

OHN10107351170

برآورد تحلیلی فرکانس ارتعاش آزاد سد خاکی با هسته
رسی بر بستر صلب

مریم مهدی زاده^۱، علی قنبری^۲

دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران

mm16246@yahoo.com

خلاصه

سدهای خاکی، سازه‌هایی سه بعدی، عظیم، ناهمگن و غیرایزوتروپ هستند که در اندرکنش با شالوده و آب مخزن می‌باشند. استفاده از سد خاکی همگن به علت حجم مصالح زیاد و همچنین رخ دادن پدیده رگاب در ارتفاعات کم معمول تر است. در عین حال سد خاکی با هسته رسی به علت انعطاف پذیری بدنه و وجود رس به عنوان یک لایه نفوذ ناپذیر با ارتفاعات مختلف ساخته می‌شود. ارائه روشی مناسب جهت تعیین فرکانس طبیعی سازه که یکی از پارامترهای تاثیرگذار در تحلیل لرزه ای سد هاست، نقش حائز اهمیتی در تحلیل دقیق این سازه‌ها دارد. فرکانس طبیعی سازه به کمک روابط تجربی، روشهای تحلیلی، ابزار گذاری و یا آنالیز مودال به دست می‌آید. در این مقاله با استفاده از تحلیل جرم گسترده و فرض تابع شکل مثلثاتی، فرمولاسیون جدیدی برای محاسبه تقریبی فرکانس طبیعی سد خاکی ناهمگن ارائه شده است. فرکانس حاصل از روابط پیشنهادی با روابط تجربی محققین گذشته و نتایج نرم افزار مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که تابع شکل مثلثاتی برای توصیف پاسخ های دینامیکی این نوع سد عملکرد خوبی دارد و می‌توان از این فرمول پیشنهادی برای برآورد تقریبی و سریع زمان تناوب اصلی سد خاکی ناهمگن استفاده کرد.

کلمات کلیدی: فرکانس طبیعی، سد خاکی ناهمگن، حل تحلیلی، پی صلب، تابع شکل.

۱. مقدمه

محاسبه فرکانس یا زمان تناوب اصلی یک سازه در بررسی رفتار دینامیکی آن سازه بسیار تاثیرگذار است. روابط تخمینی و تحلیلی دقیقی برای محاسبه فرکانس طبیعی سازه‌هایی نظیر دودکش‌ها، ساختمان‌ها، سیلوها، پل‌ها و سدها وجود دارد. امروزه صنعت سد سازی در ایران پیشرفت قابل ملاحظه ای داشته است. از طرفی با توجه به لرزه خیز بودن کشورمان و عملکرد مناسبی که سدهای خاکی در زلزله‌های اخیر از خود نشان داده اند، استفاده از این گونه سدها در نواحی اطراف گسل‌های فعال بر سدهای بتنی ارجحیت دارد. از این رو و با توجه به توزیع گسترده این نوع سد سازی در کشور، طراحی لرزه ای ایمن این سدها و بررسی پاسخ دینامیکی سد به نیروهای وارده از اهمیت بسزایی برخوردار است.

سدهای خاکی معمولاً به دوگونه همگن و ناهمگن ساخته می‌شوند. سدهای همگن به دلیل حجم مصالح زیاد و همچنین رخ دادن پدیده رگاب در آنها معمولاً تا ارتفاع ۲۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ حال آنکه سدهای خاکی ناهمگن به دلیل انعطاف پذیر بودن بدنه در مقابل زلزله از شرایط بهتری برخوردار هستند. هر چه انعطاف پذیری سد بیشتر باشد، فرکانس ارتعاش کمتر و زمان تناوب آن بیشتر خواهد بود. فرکانس سد یکی از پارامترهای تفسیر کننده رفتار لرزه ای سد در طی بارگذاری های ناشی از زلزله می‌باشد.

تا کنون روش های عددی زیادی برای محاسبه فرکانس ارتعاش آزاد ارائه شده است اما روش های تحلیلی و آزمایشگاهی کمی در طی سالهای گذشته به محاسبه این

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران

مهم پرداخته اند. [1] Kishi et al (1987) با استفاده از مدل گوه ناقص دو بعدی سد خاکی و در نظر گرفتن همزمان ممان خمشی و نیروی برشی در مقطع قائم سد خاکی در یک کانال مستطیلی توانست فرمول جدیدی برای فرکانس سد ارائه دهد. Gazetas et al [2] (1991) نیز فرمولی برای محاسبه فرکانس ارتعاش آزاد سد خاکی همگن قرار گرفته روی بستر صلب و متشکل از خاک چسبنده به روش تیر برشی ارائه داد. [3] Watanabe et al (1996) نیز توانست بر اساس طیف فوریه و آنالیز مودال، فرکانس طبیعی و مدهای متناظر با آن را تا پنجمین مد حرکتی سد خاکی، محاسبه نماید. [4] Zhen et al (1996) نیز در طی تحقیقی فرکانس های سد خاکی ناهمگن موجود در یک کانال مثلثی را که به صورت الاستیک مدل شده بود، با استفاده از روش تحلیل گوه برشی به دست آورد. [5] Nunez et al. (2007) به محاسبه فرکانس ارتعاش آزاد سد خاکی با شکل بدنه غیر مثلثی پرداخت. در سالهای اخیر نیز [6] Parish et al. (2009) فرکانس طبیعی سیستم پی-سد را با استفاده از تحلیل فوریه پاسخ ارتعاش آزاد سد بدست آورد. همچنین Mahdizadeh [7] et al. (2012) فرکانس طبیعی سد خاکی همگن الاستیک بر بستر صلب را با استفاده از روش تحلیل جرم گسترده به دست آورد.

در مقاله حاضر سعی شده است فرمولی تقریبی برای محاسبه فرکانس ارتعاش آزاد سد خاکی با هسته رسی بر پایه روش تحلیلی جرم گسترده ارائه شود. در محاسبه فرکانس طبیعی سد، تابع شکل مثلثاتی مورد استفاده قرار گرفته است و سدی ناهمگن به صورت الاستیک خطی مدل شده است. برای کنترل نتایج، به وسیله نرم افزار ژئوتکنیکی مبتنی بر روش های عددی، سدهای ناهمگنی با ارتفاع و مدول های برشی مختلف بر روی بستر صلب مدل شده اند و نتایج به دست آمده برای مقایسه دقت فرمول پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. فرمولاسیون محاسبه فرکانس طبیعی با کمک معادلات جرم گسترده

در محاسبه فرکانس ارتعاش آزاد سد خاکی به روش تحلیل جرم گسترده با متغیر های زیادی روبرو هستیم، از این رو برای جلوگیری از گستردگی موضوع، این تحقیق بر پایه یک سری فرضیات انجام گرفته است. فرضیاتی که مورد استفاده قرار گرفته است در موارد زیر خلاصه شده است:

- ۱- رفتار سد خاکی به صورت کرنش صفحه ای مدل شده است.
- ۲- تابع شکل مثلثاتی مورد استفاده قرار گرفته اند.
- ۳- شیب پوخته سد ۱ قائم به α افقی است.
- ۴- شیب هسته سد ۱ قائم به β افقی است.
- ۵- مسئله در حالت الاستیک خطی مد نظر است.
- ۶- مسئله برای سدهای با ارتفاع ۲۰ تا ۱۰۰ متر مد نظر می باشد.
- ۷- پی سد خاکی صلب فرض شده است.
- ۸- میرایی تقریباً برابر صفر است.

فرکانس ارتعاش آزاد یکی از پارامترهای اساسی در تعریف پاسخ سازه ها در برابر نیروهای دینامیکی می باشد که از رابطه زیر حاصل می شود:

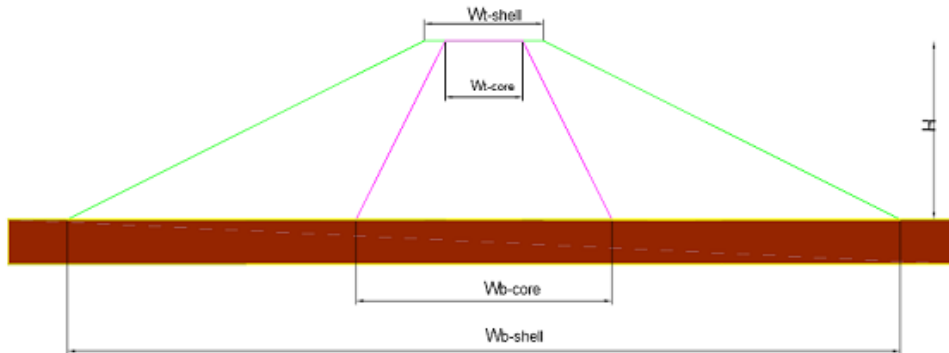
$$\omega = \sqrt{\frac{K^*}{M^*}} \quad (1)$$

که در آن K^* و M^* به ترتیب سختی و جرم معادل می باشند که به صورت زیر تعریف می شود:

$$M^* = \int_0^H \mu(x) \varphi^2(x) dx \quad (2)$$

$$K^* = \int_0^H k(x) (\varphi'(x))^2 dx \quad (3)$$

در روابط بالا، $\mu(x)$ و $k(x)$ جرم و سختی واحد ارتفاع سد هستند و از خصوصیات هندسی سد که در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است، حاصل می شوند. با توجه به شکل شماره ۱ و یک تناسب ساده می توان جرم و سختی واحد ارتفاع سد را به صورت زیر تعریف کرد:



شکل ۱ - هندسه سد خاکی مورد استفاده در تحلیل ها

$$\mu(x) = \rho \left(W_t + \frac{(H-x)(W_b - W_t)}{H} \right) \quad (4)$$

$$k(x) = \frac{E}{12} \left(W_t + \frac{(H-x)(W_b - W_t)}{H} \right)^3 \quad (5)$$

که در رابطه فوق ρ و E به ترتیب برابر جرم مخصوص و مدول الاستیسیته متوسط مصالح تشکیل دهنده بدنه سد خاکی ناهمگن (پوسته و هسته) و H برابر ارتفاع سد می باشد. لازم به ذکر است که در تمامی فرمول ها و روابط ذکر شده در این قسمت و قسمت های بعد، منظور از پارامترهای $\rho, E, G, \mu, W_b, W_t$ به ترتیب همان $\rho_{ave}, E_{ave}, G_{ave}, \mu_{ave}, W_{bshell}, W_{tshell}$ می باشد که برای اختصار از تکرار آن خودداری شده است، مگر اینکه این موارد با اندیس دیگری مشخص بشوند.

برای محاسبه فرکانس نیاز به فرض تابع شکلی بود که به همین منظور تابع شکلی مثلثاتی $1 - \cos(\pi x/2H)$ مورد استفاده قرار گرفت که محاسبات مربوط به این تابع شکلی در ادامه آورده شده است. در این حالت، ابتدا مقدار جرم و سختی معادل را طبق فرمول های شماره (۲) تا (۵) محاسبه نموده و سپس با در نظر گرفتن فرضیات موجود و اعمال آنها در روابط ساده شده جرم و سختی معادل، مقادیر به دست آمده را در فرمول شماره (۱) جایگزین کرده و رابطه ای برای محاسبه فرکانس ارتعاش آزاد به دست خواهیم آورد.

در گام نخست با قرار دادن تابع شکل مثلثاتی و مشتق دوم آن در فرمولاسیون جرم و سختی معادل و تکمیل فرآیند انتگرال گیری با استفاده از انتگرال های ساده و جز به جز و اعمال فرضیات ذکر شده در ابتدا، عبارات ساده شده ای بر حسب جرم مخصوص مصالح بدنه سد و همچنین خصوصیات هندسی سد حاصل می شود:

$$M^* = 0.23 \rho_{ave} W_{tshell} H + 0.08 \rho_{ave} \alpha H^2 \quad (6)$$

$$K^* = -0.101464 E_{ave} \alpha^3 + (1.6292) \frac{E_{ave} \alpha^2 W_{tshell}}{H} + (1.06541) \frac{E_{ave} W_{tshell}^2 \alpha}{H^2} + (0.2537) \frac{E_{ave} W_{tshell}^3}{H^3} \quad (7)$$

اکنون عبارات جرم و سختی معادل، یعنی فرمول شماره (۶) و (۷) را در فرمول شماره (۱) برای محاسبه فرکانس جایگذاری می کنیم. در این زمان برای ساده سازی بیشتر فرمولاسیون نهایی، به جای استفاده از مدول الاستیسیته از مدول برشی استفاده می کنیم، در نتیجه پارامترهای سرعت موج برشی و نسبت پواسون در فرمولاسیون محاسبه فرکانس ارتعاش آزاد ظاهر خواهند شد:

$$\omega = \sqrt{\frac{2(1+\mu_{ave})(-0.101464\alpha^3 + (1.6292)\alpha^2 Wt/H + (1.06541) Wt^2\alpha/H^2 + (0.2537) Wt^3/H^3)}{(0.23 Wt H + 0.08 \alpha H^2)} (Vs)_{ave}} \quad (8)$$

مشاهده می شود که پس از ساده سازی های انجام شده، پارامترهایی نظیر شیب پوسته، متوسط وزنی نسبت پواسون هسته و پوسته، عرض تاج، ارتفاع و متوسط وزنی سرعت موج برشی مصالح تشکیل دهنده هسته و پوسته سد در این فرمول مشارکت دارد. برای محاسبه متوسط وزنی سرعت موج برشی و نسبت پواسون از نسبت مساحت هسته و پوسته، آنچنان که از شکل شماره (۱) بر می آید استفاده شده است که نتایج در عبارات زیر قابل مشاهده است:

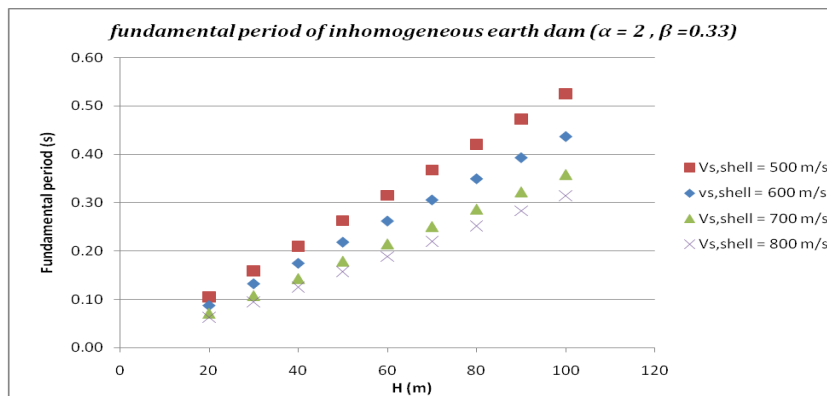
$$(Vs)_{ave} = \frac{(Vs)_{core} (Wt + \beta H)_{core} + (Vs)_{shell} [(Wt + \alpha H)_{shell} - (Wt + \beta H)_{core}]}{(Wt + \alpha H)_{shell}} \quad (9)$$

$$(\mu)_{ave} = \frac{(\mu)_{core} (Wt + \beta H)_{core} + (\mu)_{shell} [(Wt + \alpha H)_{shell} - (Wt + \beta H)_{core}]}{(Wt + \alpha H)_{shell}} \quad (10)$$

مشاهده می شود که با نزدیک شدن مشخصات هندسی هسته به پوسته و یا صفر شدن آن مشخصات، مقادیر متوسط سرعت موج برشی و نسبت پواسون به ترتیب برابر با مقادیر مربوط به هسته و پوسته خواهند شد. به عنوان نمونه مقادیر مربوط به زمان تناوب اصلی سدهایی با ارتفاع ۲۰ تا ۱۰۰ متر با نسبت پواسون پوسته و هسته که به ترتیب ۰/۳ و ۰/۳۵ و سرعت موج برشی پوسته و هسته که به ترتیب ۷۰۰ و ۴۲۰ متر بر ثانیه می باشند و سایر مشخصات مربوطه در جدول شماره (۱) موجود است، همچنین در گراف شکل شماره (۲) زمان تناوب مربوط به سدهای ذکر شده برای سه سرعت موج برشی دیگر هم قابل ملاحظه است:

جدول ۱- فرکانس و زمان تناوب اصلی سد خاکی با هسته رسی

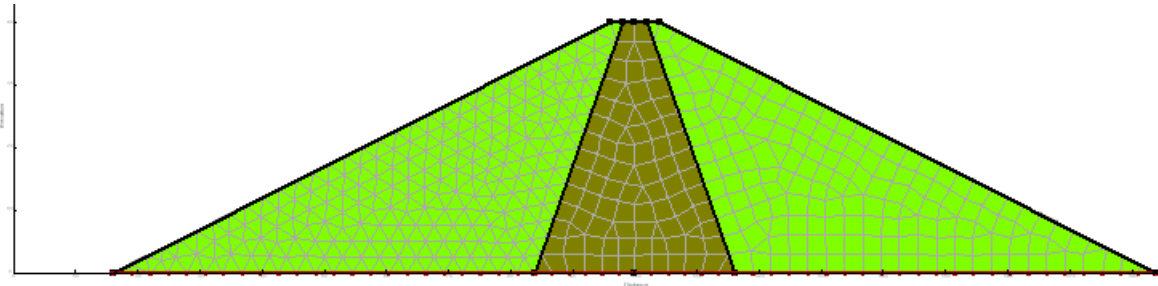
H(m)	α	β	Wt,shell (m)	Wt,core (m)	T (s)	W (rad/s)
20	2	0.33	4	2	0.07	87.54
30	2	0.33	6	4	0.11	57.99
40	2	0.33	8	4	0.14	43.77
50	2	0.33	10	5	0.18	35.02
60	2	0.33	12	6	0.22	29.18
70	2	0.33	14	7	0.25	25.01
80	2	0.33	16	8	0.29	21.88
90	2	0.33	18	9	0.32	19.45
100	2	0.33	20	10	0.36	17.51



شکل ۲- زمان تناوب اصلی سد خاکی با هسته رسی (حل تحلیلی)
 ۳. تحلیل دینامیکی

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
 ۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲

برنامه QUAKE/W برنامه ای مبتنی بر المان محدود است که برای مدلسازی و انجام تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار میگیرد. در این برنامه ابتدا مدل مورد نظر تحت آنالیز استاتیکی قرار می گیرد و سپس با انجام تغییراتی در مدل، آنالیز دینامیکی روی آن انجام می شود، بدین صورت که شتاب مناسبی انتخاب و به مدل اعمال می شود تا پاسخ های لرزه ای مدل دریافت شود و نحوه عملکرد سازه تحت بارگذاری انتخابی مورد بررسی قرار گیرد. شکل شماره ۳ مدل ساخته شده دوبعدی المان محدود سد خاکی ناهمگن با پی صلب را نمایش می دهد.



شکل ۳ - مدل سد خاکی با هسته رسی بر بستر صلب

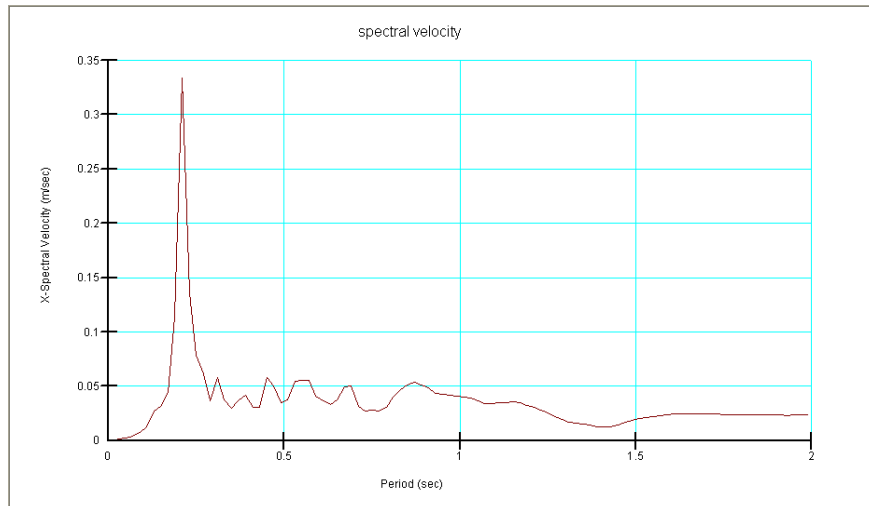
همان طور که در شکل شماره ۳ مشاهده می کنید از تکیه گاههایی که حرکت مدل را در دو جهت افقی و عمودی محصور می کنند، به عنوان پی صلب استفاده شده است. با استفاده از نسبت پواسون های مفروض و مدول های برشی مختلف و سایر پارامترهای مربوط به هندسه سد، مدل های زیادی مورد تحلیل قرار گرفته است که ذکر آنها در این مجال مقدور نیست. به عنوان نمونه ویژگی های مورد استفاده برای پوسته و هسته سد خاکی در یکی از مدلسازی ها در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح مورد استفاده در مدلسازی برای پوسته و هسته

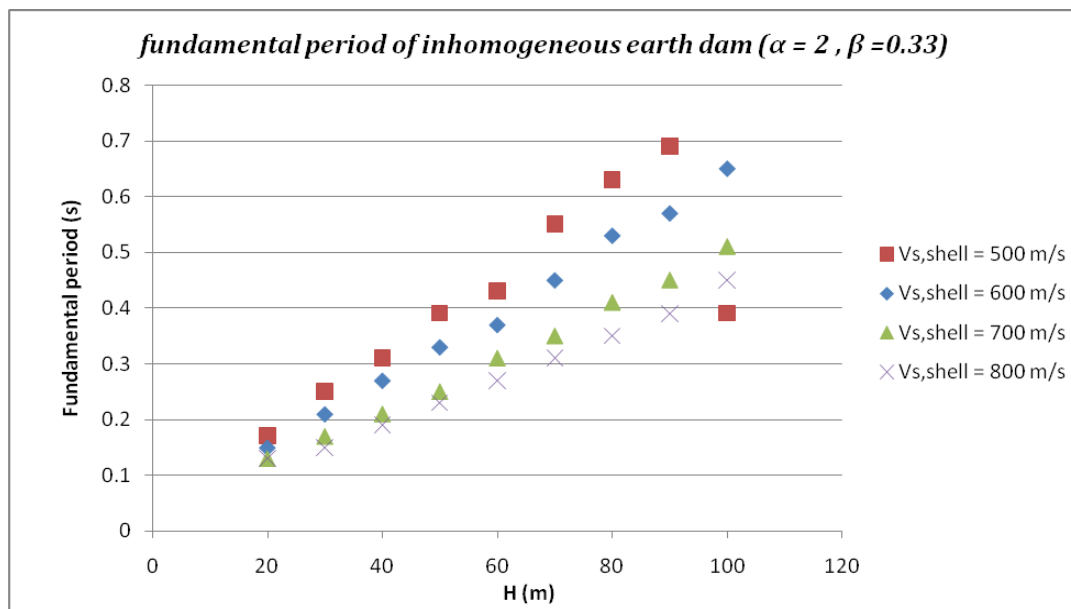
Material Model	Unit Weight	Poisson ratio	Damping ratio	Shear Modulus	Wt,shell (m)	α
Linear elastic	20 kN/m ³	0.3	1e-008	980 Mpa	8	2

Material Model	Unit Weight	Poisson ratio	Damping ratio	Shear Modulus	Wt,core (m)	β
Linear elastic	18 kN/m ³	0.35	1e-008	317.52 Mpa	4	0.33

پس از ساخت مدل و انتخاب بار زلزله که شتاب حداکثری برابر 0.1g را داراست، آنالیز دینامیکی انجام می شود و نتایج حاصل از آن همان پاسخ دینامیکی سازه است که یکی از پارامترهای اصلی اش همان فرکانس ارتعاشی سد می باشد. این برنامه فرکانس ارتعاش آزاد را به صورت مستقیم نمی دهد لیکن می توان این پارامتر را از نمودار طیف سرعت افقی نسبت به زمان محاسبه کرد. به عبارتی می توان گفت زمان تناوب متناظر با نقطه ماکزیمم این گراف همان زمان تناوب اصلی سازه است. در شکل شماره ۴ یک نمونه از گراف طیف سرعت نسبت به زمان نمایش داده شده است. برای بررسی بیشتر و امکان مقایسه نتایج نرم افزار با کار تحلیلی، تمام ویژگی های مصالح مدل فوق را ثابت نگه داشته و فقط میزان مدول برشی پوسته و هسته سد را تغییر دادیم. نتایج به صورت یک گراف در شکل شماره ۵ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که مدول های برشی استفاده شده در آنالیز دینامیکی متناظر با سرعت های موج برشی استفاده شده در حل تحلیلی است.



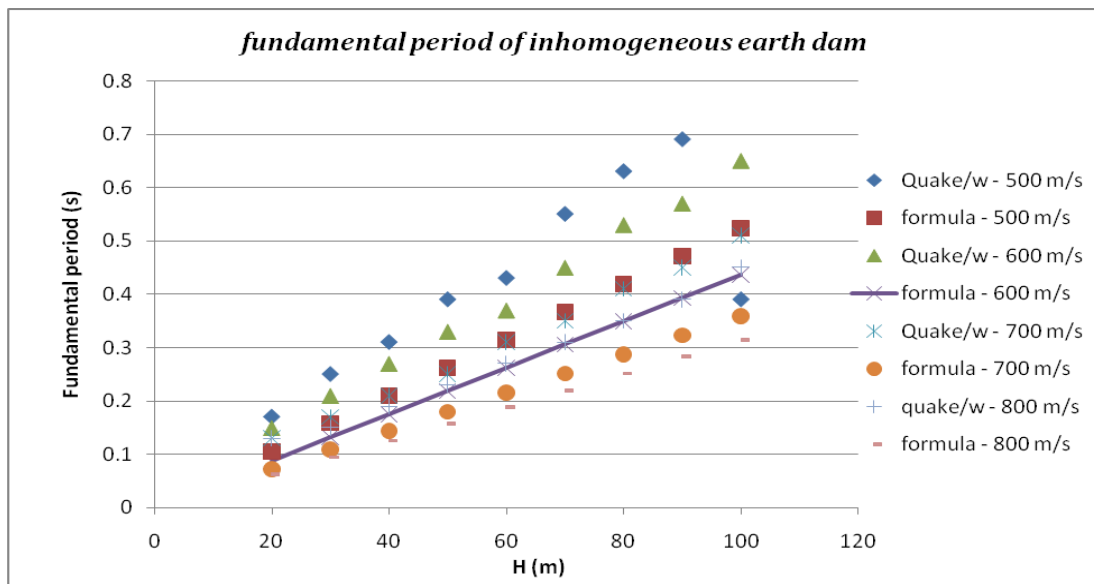
شکل ۴ - گراف طیف سرعت افقی نسبت به زمان



شکل ۵ - زمان تناوب اصلی سد خاکی با هسته رسی (نرم افزار)

۴. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نتایج نرم افزار

همواره لازم است تا هر رابطه پیشنهادی جدید با روابط قبلی و روش های عددی و نرم افزاری کنترل و مقایسه گردد تا صحت نتایج به دست آمده مورد ارزیابی قرار گیرد. از این رو در این قسمت برآنیم تا نتایج به دست آمده از فرمولاسیون پیشنهادی را با نتایج نرم افزاری ذکر شده در قسمت قبل مقایسه نماییم. به منظور مقایسه، زمان تناوب های اصلی بدست آمده با این تابع شکل به همراه زمان تناوب های اصلی حاصل از تحلیل دینامیکی نرم افزار در یک گراف گردآوری شده و در شکل شماره ۶ نمایش داده می شود. این گراف برای سرعت های موج برشی پوسته سد ۵۰۰ تا ۸۰۰ متر بر ثانیه رسم شده است. مشاهده می شود که با افزایش ارتفاع سد پریود اساسی سد نیز افزایش پیدا کرده و در نتیجه آن میزان فرکانس اصلی سد کاهش می یابد. آنچه از این گراف بر می آید این است که نتایج فرمولاسیون پیشنهادی با استفاده از تابع شکل مثلثاتی همخوانی نسبتاً خوبی با نتایج نرم افزاری دارد.



شکل ۶ - زمان تناوب اصلی سد خاکی با هسته رسی (نرم افزار و تحلیلی)

لازم به ذکر است که پارامترهای مربوط به هندسه و مصالح پوسته و هسته سد در این مقایسه، همان مواردی است که در جداول شماره (۱) و (۲) به آنها اشاره گردید.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله سعی شده است با استفاده از روش تحلیلی جرم پیوسته فرمولاسیون جدیدی برای محاسبه فرکانس ارتعاش آزاد سد خاکی ناهمگن ارائه شود. این روش مبتنی بر فرضیاتی بود که می توان از جمله آنها به تابع شکل مثلثاتی، صلبیت پی، شرایط الاستیک خطی و مواردی از این قبیل اشاره کرد. بدیهی است که میزان فرکانس ارتعاش آزاد برای سد روی پی انعطاف پذیر با این مقادیر به دست آمده متفاوت است. هندسه سد، سرعت موج برشی و ضریب پواسون بدنه سد از پارامترهای تاثیر گذار در روند محاسبه بوده اند.

$$\omega = \sqrt{\frac{2(1+\mu_{ave})(-0.101464\alpha^3 + (1.6292)\alpha^2 Wt/H + (1.06541) Wt^2\alpha/H^2 + (0.2537) Wt^3/H^3)}{(0.23 Wt H + 0.08 \alpha H^2)} (Vs)_{ave}}$$

با استفاده از نتایج این تحقیق می توان اذعان داشت که مقادیر فرکانس حاصل از فرمول تابع شکل مثلثاتی به طور متوسط حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد از مقادیر نرم افزار بیشتر می باشد. همچنین زمان تناوب اصلی سدهای خاکی ناهمگن بر روی بستر صلب با ارتفاع ۲۰ تا ۱۰۰ متر در محدوده ۰/۷ تا ۰/۶ ثانیه متغیر است. همان گونه که از نتایج برمی آید، فرکانس ارتعاش آزاد سد خاکی با هسته رسی حاصل از فرمولاسیون پیشنهادی با ارتفاع سد نسبت معکوس و با سرعت موج برشی و نسبت پواسون متوسط رابطه مستقیم دارد.

۶. مراجع

1. Kishi, N., Nomachi, S.G., Matsuoka, K. G., Kida, T. [1987]. "Earthquake engineering", Japan society of civil engineering, proceeding of JSCE, No. 386/I- 8, Vol. 4, No. 2, pp 259 – 26
2. Idriss, M., et al [1974], "Earth dam-foundation interaction during earthquake", Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.2, pp. 313-323

3. Watanabe, H. [1996]. "Vibration modes of a rockfill dam based On the observation of micro tremors and an earthquake", V1, No1-4.
4. Zhen, Z., [1996], "Shear vibration of 3-D inhomogeneous earth Dam in triangular canyons", Eleventh world conference of Earthquake engineering. paper No. 584.
5. Núñez E. 2007. Behavior of coarse alluvium slopes subjected to earthquakes. Proc. XIII PCSMGE, Margarita (Venezuela), 862-867
6. Parish, Y., M. Sadek and Shahrour I. [1984]. "Seismic Response of End-bearing Single Piles", Soil Dyn. And Earthquake Engrg. No. 3, pp. 82-93.
7. Mahdizadeh, M. and Ghanbari, A. (2012), "Calculation of natural frequency of earth dams by means of analytical solution". Seventh international conference on case histories in geotechnical engineering, Chicago, April 29-May 4, 2013
8. Ziaie moayed, R. [1996]. "Seismic behavior of zoned core Embankment dam", EJGE.
9. Kuwabara, T., et al [1987], "Study on the vibration characteristics of filldam with a rigid core- Analytical study", Bull. Univ. Osaka pref...ser. B., Vol.39.
10. Chopra, A.K. [1995]. "Dynamic of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.