

آزمایش مدل هیدرولیکی دریاچه کشویی تونل تخلیه تحتانی سد مارون -

مقایسه با مدل آئرودینامیکی

د. محمدصادق صادقیپور

استاد دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

حمید مهدیقلی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

سیاوش کاویانی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت: ۷۷/۱/۱۶، تاریخ تصویب: ۷۸/۸/۸)

چکیده

بمنظور اطمینان از عملکرد صحیح دریاچه های سدهای بزرگ و نیز جهت تعیین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر آنها، این دریاچه ها را در مراحل طراحی و قبل از ساخت، مورد آزمایش مدل فیزیکی هیدرولیکی قرار می دهند. تست دریاچه های کلیه سدهای ساخته شده در ایران در خارج از کشور و یا هزینه ارزی زیاد انجام گرفته است. علاوه بر آن در سالهای اخیر استفاده از مدل آئرودینامیکی، بجای مدل هیدرولیکی، نیز مطرح گردیده است. بادو هدف کسب دانش فنی آزمایش مدل هیدرولیکی دریاچه ها و نیز بررسی مقایسه ای بین نتایج حاصل از آزمایشات مدل هیدرولیکی و آئرودینامیکی، دریاچه کشویی تونل تخلیه تحتانی سد مارون مدل سازی و مورد آزمایش هیدرولیکی قرار گرفت. با اندازه گیری فشار در نقاط مناسب دریاچه و محفظه مدل و بکارگیری تساوی اعداد اویلر، مقادیر فشار در نقاط مشابه دریاچه اصلی محاسبه گردید. فشارهای بدست آمده، جهت محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد به دریاچه مورد استفاده قرار گرفتند. نیروهای هیدرودینامیکی وارد به اجزاء مختلف دریاچه و برآیند آنها به ازاء بازشدگی های مختلف سازگاری بسیار خوبی را با نتایج حاصل از آزمایش مدل آئرودینامیکی نشان می دهد.

کلیدواژه ها: مدل هیدرولیکی، مدل آئرودینامیکی، دریاچه سد، آزمایش مدل فیزیکی، سد مارون

مقدمه

ارتعاش و کاویتاسیون در مراجع مختلف داده شده اند. حتی نیروهای بالابر دریاچه را می توان با دقت نسبتاً خوب با استفاده از روش های تئوریک محاسبه نمود. لیکن، بدلیل پیچیدگی و سه بعدی بودن الگوی جریان که عمدتاً ناشی از پیچیدگی هندسه معبر جریان در نواحی اطراف دریاچه است، کسب نتایج دقیق از طریق مدل سازی تئوریک برای بسیاری از اثرات عملاً امکان پذیر نبوده و اطمینان قطعی را نسبت به عملکرد عاری از ارتعاش و کاویتاسیون دریاچه به طراح و سازنده نخواهد داد. لذا، بدلیل هزینه های بسیار زیاد ساخت سدها و تاسیسات مربوطه و نیز خسارات و زیان های جانی و مالی ناشی از شکست احتمالی دریاچه ها، انجام آزمایش مدل هیدرولیکی، و بعضاً ارتعاشی، برای

دریاچه های سد بعنوان سازه های هیدرولیکی کنترل کننده جریان، در معرض نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی ناشی از عبور آب هستند که مقدار آنها تابعی است از شرایط عملکردی دریاچه نظیر میزان بازشدگی، دبی و ارتفاع آب. دریاچه های سد تحت شرایط کاری بسیار سختی از نظر نیروهای وارده، ارتعاشات ناشی از بارهای هیدرودینامیکی نوسانی و عوارض ناشی از کاویتاسیون عمل می نمایند. علاوه بر آن آگاهی از نیروهای وارد بر دریاچه در جهات افقی و قائم بمنظور محاسبه قدرت موتور محرک دریاچه الزامی است. جنبه های مختلف طراحی دریاچه ها تقریباً بطور کامل مورد بررسی قرار گرفته و شناخته شده اند [۵]. توصیه های متعدد جهت حصول یک طراحی دریاچه عاری از

مشترک می‌باشند. بعد از دریچه‌ها، تونل بصورت بتنی به قطر ۶ متر ادامه یافته و یک جریان کانال باز با سطح آزاد در آن تشکیل می‌شود. مشخصات اصلی عبارتند از:

- ارتفاع سطح آب دریاچه نسبت به سطح دریا، حداکثر ۵۱۴/۸۵ متر و حداقل ۴۲۰/۰ متر،

- ارتفاع آستانه دریچه شعاعی نسبت به سطح دریا ۳۸۱/۷۰۵ متر،

- حداکثر دبی تخلیه تونل، ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه،

- ابعاد هندسی مهم:

الف - دریچه شعاعی، $R=6/5$ m، زاویه ۴۸ درجه، مجهز به آب‌بند در بالادست، و در لبه‌های بالائی، کناری و پائینی. فضای پشت دریچه از طریق سقف و نیز پله به ارتفاع ۰/۷۵ متر و شیار (به ابعاد ۰/۵×۰/۶ متر) ایجاد شده، بترتیب در کف و بر روی دیوارهای جانبی هوادهی می‌شود. سرعت حرکت دریچه ۰/۳ متر بر دقیقه است. ابعاد تونل در محل دریچه ۴/۲ متر × ۳/۲ متر و پهنای آب بندی شده دریچه ۳/۶۴ متر است.

ب - دریچه کشویی، ابعاد کانال در محل دریچه ۴/۵ متر × ۳/۲۶ متر و پهنای آب‌بندی شده توسط دریچه ۳/۴۳ متر است. ضخامت کل دریچه ۰/۷ متر، ابعاد شیارها ۰/۱۷ متر × ۰/۲ متر و شیب خروجی ۱:۳۹ است. زاویه لبه پائینی دریچه $\theta=45^\circ$ و شعاع انحنای آن $r=0/28$ m است. سرعت حرکت دریچه در حالت عادی ۰/۳ متر بر دقیقه و در حالت اضطراری ۳ متر بر دقیقه است. طول ناحیه تبدیل مقطع دایره بقطر ۴/۵ متر به مستطیل به ابعاد ۴/۴ متر × ۳/۳ متر، قبل از دریچه اضطراری، ۸ متر بوده و فضای بین دریچه‌ها توسط دو لوله هرکدام بقطر ۰/۲ متر و مجهز به شیرهای اتوماتیک یک طرفه هوادهی می‌شود. شیب تونل، محفظه دریچه‌ها و لوله تخلیه 12° است. شکل (۱) شمای کلی تونل تخلیه تحتانی سد مارون، همراه با دریچه‌های شعاعی و کشویی را نشان می‌دهد.

در مدل‌سازی دریچه و باتوجه به نیروهای موجود رابطه تابعی زیر بین کمیت‌های بدون بعد برقرار می‌گردد.

$$Eu_l = f(\text{Re و نسبت‌های ابعاد})$$

ایجاد تساوی بین اعداد رینولدز در مدل و نمونه اصلی عملاً غیرممکن است، لیکن، چنانچه عدد رینولدز مدل از یک مقدار بحرانی حداقل بیشتر باشد، در این صورت بدلیل شدت درهمی بالا، عملاً اثرات عدد رینولدز (اصطکاک) قابل اغماض خواهد بود [۵]. لذا، چنانچه بین مدل و نمونه اصلی تشابه هندسی وجود داشته‌باشد، تشابه دینامیکی برقرار شده و اعداد اویلر مساوی خواهند شد. از طرف دیگر تحلیل فوق ما را از داشتن معیاری جهت انتخاب سرعت در مدل محروم می‌سازد. در این موارد، برای انتخاب

دریچه‌های بسیاری از سدهای مرتفع عملاً لازم است.

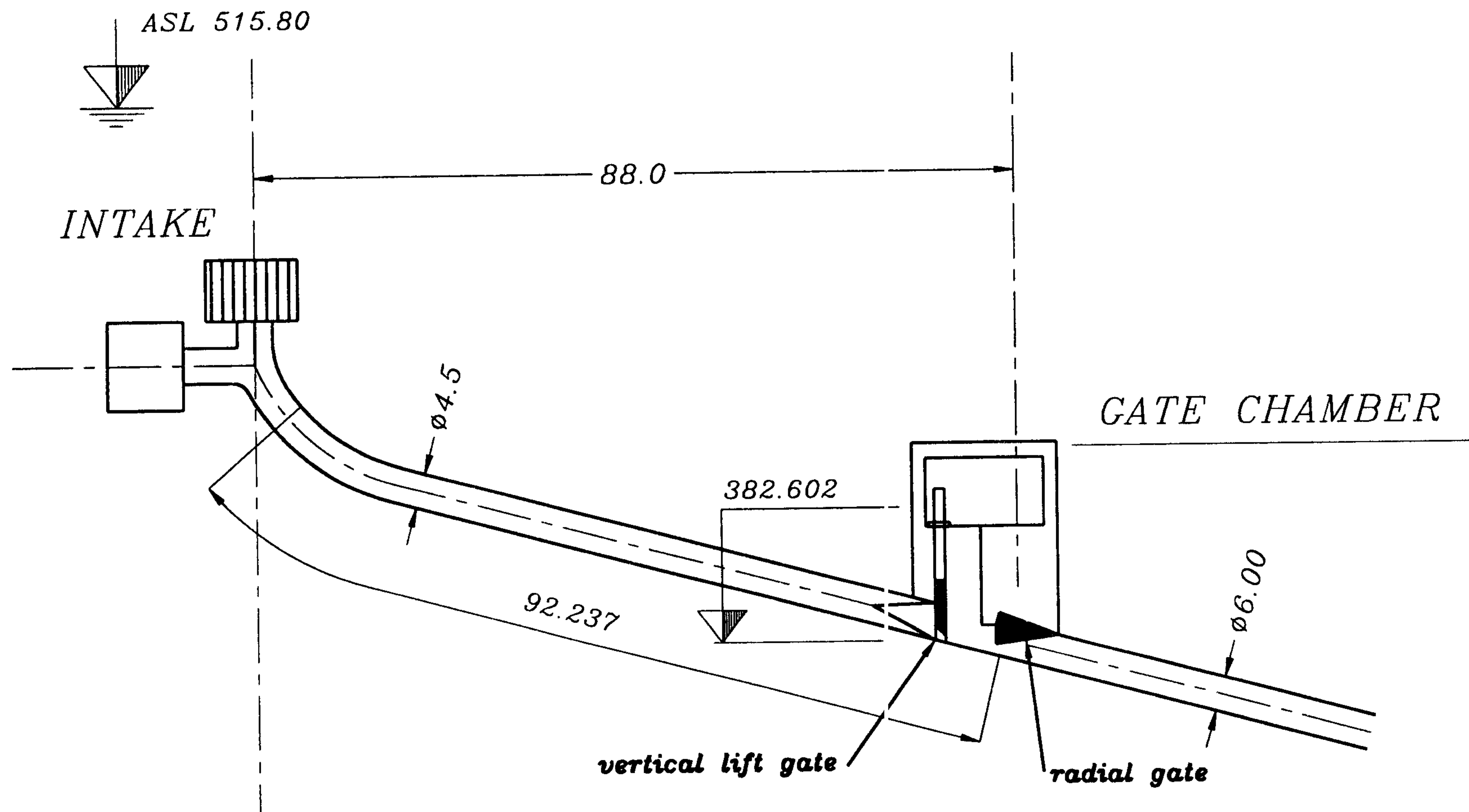
برای کلیه سدهائی که تاکنون در ایران ساخته شده‌اند، آزمایش مدل هیدرولیکی در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی خارج از کشور انجام شده است. از طرف دیگر، در سالهای اخیر استفاده از سیال هوا بجای آب در آزمایشات مدل تونل‌های تحت فشار (مدل آئرو دینامیکی) مرسوم گردیده است که مدافعان استفاده از این مدل‌ها مزایائی نظیر سهولت، اقتصادی بودن و تمیزی را برای آن بر شمرده‌اند. در حالیکه مخالفان آن معایبی نظیر دقت کمتر، عدم امکان مشاهده برخی اثرات نظیر کاویتاسیون و غیره را برای آن ذکر کرده‌اند.

در انجام پژوهش حاضر بطور همزمان دو هدف عمده دنبال می‌شده است. هدف اول کسب دانش فنی انجام آزمایشات مدل هیدرولیکی بوده است بطوریکه بتوان از این پس آزمایشات مدل کلیه دریچه‌ها را در داخل کشور انجام داد. هدف دوم بررسی مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از آزمایشات مدل هیدرولیکی و آئرو دینامیکی بوده است. برای این منظور دریچه‌های تونل تخلیه تحتانی سد در دست احداث مارون انتخاب شده‌اند. برای این دریچه‌ها، در دانشگاه برنو جمهوری چک، آزمایش مدل آئرو دینامیکی انجام شده و طراحی دریچه‌ها براساس نتایج آزمایش مدل فوق انجام شده و هم‌اکنون در دست ساخت هستند.

در پژوهش حاضر با ساخت مدل از دریچه‌های فوق همراه با محفظه آنها، عملکرد هیدرولیکی دریچه‌ها مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. به کمک اندازه‌گیری فشار در نقاط مناسب، نیروهای هیدرو دینامیکی وارد بر دریچه کشویی محاسبه شده‌اند. نتایج بدست آمده برای نیروهای وارد بر دریچه‌ها کاملاً با نتایج حاصل از آزمایش مدل آئرو دینامیکی سازگار است. علاوه بر آزمایش مدل هیدرولیکی آزمایش مدل ارتعاشی نیز برای دریچه کشویی انجام شده که نتایج آن بطور جداگانه ارائه گردیده است [۱].

مشخصات عمومی تونل و دریچه‌های سد مارون

تونل تخلیه تحتانی سد مارون مجهز به دو دریچه شعاعی و کشویی متوالی، بترتیب، جهت تنظیم دبی و انسداد تونل در شرایط اضطراری و یا تعمیرات می‌باشد. در پژوهش حاضر رفتار دریچه کشویی از نظر هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته و نیروهای هیدرو دینامیکی وارد بر آن محاسبه گردیده است. تونل دارای مقطع دایره با قطر ۴/۵ متر است که قبل از دریچه‌ها توسط یک تبدیل به مقطع مستطیل تبدیل می‌شود. این تونل در ورود دارای یک شبکه آشغالگیر است. دریچه‌های کشویی و شعاعی دارای یک محفظه



شکل ۱: شمای کلی تونل تخلیه تحتانی سدمارون همراه با دریچه های شعاعی و کشوئی (کلیه ابعاد برحسب متر داده شده اند).

فشارها، در آزمایش مدل هیدرولیکی، توسط پیزومتر اندازه گیری شده اند.

آب مورد نیاز سیستم توسط یک تانک به ارتفاع ۷ متر از سطح زمین و کنترل آن توسط یک شیر کشوئی در ابتدای لوله انجام شده است. آب خروجی از مدل به درون یک حوضچه و از آنجا به کانالی بطول تقریبی ۱۵ متر تخلیه شده و در انتهای کانال از روی یک سرریز مستطیلی به درون مخزن برگشت تخلیه می گردد.

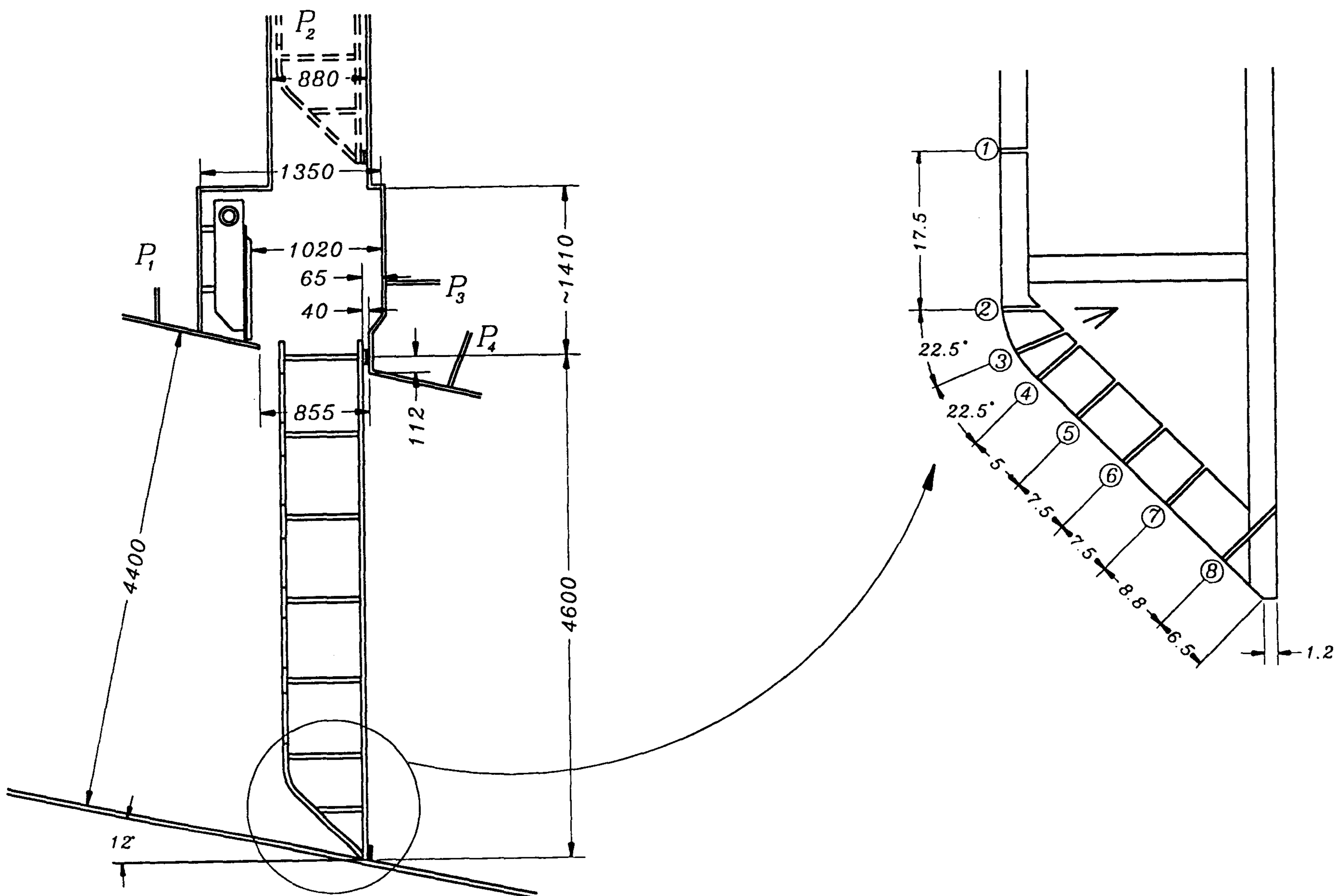
نیروی هیدرودینامیکی وارد بر دریچه کشوئی

در آزمایشات مدل هیدرولیکی (ویا آئرو دینامیکی) آنچه مبنا و پایه کلیه بررسی ها و محاسبات می باشد فشار در نقاط بخصوص از دریچه و محفظه آن و نیز تونل در حوالی محل دریچه است. با استفاده از فشارهای اندازه گیری شده نیروهای وارد بر دریچه در دو جهت افقی و قائم محاسبه می شود. بعلاوه به کمک فشارهای اندازه گیری شده و محاسبه شاخص کاویتاسیون در مقایسه با شاخص بحرانی احتمال وقوع کاویتاسیون را در نقاط حساس می توان بررسی نمود. از فشارهای اندازه گیری شده و نیز نوسانات فشار، برخی از بررسی ها و محاسبات، از جنبه احتمال ارتعاش دریچه، را نیز می توان انجام داد.

سرعت در مدل، معمولاً از طریق برون یابی برای عدد رینولدز مدل و یا از طریق مساوی قرار دادن اعداد فرود در مدل و نمونه اصلی عمل می نمایند. در پژوهش حاضر از روش دوم استفاده شده است.

ساخت مدل و اندازه گیری ها

مقیاس مدل با توجه به امکانات موجود ۱:۲۵ انتخاب شده و تشابه هندسی بین مدل و نمونه واقعی، از ابتدای کانال تبدیل (Transition) دایره به مستطیل تا انتهای محفظه دریچه ها بعد از دریچه شعاعی بطور کامل رعایت شده است. سرعت آب در مدل با استفاده از مساوی قرار دادن اعداد فرود در مدل و نمونه اصلی محاسبه شده است. ناحیه مورد آزمایش شامل دریچه ها و محفظه آنها از ورق پلکسی گلاس شفاف با دقت ۰/۱ میلی متر ساخته شده است. شکل (۲) دریچه کشوئی مورد آزمایش را همراه با ابعاد مربوطه نشان می دهد. نقاط P معرف نقاط اندازه گیری فشار در آزمایش مدل هستند. سوراخهای اندازه گیری فشار بر روی دو دریچه و نیز محفظه آنها ایجاد گردیده که توسط شلنگ های شفاف به قطر داخلی ۵ و ۸ میلی متر به فشارسنج مرتبط شده اند. شلنگ ها از طریق لوله برنزی تعبیه شده در بالای دریچه به بیرون هدایت می شوند. محل خروج شلنگ ها از لوله برنزی آب بندی شده است.



شکل ۲: مشخصات هندسی دریچه کشوئی و محفظه آن و محل نصب سوراخهای اندازه گیری فشار (کلیه ابعاد برحسب میلی متر داده شده اند).

است که این به اعداد اویلر یکسان بین آنها منجر می شود. در این روش:

۱- نیازی به مدل کردن کل تونل از ابتدا تا انتها نیست. البته دبی و سرعت برای نمونه اصلی با محاسبه بدست می آید که ممکن است دارای خطا باشد.

۲- نیازی به تنظیم دقیق دبی برای هر بازشدگی نیست، البته اندکی خطا در عدد فرود بوجود می آید که عمدتاً قابل صرف نظر کردن است.

۳- می توان بجای آب از هوا استفاده نمود.

۴- ضرایب فشار بدست آمده برای کلیه نمونه های دیگر که با مدل آزمایش شده تشابه هندسی دارند قابل استفاده هستند.

۵- تنها بمنظور قراردادن یک قید بر روی سرعت از تساوی اعداد فرود و یا برون یابی رینولدز استفاده می شود.

نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر دریچه از جمع نیروهای وارده بر بخش های مختلف دریچه، نظیر پوسته، سازه تقویت کننده، آب بند بالائی دریچه و غیره تشکیل شده است.

شکل (۳) بخش های مختلف دریچه همراه با پارامترهای

نیروهائی که در جهت قائم بر دریچه کشوئی وارد می گردند عبارتند از:

الف - نیروی وزن بسمت پائین،

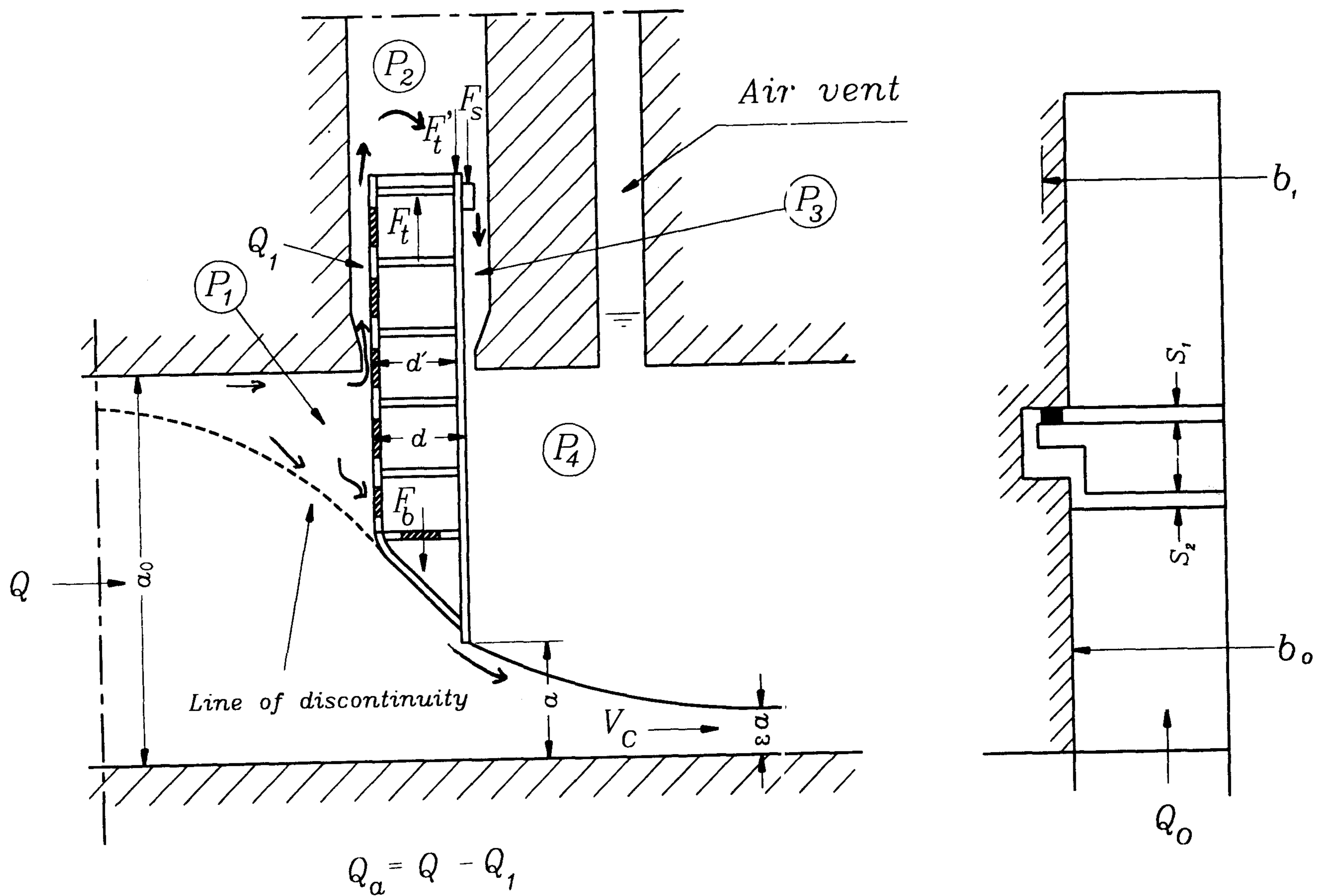
ب - نیروی اصطکاک در جهت مخالف حرکت،

پ - نیروی هیدرودینامیکی، که جهت این نیرو در بازشدگی های مختلف دریچه بسمت بالا و یا پائین است.

بدست آوردن برآیند کل نیروی های وارد بر دریچه عموماً برای طراحی سیستم محرکه آن ضروری است. ارتباط بین فشارهای اندازه گیری شده در مدل و نمونه واقعی از طریق مساوی قراردادن ضرایب فشار یا عدد اویلر بین آنها برقرار می گردد [۶]، یعنی:

$$Eul = K_i = \frac{P_1 - P_r}{\frac{1}{4} \rho V_c^2} \quad (1)$$

حداقل عدد رینولدز در مدل تقریباً $10^5 \times 2/6$ است، که از مقدار بحرانی $10^5 \times 1/65$ بیشتر بوده و لذا می توان از اثرات عدد رینولدز صرف نظر نمود [۵]. لذا، در این روش جهت برقراری تشابه دینامیکی، تنها نیاز به وجود تشابه هندسی بین مدل و نمونه اصلی



شکل ۳: شمای کلی دریچه و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بخش های مختلف آن به همراه شکل عمومی جریان از زیر و بالای دریچه.

$$K_{\gamma} = \frac{\sum (P_{b,i} - P_{b,1}) \Delta S_i}{\left(\frac{1}{\gamma} \rho V_c^2\right) S}, \quad i=2-8 \quad (7)$$

که در این رابطه $P_{b,i}$ فشار در نقطه "i" بر روی لبه پائین دریچه، ΔS_i تصویر جزء سطح زیرین دریچه، مقاوم در مقابل فشار $P_{b,i}$ در جهت افق و S تصویر سطح زیرین دریچه در جهت افق است.

$$K_{\gamma} = (P_1 - P_2) / \left[\frac{1}{\gamma} \rho V_c^2\right] \quad (8)$$

$$K_{\gamma} = (P_2 - P_4) / \left[\frac{1}{\gamma} \rho V_c^2\right] \quad (9)$$

$$K_{\delta} = (P_2 - P_3) / \left[\frac{1}{\gamma} \rho V_c^2\right] \quad (10)$$

$P_j, j=1-4$ معرف فشار استاتیکی در نقاط مختلف از محفظه دریچه می باشند، موقعیت نقاط اندازه گیری فشارهای P_j و $P_{b,i}$ بر روی شکل (۲) نشان داده شده است. جهت برقراری تشابه دینامیکی، ضرائب فوق باید در مدل و نمونه واقعی مساوی باشند. از اینجا می توان نیروهای وارد به قسمت های مختلف دریچه و سپس نیروی کل را محاسبه نمود.

مربوطه را نشان می دهد. نیروهای وارد بر اجزاء فوق عبارتند از: سطح زیرین دریچه:

$$F_b = K_{\gamma} (d - d') b \cdot \left(\frac{1}{\gamma} \rho V_c^2\right) \quad (2)$$

سطح فوقانی دریچه:

$$F_t = K_{\gamma} (d - d') b \cdot \left[\frac{1}{\gamma} \rho V_c^2\right] \quad (3)$$

پوسته دریچه:

$$F_t' = K_{\gamma} d' b \cdot \left[\frac{1}{\gamma} \rho V_c^2\right] \quad (4)$$

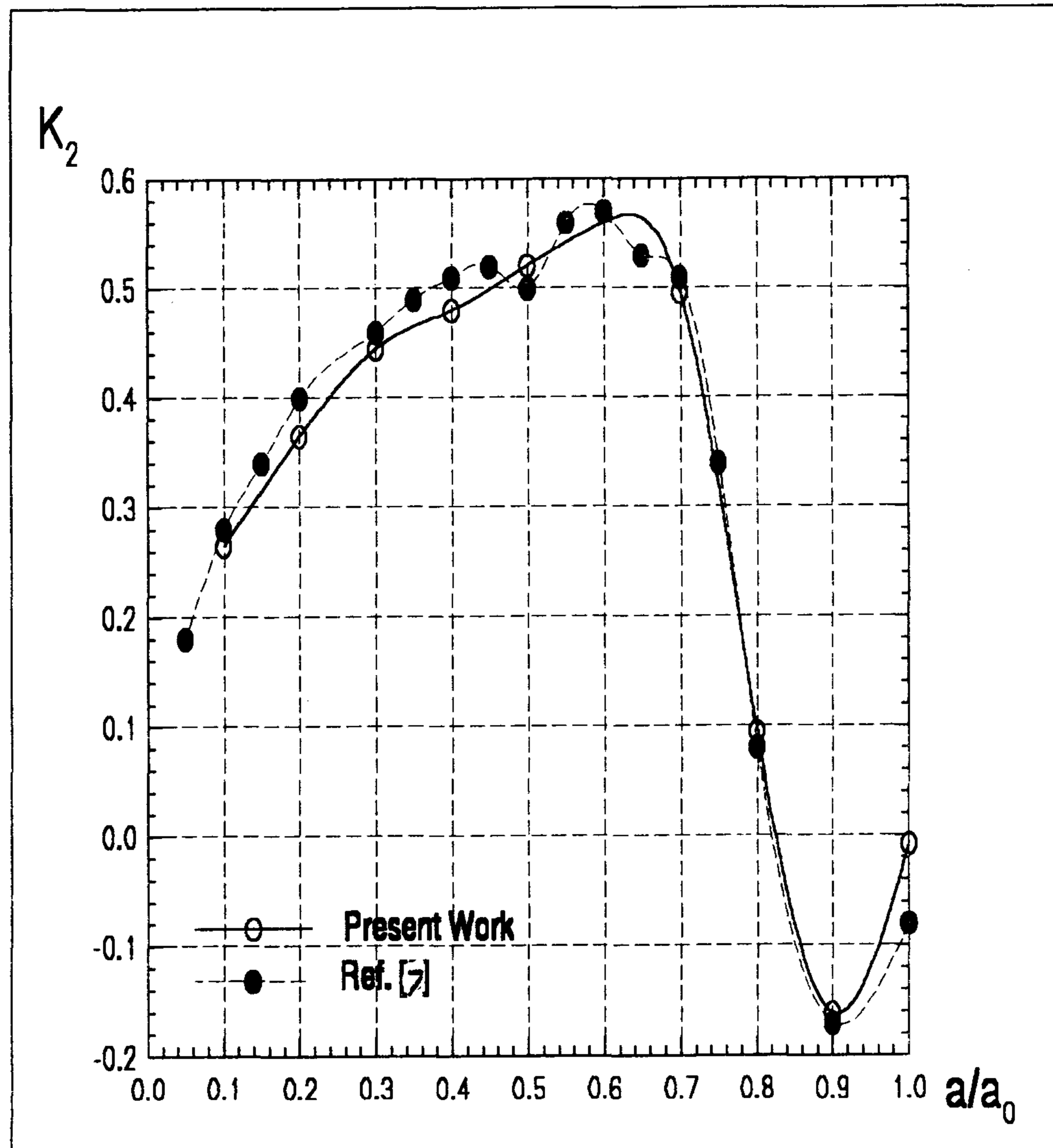
نوار آب بند فوقانی:

$$F_s = K_{\delta} t b \cdot \left[\frac{1}{\gamma} \rho V_c^2\right] \quad (5)$$

برآیند کل نیروهای فوق عبارت است از:

$$F_c = F_b - F_t + F_t' + F_s \quad (6)$$

ضرائب روابط فوق بشرح زیر تعریف می شوند:



شکل ۴: تغییرات ضریب فشار K_2 با میزان بازشدگی نسبی دریاچه.

۴- شیارها، $k_f = 0/005$ ، [۵]

۵- ناحیه انقباض مقطع کانال بعد از دریاچه

الف - افت انقباض، $k_c = 0$

ب - افت اصطکاکی، از دیاگرام مودی، $k_h = 0/006$

با استفاده از معادله (۱۱) مقادیر سرعت در تونل به‌ازاء بازشدگی‌های مختلف دریاچه و از آنجا مقادیر دبی، سرعت جت خروجی از دریاچه و هد دینامیکی جت محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که این محاسبات عمدتاً جهت طراحی دستگاه آزمایش و انتخاب ارتفاع مخزن آب لازم به منظور تامین دبی آب مورد نیاز در آزمایش مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدیهی است که دبی واقعی آب توسط سرریز اندازه‌گیری شده است که نتایج در جدول (۱) ارائه شده‌اند. محاسبات سازگار بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند.

نتایج و بحث

با اندازه‌گیری فشار در نقاط تعیین شده بر روی دریاچه و محفظه اطراف آن، توسط ترانس‌دیوسر فشار، ضرایب هیدرودینامیکی K_i ، $i=2-5$ محاسبه شده و مقایسه آنها به‌ازاء

محاسبه سرعت در زیر دریاچه کثوئی

از آنجاکه مدل کردن کل تونل از ورودی تا دریاچه‌ها بطور کامل مستلزم هزینه و زمان بسیار زیادی بوده و نیز بمنظور حذف خطاهای ناشی از عدم رعایت تساوی اعداد رینولدز و مقیاس زبری سطوح، مقدار سرعت در تونل و در زیر دریاچه کثوئی براساس اطلاعات تجربی موجود در مراجع، برای ضرایب افت محاسبه گردیده و این مقادیر، پس از اعمال مقیاس، در مدل بکار رفته‌اند. با استفاده از معادله برنولی و معادله پیوستگی، سرعت در تونل

بشرح زیر بدست می‌آید:

$$V_d = \sqrt{\frac{2gH}{\left(\sum k_i\right) + \left(\frac{S_d}{S_c}\right)^2}} \quad (11)$$

منابع ایجاد افت و ضرایب افت مربوطه عبارتند از:

۱- ورودی تونل، $k_1 = 0/1$

۲- اصطکاک تونل، از دیاگرام مودی، $k_f = 0/264$

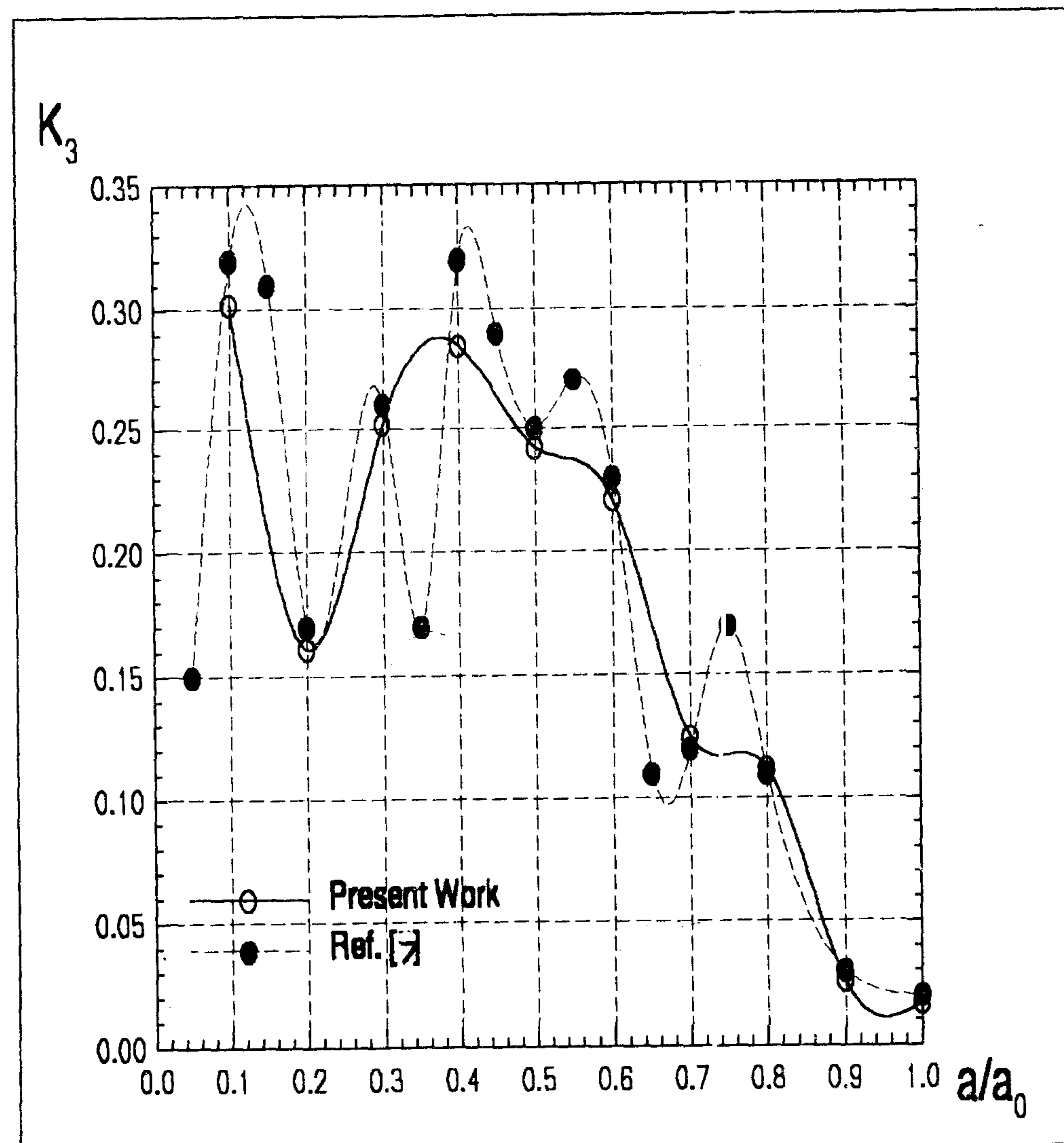
۳- ناحیه تبدیل مقطع کانال از دایره به مستطیل قبل از دریاچه،

الف - افت انبساط، زاویه معادل مساوی $2/5^\circ$ ، $k_e = 0$ ، [۴]

ب - افت اصطکاکی، از دیاگرام مودی، $k_f = 0/02$

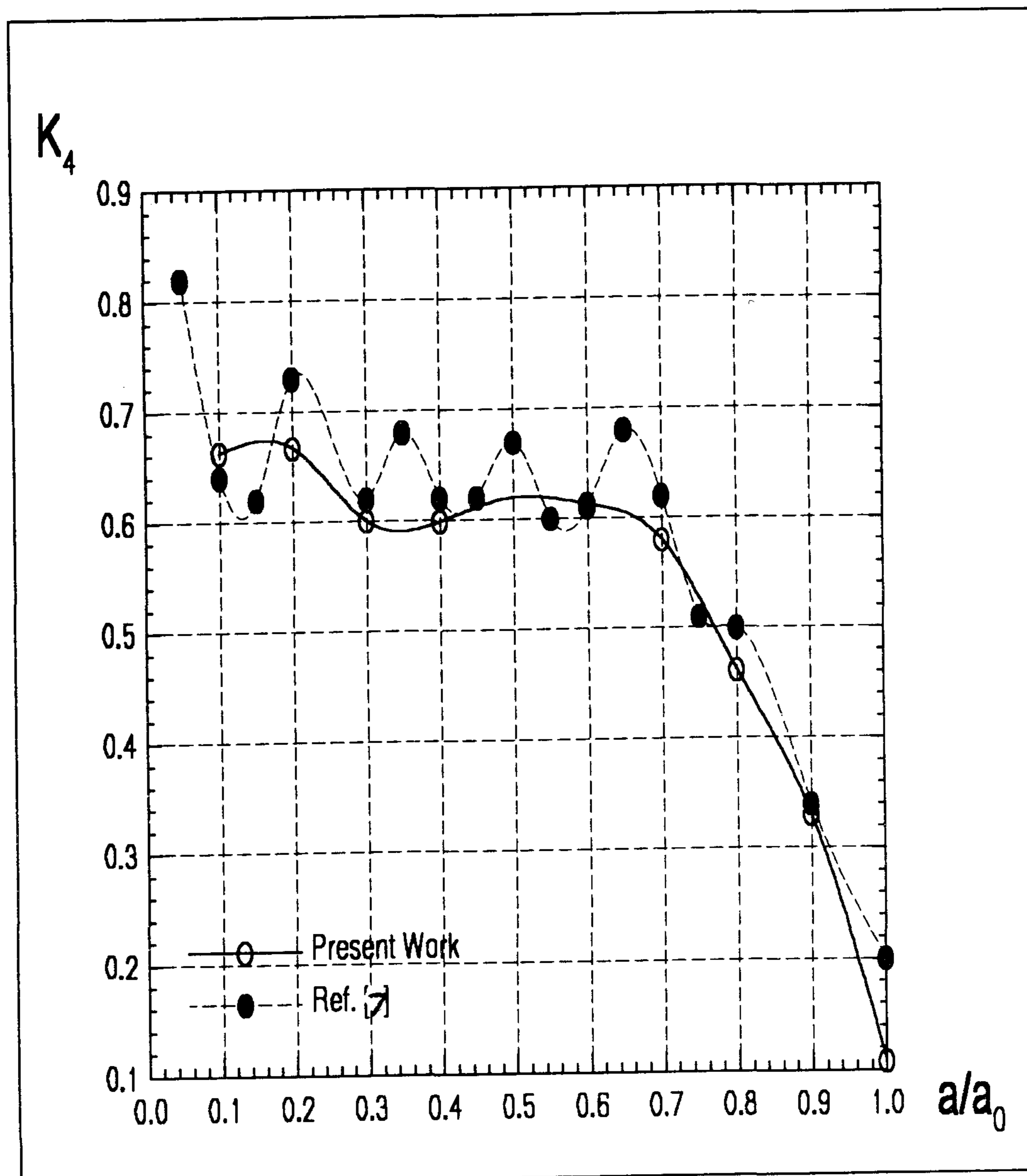
جدول ۱: مقادیر سرعت، دبی و هد دینامیکی جهت خروجی از زیر دریچه.

a/a ₀	ε [6]	S _c = ε . a . b ₀	V _d	Q = V _d . S _d	V _c = Q/S _c	0.5 . ρV _c ²
		[m ²]	[m/s]	[m ³ /s]	[m/s]	[kpa]
0.1	0.745	1.106	3.45	54.93	49.67	1233
0.2	0.746	2.216	6.90	109.8	49.54	1227
0.3	0.747	3.328	10.33	164.3	49.36	1218
0.4	0.749	4.449	13.76	218.8	49.17	1209
0.5	0.752	5.584	17.16	272.8	48.86	1193
0.6	0.758	6.754	20.59	327.3	48.46	1174
0.7	0.769	7.994	24.14	384.9	47.02	1153
0.8	0.788	0.361	27.91	443.8	47.40	1123
0.9	0.825	11.026	32.34	514.2	46.63	1087
1.0	1.0	14.820	41.58	661.2	44.52	991

شکل ۵: تغییرات ضریب فشار K₃ با میزان بازشدگی نسبی دریچه.

جدول ۲: ضرایب فشار مربوط به نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بخش های مختلف دریچه.

a/a_0	K_2	K_3	K_4	K_5
0.1	0.265	0.302	0.643	0.462
0.2	0.365	0.161	0.667	0.438
0.3	0.445	0.252	0.600	0.400
0.4	0.480	0.285	0.599	0.415
0.5	0.521	0.242	0.620	0.433
0.6	0.560	0.221	0.613	0.386
0.7	0.496	0.125	0.580	0.400
0.8	0.095	0.112	0.462	0.318
0.9	-0.161	0.026	0.330	0.272
1.0	-0.008	0.017	0.108	0.090



شکل ۶: تغییرات ضریب فشار K_4 با میزان بازشدگی نسبی دریچه.

P_7 استفاده نشده است، لذا، این ضریب نسبت به میزان بازشدگی دریچه دارای نوسان نیست.

این پدیده باعث شده است که در بازشدگی‌هایی که نتایج اندازه‌گیری آزمایش مدل هیدرولیکی ارائه نشده‌اند، اختلاف بین نتایج اندازه‌گیری شده مدل آئرو دینامیکی و مقادیر حاصل از درون‌یابی نتایج آزمایش مدل هیدرولیکی نسبتاً زیاد باشد. درحالی‌که، نتایج K_7 در شکل ۴ که مستقل از نوسانات P_7 است، برای هر دو آزمایش کاملاً باهم نزدیک هستند.

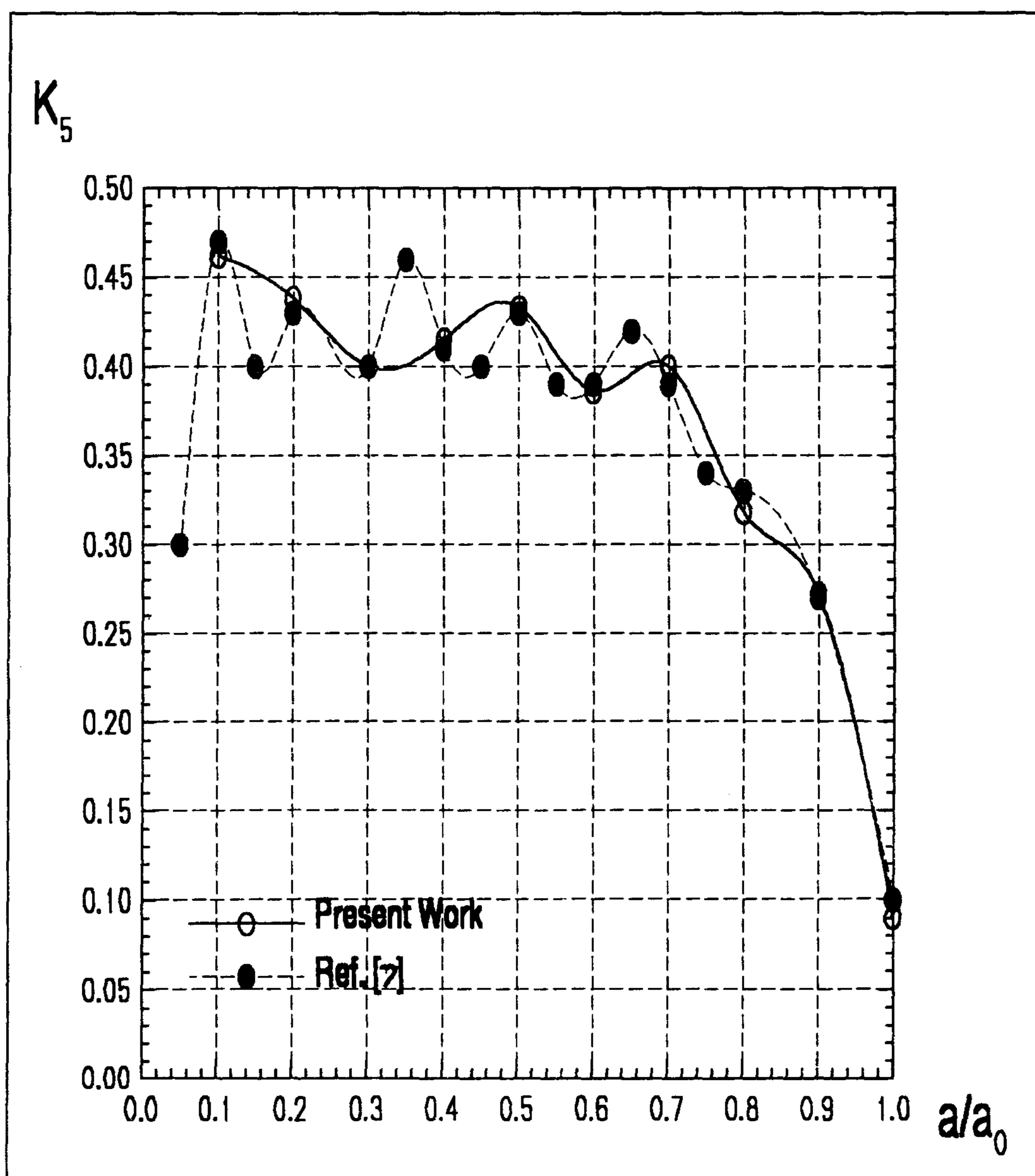
بطور کلی مقایسه نتایج آزمایشات مدل هیدرولیکی و آئرو دینامیکی نشان می‌دهد که هر دو روش دارای دقت مشابهی هستند، درحالی‌که مزایای بسیار زیادی را برای استفاده از سیال هوا بجای آب می‌توان برشمرد [۳].

ساخت مدل آئرو دینامیکی بسیار سریع‌تر و کم هزینه‌تر از ساخت مدل هیدرولیکی بوده و می‌توان آنها را از مواد بسیار سبک ساخت، لذا، ساخت و اعمال اصلاحات بر روی آنها بسادگی صورت می‌پذیرد. بمنظور اعمال سریع برخی تغییرات بر روی هندسه مرزها و مشاهده جریان، می‌توان از خاک رس، خمیرهای مخصوص و چوب استفاده نمود. از مزایای دیگر استفاده از سیال هوا می‌توان

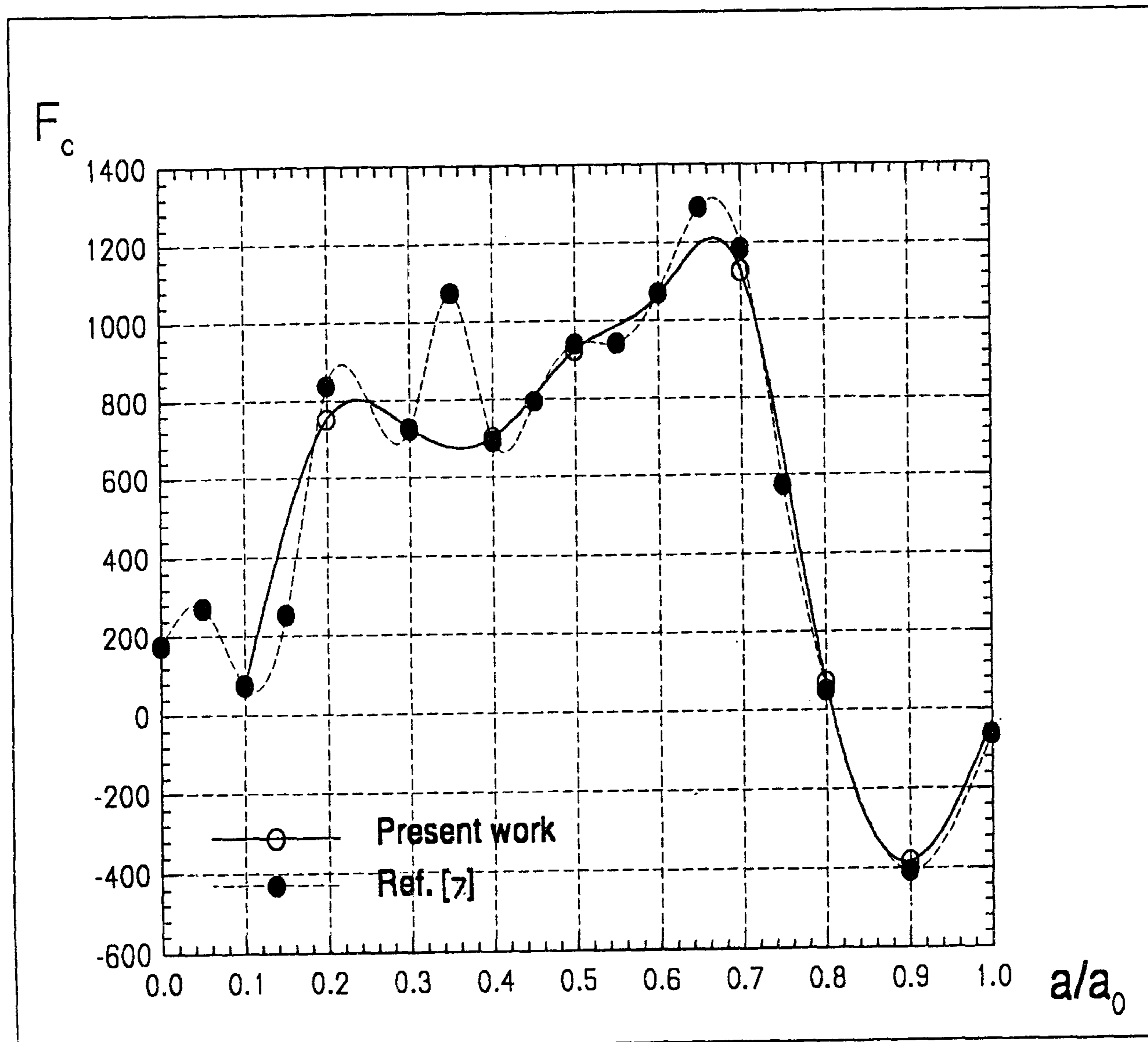
بازشدگی‌های مختلف در جدول (۲) داده شده‌اند. تغییرات ضرائب فوق با میزان بازشدگی دریچه در اشکال (۴) الی (۷) با مقادیر حاصل از آزمایش مدل آئرو دینامیکی [۲] مقایسه شده‌اند. همانگونه که دیده می‌شود نتایج حاصل از دو آزمایش مدل هیدرولیکی و آئرو دینامیکی سازگاری بسیار خوبی دارند. سپس با استفاده از ضرائب فوق و معادلات (۲) الی (۵) نیروهای وارد بر اجزاء مختلف دریچه و سپس با استفاده از معادله (۶) برآیند این نیروها که همان نیروی هیدرو دینامیکی وارد بر دریچه است محاسبه می‌گردد. کلیه نیروهای فوق برای بازشدگی‌های مختلف دریچه در جدول (۳) داده شده‌اند. در شکل (۸) تغییرات نیروهای هیدرو دینامیکی با درصد بازشدگی دریچه نشان داده شده و با نتایج حاصل از آزمایش مدل آئرو دینامیکی مقایسه گردیده است. نوسانات موجود در ضرائب هیدرو دینامیکی K_3 ، K_4 و K_5 بدلیل هندسه خاص دریچه می‌باشد که به‌ازاء بازشدگی‌های مختلف سطح مقطع معبر عبور آب از ناحیه بالادست جریان به محفظه بالائی دریچه تغییر می‌یابد. این تغییرات باعث تغییر در فشار P_7 شده و نهایتاً بر روی ضرائب هیدرو دینامیکی مربوطه تاثیر می‌گذارد. همانگونه که دیده می‌شود، چون در تعریف K_7 از

جدول ۳: نیروهای هیدرو دینامیکی وارد بر بخش‌های مختلف دریچه و برآیند آنها F_c .

a/a _o	F _t [KN]	F _b [KN]	F' _t [KN]	F _s [KN]	F _c [KN]
0.1	850	746	106	76	78
0.2	451	1022	109	72	752
0.3	700	1265	98	65	728
0.4	786	1324	97	67	702
0.5	659	1418	99	69	927
0.6	599	1500	96	61	1065
0.7	329	1305	90	62	1128
0.8	287	243	69	47	72
0.9	64.5	-403	48	39	-381
1.0	39	-18	15	12	-30



شکل ۷: تغییرات ضریب فشار K_5 با میزان بازشدگی نسبی در بچه.



شکل ۸: تغییرات نیروی هیدرودینامیکی (برحسب kN) وارد بر در بچه در جهت قائم با میزان بازشدگی نسبی در بچه.

تشکر و قدردانی

کارحاضر در قالب طرح پژوهشی از طرف معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف حمایت مالی شده است. ساخت مدل و انجام آزمایش با استفاده از امکانات و تجهیزات مرکز تحقیقات آب در محل این مرکز انجام شده است. بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف و مرکز تحقیقات آب تشکر و قدردانی می‌نمائیم.

فهرست علائم

- a : میزان بازشدگی دریچه
 Q_a : دبی عبوری از زیر دریچه
 a : ارتفاع تونل (ماکزیمم بازشدگی دریچه)
 Re : عدد رینولدز ($= \rho d V_c / \nu$)
 b : عرض تونل
 S_1 و S_2 : عرض شیار بین دریچه و محفظه دریچه،
 b_1 : عرض تونل در محل آب بندی‌های جانبی بترتیب دربالادست و پائین دست
 d : ضخامت کل دریچه
 S_c : سطح مقطع جریان در محل انقباض بعد از دریچه
 d' : ضخامت دریچه بدون پوسته
 S_d : سطح مقطع تونل در ناحیه قبل از دریچه
 Eul : عدد اویلر
 t : ضخامت آب‌بندی بالایی
 H : هد آب در محل دریچه
 V_c : سرعت جت آب در کمترین مقطع
 k_i : ضرایب افت ($i=1-5$)
 V_d : سرعت آب در تونل قبل از دریچه
 k_c : ضریب افت انقباض
 k_e : ضریب افت انبساط

حروف یونانی

- K_i : ضرایب فشار هیدرودینامیکی ($i=1-5$)
 ε : ضریب انقباض جت خروجی از زیر دریچه
 Q : دبی کل عبوری از تونل
 ρ : دانسیته
 Q_1 : دبی عبوری از بالای دریچه
 ν : ضریب لزجت سینماتیک

عدم نیاز به مخزن ذخیره هوا و امکان تخلیه هوا به محیط و نیز امکان استفاده از مدل‌های برش خورده قطاعی برای تجهیزاتی که تقارن محوری دارند را نام برد.

در اینجا لازم است به برخی از نکات و بعضاً کاستی‌های استفاده از مدل‌های آئرو دینامیکی نیز اشاره نموده و توجه کاربرها را به آنها معطوف نمود. یکی از این موارد اثرات تراکم‌پذیری هواست که چنانچه سرعت در محدوده سرعت جریان‌های تراکم‌ناپذیر حفظ شود می‌توان مستقیماً از فرمول‌های جریان تراکم‌ناپذیر استفاده نمود. موضوع دوم عدم امکان مشاهده کاویتاسیون است، که در اینجا لازم است از شاخص‌های بحرانی کاویتاسیون موجود در مراجع استفاده نمود و اعداد کاویتاسیون مربوط به نواحی بحرانی و در معرض کاویتاسیون را با آنها مقایسه نموده و از عدم وقوع کاویتاسیون اطمینان حاصل نمود. امکان استفاده مستقیم از پیرومتر جهت اندازه‌گیری فشار نیز در اینجا وجود نداشته و لازم است از وسائل دقیق‌تر اندازه‌گیری نظیر ترانسدیوسر فشار استفاده شود.

به‌عنوان آخرین مورد می‌توان به استفاده از سیال هوا بجای آب جهت انجام آزمایش مدل ارتعاشی اشاره نمود. در اینجا بدلیل تفاوت در جرم افزوده و اثرات میراکنندگی این دو سیال بهتر است که مستقیماً از آب استفاده شود.

نتیجه‌گیری

دریچه کشوئی تونل تخلیه تحتانی سد مارون مورد آزمایش مدل هیدرولیکی قرار گرفت. نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر دریچه محاسبه شده با استفاده از نتایج تست مدل هیدرولیکی در مقایسه با نتایج بدست آمده از تست مدل آئرو دینامیکی برای همین دریچه، که در کشور جمهوری چک انجام شده است، سازگاری بسیار خوبی را نشان می‌دهد. لذا، با انجام این آزمایش، اولاً، دانش فنی تست مدل هیدرولیکی این نوع دریچه‌ها تا حدود زیادی کسب شده و بسیاری از ابهامات موجود برطرف گردید. بطوریکه، هم‌اکنون بخش مستقلی جهت آزمایش مدل هیدرولیکی دریچه‌های تحت فشار در مرکز تحقیقات آب بوجود آمده است. ثانیاً، نتایج نشان می‌دهد که در صورت جمع بودن شرایط، جهت پیش‌بینی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر دریچه‌های تحت فشار، با اطمینان کامل می‌توان از آزمایش مدل آئرو دینامیکی استفاده نمود. لیکن، در آزمایش مدل آئرو دینامیکی امکان بررسی مشاهده‌ای کاویتاسیون وجود ندارد.

مراجع

- ۱ - صادقی پور، م. ص.، مهدیقلی، ح. و کاویانی، س. "تحلیل ارتعاش ناشی از جریان در دریچه کشوئی تونل تخلیه تحتانی سد مارون - آزمایش مدل فیزیکی." مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه شیراز، ۴۸۹ تا ۴۹۸، اردیبهشت (۱۳۷۵).
- 2 - Danek, M., Jaros, F. and Sulc, J. (1994). "The bottom outlet twin gate marun-model research." *Water Management Research Institute, Brno Technical University.*
- 3 - "Hydraulic laboratory techniques." (1980). *US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.*
- 4 - Levin, L. (1968). "Formularie des conduites forcees." *Oleoduces et Conduites d'Aeration, Dunod, Paris.*
- 5 - Naudascher, E. (1991). "Hydrodynamic forces." *LAHR, Netherland.*
- 6 - Sagar, B. T. A. (1977). "Downpull in high-head gate instalations." *Water Power and Dam Construction, No. 3,4 and 5, PP. 38,52 and 29.*
- 7 - Slisskij, S. M. (1970). "Gidravlika zdaniy gidroelektrostancij." *Energija, Moskova.*
- 8 - Wickert, G. and Schmausser, G. (1971). *Stahlwasserbau. Springer, Berlin.*