

# شبیه‌سازی عددی تاثیر امواج بر گرداب‌های شکل گرفته در آبگیر قائم

احسان پاکدل<sup>۱</sup>، محمدرضا مجدزاده طباطبایی<sup>۲\*</sup>، حامد سرکرده<sup>۳</sup>، سید حسین قریشی نجف‌آبادی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید بهشتی

۲- استادیار، مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

۴- استادیار، مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

\*m\_majdzadeh@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۸/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۸/۳/۱۲

## چکیده

گرداب را می‌توان به عنوان یکی از پدیده‌های ناشناخته در زمینه آبیگری از مخازن سدها نام برد که می‌تواند باعث به وجود آمدن مشکلاتی در فرآیند آبیگری شود. در این پژوهش با هدف بررسی تاثیر امواج در سطح مخزن بر گرداب، به شبیه‌سازی عددی امواج در دهانه آبگیرهای قائم با استفاده از نرم‌افزار STAR-CCM، در شرایط تشکیل گرداب‌های مختلف پرداخته شده است. در همین راستا گرداب‌های کلاس A، B و C در مدل عددی شبیه‌سازی شد و نتایج آن پس از برخورد با امواج بررسی شد. نتایج نشان داد که امواج باعث کاهش مولفه‌های سرعت مماسی، شعاعی و محوری گرداب شکل گرفته می‌شوند. طبق نتایج ارائه شده، کمترین مقدار مولفه سرعت مماسی در هنگام حضور امواج به طور میانگین در گرداب‌های نوع A، B و C به ترتیب حدود ۱۴٪، ۱۹٪ و ۲۳٪ کاهش داده شده است. میزان کاهش ماکزیمم مقدار مولفه سرعت شعاعی نیز برای گرداب‌های کلاس A، B و C به ترتیب حدود ۹٪، ۱۳٪ و ۱۸٪ می‌باشد. ماکزیمم مقدار سرعت محوری نیز برای گرداب‌های کلاس A، B و C به ترتیب حدود ۱۵٪، ۱۶٪ و ۲۳٪ کاهش داده شده‌اند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، میزان کاهش با کم شدن دامنه امواج بیشتر شده و این بدین معنی است که امواج با دامنه کوچکتر یا به عبارتی ریزموج‌ها بهتر می‌توانند مولفه‌های سرعت را کاهش داده و در نتیجه جریان گردابی را به روشی هیدرولیکی ضعیف کنند.

**واژه‌های کلیدی:** آبگیر قائم، امواج، گرداب، بردار سرعت، نرم‌افزار STAR-CCM

## ۱- مقدمه

دهانه آبگیرها، عملکرد مناسب سازه آبگیر را مختل می‌کند. گرداب‌ها باعث مشکلاتی از قبیل ایجاد نوسان در سیستم، کاهش راندمان توربین‌ها، افزایش تلفات هیدرولیکی در دهانه آبگیر، ورود هوا و ذرات شناور به لوله آبگیر و در نهایت کاهش بازدهی

تشکیل گرداب در دهانه آبگیرهای نیروگاه‌ها از جمله پدیده‌های نامطلوب هیدرولیکی است که در هنگام آبیگری از سدها به وقوع می‌پیوندد. به بیان دقیق‌تر، تشکیل جریان‌های گردابی در

الگوی جریان گردابی در دهانه آبگیر ارائه دهند [6].

شکل ۱. طبقه‌بندی گرداب‌ها با توجه به قدرت گرداب [5]

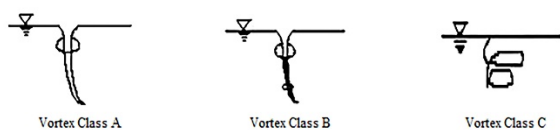


Fig. 1. Vortex classification according to vortex strength [5]

آچياما و ایشيجرو، اندرکنش بین افزایش حباب هوا و هسته گرداب در یک جریان چرخشی در حال گسترش در یک سیلندر را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که حباب‌ها جریان آب را نامتقارن می‌سازند و سرعت آب را کاهش می‌دهند [7]. ونگ و همکاران با انجام پژوهشی به شناسایی هسته هوای گرداب در آبگیرهای هیدرولیکی پرداختند. آنها در طی پژوهش‌های خود فرمول‌بندی جدیدی برای تغییرات سرعت مماسی با توجه به تئوری رانکین ارائه دادند و سپس نتایج خود را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند [8]. در پژوهش آزمایشگاهی دیگری منشی‌زاده و همکاران به مطالعه دینامیک گرداب سطحی با هسته هوا و شناسایی مواردی همچون الگوی جابه‌جایی هسته گرداب در سطح آب پرداختند. آنها همچنین در قسمت دیگری از مطالعات آزمایشگاهی خود، اندازه‌گیری نرخ هوای ورودی به آبگیر افقی را بررسی کردند [9]. خان‌آرمویی و همکاران نیز با انجام یک کار آزمایشگاهی به بررسی تاثیر زاویه آبگیری بر قدرت گرداب پرداختند. آنها بیان کردند که با کاهش زاویه آبگیری از حالت قائم به حالت افقی، قدرت گرداب حدود ۳۱٪ کاهش می‌یابد [10].

در عصر حاضر که نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی به سرعت در حال گسترش و توسعه هستند، روش‌های عددی گزینه‌های مناسبی برای بررسی پدیده‌های هیدرولیکی مانند گرداب هستند. از جمله مزایای این روش کاهش زمان محاسبات و امکان مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای درستی‌آزمایی هستند [11]. مطالعات عددی در این زمینه توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است. سوریک گولیک و همکاران با استفاده از نرم افزار ANSYS-CFX به شبیه‌سازی پدیده گرداب پرداختند. آنها در این شبیه‌سازی برای سطح آزاد

آن می‌شوند [1]. رانکین برای اولین بار در سال ۱۸۵۸ یک مدل ریاضی برای گرداب ایجاد شده در ورودی آبگیرها پیشنهاد کرد. این مدل با فرض وجود یک هسته درونی با حرکت چرخشی که توسط یک قسمت بیرونی دارای حرکت غیر چرخشی احاطه می‌شود، ارائه شد [2]. جریان‌های گردابی در دهانه آبگیر به دو صورت چرخشی و غیرچرخشی هستند. برای تفکیک جریان‌های چرخشی از جریان‌های غیرچرخشی از یک میدان برداری به نام گردندگی (ξ) در داخل سیال استفاده می‌شود که برابر با کرل بردار سرعت است. در جریان غیر چرخشی ξ برابر صفر بوده و در غیر این صورت، جریان چرخشی است [3]. یکی از پارامترهای مهم جریان گردابی، سرعت جریان است. اختلال در میدان سرعت و افزایش سرعت مماسی، از جمله مخاطرات تشکیل گرداب در دهانه آبگیرهای مخزن سدها است [4]. به بیان دیگر افزایش سرعت می‌تواند منجر به ایجاد هسته هوا در دهانه آبگیر و در نتیجه کاهش شدید فشار در سیستم آبگیری شود.

در طی سال‌های اخیر پژوهشگران کارهای مختلفی برای شناخت بهتر پدیده گرداب و کاهش اثر آن بر بازدهی آبگیر و به دنبال آن نیر گاه‌های برق آبی انجام داده‌اند. جدیدترین دسته‌بندی گرداب‌ها براساس قدرت آنها توسط سرکرده و همکاران ارائه شد [5]. براساس این طبقه‌بندی، گرداب‌ها به سه کلاس متفاوت تقسیم می‌شوند. گرداب‌های کلاس C به گرداب‌های ضعیف معروف هستند. در این نوع گرداب چرخش‌هایی در سطح آب ایجاد شده و در برخی موارد فرورفتگی کم عمقی نیز در سطح آب تشکیل می‌شود که پس از مدتی از بین رفته و دوباره ایجاد می‌شود. در گرداب‌های کلاس B، فرورفتگی نسبتاً عمیقی در سطح آب ایجاد شده و تا حدودی ذرات شناور به داخل گرداب و لوله آبگیر کشیده می‌شود. در گرداب‌های کلاس A که به گرداب‌های قوی معروف هستند، هسته هوا به طور کامل تشکیل شده و باعث می‌شود علاوه بر ذرات شناور، حباب‌های هوا نیز به درون لوله آبگیر کشیده شود (شکل ۱).

هایت و می با انجام یک پژوهش آزمایشگاهی به بررسی مولفه‌های مختلف سرعت گرداب، در دهانه آبگیر پرداختند. آنها توانستند روابط تحلیلی برای محاسبه مولفه‌های سرعت و

عددی با استفاده از نرم افزار Flow3D به بررسی تخمین نرخ هسته هوای ورودی به آبگیر پرداخت. وی در این شبیه سازی از مدل آشفتگی LES استفاده کرد و در نهایت توانست با شناسایی کمینه نرخ هوای ورودی به آبگیر، عمق استغراق بهینه را محاسبه کند [20].

امواج از جمله پدیده های طبیعی هستند که در سطح دریاچه سدها ایجاد شده و می توانند تاثیر قابل توجهی بر گرداب داشته باشند. در این پژوهش با شبیه سازی عددی امواج در دهانه آبگیرهای قائم، تلاش شد تا با استفاده از روشی هیدرولیکی و غیرسازه ای گرداب های تشکیل شده در دهانه آبگیر کاهش داده شود. برای شبیه سازی عددی از نرم افزار STAR-CCM استفاده شد. از مزایای این نرم افزار می توان به دسترسی به انواع مدل های آشفتگی و امکان شبیه سازی بیشتر پدیده های هیدرولیکی اشاره کرد. همچنین انعطاف پذیری در شبکه بندی مسئله که در هندسه های پیچیده بسیار کاربردی است، از دیگر مزایای این نرم افزار نسبت به سایرین است. در واقع این نرم افزار یک منبع محاسبات مهندسی برای حل مسائل چند وجهی در مکانیک سیالات و جامدات در محیطی یکپارچه و پیوسته است [21]. در همین راستا گرداب های کلاس A، B و C به صورت عددی شبیه سازی شد و آثار برخورد سه موج با دامنه های متفاوت بر این گرداب ها ارزیابی شد.

## ۲- مواد و روش ها

در این پژوهش، شبیه سازی پدیده گرداب و الگوی جریان اطراف آن در مخزن، توسط حل معادلات سه بعدی ناویر-استوکس حرکت سیال براساس روش حجم محدود، به وسیله نرم افزار STAR-CCM انجام شد. مدل در حالت دو فازی مورد مطالعه قرار گرفت تا امکان شبیه سازی عددی گرداب و موج با این رویکرد قابل بررسی باشد. به منظور کاهش زمان محاسبات برای حل معادلات، روش اویلری انتخاب و آشفتگی با استفاده از مدل LES در نرم افزار استار شبیه سازی شد [21]. این مدل آشفتگی، روش مناسبی برای شبیه سازی پدیده های سیالاتی مانند

از مدل VOF و برای آشفتگی از مدل  $k-\epsilon$  استفاده کردند. هماهنگی نتایج عددی و آزمایشگاهی در این پژوهش، میزان بالا بودن دقت مدل عددی را نشان داد [12]. لی و همکاران نیز در طی یک کار پژوهش به شبیه سازی گرداب سطحی پرداختند. آنها با رسم خطوط جریان، الگوی جریان در دهانه آبگیر را شناسایی و مولفه های سرعت های محوری و شعاعی گرداب تشکیل شده را با مدل رانکین مقایسه کردند [13]. از جمله تلاش های دیگر برای شبیه سازی عددی پدیده گرداب توسط آیار به انجام رسید. وی برای شبیه سازی گرداب از نرم افزار Flow3D استفاده کرد و مدل سطح آزاد و آشفتگی را به ترتیب VOF و  $r$  RNG در نظر گرفت. همچنین برای درستی نتایج خود از یک مدل آزمایشگاهی آبگیر نیروگاه کمک گرفته و پارامترهای میدان جریان را در مدل عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه کرد [14]. لوسینو و همکاران نیز برای یک آبگیر پمپ، پدیده گرداب را به صورت سه بعدی شبیه سازی کردند. گرداب تشکیل شده با رسم خطوط جریان در نتایج تحقیق آنها ارائه شده است. آنها شبیه سازی خود را با استفاده از نرم افزار Flow3D انجام دادند و برای سطح آزاد مدل VOF و برای آشفتگی مدل  $r$  LES را در نظر گرفتند [15]. سرکرده و همکاران نیز پدیده گرداب و الگوی جریان در اطراف مخزن را به صورت سه بعدی با استفاده از مدل RANS، شبیه سازی کردند [16]. بین و همکاران با انجام یک شبیه سازی عددی اندرکنش کاویتاسیون و گرداب را مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که کاویتاسیون باعث افزایش لایه مرزی جریان و تشدید هسته هوای گرداب می شود [17]. خادم رابع و همکاران با انجام شبیه سازی عددی، رفتار جریان را در هنگام کشیده شدن هسته هوای گرداب به داخل آبگیر، مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، مولفه های سرعت های مماسی، شعاعی، محوری و پروفیل سطح آب برای شناخت بهتر الگوی جریان و تعیین عمق استغراق بحرانی ارزیابی شد. آنها همچنین عملکرد صفحات ضد گرداب در آبگیر را بررسی کردند و عمق مورد نیاز برای جلوگیری از ورود هوا و ذرات شناور به آبگیر را تعیین کردند [19 و 18] سرکرده در طی یک مطالعه

مستطیل‌های ورودی برابر ۰/۰۵ متر و طول آن برابر ۰/۵۲ بوده که به صورت مماس بر استوانه طراحی شده‌اند. قطر آبگیر قائم در این مدل آزمایشگاهی برابر ۰/۲۴، ۰/۱۹ و ۰/۱۴ متر می‌باشد که در مدل عددی شبیه سازی شده در این پژوهش قطر اصلی مورد نظر آزمایش یعنی ۰/۱۹ متر در نظر گرفته شده است. به منظور کاهش آثار مرزی دهانه آبگیر ۰/۰۵ متر بالاتر از کف مخزن قرار گرفته و ارتفاع آب در مخزن برابر ۰/۲۳۵ متر است. ابعاد مدل در شکل (۲) آمده است.

شکل ۲. مشخصات مدل آزمایشگاهی (اعداد دارای واحد متر) [28]

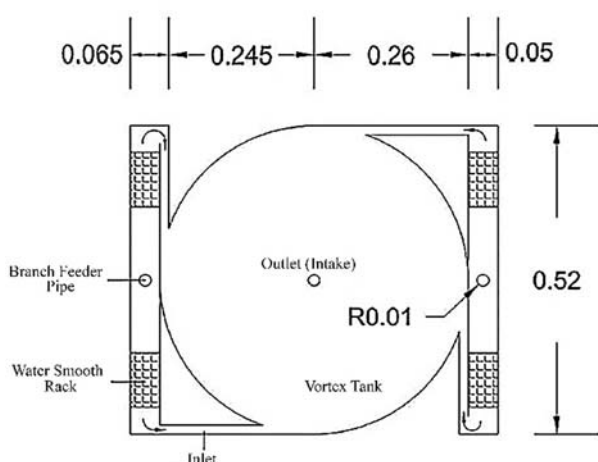


Fig. 2. Specification of experimental model (m) [28]

همچنین برای شبیه‌سازی امواج و برخورد آن با گرداب تشکیل شده، از امواج شبیه‌سازی شده در کار آزمایشگاهی نینگ و همکاران استفاده شد [29]. در این مدل آزمایشگاهی فلومی با ابعاد ۳×۶۹ مترمربع در نظر گرفته شد و امواجی با طول موج‌های ۲/۱۸ و ۲ متر ایجاد شد. براساس تحلیل ابعادی به عمل آمده با در نظر گرفتن طول موج ۲/۱۸ متر و پس از تبدیل مقیاس، طول موج قابل استفاده برای مدل این پژوهش برابر ۰/۱۶۴ متر بدست آمد  $(\lambda = L_m / L_p = 69 / 0.52 \cong 133)$ . به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، دامنه امواج مورد مطالعه به صورت نسبتی از ارتفاع آب روی مخزن، برحسب درصد، در نظر گرفته شد. امواج بررسی شده با توجه به ابعاد مدل و نوع مطالعه از نوع امواج سطحی بسیار ریز و مخزنی هستند. مشخصات امواج شبیه‌سازی شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

شبیه‌سازی عددی تاثیر امواج بر گرداب‌های شکل گرفته در آبگیر قائم گرداب است [18 و 15]. برای شبکه‌بندی دامنه محاسباتی از یک مختصات کارتیزین استفاده شده و سطح آزاد با استفاده از روش VOF در نظر گرفته شده است. مبنای روش VOF بدین صورت است که به سلول‌های فاقد سیال مقدار صفر، سلول‌های پر شده با آب مقدار یک و سلول‌هایی که به طور جزئی پر شده‌اند مقدار بین صفر و یک اختصاص داده می‌شود [23 و 22].

## ۲-۱- معادلات حاکم

معادلات ناویر-استوکس توصیف کننده حرکت جریان و در واقع معادلات پایه دینامیک سیالات هستند [25 و 24]. تئوری‌های متفاوتی برای گرداب‌های سطحی ارائه شده است که همه آنها مبتنی بر حفظ مومنتوم زاویه‌ای و معادلات استوکس است. معادلات حاکم در شرایط جریان دو فازی با فرض همگن بودن، به صورت زیر است [26]:

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho V_i V_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 V - \tau + f_i \quad (2)$$

که  $f_i$  نیروی خارجی،  $\rho$  چگالی مخلوط،  $\mu$  ویسکوزیته ترکیب،  $V$  سرعت و  $\tau$  تنش تانسور رینولدز است.

از سوی دیگر، معادلات حاکم بر امواج آب در یک سیال لزج، معادلات ناویر-استوکس می‌باشند که در اینجا به شکل خطی شده آمده‌اند [27]:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_k^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_k} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_k}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 V_k}{\partial x_k^2} \right) - g \quad (4)$$

در معادلات فوق  $P$  مشخص کننده فشار،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی،  $x$  بردار مکان و اندیس‌های  $i$ ،  $j$  و  $k$  به ترتیب بیانگر بردار مربوطه در جهت افقی، قائم و عمود بر صفحه می‌باشند.

## ۲-۲- مدل آزمایشگاهی برای درستی آزمایشی مدل عددی

برای شبیه‌سازی جریان در آبگیر قائم از مدل طراحی شده توسط سان و لیو استفاده شد [28]. این مدل آزمایشگاهی به صورت استوانه‌ای با چهار ورودی مستطیل شکل طراحی شده است که آبگیر قائم در مرکز و انتهای استوانه قرار دارد. عرض ورودی-های مخزن ۰/۱۵ متر و قطر و ارتفاع استوانه به ترتیب برابر ۰/۵۲ و ۰/۴۵ متر در نظر گرفته شده است. عرض هر یک از

بدین صورت که مقدار فشار در ورودی‌ها از کف مخزن تا سطح آزاد با توجه به ارتفاع محاسبه می‌شود. در نهایت برای خروجی که همان دهانه آبگیر قائم است، شرط مرزی سرعت خروجی لحاظ شده که مقدار آن با توجه به نوع گرداب‌ها متغیر بوده و برای گرداب‌های کلاس A، B و C به ترتیب برابر ۲/۵، ۱/۵ و ۰/۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. موقعیت مرزها در شکل (۴) نشان داده شده و مشخصات و نوع مرزها براساس نرم افزار STAR-CCM در جدول (۲) آمده است. شکل (۵) گرداب تشکیل شده با هسته هوا را در مدل عددی نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات شرایط مرزی مدل براساس نرم‌افزار STAR-CCM [21]

| Location                                          | Boundary type    | Value           |
|---------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| Inlet<br>( $X_{min}, X_{max}, Y_{min}, Y_{max}$ ) | Stagnation Inlet | 0-2305.35 Pa    |
| Outlet ( $Z_{min}$ )                              | Velocity         | 0.7-1.5-2.5 m/s |
| Free Surface ( $Z_{max}$ )                        | Pressure Outlet  | 0 Pa            |
| Walls                                             | Wall             | NO-Slip         |

Table 2 Specification of boundary condition according to STAR-CCM software [24]

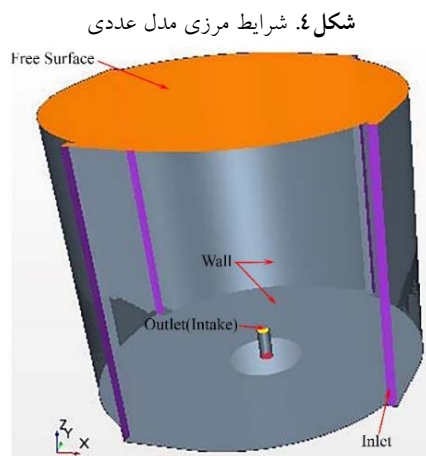


Fig. 4. Boundary condition of numerical model

شکل ۵. تشکیل گرداب با هسته هوا در شبیه‌سازی عددی

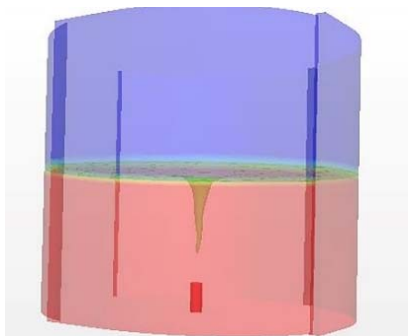


Fig. 5. Vortex formation with air core on the numerical simulation

جدول ۱. مشخصات امواج در مدل عددی

| Row | Wave amplitude to height of water<br>(a/d)(%) | Wave length to tank length (l/L) |
|-----|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| 1   | 0.3                                           | 0.03                             |
| 2   | 1.3                                           | 0.03                             |
| 3   | 2.6                                           | 0.03                             |

Table 1 Specification of waves in the numerical model

## ۳-۲- شبکه‌بندی مدل عددی

در شبیه‌سازی عددی براساس روش اویلری، انتخاب ابعاد مناسب شبکه‌بندی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. هرچه ابعاد شبکه کوچکتر باشد، دقت محاسبات بالاتر می‌رود. از طرف دیگر ریز بودن بیش از اندازه ابعاد شبکه، باعث افزایش زمان محاسبات می‌شود که امری نامطلوب است. بر همین اساس در مدل مذکور تحلیل حساسیت به صورت مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی انجام شد و نتایج ابعاد شبکه در قالب شکل (۳) رسم شد.

شکل ۳. تحلیل حساسیت مدل عددی به ابعاد شبکه

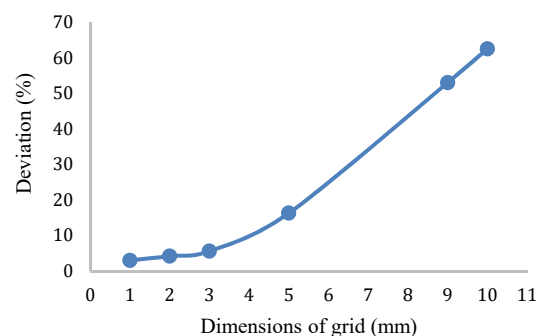


Fig. 3. Sensitivity analysis of numerical model to grid dimension

با توجه به شکل (۳)، برای مدل عددی ابعاد شبکه در اطراف دهانه آبگیر ۳mm انتخاب شد.

## ۴-۲- شرایط مرزی

در این مدل شرط مرزی سطح آزاد به صورت فشار خروجی با فشار صفر در نظر گرفته شد، تا اثر اتمسفر در محاسبات مدل لحاظ شود. قسمت‌هایی از مدل که به عنوان مخزن و نگهدارنده آب بودند با شرط مرزی دیوار که داری تنش برشی بدون لغزش است، لحاظ شد، تا از عبور آب از این قسمت‌ها جلوگیری شود. برای ورودی‌های مدل از شرط مرزی فشار ثابت استفاده شد،

نتایج حاصل از شکل‌های (۶ و ۷) حاکی از آن است که خطای مقادیر بی‌بعد  $V_\theta$  مدل عددی حاضر و مدل آزمایشگاهی سان و لیو به طور متوسط حدود ۶٪ و مقادیر بی‌بعد  $V_r$  حدود ۱۰٪ می‌باشد که نشان از هماهنگی قابل قبول نتایج مدل عددی این پژوهش و مدل آزمایشگاهی مذکور است. قابل ذکر است که خطای حاصل از مقایسه نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (Exp-Num)}{\sum_{i=1}^n (Exp)} \times 100 \quad (5)$$

که در رابطه فوق  $n$  مشخص کننده تعداد داده‌ها،  $Exp$  داده آزمایشگاهی و  $Num$  نتایج عددی می‌باشد.

### ۳-۳- ارائه و تحلیل نتایج

با توجه به رابطه گردندگی با بردار سرعت،  $V_\theta$  عامل مهمی در افزایش و یا کاهش قدرت گرداب تشکیل شده است. با در نظر گرفتن این موضوع و به طور کلی اهمیت سرعت در میدان جریان، در این قسمت به بررسی مولفه‌های مختلف سرعت در جریان گردابی هنگام حضور امواج، پرداخته می‌شود.

شکل ۸. حضور امواج در جریان گردابی

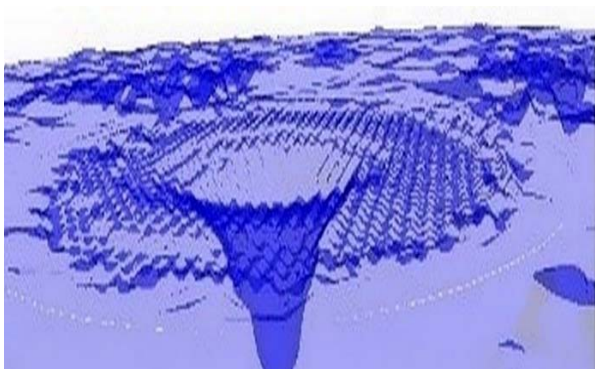


Fig. 8. The presence of waves in the vortex flow

### ۳-۱- توزیع سرعت مماسی $V_\theta$

با توجه به اینکه تغییرات  $V_\theta$  برای آبگیرهای قائم رو به پایین در جهت عمق آب ثابت است [30]، اندازه‌گیری  $V_\theta$  در نزدیکی سطح آب و جهت افقی مخزن انجام شد. در این قسمت به مقایسه مقادیر  $V_\theta$  انواع گرداب‌ها در حضور امواج پرداخته می‌شود. در شکل (۸) نمودار مقایسه‌ای  $V_\theta$  در حضور امواج برای گرداب کلاس A رسم شده است.

شبیه‌سازی عددی تاثیر امواج بر گرداب‌های شکل گرفته در آبگیر قائم همچنین شرایط اولیه در این مدل، سیال تراکم ناپذیر با مشخصات، آب با چگالی  $1000 \text{ kg/m}^3$  و ویسکوزیته دینامیکی  $0.001 \text{ kg/m/s}$  در دمای  $20^\circ$  است.

### ۲-۵- درستی آزمایشی مدل عددی

در شکل (۶) توزیع سرعت مماسی به صورت بی‌بعد در مدل عددی پژوهش حاضر و مدل آزمایشگاهی سان و لیو با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است که در آن  $V_\theta$  بیانگر سرعت مماسی،  $\Gamma_{in}$  گردندگی اولیه،  $r$  شعاع گرداب و  $r_m$  شعاعی از گرداب است که در آن سرعت مماسی ماکزیمم مقدار خود را دارد. در شکل (۷) نیز توزیع سرعت شعاعی به صورت بی‌بعد در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی سان و لیو با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است که در آن  $V_r$  سرعت شعاعی و  $V_{rmax}$  سرعت شعاعی ماکزیمم است. قابل ذکر است که در مدل آزمایشگاهی سان و لیو گرداب قوی کلاس A ایجاد شده است. به همین دلیل در این قسمت برای صحت سنجی نتایج، تنها به مقایسه گرداب کلاس A با مدل سان و لیو پرداخته می‌شود.

شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای توزیع سرعت مماسی  $V_\theta$

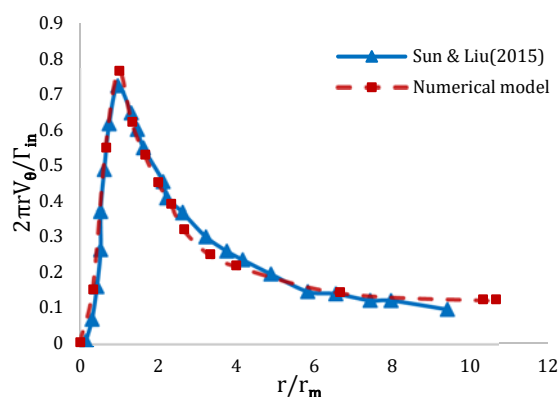


Fig. 6. Comparative graph of tangential velocity distribution

شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای سرعت شعاعی  $V_r$

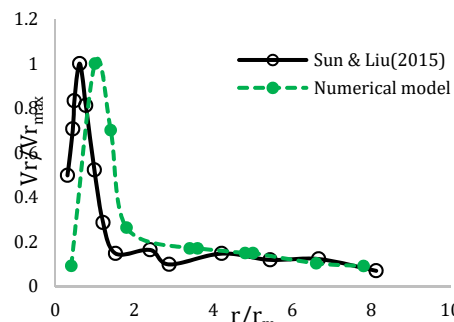


Fig. 7. Comparative graph of radial velocity distribution

با توجه به شکل (۱۰) در گرداب کلاس B نیز مانند گرداب کلاس A امواج اثر کاهشی روی پارامترهای گرداب دارند و  $V_\theta$  را کاهش می‌دهند. این نرخ کاهش با توجه به کمتر بودن قدرت گرداب کلاس B از کلاس A، به مراتب بیشتر است. همچنین نمودارهای  $V_\theta$  در این گرداب در حضور امواج برخورد کمتری با نمودار اصلی دارند که خود دلیلی بر افزایش روند کاهش  $V_\theta$  است. در این نوع گرداب نیز موج با دامنه کوچکتر بهتر از موج با دامنه بزرگتر،  $V_\theta$  را کاهش می‌دهد، بدین صورت که امواج با نسبت  $a/d$  برابر  $1/3$ ،  $2/6$ ،  $1/3$  و  $3/5$ ، ماکزیمم مقدار بی‌بعد  $V_\theta$  را به ترتیب  $7\%$ ،  $19\%$  و  $30\%$  کاهش داده‌اند. جدول (۴) اطلاعات دقیق‌تر شکل (۱۰) را نشان می‌دهد.

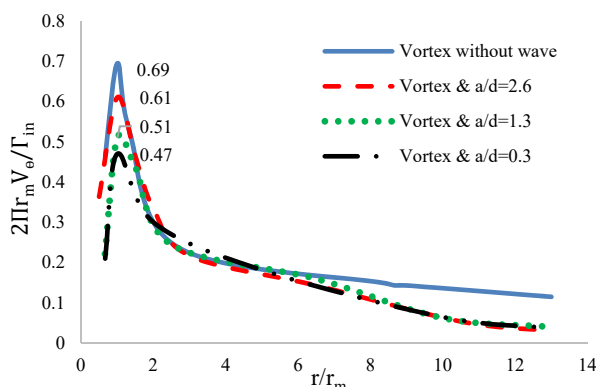
جدول ۴ تاثیر امواج مختلف بر سرعت مماسی گرداب کلاس B

| $a/d$<br>(%) | $(2\pi r_m V_\theta / \Gamma_{in})_{max}$<br>Without Wave | $(2\pi r_m V_\theta / \Gamma_{in})_{max}$<br>After wave present | Reduction rate<br>(%) |
|--------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 2.6          | 0.82                                                      | 0.76                                                            | 7.3                   |
| 1.3          | 0.82                                                      | 0.66                                                            | 19.4                  |
| 0.3          | 0.82                                                      | 0.57                                                            | 30.5                  |

**Table 4** The effect of different waves on the tangential velocity of the vortex B class

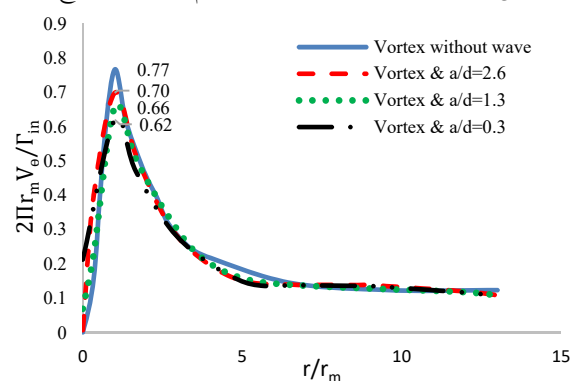
برای گرداب کلاس C نیز نتایج تاثیر  $V_\theta$  در شکل (۱۱) آورده شده است.

شکل ۱۱. سرعت مماسی گرداب کلاس C در هنگام برخورد با امواج

**Fig. 11.** The tangential velocity of vortex C when dealing with waves

در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که روند کاهش ماکزیمم مقدار  $V_\theta$  در گرداب کلاس C نیز تکرار می‌شود و دو موج کوچکتر ماکزیمم مقدار بی‌بعد  $V_\theta$  را بیشتر کاهش داده‌اند. نتیجه

شکل ۹. سرعت مماسی گرداب A در هنگام برخورد با امواج

**Fig. 9.** The tangential velocity of vortex A when dealing with waves

با دقت در شکل (۹) مشاهده می‌شود که در هر سه موج، نمودار  $V_\theta$  گرداب پایین‌تر از نمودار اصلی قرار دارد. در هر موج می‌توان دید که نقطه سرعت مماسی ماکزیمم در هنگام برخورد موج کاهش یافته و میزان این کاهش، با کم شدن دامنه موج، افزایش یافته است. بدین ترتیب که در موج با نسبت  $a/d$  برابر  $2/6$ ، ماکزیمم مقدار بی‌بعد  $V_\theta$  حدود  $9\%$ ، در موج  $1/3$  حدود  $14\%$  و در موج با نسبت  $a/d$  برابر  $3/5$  در حدود  $19\%$  کاهش داده شده است. اطلاعات دقیق‌تر برای گرداب کلاس A در جدول (۳) آمده است.

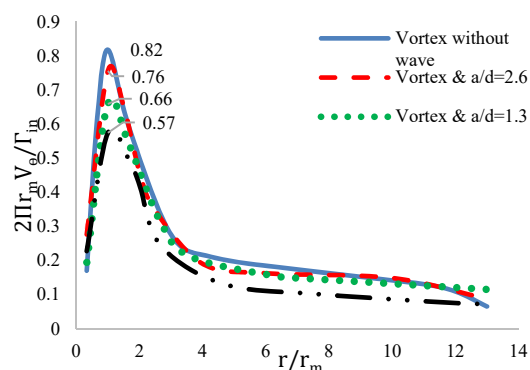
جدول ۳ تاثیر امواج مختلف بر سرعت مماسی گرداب کلاس A

| $a/d$<br>(%) | $(2\pi r_m V_\theta / \Gamma_{in})_{max}$<br>Without Wave | $(2\pi r_m V_\theta / \Gamma_{in})_{max}$<br>After wave present | Reduction rate<br>(%) |
|--------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 2.6          | 0.77                                                      | 0.7                                                             | 9.1                   |
| 1.3          | 0.77                                                      | 0.66                                                            | 14.3                  |
| 0.3          | 0.77                                                      | 0.62                                                            | 19.5                  |

**Table 3** The effect of different waves on the tangential velocity of the vortex A class

در شکل (۱۰) نمودار مقایسه‌ای  $V_\theta$  در حضور امواج برای گرداب کلاس B رسم شده است.

شکل ۱۰. سرعت مماسی گرداب کلاس B در هنگام برخورد با امواج

**Fig. 10.** The tangential velocity of vortex B when dealing with waves

با دقت در شکل (۱۲) اثر موج بر کاهش  $V_r$  را مشاهده می‌کنیم. تغییرات  $V_r$  در گرداب کلاس A با برخورد موج نسبت به تغییرات  $V_\theta$  کمتر است که به دلیل تاثیر گذارتر بودن سرعت مماسی بر پارامترهای گرداب است. از طرفی مشاهده می‌کنیم که ماکزیمم مقدار بی‌بعد  $V_r$  در شعاع‌های زودتری در هنگام برخورد موج با گرداب رخ داده که می‌تواند به علت تاثیر موج بر افزایش روند کاهش سرعت با دور شدن از هسته گرداب باشد. جدول (۶) در صد تغییرات  $V_r$  برای گرداب کلاس A را نشان می‌دهد.

جدول ۶. تاثیر امواج مختلف بر سرعت شعاعی گرداب کلاس A

| $a/d$<br>(%) | $((-V_r r_m)/v_e)_{max}$<br>Without Wave | $((-V_r r_m)/v_e)_{max}$<br>After wave present | Reduction rate<br>(%) |
|--------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|
| 2.6          | 1.53                                     | 1.47                                           | 3.9                   |
| 1.3          | 1.53                                     | 1.37                                           | 10.5                  |
| 0.3          | 1.53                                     | 1.33                                           | 13.1                  |

Table 6 The effect of different waves on the radial velocity of the vortex A class

با دقت در جدول (۶) مشاهده می‌کنیم که امواج توانسته‌اند به ترتیب  $0.3/1.3/2.6\%$  و  $0.5/1.0/1.3\%$  مقدار  $V_r$  را در گرداب قوی کلاس A کاهش دهند. برای گرداب کلاس B تغییرات  $V_r$  در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

شکل ۱۳. سرعت شعاعی گرداب کلاس B در هنگام برخورد با امواج

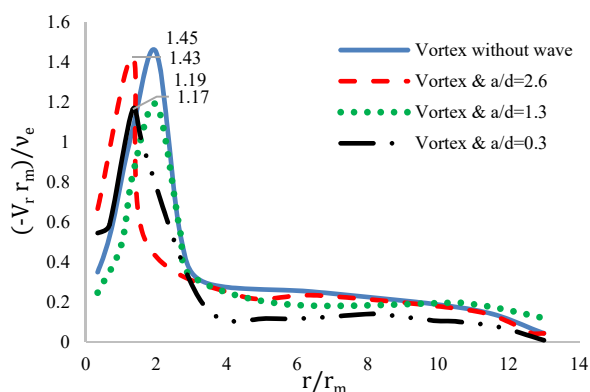


Fig. 13. The radial velocity of vortex B when dealing with waves

با توجه به شکل (۱۳) در می‌یابیم مانند گرداب کلاس A، در این گرداب نیز  $V_r$  با برخورد موج به گرداب، کاهش یافته است. اما در گرداب کلاس B امواج با دامنه متفاوت، علاوه بر کاهش ماکزیمم مقدار  $V_r$ ، آن را در شعاع‌های مختلف ایجاد

تغییرات  $V_\theta$  در گرداب کلاس C در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵. تاثیر امواج مختلف بر سرعت مماسی گرداب کلاس C

| $a/d$<br>(%) | $(2\pi r_m V_\theta / \Gamma_{in})_{max}$<br>Without Wave | $(2\pi r_m V_\theta / \Gamma_{in})_{max}$<br>After wave present | Reduction rate<br>(%) |
|--------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 2.6          | 0.69                                                      | 0.61                                                            | 11.1                  |
| 1.3          | 0.69                                                      | 0.51                                                            | 26                    |
| 0.3          | 0.69                                                      | 0.47                                                            | 32                    |

Table 5 The effect of different waves on the tangential velocity of the vortex C class

اثر قابل ملاحظه موج با نسبت  $a/d$  برابر  $0.3/1.0/3\%$  بر کاهش مقدار  $V_\theta$  گرداب کلاس C در جدول (۵) دیده می‌شود، به طوری که این موج مقدار ماکزیمم  $V_\theta$  را تا حدود  $32\%$  کاهش داده است. همچنین موج با نسبت  $a/d$  برابر  $0.3/1.3\%$  نیز اثر کاهشی مناسبی بر  $V_\theta$  داشته و درصد کاهش برای آن در حدود  $26\%$  محاسبه شده است.

### ۳-۲- توزیع سرعت شعاعی $V_r$

بعد از  $V_\theta$  جریان گردابی،  $V_r$  نیز تاثیر مهمی در تشکیل گرداب و از بین رفتن آن دارد. در واقع این دو مولفه در هنگام برخورد موج با گرداب، بردار سرعت را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در ادامه روند تغییرات  $V_r$  گرداب کلاس A در حضور امواج در شکل (۱۲) نشان داده است. پژوهشگران مختلف از پارامتر  $v_e$  برای بی‌بعد کردن  $V_r$  و  $V_z$  استفاده کرده‌اند [19 و 11 و 6].  $v_e$  پارامتری است که به صورت حاصل جمع ویسکوزیته گردابی ( $\varepsilon$ ) و ویسکوزیته سینماتیکی ( $\nu$ ) تعریف می‌شود و آن را ویسکوزیته موثر می‌نامند. در جریان‌هایی با عدد رینولدز بالا مقدار  $\nu$  در مقایسه با  $\varepsilon$  کوچک بوده و از آن صرف نظر می‌شود. برای آب  $20^\circ$  مقدار  $\varepsilon$  در حدود  $0.0035 \text{ m}^2/\text{s}$  و مقدار  $\nu$  تقریباً برابر  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  است و این رو طبق نکته فوق مقدار  $v_e$  برابر با  $0.0035 \text{ m}^2/\text{s}$  در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۲. سرعت شعاعی گرداب کلاس A در هنگام برخورد با امواج

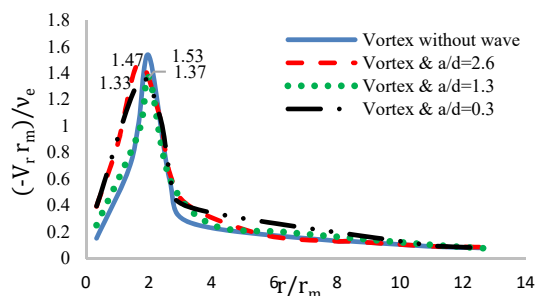


Fig. 12. The radial velocity of vortex A when dealing with waves

جدول ۸ تاثیر امواج مختلف بر سرعت شعاعی گرداب کلاس C

| $a/d$<br>(%) | $((-V_r r_m)/v_e)_{max}$<br>Without Wave | $((-V_r r_m)/v_e)_{max}$<br>After wave present | Reduction rate (%) |
|--------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|
| 2.6          | 1.2                                      | 1.07                                           | 10.8               |
| 1.3          | 1.2                                      | 1.06                                           | 11.6               |
| 0.3          | 1.2                                      | 0.81                                           | 32.5               |

Table 8 The effect of different waves on the radial velocity of the vortex C class

همان طور که گفته شد و مطابق جدول (۸)، موج کوچکتر بسیار بیشتر بر  $V_r$  گرداب کلاس C اثر کرده، به طوری که حدود ۳۲٪ ماکزیمم مقدار بی بعد  $V_r$  را کاهش داده است.

با توجه به جدول های (۶ تا ۸) مشاهده می شود که مانند مولفه سرعت مماسی، سرعت شعاعی نیز در انواع گرداب با برخورد موج به آن، کاهش می یابد. این روند کاهشی تقریباً مشابه  $V_\theta$  بوده و با کاهش دامنه موج افزایش می یابد با این تفاوت که درصد تغییرات آن در دو موج با نسبت  $a/d$  برابر ۲/۶٪ و ۱/۳٪ نسبت به ۰/۳٪ کمتر است. به بیان دقیق تر همچنان در موج کوچکتر که دامنه آن تنها ۰/۳ ارتفاع آب مخزن است، بیشترین کاهش را داریم به طوری که این موج  $V_r$  گرداب های کلاس A، B، و C را به ترتیب ۱/۱۳٪، ۱۹/۶٪ و ۳۲/۵٪ کاهش می دهد.

### ۳-۳- توزیع سرعت محوری $V_z$

مولفه دیگر بردار سرعت که در این قسمت مورد بررسی قرار می گیرد،  $V_z$  است. در شکل (۱۵) نمودار بی بعد توزیع  $V_z$  برای گرداب کلاس A نشان داده شده است.

شکل ۱۵. سرعت محوری گرداب کلاس A در هنگام برخورد با امواج

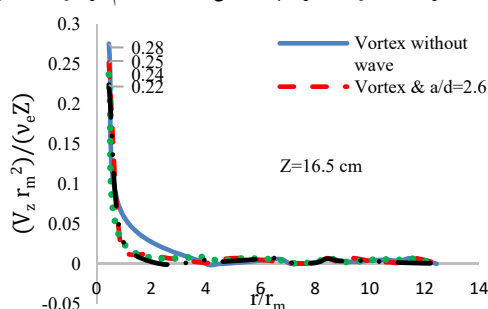


Fig. 15. The axial velocity of vortex A when dealing with waves

در شکل فوق،  $V_z$  سرعت محوری و  $Z$  ارتفاع آب از سطح آزاد است که با توجه به نوع و ارتفاع هسته گرداب، متفاوت است. با توجه به شکل (۱۵) مشاهده می شود که ماکزیمم مقادیر

کرده اند که می تواند نشان دهنده اثر موج بر کاهش شعاع هسته گرداب باشد. همچنین در تمامی شعاع ها نمودار گرداب بدون موج بالاتر از بقیه قرار گرفته که خود دلیلی بر کاهش مقادیر  $V_r$  توسط امواج است. میزان تغییرات  $V_r$  برای گرداب کلاس B در جدول (۷) آمده است.

جدول ۷ تاثیر امواج مختلف بر سرعت شعاعی گرداب کلاس B

| $a/d$<br>(%) | $((-V_r r_m)/v_e)_{max}$<br>Without Wave | $((-V_r r_m)/v_e)_{max}$<br>After wave present | Reduction rate (%) |
|--------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|
| 2.6          | 1.45                                     | 1.43                                           | 1.5                |
| 1.3          | 1.45                                     | 1.19                                           | 18                 |
| 0.3          | 1.45                                     | 1.17                                           | 19.6               |

Table 7 The effect of different waves on the radial velocity of the vortex B class

با دقت در جدول (۷) مشاهده می شود که این بار موج بزرگتر نسبت به گرداب کلاس A ضعیف تر عمل کرده و تنها ۱/۵٪ ماکزیمم مقدار بی بعد  $V_r$  را کاهش داده است. اما دو موج کوچکتر قوی تر عمل کرده اند و تا حدود ۱۹٪ مقدار  $V_r$  را در گرداب کلاس B کاهش داده اند که در نوع خود قابل توجه است. در ادامه اثر امواج بر گرداب کلاس C در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

شکل ۱۴. سرعت شعاعی گرداب کلاس C در هنگام برخورد با امواج

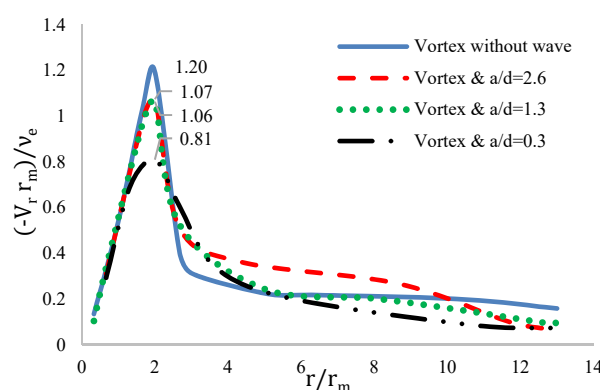


Fig. 14. The radial velocity of vortex C when dealing with waves

با دقت در شکل (۱۴) در می یابیم مانند دو گرداب دیگر، در گرداب کلاس C نیز، امواج باعث کاهش مقادیر  $V_r$  شده است. موج کوچکتر نسبت به دو موج دیگر به میزان بیشتری مقدار  $V_r$  را کاهش داده است. بررسی دقیق میزان تغییرات  $V_r$  در گرداب کلاس C در جدول (۸) آمده است.

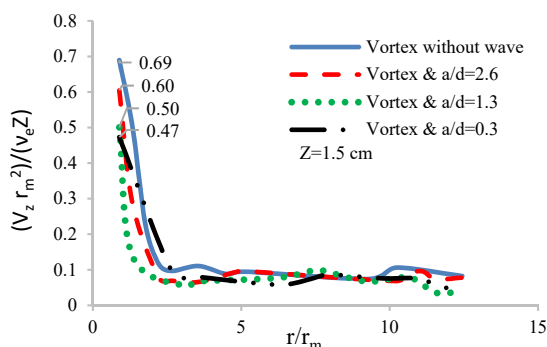
جدول ۱۰ تاثیر امواج مختلف بر سرعت محوری گرداب کلاس B

| $a/d$<br>(%) | $(V_z r_m^2 / v_e z)_{max}$<br>Without Wave | $(V_z r_m^2 / v_e z)_{max}$<br>After wave present | Reduction rate<br>(%) |
|--------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|
| 2.6          | 0.17                                        | 0.15                                              | 12.3                  |
| 1.3          | 0.17                                        | 0.143                                             | 16.4                  |
| 0.3          | 0.17                                        | 0.139                                             | 18.7                  |

**Table 10** The effect of different waves on the axial velocity of the vortex B class

طبق آنچه گفته شد و با توجه به جدول (۱۰) ملاحظه می‌شود که امواج در این گرداب نیز مقادیر  $V_z$  را کاهش داده‌اند. میزان کاهش در این گرداب تقریباً مشابه گرداب کلاس A بوده و همچنین افزایش دامنه موج تاثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش روند کاهش نداشته است. در ادامه روند تغییر  $V_z$  در حضور موج، برای گرداب کلاس C در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

شکل ۱۷. سرعت محوری گرداب کلاس C در هنگام برخورد با امواج

**Fig. 17.** The axial velocity of vortex C when dealing with waves

با توجه به شکل (۱۷)، اثر کاهشی امواج بر  $V_z$  گرداب کلاس C نیز مشهود است. مطابق شکل (۱۷) دو موج با نسبت  $a/d$  برابر  $1/3$  و  $1/3$ ، تاثیر نسبتاً یکسانی بر کاهش  $V_z$  گرداب کلاس C داشته‌اند. جدول (۱۱) مقایسه مقادیر بی‌بعد  $V_z$  را برای این گرداب نشان می‌دهد.

جدول ۱۱ تاثیر امواج مختلف بر سرعت محوری گرداب کلاس C

| $a/d$<br>(%) | $(V_z r_m^2 / v_e z)_{max}$<br>Without Wave | $(V_z r_m^2 / v_e z)_{max}$<br>After wave present | Reduction rate<br>(%) |
|--------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|
| 2.6          | 0.69                                        | 0.60                                              | 13                    |
| 1.3          | 0.69                                        | 0.50                                              | 26                    |
| 0.3          | 0.69                                        | 0.47                                              | 30.9                  |

**Table 11** The effect of different waves on the axial velocity of the vortex C class

شبیه‌سازی عددی تاثیر امواج بر گرداب‌های شکل گرفته در آبگیر قائم

بی‌بعد  $V_z$  دارای اختلاف نسبی هستند و با دور شدن از هسته گرداب این اختلاف بسیار کم شده و ناچیز است. بررسی تغییرات  $V_z$  برای گرداب کلاس A در جدول (۹) آمده است.

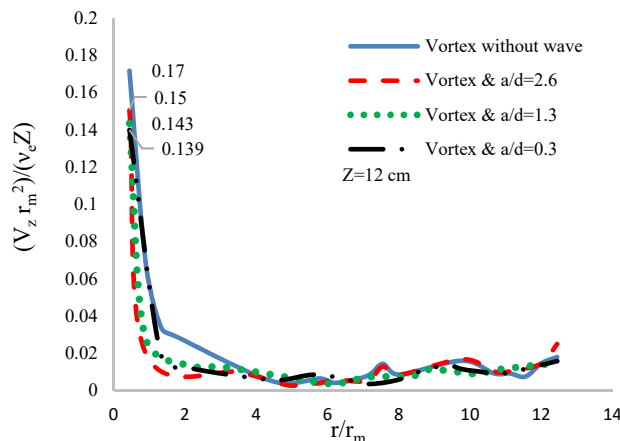
جدول ۹ تاثیر امواج مختلف بر سرعت محوری گرداب کلاس A

| $a/d$<br>(%) | $(V_z r_m^2 / v_e z)_{max}$<br>Without Wave | $(V_z r_m^2 / v_e z)_{max}$<br>After wave present | Reduction rate<br>(%) |
|--------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|
| 2.6          | 0.28                                        | 0.25                                              | 10.7                  |
| 1.3          | 0.28                                        | 0.24                                              | 14.3                  |
| 0.3          | 0.28                                        | 0.22                                              | 21.4                  |

**Table 9** The effect of different waves on the axial velocity of the vortex A class

با دقت در جدول (۹)، ماکزیمم مقدار بی‌بعد  $V_z$  در گرداب کلاس A بواسطه امواج تا حدود ۲۰٪ کاهش داده شده که در نوع خود قابل توجه است. دو موج کوچکتر بیشترین تاثیر را در کاهش  $V_z$  داشته‌اند و تقریباً تاثیر آنها یکسان بوده است. در شکل (۱۶) توزیع بی‌بعد سرعت محوری برای گرداب کلاس B نشان داده شده است.

شکل ۱۶. سرعت محوری گرداب کلاس B در هنگام برخورد با امواج

**Fig. 16.** The axial velocity of vortex B when dealing with waves

با بررسی شکل (۱۶) درمی‌یابیم که در این گرداب نیز امواج مقادیر  $V_z$  را کاهش داده‌اند. این میزان کاهش نسبت به گرداب کلاس A کمتر شده و اختلاف چندانی بین مقادیر سه موج دیده نمی‌شود. اطلاعات دقیق‌تر برای این شکل در جدول (۱۰) آمده است.

## Reference

## ۵- مراجع

- [1] Knauss, J. 1978. Prediction of critical submergence, swirling flow problems at intakes, IAHR Hydraulic Structures Design Manual, 1, 7-11, Netherlands: Balkema Rotterdam.
- [2] Rankine, W. J. M. 1858. A Manual of Applied Mechanics, London: R. Griffen.
- [3] Kundu, P. 2002. Fluid Mechanics. Academic Press.
- [4] Khadem rabe, B. 2017. Numerical and experimental study of air-core vortex in inclined intakes of power plant, *PhD Thesis, Department of Water Resources Engineering*, Shahid Beheshti University, Tehran. (In Persian)
- [5] Sarkardeh, H., Zarrati, A. R., & Roshan, R. 2010. Effect of intake head wall and trash rack on vortices, *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 108-112.
- [6] Hite, J., & Mih, W. 1994. Velocity of Air-Core Vortices at Hydraulic Intakes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(3), 284-297.
- [7] Uchiyama, T., & Ishiguro, Y. 2016. Study of the interactions between rising air bubbles and vortex core of swirling water flow around vertical axis, *Chemical Engineering Science (Elsevier)*, 142, 137-143.
- [8] Wang, Y. K., Jiang, C. B., & Liang, D. F. 2010. Investigation of air-core vortex at hydraulic intakes, *Journal of Hydrodynamics*, 22(5), 696-701.
- [9] Monshizadeh, M., Tahershamsi, A., Rahimzadeh, H., & Sarkardeh, H. 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), 59-67. (in Persian)
- [10] Khanarmuei, M. R., Rahimzadeh, H., & Sarkardeh, H. 2014. Investigating the effect of intake withdrawal direction on critical submergence and strength of vortices, *Modares Mechanical Engineering*, 14(10), 35-42. (In Persian)
- [11] Chen, Y., Wu, C., Wang, B., & Du, M. 2012. Three-dimensional Numerical Simulation of Vertical Vortex at Hydraulic Intake. *2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering*, 55-60.
- [12] Suerich Gulick, F., Gaskin, S. J., Villeneuve, M., Holder, G., & Parkinson, É. 2006. Experimental and Numerical Analysis of Free Surface Vortices at a Hydropower Intake, *7th Int. Conf. Hydroscience and Engineering (ICHE)*. Philadelphia, USA.
- [13] Li, H. F., Chen, H. X., Ma, Z., & Zhou, Y. 2008. Experimental and Numerical Envestigation of Free Surface Vortex, *Journal of hydrodynamics*, 20(4), 485-491.
- [14] Aybar, A. 2012. *Computational Modeling of Free Surface Flow in Intake Structures Using Flow 3D Software*, Turkey: M.Sc. Thesis in Civil Eng, Middle East Technical University.
- [15] Lucino, C., Liscia, S., & Duró, G. 2010. Vortex Detection in Pump Sumps by Means of CFD. *XXIV Latin American Cong. Hydraulics Punta Del Este*. Uruguay.

با دقت در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود که ماکزیمم مقدار  $V_z$  برای گرداب کلاس C نیز در حضور امواج کاهش یافته است. این میزان کاهش با کاهش دامنه موج افزایش یافته و در موج با نسبت  $a/d$  برابر  $0.3/0.3$ ، کاهش حدود  $30\%$ ،  $V_z$  مشاهده می‌شود.

## ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی عددی امواج با دامنه‌های مختلف، تاثیر برخورد آنها با گرداب‌های شکل گرفته در دهانه آبگیر قائم بررسی شده است. بر این اساس پس از تشکیل گرداب‌های کلاس A، B و C در مدل عددی، سه موج با نسبت  $a/d$  برابر  $0.2/0.3$ ،  $0.1/0.3$  و  $0.0/0.3$ ، ایجاد و اثر برخورد آنها به گرداب‌ها تحلیل شد. دامنه‌های امواج به صورت نسبتی از ارتفاع آب مخزن و به اندازه‌ای تعیین شد که دور از واقعیت نباشد. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مشاهده شد که امواج می‌توانند باعث کاهش مولفه‌های مختلف سرعت گرداب شوند. پیش از این بیشتر پژوهشگران از روش‌های سازه‌ای مانند ساخت صفحات مشبک برای کاهش مولفه‌های گرداب مانند سرعت استفاده کرده بودند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که امواج قادر به کاهش مولفه‌های سرعت به روشی هیدرولیکی و غیرسازه‌ای هستند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که ماکزیمم مقدار مولفه سرعت مماسی در هنگام حضور امواج به طور میانگین در گرداب‌های کلاس A، B و C به ترتیب حدود  $14\%$ ،  $19\%$  و  $23\%$  کاهش داده شده است. میزان کاهش ماکزیمم مقدار مولفه سرعت شعاعی نیز برای گرداب‌های کلاس A، B و C به ترتیب حدود  $9\%$ ،  $13\%$  و  $18\%$  است. ماکزیمم مقدار مولفه سرعت محوری نیز برای گرداب‌های کلاس A، B و C به ترتیب حدود  $15\%$ ،  $16\%$  و  $23\%$  کاهش داده شده‌اند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، میزان کاهش مولفه‌های سرعت گرداب، با کم شدن دامنه امواج بیشتر شده و این بدین معنی است که امواج با دامنه کوچکتر بهتر می‌توانند مولفه‌های سرعت را کاهش داده و در نتیجه میدان جریان گردابی را تضعیف کنند. در واقع موج کوچکتر که نسبت ارتفاع دامنه آن به آب روی مخزن  $0.3/0.3$  است، نسبت به دو موج دیگر تاثیر بیشتری بر کاهش میدان سرعت جریان گردابی و پارامترهای تاثیر گذار بر آن داشته است.

- International Conference on Ship Hydrodynamics*, National Academy of Science, Washington, DC, 1–19.
- [24] Schneiderbauer, S., & Krieger, M. 2014. What do the Navier–Stokes equations mean?, *European Journal of Physics*, 35, 1–24.
- [25] Anderson, J. D. 1996. *Computational Fluid Dynamics*, New York: McGraw-Hill.
- [26] Ahn, S. H., Xiao, Y., Wang, Z., Zhou, X., & Luo, Y. 2017. Numerical prediction on the effect of free surface vortex on intake flow characteristics for tidal power station, *Renewable Energy*, 101, 617–628.
- [27] Dean, R.G., & Dalrymple, R.A. 1984. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, 2, 261–269, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ: World Scientific.
- [28] Sun, H., & Liu, Y. 2015. Theoretical and experimental study on the vortex at hydraulic intakes. *Journal of Hydraulic Research*, 53(6), 787–796.
- [29] Ning, D. Z., Zang, J., Liu, S. X., Taylor, R. E., Teng, B., & Taylor, P. H. 2009. Free-surface evolution and wave kinematics for nonlinear uni-directional focused wave groups. *Ocean Engineering*, 36, 1226–1243.
- [30] Sarkardeh, H., Zarrati, A. R., Jabbari, E., & Tavakkoli, S. 2014. Velocity field in a reservoir in the presence of an air-core vortex, *ICE. Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 167, 356–364.
- [16] Sarkardeh, H., Zarrati, A. R., Jabbari, E., & Marosi, M. 2014. Numerical Simulation and Analysis of Flow in a Reservoir in the Presence of Vortex. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(4), 598–608.
- [17] Bin, J., Xianwu, L., Roger, E. A., & Yulin, W. 2014. Numerical simulation of three dimensional cavitation shedding dynamics with special emphasis on cavitation–vortex interaction, *Ocean engineering*, 8(4), 656–660.
- [18] Khadem-Rabe, B., Ghoreishi-Najafi, S. H., & Sarkardeh, H. 2017. Numerical Simulation of Air-Core Vortex at Intake, *Journal of Current Science*, 112(11), 435–448.
- [19] Khadem-Rabe, B., Ghoreishi-Najafi, S. H., & Sarkardeh, H. 2016. Numerical simulation of anti-vortex devices at water intakes, *Journal of Water Management (ICE)*, 170(3), 1–12.
- [20] Sarkardeh, H. 2017. Numerical calculation of air entrainment rates due to intake vortices, *Journal of Meccanica*, 52(15), 3629–3643.
- [21] Overview, P. (n.d.). 2013. *Simcenter STAR-CCM+ Product Overview*.
- [22] Hirt, C., & Nichols, B. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39, 201–225.
- [23] Hirt, C. W., & Sicilian, J. M. 1985. A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes, *Proceedings of the 4<sup>th</sup>*

# Numerical Simulation of the effect of waves on the vortex formed in the vertical intake

Ehsan Pakdel<sup>1</sup>, Mohammadreza Majdzadeh Tabatabai<sup>2\*</sup>, Hamed Sarkardeh<sup>3</sup>, Sayed Hosain Ghoreishi Najafabadi<sup>4</sup>

1- M.Sc. of Water and Hydraulic Structure Engineering, Dept. of Civil, Water and Environmental Eng., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Prof., Dept. of Civil, Water and Environmental Eng., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

4- Assistant Prof., Dept. of Civil, Water and Environmental Eng., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

\*m\_majdzadeh@sbu.ac.ir

## Abstract

The formation of a vortex at the mouth of power plant intake is one of the unfavorable hydraulic phenomena that occur during dewatering of dams. More precisely, the formation of vortex flows in the openings of the intake disturbs the proper functioning of the intake structure. vortices cause problems such as oscillating in the system, reducing turbine output, increasing hydraulic losses in the intake openings, entering the air and particles into the intake pipe and eventually reducing its efficiency. In recent years, various scholars have conducted extensive studies on the phenomenon of vortex. In the meantime, research has been carried out experimentally using mechanical devices and less attention has been paid to the natural phenomena existing on the level of reservoirs of dams and their impact on the vortex. One of the most important natural phenomena that occurs in the reservoir of dams is the waves that can affect the vortex. In this research, with the aim of investigating the effect of waves on the vortex, numerical simulation of waves in the openings of vertical intake has been studied in various vortex formation conditions. In this regard, three class of vortices A, B and C were simulated in numerical model and the results were investigated after dealing with waves. To simulate the flow in the vertical intake, the model designed by Sun and Liu was used. This model is designed in a cylindrical shape with four rectangular inlets, with a vertical intake located at the center and end of the cylinder. In the present study, the model was studied in three-dimensional and two-phase mode, so that numerical simulation of vortex and wave can be investigated with this approach. In order to reduce the computational time to solve the equations, Euler's method was chosen and the turbulence was simulated using the LES model in STAR-CCM Software. After sensitivity analysis, 3 mm grid dimensions were selected. For computational mesh domain, a Cartesian coordinate was used and the free surface was considered using the VOF method. Accordingly, after formation of three classes of vortices A, B and C in the numerical model, three waves with a/d ratio of 2.6%, 1.3% and 0.3% were generated and the effect of their collisions on vortices was analyzed. The amplitudes of the waves are determined in relative proportions of the reservoir water's height and are not far from reality. The results showed that the waves reduced the components of tangential, radial and axial velocity. According to the results, the maximum component of the tangential velocity at the time of the presence of waves is reduced by about 14%, 19% and 23%, respectively, in the class A, B, and C vortices. The radial velocity component is also reduced by about 9%, 13% and 18% for the A, B, and C vortices, respectively. The maximum axial velocity was also reduced to 26%, 13%, and 23% for class A, B, and C vortices, respectively. According to the simulation results, the decrease rate with decrease decreasing wave amplitude, which means that smaller waves can lower the velocity components and thus weaken the vortex flow.

**Keywords:** Vertical intake, Waves, Vortex, STAR-CCM, Velocity vector