

تأثیر صفحات عمودی در استهلاک گرداب با استفاده از نتایج تجربی

سید محمود برقی* و داود رجیبی سیاهبومی**

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۷۸/۵/۱۶ - دریافت نسخه نهایی: ۷۸/۱۲/۷)

چکیده - مطالعه حاضر به منظور بررسی کاهش درصدی گرداب در لوله‌های عمودی صورت گرفته است. برای استهلاک گرداب راه‌های گوناگونی وجود دارد که یکی از ساده‌ترین و در عین حال موثرترین آنها، استفاده از صفحات عمودی در دهانه ورودی آبگیرها و در نتیجه دور کردن سیال در حال دوران از میدان چرخش است. حذف گرداب می‌تواند به صورت کامل و یا به صورت درصدی باشد که در این مقاله، هدف حذف درصدی گرداب (استهلاک گرداب) است. بدین منظور صفحات مستطیل شکل با ابعاد مختلف در موقعیتهای گوناگون نسبت به راس ورودی لوله مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. درصد کاهش گرداب برای هر حالت در دبی ثابت بررسی شده است، به طوری که در یک دبی سه ارتفاع آب بر روی لوله ورودی اندازه‌گیری و تحلیل شده‌اند، ارتفاع آب بدون صفحه ($H_{n,p}$)، ارتفاع آب با صفحه (H) و ارتفاع آب با حذف کامل گرداب ($H_{n,v}$) آزمایشها برای سه قطر لوله (D) به قطرهای 5، 7.5 و 10 cm انجام گرفته است. ابعاد صفحات انتخابی و موقعیت قرارگیری آنها بر مبنای ضریبی از قطر لوله‌ها انتخاب شده تا نتایج بدون بعد ارائه شوند. نتایج مربوط به بیش از ۶۰۰۰ آزمایش با متغیرهای دبی، قطر، ابعاد صفحه و محل قرارگیری صفحه نشان می‌دهند که می‌توان با استفاده از یک صفحه مستطیلی به ابعاد نسبتاً بسیار کوچک ($D \times 1.5D$) تا حدود ۸۰ درصد تأثیر گرداب را کاهش داد. نهایتاً نتایج به صورت جدولها و نمودارهایی که برای هر ابعاد صفحه بهترین حالت محل قرارگیری آن را نشان می‌دهد ارائه شده‌اند.

Effect of Vertical Plates on Reducing Vortex Using Experimental Data

S. M. Borghei and D. Rajabi Siahboomi

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

ABSTRACT- This paper is about experimental results for partial reduction of vortex at vertical pipe intakes. One of the easiest and practical ways of reducing vortex effect is to use anti-vortex plates or baffles. These plates can be used to avoid the vortex completely or partially. This paper will concentrate on the latter case. Rectangular plates with different dimensions have been placed at different positions to the intake pipe. Three different pipe diameters (D), 50, 75 and 100 mm, have been used. Vortex reduction percentages have been measured for each case at a constant discharge in such a way that at a given discharge, three water heads on intake pipe, namely, the water head without plate ($H_{n,p}$), water head with plate (H), and water

** - کارشناس ارشد

** - استادیار

head with complete vortex avoidance ($H_{n,v}$), have been measured and analyzed. Plate dimensions and positions have been chosen as a multiple of pipe diameter in order to analyze and introduce the results in nondimensional form. The results of more than 6000 data points show that a plate as small as $D \times 1.5D$ at the right position can reduce the vortex effect and, hence, increase, the discharge for the same head by 80%. Finally the results are presented in graph and tables format for each plate, showing the effect at best plate positions.

۱- مقدمه

پدیده گرداب به علت اثر متقابل و پیچیده بین هندسه اطراف آبگیر (نظیر فضاهاى مرده و غیره)، سرعت جریان، نیروی ثقل، حرکت وضعی زمین و خصوصیات سیال از قبیل کشش سطحی و لزجت در مواقع خروج آب از سازه‌های آبی نظیر روزنه‌ها، دریچه‌ها، کانالها، کالورتها و لوله‌های عمودی و افقی و سرریزهای نیلوفری تشکیل می‌شود. همچنین هرگاه عمق آب در بالای راس لوله ورودی به اندازه کافی نباشد (کمتر از عمق استغراق)، در موقع ورود آب به لوله، گردابهای قوی با هسته هوا ایجاد می‌شوند.

گاهی اوقات به منظور عبور سریعتر اجسام شناور مثل یخ یا آشغال در جریانهای سیلابی، چرخش در دهانه سرریزهای نیلوفری مؤثر است. همچنین ورودی کمی هوا همراه با یک جریان گردابی بعضاً باعث کاهش خطرات فشار منفی و کاویتاسیون در لوله‌های آبگیر می‌شود. لذا چرخش مختصر آب در دهانه خروجی می‌تواند مطلوب باشد [۱].

در زمینه استهلاک و یا حذف درصدی از گرداب، مطالعاتی انجام نشده است و عمدتاً محققان تحقیقات خود را برای حذف کامل گرداب انجام داده‌اند لذا کمبود اطلاعات در مورد چگونگی حذف بخشی از گرداب محسوس است، که این نوشته این مقوله را با انجام آزمایشها بررسی می‌کند.

گرداب آزاد ابتدا در مرزهای سیال تشکیل می‌شود و با گذشت زمان به داخل سیال ادامه می‌یابد. به طور معمول ابتدا گرداب با سطح آزاد از سطح جریان شروع می‌شود و به تدریج به داخل جریان انتشار می‌یابد. برای مثال در یک سیستم پمپاژ ممکن است گرداب از کف آبگیر (مرز صلب) شروع شود و تا دهانه لوله مکش ادامه یابد [۲]. همچنین در رودخانه و یا جریانهای سیلابی داخل مخازن که جریان آب وجود دارد و آب از لوله عمودی خارج می‌شود، این جریان ممکن است یک نیروی مماسی به جریان گردابی وارد کرده و

گرداب را در عمق تقویت کند.

راههای گوناگونی برای حذف و استهلاک گرداب وجود دارد لیکن بعضاً به خاطر مشکلات اقتصادی و محدودیتهای طراحی، ترجیح داده می‌شود که گرداب با استفاده از روشهای ساده و موثر ضدگرداب مستهلاک شود. یکی از این روشها استفاده از صفحات عمودی در راس ورودی، به منظور قطع خطوط جریان میدان چرخش و در نتیجه دور کردن سیال در حال دوران از میدان چرخش است [۳]. مطالعات انجام شده بر روی آبگیرهای افقی سد شهید عباسپور نشان داده است در حالتی که صفحات عمودی به صورت عمود بر جریان نزدیک شوند و در فاصله معادل نصف عمق استغراق از پیشانی آبگیر قرار گیرند، تاثیر بسیار زیادی در استهلاک پدیده گرداب دارند. همچنین کاربرد صفحه با زاویه بین ۴۵ تا ۷۰ درجه نسبت به محور آبگیر در مقایسه با زوایای دیگر اثر بیشتری بر گرداب گذاشته و قدرت آن را به مقدار زیادی کاهش داده است [۴]. در این مقاله نیز هدف تعیین ابعاد و موقعیت صفحات مستطیلی عمودی به منظور بررسی استهلاک درصدی گرداب در ورودیهای عمودی با استفاده از مدل آزمایشگاهی است. بدین منظور بیش از ۶۰۰۰ حالت مختلف از قطر لوله آبگیر D ، دبی Q ، ابعاد $(a \times b)$ و محل موقعیت صفحه نسبت به راس ورودی لوله (x, y) آزمایش شده تا نتیجه گیری کامل امکانپذیر شود.

۲- مبانی و انواع گرداب

به طور کلی هر ذره متحرکی که در سیال متصور شویم دارای سه حرکت انتقالی، چرخشی و تغییر شکل است. هرگاه این ذره حول مرکزی به فاصله r در یک صفحه دوران کند سرعت مماسی ذره از معادله (۱) و دوران آن از معادله (۲) به دست می‌آید.

$$V_{\theta} = \Omega r \quad (1)$$

$$\Gamma = \oint_s V_{\theta} \cdot ds \quad (2)$$

که در این معادله‌ها؛ $V\theta$ سرعت مماسی ذره، $\Omega(r,t)$ سرعت زاویه‌ای (که به صورت مشتق زمانی زاویه θ تعریف می‌شود) $(\Omega = d\theta/dt)$ ، s مسیر جریان به صورت یک منحنی بسته و Γ پارامتر دوران یا نرخ جریان منتقل شده بر روی مسیر s است.

همچنین هر میدان جریان گردابی شامل دو منطقه گرداب اجباری و گرداب آزاد است که مرز بین این دو ناحیه در مواقعی که خروجی به صورت عمودی از کف مخزن قرار گیرد، در فاصله‌ای به اندازه شعاع خروجی از مرکز گرداب قرار دارد. در ناحیه گرداب اجباری ذرات سیال مانند ذرات یک جسم صلب عمل کرده بنابراین توزیع سرعت مماسی به صورت خطی با شعاع دایره چرخش تغییر می‌کند، و پروفیل سرعت در این ناحیه به صورت سهموی است. در ناحیه گرداب آزاد، سیال دارای حرکت دورانی بوده و سرعت مماسی رابطه معکوس با شعاع چرخش داشته و پروفیل سرعت در این ناحیه به صورت هذلولی است. البته در آبگیرها و حالت‌های مشابه، گرداب اصلی همان گرداب آزاد است [۵ و ۶].

در نزدیکی سطح آب در اثر دوران سیال، نیروی گریز از مرکزی بر ذرات وارد می‌شود که باعث دور شدن ذرات از محور دوران می‌شود و همین امر موجب کاهش فشار در اطراف محور دوران می‌شود. در نزدیکی آبگیر نیز به دلیل تقارب جریان، سرعت افزایش یافته و نتیجتاً باعث افتادگی سطح آب و ورود هوا به داخل آب می‌شود. تا زمانی که در این منطقه فشار بیش از اتمسفر باشد، مانند یک سد، مانع نفوذ هوا به داخل هسته گرداب می‌شود. لذا آبگیر موقعی در معرض ورود هوا قرار دارد که قدرت چرخش و یا دبی آبگیری برای فراهم کردن فشار زیر اتمسفر کافی باشد.

اصولاً گردابها را براساس موقعیت تشکیل، زمان پایداری و شکل ظاهری طبقه بندی می‌کنند. گردابها از لحاظ موقعیت تشکیل به دو دسته گردابهای سطحی (شامل گردابهای دیواری و گردابهای سطح آزاد) و زیرسطحی تقسیم می‌شوند، شکل (۱). براساس زمان پایداری، به دو دسته گردابهای پایدار (دائمی) و زودگذر (غیردائمی) تقسیم می‌شوند. همچنین در ارتباط با قدرت و شکل ظاهری به شش گروه مختلف طبقه بندی شده، شکل (۲)، که گرداب نوع ۶ قویترین و بحرانیترین حالت آن است [۳ و ۷].

۳- راههای تضعیف و حذف گرداب

برای جلوگیری از تشکیل گرداب و یا کاهش قدرت چرخش جریان روشهای متفاوتی وجود دارد. یکی از آنها ایجاد عمق استغراق بر روی دهانه خروجی است. یعنی عمقی که جریان روی دهانه آبگیر حالت استغراق پیدا کرده و در نتیجه گرداب و هسته هوا حذف می‌شوند. برطبق مطالعات انجام شده [۳]، معادله‌های مختلفی برای عمق استغراق در حالت‌های مختلف ارائه شد که معادله کلی را می‌توان به صورت زیر نشان داد.

$$(h/D) = aFr^b + c \quad (3)$$

که h عمق استغراق بحرانی، $Fr = V/\sqrt{gD}$ (عدد فرود آبگیر)، V سرعت جریان در دهانه آبگیر، D قطر آبگیر و a ، b و c اعداد ثابت‌اند که محققان مختلف پیشنهاد کرده‌اند. تنها راه اصلاح آبگیرها (از نظر جلوگیری از تشکیل گرداب و ورود هوا)، تعیین حداقل عمق استغراق بحرانی نیست. ایجاد شرایط مناسب در جریان ورودی، برای کمینه کردن چرخش اولیه و همچنین حذف منابع تشکیل گرداب از روشهای دیگر است. به طور خلاصه راههای پیشگیری یا تضعیف گرداب به صورت زیر ارائه می‌شود [۳ و ۸]:

۳-۱- افزایش دادن طول خطوط جریان متوسط

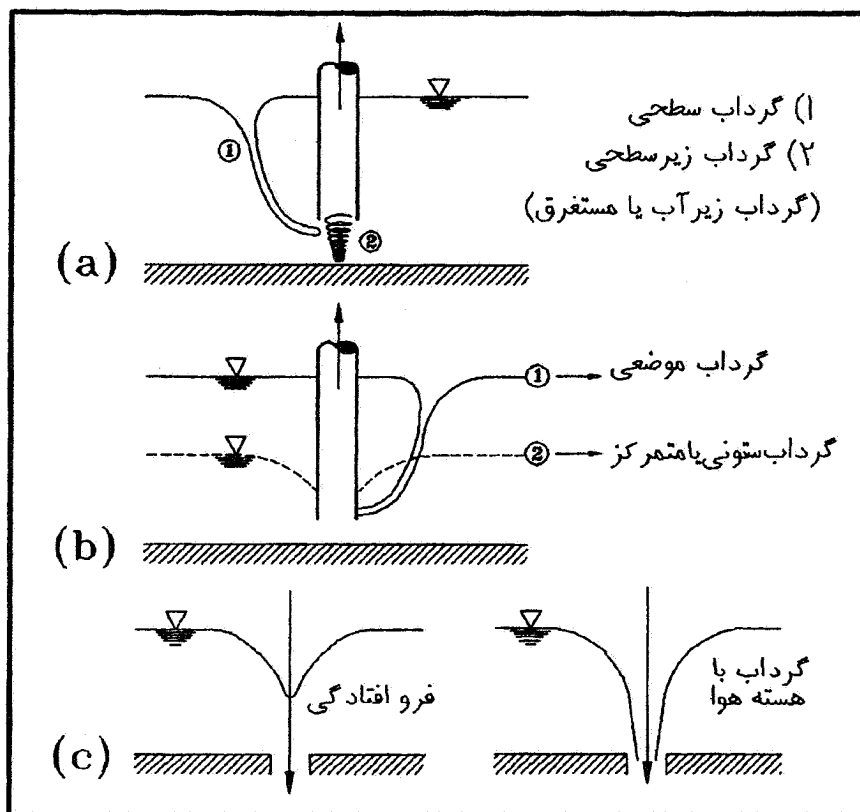
- الف - رعایت عمق کمینه استغراق مجاز بر روی آبگیر با کاهش رقوم دهانه آبگیر یا افزایش تراز سطح آب.
- ب - طولانی کردن خطوط جریان بین دهانه آبگیر و سطح آب با کاربرد صفحات افقی در قسمت پیشانی آبگیرهای افقی و یا سرپوشهایی در بالای دهانه آبگیرهای عمودی.

۳-۲- حذف جریان ثانویه و فعال کردن نواحی ساکن جریان

- الف - با استفاده از لوله‌های تزریق، برجهای مشبک و ...
- ب - با تند کردن شیب اطراف آبگیر و ...

۳-۳- یکنواخت کردن توزیع سرعت جریان

- الف - با تعبیه اجزایی مانند دیواره‌های هدایت و شبکه‌ها
- ب - با جهت دادن جریان به سمت آبگیر قبل از رسیدن به ورودی
- ج - با اصلاح شرایط نامتقارن مرزها
- د - با شکل دادن به پایه‌ها و همچنین سایر اجزای آبگیر در جهت



شکل ۱- انواع گرداب براساس موقعیت ظهور و شکل آنها

الف - مخزن اصلی به صورت استوانه با قطر 100 cm و ارتفاع 80 cm با ورودی جریان از کف و خروجی توسط لوله آبگیر از بالا و وسط

ب - لوله‌های آبگیر با سه قطر 5، 7.5 و 10 cm در وسط مخزن استوانه نصب می‌شوند.

ج - مخزن ذخیره و گردش آب که در زیر مخزن اصلی قرار گرفته و آب خارج شده از مسیر لوله آبگیر به این مخزن وارد می‌شود. د - پمپ گردش جریان با دبی بیشینه 18 m^3 در ساعت که آب را از مخزن ذخیره به مخزن اصلی انتقال می‌دهد.

ه - دبی سنج الکترونیکی

و - صفحات مسطح مستطیلی با ابعاد مختلف، به عنوان صفحات ضد دوران.

ورودی به مخزن اصلی از کف آن صورت می‌گیرد و برای تقویت گرداب آزاد در مخزن اصلی، آب با زاویه وارد مخزن می‌شود. همچنین از فیلترهایی برای آرام کردن ورود جریان به داخل مخزن استفاده شده است.

جلوگیری از جدایی خطوط جریان

ه - با کاهش سرعت ورودی با افزایش سطح مقطع آبگیر

۳-۴ - استفاده از روشهای ویژه ضد گرداب

الف - با کاربرد صفحات شناور

ب - با جلوگیری از چرخش گرداب توسط؛ پره‌ها، شبکه‌ها، میله‌های قطع کننده مخروطه گرداب، صفحات عمودی و

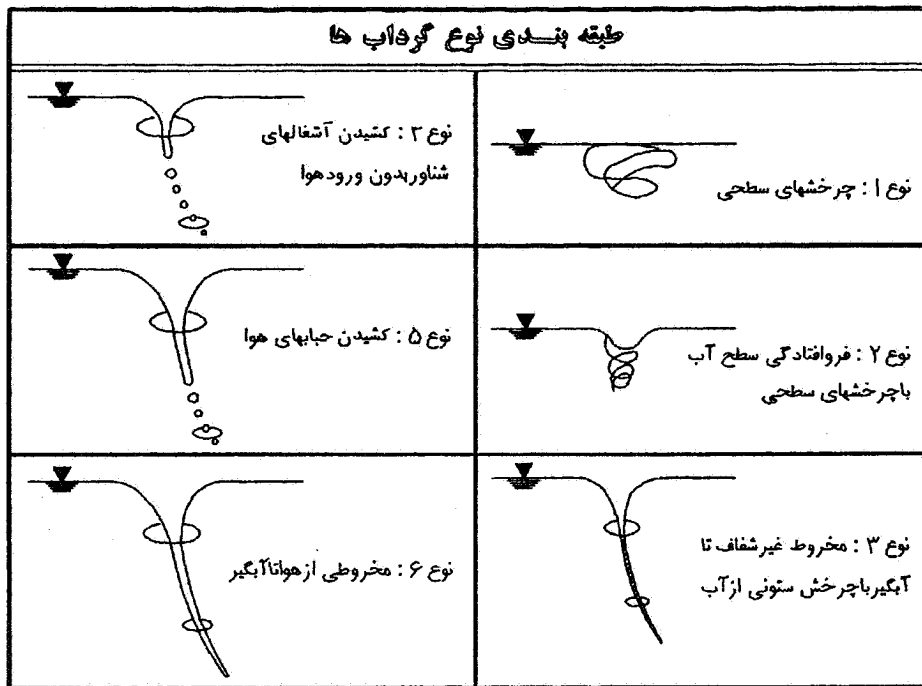
همچنین اعمال افت به جریان

در این مقاله تاثیر صفحات عمودی در حذف درصدی گرداب با

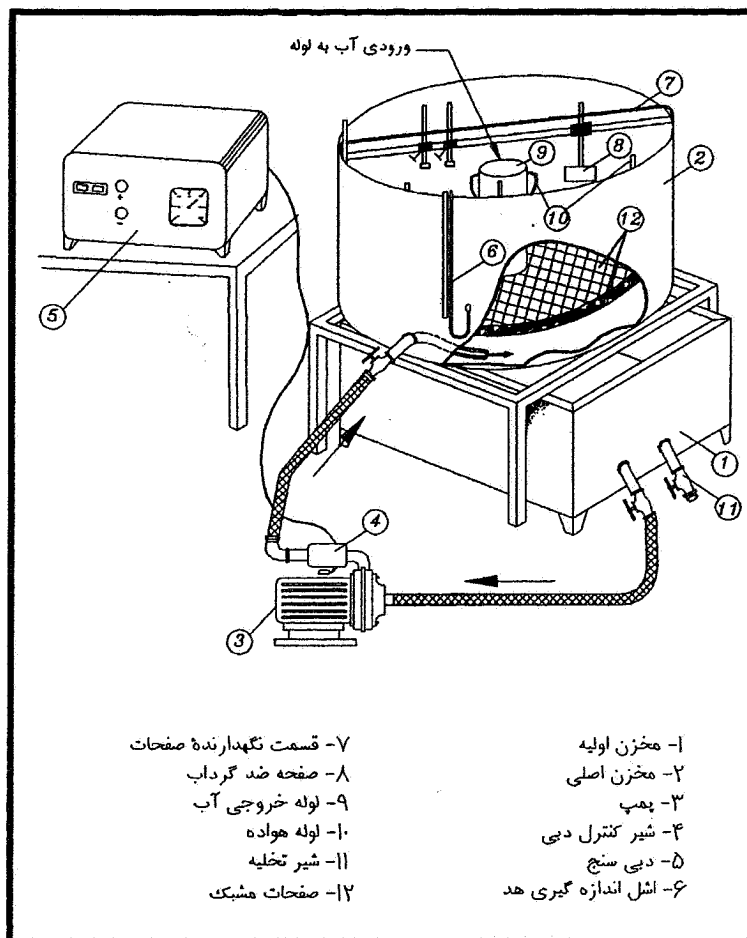
استفاده از مدل فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۴ - معرفی مدل

ابعاد مدل طوری انتخاب شده است که تاثیر نیروهایی همچون کشش سطحی که معمولاً در جریانهای واقعی هیدرولیک مهم نیستند، ناچیز شده و خطاهای مقیاسی حداقل شود. به همین منظور دستگاه آزمایش از اجزای زیر تشکیل شده است، شکل (۳):



شکل ۲- طبقه بندی گردابها براساس قدرت و شکل ظاهری آنها



شکل ۳- نمایی از مدل گرداب

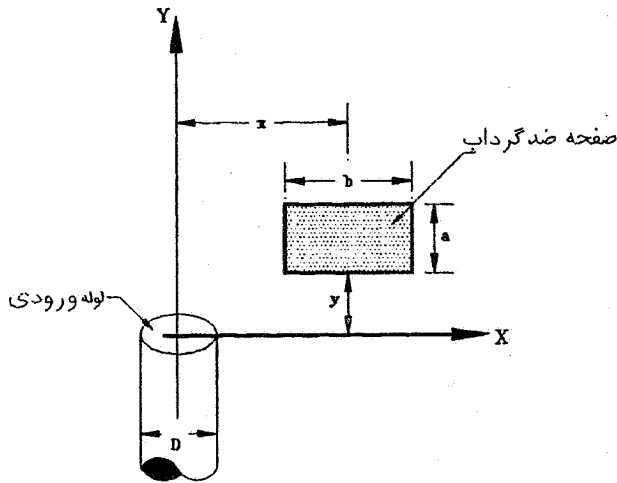
۵- آزمایشها

۵-۱- متغیرها

آزمایشها برای سه لوله خروجی (معادل آبگیر عمودی) با قطرهای 5، 7.5 و 10 cm با لوله تیز انجام گرفته است. لوله 7.5 cm به عنوان لوله مرجع انتخاب شده و کلیه آزمایشها برای آن انجام گرفته است. برای اطمینان از نتایج آزمایش، برای دو لوله دیگر آزمایشها در حدی بوده است که بتوان نتایج را با هم مقایسه و از جمع تمام آزمایشها نتیجه گیری کلی کرد. لذا، تعداد ۱۶ صفحه با ابعاد مختلف برای قطر 7.5 cm مورد آزمایش قرار گرفت. سپس برای لوله‌هایی به قطرهای 5 و 10 cm، تعداد ۸ صفحه مورد آزمایش قرار گرفت که ابعاد ۴ عدد از این صفحات در هر سه قطر (برحسب قطر لوله) مشابه و ابعاد ۴ عدد از صفحات فقط بین دو قطر (5 یا 7.5 cm و یا 10 یا 7.5 cm) مشابه انتخاب شد، جدول (۱). برای هر صفحه، به طور متوسط، ۱۵ موقعیت نسبت به راس ورودی لوله در نظر گرفته شده است. تغییرات ارتفاع آب در هر موقعیت صفحه برای ۱۵ دبی اندازه گیری شده است. شکل (۴) موقعیت یک صفحه را نسبت به راس ورودی لوله (x و y) و جدول (۱) محدوده آزمایشها را به طور خلاصه نشان می‌دهند.

همان طور که در جدول (۱) هم آمده است صفحات مورد آزمایش برای دو قطر لوله 7.5 و 5 cm در پنج عمق (y برابر $2D$ ، D ، صفر، D و $2D$) برابر قرار داده شده‌اند. از این پنج موقعیت عمق y ، دو عمق ($-D$ ، $-2D$) دارای سه موقعیت طولی (x) شامل D (یا $1.5D$ بسته به ابعاد صفحه) $2D$ ، $3D$ بوده است و سه عمق دیگر (صفر، D و $2D$) هر کدام دارای چهار موقعیت طولی (x) شامل صفر، D ، $2D$ و $3D$ هستند.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش صفحات با لوله‌ها 7.5 و 5 cm همچنین محدودیت ظرفیت دبی پمپ، آزمایشها برای قطر لوله 10 cm فقط در عمقهای D ، $2D$ و صفر صورت گرفته است. همچنین به علت محدودیت ابعاد مدل و کاهش تاثیر صفحات بر روی گرداب در عمقها و فواصل دورتر از $3D$ ، نتایج آزمایش صفحات در خارج از این محدوده ارائه نشده است (برای توضیحات بیشتر به مرجع [۹] مراجعه شود).



شکل ۴- نمایی از موقعیت یک صفحه

۵-۲- پارامترهای شاخص

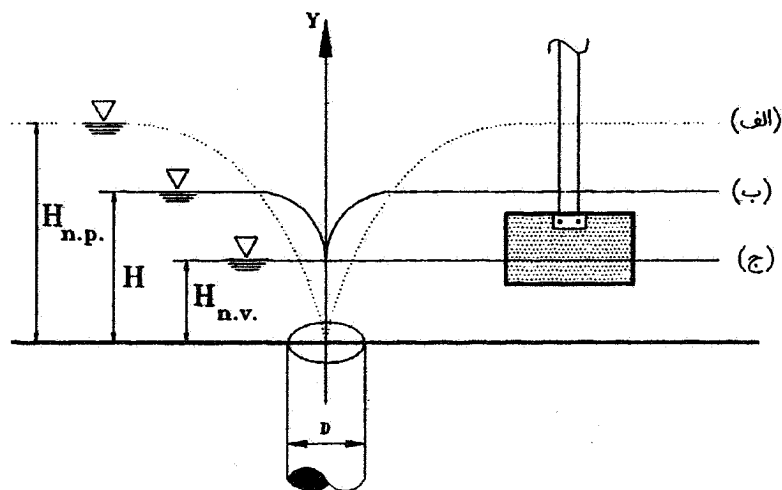
تاثیر صفحه بر روی استهلاك گرداب به این صورت بررسی می‌شود که وجود صفحه باعث کاهش چرخش و ورود هوا شده و از طرفی دبی ورود به لوله افزایش می‌یابد. لذا، به ازای یک دبی ثابت، ارتفاع آب کاهش می‌یابد (و یا به ازای ارتفاع ثابت آب، دبی افزایش می‌یابد). بنابراین در یک دبی ثابت، مقایسه ارتفاع آب بر روی راس لوله در حالت وجود صفحه (H) با ارتفاع آب در دو حالت عدم وجود صفحه ($H_{n.p.}$) و حذف کامل گرداب ($H_{n.v.}$) می‌تواند درصد کاهش گرداب در اثر وجود صفحه را مشخص کند. شکل (۵) سطح آب را در یک دبی ثابت برای سه حالت با صفحه، بدون صفحه و حذف کامل گرداب نشان می‌دهد.

در تمام جدولها و نمودارهای ارائه شده، ابعاد صفحات به صورت $a \times b$ (افقی \times عمودی) نشان داده شده است. به منظور مقایسه قطرهای مختلف و همچنین ارائه نتایج به صورت کلی، لازم است که دبی (Q) به صورت بدون بعد در آید. برای بی‌بعد کردن دبی، تمام دبی‌ها بر دبی Q_0 تقسیم شده است. Q_0 دبی است که بدون استفاده از صفحه و در حالت جریان با گرداب آزاد برای لوله به قطر D ، آب ارتفاعی برابر D ($H_{n.p.} = D$) نسبت به راس لوله داشته باشد.

همچنین اگر متغیری به عنوان بازده تعریف شود در این صورت بر مبنای ارتفاع آب در حالت‌های مختلف به صورت زیر می‌تواند بیان شود:

جدول ۱- مشخصات آزمایشها

ابعاد صفحات مورد آزمایش (افتی X عمودی)		تعداد	تعداد صفحات آزمایش شده (عدد)	صفتهای مورد آزمایش γ	حدود دبیهای مورد آزمایش (m ³ /hr)	قطر لوله D(cm)
*	*	1320	8	-2D, -D, 0, D, 2D	(۴-۱۱)	۵
*	*	4320	16	-2D, -D, 0, D, 2D	(۶-۱۸)	۷/۵
*	*	1728	8	-2D, -D, 0	(۹-۱۸)	۱۰
	2.5D*2.5D					
	2.5D*2D					
	2.5D*1.5D					
	2.5D*D					
	2D*2.5D					
	2D*2D					
	2D*1.5D					
	2D*D					
	1.5D*2.5D					
	1.5D*2D					
	1.5D*1.5D					
	1.5D*D					
	D*2.5D					
	D*2D					
	D*1.5D					
	D*D					



شکل ۵- سطح آب در دبی ثابت برای سه حالت الف- بدون وجود صفحه $H_{n.p.}$ ب- با صفحه H و ج- بدون وجود گرداب $H_{n.v.}$

$$(۴) \quad \text{درصد کاهش گرداب} = \frac{H_{n.p.} - H}{H_{n.p.} - H_{n.v.}} \times 100 = \text{بازده}$$

الف - قطر 7.5 cm

شکل (۶) نمونه‌ای از تاثیر فواصل مختلف x (فاصله افقی صفحه تا مرکز لوله) را در عمقهای مختلف قرارگیری صفحه (از $y=-2D$ الی $y=D$) برای صفحه‌ای به ابعاد $1.5D \times 2D$ نشان می‌دهد.

شکل (۶-الف) تغییرات ارتفاع آب نسبت به دبی در دو حالت نبودن صفحه ($n.p.$) و نبودن گرداب ($n.v.$) همراه با استقرار صفحه در عمق $y=-2D$ و فواصل $\alpha=1.5D$ تا $x=2D$ و $x=3D$ آمده است. مشاهده می‌شود که در این حالتها، استقرار صفحه در موقعیت $x=1.5D$ (نزدیکترین فاصله ممکن صفحه به مرکز لوله خروجی) دارای کمترین ارتفاع آب (H) و در نتیجه بیشترین تاثیر در کاهش درصد گرداب نسبت به سایر فواصل در عمق $y=-2D$ است.

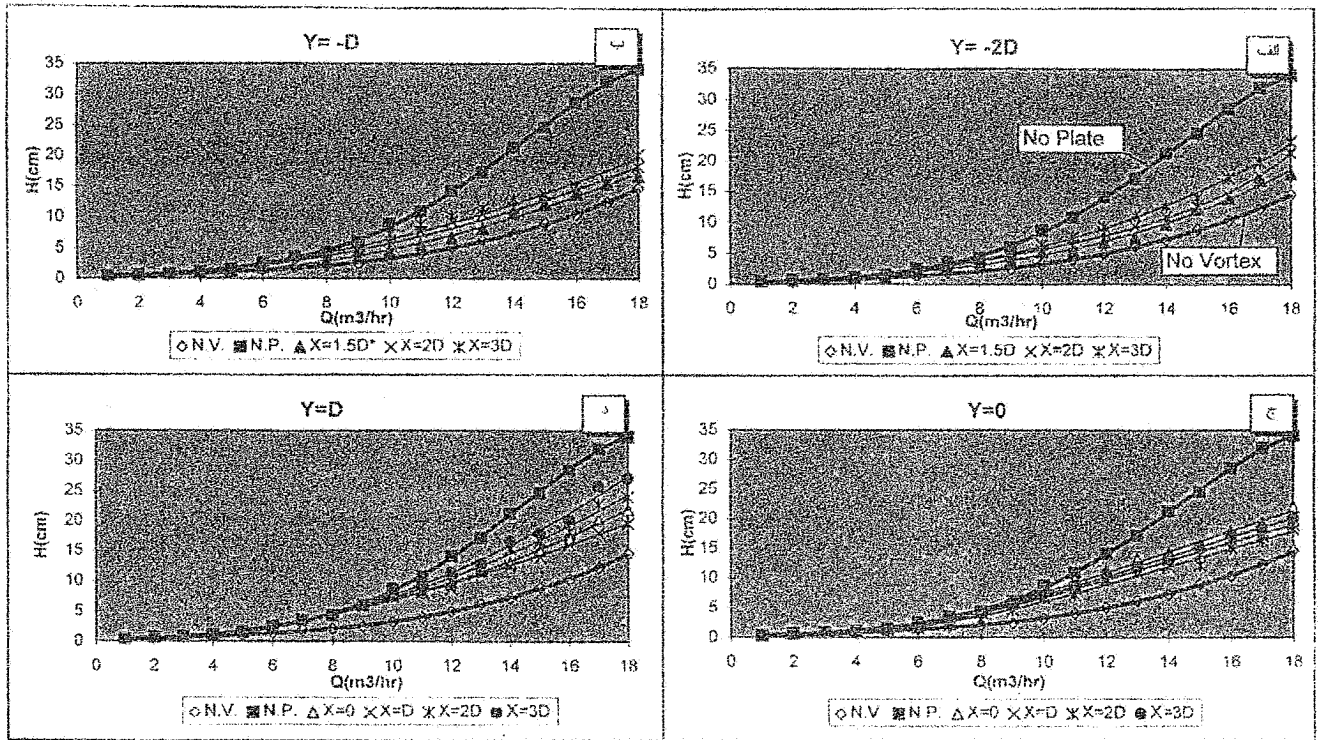
به همین ترتیب شکل (۶-ب) نیز برای استقرار این صفحه در عمق $y=-D$ و همان فواصل $\alpha=1.5D$ تا $x=2D$ و $x=3D$ ترسیم شده است. در این حالت نیز نزدیکترین فاصله به مرکز لوله خروجی ($x=1.5D$) دارای بیشترین تاثیر در کاهش درصد گرداب دارد. زیرا نه تنها به علت قرار گرفتن در عمقی پایتتر از دهانه خروجی موجب اغتشاش نمی‌شوند بلکه نزدیکترین موقعیت را نسبت به گرداب دارند.

که این تعریف مبنای ارائه نتایج خواهد بود.

۶- نتایج

همان طور که ذکر شد، با توجه به تعداد زیاد اندازه‌گیریها، تجزیه و تحلیل نتایج فقط در بهترین موقعیت هر صفحه انجام گرفته است (موقعیتی که استقرار صفحه در آن موقعیت بیشترین تاثیر را در کاهش درصد گرداب دارد). همچنین شایان ذکر مجدد است به خاطر ایجاد یک گرداب متمرکز و پایدار، یک چرخش اجباری لوله در کل عمق مخزن در اثر ورود زاویه‌دار آب، شکل (۳)، در مجرای ورودی از کف مخزن اصلی ایجاد شد. بدین ترتیب نتایج حاصل از این تحقیق تحت تاثیر شرایط ورود جریان و همچنین تاثیر آن در ایجاد چرخش است و لذا کاربرد نتایج حاصله فقط تحت شرایط یکسان توصیه می‌شود (برای مثال لوله آبگیر در رودخانه‌ای که وجود جریان آب از یک طرف لوله باعث یک چرخش اولیه در عمق جریان شود).

همچنین به علت جامعیت آزمایشها و نتایج حاصل برای قطر 7.5 cm، ابتدا نتایج مربوط به این قطر آورده شده است و سپس ضمن مقایسه نتایج سه قطر لوله، نتیجه‌گیری کلی به عمل آمده است.



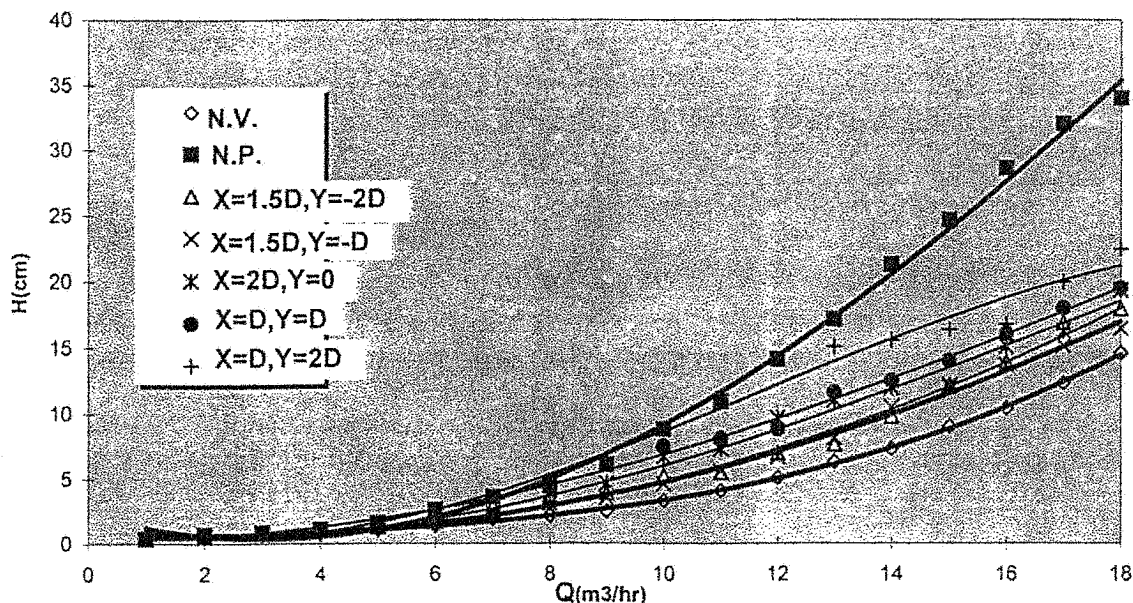
شکل ۶- نمونه‌هایی از نتایج تأثیر فواصل مختلف x در عمقهای آزمایش شده برای صفحه‌ای به ابعاد $A=1.5D \times 2D$ و قطر خروجی 7.5 cm (بدون گرداب = N.V., بدون صفحه = N.P.)

بیشترین تأثیر را در کاهش درصد گرداب داشته است. چنین نتیجه‌ای برای تمام صفحات در $y=2D$ نیز حاصل شده است (نتایج $y=2D$ ارائه نشده است). علت آن را می‌توان چنین ذکر کرد که در فاصله $x=0$ به علت قرارگیری صفحه در مرکز گرداب، که معمولاً هسته هوا وجود داشته و خالی از آب است، این موقعیت نقش چندانی در استهلاک گرداب ندارد. همچنین دو موقعیت $x=2D$ و $x=3D$ به علت دور بودن از مرکز و میدان چرخش نقش بسیار کمی در استهلاک گرداب از خود نشان داده‌اند. حتی قرارگیری صفحه در موقعیت $x=0$ دارای تأثیر بیشتری در حذف گرداب نسبت به دو حالت دیگر دارد.

اگر از بین تمام حالت‌های بالا موثرترین فواصل هر عمق را انتخاب در کنار هم رسم کنیم یک عمق و یک فاصله به عنوان موثرترین موقعیت به دست می‌آید. چنین نموداری در شکل (۷) برای این صفحه رسم شده است. چنانچه مشاهده می‌شود موقعیت بهترین و موثرترین موقعیت انتخاب شده است. شکل (۸)

همچنین شکل (۶-ج) نیز همین تأثیر را برای این صفحه در عمق $y=0$ و فواصل $x=0$ و $x=D$ و $x=2D$ و $x=3D$ نشان می‌دهد. در این عمق، فاصله $x=2D$ دارای بیشترین تأثیر در کاهش درصد گرداب است. طبق آزمایشهای انجام شده در این عمق، برای صفحاتی با بعد افقی کوچک ($b=D$)، فاصله $x=D$ تأثیر مثبت‌تری نسبت به فاصله $x=2D$ دارد. استقرار صفحات در این عمق و فواصل $x=0$ و $x=D$ به علت نزدیک بودن به دهانه خروجی و وجود گرداب اولیه، موجب اغتشاش در دهانه شده و در نتیجه مانع عبور آب می‌شود. این تأثیر چنان شدید است که حتی استقرار صفحه در فاصله $3D$ تأثیر مثبت‌تری نسبت به استقرار آن در موقعیت $x=0$ دارد. صفحات با بعد افقی D (به علت کوچک بودن این بعد) تأثیرشان در فواصل دور کمتر شده و در نتیجه برای این گونه صفحات و این عمق، فاصله $x=D$ تأثیر بیشتری نسبت به سایر فواصل دارد.

بالاخره، شکل (۶-د) برای موقعیت صفحه در عمق $y=D$ است. همان طور که مشاهده می‌شود، در این عمق، فاصله $x=D$



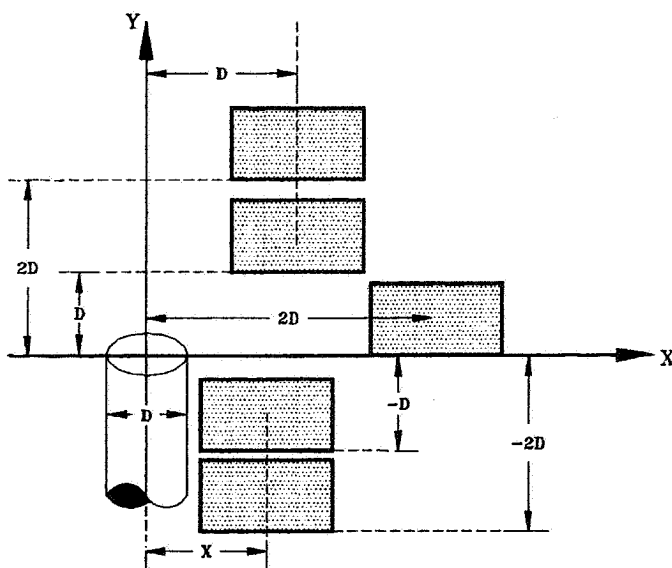
شکل ۷- رسم مؤثرترین موقعیتها برای صفحه‌ای به ابعاد $1.5D \times 2D$

ب - قطرهای 5 و 10 cm

اطلاعات مربوط به آزمایشها و نتایج آن برای لوله‌های با قطر خروجی 5 و 10 cm در شکلهای و جدولهایی مانند نتایج مربوط به قطر 7.5 cm آورده شده است. از آنجا که نتایج مربوط به این دو قطر نیز بسیار نزدیک به حالت $7/5$ است لذا از آوردن نتایج به صورت مجزا خودداری شده و برای این منظور می‌توان به مرجع [۹] مراجعه کرد. اما مقایسه کلی نتایج و جمع‌بندی آنها در قسمت بعد انجام گرفته است.

۶-۱- مقایسه نتایج حاصل از هر سه قطر لوله خروجی

نتایج حاصل از تحلیل آزمایشهای دو قطر دیگر (5 و 10 cm) نیز، نتایج حاصل از قطر 7.5 cm را تایید می‌کنند. تغییرات درصد کاهش گرداب (راندمان) در مقابل Q/Q_0 و همچنین حدود تغییرات 5 و 10 درصد برای سه قطر لوله رسم شده است که نمونه‌ای از آن برای قطر 7.5 cm در شکل (۹) نشان داده شده است. همان طور که از شکل هم مشخص است هر چه ابعاد صفحه بزرگتر می‌شود تاثیر صفحه در استهلاک گرداب فارغ از نسبت Q/Q_0 و یا دبی است. از آنجا که امکان ارائه کلیه نتایج بدین صورت امکان ندارد (برای کل نتایج به مرجع [۹] مراجعه شود)، لذا نتایج آنها در جدول (۳) آمده است. تفسیر نتایج در جدول (۳) را می‌توان بدین



شکل ۸- مؤثرترین موقعیت صفحات

مؤثرترین فاصله (X) برای صفحات را در عمقهای مختلف نشان می‌دهد. مراحل بالا برای تمام صفحات با ابعاد گوناگون انجام شده که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. جدول (۲) اطلاعات مربوط به مؤثرترین (بهترین) موقعیت هر صفحه (قسمت الف) و درصد کاهش گرداب بر اثر وجود آن صفحه در موقعیت استقرار مناسب (قسمت ب) را نشان می‌دهد.

جدول ۲- اطلاعات بهترین موثقت هر صفحه و درصد کاهش گرداب در آن موثقت برای قطر 7.5 cm الف - جدول بهترین موثقت برای هر صفحه با ابعاد معین

Q (m ³ /hr)	بدون گرداب (HnV)	بدون صفحه (Hn.p)	D*1.5D Y=-D X=1.5D	2D*2D Y=-D X=1.5D	2.5D*2.5D Y=-2D X=2D	D*2.5D Y=-D X=1.5D	2D*2.5D Y=-D X=8D	1.5D*2.5D Y=-D X=1.5D	D*2D Y=0 X=D	1.5D*2D Y=-D X=1.5D	D*2D Y=0 X=D	1.5D*D Y=0 X=D	2D*D Y=-D X=D	2.5D*D Y=-D X=D	2D*1.5D Y=-D X=1.5D	2.5D*1.5D Y=-D X=1.5D	2.5D*2D Y=-D X=1.5D	Q/Q ₀	H _g (m)
۶	۱/۴	۷/۹	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴
۷	۱/۹	۳/۵	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹
۸	۱/۵	۲/۳	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۹	۱/۳	۲/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳
۱۰	۲/۳	۱/۲	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳
۱۱	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۳	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۴	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۶	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۷	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۸	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲

ب - جدول درصد کاهش گرداب برای بهترین موثقت برای هر صفحه با ابعاد معین

Q (m ³ /hr)	Q/Q ₀	H _g (m)	D*1.5D Y=-D X=1.5D	2D*2D Y=-D X=1.5D	2.5D*2.5D Y=-2D X=2D	D*2.5D Y=-D X=1.5D	2D*2.5D Y=-D X=8D	1.5D*2.5D Y=-D X=1.5D	D*2D Y=0 X=D	1.5D*2D Y=-D X=1.5D	D*2D Y=0 X=D	1.5D*D Y=0 X=D	2D*D Y=-D X=D	2.5D*D Y=-D X=D	2D*1.5D Y=-D X=1.5D	2.5D*1.5D Y=-D X=1.5D	2.5D*2D Y=-D X=1.5D	Q/Q ₀	H _g (m)
۶	۰.۶۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۷	۰.۷۴	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۸	۰.۸۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۹	۰.۹۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۰	۱.۰۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۱	۱.۱۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۲	۱.۲۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۳	۱.۳۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۴	۱.۴۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۵	۱.۵۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۶	۱.۶۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۷	۱.۷۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
۱۸	۱.۸۳۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲

جدول ۳- خلاصه تغییرات درصد کاهش گرداب و محدوده ۵ و ۱۰ درصد

درصد خارج از حدود (۱۰٪)			درصد خارج از حدود (۵٪)			حدود تغییرات درصد کاهش گرداب (٪)			ابعاد
D=10cm	D=7.5cm	D=5cm	D=10cm	D=7.5cm	D=5cm	D=10cm	D=7.5cm	D=5cm	صفحات
	۴۶			۴۶			۶۳		D*D
	۱۰			۱۵			۵۰		D*1.5D
	-			۱۹			۳۵		D*2D
	۱۵			۳۴/۶			۵۳		D*2.5D
۱۰	-	-	۳۰	۱۵/۴	۱۲/۵	۱۴	۶۱	۶۰/۶	1.5D*D
-	-	-	-	-	۱۲/۵	۱۴	۱۹	۱۷/۱	1.5D*1.5D
-	-	-	-	-	۱۲/۵	۱۷	۲۲	۲۲	1.5D*2D
-	-	-	-	-	-	۱۰	۲۷	۲۷	1.5D*2.5D
-	۷/۷		۳۰	۳۰/۷		۷/۳۶	۴۵		2D*D
-	۷/۷		۳۰	۱۵		۱۲/۳	۳۰		2D*1.5D
-	-		-	-		۵/۲	۱۸		2D*2D
-	-		-	۳۰/۷		۱۳/۴	۱۳		2.5D*2.5D
	۱۹/۲	-		۵۰	۱۲/۵		۴۰	۳۹	2.5D*D
	۷/۷	-		۱۹	-		۲۴	۳۲/۶	2.5D*1.5D
	-	-		۷/۷	-		۱۴	۸/۵	2.5D*2D
	۵	-		۷/۵	-		۱۵	۱۱/۳	2.5D*2.5D

Q/Q_0 محاسبه و نتایج آن در شکلهای (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) ترسیم شده‌اند.

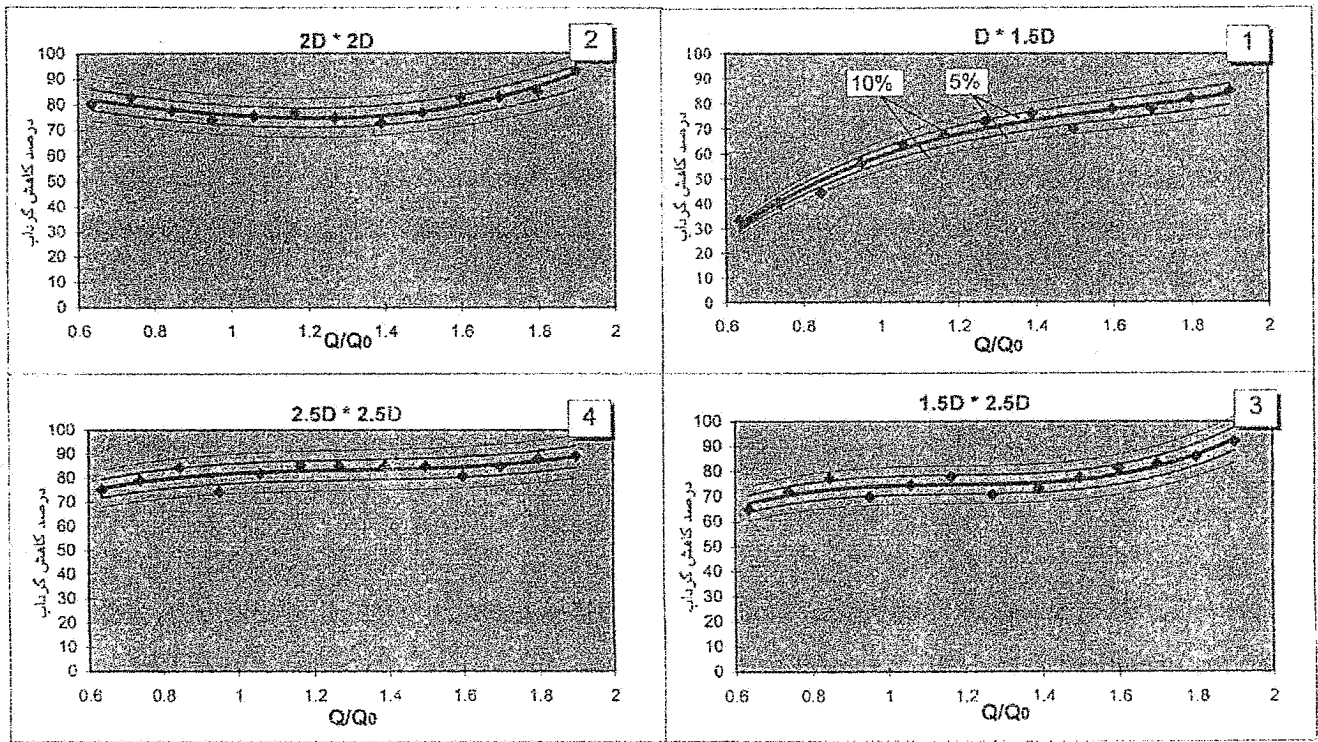
در این شکلهای مشاهده می‌شود که نتایج سه لوله بسیار به هم نزدیک است و یکدیگر را تأیید می‌کنند. تنها در حالت کاربرد صفحه‌ای به ابعاد $1.5D \times D$ تفاوتی در حدود ۵ درصد در میزان درصد کاهش گرداب بین لوله‌های قطر ۱۰ و ۷.۵ cm وجود دارد و در صفحات دیگر این تفاوت از ۵ درصد تجاوز نمی‌کند. همچنین برای دو قطر لوله ۵ و ۷.۵ cm در دو حالت صفحاتی با ابعاد $2.5D \times 2.5D$ و $2.5D \times 1.5D$ در مقادیر کم Q/Q_0 تفاوتی در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد مشاهده شده و در سایر موارد این دو قطر تقریباً مقادیر مشابهی را دارند.

۷- نتیجه‌گیری

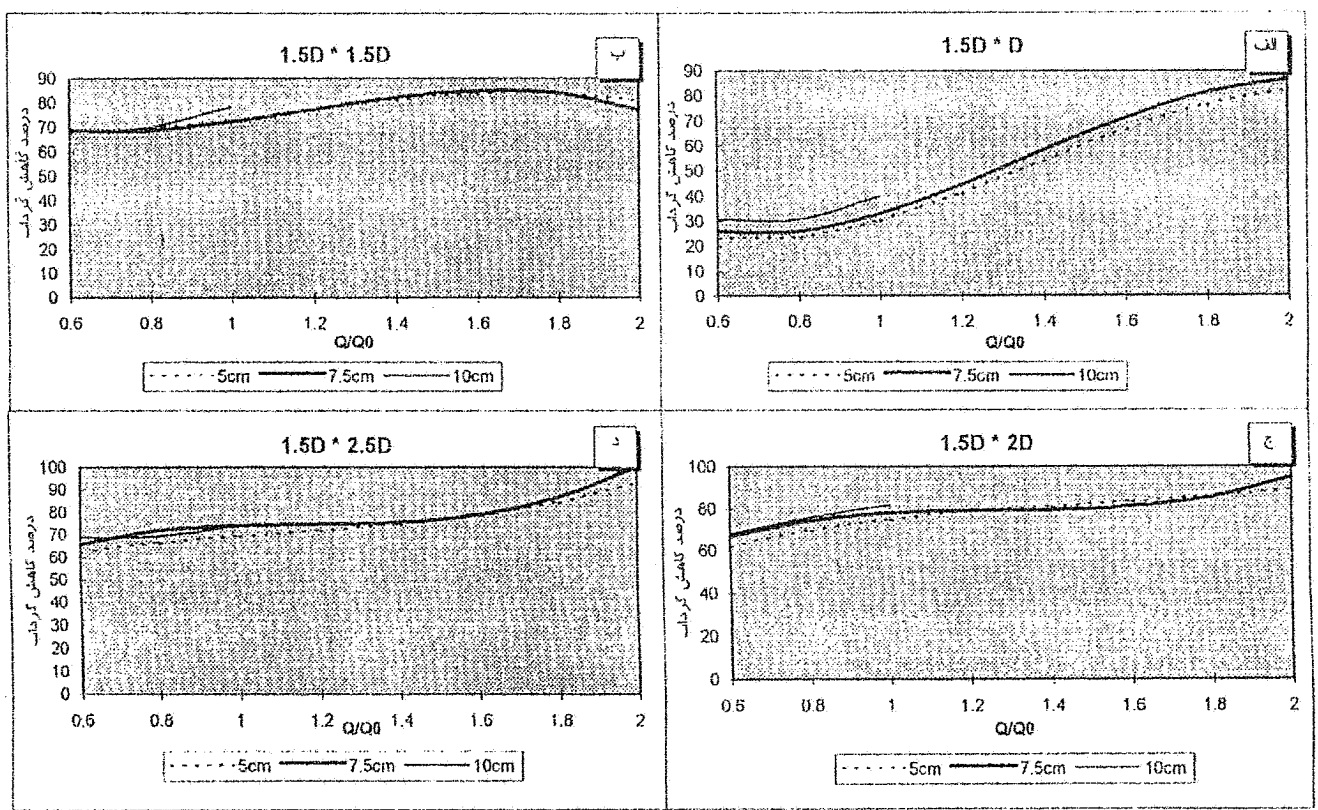
آزمایشها نشان می‌دهند که تقریباً برای تمام صفحات و قطرهای

ترتیب انجام داد که در بین صفحاتی که مورد آزمایش قرار گرفتند با لوله‌ای به قطر ۷.۵ cm، حدود تغییرات درصد کاهش گرداب نسبت به دبی برای صفحه‌ای به ابعاد $2.5D \times 2D$ دارای کمترین مقدار و درصد خارج از حدود ۵ درصد آن نیز ناچیز است. همین ابعاد صفحه در آزمایشهای با قطر ۵ cm نیز دارای کمترین حدود تغییرات درصد کاهش گرداب بوده و درصد خارج از محدوده ۵ درصد آن نیز صفر است. این وضعیت را در آزمایشهای با لوله به قطر ۱۰ cm، صفحه‌ای با ابعاد $2D \times 2D$ داشته است. همچنین در این جدول حدود تغییرات درصد کاهش گرداب در صفحاتی به ابعاد $D \times 1.5D$ ، $D \times 2.5D$ ، $D \times D$ و $1.5D \times D$ قابل ملاحظه است. یعنی صفحاتی که یک بعد آن کوچکترین مقدار خود یعنی D را دارند.

درصدهای کاهش گرداب (یا بازده صفحات) برای سه قطر لوله مورد آزمایش و در موثرترین موقعیت صفحات با توجه به منحنیهای برازش شده به داده‌های واقعی برای نسبتهای مشترک



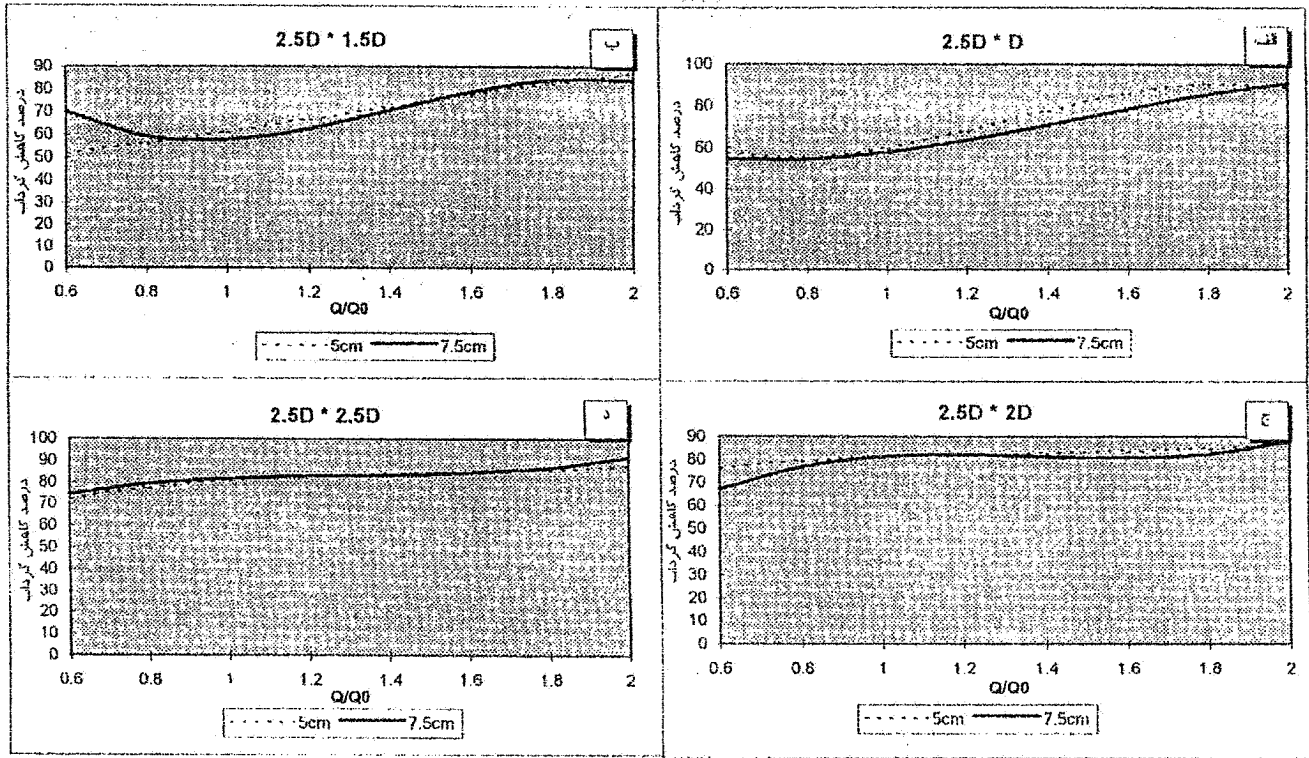
شکل ۹- نمونه تغییرات درصد کاهش گرداب، معادله (۴)، در مقابل Q/Q_0 برای قطر خروجی 7.5 cm



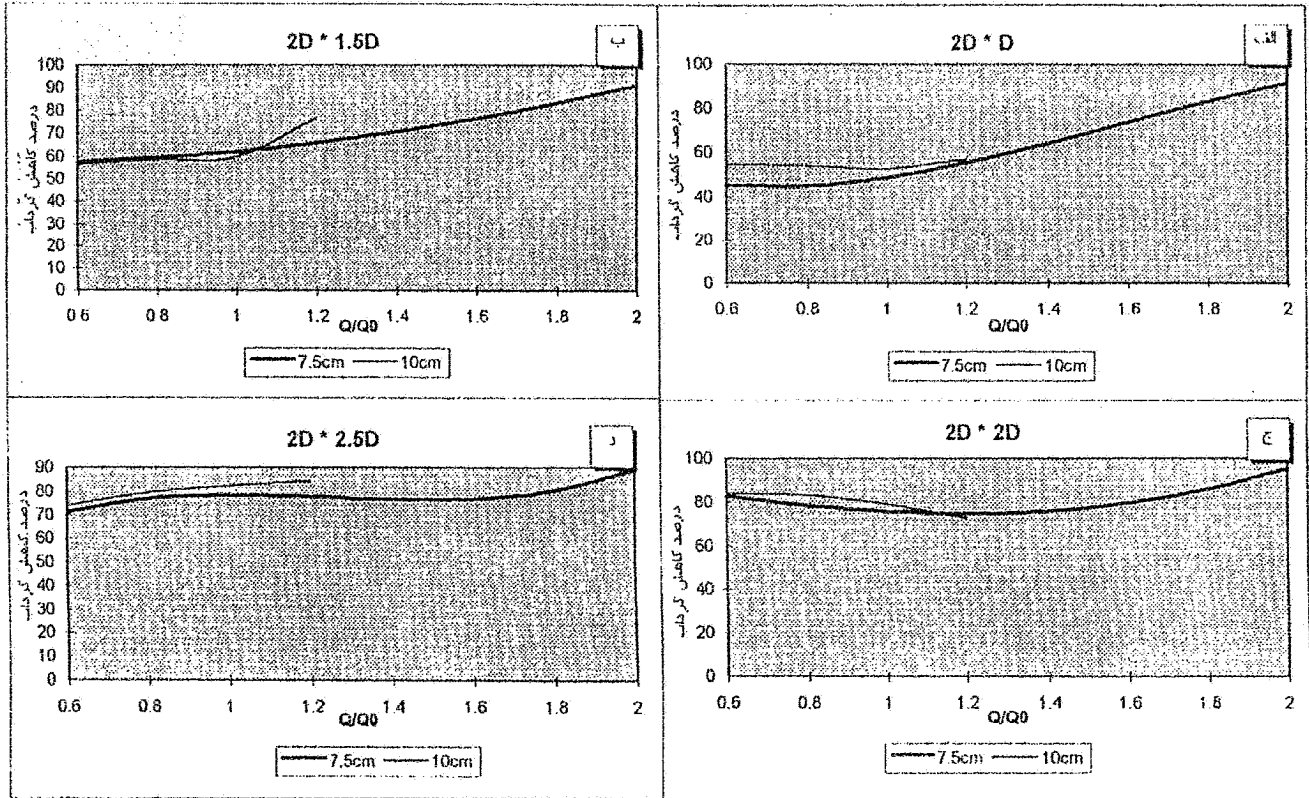
شکل ۱۰- مقایسه تغییرات درصد کاهش گرداب نسبت به Q/Q_0 در سه قطر لوله خروجی 5، 7.5 و 10 cm

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1379.19.1.8.6]

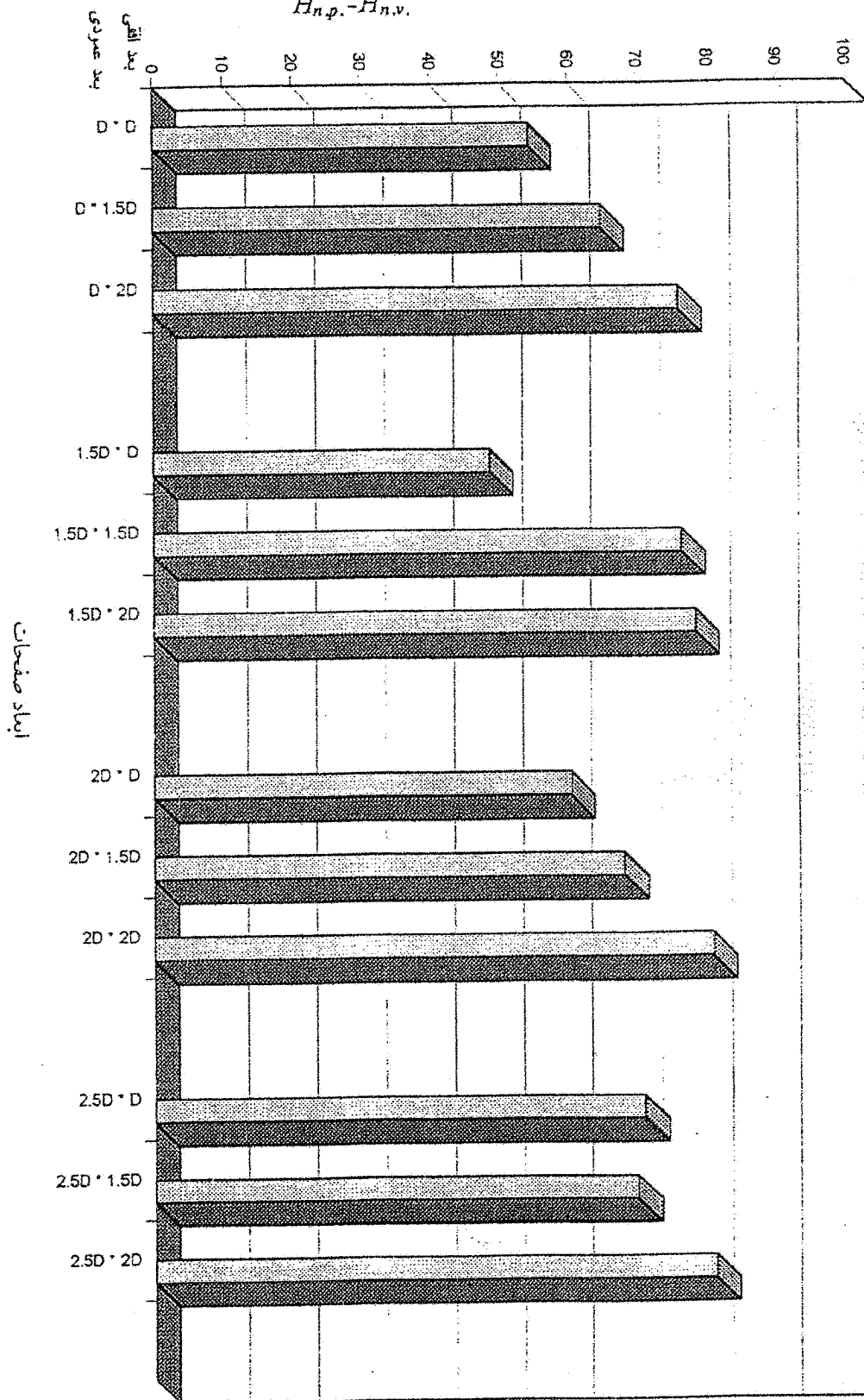


شکل ۱۱- مقایسه تغییرات درصد کاهش گریز نسبت به Q/Q_0 در دو قطر لوله خروجی 5 cm و 7.5



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات درصد کاهش گریز نسبت به Q/Q_0 در دو قطر لوله خروجی 7.5 و 10 cm

$$\left(\frac{H_{n.p.} - H}{H_{n.p.} - H_{n.v.}} \times 100 \right)$$



شکل ۱۳- درصد متوسط کاهش گرداب توسط صفحات با ابعاد مختلف در مؤثرترین موقعیت استقرار

جدول ۴- درصد کاهش گرداب برای صفحات با ابعاد مختلف

شماره ردیف	ابعاد صفحات ۱ (افقی×عمودی)	موقعیت صفحه		ابعاد صفحات ۲ (افقی×عمودی)	موقعیت صفحه		نسبت مساحتها (1)/(2)	اختلاف درصد کاهش گرداب
		X	Y		X	Y		
۱	1.5D*2.5D	2D	-D	1.5D*1.5D	1.5D	-D	1.7	0.60%
۲	2.5D*1.5D	1.5D	-D	D*2.5D	2D	-D	1.5	1.01%
۳	2.5D*2D	1.5D	-D	2D*2D	1.5D	-D	1.25	0.30%
۴	2D*2.5D	1.5D	-D	1.5D*2D	1.5D	-D	1.7	0.60%
۵	1.5D*2D	1.5D	-D	D*2D	1.5D	-D	1.5	2.50%
۶	2D*1.5D	1.5D	-D	D*1.5D	1.5D	-D	2	3.35%
۷	2.5D*2.5D	2D	-2D	1.5D*1.5D	1.5D	-D	2.78	6.16%
۸	2.5D*2.5D	2D	-2D	D*2D	1.5D	-D	3.125	6.65%
۹	2.5D*1.5D	1.5D	-D	D*2D	1.5D	-D	1.875	-5.78%
۱۰	2D*D	D	-D	D*2D	1.5D	-D	1	-15.33%
۱۱	D*2.5D	2D	-D	D*2D	1.5D	-D	1.25	-6.79%

مختلف نتایج زیر قابل حصول است.

الف - در بین تمام موقعیتهای (x,y) برای هر صفحه با ابعاد معین یک موقعیت دارای بیشترین تاثیر برای استهلاک گرداب است، که برای اکثر صفحات این موقعیت در عمق $y=-D$ و نزدیکترین فاصله افقی (x) صفحه به مرکز دهانه خروجی قرار دارد.

ب - هر چند صفحه‌ای به ابعاد $2.5D \times 2.5D$ در موقعیت استقرار $x=2D$ و $y=-2D$ بیشترین تاثیر در استهلاک گرداب داشته است، ولی نکته حائز اهمیت، موقعیت صفحه است که حتی در بعضی مواقع صفحه‌ای با ابعاد کوچکتر اما موقعیت مناسب دارای درصد کاهش گرداب بیشتر از صفحه‌ای با ابعاد بزرگتر است، ردیفهای ۹، ۱۰ و ۱۱ از جدول (۴) را ببینید.

ج - اندازه افقی صفحه نقش بیشتری در استهلاک پدیده گرداب نسبت به اندازه عمودی دارد، شکل (۱۳).

مراجع

- Novak, P., and Cabelka, J., *Models in Hydraulic Engineering*, Pitman Publishing Inc., 1981.
- Saffman, P. G., *Vortex dynamics*, 3rd Print, Cambridge University Press, 1995.
- Knauss, J., "Swirling Flow Problems at Intakes," *Hydraulic Structures Design Manual*, 1.A.A. Balkema, Rotterdam, 1987.
- "بررسی پدیده گرداب بر روی آبگیرهای سد شهید عباسپور"، مرکز تحقیقات آب، وزارت نیرو، ۱۳۷۴.

د - به منظور یک نتیجه‌گیری کلی برای درصد کاهش گرداب توسط هر صفحه آزمایش شده، میانگینی از درصد کاهش گرداب توسط این صفحات در نسبتهای مختلف Q/Q_0 و قطرهای مختلف گرفته شده است. نتایج حاصل به صورت یک نمودار میله‌ای در شکل (۱۳) رسم شده است. این نمودار درصد بازده گرداب توسط هر صفحه با ابعاد معین را در موثرترین موقعیت استقرار آن صفحه و در هر دبی دلخواه نشان می‌دهد.

قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت تحصیلات تکمیلی دانشگاه صنعتی شریف که بخشی از هزینه‌های پروژه را تقبل کرده است تشکر و قدردانی می‌کنند.

5. Lugs, H. J., "Vortex Flow in Nature & Technology," Potomac, Maryland, Feb. 1983.
6. Sheldon, I., "Flow Vortices," Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, 1996.
7. Constantinescu, G. S., and Patel, V. C., "Numerical Model for Simulation of Pump Intak Flow and Vortices," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 4, pp. 123-134, 1998.
8. May, R. W. P., and Willough, I. R., "Performance of Vortex Inhibitors for Reservoir Intakes," *Hydraulics Research Wallingford*, 1990.
9. رجبی سیاهبومی، د.، "استفاده از صفحات ضد دوران در کاهش درصدی دوران با استفاده از مدل آزمایشگاهی،" پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه صنعتی شریف، تیرماه ۱۳۷۸.