

بررسی اثر زاویه دفلکتور متقارن بر عملکرد آبگیر قائم

سروش اسماعیلی زاده^۱ و بابک لشکرآرا^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۹

چکیده

ایجاد گرداب در ورودی آبگیرها سبب بروز مشکلاتی از جمله ورود هوا به تأسیسات هیدرومکانیکی و در نتیجه بروز کاویتاسیون خواهد داشت. تعیین میزان تراز مجاز بهره‌برداری مخزن که باعث نفوذ هوا به آبگیر نشود، اهمیت بالایی دارد. با استفاده از اجزای جانبی، امکان بهبود الگوی جریان آبگیر و در نتیجه کاهش تراز مجاز بهره‌برداری مخزن وجود دارد. در این پژوهش آزمایشگاهی، اثر زاویه دفلکتور واقع در درون مجرا بر نحوه عملکرد هیدرولیکی آبگیرهای قائم، به خصوص عمق استغراق بحرانی آبگیر، بررسی شده است. برای این منظور، سه سناریوی مختلف به کارگیری دفلکتور در مجرای قائم با تغییر زاویه انحراف α معادل ۳، ۷ و ۱۱ درجه بررسی و نتایج حاصل با شرایط جریان در آبگیر قائم در حالت بدون دفلکتور (مدل شاهد) مقایسه شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که به کارگیری دفلکتور در ایجاد ثبات تغییرات تراز سطح آب مخزن و کاهش تراز مجاز بهره‌برداری مخزن شده و نیز در جلوگیری از ورود هوا به دهانه آبگیر نقش بسزایی دارد. میزان عمق استغراق بحرانی زمان استفاده از دفلکتور با زاویه انحراف ۱۱ درجه، نسبت به شرایط ۳ درجه، به طور میانگین حدود ۵۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. در تحلیل حساسیت صورت گرفته بر عمق استغراق بحرانی همچنین مشخص شد که تغییرات پارامترهای زاویه انحراف α و عدد فرود Fr آبگیر نقش بسزایی در میزان عمق استغراق بحرانی دارند به طوری که در تعیین پارامتر $(S/D)_c$ ، نقش تغییر در عدد فرود Fr در زاویه α معادل ۱۱ درجه، نسبت به زاویه α معادل ۳ درجه، دو چندان است.

واژه‌های کلیدی

جریان چرخشی، سطح ریزش کروی، شکل گرداب، عمق استغراق بحرانی

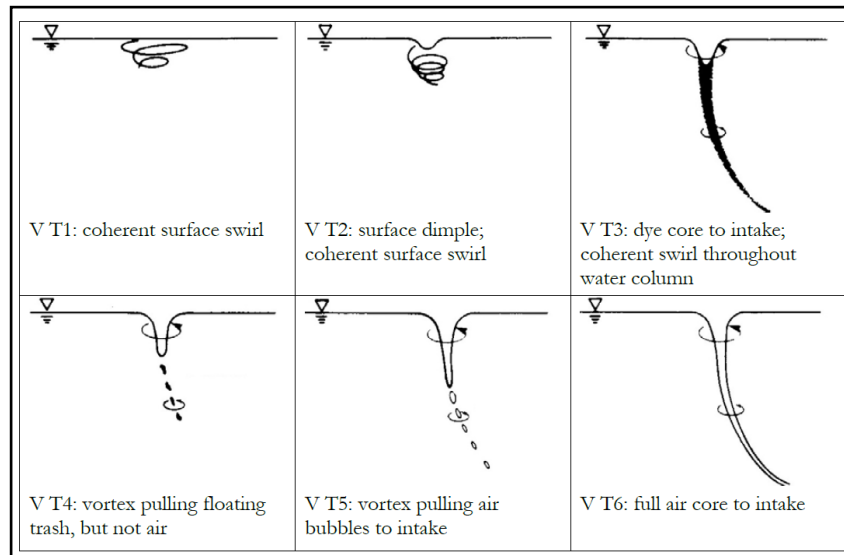
مقدمه

انسداد آشغالگیر، نفوذ هوا به آبگیر و کاهش عمر توربین‌ها می‌انجامد. هرچه گرداب ایجاد شده قوی‌تر باشد، اثر منفی آن بر عملکرد هیدرولیکی آبگیر بیشتر خواهد بود (Sarkardeh, 2017). بنابراین در نیروگاه‌های برق‌آبی، محدودیت کاهش تراز مجاز بهره‌برداری مخزن به دلیل ایجاد زمینه تشکیل گرداب با هسته هوا، عملاً مانع رها سازی آب در ترازهای پایین‌تر و تولید انرژی الکتریکی می‌شود (Amiri et al., 2011). با توجه به شکل ۱، گرداب‌های تشکیل شده در سطح آب به لحاظ

در شرایط خشکسالی و در فصل‌های گرم سال، به دلیل تقلیل دبی رودخانه‌های ورودی به مخزن سدها و نیز افزایش مصرف و بهره‌وری از منابع آب موجود در مخازن، تراز سطح آب در مخزن کاهش می‌یابد و شرایط ایجاد گرداب در دهانه ورودی آبگیرها مهیا می‌شود. این عامل، مشکلاتی مانند کاهش کارایی توربین‌ها و ایجاد ارتعاشات، افت شدید راندمان آبگیری، مکش اجسام شناور سطح آب به طرف ورودی را در پی دارد که سرانجام به

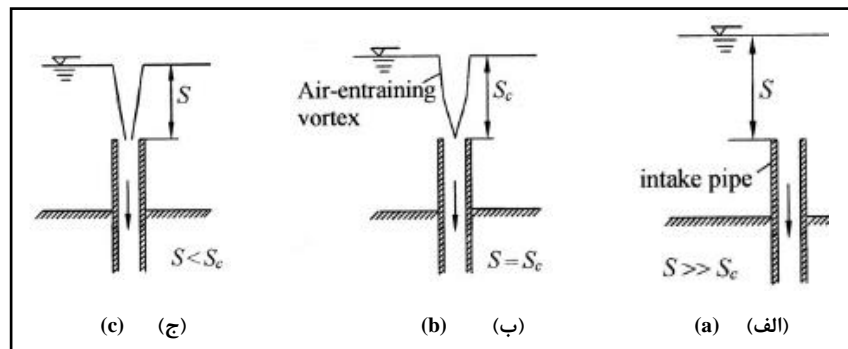
استغراق بحرانی تراز است که در آن، هسته هوای تشکیل شده در آستانه ورود به آبگیر قرار می‌گیرد (شکل ۲-ب). این وضعیت را می‌توان معادل شرایط تشکیل گرداب نوع ۴ دانست. با این حال زمانی که عمق استغراق آبگیر (S) از عمق استغراق بحرانی بیشتر باشد، هوا وارد آبگیر نمی‌شود (شکل ۲-الف). در حالت عکس آن، یعنی شرایطی که S از S_c کمتر است، هسته هوا به درون آبگیر نفوذ می‌کند (شکل ۲-ج) که این وضعیت نیز معادل شرایط تشکیل گرداب نوع ۶ و ۵ است.

فیزیکی در شش نوع ۱ تا ۶ تقسیم می‌شوند، که با افزایش نوع گرداب، قدرت آن نیز افزایش می‌یابد (Hecker, 1987). بنابراین با توجه به خصوصیات نوع گرداب، می‌توان گرداب‌های نوع ۵ و ۶ را به دلیل نفوذ هوا به آبگیر بسیار مهم در نظر گرفت. گرداب نوع ۴ نیز به دلیل مکش اجسام شناور سطح آب به درون آبگیر اهمیت می‌یابد. از دیگر شاخص‌های طراحی آبگیرها که تراز مجاز بهره‌برداری را در نیروگاه‌های برق آبی مشخص می‌کند، عمق استغراق بحرانی (S_c) است. عمق



شکل ۱- طبقه بندی گرداب (Hecker, 1987)

Fig. 1- Vortex classification (Hecker, 1987)



شکل ۲- تعریف عمق استغراق و شرایط بحرانی در آبگیر قائم

Fig. 2- Definition of submergence depth and critical conditions in the vertical intake

CSSS مفهومی مفید برای تفسیر فیزیکی رخداد یک گرداب با هسته هوا هستند. در دهه اخیر نیز یکی از دغدغه‌های اساسی محققان عرصه علوم آب، شناخت شرایط هیدرولیکی آبگیرها بوده که در مطالعات متعدد آنها کاملاً مشهود است. برای مثال، در بررسی مکانیسم و تشکیل گرداب می‌توان به مطالعات امیری و همکاران (Amiri *et al.*, 2011) اشاره کرد که قدرت گردابه‌های شکل‌گرفته در دهانه آبگیر افقی را بررسی کردند. سرکرده و همکاران (Sarkardeh *et al.*, 2014) نیز با آزمایش‌هایی در مجاورت یک آبگیر افقی، الگوی جریان را در اطراف آبگیر افقی در شرایط تشکیل گرداب با هسته هوا بررسی و سازوکاری برای تشکیل گرداب‌های سطحی ارائه کردند.

در پژوهشی دیگر، خان‌آرمویی و همکاران (Khanarmuei *et al.*, 2015) تشکیل گرداب را در آبگیرهای دوگانه و تأثیر عملکرد همزمان آنها بر قدرت گرداب‌های شکل‌گرفته بررسی کردند. این محققان در بخش دیگری از پژوهش آزمایشگاهی خود به بررسی تأثیر زاویه آبگیری جریان بر عمق استغراق بحرانی آبگیر پرداختند. سرکرده و همکاران (Sarkardeh *et al.*, 2010) نیز با اجرای ۱۰۰ آزمایش، عمق استغراق بحرانی آبگیر افقی را با شیب‌های مختلف دیواره بالادست آبگیر و وجود سازه آشغالگیر محاسبه کردند. شیخی و همکاران (Sheikhi *et al.*, 2018) با تلفیق نتایج آزمایشگاهی مختلف، دامنه تأثیر پارامترهای مؤثر بر تخمین عمق استغراق بحرانی را در آبگیرهای افقی منشعب از مخازن بررسی و با اعمال اثر وزن کلیه عوامل هیدرولیکی و هندسی، رابطه‌ای غیرخطی برای تخمین عمق استغراق بحرانی معرفی کردند. تاستان و یل‌دیریم (Tastan & Yildirim, 2018) با بررسی

تاکنون مطالعات زیادی درباره عمق استغراق بحرانی و ایجاد گرداب در آبگیرها صورت گرفته است. انوار و همکاران (Anwar *et al.*, 1978) و انوار و امیمیلت (Anwar & Amimilett, 1980) چندین بار جریان‌های گردابی و روش‌های جلوگیری از آنها و اثر فاصله دیواره‌های مخزن بر گرداب را بررسی کرده‌اند. یل‌دیریم و کوباس (Yildirim & Kocabas, 1995) عمق استغراق بحرانی آبگیرهای عمودی واقع در کانال را به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مطالعه و رابطه‌ای برای پیش‌بینی آن ارائه کرده‌اند. کوباس و یل‌دیریم (Kocabas & Yildirim, 2002) اثر جریان‌های چرخشی را بر عمق استغراق بحرانی در آبگیرهای لوله‌ای بررسی کردند و دریافتند که تشکیل گرداب با هسته هوا و عمق استغراق بحرانی به مقدار چشمگیر به شرایط جریان تقرب و هندسه سازه ورودی بستگی دارد و برای هر سازه با هندسه خاص خود، به عنوان مطالعه موردی، باید بررسی شود. این پژوهشگران با تجسم‌سازی جریان به کمک رنگدانه مشاهده کردند که سیال اطراف آبگیر به صورت یک حجم کروی به سمت آبگیر جریان می‌یابد. به عبارتی، حجمی کروی شکل از جریان تحت تأثیر مکش آبگیر قرار دارد. این حجم کروی، که به سطح ریزش کروی^۱ (SSS) موسوم است، علاوه بر این که به صورت شعاعی جمع می‌شود، حول محور عمودی آبگیر نیز می‌چرخد و گرداب با هسته هوا زمانی رخ می‌دهد که سطح ریزش کروی فرو ریزد. سطح ریزش کروی بر اثر مکش متعدد آبگیر فرو می‌پاشد. هنگام فروریزش، حالتی که هسته هوا به لبه ورودی آبگیر برسد، سطح ریزشی کروی بحرانی^۲ (CSSS) تشکیل می‌شود که در این حالت شعاع کره معادل S_c ، همان عمق استغراق بحرانی، است. این محققان می‌گویند تعریف‌های SSS و

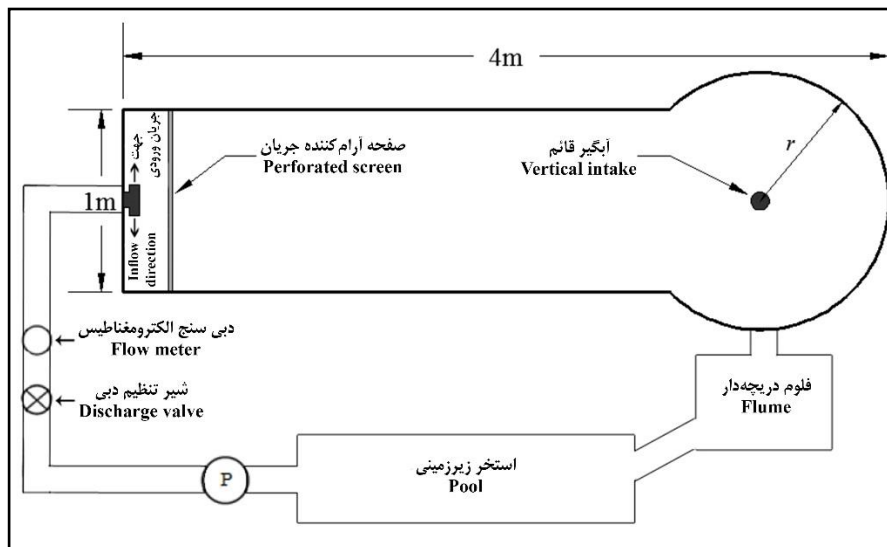
یکی از راه‌های مقابله با گرداب و نفوذ هوا، کاهش عمق استغراق بحرانی آبگیر است. در این مقاله به اثر میزان انحراف جریان توسط دفلیکتور در مجرای آبگیرهای قائم پرداخته شده است. بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقی در این خصوص نشده است. در این گزارش چگونگی تغییرات عمق استغراق، عدد فرود، شکل گرداب^۲ و عمق استغراق بحرانی آبگیر آمده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش آزمایشگاهی از مدل فیزیکی موجود در آزمایشگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه دانشگاه صنعتی جندی شاپور استفاده شد. مدل مخزن فیزیکی مذکور ۴ متر طول، ۱ متر عرض و ۱ متر ارتفاع دارد. جداره مخزن از جنس ورق گالوانیزه و انتهای آن دایره‌ای است، سیستم آرام‌کننده جریان دارد و تلاش شده است تا به کمک آن شرایط آرامش جریان در مخزن به‌خوبی شبیه‌سازی شود (شکل ۳).

شکل هندسه ورودی آبگیرهای قائم و تأثیر آن بر وقوع گرداب با هسته هوا، می‌گویند اثر پروفیل ورودی آبگیر بر شرایط گرداب با هسته هوا و عمق استغراق بحرانی ناچیز است. در واقع، سازوکار اصلی وقوع گرداب با هسته هوا برای هر نوع پروفیل ورودی آبگیر یکسان است. این محققان می‌افزایند برای رخداد گرداب با هسته هوا، ضروری است توده سیال به‌صورت قطاع کروی که حول محور عمودی خود، تحت اثر نیروی کریولیس و چرخش تحمیلی یا القا شده قرار گرفته، تشکیل شود یا به‌صورت هیدرولیکی توسعه یابد. به‌عبارت دیگر، قطاع‌های سطح ریزش کروی^۱ (SSSSs) برای وجود گرداب الزامی است.

تشکیل گرداب و نفوذ هوا در آبگیرها به ناپایدار شدن جریان می‌انجامد و عاملی است برای ایجاد مشکلاتی مانند ارتعاش در تجهیزات هیدرومکانیک، سر و صداهای نامتعارف، نوسان شدید در فشارهای موضعی و تشدید شرایط وقوع کاویتاسیون (Chen & Chen, 2015).

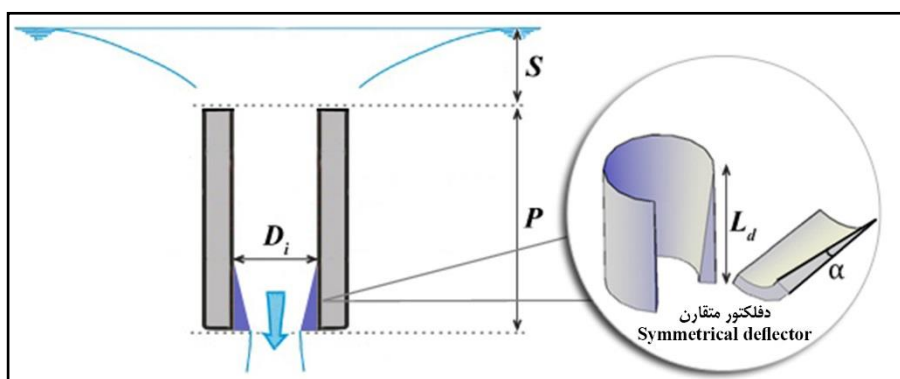


شکل ۳- پلان سیستم آزمایشگاهی

Fig. 3- Experimental set-up plan

زاویه‌های α ، دفلکتورهای با ابعاد مد نظر ساخته شد. برای ساخت دفلکتورها، ابتدا طرح مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار اتوکد بر اساس هندسه از پیش تعیین‌شده به صورت سه‌بعدی رسم شد (شکل ۴).

ایستگاه پمپاژ این آزمایشگاه می‌تواند ۲۵۰ لیتر بر ثانیه آب تأمین کند. برای تحقق اهداف پژوهش، سناریوهای مختلفی با تغییر در زاویه انحراف دفلکتور، بین ۳ تا ۱۱ درجه، ایجاد گردید. برای این منظور در هر یک از



شکل ۴- مقطع طولی آبگیر قائم به همراه دفلکتور

Fig. 4- The longitudinal section of the vertical intake with deflector

در این بازه زمانی حضوری پایدار داشته باشد با توجه به شکل ظاهریش با چشم غیر مسلح، یکی از گرداب‌های شش‌گانه معرفی می‌شود. طبق شرایط آزمایشگاهی، مقرر گردید که حداقل زمانی معادل ۲۰ دقیقه برای حصول اطمینان از ثبات گرداب اعمال شود. برای اندازه‌گیری عمق آب روی تاج آبگیر، از یک عمق‌سنج با دقت ± 0.5 میلی‌متر استفاده گردید. جریان آب پس از عبور از آبگیر وارد مجرای قائم و گذر از دفلکتور می‌شود و به کانال انتقال هدایت و مجدداً به استخر زیرزمینی وارد می‌شود. این چرخه در طول آزمایش‌ها برای سناریوهای مختلف و در شرایط هیدرولیکی مختلف ادامه می‌یابد.

به منظور شناسایی پارامترهای مؤثر بر عمق استغراق بحرانی آبگیرهای قائم در حضور دفلکتور، پارامترها دسته‌بندی شدند. بررسی‌ها نشان داد که

با تهیه شافت توپر پلیمری از نوع پلی‌تترافلورو اتیلن^۱ خالص (تفلون)، در کارگاه تراشکاری، مدل مورد نظر تهیه شد. بین تمام پلیمرها، تفلون خالص دارای پایین‌ترین ضریب سایش است. این پلیمر با داشتن قابلیت تراش‌کاری و مشخصه آب‌بندی خیلی عالی، بهترین گزینه برای ساخت مدل است. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب سیستم کلی آزمایشگاه و مشخصات هندسی آبگیر قائم به همراه دفلکتور را در این پژوهش نشان می‌دهند.

پس از نصب دفلکتور مورد نظر برای آبگیر، جریان آب از استخر زیرزمینی پمپاژ می‌شود و قبل از رسیدن به مخزن از یک دی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت ± 0.2 درصد مقیاس واقعی گذر می‌کند. برای حصول اطمینان از ثبات جریان در هر آزمایش، میزان حضور گرداب در بازه زمانی خاصی مشخص گردید. بدیهی است هر گردابی که

1- Polytetrafluoroethylene (PTFE)

با فرض پارامترهای ρ ، V و D_i به‌عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از تئوری پی‌باکینگهام می‌توان پارامترهای بدون بعد مؤثر بر تحقیق حاضر را به‌صورت رابطه ۲ نوشت.

$$f\left(\frac{\rho V D_i}{\mu}, \frac{\rho V^2 D_i}{\sigma}, \frac{\Gamma}{V D_i}, \frac{V}{\sqrt{g D_i}}, \frac{S}{D_i}, \alpha\right) = 0 \quad (2)$$

که در آن،

نسبت‌های $\rho V D_i / \mu$ ، $\rho V^2 D_i / \sigma$ ، $\Gamma / V D_i$ و $V / \sqrt{g D_i}$ به ترتیب معرف اعداد رینولدز (Re)، وبر (We)، کلف (Ko) و فرود (Fr) هستند.

طبق تعریف، عمق استغراق بحرانی عبارت است از عمقی که گرداب با هسته هوا تا لبه تاج آبگیر نفوذ کند (Tastan & Yildirim, 2010)، این ویژگی با ماهیت گرداب نوع ۴ در توافق کامل است (Naderi & Gaskin, 2018). از آنجا که عدد کلف با پارامتر گردش رابطه مستقیم دارد، طبق مطالعات کناوز (Knauss, 1987) گردابه‌های نوع ۱ تا ۴ دارای گردش ضعیفی هستند، بنابراین می‌توان از تأثیر عدد کلف در حضور گرداب نوع ۴ صرف‌نظر کرد. از این‌رو معادله حاکم بر عمق استغراق بحرانی آبگیر قائم در حضور دفلکتور به‌شکل عمومی رابطه ۳ نمایش داده می‌شود.

$$\left(\frac{S}{D_i}\right)_{cr} = f(\alpha, Fr, Re, We) \quad (3)$$

پس از اجرای آزمایش‌ها مطابق با سناریوهای تدوین شده، با استفاده از نرم‌افزار تحلیل‌گر آماری میزان اثرپذیری هر یک از پارامترهای بدون بعد رابطه ۳ بر عمق استغراق بحرانی تعیین و تجزیه و تحلیل‌های لازم در راستای نقاط ضعف و قوت

پارامترهای مؤثر را می‌توان از نظر خصوصیات سیال، خصوصیات جریان و مشخصات هندسی آبیگر به‌صورت زیر نوشت:

خصوصیات سیال: جرم مخصوص سیال (ρ)، لزوجت سیال (μ)، کشش سطحی (σ).

خصوصیات جریان: سرعت در دفلکتور (V) در مدل شاهد سرعت در مجرای آبیگر، بار آبی روی تاج آبیگر (S)، شتاب ثقل (g)، چرخش اعمال شده یا گردش (Γ).

خصوصیات هندسی: قطر آبیگر (D_i)، زاویه انحراف دفلکتورها (α)، طول دفلکتورها (L_d)، موقعیت مکانی تنگ‌ترین مقطع دفلکتور نسبت به تراز تاج آبیگر (P) (شکل ۴)، فاصله مرکز آبیگر تا جداره‌های مخزن (r) (شکل ۳).

در تمامی سناریوها، طول دفلکتور (L_d) ثابت و معادل ۰/۱۲۵ متر در نظر گرفته شده، بنابراین می‌توان از اثر آن صرف‌نظر کرد. همچنین به‌دلیل نصب تمامی دفلکتورها به فاصله ۰/۳۱۵ متری پایین‌تر از تراز تاج آبیگر، پارامتر (P) نیز ثابت در نظر گرفته شده است.

برای جلوگیری از اثر دیواره‌های مخزن بر شکل گرداب، انوار و همکاران (Anwar et al., 1978) پیشنهاد کردند که فاصله جداره‌های مخزن تا مرکز آبیگر (r) بیشتر از $4D_i$ باشد. از این‌رو در این تحقیق پارامتر (r) برای تمامی سناریوها ثابت و معادل ۰/۷۵ متر اختیار شده است که با در نظر داشتن قطر آبیگر D_i معادل ۰/۱ متر، مقداری بیشتر از $7D_i$ است و از تأثیر آن می‌توان چشم‌پوشید. بنابراین، پارامترهای حاکم بر فضای پژوهش را می‌توان به‌صورت رابطه ۱ خلاصه کرد.

$$f(\rho, \mu, \sigma, V, S, g, \Gamma, D_i, \alpha) = 0 \quad (1)$$

لشکرآرا و شیخی (Lashkar-Ara & Sheikhi, 2017) به استناد تحقیقات برخی پژوهشگران می‌گویند: چنانچه توان دوم عدد وبر از 10000 بزرگ‌تر باشد می‌توان از اثر نیروی کشش سطحی در نتایج آزمایشگاهی صرف‌نظر کرد؛ به ازای اعداد وبر بزرگ‌تر از 120 اثر نیروی کشش سطحی قابل صرف‌نظر کردن است؛ درباره گرداب آزاد در آبگیرهای افقی به‌ازای اعداد رینولدز بزرگ‌تر از $10^5 \times 1/1$ اثر نیروی لزوجت قابل چشم‌پوشی است؛ و سرانجام اینکه در خصوص اثر مقیاس در مدل‌سازی ورود هوا به هسته مرکزی گرداب، اگر اعداد وبر و رینولدز به‌ترتیب بزرگ‌تر از 720 و $10^5 \times 1/4$ باشند، اثر نیروی لزوجت و کشش سطحی بر نتایج مدل‌سازی ناچیز است. بر اساس جدول ۱، از آنجا که در تمامی آزمایش‌ها حداقل اعداد رینولدز و وبر از حدود عنوان شده بیشتر است منظور کردن این اعداد تأثیری بر نتایج آزمایشگاهی ندارد و از بررسی آنان در رابطه ۳ صرف‌نظر شده است.

انحراف جریان در مجرای آبگیرهای قائم ارائه شده است. توابع خطای مورد استفاده برای تحلیل آماری روابط پیشنهادی برای تخمین عمق استغراق بحرانی شامل: ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، ضریب وزن باقیمانده، راندمان مدل‌سازی و ضریب زاویه خط رگرسیون برآزش داده شده از بین نتایج، در مقایسه با خط ۴۵ درجه هستند.

نتایج و بحث

برای تأمین هدف‌های پیش‌بینی شده در مبحث تحلیل ابعادی و به‌منظور بررسی اثر دفلکتور در مجرای آبگیر قائم بر نحوه عملکرد هیدرولیک جریان، به‌خصوص عمق استغراق بحرانی و شکل گرداب، آزمایش‌ها مطابق با سناریوهای از پیش تعیین شده به اجرا درآمدند. محدوده تغییرات پارامترهای مورد آزمایش در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱- محدوده پارامترهای مورد آزمایش

Table 1-The range of parameters tested

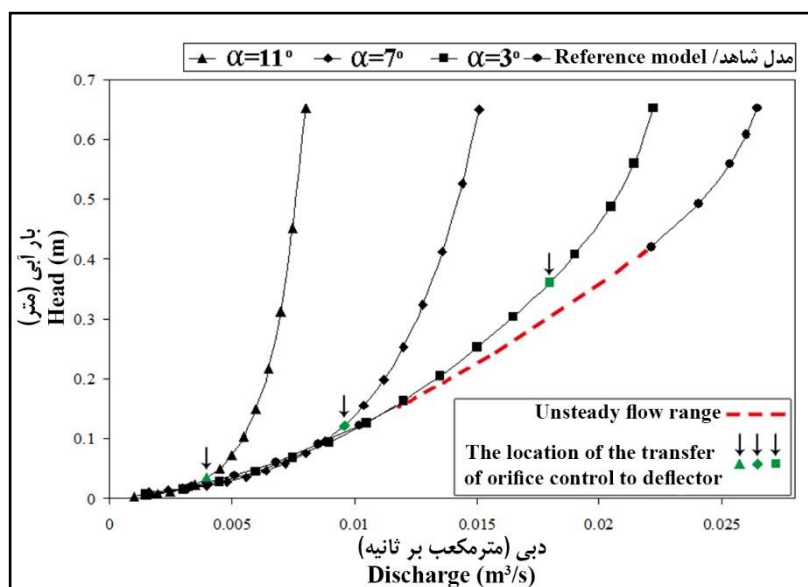
پارامترها Parameters	نماد Symbol	واحد Unit	محدوده تغییرات Variation range
دبی Discharge	Q	لیتر بر ثانیه lit/s	2-26
زاویه دفلکتور Deflector angle	α	درجه degree	3, 7 and 11
عدد فرود Froude number	Fr	-	0.3-3.9
عدد رینولدز Reynolds number	Re	-	151284-403475
عدد وبر Weber number	We	-	5542-226993
شکل گرداب Vortex type	VT	-	3, 4, 5 and 6

منحنی دبی - اشل

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در مرحله کارکرد آبگیر، شرایط روزنه قبل از انحراف ناشی از دفلکتور درون مجرا حاکم می‌شود. با این همه، اثر انحراف جریان بر روند تغییرات پارامترهای هیدرولیکی بسیار مؤثر است، به‌گونه‌ای که با افزایش تراز مخزن این تأثیرات روندی صعودی به خود می‌گیرد. نمودار شکل ۵ میزان تأثیرپذیری جریان از دفلکتور را بر میزان ظرفیت تخلیه آبگیر برای هر یک از سناریوها نشان می‌دهد.

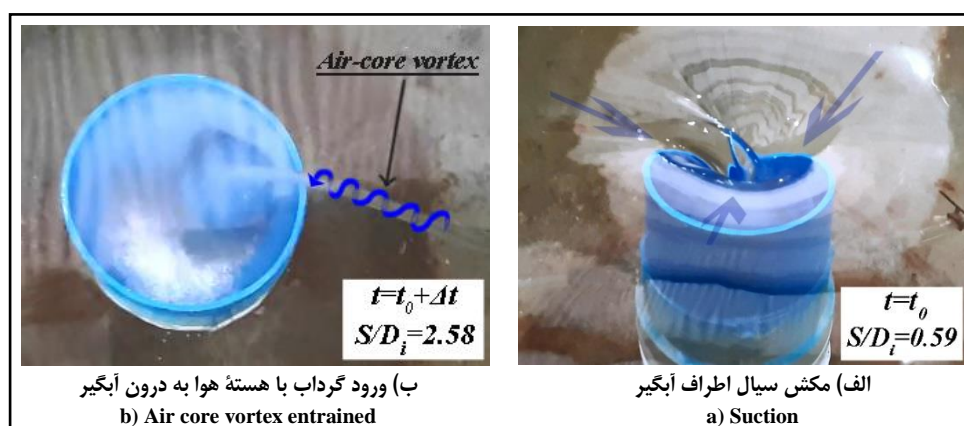
با توجه به شکل ۵، در زاویه α معادل ۱۱ درجه، شرایط جریان در آبگیر از کنترل روزنه به دفلکتور در دبی پایین‌تری تغییر کرده است، بلندشدگی منحنی دبی - اشل در دبی‌های پایین گویای این واقعیت است. این روند برای نسبت‌های زاویه α معادل ۷ و ۳ درجه نیز به این صورت بوده به‌گونه‌ای که مختصات نقطه انتقال از روزنه به دفلکتور (نقاط سبز رنگ در شکل ۵) در زاویه α معادل ۷ درجه کمتر است تا در زاویه ۳ درجه. در حالت کلی، آهنگ تغییرات منحنی دبی - اشل آبگیر به زاویه α بستگی دارد، به هر میزان که زاویه انحراف بیشتر باشد منحنی با شیب تندتری پیشروی می‌کند. علت این پدیده را باید در نحوه تشکیل سطح ریزش کروی (SSS) جستجو کرد. زاویه α تأثیر مستقیمی بر شعاع کره SSS دارد، به‌نحوی که با افزایش زاویه α سطح مقطع مؤثر جریان کمتر می‌شود و در نتیجه سبب خواهد شد شعاع کره SSS کمتر شود که این عامل باعث شده تا سطح ریزش کروی شکل گرفته در اطراف آبگیر

کوچک‌تر و در نتیجه فروپاشی آن (مکش به سمت دهانه آبگیر) ضعیف‌تر شود؛ این عامل علاوه بر کاهش نفوذ گرداب با هسته هوا به درون آبگیر، سبب کاهش میزان تخلیه جریان می‌شود. عملکرد آبگیر در شرایط بدون کارگذاری دفلکتور (مدل شاهد) منجر به ایجاد شرایط جریان ناپایدار در محدوده‌ای از دبی‌ها شد (باند قرمز رنگ در شکل ۵) به‌گونه‌ای که به‌ازای یک دبی ثابت در بازه زمانی متفاوت دو عمق بر تاج آبگیر شکل گرفت. به‌عبارتی، تشکیل و فروپاشی سطح ریزش کروی به‌صورت نامنظم و آنی تغییر می‌یابد. جریان ناپایدار باعث ایجاد تغییرات شدید تراز سطح آب در مخزن، ایجاد سروصداهای شدید ناشی از مکش هوا به درون آبگیر و ایجاد لرزش‌هایی بر بدنه مدل و مخزن شده است. شکل ۶، مدل شاهد را در حالت جریان ناپایدار برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. در زمان t_0 فروپاشی کره SSS به حدی است که باعث مکش ناگهانی سیال پیرامون آبگیر می‌شود به‌گونه‌ای که خطوط جریان اطراف ورودی به‌صورت مایل با انحنای شدیدی وارد آبگیر می‌شوند (شکل ۶-الف)، و به تبع آن سروصداها و لرزش‌هایی بر بدنه مخزن و مدل رخ می‌دهد. در این مرحله از کارکرد آبگیر مکش جریان مانع از تشکیل جریان‌های چرخشی در ورودی آبگیر شده است. در شکل (۶-ب) و در زمان $t_0 + \Delta t$ کره SSS تشکیل می‌شود و به‌دلیل کمتر بودن شعاع این کره نسبت به کره بحرانی CSSS، گرداب با هسته هوا (گرداب نوع ۶) در ورودی آبگیر شکل می‌گیرد.



شکل ۵- منحنی دبی- اشل آبگیر

Fig. 5- Head-discharge curves



شکل ۶- جریان ناپایدار در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه در مدل شاهد

Fig. 6- Unsteady flow at discharge of 15 liters per second in reference model

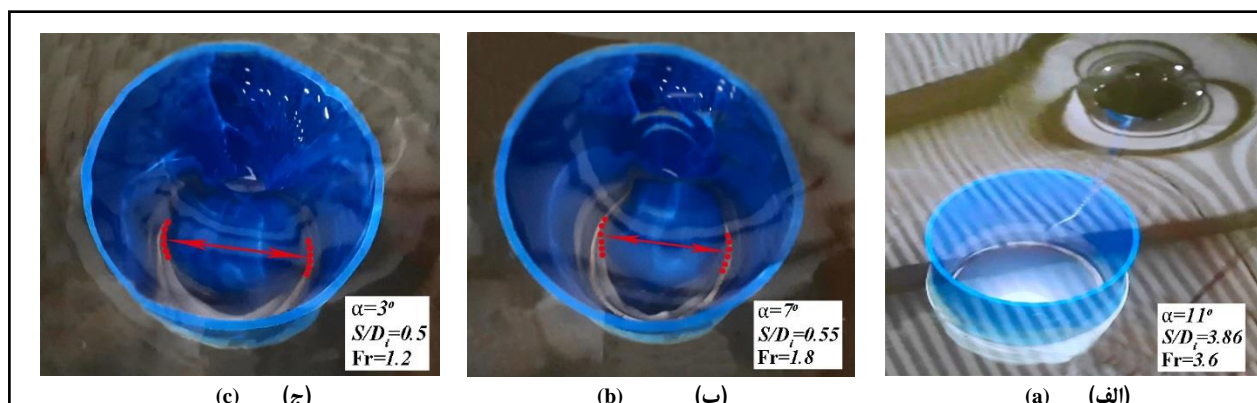
نسبی (S/D_i) کاهش می‌یابد. در شکل (۷- الف) و سناریوی ۱۱ درجه، زاویه α به طوری است که سیال درون مخزن به طور کامل انحراف ناشی از دفلکتور را پذیرفته و با انتقال شرایط جریان خود به دفلکتور باعث افزایش تراز مخزن و وقوع گردابه‌های ضعیف شده است. به عبارت دیگر، در این حالت کره‌هایی از نوع SSS تشکیل می‌شود که شعاعی بیشتری یا مساوی شعاع کره بحرانی CSSS دارند. در شکل (۷- ب و ج)، زاویه α به اندازه‌ای نیست که سیال

عمق استغراق نسبی (S/D_i)

برای بررسی چگونگی تأثیر میزان زاویه دفلکتور بر عمق استغراق نسبی آبگیر، در شکل ۷ اندرکنش میزان بار آبی روی تاج آبگیر در دبی ثابت ۷ لیتر بر ثانیه بررسی و ارزیابی شد. مقایسه بخش‌های مختلف در این شکل نشان می‌دهد که در شرایط هیدرولیکی یکسان، کاهش زاویه α (افزایش شعاع کره SSS) منجر به نفوذ گرداب با هسته هوا (نوع ۶) و افزایش میزان تخلیه آبگیر می‌شود و به تبع آن عمق استغراق

روزنه در راستای عمق آب در زاویه ۷ درجه بیشتر از کشیدگی ابعاد روزنه در زاویه ۳ درجه است. پس از پردازش مشاهدات آزمایشگاهی، روند تغییرات عمق استغراق نسبی در مقابل عدد فرود ارزیابی و از بین نتایج، بهترین منحنی برآزش داده شد. شکل ۸، آهنگ تغییرات عمق استغراق نسبی (S/D_i) را در مقابل عدد فرود (Fr) به‌ازای کلیه سناریوها نشان می‌دهد. در این شکل نتایج مطالعه گالیور و ریندلز (Gulliver & Rindels, 1983) نیز مشاهده می‌شود.

درون مخزن به‌طور کامل انحراف ناشی از دفلکتور را احساس کند، یعنی شعاع کره SSS به‌صورت کامل تحت تأثیر گلوگاه قرار نگرفته است و در بیان ساده‌تر، شرایط جریان روزنه قبل از دفلکتور ایجاد می‌شود به‌گونه‌ای که وجود دفلکتور، و نه شرایط جریان در مخزن، بر میزان ابعاد هندسی روزنه اثرگذار است. در بررسی‌های دقیق‌تر در شکل (۷-ب و ج) کاملاً مشهود است که قطر روزنه یا پخشیدگی^۱ هوا (پیکان قرمز رنگ) در زاویه α معادل ۷ درجه کوچک‌تر است تا در زاویه ۳ درجه، و کشیدگی ابعاد



شکل ۷- تأثیر میزان زاویه دفلکتور α بر عمق استغراق نسبی آبگیر و قدرت گرداب در دبی ثابت ۷ لیتر بر ثانیه

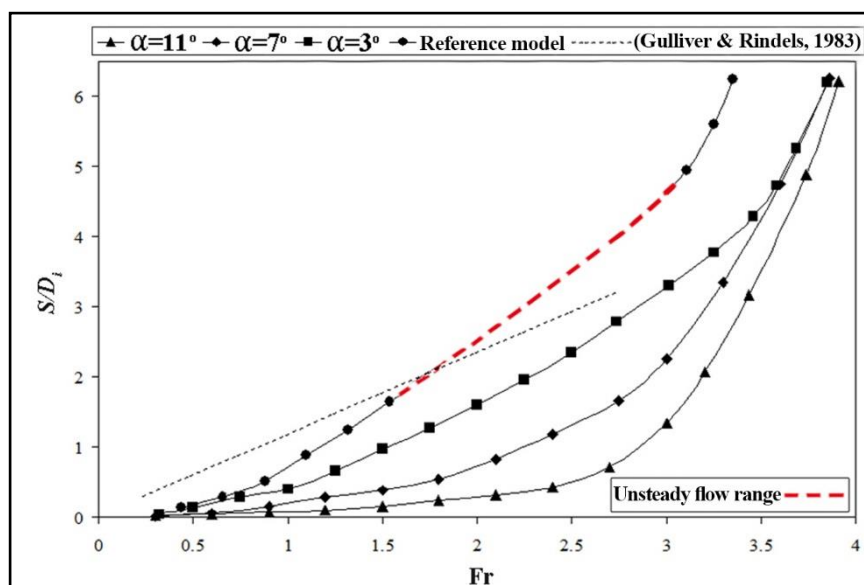
Fig. 7- Influence of deflector angle on relative submergence depth and vortex power at constant discharge 7 liters per second

(کمتر شدن زاویه α) مقاومت در برابر جریان کمتر می‌شود و هسته گرداب تمایل به نفوذ در آبگیر را دارد. بدین معنا که هسته گرداب به‌صورت شعاعی به سمت بیرون کشیده می‌شود. بر این اساس، برای حفظ این گرداب به چرخش بیشتری نیاز است. در این حالت، آبگیر با کاهش زاویه α در یک فرود ثابت، عمق استغراق نسبی بیشتری می‌طلبد. بنا به مطالعات یانگ و همکاران (Yang et al., 2014) در آبگیرهای قائم، اثر فشردگی^۲ و کششی^۳ گرداب همزمان با یکدیگر در تعامل هستند و اینکه کدام یک غالب خواهد بود به عدد فرود (Fr) بستگی دارد.

با توجه به شکل ۸، نصب دفلکتور باعث کاهش عمق استغراق نسبی در کل محدوده عدد فرود شده است؛ یعنی در یک فرود ثابت، هرچه زاویه α بیشتر باشد به عمق استغراق نسبی کمتری نیاز است. در بیان دقیق‌تر، دفلکتور درون مجرا به‌نوبه خود باعث فشردن هسته هوای گرداب و حرکت آن به سمت بالادست می‌شود، در نتیجه گرداب‌های ضعیف را ایجاد می‌کند و از میزان چرخش جریان روی تاج می‌کاهد، بنابراین آبگیر با افزایش زاویه α در یک فرود ثابت، به عمق استغراق نسبی کمتری نیاز دارد. از سوی دیگر، با بزرگتر شدن فضای داخلی آبگیر

1- Expansion
3- Stretching

2- Squeezing



شکل ۸- تغییرات عمق استغراق نسبی در مقابل عدد فرود

Fig. 8- The variation of the relative submergence depth versus the number Fr

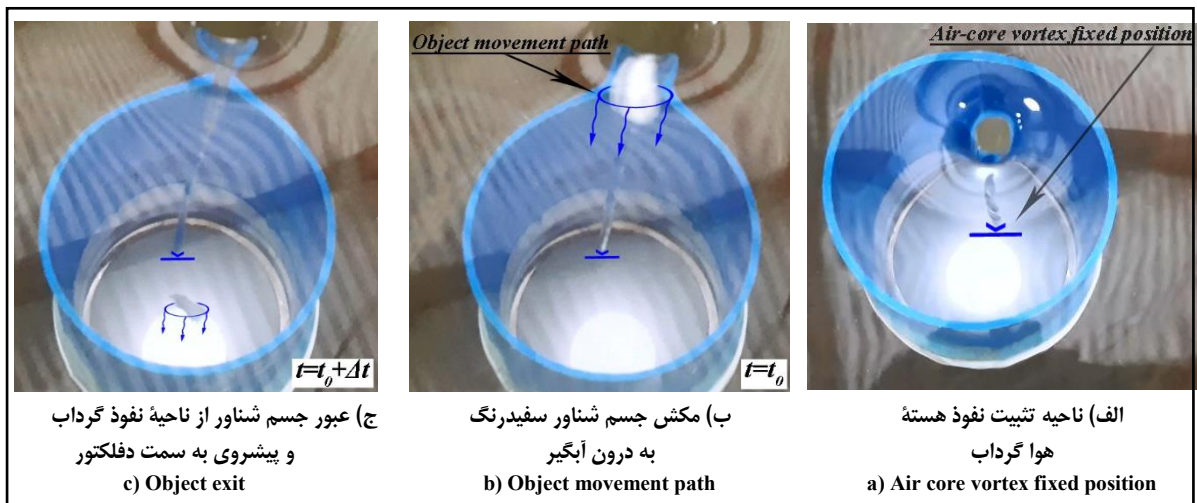
به دست آمده با نتایج بررسی‌های گالیور و ریندلز (Gulliver & Rindels 1983) مقایسه شده است. خط‌چین نقطه‌ای شکل ۸، نتایج این محققان را نشان می‌دهد که برآزش شده از نتایج آزمایشگاهی آبگیر قائم در حضور گردابه‌های نوع ۵ و ۶ در شرایط ناپایدار است. مشاهده می‌شود که آبگیر قائم رفتار منطقی دارد و دلیل اختلاف به وجود آمده در تفاوت اندک فیزیک مدل‌ها و ناپایداری شرایط جریان است.

شکل گرداب

الگوی جریان گردابی در ترازهای مختلفی از مخزن تشکیل شد و به شکل‌گیری انواع گرداب در مخزن انجامید. شکل اولیه گرداب ایجاد شده در سناریوهای مختلف و در تمامی آزمایش‌ها با چشم غیرمسلح قابل رؤیت بود و برای شناسایی دقیق شکل نهایی گرداب گاهی از ترفندهایی مطابق شکل ۹ استفاده شد. برای نمونه، مطابق شکل (۹-الف) برای دفلکتور با زاویه α معادل ۱۱ درجه به ازای Fr و S/D_i به ترتیب معادل ۲/۸ و ۰/۸۲، گردابی با هسته

بر این اساس، در نسبت S/D_i کم و در آبگیر با زاویه α معادل ۱۱ درجه، به دلیل انتقال سریع‌تر سطح مقطع جریان از روزنه به دفلکتور و به تبع آن افزایش سرعت جریان خروجی از آبگیر، عدد فرود افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. بنابراین، عمق استغراق نسبی با افزایش عدد فرود، بیشتر تحت تأثیر فاکتور فشردگی گرداب قرار می‌گیرد. با این همه، با کاهش زاویه α و در نتیجه کاهش عدد فرود، اثر کششی نقش بیشتری دارد تا اثر فشردگی، بدین معنا که هسته گرداب تمایل دارد به صورت شعاعی رو به بیرون کشیده شود، در نتیجه عمق استغراق نسبی با کاهش عدد فرود، بیشتر تحت تأثیر فاکتور کششی گرداب قرار می‌گیرد. همچنین، در مقایسه سناریوها نسبت به هم مشخص است با اینکه میزان تغییرات عمق استغراق نسبی در محدوده فرودهای میانی بسیار زیاد است، این روند در فرودهای بالا بسیار کمتر می‌شود به گونه‌ای که آهنگ تغییرات منحنی‌های مدل‌های دارای دفلکتور به صورت مجانبی به یکدیگر نزدیک می‌شوند. نتایج

می‌کنند و نه هوا، بنابراین مطابق با شکل (۹-ب) با استفاده از رهاسازی قطعه شناور سفید در مخزن در زمان t_0 و مکش آن به درون هسته هوا گرداب و حرکت به سمت پایین دست و عبور از ناحیه نفوذ گرداب در زمان $t_0 + \Delta t$ مطابق شکل (۹-ج)، گرداب نوع ۴ گزارش شد. هوا به درون آبیگر نفوذ کرده و موقعیت مکانی نفوذ خود را بین ناحیه نصب دفلیکتور و تراز تاج آبیگر تثبیت نموده است. برای شناسایی دقیق نوع گرداب، و از آنجایی که گرداب نوع ۳ و ۴ از نظر ظاهری تقریباً با هم شباهت دارند، با دانستن این موضوع که در گردابه‌های نوع ۴ فقط اجسام شناور به آبیگر نفوذ



شکل ۹- روند شکل‌گیری و شناسایی گرداب نوع ۴ (عمق استغراق بحرانی)

Fig. 9- The process of forming and identifying vortex type 4 (critical submergence depth)

همزمانی دو عامل جستجو کرد: یک عامل تشکیل کره‌های SSS با شعاعی کمتر از شعاع کره بحرانی CSSS و عامل دیگر این است که در دفلیکتورهای با زاویه α کم در یک هد ثابت، آبیگر دارای اعداد فرود پایین‌تری بوده لذا اثرهای کششی گرداب حاکم می‌شود. با مشاهده پارامترهای درج شده در جدول ۲ مشخص می‌شود که به‌ازای عمق استغراق نسبی $S/D_i \leq 4$ ، به‌دلیل قرارگیری مدل شاهد در محدوده جریان ناپایدار، گرداب شکل گرفته در دهانه ورودی آبیگر به‌صورت ناپایدار ایجاد می‌شود. اما در عمق استغراق نسبی برابر ۵، $(S/D_i = 5)$ گرداب در مدل شاهد پایدار می‌شود و گرداب نوع ۶ را تشکیل می‌دهد. با این همه، در دیگر سناریوها با کاهش

با توجه به مطالعات هیکر (Hecker, 1987) پارامترهای عمق استغراق نسبی (S/D_i) و عدد فرود (Fr) جزو مؤثرترین پارامترهای تأثیرگذار بر شکل گرداب هستند و از این‌رو پس از پردازش مشاهدات آزمایشگاهی، روند تغییرات نوع گرداب برای عمق استغراق نسبی (S/D_i) معادل ۲، ۳، ۴ و ۵ و اعداد فرود (Fr) معادل ۲/۳، ۲/۸، ۳/۳ و ۳/۸ به‌ترتیب در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است. ارزیابی‌های حاصل از تمامی سناریوها نشان می‌دهد در اکثر موارد در شرایط هیدرولیکی یکسان، کاهش زاویه α سبب افزایش نوع گرداب و به‌تبع آن افزایش قدرت گردابه می‌شود، با توجه به توضیحات ذکر شده در بخش‌های قبل، علت این پدیده را می‌توان در

می‌شود و گرداب نوع ۶ را تشکیل می‌دهد. در نسبت‌های Fr معادل $2/3$ و $3/8$ نوع شکل گرداب در مدل‌های با زاویه انحراف α معادل ۱۱، ۷ و ۳ درجه بدون تغییر نسبت به یکدیگر باقی می‌ماند و برای هر سه سناریو یکسان است. این موضوع نشان می‌دهد در فرودهای کم و همچنین فرودهای زیاد، عدد فرود (Fr) نقش مؤثرتری در شکل گرداب نسبت به زاویه α دارد. روند تغییرات نوع گرداب و به تبع آن قدرت گردابه در فرودهای میانی همچنان با کاهش زاویه α ، عموماً روندی افزایشی به خود می‌گیرد. با بررسی‌های دقیق‌تر جریان مشخص شد که با در نظر گرفتن یک سناریوی ثابت (ثابت بودن زاویه α) افزایش عدد فرود (Fr) سبب کاهش نوع گرداب و در نتیجه باعث کاهش قدرت گردابه خواهد شد. در مقایسه سناریوها نسبت به گرداب دیده می‌شود که آهنگ تغییرات نوع گرداب در نسبت $2/8$ بیشتر است تا در نسبت‌های دیگر.

زاویه α ، نوع گرداب عموماً روندی افزایشی به خود می‌گیرد. با بررسی‌های دقیق‌تر جریان مشخص شد که با در نظر گرفتن یک سناریوی ثابت (ثابت بودن زاویه α)، افزایش عمق استغراق نسبی (S/D_i) سبب کاهش نوع گرداب و در نتیجه باعث کاهش قدرت گردابه خواهد شد. در مقایسه سناریوها نسبت به هم دیده می‌شود که آهنگ تغییرات نوع گرداب در نسبت S/D_i معادل ۲ بیشتر است تا در نسبت‌های دیگر. یادآوری می‌شود وقوع گرداب نوع ۴ (عمق استغراق بحرانی) با کاهش زاویه α ، در ترازهای سطح آب بالاتری در مخزن رخ می‌دهد.

با توجه به داده‌های موجود در جدول ۳ دیده می‌شود که به ازای اعداد فرود $2 \leq Fr \leq 8$ ، به دلیل قرارگیری مدل شاهد در محدوده جریان ناپایدار، گرداب شکل گرفته در دهانه ورودی آبگیر به صورت ناپایدار تشکیل می‌شود. این اما در اعداد فرود بیش از $2/8$ ، گرداب در آبگیر بدون دفلکتور، پایدار

جدول ۲- شکل گرداب در S/D_i های مختلف

Table 2- Vortex type in different S/D_i

S/D_i	2				3				4				5			
α (°)	11	7	3	R.f*	11	7	3	R.f	11	7	3	R.f	11	7	3	R.f
VT	4	5	6	U.s**	4	4	6	U.s	4	4	4	U.s	3	4	4	6

* Reference model

**Unsteady

جدول ۳- شکل گرداب در اعداد فرود (Fr) مختلف

Table 3- Vortex type in different Fr

Fr	2.3				2.8				3.3				3.8			
α (°)	11	7	3	R.f	11	7	3	R.f	11	7	3	R.f	11	7	3	R.f
VT	6	6	6	U.s	4	5	6	U.s	4	4	5	6	3	3	3	6

عمق استغراق بحرانی $(S/Di)_{cr}$

وابسته نشان داده شده در رابطه ۳، مقادیر مشاهداتی زاویه α و عدد فرود $V/\sqrt{gD_i}$ در مقابل عمق استغراق بحرانی مشاهداتی $(S/Di)_{cr}$ ارزیابی شد. بدین منظور ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل (مرحله آموزش) و ۲۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی آن (مرحله آزمون) به کار گرفته شد. نداشت صورت گرفته بر فضای بین پارامترهای مستقل و وابسته را می‌توان به صورت رابطه ۴ نشان داد.

با توجه به آنچه در بخش آنالیز ابعادی بحث شد، از آنجایی که ماهیت گرداب نوع ۴ با عمق استغراق بحرانی آبیگر در توافق کامل است، نتایج آزمایشگاهی در حضور این نوع گرداب در تمامی سناریوهای مدل‌های دارای دفلیکتور پردازش شد. برای تعیین رابطه حاکم بر فضای تحقیق، از نرم‌افزار تحلیل گر آماری SigmaPlot استفاده شده است. برای تعیین فضای نداشت بین پارامترهای مستقل و

$$\left(\frac{S}{D_i}\right)_{cr} = (2Fr^2 - 8.8837Fr) - (101.0708\alpha^2 - 18.1697\alpha) + 10.2517 \quad (4)$$

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است. ضریب همبستگی رابطه پیشنهادی ۰/۹۹۸۳ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۶۳۹ برآورد شد. می‌توان دریافت که رابطه ۴ پارامتر $(S/Di)_{cr}$ را در مرحله آموزش حدود ۱ درصد کمتر از مقادیر مشاهداتی و در مرحله آزمون حدود ۱/۲ درصد بیشتر از مقادیر مشاهداتی پیش‌بینی می‌کند.

که در آن، زاویه انحراف دفلیکتورها (α) بر حسب رادیان (rad) است. به منظور ارزیابی نتایج رابطه ۴ از توابع تحلیل گر خطا استفاده شده است. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری در مراحل مختلف آموزش و آزمون برای تخمین عمق استغراق بحرانی در جدول ۴ و

جدول ۴- توابع خطای حاصل از نتایج معادله پیشنهادی (۴) در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی

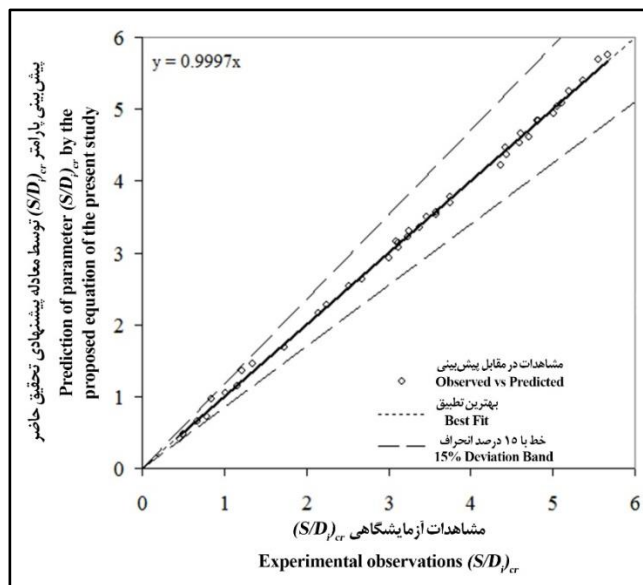
Table 4- Error functions obtained from the results of the proposed equation (4) versus the experimental observations

مرحله Stage	پارامتر Parameter	ضریب همبستگی The coefficient of determination	ریشه میانگین مربعات خطا Root mean squared error	میانگین خطای مطلق Mean absolute error	ضریب وزن باقیمانده Coefficient of residual mass	راندمان مدل‌سازی Modeling efficiency	ضریب زاویه Angle factor
آموزش Training (80%)	$(S/Di)_{cr}$	0.9983	0.0639	0.052	1.028×10^{-10}	0.9983	0.9997
آزمون Testing (20%)	$(S/Di)_{cr}$	0.9975	0.0798	0.0731	0.0284	0.9975	1.0126

منظور ابتدا تعدادی از آزمایش‌های برخوردار از شاخص تطبیق مناسب نسبت به رابطه برآورد شده، انتخاب شدند و مقدار عدد فرود (Fr) در آنها

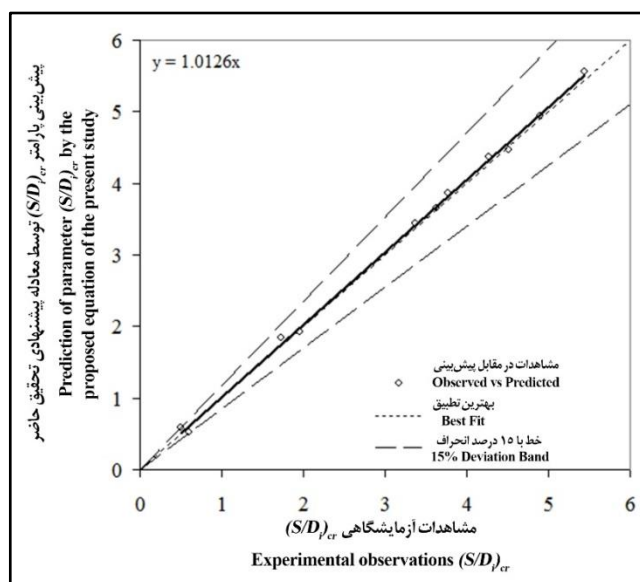
به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر رابطه عمومی معرفی شده در تخمین عمق استغراق بحرانی، حساسیت رابطه ۴ تحلیل شد. برای این

به ترتیب به میزان ± 5 ، ± 10 و ± 15 درصد نمودار شده و نتیجه این تغییرات بر عملکرد رابطه ۴ در تخمین عمق استغراق بحرانی $(S/D)_{cr}$ ارزیابی شد. شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نمونه‌هایی از تحلیل حساسیت را در آزمون‌هایی با عمق استغراق بحرانی برابر ۴ در زاویه α برابر ۷، ۱۱ و ۳ درجه با اعداد فرود به ترتیب معادل ۳/۵۸، ۳/۴۳ و ۳/۴ نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- پیش‌بینی پارامتر $(S/D)_{cr}$ در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آموزش

Fig. 10- Prediction of parameter $(S/D)_{cr}$ versus experimental observations in training phase

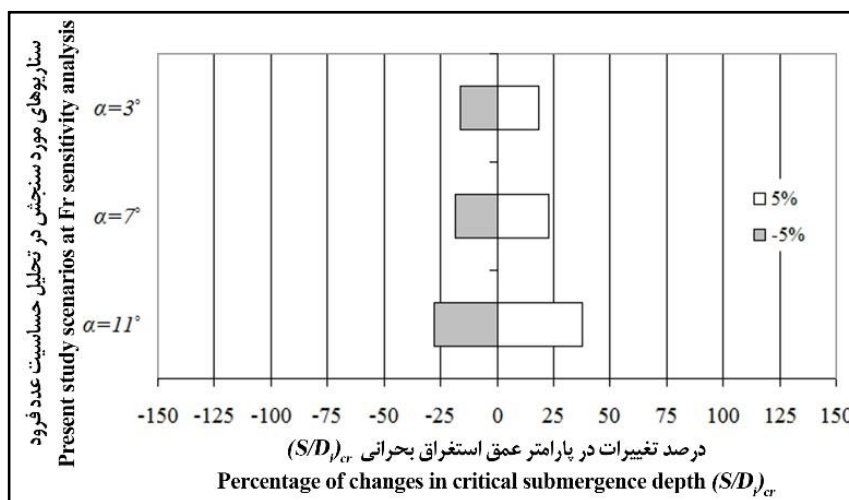


شکل ۱۱- پیش‌بینی پارامتر $(S/D)_{cr}$ در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آزمون

Fig. 11- Prediction of parameter $(S/D)_{cr}$ versus experimental observations in testing phase

یادآوری می‌شود که تحلیل حساسیت در چندین مرحله از آزمایش‌ها به اجرا درآمد ولی به دلیل تشابه نتایج صرفاً نمونه‌ای از آن در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ به نمایش گذاشته شده است. تحلیل‌ها حاکی از آن است که افزایش اعداد فرود به میزان ۵ درصد منجر به رشد به میزان ۳۷/۵، ۲۲/۸ و ۱۸/۶ درصد در عمق استغراق بحرانی (شکل ۱۲).

یادآوری می‌شود که تحلیل حساسیت در چندین مرحله از آزمایش‌ها به اجرا درآمد ولی به دلیل تشابه نتایج صرفاً نمونه‌ای از آن در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ به نمایش گذاشته شده است. تحلیل‌ها حاکی از آن است که افزایش اعداد فرود به میزان ۵ درصد منجر به رشد به میزان ۳۷/۵، ۲۲/۸ و ۱۸/۶ درصد در عمق استغراق بحرانی (شکل ۱۲).



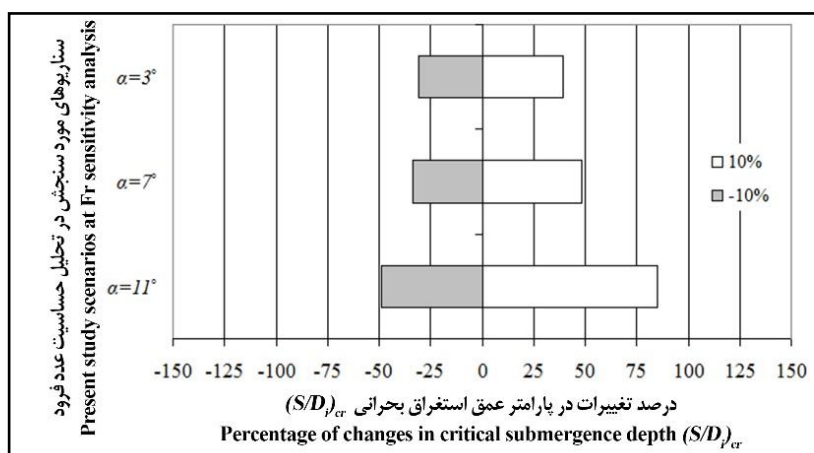
شکل ۱۲- تحلیل حساسیت پارامتر $(S/Di)_{cr}$ برای تغییر به میزان $\pm 5\%$ در اعداد فرود مورد آزمون

Fig. 12- Sensitivity analysis of $(S/Di)_{cr}$ parameter for change of $\pm 5\%$ in the tested Fr numbers

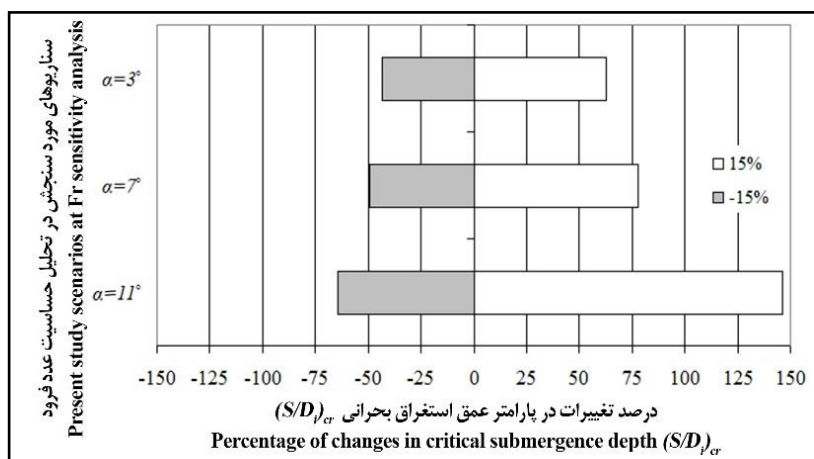
زاویه α معادل ۱۱، ۷ و ۳ درجه روبه‌رو خواهد شد (شکل ۱۳).

نتایج حاصل از تکرار تغییرات اعمال شده به میزان $\pm 15\%$ درصد در اعداد فرود، مشاهده گردید که این افزایش در هر یک از زاویه‌های α معادل ۱۱، ۷ و ۳ درجه به ترتیب به افزایش ۱۴۶/۱، ۷۷/۷ و ۶۲/۸ درصد می‌انجامد و با کاهش ۱۵ درصد در اعداد فرود مورد آزمون، به ترتیب ۶۴/۴، ۴۹/۳ و ۴۳/۱ درصد از عمق استغراق بحرانی آنگیبر کاسته می‌شود (شکل ۱۴).

تغییر بیشتر در اعداد فرود بر عمق استغراق بحرانی آنگیبر مؤثر است. در مرحله نمو افزایشی اعداد فرود تا سر حد ۱۰ درصد فرودهای مورد آزمون، مشاهده شد که پارامتر $(S/Di)_{cr}$ به ترتیب در هر یک از زاویه‌های α معادل ۱۱، ۷ و ۳ درجه، معادل ۸۵/۲، ۴۸/۳ و ۳۹/۵ درصد رشد داشته است. در نقطه مقابل، با کاهش ۱۰ درصد در اعداد فرود در آزمون‌های مربوط، عمق استغراق بحرانی آنگیبر با کاهشی به ترتیب معادل ۴۸/۷، ۳۳/۴ و ۳۰/۶ درصد در هر یک از سناریوهای تغییر در



شکل ۱۳- تحلیل حساسیت پارامتر $(S/D)_{cr}$ برای تغییر به میزان $\pm 10\%$ درصد در اعداد فرود مورد آزمون
 Fig. 13- Sensitivity analysis of $(S/D)_{cr}$ parameter for change of $\pm 10\%$ in the tested Fr numbers



شکل ۱۴- تحلیل حساسیت پارامتر $(S/D)_{cr}$ برای تغییر به میزان $\pm 15\%$ درصد در اعداد فرود مورد آزمون
 Fig. 14- Sensitivity analysis of $(S/D)_{cr}$ parameter for change of $\pm 15\%$ in the tested Fr numbers

در ارزیابی بین سناریوهای تحقیق حاضر می‌توان گفت که اثر میزان تغییرات عدد فرود بر عمق استغراق بحرانی آبگیر، با افزایش زاویه α ، روندی افزایشی دارد که دلیل آن نیز افزایش ناگهانی تراز سطح آب مخزن و در نتیجه افزایش سریع‌تر سرعت جریان خروجی و عدد فرود در دفلکتورهایی با زاویه بیشتر است که به نوبه خود بر تغییرات آنی فاکتورهای فشردگی و کششی گرداب و در نتیجه عمق استغراق بحرانی آبگیر اثرگذار هستند.

در یک ارزیابی کلی می‌توان گفت که با اعمال $\pm 5\%$ درصد تغییر در اعداد فرود مورد آزمون در هر یک از سناریوی تغییر در زاویه α معادل ۳، ۷ و ۱۱ درجه، در مجموع عمق استغراق بحرانی $(S/D)_{cr}$ را به ترتیب ۶۵، ۴۱ و ۳۴/۸ درصد تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مقادیر برای اعمال تغییر به میزان $\pm 10\%$ درصد، به ترتیب معادل ۱۳۳/۹، ۸۱/۷ و ۷۰/۱ و برای اعمال تغییر به میزان $\pm 15\%$ درصد به ترتیب معادل

در ارزیابی بین سناریوهای تحقیق حاضر می‌توان گفت که اثر میزان تغییرات عدد فرود بر عمق استغراق بحرانی آبگیر، با افزایش زاویه α ، روندی افزایشی دارد که دلیل آن نیز افزایش ناگهانی تراز سطح آب مخزن و در نتیجه افزایش سریع‌تر سرعت جریان خروجی و عدد فرود در دفلکتورهایی با زاویه بیشتر است که به نوبه خود بر تغییرات آنی فاکتورهای فشردگی و کششی گرداب و در نتیجه عمق استغراق بحرانی آبگیر

۲۱۰/۵، ۱۲۷ و ۱۰۵/۹ است.

در حالت کلی، با نصب دفلکتور و افزایش زاویه α ، عمق استغراق بحرانی کاهش می‌یابد به گونه‌ای که استفاده از دفلکتور با زاویه ۱۱ درجه نسبت به شرایط استفاده از دفلکتور با زاویه ۳ درجه، در بیشترین حالت حدود ۸۹ درصد و به‌طور میانگین حدود ۵۰ درصد کاهش در عمق استغراق بحرانی نشان می‌دهد. سرانجام با تحلیل نتایج به‌دست آمده، رابطه‌ای برای پیش‌بینی عمق استغراق بحرانی آبیگرهای قائم بر حسب عدد فرود Fr و زاویه α ارائه شده است.

رابطه ارائه شده جهت عمق استغراق بحرانی با اعمال تغییرات در عدد فرود مورد آزمون به‌میزان $\pm 5\%$ ، $\pm 10\%$ و $\pm 15\%$ درصد، مورد آنالیز حساسیت قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که اعمال $\pm 15\%$ درصد تغییر به نسبت $\pm 5\%$ درصد تغییرات در اعداد فرود مورد آزمون در هر یک از سناریوهایی تغییر در زاویه α معادل ۱۱، ۷ و ۳ درجه، در مجموع عمق استغراق بحرانی $(S/D_i)_{cr}$ را به ترتیب ۱۴۵/۵، ۸۶ و ۷۱/۱ درصد بیشتر تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت حاکی از آن است که تغییر در عدد فرود در زاویه α معادل ۱۱ درجه نقشی دوچندان نسبت به تغییر در عدد فرود در زاویه α معادل ۳ درجه در تعیین پارامتر $(S/D_i)_{cr}$ دارد.

سرانجام، دفلکتور با کاهش تراز مجاز بهره‌برداری مخزن، میزان خسارات ناشی از ورود هوا به توربین‌ها و حتی پمپ‌ها را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. می‌توان با مکانیکی کردن دفلکتور و تغییر زاویه آن به‌صورت خودکار، نحوه تغییرات تراز مخزن را بر میزان انحراف جریان با نصب سنسور کنترل کرد و به نوعی تراز مجاز بهره‌برداری را در مخزن مدیریت نمود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، با نصب دفلکتور در مجرای آبیگرهای قائم واقع در مخزن، تأثیر زاویه انحراف جریان α بر عملکرد هیدرولیکی آن به‌خصوص شکل گرداب و عمق استغراق بحرانی بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تعیین دفلکتور علاوه بر کاهش عمق استغراق بحرانی، سبب ثبات تغییرات تراز سطح آب مخزن و جلوگیری از شرایط جریان ناپایدار، بروز مکش، لرزش و سروصداهای ناشی از کارکرد آبیگر می‌شود.

تغییر زاویه انحراف α مستقیماً بر شکل‌گیری کره‌های جریان SSS و CSSS اثرگذار است، به‌گونه‌ای که با نصب دفلکتور و افزایش زاویه انحراف α ، علاوه بر اینکه اثر سطح ریزش کروی (SSS) کوچک‌تر می‌شود، شعاع آن نیز همواره روندی به‌سمت بیشتر شدن از شعاع کره بحرانی CSSS دارد. با افزایش زاویه انحراف α و در نتیجه افزایش عدد فرود، عمق استغراق نسبی S/D_i در آبیگر بیشتر تحت تأثیر فاکتور فشردگی گرداب قرار می‌گیرد، اما با کاهش زاویه α و در نتیجه کاهش عدد فرود، اثر کششی گرداب بیشتر از اثر فشردگی آن بر عمق استغراق نسبی S/D_i است.

ارزیابی‌های حاصل از شکل گرداب نشان می‌دهد که در اکثر موارد در شرایط هیدرولیکی یکسان، افزایش زاویه α سبب کاهش نوع گرداب و به‌تبع آن کاهش قدرت گردابه می‌شود. همچنین شکل گرداب با در نظر گرفتن یک مقدار ثابت برای زاویه انحراف α ، با افزایش عمق استغراق نسبی و عدد فرود، روندی کاهش‌یافته می‌گیرد.

قدردانی

از دانشگاه صنعتی جندی شاپور به پاس تأمین منابع مالی و فراهم آوردن امکان استفاده از آزمایشگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه گروه مهندسی عمران سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- Amiri, S. M., Zarrati, A. R., Roshan, R., & Sarkardeh, H. (2011). Surface vortex prevention at power intakes by horizontal plates. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 164(4), pp. 193-200.
- Anwar, H. O., & Amimilett, M. B. (1980). Vortices at vertically inverted intake. *Journal of Hydraulic Research*, 18(2), pp. 123-134.
- Anwar, H. O., Weller, J. A., & Amphlett, M. B. (1978). Similarity of free-vortex at horizontal intake. *Journal of Hydraulic Research*, 16(2), pp. 95-105.
- Chen, S. H., & Chen, M. (2015). *Hydraulic Structures*. Springer.
- Gulliver, J. S., & Rindels, A. J. (1983). An experimental study of critical submergence to avoid free-surface vortices at vertical intakes. *Project Report*. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota.
- Hecker, G. E. (1987). *Fundamentals of Vortex Intake Flow*. In J. Knauss (Ed.) Swirling Flow Problems at Intakes. London: Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203737552>.
- Khanarmuei, M. R., Rahimzadeh, H., & Sarkardeh, H. (2015). Investigating the effect of intake withdrawal direction on critical submergence and strength of vortices. *Modares Mechanical Engineering*, 14(10), pp. 35-42. (in Persian)
- Knauss, J. (1987). Swirling Flow Problems at Intakes. *IAHR Hydraulic Structures Design Manual*. London: Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203737552>.
- Kocabaş, F., & Yildirim, N. (2002). Effect of circulation on critical submergence of an intake pipe. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), pp. 741-752.
- Lashkar-Ara, B., & Sheikhi, Y. (2017). Introduce of CPK spillway and study of its discharge coefficient under free flow regime. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(2), pp. 209-221. (in Persian)
- Naderi, V., & Gaskin, S. (2018). An experimental study of the performance of an ogee-shaped vertical intake: geometrical parameters of crossvane vortex inhibitor. In 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures. May. 15-18. Aachen, Germany.
- Sarkardeh, H. (2017). Minimum reservoir water level in hydropower dams. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(4), pp. 1017-1024.
- Sarkardeh, H., Jabbari, E., Zarrati, A. R., & Tavakkol, S. (2014). Velocity field in a reservoir in the presence of an air-core vortex. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 167(6): pp. 356-364.

- Sarkardeh, H., Zarrati, A. R., & Roshan, R. (2010). Effect of intake head wall and trash rack on vortices. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), pp. 108-112.
- Sheikhi, Y., Lashkar-Ara, B., Fathi-Moghadam, M., & Valipour, M. (2018). Critical submergence estimation for horizontal intakes derived from reservoir using intelligent and statistical methods. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(3), pp. 171-184. (in Persian)
- Tastan, K., & Yildirim, N. (2010). Effects of dimensionless parameters on air-entraining vortices. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), pp. 57-64.
- Tastan, K., & Yildirim, N. (2018). Effects of intake geometry on the occurrence of a free-surface vortex. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(4), 04018009.
- Yang, J., Liu, T., Bottacin-Busolin, A., & Lin, C. (2014). *Effects of intake-entrance profiles on free-surface vortices*. *Journal of Hydraulic Research*, 52(4), pp. 523-531.
- Yildirim, N. & Kocabaş, F. (1995). Critical submergence for intakes in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(12), pp. 900-905.

Investigation of the Effect of Symmetrical Deflector Angle on Performance of Vertical Intake

S. Esmaeili-Zadeh and B. Lashkar-Ara *

*Corresponding Author: Associate Professor, Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran. Email: lashkarara@jsu.ac.ir

Received: 24 April 2019; Accepted: 20 July 2019

Extended Abstract

Introduction

Formation of air-entraining vortices in an intake leads to unsteady flow and cause problems such as vibration in hydro mechanical equipment, abnormal noises, severe fluctuations in local pressures and exacerbated cavitation conditions (Chen & Chen, 2015). As stated by (Sarkardeh, 2017) the stronger vortex the greater will be its negative effects on intake performance. There have been many studies on the critical submerged depth and vortex formation in intakes. (Kocabas & Yildirim, 2002) investigated the effect of rotational flow on the critical submerged depth in intakes and found that the vortex formation with the air-core vortex and the critical submerged depth was significantly dependent on the approach flow conditions and the inlet geometry. Therefore, a separate case study should be undertaken to address any structure with a particular geometry. In this paper, the effect of flow rate deviation due to the use of a deflector on a vertical intake was investigated. In this paper, also the variation of submerged depth, Froude number, vortex type, and critical submerged depth was discussed.

Methodology

In this study, different scenarios were created by varying the deflector angle from 3 to 11 degrees. In order to measure the discharge rate, the flow passes an electromagnetic flow meter with a full-scale accuracy of $\pm 0.2\%$. A depth gauge with an accuracy of ± 0.05 mm was used to measure the water head on the intake crest. Given that the critical submerged depth is in agreement with the nature of the type 4 vortex (Naderi & Gaskin, 2018). Therefore, in experiments with the observation of type 4 vortex, the critical submerged depth was determined. Then, according to the dimensional analysis and the results of the last experiments, the key factors affecting the critical submerged depth, including deflector angle (α) and Froude number (Fr) were identified. The range of variation of the tested parameters included in deflector angle (α) of 3, 7 and 11 degrees, the discharge of 2 to 26 liter/s and the Froude number of 0.3 to 3.9.

Results and Discussion

After processing experimental observations, the trend of the rating curve changes, the relative submerged depth versus the Froude number, as well as the vortex type were evaluated. The results showed that the flow with a higher deviation angle α has a steeper rating curve. In other words, the angle α has a direct effect on the spherical sink surface sector, so that by increasing the angle α , the effective cross-sectional area of the flow decreases, resulting in a reduced spherical sink surface sector, and leading to a weak performance of the intake. This caused water to be stored in the reservoir for low discharges. According to the experimental observations at a fixed Froude number, the greater the angle α , the lower the relative submerged depth. To be more precise, the deflector inside the intake, in turn, compresses the air-core vortex and moves it upstream, thereby creating weak vortices and reducing the amount of rotation of the flow on the crest, thus it was observed that with increasing the angle α at a constant Froude number, less relative submersion depth was required. On the other hand, decreasing the angle of α causes the vortex core to be emitted outward, so more rotation was needed to maintain this vortex. Therefore, in this situation, the intake at a constant Froude number requires a greater relative submersed depth.

Conclusions

The results of this study showed that the use of a deflector in the vertical intake, in addition to reducing the critical submerged depth, weakens the formation of a vortex, stabilizes reservoir water level changes, and prevents unsteady flow conditions. The results also revealed that an increase in deviation angle α and consequently the Froude number, allowed the vortex compression effect to impose the greatest impact on the relative submerged depth (S/D_i).

Acknowledgement

We are grateful to Jundi-Shapur University of Technology and for funding of present project allowing access to the hydraulic and river engineering laboratory of the Department of Civil Engineering.

Keywords: Critical Submergence Depth, Rotational Flow, Spherical Sink Surface, Vortex Formation