

به نام خدا

۹۹/۸۸



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی
پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مدل‌سازی عددی پخش امواج شوک در سرریزها

دانشجو:

حمید پزشکی

استاد راهنما:

دکتر محمدتقی احمدی

۱۳۸۷ / ۱۵ / ۲۲

زمستان ۸۶

۹۹۱۸۵

کتابخانه دانشگاه تربیت مدرس
کتابخانه مرکزی



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان

آقای حمید پزشکی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان مدل سازی عددی پخش امواج شوک در سرریزها در تاریخ ۱۳۸۷/۱۲/۲۷ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه های هیدرولیکی پیشنهاد می کنند.

| عضو هیات داوران | نام و نام خانوادگی | رتبه علمی | امضا |
|--------------------------------------|---------------------------------|-----------|------|
| استاد راهنما | دکتر محمد تقی احمدی | استاد | |
| استاد ناظر | دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر مسعود سلطانی محمدی | استاد یار | |
| استاد ناظر | دکتر رضا عطارنژاد | دانشیار | |
| مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی) | دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری | دانشیار | |

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان
استاد راهنما:

۱۸/۱۲/۸۷

آیین نامه چاپ پایان نامه های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی-پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته عمران-سازه های هیدرولیکی است که در سال ۱۳۸۶ در دانشکده فنی-مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر محمدتقی احمدی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتبهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده ۶: اینجانب حمید پزشکی دانشجوی رشته عمران-سازه های هیدرولیکی مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

۱۳۸۶/۱۱/۱۴

تاریخ و امضا:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

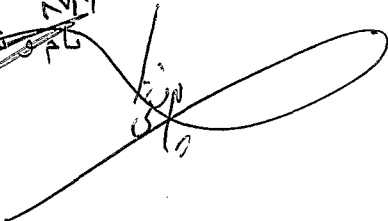
ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ماده ۵ و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

۸۷/۴/۲۲
نام خانوادگی
امضاء



برای پدر و مادرم

تقدیم به

گروه مهندسی آبیاری دانشگاه تبریز؛

گروه مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه تربیت مدرس.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از راهنمایی‌های ارزشمند آقای دکتر محمدتقی احمدی که در طی انجام تحقیق یاری‌رسان اینجانب بودند؛ کمال امتنان را داشته باشم. ایشان تکیه‌گاهی توانا و پشتوانه‌ای بزرگ برایم در به ثمر رساندن این پایان‌نامه بودند.

از آقای دکتر محمدتقی شروانی تبار، استادیار بخش مکانیک دانشگاه تبریز، به خاطر در اختیار قرار دادن مراجع بسیار مفید و راهنمایی شایسته‌شان سپاسگزار می‌شود.

بدین وسیله از آقایان مهندس طریقت، مهندس طراح شرکت مهاب قدس، مهندس صفرزاده، دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس، به خاطر کمک بی‌دریغ‌شان تشکر می‌گردد.

چکیده:

در این تحقیق الگوریتم جدیدی برای مدل‌سازی آکوستیکی کاویتاسیون و تاثیر آن بر سرریزها توسعه یافته است. مجموعه‌ی کاویتاسیون از دو بخش اصلی ابر کاویتاسیون و میکروجت تشکیل شده است. در آن بارگذاری نرمالایز شده‌ای بر اساس رکوردهای آکوستیکی ثبت شده تعریف می‌شود. آنگاه ضریب بارگذاری محاسبه شده به صورت مضربی در آن ضرب می‌گردد تا بارگذاری نهایی ناشی از انفجارهای مجموعه کاویتاسیون حاصل شود. ضریب بارگذاری به همراه حجم ابر کاویتاسیون و محل انفجار کاویتاسیون به ازای شرایط معین جریان بر روی سرریز با روش خاص و با توجه به نتایج آنالیز دینامیکی سیال به دست می‌آید. سپس آنالیز آکوستیکی کاویتاسیون با استفاده از معادله‌ی هلمهولتز و معادله‌ی دینامیکی سازه با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه‌ی بتنی سرریز به صورت دوبعدی انجام می‌شود. در این تحقیق رفتار غیرالاستیک بتن نیز در آنالیز آکوستیکی وارد شده است. در نهایت اجرای کامل الگوریتم پیشنهادی برای سرریز سد کارون ۱ صورت گرفته است. میزان خسارات کاویتاسیون به طور جدی می‌تواند شدید باشد. نتایج، مود خسارت وارده را با دقت قابل قبولی در مقایسه با خسارات گزارش شده در مراجع و سرریز کارون ۱ نشان می‌دهد. در این تحقیق بر روی اثر پارامترهایی چون بارگذاری، ضریب بارگذاری، فاصله محل انفجار تا سطح سرریز و اثر متقابل آن با ضریب بارگذاری بحث شده است. به طور کلی الگوریتم ارائه شده روشی مناسب و ساده را برای تعیین تاثیرات پدیده‌ی پیچیده‌ی کاویتاسیون بر سرریزها پیشنهاد می‌دهد.

کلمات کلیدی: سرریز، ابر کاویتاسیون، میکروجت، امواج آکوستیکی-انفجاری، مدل پلاستیسیته بتن

فهرست مطالب

| | |
|----|---|
| ۱ | فصل اول..... |
| ۲ | مقدمه..... |
| ۳ | ۱-۱- پدیده‌های اساسی در کاویتاسیون..... |
| ۴ | ۲-۱- اهمیت تحقیق حاضر..... |
| ۷ | فصل دوم..... |
| ۸ | مقدمه..... |
| ۹ | ۱-۲- معادلات شبه هارمونیک..... |
| ۱۰ | ۱-۱-۲- معادلات شبه هارمونیک دائمی..... |
| ۱۰ | ۱-۱-۱-۲- معادلات شبه هارمونیک دائمی یک‌بعدی..... |
| ۱۲ | ۱-۱-۱-۱-۲- روش Petrov-Galerkin در طرح Upwind یک‌بعدی..... |
| ۱۲ | ۲-۱-۱-۲- معادلات شبه هارمونیک دائمی دو یا سه‌بعدی..... |
| ۱۳ | ۱-۲-۱-۱-۲- وزنه‌های خط جریانی Petrov-Galerkin..... |
| ۱۴ | ۲-۱-۲- معادلات شبه هارمونیک گذرا..... |
| ۱۶ | ۱-۲-۱-۲- روش‌های بر مبنای مشخصه..... |
| ۱۷ | ۱-۱-۲-۱-۲- روش‌های مشخصه-گالرکین..... |
| ۱۹ | ۲-۱-۲-۱-۲- روندی ساده از روش مشخصه-گالرکین صریح..... |
| ۲۳ | ۳-۱-۲-۱-۲- شیوه‌های تیلور-گالرکین برای متغیرهای اسکالر..... |
| ۲۴ | ۳-۱-۲- شرایط پایداری حالت دائمی..... |
| ۲۵ | ۴-۱-۲- امواج غیرخطی و شوک‌ها..... |
| ۲۷ | ۲-۲- معادله‌ی هلمهولتز..... |
| ۳۴ | ۳-۲- معادلات دینامیکی سیال و ریلی-پلست برای ابر کاویتاسیون..... |
| ۳۷ | ۴-۲- معادله لاپلاس برای تک‌حباب کاویتاسیون..... |
| ۳۹ | ۵-۲- معادله‌ی حاکم بر رفتار سازه..... |
| ۴۴ | جمع‌بندی..... |
| ۴۵ | فصل سوم..... |
| ۴۶ | مقدمه..... |
| ۴۷ | ۱-۳- روش‌های عددی..... |
| ۴۷ | ۱-۱-۳- حل عددی معادلات دینامیکی سیال و ریلی-پلست در مدل ابر کاویتاسیون..... |
| ۵۲ | ۲-۱-۳- حل عددی معادله لاپلاس در مدل انفجار نامتقارن تک‌حباب کاویتاسیون..... |
| ۵۴ | ۲-۳- روش‌های تجربی..... |
| ۵۴ | ۱-۲-۳- بررسی تجربی ابر کاویتاسیون..... |
| ۵۹ | ۲-۲-۳- بررسی تجربی تک‌حباب کاویتاسیون..... |
| ۶۱ | ۳-۲-۳- بررسی تجربی کاویتاسیون به مفهوم عام..... |
| ۶۴ | جمع‌بندی..... |
| ۶۶ | فصل چهارم..... |

| | |
|-----|--|
| ۶۷ | مقدمه |
| ۶۷ | ۱-۴- الگوریتم حل مساله |
| ۶۷ | ۱-۱-۴- تعیین هندسه و محل ابر کاویتاسیون |
| ۶۹ | ۲-۱-۴- بیان مراحل اصلی بارگذاری انفجاری معادل کاویتاسیون |
| ۷۰ | ۱-۲-۱-۴- بارگذاری نرمالایز شده انفجاری کاویتاسیون |
| ۷۱ | ۲-۲-۱-۴- ضریب بارگذاری انفجاری کاویتاسیون |
| ۷۳ | ۲-۴- محاسبه‌ی اندرکنش دینامیکی سازه و آب بر اثر کاویتاسیون |
| ۷۶ | جمع‌بندی |
| ۷۸ | فصل پنجم |
| ۷۹ | مقدمه |
| ۸۶ | ۱-۵- صحت‌سنجی مدل عددی |
| ۹۲ | ۲-۵- تحلیل حساسیت |
| ۹۲ | ۱-۲-۵- دسته‌ی اول از آنالیزهای آکوستیکی |
| ۹۲ | ۱-۱-۲-۵- مورد ۱-۱؛ مش |
| ۹۳ | ۲-۱-۲-۵- مورد ۲-۱؛ ضریب بارگذاری آکوستیکی انفجار کاویتاسیون (L.F.) |
| ۹۶ | ۲-۱-۲-۵- مورد ۳-۱؛ بارگذاری آکوستیکی انفجار کاویتاسیون |
| ۹۷ | ۲-۲-۵- دسته‌ی دوم از آنالیزهای آکوستیکی کاویتاسیون (سرریز کارون ۱) |
| ۱۰۰ | ۱-۲-۲-۵- مورد ۱-۲؛ مدل الاستیک سرریز کارون ۱ |
| ۱۰۶ | ۲-۲-۲-۵- مورد ۲-۲؛ مدل غیرالاستیک سرریز کارون ۱ |
| ۱۱۲ | ۳-۵- میدان آکوستیکی |
| ۱۱۴ | جمع‌بندی |
| ۱۱۵ | فصل ششم |
| ۱۱۶ | مقدمه |
| ۱۱۶ | ۱-۶- نتایج کلی |
| ۱۱۷ | ۲-۶- توصیه‌های طراحی |
| ۱۱۸ | پیشنهادات |
| ۱۲۰ | مراجع |

چکیده انگلیسی

فهرست علائم:

| | |
|------------------------|--|
| A_r | نسبت دامنهی فشار پالس به فشار استاتیکی |
| A_0 | شعاع بی بعد اولیهی ابر کاویتاسیون |
| $A(t)$ | شعاع ابر کاویتاسیون کروی |
| c | عدد Courant |
| C | سرعت انتشار شوک |
| c_d | سرعت موج اتساعی |
| C_p | ضریب فشاری محلی در مخلوط حباب و سیال |
| C_{Pmin} | حداقل ضریب فشار |
| $C_\infty(t)$ | اغتشاش فشاری در دوردست |
| E | مدول الاستیسیته |
| E_k | انرژی جنبشی جت مایع |
| fr | فرکانس فشار پالس |
| fr_{max} | حداکثر فرکانس چرخه‌ای |
| $f(t)$ | بارگذاری نرمالایز شدهی کاویتاسیون |
| g | شتاب گرانشی |
| G | پتانسیل جریان پلاستیک سازه |
| G_r | تابع گرین |
| h | اندازهی مشخصه‌ی المان |
| k | ضریب پخش |
| k_b | پخش معادل یک بعدی |
| \tilde{K}_{ij} | مولفه‌ی i - j ام پخش معادل چندبعدی |
| K_f | مدول بالک الاستیسیته |
| K_c | پارامتر تعیین کنندهی شکل سطح تسلیم را در صفحه‌ی انحراف‌آور |
| L_{min} | حداقل بعد المان |
| $L.F.$ | ضریب بارگذاری |
| N_i | تابع شکل در محیط سیال |
| N_i^s | تابع شکل در محیط سازه |
| n | شماره‌ی گام زمانی |
| n_{min} | تعداد اینتروال‌ها در طولی معادل کمترین طول موج |
| Pe | عدد Peclet |
| p_{at} | فشار اتمسفر |
| p | فشار هیدرودینامیکی |
| \ddot{p} و \dot{p} | مشتقات زمانی مرتبه‌ی اول و دوم فشار هیدرودینامیکی |
| p_d | فشار دینامیکی ناشی از کرنش حجمی |
| p_v | حد فشار کاویتاسیون |

| | |
|--------------------------|--|
| P_s | فشار استاتیکی آکوستیکی اولیه |
| $P_a(t)$ | فشار محاسبه شده در میدان دور دست |
| p_c | فشار حباب |
| P_{n0} | فشار تراکم‌ناپذیر به هنگام شکل‌گیری حباب |
| p_0 | فشار در محل انفجار کواپتاسیون |
| P_{wave} | توان موج شوک A |
| p.c. | ضریب تناسب |
| \bar{q}_n یا \bar{q} | بردار تنش فشاری مرزی |
| \bar{q}_M | تنش مایسس |
| Re | عدد رینولدز |
| R | شعاع حباب |
| R_0 | شعاع اولیه‌ی بی‌بعد حباب‌های هم‌اندازه‌ی داخل ابر در شروع آنالیز |
| R_0^* | شعاع اولیه‌ی حباب‌های هم‌اندازه‌ی داخل ابر در شروع آنالیز |
| R_{max} | حداکثر اندازه شعاع حباب مشاهده شده در داخل ابر |
| r_0 | مختصه‌ی شعاعی لاگرانژی |
| S_j | سطح جت مایع |
| t | زمان |
| t_G | مدت زمان اغتشاش فشاری در دور دست |
| T_{min} | کمترین پیروود موج |
| Δt | اندازه‌ی گام زمانی |
| Δt_{crit} | حداکثر گام زمانی ممکن در طرح‌های به صورت مشروط پایدار |
| U_i | مولفه‌ی \hat{u} -ام سرعت |
| \bar{U} | مقدار متوسط سرعت در امتداد مشخصه |
| \hat{u}^f | بردار سرعت سیال |
| \hat{u}^f | بردار شتاب سیال |
| U^* | سرعت مشخصه‌ی جریان |
| x' | مختصه‌ی مسیر مشخصه |
| W_i | وزنه‌ی گره \hat{u} -ام |
| \bar{W}_i | وزنه‌ی دلخواه |
| W_i^* | وزنه‌ی غیراستاندارد زینکیویچ |
| We | عدد وبر |
| \bar{P} | جزء هیدرواستاتیک تانسور تنش |
| S_{ij} | تانسور تنش انحراف‌آور |
| I_1 | تغییرناپذیر اول تانسور تنش |
| J_2 | تغییرناپذیر دوم تانسور تنش انحراف‌آور |
| F | بردار جابه‌جایی |

| | |
|----------|--|
| G | بردار پخش |
| f | بردار نیرو |
| H | ماتریس ضریب بردار P |
| M | ماتریس جرم سیال یا سازه |
| C | ماتریس میرایی |
| K | ماتریس سختی سازه |
| K_{ij} | مولفه ی ij-ام ماتریس سختی |
| B | معادل ضرب ماتریس اپراتور در ماتریس تابع شکل سیستم سازه |
| R | بردار تحریک |
| Q | ماتریس اندرکنش |
| D | ماتریس ارتجاعی |
| I | ماتریس واحد |

علائم یونانی:

| | |
|----------------------------|---|
| μ | ویسکوزیته ی مطلق جریان |
| ϕ | متغیر مجهول میدانی / تابع پتانسیل |
| ϕ^* | بخش جابه جایی خالص از متغیر میدانی مجهول ϕ |
| ϕ^{**} | بخش پخش خالص از متغیر میدانی مجهول ϕ |
| α | ضریب ثابت وزنه ی غیراستاندارد زینکیویچ |
| α_{opt} | ضریب بهینه ی وزنه ی غیراستاندارد زینکیویچ |
| α_{crit} | ضریب بحرانی وزنه ی غیراستاندارد زینکیویچ |
| δ | فاصله از گره در گام زمانی قبلی برای تخمین متغیر گره ی در گام زمانی بعدی |
| θ | ضریب وزن دهی به گام زمانی حاضر در مقایسه با گام قبلی |
| ρ_f | جرم مخصوص سیال |
| γ^f | دراگ حجمی |
| σ_{sur} یا σ | شاخص کاویتاسیون |
| κ | شاخص پلی تروپیک |
| ν | ضریب پواسون |
| β_1 و α_1 | ضرایب ماتریس میرایی ریلی |
| ψ | زاویه ی تاخیری |
| ξ | خروج از مرکزیت، انحراف ¹ |
| σ_{t0} | مقاومت کششی بتن |
| $\hat{\sigma}_{max}$ | تنش موثر اصلی حداکثر |

¹ Eccentric Parameter

| | |
|---|--|
| $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ | نسبت تنش تسلیم فشاری دوماحوری معادل به تنش تسلیم فشاری تک‌محوری |
| $\bar{\sigma}_i(\tilde{\varepsilon}_i^{pl})$ و $\bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl})$ | تنش موثر پیوستگی ^۲ فشاری و کششی |
| $\bar{\sigma}$ و σ | متغیر صوری |
| η | تراکم حباب در واحد حجم مایع، |
| γ | نسبت فاصله‌ی مرکز حباب در حداکثر اندازه‌ی خود تا جسم صلب بر روی حداکثر شعاع تجربه شده‌ی آن |
| Ω | ناحیه‌ی محاسباتی |
| Γ | مرز ناحیه‌ی محاسباتی |
| λ_{min} | کوتاه‌ترین طول موج |
| σ_{ij} | تنش نرمال |
| τ_{ij} | تنش برشی |
| $\bar{\sigma}_{ij}$ | تانسور تنش موثر الاستیک |
| ε_{ij} | تانسور کرنش الاستیک |
| ε_{ij}^{pl} | تانسور کرنش پلاستیک |
| $\tilde{\varepsilon}_i^{pl}$ و $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ | متغیرهای سخت‌شونده‌ی فشاری و کششی |
| ϕ | بردار مجهول میدانی |

^۲ Effective Cohesion Compressive /Tensile Stress

فصل اول

تعریف مساله

مقدمه

پدیده‌های اساسی در کوانتاسیون

اهمیت تحقیق حاضر

مقدمه:

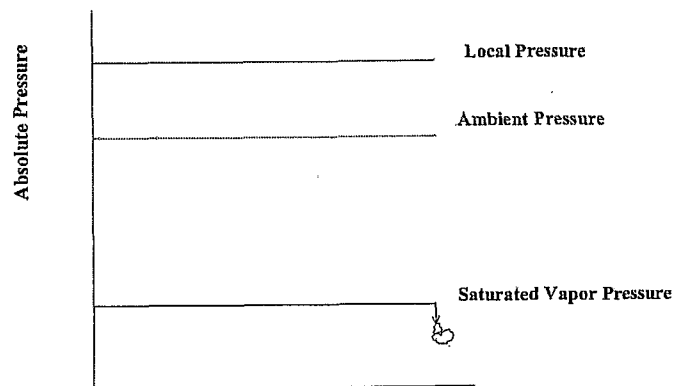
در اثر جریان آب در مجاری مختلف، میدان فشار از حالت هیدرواستاتیکی خارج می‌شود و میدان سرعت در آن شکل می‌گیرد. در مواقع خاصی با ایجاد گردابه‌ها یا افزایش سرعت به صورت موضعی مقدار فشار در میدان آن قدر کاهش می‌یابد که به مقدار معین فشار بخار اشباع^۱ سیال می‌رسد. این مقدار به دما و نوع مایع بستگی دارد. در این هنگام مایع یک تغییر فاز موضعی را از حالت مایع به حالت بخار تجربه می‌کند و حباب‌هایی در آن شکل می‌گیرند. برای درک بیشتر ارتباط بین فشارها با عناوین مختلف نگاه کوتاه به شکل ۱-۱ مفید خواهد بود. در این شکل فشار موضعی در میدان جریان به طور مداوم تغییر کرده و در صورتی به مقدار فشار بخار اشباع برسد؛ حباب‌های کاویتاسیون ایجاد می‌شوند. یک فرضیه این است که حباب در اطراف مواد معلق موجود در سیال تشکیل می‌شود. بدین صورت که در منطقه‌ی خاص به علت پایین بودن فشار در محیط اطراف حباب، حجم آن افزایش می‌یابد تا تعادل در بین فشار داخل و خارج حباب ایجاد شود. پایداری شکل حباب به دلیل وجود نیروی کشش سطحی^۲ در دو سوی غشای حباب تامین می‌شود و مقدار آن به شعاع حباب و اختلاف فشار در داخل و خارج حباب بستگی دارد. این حباب‌ها با جریان به طور موضعی انتقال می‌یابند آنگاه در ناحیه پرفشار تغییر فاز ناگهانی ناقصی صورت می‌گیرد. این تبدیل فاز معکوس با پدیده‌های مختلفی همراه می‌باشد [۱]. از آن جمله پخش امواج شوک آکوستیکی از محل انفجار مجموعه حباب‌ها می‌باشد. این امواج می‌توانند اثر مخربی را بر روی اجسام اطراف خود بر جای بگذارند [۱]. این روند را پدیده کاویتاسیون می‌نامند.

این پدیده می‌تواند در جریان آب بر روی سرریزها نیز موجب بروز مشکلاتی گردد به طوری که برخی اوقات پتانسیل ایجاد موقعیت‌های اضطراری را دارد. نمونه بارز آن سرریز سد کارون ۱ است که در آن تخریب در برخی قسمت‌ها به سنگ پی سرریز نیز رسیده بود [۲]. یا می‌توان به تخریب سرریز Keban واقع در ترکیه نیز اشاره نمود [۱]. تخریب کاویتاسیون در اثر ترکیبی از عوامل هندسی (ناهمواری‌های سطحی سرریز، وجود سازه‌هایی که زمینه ایجاد کاویتاسیون را فراهم می‌کنند مثل

¹ Vapor Saturated Pressure

² Surface Tension Pressure

درزهای اجرایی، هدایت کننده‌های جریان^۱، هیدرودینامیکی (سرعت جریان، فشار) و فیزیکی (دمای آب، مواد معلق در آب، تعداد و اندازه حباب‌ها) ایجاد می‌شود.



شکل ۱-۱- فشارهای مورد بحث در مساله. به ازای فشارهای کمتر از فشار بخار حباب‌های کاویتاسیون ایجاد می‌شوند.

عامل دیگری که در سرریزها به همراه کاویتاسیون موجب تشدید و تعمیق خرابی‌ها می‌شود؛ برخورد جت جریان بر روی حفره‌ها و برآمدگی‌های ایجاد شده از کاویتاسیون و توقف ناگهانی آن می‌باشد. بدین ترتیب این دو روند تخریب در سرریزها از همدیگر جدا نیستند. این تحقیق به مسائل مربوط به برخورد جت نمی‌پردازد. در مورد برخورد جت‌ها مطالبی در [۱] ارائه شده است. در تحقیق حاضر میدان آکوستیک ناشی از کاویتاسیون حل می‌گردد و اندرکنش آن با سازه بتنی سرریز در نظر گرفته می‌شود. پاسخ غیرخطی بتن نیز در نظر گرفته می‌شود.

۱-۱- پدیده‌های اساسی در کاویتاسیون:

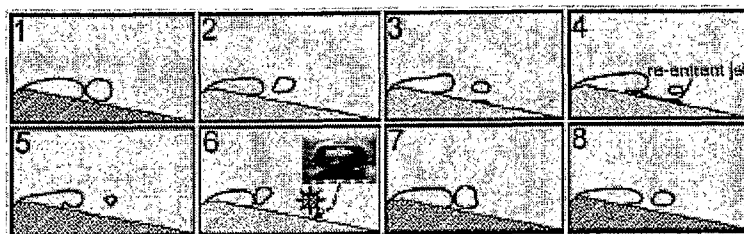
شکل ۱-۲ مراحل ایجاد کاویتاسیون را نشان می‌دهد. در قسمت ۱ ناحیه منبع تولید ابر کاویتاسیون^۲ با افت فشار ایجاد می‌شود. پدیده کاویتاسیون با جدایی^۳ ابر مذکور از قسمت مرجع آغاز می‌شود. ابر کاویتاسیون جدا شده با جریان انتقال می‌یابد.

این مجموعه حباب‌ها در منطقه پرفشار منهدم می‌شوند. در این هنگام احتمال انفجار حباب‌های دیگر به دلیل انهدام ابر وجود دارد. انفجار ابر کاویتاسیون موجب ایجاد موج شوک در مایع می‌شود که مقدار آن از چند صد کیلوپاسکال تا چند صد مگاپاسکال تغییر می‌کند [۳،۴].

¹ Deflector

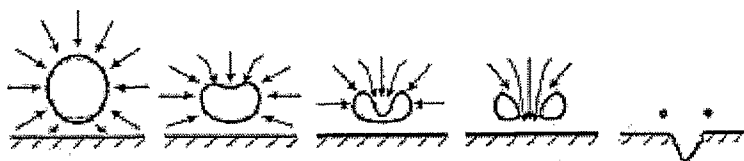
² مجموعه‌ای واحد از حباب‌ها را گویند [۱].

³ Separation



شکل ۱-۲- مکانیزم شکل گیری کاویتاسیون [۳]

انهدام ابر کاویتاسیون موجب ایجاد جتی به طرف منبع اصلی می شود. قسمت ۴ از شکل ۱-۱ این مرحله را نشان می دهد. جت ایجاد شده با حرکت خود به سمت منبع تولید موجب جدایی ابر کاویتاسیون جدید می شود. دوباره با انفجار این ابر در قسمت ۶ از شکل احتمال شکل گیری میکروجت مشاهده می شود. میکروجت ها را می توان جزو جت های با سرعت بالا به حساب آورد که با منفجر شدن حباب به صورت نامتقارن مسیرشان از داخل حباب مهیا می شود (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳- مکانیزم شکل گیری انفجار نامتقارن در حباب و تشکیل میکروجت [۳]

از مکانیزم های فرسایش کاویتاسیون می توان به تاثیر موج های شوک که از انهدام مجموعه حباب ها تشکیل می شود؛ اشاره کرد [۵]. ولی احتمال داده می شود که مکانیزم اصلی فرسایش کاویتاسیون میکروجت ها باشند. سرعت میکروجت می تواند به چند صد متر بر ثانیه برسد [۳، ۶]. میکروجت می تواند موجب ایجاد شوک از مرتبه یک گیگاپاسکال در تداوم زمانی یک نانوثانیه شود و سطحی از مرتبه یک میکرومتر مربع را تحت تاثیر قرار دهد و کشش موضعی ایجاد نماید [۳].

۱-۲- اهمیت تحقیق حاضر:

سدها در ایران به علت واقع شدن در منطقه خشک از جهان، نقش بارزی در تامین آب مشروب و کشاورزی دارند. با نگاهی کوتاه به وضعیت اقلیم کشور می توان وجود حیات بخش آنها را تصدیق کرد. در نتیجه بایست از سلامت سدها و سازه های جانبی شان برای بهره برداری مطمئن بود. یکی از سازه های جانبی مهم در این مجموعه های عظیم، سرریزها می باشند. زیرا در هنگام مواجهه با سیلاب این سرریز می باشد که ایمنی سد را با تخلیه آب مخزن فراهم می کند. سرریزهای اوجی^۱ به دلیل تخلیه

^۱ Ogee Spillways

سریع تر به ازای شرایط یکسان، جزو سرریزهای معمول در سدها می باشد. چنان که به نحوه ی تامین آب مخزن سدها نیز توجه کنیم، اهمیت این سازه های جانبی بیش از پیش مشخص می شود. زیرا که پر شدن مخزن سدها به یکباره صورت می گیرد. بنابراین ایمنی و پایداری سدها به هنگام سیلاب بر سلامت و آبگذری مناسب سرریز آنها وابسته می شود.

مهمترین پدیده ی هیدرولیکی که ایمنی سرریزها را هنگام بهره برداری به طور چشم گیری کاهش می دهد؛ وقوع کاویتاسیون و تخریب این سازه ها می باشد. به طور مثال می توان به تجربه ی سرریز کارون ۱ در سال ۱۳۵۶ اشاره کرد. در زمینه هندسه و شکل گیری کاویتاسیون، تحقیقات را می توان به طور کلی به دو دسته تحقیق بر روی مدل ابر کاویتاسیون و مدل حباب های تنها تقسیم کرد. در مدل ابر کاویتاسیون شعاع حباب های گروهی موجود در درون ابر را در اثر تغییرات متغیرهای میدانی همچون فشار بررسی می کنند و تاریخچه فشار در مرز دوردست را به دست می آورند [۷]. در مورد مدل آزمایشگاهی و عددی تک حباب می توان به مراجع [۸،۹] اشاره کرد.

تحقیقات آزمایشگاهی محدودی در زمینه اثر پدیده کاویتاسیون بر روی اجسام اطراف گزارش شده است [۱۰،۱۱] که اثر آن بر روی اجسام مختلف از جمله بتن در مرجع [۱] آمده است. مرجع [۴] تحقیقی است که به دنبال یافتن مدلی برای تخریب ایجاد شده از کاویتاسیون در هیدروفویلی می باشد که از ماده ی شکل پذیر ساخته شده است. مدل ارائه شده ی آن تجربی-آماری می باشد؛ چنان که برای تخمین میزان فرسایش کاویتاسیون به ایجاد رابطه بین فرسایش سطح و ساختار تصویری جریان حباب دار پرداخته است. تحقیقات قبلی ذکر شده در این مرجع با ایجاد رابطه بین حجم حباب عبوری و نرخ تولید انرژی مخرب میزان خسارت را یافته اند که به ادعای مرجع [۴] دقیق نبوده اند. لازم به ذکر است که تاکنون مدل عددی در زمینه تخمین خسارت ناشی از کاویتاسیون گزارش نشده است. در کل می توان خساراتی را که کاویتاسیون به اجسام جامد موجود در مجاورت خود وارد می سازد، در دو دسته ی ترک و حفره خلاصه نمود. حفره در اثر برخورد میکروجت به اجسام شکننده و شکل پذیر ایجاد می شود [۴]. در طرف دیگر اندرکنش امواج در ماده ی جامد ترک ها را ایجاد می کند. امواج شوکی که در ساختار کاویتاسیون مطرح هستند؛ از انفجار ابر کاویتاسیون و برخورد میکروجت به اجسام جامد مجاور به وجود می آیند. انواع ترک های مشاهده شده در مواد مختلف در مرجع [۱] آمده است. مطالعات کلاسیک بر روی فرسایش بتن در اثر جریان طولانی مدت سیال حاوی حباب های کاویتاسیون نشان می دهد که:

الف- با افزایش مقاومت فشاری بتن مقاومت آن در برابر کاویتاسیون افزایش می یابد.

ب- با کاهش نسبت آب به سیمان در اختلاط بتن مقاومت آن در برابر کاویتاسیون افزایش می یابد.

ج- تیپ سیمان تاثیری در مقاومت بتن در برابر کاویتاسیون ندارد.

د- مصالح درشت دانه در مقایسه با مصالح ریز دانه به راحتی در اثر کاویتاسیون کنده می شوند.

بنابراین حداکثر قطر توصیه شده در مصالح مصرفی ۲۰ mm است.

ه- چسبندگی بین سیمان و مصالح مصرفی نقش بارزی در مقاومت بتن در برابر کاویتاسیون دارد. به طوری که چسبندگی بهتر بین مصالح و سیمان مقاومت را افزایش می‌دهد.
و- سختی^۱ مصالح برای مقاومت بتن در برابر کاویتاسیون نباید بحرانی نباشد. این امر در پخش موج تنش یا شوک در بتن تاثیر دارد.

در جریان کوتاه‌مدت کاویتاسیون بر روی بتن ابعاد ترک‌های ایجاد شده در بتن در مقایسه با حفره‌ها ناچیز می‌باشد [۱۰، ۱۱]. در اثر برخورد میکروجت به بتن معمولاً فرسایش از سطح مشترک بین سیمان و مصالح شروع می‌شود. در عین حال ترک‌ها نیز این سطح مشترک را دنبال می‌کنند [۱۱ و ۱۰]. ترک خوردن سطح مشترک دانه‌های مصالح را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این شرایط دانه‌های گرد ماسه بر خلاف دانه‌های تیز آسیب نمی‌بینند و چسب سیمانی اطراف آنها فرسایش می‌یابد.

با این مقدمه می‌توان بر اهمیت تحقیق حاضر پی برد. به خصوص اینکه تجربه عملی حوادث سرریز نیز در ایران وجود دارد. لذا در این تحقیق سعی بر این شد که شناخت مراحل ساختار کاویتاسیون صورت گیرد و در راستای مدل‌سازی آن تلاش گردد و پاسخ بتن سرریز به این نوع بارگذاری تقریباً ناشناخته مد نظر قرار گیرد. این تحقیق که برای مدل‌سازی عددی فرایند کاویتاسیون صورت می‌گیرد؛ در ایران کاملاً نو و در سطح جهانی کم‌سابقه است.

^۱ Hardness