

مدلسازی هیدروالاستیک و تحلیل دینامیکی دریاچه های کشوئی سد

محمد صادق صادقی پور

استاد دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

حمید مهدیقلی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

علیرضا میرزا آقا

کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت ۷۷/۸/۱۹، تاریخ تصویب ۷۸/۸/۲۲)

چکیده

دریاچه های عمقی سدهای بزرگ که جهت تنظیم دبی بکار می روند دارای شرایط عملکردی سختی بوده و می توانند در معرض انواع ارتعاشات ناشی از جریان باشند. چنانچه شرایط کاری نامناسب و یا ارتعاشات کنترل نشده دریاچه باعث شکست آن شود، خسارات مالی و جانی هنگفتی ببار خواهد آمد.

بمنظور بررسی پدیده ارتعاشات ناشی از جریان در دریاچه های با ابعاد کوچک، از مدل های یک درجه آزادی استفاده می شود، در حالیکه در دریاچه هایی که ابعاد بزرگی دارند، معمولاً مدل های یک درجه آزادی مناسب نبوده و انجام آزمایشات مدل هیدروالاستیک و آنالیز مودال توصیه می شود. در پژوهش حاضر، دریاچه کشوئی تونل تخلیه تحتانی یکی از سدهای در دست احداث در کشور مدل سازی هیدروالاستیک شده و برای آن آنالیز مودال انجام گرفته است.

واژه های کلیدی: مدلسازی، آنالیز مودال، هیدروالاستیک، تحلیل دینامیکی، دریاچه های سد

مقدمه

دریاچه های کنترل جریان در سدها معمولاً تحت تاثیر شرایط دینامیکی و ارتعاشاتی نامساعدی قرار دارند که چنانچه اثرات عوامل فوق بخوبی شناسایی و کنترل نشده باشند، می توانند باعث خسارات عمده ای گردند. لذا، بهینه سازی دریاچه ها، به منظور اطمینان از عدم وقوع ارتعاشات مخرب برای آنها، یکی از اقدامات مهم در مراحل طراحی می باشد.

بررسی های گسترده ای، با استفاده از مدل های یک درجه آزادی، درباره ارتعاشات دریاچه های کشوئی و شعاعی انجام گرفته است که از میان آنها میتوان به کارهای انجام شده توسط Brown [۱]، Campbell [۲]، Simmons [۳]، Hardwick [۴]، Belevins [۵]، Nguyen و Naudascher [۶] و Jongeling

[۷] اشاره نمود. Naudascher [۸] در کتاب خود به بررسی و دسته بندی کلیه عوامل موثر در ایجاد ارتعاشات در انواع سازه های هیدرولیکی پرداخته است.

از کارهای انجام شده برای اولین بار در ایران میتوان به مدل سازی یک درجه آزادی دریاچه کشوئی تونل تخلیه تحتانی سد مارون اشاره نمود [۹]. در این آزمایش که بمنظور کسب دانش فنی آزمایش مدل ارتعاشاتی دریاچه ها در داخل ایران انجام گرفت، نتایج بسیار خوبی بدست آمده است.

یکی از کارهای جالب در زمینه ارتعاشات دریاچه ها، توسط کارشناسان دانشگاه تیان جان چین بر روی دریاچه سد تشرین در سوریه انجام شده است [۱۰]. در این پژوهش، آنالیز مودال دریاچه های کشوئی واقعی

محرک دریچه از نوع هیدرولیکی است که در آن، سیلندر به بالای سقف محفظه دریچه ثابت شده و پیستون به دریچه متصل می شود و دریچه را جابجا می نماید. دریچه در هیچ نقطه ای گیردار نشده است و تنها اتصال آن به سقف محفظه و از طریق جک هیدرولیکی می باشد که بصورت یک تکیه گاه فتری عمل می نماید. نقشه ای از دریچه در شکل (۱) نشان داده شده است.

مدل سازی ارتعاشی دریچه

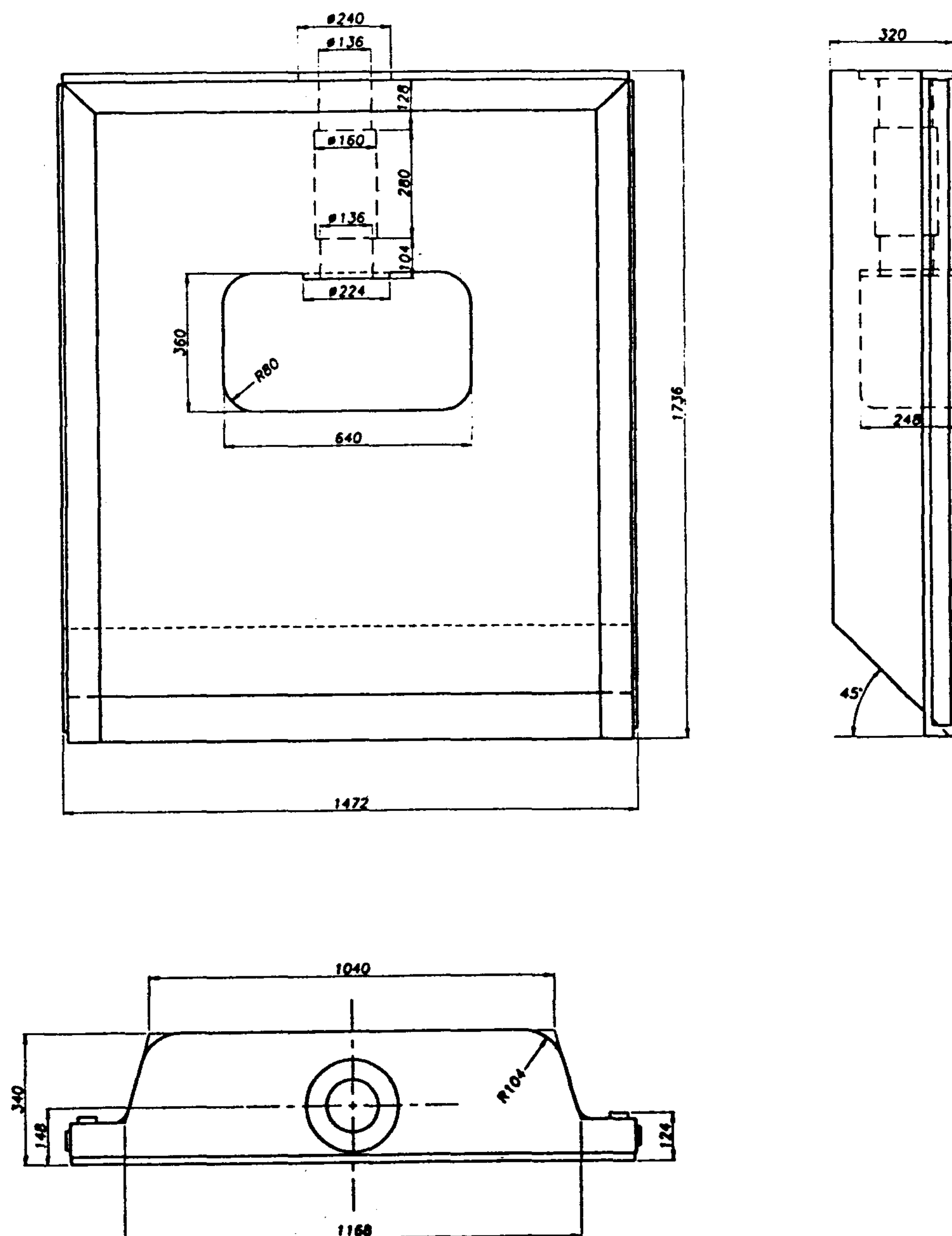
بطور کلی ارتعاشات، ناشی از جریان دریچه ها را می توان به سه دسته کلی، ارتعاش ناشی از تحریک خارجی^۱، ارتعاش ناشی از ناپایداری^۲ و ارتعاش ناشی از

انجام گرفته و سپس نتایج توسط مدل سازی کامپیوتری کنترل شده است.

در پژوهش حاضر با استفاده از دو مدل یک و دو بعدی، ارتعاش دریچه کشویی تونل تخلیه تحتانی یکی از سدهای در دست احداث در کشور مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از نتایج بدست آمده سعی شده است که ضمن بررسی وضعیت دریچه از نقطه نظر احتمال وقوع ارتعاشات مخرب برای آن، یک روش کلی نیز جهت انجام چنین آزمایشاتی در داخل کشور تدوین گردد.

مشخصات دریچه

دریچه مورد بررسی از نوع کشویی بوده و از چدن و بطور یکپارچه توسط ریخته گری ساخته می شود.



شکل ۱: نقشه دریچه همراه با ابعاد اصلی آن.
(کلیه ابعاد بر حسب میلی متر هستند)

رفتار ارتعاشی دریاچه از آنالیز مودال استفاده شود. در اینجا نیاز به ساخت یک مدل هیدروالاستیک کامل می باشد، اما باتوجه به پیچیدگی های دریاچه های کشویی و برخی محدودیتهای ساخت مواد و قطعات که باید در هنگام آنالیز مودال بطور دقیق رعایت شوند، و همچنین دشوار بودن اعمال شرایط مرزی کاملاً مشابه، در آنالیز مودال مدل‌های مقیاسی به ندرت ساخته شده و معمولاً این آنالیز بر روی دریاچه اصلی و در شرایط واقعی انجام می پذیرد. بدیهی است که استفاده از نتایج حاصل از چنین آزمایشی در مراحل طراحی امکان پذیر نیست. لذا، برای اینگونه دریاچه ها، در مراحل طراحی، با استفاده از مدلسازی عددی، آنالیز مودال انجام گرفته و در صورت نیاز، پس از ساخته شدن دریاچه، با اندازه گیری های مناسب، این آنالیز را برای دریاچه واقعی نیز انجام داده و نتایج را باهم مقایسه می کنند. امروزه، باتوجه به امکانات نرم افزاری جدید امکان مدلسازی دریاچه و جک هیدرولیکی متصل به آن با استفاده از روش المانهای محدود موجود می باشد و این روش به عنوان ابزاری مهم در مدلسازی واقعی دریاچه بکار می رود.

معیارهای تشابه هیدروالاستیک

برای آنکه بتوان اثر توأم جریان و سازه دریاچه را برهم مدل نموده و رفتار ارتعاشی دریاچه و پایداری آن را پیش بینی نمود، لازم است که یک مدل هیدروالاستیک هر دو تشابه سیستم هیدرودینامیکی و دینامیکی سازه را، بطور همزمان تأمین نماید. منظور از تشابه سیستم هیدرودینامیکی، تشابه نیروهای دینامیکی هستند که از طرف سیال بر دریاچه وارد شده و باعث ارتعاش آن می گردند. جهت برقراری تشابه هیدرودینامیکی لازم است که علاوه بر وجود تشابه هندسی، اعداد رینولدز و اویلر نیز در مدل و نمونه واقعی باهم مساوی باشند. عملاً برقراری تساوی اعداد رینولدز امکان پذیر نیست. لیکن، برای اعداد رینولدز بزرگتر از $10^5 \times 1/80$ ، می توان از اثرات لزجت صرف نظر نموده و جهت انتخاب سرعت در مدل، بجای تساوی اعداد رینولدز از تساوی اعداد فرود استفاده نمود [۸].

اگر مقیاس مدل λ_L باشد، ضرایب تشابه برای دامنه و فرکانس نیروی هیدرودینامیکی وارد بر دریاچه،

حرکت جسم نوسانگر^۱ تقسیم کرد. هر یک از این سه نوع ارتعاش، خود دارای منابع تحریک متنوعی هستند که عامل ایجاد آنها می باشند. جهت اطلاع از این عوامل و بحث مشروحاتی درباره عوامل ایجاد ارتعاشات ناشی از جریان می توان به [۸] مراجعه نمود.

در حال حاضر، با بررسی های گسترده و تحقیقات وسیعی که بر روی ارتعاشات ناشی از جریان دریاچه ها انجام گرفته است، دستورالعمل ها و توصیه های بسیار خوبی جهت طراحی دریاچه های ایمن از ارتعاشات مخرب، در دسترس می باشد [۱۱]. با این وجود هزینه بسیار بالای طراحی و ساخت سدها از یک طرف و مشکلات و احیانا خسارات مالی و جانی جبران ناپذیری که شکست و یا عدم توفیق دریاچه ها در عملکرد مناسب می تواند ایجاد کند، از طرف دیگر، لازم می سازد که برای برخی از دریاچه ها از طریق آزمایش، بررسی کاملتری در رابطه با احتمال وقوع ارتعاشات صورت گیرد.

مدلهای مقیاسی فیزیکی مورد استفاده در بررسی ارتعاشی دریاچه ها می توانند یک و یا دوبعدی باشند. یعنی اینکه، در یک جهت (قائم) و یا در دو جهت (قائم و افقی) قابلیت جابجایی داشته باشند. در صورتیکه ابعاد دریاچه کوچک باشند، و یا به دلایلی نظیر کم بودن تکرانهای نصب و یا سختی بالای ایجاد شده در لبه دریاچه، بتوان از ارتعاشات عرضی دریاچه و لبه آن صرف نظر نمود، استفاده از مدل یک بعدی پیشنهاد می شود [۹]. در غیر اینصورت، باید از مدل دوبعدی استفاده کرد. اما استفاده از مدل‌های مقیاسی دوبعدی، باتوجه به نیاز به وجود برقراری تشابه هیدروالاستیک بین مدل و نمونه واقعی و نیز نیاز به اندازه گیری جابجایی دریاچه در دو جهت قائم و افقی و ایجاد ارتباط بین آنها، بسیار پیچیده می باشد. از طرف دیگر، مدل‌های دوبعدی نمی توانند ارتعاشات عرضی دریاچه را به درستی مدل کرده و در واقع دریاچه را در جهت عرضی نیز بصورت صلب در نظر می گیرند، در حالیکه ارتعاشات عرضی دریاچه همگون نبوده و نقاط مختلف مقاطع نسبت به هم، می توانند میزان جابجایی متفاوتی را نشان دهند. این موضوع برای دریاچه هایی با ابعاد بزرگ، می تواند غیر قابل اغماض باشد. بنابراین، برای رسیدن به نتیجه ای واقعی تر، پیشنهاد می شود که باتوجه به امکانات جدید برای بررسی

$$\lambda_{\zeta} = 1$$

(۴ - ج)

که در این روابط $\lambda_{rs}, \lambda_E, \lambda_k, \lambda_c, \lambda_m$ و λ_{ζ} ، بترتیب، ضرائب مقیاس مربوط به جرم، میرائی، سختی، مدول الاستیسیته، جرم حجمی و نسبت میرائی درجه می باشند.

تحلیل دینامیکی سازه

در اینجا برخلاف تحلیل استاتیکی سازه ها که در آنها پاسخ یک سازه در برابر یک بار استاتیکی بدست می آید، هدف یافتن پاسخ سازه به یک بار دینامیکی است. بطور کلی معادله حاکم بر رفتار دینامیکی یک سازه، یک معادله دیفرانسیل شبه هارمونیک به فرم کلی زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \left(Q - \eta \frac{\partial \phi}{\partial t} - \rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) = 0$$

(۵)

که در این معادله k_x, k_y, k_z و Q توابعی از ϕ و t هستند. فرم کلی معادله معرف معادله حاکم بر هدایت حرارت در جامدات و معادله انتشار موج در سیالات نیز می باشد. اکنون، برای اینکه بتوانیم معادله بالا را جهت حل با استفاده از روش عددی اجزاء محدود فرموله نمائیم، تابع ϕ را با استفاده از توابع وزن N_i بصورت زیر نشان می دهیم.

$$\phi = \sum_{i=1}^n N_i \phi_i$$

(۶)

فرمولاسیون اجزاء محدود معادله (۵) بفرم کلی زیر در می آید:

$$M\ddot{\phi} + C\dot{\phi} + K\phi + f = 0$$

(۷)

که در این معادله

$$M = \int_V N^T \rho N dV$$

(۸ - الف)

$$C = \int_V N^T \mu N dV$$

(۸ - ب)

بترتیب، برابر خواهند بود با:

$$\lambda_p = \lambda_L$$

(۱ - الف)

$$\lambda_{\omega} = \lambda_L^{-1/2}$$

(۱ - ب)

برای برقراری تشابه سیستم های دینامیکی، باید تشابه هندسی و شرایط مرزی، تشابه شرایط فیزیکی و تشابه شرایط حرکت برقرار باشند.

برای برقراری تشابه هندسی و شرایط مرزی باید

داشته باشیم:

$$\lambda_e = \lambda'_y = 1$$

(۲ - الف)

$$\lambda_u = \lambda_L$$

(۲ - ب)

که در این روابط λ_e, λ'_y و λ_u بترتیب ضرائب مقیاس کرنش خطی، کرنش زاویه ای و جابجائی می باشند.

برای برقراری تشابه شرایط فیزیکی، خصوصیات

مکانیکی و همچنین حالات تنش در مدل و نمونه اصلی باید مشابه باشند. بنابراین:

$$\lambda_y = 1$$

(۳ - الف)

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_{\tau} = \lambda_E = \lambda_G$$

(۳ - ب)

که در این معادلات $\lambda_G, \lambda_E, \lambda_{\tau}, \lambda_{\sigma}, \lambda_y$ ، به ترتیب، ضرائب مقیاس پواسون، تنش قائم، تنش برشی، مدول الاستیسیته و مدول برشی می باشند.

برای ارضاء تشابه شرایط حرکت، با بهره گیری از

معادله دیفرانسیل حرکت، بدست می آید.

$$\lambda_m = \lambda_L^3$$

(۴ - الف)

$$\lambda_c = \lambda_L^{2.5}$$

(۴ - ب)

$$\lambda_k = \lambda_L^2$$

(۴ - پ)

$$\lambda_E = \lambda_L$$

(۴ - ت)

$$\lambda_{rs} = 1$$

(۴ - ث)

بصورت کاملاً سه بعدی تحلیل شود، جهت مدل نمودن آن از المانهای آجری^۱ استفاده شده است. برای مدل سازی حدود ۸۰٪ حجم دريچه از المانهای آجری مکعبی به ابعاد $110 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ استفاده شده است. برای سایر قسمت های دريچه از جمله لبه، کشویی ها و قوسهای اطراف، از المانها آجری با سطوح قاعده مثلثی استفاده شده است. نسبت حجم بزرگترین المان ایجاد شده به حجم کوچکترین المان برابر دو می باشد. در تمام مجموعه تنها دو المان دارای وجوه نامنظم هستند. اشکال (۲) و (۳) مدل مجموعه دريچه و بازوی جک هیدرولیکی را از دو دید مختلف نشان می دهند.

در مدل سازی ساده سازهایی انجام گرفته است، نظیر فرض آنکه تیغه های آب بندی جزئی از کشویی است و یا تقریب قوس ها با خط مستقیم. این تقریب ها، در مجموع منجر به افزایش حجمی حدود ۱٪ برای مدل نسبت به نمونه واقعی گردیده است.

برای تعریف مشخصات المانها از مشخصات مکانیکی چدن استفاده شده است که عبارتند از :

$$\rho_0 = 7800 \text{ kg/m}^3, \nu = 0.3, E = 21 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

در اینجا لازم است که جرم حجمی دريچه براساس جرم افزوده بصورت زیر اصلاح شود:

$$\rho = \rho_0 = \frac{m + m_0}{m_0} \quad (10)$$

که m_0 جرم دريچه بوده و برابر است با 8600 kg و m جرم افزوده دريچه است.

جرم افزوده دريچه

جرم افزوده دريچه برابر است با :

$$m = m_w + m_x \quad (11)$$

که m_x جرم آب داخل دريچه بوده و برای دريچه های مشبک مقدار آن در حدود 0.75 جرم آب هم حجم دريچه می باشد. برای دريچه های توپر، نظیر دريچه مورد بررسی، m_x برابر صفر است. همچنین :

$$m_w = C_m(\rho D^2 L) \quad (12)$$

$$f = \int_V N^T Q dV$$

(۸ - پ)

اگر دامنه تغییر مکان نقاط مختلف سازه الاستیک با زمان تغییر نماید، دو نوع نیروی دیگر به سیستم وارد میشود. یکی از این نیروها اینرسی است و براساس قاعده دالامبر می توان آن را با معادل استاتیکی $\rho \ddot{u}$ جایگزین نمود، که در اینجا u دامنه جابجائی و ρ چگالی جسم است. این نیرو که معمولاً بصورت نیرو در واحد حجم ارائه می شود، همواره هم راستا و در فاز مخالف با بردار تغییر مکان است. محل اثر این نیرو در ماتریس جرم M بوده و اعمال آن در محاسبات از طریق سعی و خطا انجام می شود. نیروی دوم در اثر وجود مقاومت سیال و یا میرائی سازه ای ایجاد شده، و از حرکت جلوگیری می نماید. معادل استاتیکی این نیرو بصورت $c \dot{u}$ داده می شود که در آن c ضریب میرایی ویسکوز معادل است. این نیرو همواره بر امتداد تغییر مکان عمود است.

در عمل محاسبه ماتریس C دشوار است، چون ، اطلاعات ما درباره ماتریس لزجت μ کم است. لذا، فرض می شود که ماتریس میرایی بصورت یک ترکیب خطی از ماتریس های سختی و جرم تعریف شود:

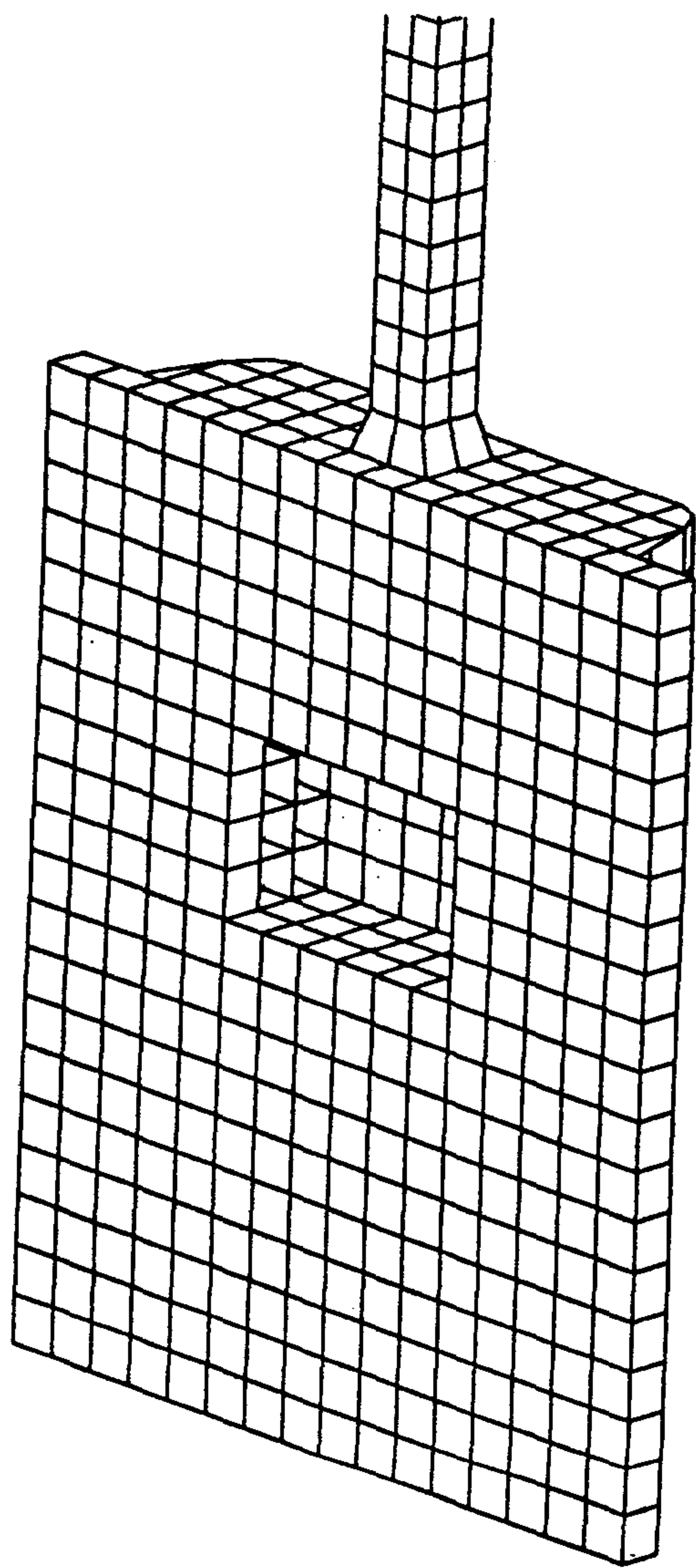
$$C = \alpha M + \beta K \quad (9)$$

که در این رابطه α و β بصورت تجربی محاسبه می شوند [۱۲].

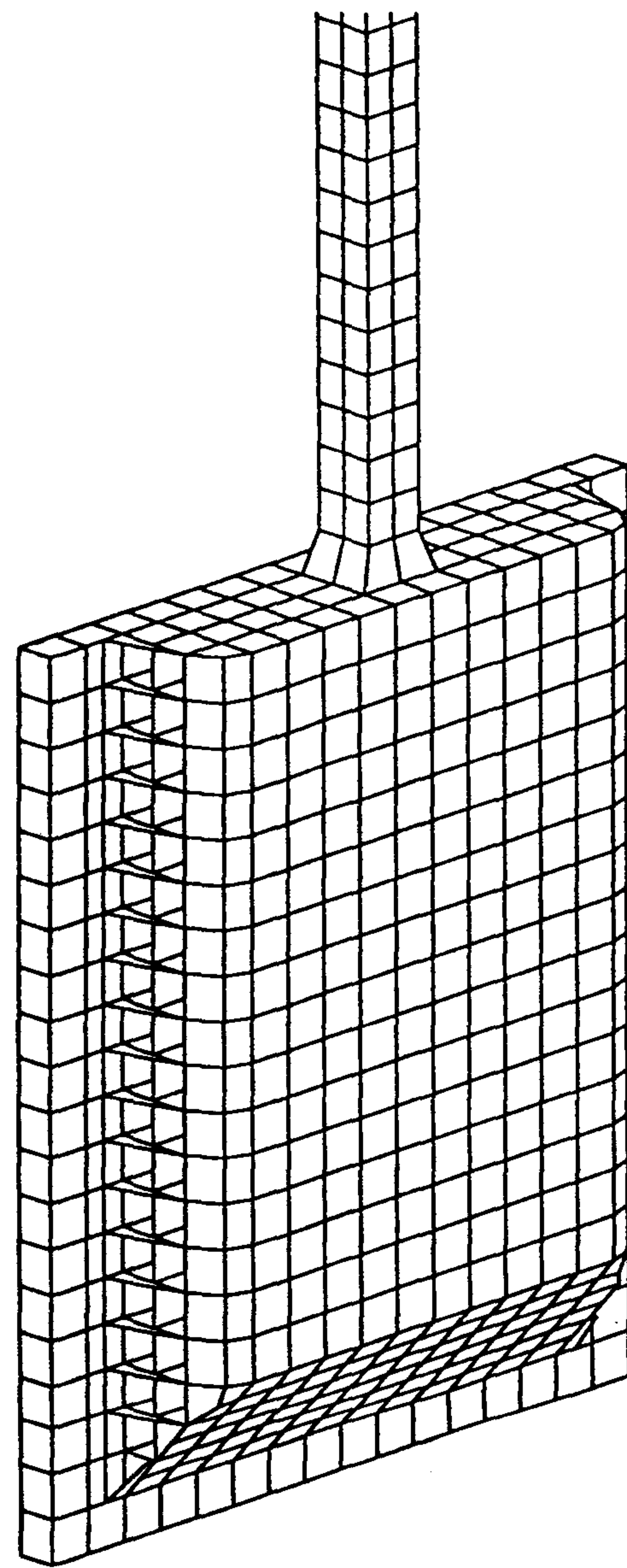
پس از تعیین ماتریس های جرم و سختی برای یک سازه، معادله مشخصه سیستم بصورت ماتریسی بدست آمده و حل می شود. از آنجا، فرکانس های طبیعی و شکل مودها بدست می آیند. برای مدل سازی سازه نیاز به یک نرم افزار اجزاء محدود می باشد که در این پژوهش از نرم افزار SAP90 استفاده شده است. این نرم افزار، دارای بسته های اطلاعاتی در داخل خود است که بر حسب نوع سازه مورد بررسی، مقادیر مناسب α و β را از آنجا انتخاب می نماید.

مدل سازی کامپیوتری دريچه

همانگونه که گفته شد دريچه توپر بوده و از چدن ریخته گری ساخته شده است. باتوجه به اینکه دريچه باید



شکل ۳: دریچه مدل شده از دید پشت.



شکل ۲: دریچه مدل شده از دید روبرو.

جدول ۱: ضریب جرم افزوده و جرم افزوده دریچه در بازشدگی های مختلف.

درصد بازشدگی دریچه	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
C_m	۴/۸۸	۴/۵۷	۴/۲۷	۴/۰۰	۳/۷۶	۳/۶۰	۳/۴۲	۳/۳۰	۳/۲۰	۳/۲۰	۳/۳۰
m_w	۱۲۸۷	۱۲۰۵	۱۱۲۶	۱۱۰۵	۹۹۲	۹۴۹	۹۰۲	۸۷۰	۸۴۶	۸۴۶	۸۷۰

مربوط به جک هیدرولیکی.

المانهای مربوط به کشویی ها، تنها می توانند در جهت قائم جابجا شوند، لذا درجات آزادی گرههای مربوط به این المانها به گونه ای در نظر گرفته می شوند که این شرط را تامین نمایند.

محل اتصال پیستون به جک یک تکیه گاه فنری است، چون روغن موجود در جک بصورت فنر عمل می نماید. بنابراین، در این قسمت با استفاده از بلوک Spring در نرم افزار مربوطه از تکیه گاه فنری استفاده شده است.

در این رابطه C_m ضریب جرم افزوده بوده، که برای دریچه های مختلف و برحسب درصد بازشدگی ارائه شده است [۱۳]. در این رابطه D عمق دریچه و L پهنای آن می باشد. مقادیر C_m و m_w ، برحسب میزان بازشدگی دریچه، در جدول (۱) داده شده اند.

شرایط مرزی

برای این مسئله دو نوع شرط مرزی باید در نظر گرفت، شرط مرزی مربوط به کشویی ها و شرط مرزی

ارتعاش طولی و عرضی است، لذا، نمی توان برای مدل سازی آن از المان Frame استفاده نمود و باید آن را با المان Solid مدل کرد. دسته پیستون دارای مقطع دایره است، پس اولاً مدل کردن آن مشکل است و ثانیاً اتصال آن به دریچه که با المانهای مکعبی مدل شده است، مشکل می باشد. برای حل این مشکل، دسته پیستون با یک منشور معادل به ابعاد $a=b=1/774 R$ تقریب شده است. در این جایگزینی مساحت مقاطع فشاری و خمشی تقریباً حفظ شده اند. به این ترتیب نسبت ممان اینرسی خمشی سطح مقطع برای مربع معادل، نسبت به دایره، چهار درصد افزایش خواهد داشت که قابل اغماض است. لذا، برای مدل سازی این قسمت از المانهای مکعبی با اضلاع $a=1/774 R$ استفاده شده است.

مدل تجربی و تعیین فرکانس های تحریک

با استفاده از مدل سازی عددی و آنالیز مودال فرکانس های طبیعی دریچه و مودهای ارتعاشی تعیین می شوند. جهت تعیین رفتار ارتعاشی دریچه لازم است که فرکانس های تحریک دریچه بطریق تجربی، تعیین شده و با فرکانس های طبیعی مقایسه شوند.

بمنظور بدست آوردن سختی فنری روغن، ابتدا سختی فنری معادل کل مجموعه جک را با استفاده از مدل جرم و فنر یک درجه آزادی بدست می آوریم، برای این منظور از رابطه

$$k = m\omega_n^2 \quad (13)$$

استفاده می شود. ω_n فرکانس طبیعی مدل یک درجه آزادی دریچه بوده و مقدار آن برابر 26Hz بدست می آید [14].

باتوجه به اینکه جک هیدرولیکی از دو فنر معادل اصلی، روغن و پیستون، تشکیل شده است که بصورت سری قرار گرفته اند، پس:

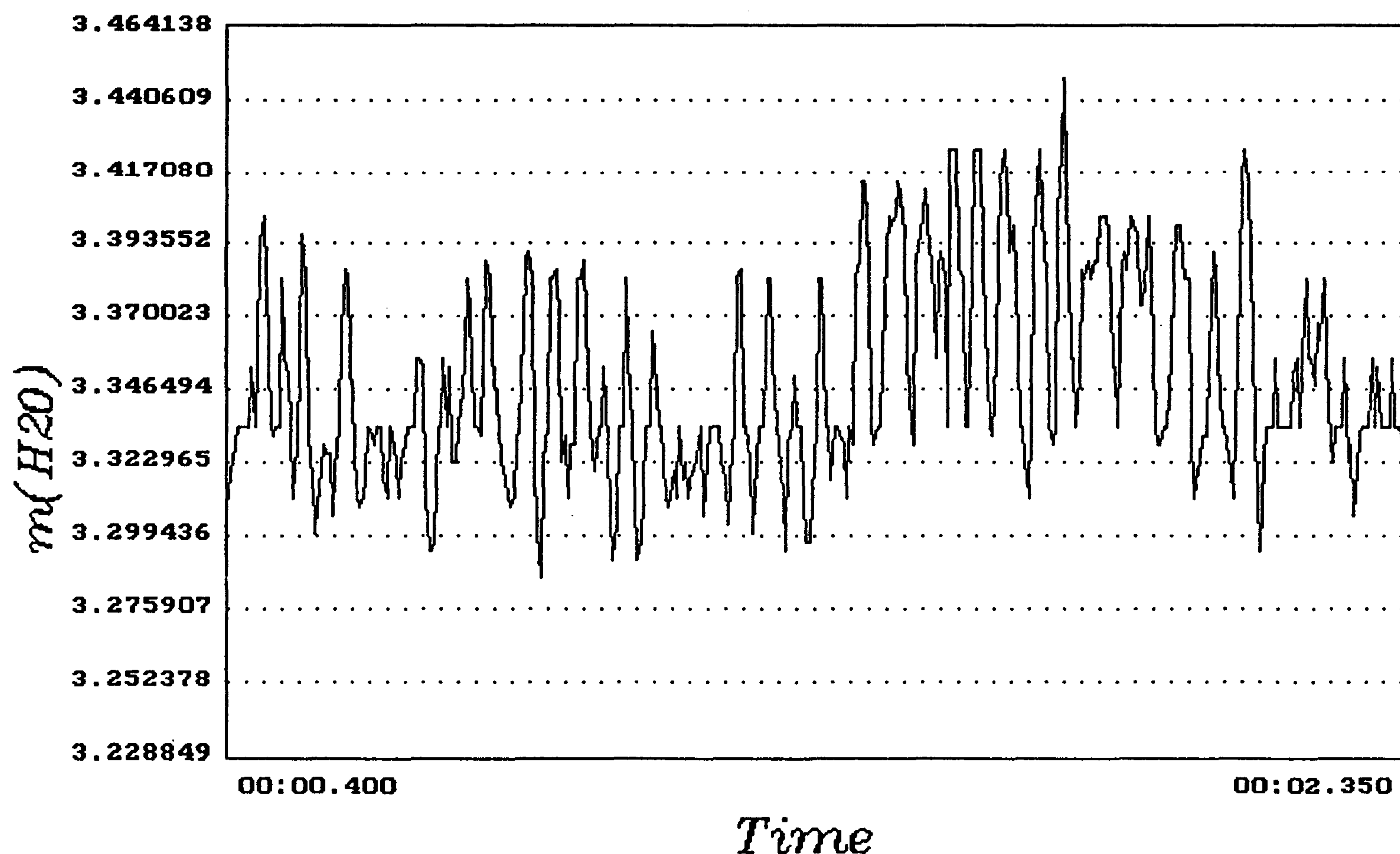
$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (14)$$

سختی فنری دسته پیستون از رابطه،

$$k_1 = \frac{AE}{L} \quad (15)$$

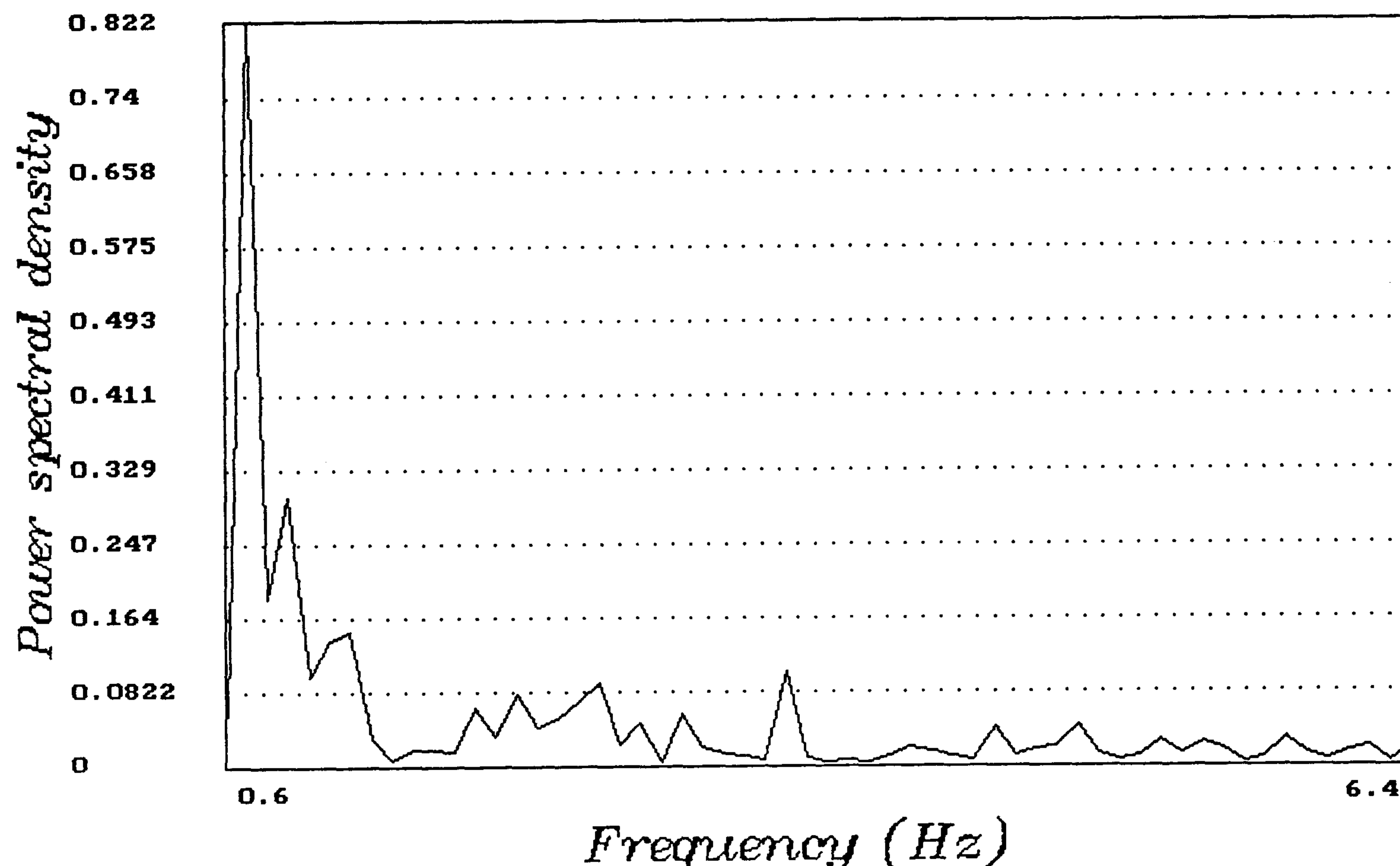
محاسبه می شود. لذا، k_2 ، سختی فنری معادل روغن بدست می آید. باتوجه به اینکه دسته پیستون دارای دو

Piz10



شکل ۴: نمونه ای از نوسانات فشار.

Piz5



شکل ۵: نمونه ای از منحنی طیف فرکانسی توان.

تحلیل نتایج

الف - نتایج آنالیز مودال

فرکانس های طبیعی ده مود اول دریاچه برای ده بازشدگی مختلف در جدول (۲) آمده است. از بررسی جدول (۲) و نتایج گرافیکی بدست آمده می توان نتیجه گیری های زیر را نمود.

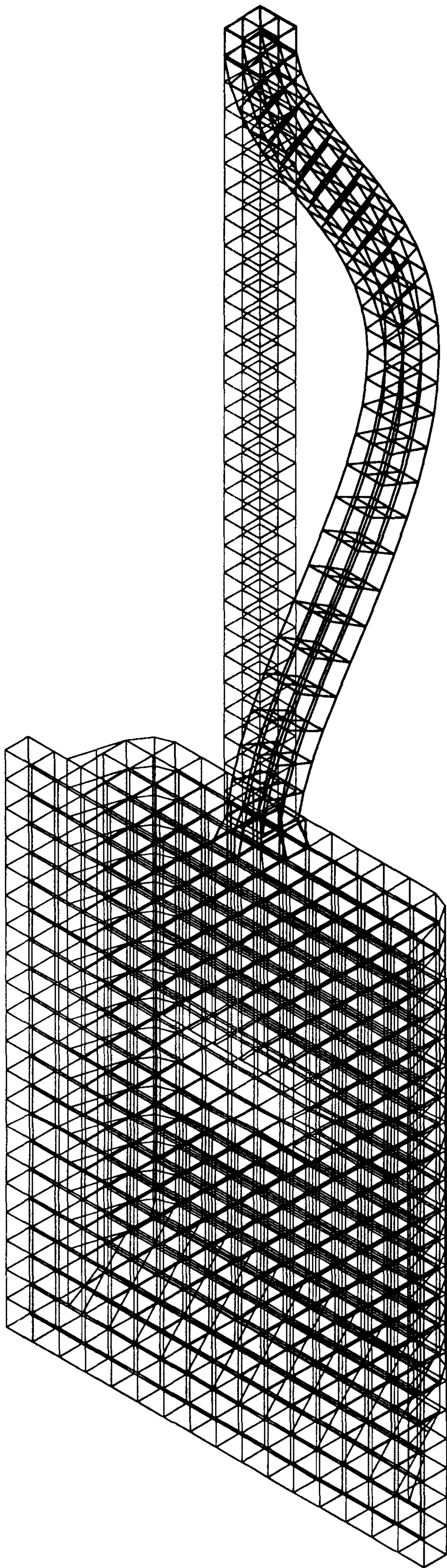
۱ - فرکانس های طبیعی برای یک مود ارتعاشی مشخص با تغییر میزان بازشدگی دریاچه تغییر قابل توجهی نمی نماید. در مود اول، حداکثر فرکانس در بازشدگی ۱۰٪ اتفاق افتاده و تا بازشدگی ۶۰٪ تدریجاً کاهش و سپس اندکی افزایش می یابد.

۲ - در برخی از مودها، ارتعاش پیکره اصلی دریاچه غالب است (شکل ۶). لیکن در سایر مودها (شکل ۷)، پیکره اصلی دریاچه ارتعاش چندانی نداشته و ارتعاش بازوی جک متصل به آن غالب است. این پدیده معمولاً بصورت دو شکل مود متوالی جک ظاهر می شود.

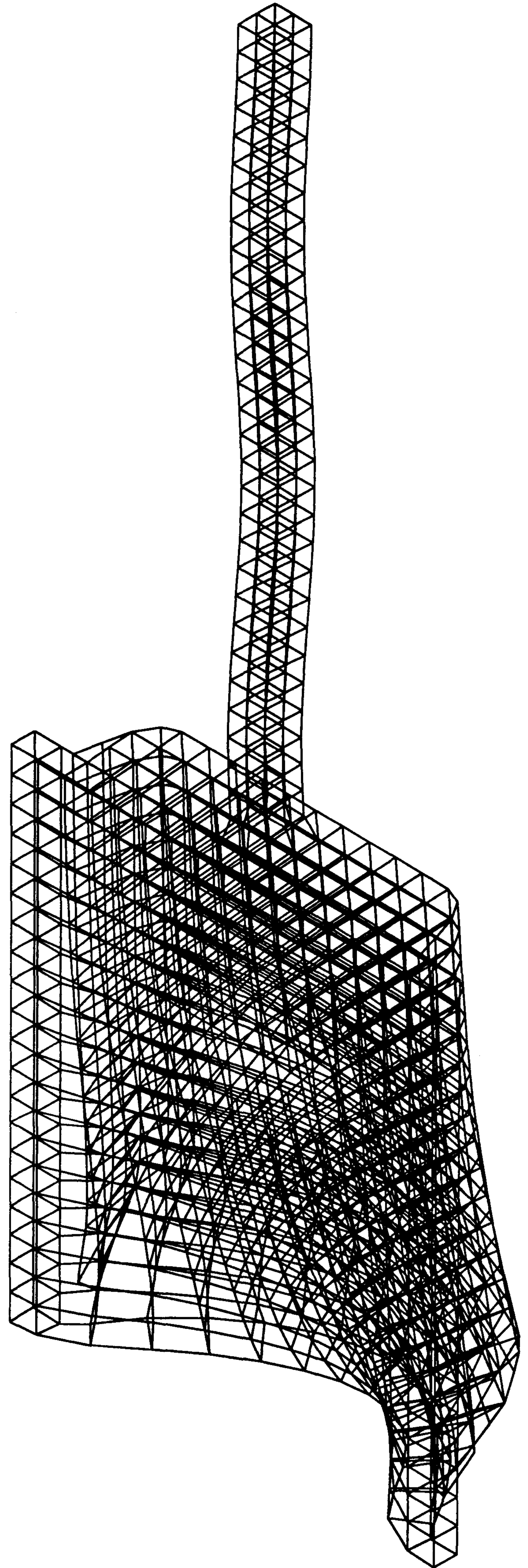
۳ - بررسی ده شکل مود اول دریاچه نشان می دهد که برخلاف آنچه که مدل ساده یک بعدی نشان میدهد، فرکانس های طبیعی دریاچه از مقادیر خیلی کم (حدود ۰/۷۵ Hz) شروع می شوند. در حالیکه، فرکانس نوسانی

جهت اندازه گیری فرکانس های تحریک دریاچه، ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی، با استفاده از تشابه فرودیک مدل با مقیاس $\frac{1}{12.5}$ از دریاچه ساخته شده است. مدل ساخته شده از پلکسی گلاس است. از طریق تعبیه سوراخهای مناسب در نقاط مختلف دریاچه و اتصال آنها به فشار سنج های الکترونیکی نوسانات فشار اندازه گیری و ضبط می شوند. این فشار سنج ها فشارهای حداکثر تا ده متر آب را با دقت یک درصد فشار ماکزیمم اندازه گیری می نمایند.

پس از ضبط نوسانات فشار بصورت فایل های عددی، با استفاده از تبدیل سریع فوریه (FFT)، منحنی های طیف فرکانسی توان (SPD) بدست می آیند که به کمک آنها، فرکانس های تحریک تعیین می شوند. عملیات فوق برای بازشدگی های مختلف دریاچه انجام می گیرد. شکل (۴) نمونه ای از نوسانات فشار ضبط شده را برای بازشدگی ده درصد دریاچه و شکل (۵) نتایج پردازش شده را برای طیف فرکانسی توان نشان می دهد.



شکل ۷: ارتعاش در بجه در مود دوم ارتعاشی.



شکل ۶: ارتعاش در بجه در مود چهارم ارتعاشی.

جدول ۲: فرکانسهای طبیعی ده شکل مود اول دریاچه در بازشدگی های مختلف بر حسب Hz.

بازشدگی % شکل مود	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
۱	۰/۷۹	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۴	۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۷۸
۲	۲/۷۹	۲/۸۰	۲/۸۲	۲/۸۲	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۴	۲/۸۵	۲/۸۵	۲/۸۳
۳	۷/۵۳	۷/۵۸	۷/۶۲	۷/۶۲	۷/۶۶	۷/۶۶	۷/۶۷	۷/۷۱	۷/۷۱	۷/۶۷
۴	۱۲/۶۹	۱۲/۷۷	۱۲/۸۴	۱۲/۸۴	۱۲/۹۰	۱۲/۹۱	۱۲/۹۱	۱۳	۱۲/۹۹	۱۲/۹۱
۵	۱۳/۶۵	۱۳/۶۶	۱۳/۷۰	۱۳/۶۸	۱۳/۷۵	۱۳/۷۵	۱۳/۷۵	۱۳/۸۷	۱۳/۸۷	۱۳/۸۴
۶	۱۴/۳۸	۱۴/۴۶	۱۴/۵۴	۱۴/۵۴	۱۴/۶۲	۱۴/۶۳	۱۴/۶۳	۱۴/۷۱	۱۴/۷۱	۱۴/۶۸
۷	۱۸/۱۴	۱۸/۲۴	۱۸/۳۵	۱۸/۳۴	۱۸/۴۵	۱۸/۴۵	۱۸/۴۵	۱۸/۵۶	۱۸/۵۶	۱۸/۵۲
۸	۲۰/۲۹	۲۰/۴۱	۲۰/۵۲	۲۰/۵۲	۲۰/۶۴	۲۰/۶۴	۲۰/۶۴	۲۰/۷۷	۲۰/۷۷	۲۰/۷۱
۹	۲۳/۰۴	۲۳/۱۷	۲۳/۳۰	۲۳/۳۰	۲۳/۴۳	۲۳/۴۳	۲۳/۴۳	۲۳/۵۷	۲۳/۵۷	۲۳/۵۲
۱۰	۲۶/۱۷	۲۶/۳۲	۲۶/۴۷	۲۶/۴۷	۲۶/۶۲	۲۶/۶۲	۲۶/۶۲	۲۶/۷۸	۲۶/۷۸	۲۶/۷۲

جدول ۳: مقایسه فرکانسهای طبیعی دریاچه در آب و هوا برای بازشدگی 0٪.

شکل مود	فرکانس در آب	فرکانس در هوا	درصد کاهش فرکانس
۱	۰/۸۴	۰/۹	۶/۷
۲	۲/۸	۳	۶/۷
۳	۷/۵	۸/۰۵	۶/۸۳
۴	۱۲/۷	۱۳/۵۶	۶/۳۴
۵	۱۳/۷۶	۱۴/۷	۶/۴
۶	۱۴/۴	۱۵/۳۶	۶/۲۵
۷	۱۸/۱۴	۱۹/۴	۶/۵
۸	۲۰/۳	۲۱/۷	۶/۴۵
۹	۲۳/۰۴	۲۴/۶۱	۶/۳۸
۱۰	۲۶/۱۷	۲۷/۹۵	۶/۳۷

۵ - مقایسه مدل دریاچه موردنظر (دریاچه ای که از چدن ساخته می شود) با دریاچه ساخته شده از ورق فولادی، نشان می دهد که توزیع جرم یکنواخت در این دریاچه و جرم نسبتاً بالای آن، باعث کاهش شدید فرکانس های طبیعی آن می شود. لذا، احتمال نزدیک شدن فرکانس طبیعی دریاچه به فرکانس تحریک وجود دارد.

۶ - بررسی مودهای ارتعاشی دریاچه نشان می دهد که در صورت وقوع ارتعاش در دریاچه، لبه های نازک بخصوص لبه های ۴۵ درجه در معرض بیشترین خطر قرار دارند. در صورت ساخته شدن دریاچه بصورت یکپارچه، امکان تقویت لبه های آن وجود نداشته و لذا لازم است که این ناحیه از

قائم که از مدل ارتعاشی یک بعدی بدست می آید در حدود ۲۶ Hz است. جدول (۲) نشان می دهد که این فرکانس تقریباً منطبق بر مود دهم دریاچه است. بنابراین دیده می شود که مدل یک بعدی، به دلیل فرض تمرکز جرم و صرفنظر کردن از ارتعاشات عرضی جک و لبه آزاد دریاچه، نمی تواند رفتار ارتعاشی را بخوبی پیش بینی نماید.

۴ - بررسی مدل های ارتعاشی دریاچه در هوا و آب (جدول ۳) نشان می دهد که طبق انتظار، جرم افزوده باعث کاهش فرکانس طبیعی آن می شود. این کاهش ممکن است تا ۷٪ فرکانس طبیعی دریاچه در هوا باشد.

می توانند دریاچه را تحریک نمایند. نمودار نشان می دهد که فرکانس تحریک برای مدل در حدود 0.16 Hz می باشد. باتوجه به اینکه فرکانس مدل و نمونه اصلی با عکس ریشه دوم ضریب مقیاس (λ_r) ارتباط دارند، فرکانس تحریک برای دریاچه واقعی در این بازشدگی در حدود 0.17 Hz خواهد بود. بطور کلی ناحیه بین 0.14 Hz و 0.20 Hz ناحیه خطرناک از نظر احتمال ارتعاش به حساب می آید.

باتوجه به نتایج، ملاحظه می شود که کمترین فرکانس طبیعی دریاچه در حدود 0.175 Hz و بیشترین فرکانس تحریک در حدود 0.2 Hz است. براساس مرجع [۱۱]، جهت اطمینان از عدم وقوع ارتعاش، لازم است که فرکانس طبیعی دریاچه حداقل سه برابر فرکانس تحریک باشد. در اینجا این نسبت $3/75 = 0.2 \div 0.175$ بوده و لذا می توان از عدم وقوع ارتعاش اطمینان نمود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از همکاری مرکز تحقیقات آب، وابسته به وزارت نیرو، بخاطر ساخت مدل و تامین امکانات آزمایشگاهی و کامپیوتری سپاسگزاری می شود.

دریاچه از نظر احتمال ایجاد تنش های بالا در هنگام ارتعاش، مورد توجه جدی قرار گیرد.

۷- بررسی برخی از مودهای ارتعاشی دریاچه نشان می دهد که چنانچه بدنه دریاچه و بازوی جک متصل به آن دچار ارتعاش قائم گردند (نظیر شکل مود اول)، محل اتصال جک به دریاچه در معرض تنش های برشی شدید قرار خواهد گرفت.

ب- نتایج حاصل از آزمایش مدل هیدرولیکی

بررسی منحنی های طیف فرکانسی توان در ده بازشدگی مختلف نشان می دهد که :

۱- منحنی های طیف فرکانسی توان در بازشدگی های مختلف سیر نزولی دارند. مقدار ماکزیمم منحنی نزدیک به فرکانس صفر بوده و با افزایش فرکانس، طیف فرکانسی کاهش می یابد.

۲- منحنی های طیف فرکانسی توان در بازشدگی های مختلف بجز بازشدگی 10% فاقد قله خاصی هستند. این نشان دهنده عدم وجود تحریک در این نواحی است.

۳- در بازشدگی 10% ، به دلیل وجود فشار بالا در لبه های دریاچه و نیز سرعت زیاد آب، جریان کمی ناپایدار شده و این مسئله باعث ایجاد گردابه هایی می شود که

مراجع

- 1 - Brown, F. R. (1961). *Fluctuations of Control Gates*. 9th Congress, Yougoslavia.
- 2 - Campbell, F. (1961). "Vibration problems in hydraulic structures." *Journal of the Hydraulic Division*, HY2, March.
- 3 - Simmons, W. (1965). "Experiences with flow induced vibrations." *Journal of the Hydraulic Division*, HY5.
- 4 - Hardwick, J. D. (1974). "Flow induced vibrations of vertical lift gates." *Journal of the Hydraulic Division*, HY5.
- 5 - Blevins, (1977). *Flow induced vibrations*. Ban Nostran Reinhold Pub.
- 6 - Naudascher, E. and Nguyen, D. V. (1986). "Self excited vibrations of vertical lift gates." *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 24, No. 5.
- 7 - Jongeling, (1987). "In flow vibrations of gates edges." *International Conference on Flow Induced Vibrations*, England, P. D3.
- 8 - Naudascher, E. (1991). *Hydrodynamic forces*. IAHR Pub.
- 9 - کاویانی، س. "تحلیل تجربی ارتعاش دریاچه های کشوئی سد." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۴).
- 10 - (1994). "Exptimental investigations on vibrations of bottom outlet service gates." *Technical Report*, Tianjan University, China.

- 11 – Lewin, J. (1990). *Hydraulic gates and valves*. Thomas Telford Pub.
- 12 – Zienkiewiz, O. C. (1982). *The finite element method*. McGraw Hill Company, New York.
- 13 – Nguyen, T. D. (1992). "Added mass and its characteristics at slide gates." *International Conference of Flow Induced Vibrations in Fluid Engineering, Reading, England*, P. A2.
- ۱۴ – میرزا آقا، ع. "مدل سازی هیدروالاستیک دوبعدی و آنالیز مودال دریچه های کشوئی سد." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۶).

واژه نامه :

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 – Extraneously Induced Excitation | ارتعاش ناشی از تحریک خارجی |
| 2 – Instability Induced Excitation | ارتعاش ناشی از ناپایداری |
| 3 – Movement Induced Excitation | ارتعاش ناشی از حرکت جسم نوسانگر |