

مطالعه عددی عملکرد همزمان سرریز و آبگیر سد و نیروگاه جریان

ابراهیم اسمعیل پور^۱

حامد سرکرده^{۲*}

ابراهیم جباری^۳

چکیده

در پژوهش حاضر با شبیه‌سازی عددی ۱۶ گرداب در کلاس‌های مختلف به بررسی تأثیر عملکرد همزمان سرریز و آبگیر نیروگاه در سد و نیروگاه مسجدسلیمان پرداخته شده است. روش حجم سیال (VOF) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) در شبیه‌سازی سطح آزاد و آشفتگی مورد استفاده قرار گرفت. با مقایسه هزینه محاسبات و مقدار خطا، اندازه شبکه‌ی ۵ میلی‌متر برای مدل‌سازی، به‌عنوان اندازه‌ی شبکه‌بندی مناسب تعیین شد. در گرداب‌های کلاس A زمانی که جریان سرریز در بیشترین حالت خود قرار دارد؛ در عدد فرود (Fr) $3/7$ و در عمق استغراق نسبی (S/D) $2/1, 1/5$ و $2/4$ باعث کاهش ۲۳٪، ۳۶٪ و ۶۸٪ قدرت گرداب می‌شود. جریان سرریز در گرداب‌های شکل‌گرفته‌ی کلاس A باعث حذف گرداب نمی‌شود، اما باعث تغییر کلاس گرداب به نوع B و C در بعضی از حالت‌ها می‌شود. در گرداب‌های تشکیل‌شده کلاس B و C با عملکرد همزمان سرریز و آبگیر، به‌طور کامل گرداب‌ها از بین می‌روند و چرخشی در سطح مخزن دیده نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی

گرداب، آبگیر، مدل‌سازی عددی، نیروگاه جریانی، جریان سرریز

^۱ دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

^{۲*} دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری. sarkardeh@hsu.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

مقدمه

آن هسته کامل هوا شکل گیرد (S_c). عمق استغراق نسبی به صورت S/D تعریف می شود که D قطر آبگیر است. صنعتی منفرد در سال ۲۰۱۱ بیان کرد عوامل مهمی در تعیین S_c تأثیر می گذارند که از جمله این عوامل: قطر لوله (D)، جرم حجمی آب (ρ)، سرعت متوسط جریان در مجرای آبگیر (V)، لزجت سینماتیکی سیال (ν)، شتاب ثقل زمین (g)، کشش سطحی سیال (σ)، قدرت گرداب (Γ) و جهت آبگیری (ϕ) است؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت که S_c تابعی از این عوامل است:

$$S_c = f(D, V, g, \rho, \sigma, \Gamma, \phi, \nu) \quad (1)$$

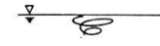
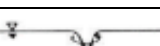
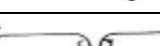
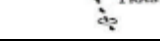
در نهایت با استفاده از تحلیل ابعادی و معرفی پارامترهای قطر و سرعت جریان به عنوان متغیرهای مستقل، رابطه بی بعد زیر به دست آمده است.

$$\left(\frac{S}{D}\right)_{cr} = f\left(\phi, \frac{V}{\sqrt{gd}}, \frac{Vd}{\nu}, V\sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}}, \frac{\Gamma}{Vd}\right) \quad (2)$$

که ϕ جهت آبگیری، $Fr = V/\sqrt{gd}$ عدد فرود، $Re = VD/\nu$ عدد رینولدز، $We = V\sqrt{\rho D/\sigma}$ عدد وبر و $N_\Gamma = \Gamma D/Q$ عدد گردندگی می باشد.

تشکیل گرداب در دهانه آبگیر نیروگاه می تواند اثرات منفی قابل توجهی بر عملکرد و طول عمر یک نیروگاه برق آبی همچون تولید ارتعاشات و صدا، افزایش افت هیدرولیکی در دهانه آبگیر نیروگاه، افزایش مشکلات عملیاتی مانند مسدود شدن مجاری آشغال گیر، تشدید خلاءزایی و خوردگی در اثر مکش هوا و مواد شناور روی سطح آب و کاهش عمر توربین ها شود (لاگت^۱، ۱۹۸۳). هکر^۲ در سال ۱۹۸۷ گرداب ها را بر اساس قدرت و شکل آن ها به شش دسته تقسیم کرد. همچنین سرکرده و همکاران در سال ۲۰۱۰ گرداب ها را بر اساس مخاطره آمیز بودن در سه دسته کلی کلاس C شامل گرداب های کم خطر، کلاس B، گرداب های با قابلیت حمل مواد معلق و کلاس A، گرداب های با هسته هوا تقسیم بندی کردند. جدول (۱)، ترکیب دسته بندی بر اساس قدرت و مخاطره آمیز بودن گرداب ها را نشان می دهد. می و ویلوگی^۳ در سال ۱۹۹۰ برای توصیف بهتر پدیده گرداب از متغیرها و مشخصه هایی مانند عمق استغراق و عمق استغراق بحرانی و اعداد بی بعد مرتبط استفاده نمودند. عمق استغراق به ارتفاع تراز سطح آب نسبت به خروجی (S) اطلاق می شود. عمق استغراق بحرانی ارتفاعی است که در

جدول (۱): تقسیم بندی انواع گرداب بر اساس اندازه قدرت و مخاطره آمیز بودن (سرکرده و همکاران، ۲۰۱۰)

نوع گرداب	شکل گرداب	وضعیت گرداب	دسته بندی
۱		چرخش هایی در سطح آب مشاهده می شود	C
۲		فرورفتگی کوچکی در سطح آب مشاهده می شود اما مسیر چرخش مواد رنگی را نمی توان مشاهده کرد	
۳		با ریختن مواد رنگی به داخل جریان، مخروط چرخشی ماده رنگی مشاهده می گردد	B
۴		ذرات شناور نیز به داخل گرداب و در نتیجه مجرای آب برکشیده می شوند	
۵		بر اجسام شناور حباب های هوا نیز به داخل مجرا کشیده شده	A
۶		یک هسته هوا از سطح آزاد آب تا مجرای آبگیر مشاهده می شود	

³ May and Willoughby

¹ Lugt

² Knauss

هم‌زمان با پیشرفت مدل‌سازی‌های عددی در مهندسی، راجندران^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۹ به بررسی مدل آزمایشگاهی و عددی آبگیر یک پمپ پرداختند. آن‌ها ابتدا در مدل آزمایشگاهی گرداب با سطح آزاد را تشکیل داده، سپس پارامترهای مدنظر را توسط دستگاه PIV^۲ برداشت کرده‌اند. این پژوهش‌گران در مدل‌سازی عددی از متوسط‌گیری رینولدز در معادلات ناویراستوکس^۳ استفاده کردند. درنهایت آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل عددی در تعیین نوع گرداب و موقعیت گرداب‌ها موفق بوده است، ولی در تعیین ابعاد گرداب چندان رضایت‌بخش نبوده است. بطوریکه اندازه بزرگ‌ترین گرداب در مدل آزمایشگاهی بیشتر از مقدار عددی آن است. علاوه بر این در محاسبه قدرت گرداب‌ها نیز بین مدل عددی و آزمایشگاهی تفاوت‌هایی وجود دارد. سورچ^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۶ با مطالعه و بررسی دو هندسه مختلف آبگیر به مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی پرداختند. مدل عددی این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-CFX انجام شده است. برای شبیه‌سازی سطح آزاد آب از روش حجم سیال (VOF)^۵ و برای مدل آشفتگی از مدل $k - \epsilon$ استفاده شده است. بررسی نتایج و تحلیل سرعت نشان داد که نحوه تشکیل گرداب در دو مدل هندسی از نظر کیفی با هم متفاوت است. علاوه بر این آن‌ها شاهد وقوع گرداب از کف و سطح مخزن توسط خطوط جریان بوده‌اند. اکامورا^۶ و همکاران در سال ۲۰۰۷ به مطالعه عددی و آزمایشگاهی آبگیر پمپ پرداختند. این پژوهش‌گران با استفاده از STAR-CD، ANSYS-CFD، VISUAL FLUID SYSTEM 3D و SCRYU/TETRA^۷ و مدل‌های آشفتگی $k - \epsilon$ و SST و شش کد مختلف مدل‌سازی را ایجاد کردند و نتایج آن‌ها را با هم مقایسه کردند. این پژوهش‌گران اظهار کردند که در مدل آزمایشگاهی عمق استغراق متناسب با مقدار دبی متغیر است و گرداب‌های تشکیل شده دارای

هسته هوای ناپایدار هستند. نتایج مدل عددی نشان داد که برخی از مدل‌سازی‌ها برای تعیین محل وقوع گرداب با توجه به دبی جریان و ارتفاع آب موفق بوده است. در پژوهش دیگر که توسط لی^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۹ انجام شد، در یک مدل آزمایشگاهی دارای روزنه که در کف آن قرار دارد به مطالعه و بررسی تشکیل گرداب پرداختند. این پژوهش‌گران به مدل‌سازی سه‌بعدی هندسه مورد آزمایش در نرم‌افزار فلوئنت^۹ پرداختند. علاوه بر این، آن‌ها با منقطع‌سازی معادلات ناویراستوکس به روش حجم محدود و حل آن‌ها به روش SIMPLE به کمک کدنویسی انجام دادند. درنهایت با تطابق داده آزمایشگاهی و مدل عددی به این نتیجه رسیدند که نیروی کوریولیس^{۱۰} بیشترین تأثیر در گرداب را دارد. چن^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۲ به مطالعه و بررسی یک گرداب عمودی با استفاده از روش VOF، با مقایسه مدل‌های آشفتگی پرداختند. درنهایت آن‌ها بیان کردند که روش RNG نسبت به روش $k - \epsilon$ استاندارد بهتر است زیرا باعث انقباض سریع‌تر خطوط جریان می‌شود. آن‌ها بیان کردند که گرداب هیچ زمانی در مدل $k - \epsilon$ استاندارد تشکیل نمی‌شود، در صورتی که در روش RNG، گرداب در زمان ۷۰ ثانیه شروع به تشکیل شدن می‌کند و در زمان ۸۴ ثانیه کاملاً مشاهده می‌شود. در مدل RNG، انرژی آشفتگی در هسته گرداب به دلیل گردش بالا است و به دلیل پایین آمدن سرعت در بیرون هسته گرداب کاهش می‌یابد؛ اما در مدل استاندارد، در تمام محدوده گرداب، انرژی سینماتیکی بالا است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل استاندارد برای شبیه‌سازی گرداب مناسب نیست. به‌طور مشابه در مدل RNG، نرخ از بین رفتن آشفتگی زیاد است در صورتی که در مدل استاندارد در کل محدوده گرداب این مقدار بالا است؛ که افزایش مقدار این نرخ خود می‌تواند باعث عدم تشکیل گرداب شود. از سوی دیگر ویسکوزیته سیال در محدوده گرداب در روش استاندارد بسیار بیشتر از روش RNG است. این موارد دلیل ناکامی مدل استاندارد در مدل‌سازی عددی گرداب است.

^۸ Li^۹ Fluent^{۱۰} Coriolis force^{۱۱} Chen^۱ Rajendran^۲ Particle Image Velocimetry^۳ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)^۴ Suerich^۵ Volume of Fluid^۶ Okamura^۷ Renormalization Group

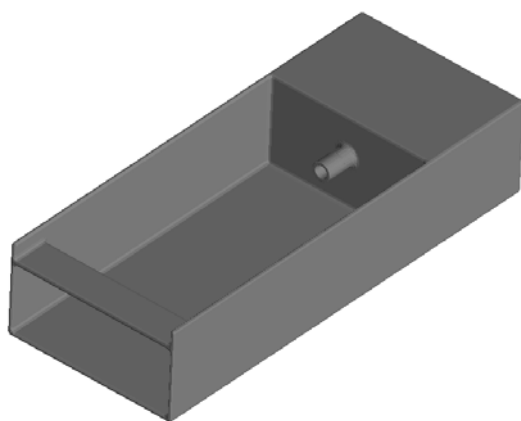
در مدل عددی با داده‌های تحلیلی، ۵٪ انحراف مشاهده نمودند. این پژوهش‌گران با مطالعه خطوط جریان در مطالعه عددی نتیجه گرفتند که سازه ضدگرداب قیفی نسبت به سازه صفحه‌ای عملکرد مؤثرتری در کاهش ورتیسیته^۴ در آبگیر داشته است. زی^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی گرداب در مراحل مختلف تشکیل پرداختند. این پژوهش‌گران با استفاده از مدل آشفتگی LES به مدل‌سازی گرداب پرداختند. آن‌ها دریافتند گرداب‌های عمودی ضعیفی در نزدیکی آبگیر توزیع می‌شوند و با اثر کشش تقویت می‌شوند. در نهایت این گرداب‌ها که به‌طور تصادفی توزیع شده بودند، با یکدیگر ترکیب شده و به یک گرداب بزرگ با هسته هوا تبدیل می‌شوند و در نهایت یک گرداب با هسته هوا تشکیل می‌شود. در سال ۲۰۲۱ نیز سرکرده و ماروسی با استفاده از مدل اسپیرال، معادلات حاکم بر حرکت سیالات را مورد بررسی قرار دادند.

مطالعاتی نیز در زمینه عملکرد سرریزها انجام شده است. فدائی و بارانی در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی عددی جریان یک سرریز پرداختند. از آنجاکه جریان واقعی آشفته است، از مدل RNG برای شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج محاسباتی عددی فشار پیرومتری و سرعت جریان در طول سرریز با نتایج حاصل از آزمون‌های مدل هیدرولیکی مقایسه شد. حداکثر اختلاف بین نتایج محاسبه‌شده و آزمایش در مقادیر میانگین سرعت ۵/۴۷٪ و در مقادیر فشار پیرومتری ۷/۹۷٪ بود و نتایج عددی با آزمایش‌ها مطابقت داشت. سرکرده و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از یک مدل عددی و یک مدل آزمایشگاهی به بررسی کانال تقرب سرریز و بهبود الگوی جریان بر روی سرریز پرداختند. در این شبیه‌سازی از مدل RNG و VOF به ترتیب برای شبیه‌سازی آشفتگی و مدل‌سازی سطح آب استفاده شده است. با توجه به شبیه‌سازی انجام‌شده بهترین پروفیل برای سرریز پلکانی انتخاب شد. دهدار و پارسایی در سال ۲۰۱۶ به مطالعه اثر هندسه دیواره هدایت‌کننده بر الگوی جریان با استفاده از شبیه‌سازی فیزیکی و عددی پرداختند. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام شد. برای این مطالعات سه طرح برای دیواره راهنما ارائه شد.

سرکرده و همکاران در سال ۲۰۱۴ در مورد میدان جریان در مخزن در حضور گرداب با استفاده از مدل‌سازی عددی مطالعاتی انجام دادند. مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار FLOW 3D ساخته و برای صحت‌سنجی آن از یک مدل آزمایشگاهی استفاده شده است. این پژوهش‌گران برای مدل‌سازی سطح آب از روش VOF و از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)^۱ استفاده کرده‌اند. آن‌ها به مطالعه مدل آشفتگی k-ε پرداختند ولی هیچ‌گونه گردابی مشاهده نکردند. در این مدل عددی از دو عدد فرود ۰/۶ و ۱/۲ استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های این پژوهش‌گران در سه تراز مختلف آب نشان داد که فرو رفتگی سطح آب در روش عددی قابل تشخیص نیست. در انتها آن‌ها با استفاده از خطوط کانتور سرعت، جریان قیفی شکل در سطح آب و انتهای مخزن مشاهده کردند. این پژوهش‌گران اظهار کردند بیشترین مقدار سرعت، ۱۰٪ بیش از مقدار واقعی در نزدیکی هسته گرداب است. از سوی دیگر با استفاده از خطوط جریان مارپیچی در سطح آب دیده شد که با موقعیت گرداب در آزمایش مطابقت دارد. در مطالعه دیگری سرکرده در سال ۲۰۱۷ به مدل‌سازی یک آبگیر افقی برای بررسی نرخ ورود هوا در اثر تشکیل گرداب پرداخت. در این مطالعه از مدل LES و روش FAVOR^۲ و VOF استفاده شده است. آن‌ها بیان کردند که اگر حداقل نرخ هوای ورودی به میزان ۱۰^{-۵} باشد، می‌توان عمق استغراق بحرانی را به میزان ۱۲٪ کاهش داد. هان^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر گرداب بر توربین‌های جذر و مدی پرداختند. پس از شبیه‌سازی گرداب، داده‌های عددی با داده‌های تحلیلی تطابق خوبی داشته است. این پژوهشگران نشان دادند که افزایش قدرت گرداب باعث ورود هوای بیشتری به داخل لوله انتقال می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که گرداب‌ها باعث کاهش جریان عبوری می‌شوند و با کاهش سطح آب نرخ جریان عبوری به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. خادم رابع و همکاران در سال ۲۰۱۸ به مطالعه سازه ضد گرداب در یک گرداب عمودی با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداختند. در این مدل‌سازی عددی از مدل آشفتگی LES استفاده شده است. آن‌ها با مقایسه داده‌های سرعت شعاعی

³ Ahn⁴ Vorticity⁵ Zi¹ Large Eddy Simulation² Fractional Area-Volume Obstacle Representation

آزمایشگاهی منشی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ استفاده شده است. در انجام این مدل از مخزن مستطیل شکل با دیواره شفاف به ابعاد $2/4\text{m}$ طول، $1/8\text{m}$ عرض و $1/2\text{m}$ ارتفاع استفاده شده است. لوله آبگیر به قطر داخلی $0/135\text{m}$ به صورت افقی در امتداد محور طولی به فاصله $0/48\text{m}$ از کف مخزن نصب گردیده است. دهانه آبگیر به اندازه $0/35\text{m}$ در داخل مخزن قرار گرفته است. سرعت‌های مماسی گرداب توسط دستگاه ADV^1 اندازه‌گیری شده است. هندسه مدل منشی‌زاده و همکاران به صورت شکل (۱) است.



شکل (۱): نمایش هندسه مخزن در مدل عددی

تنظیمات مدل عددی

در این پژوهش شرط مرزی ورودی و خروجی به مخزن، به ترتیب شرط فشار ثابت با ارتفاع آب و دبی در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل کاهش تعداد شبکه‌ها، مرزهای چپ، راست و پایین در داخل مخزن شرط تقارن و در مورد شرط مرزی بالا نیز با توجه به قرار گرفتن شبکه‌بندی در فاز هوا، شرط تقارن در نظر انتخاب شد. به عنوان شرایط اولیه، مخزن تا ارتفاع مورد نظر پر از آب در نظر گرفته شد.

به منظور حصول اطمینان از تشکیل گرداب، به بررسی مدل‌های آشفتگی مختلف پرداخته شده است تا مناسب‌ترین مدل انتخاب گردد. مدل‌سازی‌ها با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، RNG، $k-\omega$ و LES انجام شده است که البته در هیچ‌یک از مدل‌های آشفتگی به‌استثنای LES، گرداب تشکیل نشد. لذا از مدل آشفتگی LES در مدل عددی استفاده شده است؛ البته به این موضوع پیش‌تر توسط سرکرده و همکاران در سال ۲۰۱۴، سوهانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ و زی و همکاران در سال ۲۰۲۰ اشاره شده بود.

نتایج نشان داد که طرح ۳ بهترین عملکرد را داشته و همچنین برای از بین بردن امواج مناسب است. مطالعات نشان داد که مدل آشفتگی RNG بهترین عملکرد را برای نشان دادن امواج دارد. مشخصات مدل‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. جهانی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به مطالعه دیواره هدایت‌کننده و هندسه پایه بر روی الگوی جریان در کانال تقرب سرریز پرداختند. آن‌ها با سناریوهای مختلف هیدرولیکی برای بهینه‌سازی هندسه دیواره هدایت‌کننده و پایه‌های سرریز، اقدام به شبیه‌سازی کردند و از مدل‌های RNG و VOF به ترتیب برای شبیه‌سازی آشفتگی و شبیه‌سازی سطح آب استفاده کردند. نتایج عددی و داده‌های تجربی از تطابق خوبی برخوردار بودند. نتایج آن‌ها نشان داد که شیب عمودی دیواره هدایت‌کننده و پایه‌های آن، عامل مؤثر در جریان سرریز است. علاوه بر این، آن‌ها بیان کردند که افزایش طول مستقیم دیواره هدایت‌کننده منجر به کاهش سرعت میانگین، عمق و اغتشاشات در نزدیک کانال می‌شود. پارسایی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به مطالعه الگوی جریان و دیواره هدایت‌کننده در سد کمال صالح با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداختند. نتایج نشان داد که هندسه دیواره سمت چپ باعث عدم ثبات در الگوی جریان و ایجاد جریان ثانویه و گرداب شده و باعث کاهش عملکرد سرریز در تخلیه گرداب می‌شود.

همان‌گونه که اشاره شد، یکی از عوامل مؤثر بر تشکیل و قدرت گرداب در نیروگاه‌های برق‌آبی اثر جریان‌های دیگر در مخزن است. در سد و نیروگاه مسجد سلیمان به دلیل این که مخزن بزرگی وجود ندارد، با کوچک‌ترین سیلابی، سرریز سد شروع به کار می‌کند. با شروع فعالیت نیروگاه، امکان تشکیل گرداب وجود دارد. این در حالی است که سرریز سد نیز فعال است. تاثیر این دو جریان شکل گرفته در مخزن می‌تواند به تغییر قدرت گرداب شکل گرفته بیانجامد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D اثر جریان سرریز بر گرداب در سناریوهای مختلف بهره‌برداری از سد و نیروگاه بصورت کمی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

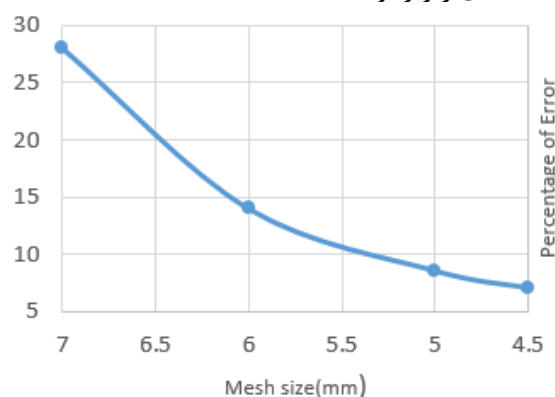
مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، از مدل

¹ Acoustic Doppler Velocimeter

تحلیل حساسیت به اندازه شبکه

برای انتخاب شبکه‌بندی و داشتن یک مدل بهینه، تحلیل حساسیت نسبت به ابعاد شبکه انجام شده است. حداکثر ابعاد شبکه مکعبی یکنواخت ۷mm بوده است و اندازه‌های بعدی آن به ترتیب برابر ۶، ۵ و ۴/۵ میلیمتر بوده و درصد خطا برای پارامتر سرعت در هرکدام از اندازه شبکه‌ها به‌دست‌آمده است. در شکل (۲) مقایسه درصد خطا نسبت به ابعاد شبکه‌بندی نشان داده شده است. شایان ذکر است در اندازه شبکه بزرگ‌تر از ۸mm هیچ گردابی مشاهده نشد و همچنین برای افزایش کارایی مدل آشفتگی LES اندازه شبکه‌بندی ریزتر توصیه شده است.



شکل (۲): نمودار تحلیل حساسیت به اندازه شبکه‌بندی

صحت سنجی مدل عددی

در این بخش به منظور نشان دادن توانایی مدل عددی در شبیه‌سازی این پدیده پیچیده، به مقایسه پارامترهای موردنظر در مدل آزمایشگاهی و عددی پرداخته شده است. در جدول (۲) N_{Γ_e} و N_{Γ_c} قدرت گرداب در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی است.

جدول (۲): مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

Error	N_{Γ_c}	N_{Γ_e}	Fr	S/D
۸/۶٪	۰/۳۷۷	۰/۴۱۲	۳/۷	۱/۵
۸/۷٪	۰/۲۰۹	۰/۲۲۹	۳/۷	۲/۱
۰/۱۶٪	۰/۱۴۳	۰/۱۴۲	۳/۷	۲/۴

همان‌گونه که از جدول (۱) مشخص است، درصد خطای به‌دست‌آمده در هریک از حالت‌های گرداب در حالت عددی و آزمایشگاهی کمتر از ۱۰٪ است.

هندسه و شبکه‌بندی مدل برای سناریوهای مختلف

کارکرد هم‌زمان آبگیر نیروگاه و سرریز سد

در این پژوهش سرریز بر اساس سد مسجدسلیمان، تغییراتی در هندسه مخزن داده شده است و برای مدل‌سازی فاصله

افقی، عمودی و عرضی سرریز تا خروجی مدل و عرض سرریز بر اساس مدل آزمایشگاهی سد مسجدسلیمان (روشن و همکاران، ۲۰۰۹) به‌دست آمده و در مدل عددی اعمال شده است. این اندازه‌ها و فواصل بر اساس نسبت آن‌ها به خروجی در مدل آزمایشگاهی به‌دست‌آمده است (برای مثال نسبت عرض سرریز به خروجی آن در مدل آزمایشگاهی برابر عرض سرریز به خروجی آن در مدل عددی است). مدل شبیه‌سازی شده دارای ۲/۴m طول، ۲/۲m عرض و ۱/۲m ارتفاع است. عرض سرریز برابر ۰/۸۶۱m و کف سرریز در ارتفاع ۰/۶۲۸m قرار دارد. در این مدل با توجه به ارتفاع‌های مختلف آب مخزن، خروجی آبگیر و دبی سرریز، مجموعاً ۱۶ مدل برای بررسی اثر جریان سرریز بر روی گرداب شکل گرفته در دهانه آبگیر به انجام رسیده است که تمام حالت‌ها در جدول (۳) آمده است. شایان ذکر است که Q_s دبی سرریز، Q_i دبی آبگیر و Q^* نسبت Q_s به Q_i است.

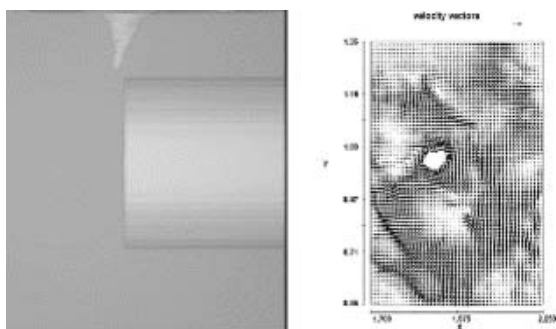
جدول (۳): متغیرهای مدل عددی

ردیف	S/D	Fr	Q^*
۱	۱/۵	۳/۷	۰
۲	۱/۵	۳/۷	۵/۹۶
۳	۱/۵	۳/۷	۸/۹۴
۴	۱/۵	۳/۷	۱۱/۹۳
۵	۲/۱	۳/۷	۰
۶	۲/۱	۳/۷	۵/۹۶
۷	۲/۱	۳/۷	۸/۹۴
۸	۲/۱	۳/۷	۱۱/۹۳
۹	۲/۴	۳/۷	۰
۱۰	۲/۴	۳/۷	۵/۹۶
۱۱	۲/۴	۳/۷	۸/۹۴
۱۲	۲/۴	۳/۷	۱۱/۹۳
۱۳	۲/۷	۱/۸	۰
۱۴	۲/۷	۱/۸	۱۲/۳۵
۱۵	۲/۷	۰/۷	۰
۱۶	۲/۷	۰/۷	۳۱/۴۵

ارائه نتایج و بحث

تأثیر جریان سرریز بر قدرت گرداب

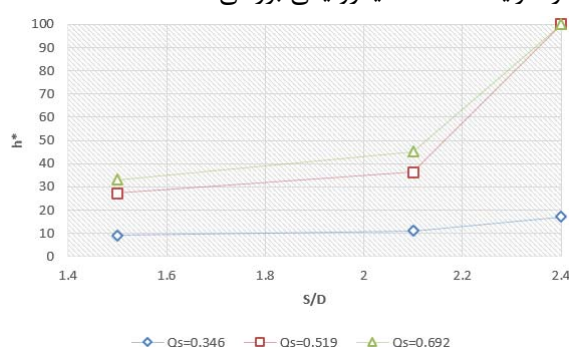
برای به دست آوردن تأثیر جریان سرریز بر کاهش قدرت گرداب از رابطه (۳) استفاده شده است. شکل (۳) به بررسی قدرت گرداب در Fr برابر با ۳/۷ پرداخته است.



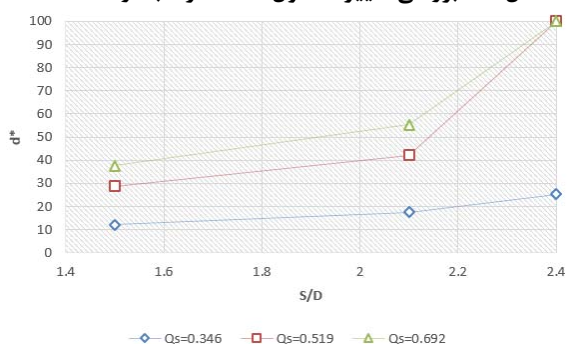
شکل (۵): قطر و طول هسته گرداب در

$$Fr = 3.7, \frac{S}{D} = 1.5, Q^* = 11.93$$

در شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات طول و قطر هسته گرداب در شرایط مختلف هیدرولیکی بررسی شده است.



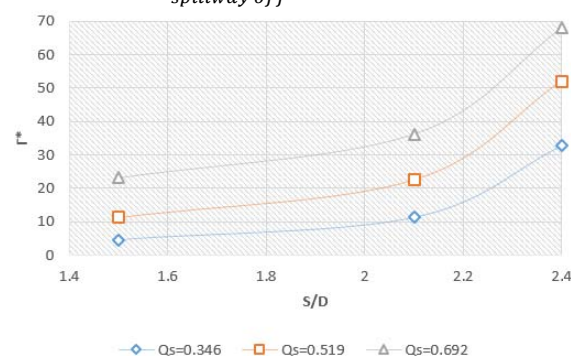
شکل (۶): بررسی تغییرات طول هسته گرداب در $Fr = 3.7$



شکل (۷): بررسی تغییرات قطر هسته گرداب در $Fr = 3.7$

شکل (۶) نشان می‌دهد در $Fr = 3.7$, S/D برابر ۱/۵ و Q^* برابر با ۵/۹۴، ۸/۹۴ و ۱۱/۹۳ به ترتیب باعث کاهش ۹٪، ۲۷٪ و ۳۳٪ طول هسته گرداب می‌شود. در S/D برابر ۲/۱ و Q^* برابر با ۵/۹۴، ۸/۹۴ و ۱۱/۹۳ به ترتیب باعث کاهش ۱۱٪، ۳۶٪ و ۴۵٪ طول هسته گرداب می‌شود و در S/D برابر ۲/۴ و Q^* برابر با ۵/۹۴، ۸/۹۴ و ۱۱/۹۳ به ترتیب باعث کاهش ۱۷٪، ۱۰۰٪ و ۱۰۰٪ طول هسته گرداب می‌شود. به‌طور کلی جریان سرریز باعث کاهش طول هسته گرداب شده و با افزایش جریان سرریز تأثیر آن بیشتر می‌شود. که این موضوع خود تأییدی بر تغییر نوع گرداب هست. شکل (۷) نشان می‌دهد در $Fr = 3.7$, S/D برابر ۱/۵ و Q^* برابر با ۵/۹۴، ۸/۹۴ و ۱۱/۹۳ به ترتیب باعث کاهش ۱۲٪، ۲۹٪

$$\Gamma^* = \frac{(\Gamma_{spillway\ off} - \Gamma_{spillway\ on})}{\Gamma_{spillway\ off}} \times 100 \quad (3)$$



شکل (۳): درصد اضمحلال قدرت گرداب در عدد فرود آبیگر

۳/۷

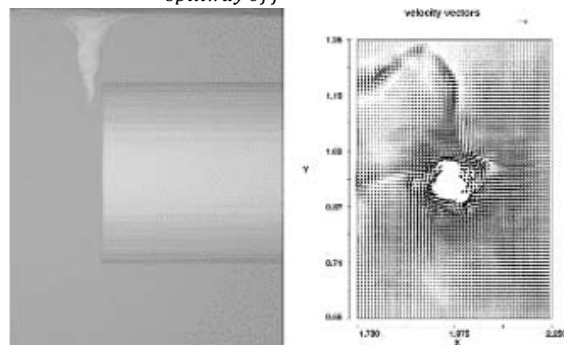
شکل (۳) نشان می‌دهد در S/D برابر ۱/۵ و Q^* برابر با ۵/۹۴، ۸/۹۴ و ۱۱/۹۳ به ترتیب باعث کاهش ۵٪، ۱۱٪ و ۲۳٪ قدرت گرداب می‌شود. در S/D برابر ۲/۱ و در Q^* برابر با ۵/۹۴، ۸/۹۴ و ۱۱/۹۳ به ترتیب باعث کاهش ۱۱٪، ۲۲٪ و ۳۶٪ قدرت گرداب می‌شود و در S/D برابر ۲/۴ و Q^* برابر با ۵/۹۴، ۸/۹۴ و ۱۱/۹۳ به ترتیب باعث کاهش ۳۳٪، ۵۲٪ و ۶۸٪ قدرت گرداب می‌شود.

بررسی طول و قطر هسته گرداب

در این قسمت به بررسی قطر و طول هسته گرداب در شرایط کارکرد همزمان سرریز و بدون کارکرد سرریز پرداخته شده است. شکل‌های (۴) و (۵) قطر و طول هسته گرداب را نمایش می‌دهد که در نگاه از بالا، قطر هسته گرداب در سطح آبیگر و در نگاه از کنار طول هسته گرداب نمایش داده شده است. برای بررسی بهتر قطر و طول هسته گرداب به ترتیب از روابط (۴) و (۵) استفاده شده است:

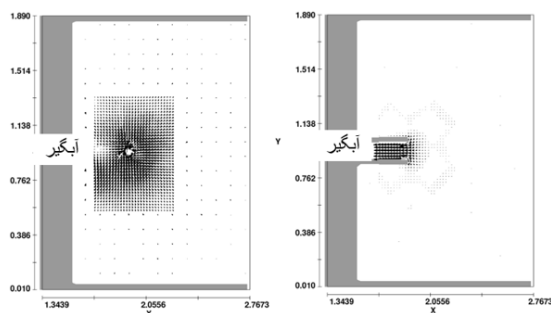
$$d^* = \frac{(d_{spillway\ off} - d_{spillway\ on})}{d_{spillway\ off}} \times 100 \quad (4)$$

$$h^* = \frac{(h_{spillway\ off} - h_{spillway\ on})}{h_{spillway\ off}} \times 100 \quad (5)$$

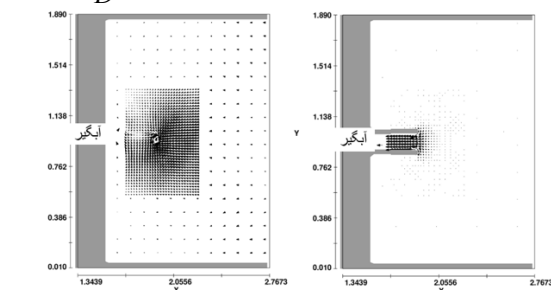


شکل (۴): قطر و طول هسته گرداب در

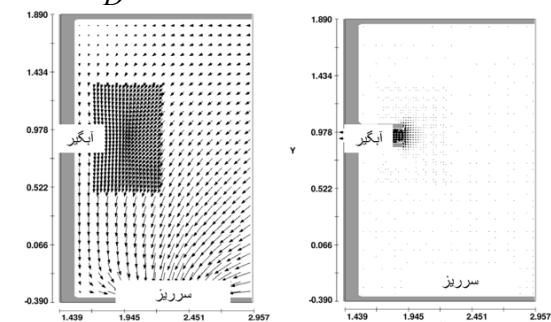
$$Fr = 3.7, \frac{S}{D} = 1.5, Q^* = 0$$



شکل (۸): گرداب شکل گرفته در $Fr = 1.8, \frac{S}{D} = 2.7, Q^* = 0$

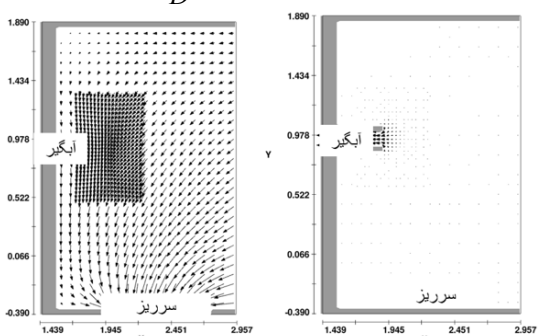


شکل (۹): گرداب شکل گرفته در $Fr = 0.7, \frac{S}{D} = 2.7, Q^* = 0$



شکل (۱۰): نمایی از سطح آب و جریان سرریز در سطح آب و در

وسط لوله در $Fr = 1.8, \frac{S}{D} = 2.7, Q^* = 12.35$



شکل (۱۱): نمایی از سطح آب و جریان سرریز در سطح آب و در

وسط لوله در $Fr = 0.7, \frac{S}{D} = 2.7, Q^* = 31.45$

جدول (۵): تقسیم‌بندی گرداب‌های کلاس B و C

کلاس گرداب	نوع گرداب	S/D	Q^*	Fr
B	۳	۲/۷	۰	۱/۸
C	۱	۲/۷	۰	۰/۷
-	-	۲/۷	۱۲/۳۵	۱/۸
-	-	۲/۷	۳۱/۴۵	۰/۷

و ۳۸٪ قطر هسته گرداب می‌شود. در S/D برابر ۲/۱ و Q^* برابر با ۵/۹۴، ۸/۹۴ و ۱۱/۹۳ به ترتیب باعث کاهش ۱۷٪، ۴۲٪ و ۵۵٪ قطر هسته گرداب می‌شود و در S/D برابر ۲/۴ و Q^* برابر با ۵/۹۴، ۸/۹۴ و ۱۱/۹۳ به ترتیب باعث کاهش ۲۵٪، ۱۰۰٪ و ۱۰۰٪ قطر هسته گرداب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دبی سرریز تأثیر آن بر کاهش قدرت گرداب، طول و قطر هسته گرداب بیشتر می‌شود. در گرداب‌های کلاس A، جریان سرریز در هیچ‌کدام از حالت‌ها باعث از بین رفتن گرداب نمی‌شود و تنها در بعضی از حالت‌ها، گرداب از نوع ۶ به ۵، ۴ و ۳ تغییر می‌کند. در جدول (۴) این تغییرات نشان داده شده است.

جدول (۴): نوع و کلاس گرداب‌ها در $Fr = 3.7$ و در شرایط

مختلف هیدرولیکی

کلاس گرداب	نوع گرداب	S/D	Q^*
A	۶	۱/۵	۰
A	۶	۱/۵	۵/۹۶
A	۵	۱/۵	۸/۹۴
A	۵	۱/۵	۱۱/۹۳
A	۵	۲/۱	۰
A	۵	۲/۱	۵/۹۶
A	۴	۲/۱	۸/۹۴
B	۳	۲/۱	۱۱/۹۳
A	۵	۲/۴	۰
B	۴	۲/۴	۵/۹۶
B	۴	۲/۴	۸/۹۴
B	۳	۲/۴	۱۱/۹۳

تأثیر عملکرد سرریز بر گرداب‌های کلاس B و C

در عملکرد آبگیر در $S/D = 2.7$ و Fr برابر با ۱/۸ و ۰/۷ به ترتیب باعث ایجاد گرداب‌های کلاس B و C می‌شود. در شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب گرداب‌های کلاس B و C با N_F برابر ۰/۱۵ و ۰/۰۸ نشان داده شده است. این گرداب‌ها پس از عملکرد سرریز با کمترین دبی در Q^* برابر ۱۲/۳۵ و ۳۱/۴۵ به‌طور کلی از بین رفتند و اثری از چرخش در سطح آب مشاهده نشده است.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمایی از سطح آب و جریان سرریز در سطح آب و در وسط لوله ($S/D = 0$) را نشان می‌دهد. در جدول (۵) نتایج این بخش به‌صورت خلاصه آمده است.

بررسی پارامتر شدت آشفتگی

شدت آشفتگی به صورت رابطه (۶) تعریف می شود که w' انحراف معیار استاندارد نوسانات سرعت آشفتگی در یک مکان مشخص و در یک دوره زمانی است. U متوسط سرعت در همان مکان در طول دوره زمانی است.

$$I = \frac{w'}{U} \quad (6)$$

که U و w' به صورت رابطه های (۷) و (۸) تعریف می شود.

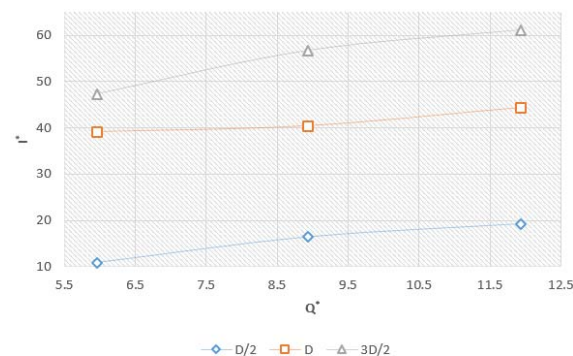
$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (7)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{3}(U_x'^2 + U_y'^2 + U_z'^2)} \quad (8)$$

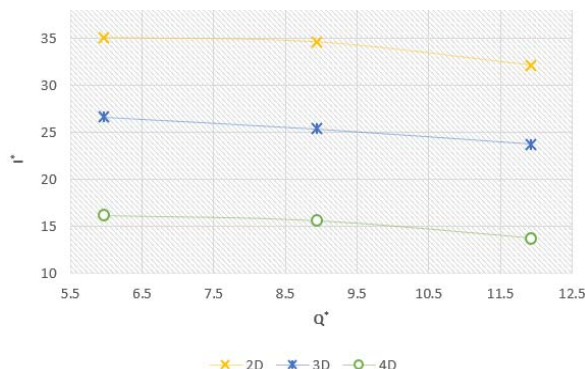
و درصد تغییرات I به صورت رابطه (۹) به دست می آید.

$$I^* = \frac{I_{spillway\ off} - I_{spillway\ on}}{I_{spillway\ off}} \times 100 \quad (9)$$

در رابطه ی بالا U_x ، U_y و U_z به ترتیب سرعت در راستای محور x ، y و z و U_x' ، U_y' و U_z' به ترتیب نوسانات سرعت در راستای محور x ، y و z است. شکل های (۱۲) و (۱۳) مقدار تغییرات I^* در Q^* مختلف در $Fr = 3.7$ و $S/D = 1.5$ را نشان می دهد. در شکل (۱۲) نقاط $D/2$ ، D و $3D/2$ و در شکل (۱۳) نقاط $2D$ ، $3D$ و $4D$ مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۱۲): نمودار شدت آشفتگی در دبی های متفاوت سرریز در نقاط $D/2$ و D و $3D/2$



شکل (۱۳): نمودار شدت آشفتگی در دبی های متفاوت سرریز در نقاط $2D$ ، $3D$ و $4D$

با توجه به شکل (۱۲) می توان نتیجه گرفت که با افزایش جریان سرریز، شدت آشفتگی در ناحیه گرداب افزایش می یابد. با افزایش شدت آشفتگی در این نقاط قدرت گرداب کاهش پیدا می کند. به طوریکه با افزایش ۴۷٪ آشفتگی در نقطه $3D/2$ ، قدرت گرداب ۵٪ کاهش می یابد. با افزایش دبی سرریز، آشفتگی افزایش می یابد. به طوریکه که با افزایش ۵۰٪ دبی سرریز، شدت آشفتگی در نقطه $3D/2$ ۵۷٪ افزایش و قدرت گرداب ۱۱٪ کاهش می یابد و با افزایش دبی سرریز به میزان ۱۰۰٪ شدت آشفتگی در نقطه $3D/2$ ۶۱٪ افزایش و قدرت گرداب ۲۳٪ کاهش می یابد. می توان نتیجه گرفت که جریان سرریز باعث ایجاد آشفتگی در محدوده گرداب می شود که این آشفتگی باعث کاهش قدرت گرداب می شود.

شکل (۱۳) نشان می دهد در نقاط $2D$ ، $3D$ و $4D$ با افزایش دبی سرریز، شدت آشفتگی کاهش می یابد که نشان دهنده این است که جریان سرریز کاملاً در این نقاط غالب است. در شکل (۱۴) شدت تغییرات آشفتگی برحسب فاصله از گرداب نشان داده شده است.

در شکل (۱۴) می توان دید که شدت آشفتگی در نقطه $3D/2$ بیشتر از دیگر نقاط است و با افزایش دبی سرریز تغییرات شدت آشفتگی در این نقطه بیشتر می شود. می توان نقطه $3D/2$ را محدوده برخورد جریان سرریز با جریان گرداب دانست. زیرا در مرز این دو جریان، آشفتگی در حداکثر حالت خود است. با توجه به شکل (۱۴) می توان فاصله $x < 3D/2$ را محدوده جریان گرداب و فاصله $x > 3D/2$ را محدوده جریان سرریز در نظر گرفت. در فاصله $x < 3D/2$ جریان سرریز باعث ایجاد آشفتگی در این ناحیه می شود و با دور شدن از مرکز گرداب تغییرات شدت آشفتگی افزایش می یابد که نشان دهنده این است که تأثیر جریان سرریز در اطراف گرداب بیشتر از مرکز آن است. همچنین در این ناحیه با افزایش دبی جریان سرریز، تغییرات شدت آشفتگی زیاد می شود که نشان دهنده این است که جریان سرریز در روند کلی جریان (جریان گرداب) در این ناحیه اختلال ایجاد می کند که باعث افزایش آشفتگی در این منطقه است. در فاصله $x > 3D/2$ جریان سرریز باعث ایجاد آشفتگی در این ناحیه می شود. اما از تغییرات شدت آشفتگی با دور شدن از مرکز گرداب کاسته می شود و همچنین با

دبی سرریز بیشتر می‌شود اما در خارج از ناحیه گرداب با افزایش دبی سرریز کاهش می‌یابد.

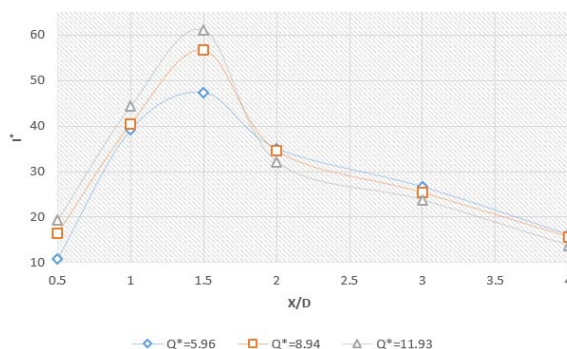
سیاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از همکاری موسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو در ارائه اطلاعات لازم تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

- ۱- صنعتی منفرد، سعید، (۲۰۱۱)، بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر عملکرد آبگیرهای مجاور نیروگاهی بر میدان جریان ورودی آبگیر (مطالعه موردی آبگیر نیروگاه سد گتوند علیا)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی.
- 2- Ahn, S.-H. (2017) Numerical prediction on the effect of free surface vortex on intake flow characteristics for tidal power station. *Renewable Energy*, 101: p. 617-628.
- 3- Chen, Y., et al., (2012) Three-dimensional numerical simulation of vertical vortex at hydraulic intake. *Procedia Engineering*, 28: p. 55-60.
- 4- Dehdar-Behbahani, S. and A. Parsaie, (2016) *Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam Iran*. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1): p. 467-473.
- 5- FADAEI, K.E. and G. Barani, (2014) *Numerical simulation of flow over spillway based on the CFD method*.
- 6- Huang, T.-H., C.-D. Jan, and Y.-C. Hsu, (2017) *Numerical simulations of water surface profiles and vortex structure in a vortex settling basin by using flow-3D*. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(5): p 531-5
- 7- Jahani, M., H. Sarkardeh, and E. Jabbari, (2018) *Effect of using guide walls and piers with different geometries on the flow at entrance of a spillway*. *The European Physical Journal Plus*, 133(3): p. 1-21.
- 8- Khadem Rabe, B., S.H. Ghoreishi Najafabadi, and H. Sarkardeh. (2018) Numerical simulation of anti-vortex devices at water intakes. in *Proceedings of the institution of civil engineers-water management*. Thomas Telford Ltd.
- 9- KNAUSS, J., (1987) *Swirling flow problems at intakes*. *Hydraulic Structures Design Manual*.
- 10- Lugt, H.J., (1983) *Vortex flow in nature and technology*. New York, Wiley-Interscience, 1983, 305 p. Translation.
- 11- Li, H.-f., et al., (2009) Formation and influencing factors of free surface vortex in a barrel with a central orifice at bottom. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 21(2): 238-244.
- 12- May, R. and I. Willoughby, (1990) Performance of vortex inhibitors for reservoir intakes.
- 13- Möller, G., M. Detert, and R.M. Boes, (2015) Vortex-induced air entrainment rates at intakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(11): p. 04015026.
- 14- Monshizadeh, M., et al., (2017) Experimental investigation of dynamics of the air-core vortices and estimating the air entrainment rate at a horizontal intake. *Modares Mechanical Engineering*, 17(8): p. 59-67.

افزایش دبی جریان سرریز از تغییرات آن کاسته می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که جریان سرریز در این ناحیه غالب است.



شکل (۱۴): تغییرات شدت آشفتگی در فواصل مختلف

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر عملکرد همزمان جریان سرریز در دبی‌های مختلف بر گرداب‌های شکل گرفته در دهانه آبگیر یک سد و نیروگاه جریانی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که:

- در گرداب‌های کلاس A، در $S/D = 1.5$ جریان سرریز در بیشترین دبی باعث کاهش قطر هسته گرداب می‌شود و با بالا رفتن S/D این تأثیر بیشتر می‌شود. در $S/D = 2.1$ جریان سرریز در بیشترین دبی باعث کاهش قطر هسته گرداب می‌شود و در $S/D = 2.4$ و بیشترین دبی سرریز، هسته گرداب به‌طور کامل از بین می‌رود و تنها چرخش‌هایی در سطح آب مشاهده می‌شود. پیدا است که جریان سرریز همچنین باعث کاهش طول هسته گرداب نیز می‌شود.

- جریان سرریز در گرداب‌های کلاس A باعث کاهش قدرت گرداب می‌شود و در حداکثر دبی سرریز در $S/D = 1.5$ باعث کاهش ۲۳٪، در $S/D = 2.1$ باعث کاهش ۳۶٪ و در $S/D = 2.4$ باعث کاهش ۶۸٪ قدرت گرداب می‌شود.

- جریان سرریز در گرداب‌های کلاس A باعث حذف گرداب نمی‌شود، اما باعث تغییر کلاس گرداب به نوع B و C در بعضی از حالات می‌شود. اما در گرداب‌های کلاس B و C به ترتیب با Fr به میزان $1/8$ و 0.7 ، در $S/D = 2.7$ با عملکرد همزمان سرریز و آبگیر به‌طور کامل گرداب‌ها از بین می‌روند و چرخشی در سطح مخزن دیده نمی‌شود.

- به‌طور کلی می‌توان گفت که جریان سرریز در این مدل عددی باعث کاهش قدرت گرداب می‌شود و حتی در بعضی موارد باعث حذف کامل گرداب می‌شود. همچنین می‌توان اشاره کرد تغییرات شدت آشفتگی در ناحیه گرداب با افزایش

- 15- Okamura, T., K. Kamemoto, and J. Matsui, (2007) CFD prediction and model experiment on suction vortices in pump sump.
- 16- Parsaie, A., A. Moradinejad, and A.H. Haghiabi,(2018) *Numerical modeling of flow pattern in spillway approach channel*. Jordan Journal of Civil Engineering,. **12**(^۱)
- 17- Rajendran, V., S. Constantinescu, and V. Patel, (1999) Experimental validation of numerical model of flow in pump-intake bays. Journal of hydraulic Engineering, 125(11): p. 1119-1125.
- 18- Roshan, R., H. Sarkardeh, and A. Zarrati, (2009) Vortex study on a hydraulic model of Godar-e-Landar Dam and hydropower plant. Computational Methods in Multiphase Flow V, 63: p. 217-225.
- 19- Sarkardeh, H., A.R. Zarrati, and R. Roshan,(2010) *Effect of intake head wall and trash rack on vortices*. Journal of Hydraulic Research,. **48**(1): p. 108-112.
- 20- Sarkardeh, H., M. Marosi, and R. Roshan,(2015) *Stepped spillway optimization through numerical and physical modeling*. International Journal of Energy and Environment,. **6**(6): p. 597.
- 21- Sarkardeh, H., et al. (2014). Numerical simulation and analysis of flow in a reservoir in the presence of vortex. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 8(4): p. 598-608.
- 22- Sarkardeh, H. (2017) Numerical calculation of air entrainment rates due to intake vortices. Meccanica, 52(15): p. 3629-3643.
- 23- Sarkardeh, H., Marosi, M. (2021). An analytical model for vortex at vertical intakes, Water Supply.
- 24- Suerich-Gulick, F., et al.,(2006) Experimental and numerical analysis of free surface vortices at a hydropower intake.
- 25- Zi, D., et al.,(2020) Numerical study of mechanisms of air-core vortex evolution in an intake flow. International Journal of Heat and Fluid Flow, 81: p. 108517.

Numerical study on simultaneous operation of spillway and power intake of run-of-river hydropower dam

Ebrahim Esmaeilpoor¹

Hamed Sarkardeh^{*2}

Ebrahim Jabbari³

Abstract

In the present study, by forming 16 vortices in different classes using Flow-3D software, the effect of simultaneous operation of spillway and power intakes in Masjed Soleyman dam was investigated. Volume of Fluid (VOF) method and Large Eddy Simulation (LES) model were used for simulating free surface and turbulence, respectively. Regarding the cost of calculations and the amount of error, the mesh size of 5 mm was selected. In Class A vortices when the spillway flow is at its peak, the strength of formed vortices reduced about 23%, 36%, and 68% in different intake submerged depths. Results showed that by increasing the discharge of spillway, the formed vortices were weaker. Moreover, spillway flow could not eliminate formed vortices in Class A, but it caused to change the vortex class to B and C in some cases; however, in the formed vortices of Class B and C, with simultaneous operation of the spillway and power intakes, the vortex disappear completely and rotation was not observed on the surface of the reservoir.

Keywords

Vortex, Intake, Numerical modeling, Power intake, Spillway

¹ M.Sc. Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

^{2*} Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. sarkardeh@hsu.ac.ir

³ Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.