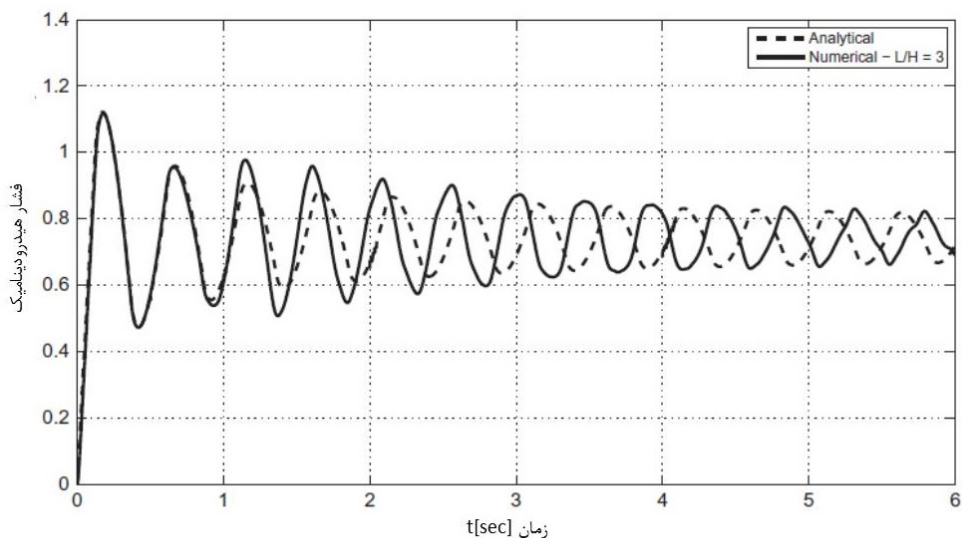


شکل 7. قشار هیدرودینامیک در پایه سد با شرط مرزی مخروطی با المان رابط [10]

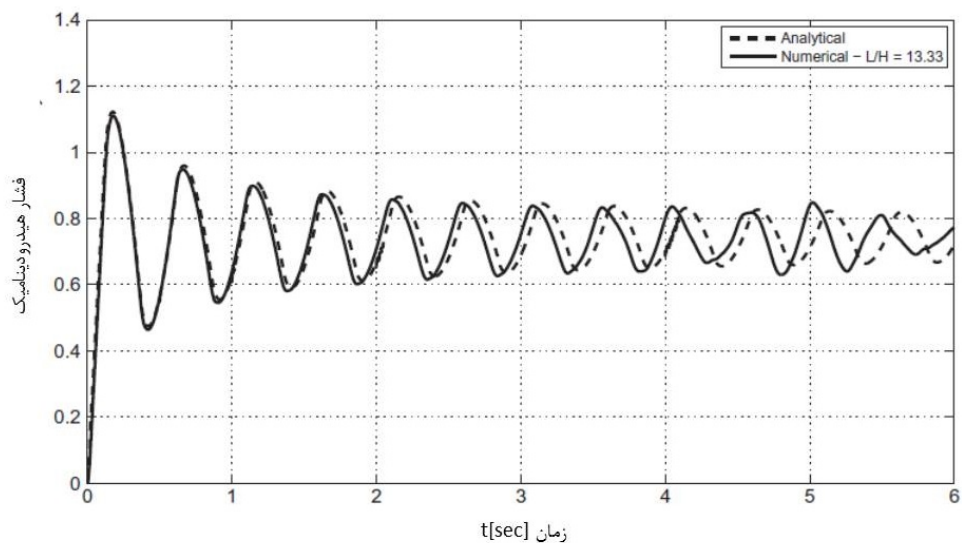
علاوه بر این شکل های 8 و 9، مقایسه ای بین تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیک به صورت تحلیلی و عددی (با

شرط مرزی چسبنده) در پایه سد برای نسبت های $L/H=3$ و $13/33$ انجام گرفت که نشان داد برای مش های

کوتاهتر افزایش سریعتری در دامنه نوسانات فشار نسبت به مش های بلندتر، رخ می دهد.

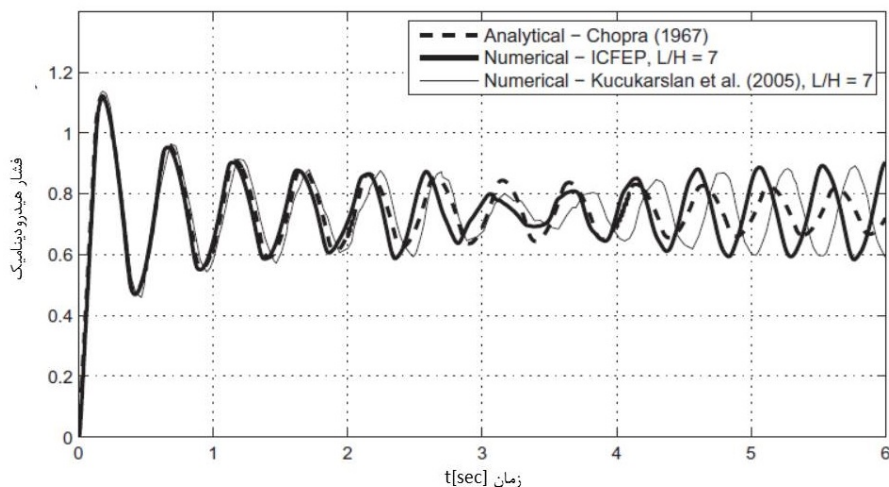


شکل ۸ فشار هیدرودینامیک در پایه سد با شرط مرزی چسبنده برای $L/H = 3$ [10]



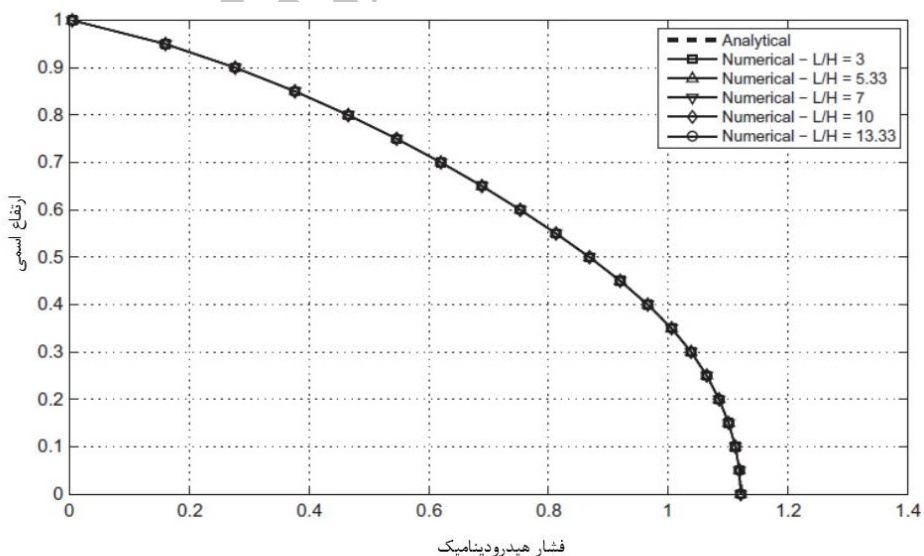
شکل ۹ فشار هیدرودینامیک در پایه سد با شرط مرزی چسبنده برای $L/H = 13.33$ [10]

شکل ۱۰ فشار هیدرودینامیک محاسبه شده برای $L/H=7$ را با جوراب تحلیلی و عددی کوچوکارسلان و همکاران مقایسه می کند و نشان داد که رویکردهای عددی (اجزاء محدود سیالات اولری و اجزاء محدود جامدات الاستیک) با رویکرد تحلیلی چوپرا مطابقت قابل قبولی دارد.



شکل ۱۰. مقایسه فشار هیدرودینامیک در پایه سد با شرط مرزی چسبنده برای $L/H = 7$ در جواب تحلیلی چوپرا و حل عددی کوچکارسلان [10]

توزیع پیک فشار هیدرودینامیک در وجه بالادست سد با پنج طول مختلف و شرط مرزی چسبنده محاسبه شده و با جواب تحلیلی مقایسه گردید که از تطابق خوبی برخوردار می باشد [شکل ۱۱]. هر چند که شرط مرزی مخروطی با المان رابط همین نتایج را ایجاد می کند. لذا می توان نتیجه گرفت که شرط های مرزی "آزاد" و "چسبنده + فشار هیدرواستاتیک" برای شروط مرزی جاذب مناسب نمی باشند.



شکل ۱۱. توزیع فشار هیدرودینامیک در وجه سد برای شرط مرزی چسبنده [10]

۳.۳- پاسخ فرکانسی

چوپرا فشار هیدرودینامیک را تحت بار متناوبی بررسی و نتایج را به صورت طیف نیروها بیان کرد. به منظور بررسی عملکرد شرایط مرزی چسبنده و مخروطی تحت گسترده وسیعی از فرکانس‌های بارگذاری آنالیزهای مشابهی برای فرکانس‌های بارگذاری متفاوت طبق معادله (4) تکرار شد.

$$a_0 \cos \omega t \quad (5)$$

پلکانوس در نمودارهایی، نسبت نیروی هیدرودینامیک F_{Dym} (انتگرال فشار هیدرودینامیک بر روی وجه بالادست سد در شرایط دایمی) است یعنی زمانی که به شکل تابع متناوب گرفته می‌شود) به نیروی هیدرواستاتیک بوده که در شتاب گرانش g ضرب شده را بر حسب نسبت فرکانسی $\Omega = w/w_1$ نشان می‌داد. w فرکانس چرخشی و w_1 فرکانس چرخشی اصلی مخزن هستند که توسط معادله زیر بیان می‌شود.

$$\pi V_p / 2H \quad (6)$$

مقادیر نسبت $g \cdot \frac{F_{Dym}}{F_{St}}$ در فرکانس‌های طبیعی مخزن ($w/w_1 = 1, 3, 5, \dots$) با فشارهای

هیدرودینامیکی که بر اثر پدیده تشدید بینهایت می‌شوند، در این مورد نمودارها حذف شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود، توافق خوبی در تمام طیف فرکانس‌ها برای هر دوی شروط مرزی بدست آمده و می‌تواند پیشنهاد دهد که این شرایط مرزی را می‌توان در مرز بالادست مخزن به منظور مدل‌سازی فشار هیدرودینامیک در سدها بر حسب بار دینامیکی در یک گسترده وسیع از فرکانس‌ها به کاربرد.

۴.۳- تراکم‌پذیری آب

اهمیت توجه به اثر تراکم‌پذیری آب ابتدا توسط چوپرا (۱۹۶۷) برجسته شد. پلکانوس (۲۰۱۳) برای آزمودن رفتار مدل عددی با فرض تراکم‌پذیری آب با شرط مرزی چسبنده، از معیاری برای تراکم‌پذیری استفاده کرد که ۱۰۰۰۰۰ مرتبه از مقدار واقعی‌اش بزرگتر بود ($K_w = 2.2 \times 10^{11}$) (طیف نیروی بدست آمده است).

¹ Steady state

نتایج عددی برای آب تراکم ناپذیر به نتایج تحلیلی و ستگارد که توسط چوپرا نیز تایید شد، نزدیک است. اما فشار هیدرودینامیک بزرگتری که در اثر تشدید فرکانس های بارگذاری نزدیک به فرکانس طبیعی مخزن بوجود می-آیند، قابل پیش بینی نبود، پس پلکانوس پیشنهاد داد که تراکم پذیری با احتساب مقدار واقعی مدول بالک، در نظر گرفته شود.

نتیجه گیری

مسائل متعددی برای مدل سازی عددی فشار هیدرودینامیکی از طریق گسسته سازی حوزه مخزن با المان ایزوپارامتریک اجزاء محدود، تشریح شد. برای دست یابی به تطابق خوب نتایج محاسبه شده با جواب های تحلیلی، موارد زیر ضروری می باشند:

- تا آنجا که به مرز بالادست کوتاه شده مربوط است، شرط مرزی چسبنده و مخروطی می تواند برای جذب امواج ساطع شده استفاده گردند. عملکرد آنها در طیف گسترده ای از فرکانس های بارگذاری شده مورد قبول واقع شد و تقریباً مشابه بود.
- در سطح مشترک بین مخزن و سد و فنداسیون و مخزن، بایستی المان رابط به منظور ایجاد حرکت نسبی بین آب و مصالح خاکی استفاده شود. مقداری برای سختی برشی این المان ها منظور می گردد.
- آب مخزن نباید به عنوان ماده غیر قابل تراکم تلقی شود تا پاسخ ممکن برای فرکانس بارگذاری شده نزدیک به فرکانس طبیعی مخزن دست کم یا دست بالا (برای فشارهای بالا) گرفته نشود.

• مراجع

- [1] Chopra AK. Earthquake response of earth dams. J Soil Mech Found Div, ASCE 1967;93(SM2):1399-412.
- [2] Chung J, Hulbert GM. A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: the generalised- α method. J Appl Mech 1993;60:371-5
- [3] Gogoi I, Maity D. A novel procedure for determination of hydrodynamic pressure along upstream face of dams due to earthquakes. Comput Struct 2010;88:539-48.

- [4] Küçükarslan S, Cos_kun SB, Tas_kin B. Transient analysis of dam–reservoir interaction including the reservoir bottom effects. *J Fluids Struct* 2005;20:1073–84.
- [5] Bathe JK. *Finite element procedures in engineering analysis*. New Jersey: Prentice Hall; 1996.
- [6] Liu PLF. Hydrodynamic pressures on rigid dams during earthquakes. *J Fluid Mech* 1986;165:131–45.
- [7] Parrinello F, Borino G. Lagrangian finite element modelling of dam–fluid interaction: accurate absorbing boundary conditions. *Comput Struct* 2007;85:932–43.
- [8] Samii A, Lotfi V. High-order adjustable boundary condition for absorbing evanescent modes of waveguides and its application in coupled fluid–structure analysis. *Wave Motion* 2012;49:238–57.
- [9] Seghir A, Tahakourt A, Bonnet G. Coupling FEM and symmetric BEM for dynamic interaction of dam–reservoir systems. *Eng Anal Bound Elem* 2009;33:1201–10.
- [10] Pelecanos L, Kontoe S, Zdravkovic L. Numerical modelling of hydrodynamic pressures on dams. *Computers and Geotechnics* 53 (2013) 68–82

Archive of SID