

Numerical simulation of the Chute Convergence effects on Forming the Transverse Wave in Flood Evacuation Systems

Sahar Biabani ¹, Mehdi Hamidi ^{2*}, Bahram Navayi Neyfa ³

1- M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Hamidi@nit.ac.ir

Received: 13 March 2019, Accepted: 22 July 2019  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Flow contact with the spillway piers causes rooster tail waves which could continue along the flood evacuation system. Therefore, the information about the height and location of these waves would be useful for the design of the spillway chute walls. On the other hand, the engineers try to design the converging chutes to reduce the excavation costs, and this convergence in many cases would increase the transverse flow depth. According to the literature, three kinds of waves could be formed in the spillway and chute system. The first wave is formed just after the spillway piers and called as rooster tail waves. The Flow passing through the two sides of a pier collide each other at a near distance after the pier and forming the first wave. The second wave is formed at the middle axis of the chute and could be considered as the result of the interaction of the first waves and the channel convergence. The third wave is formed due to the collision of the mentioned waves with the channel walls. Investigating the effect of the chute convergence on the depth and location of transverse waves is critical and necessary and could present suitable information about the three waves. In this paper, the numerical simulation of the Khair Abad dam flood evacuation system is performed for investigating the effects of chute convergence on the formation of the transverse waves along the chute.

Methodology: In this Research, the FLOW-3D is used for simulation of the effects chute convergence on transverse wave formation. The Khair Abad dam flood evacuation system laboratory tests results were used for verification of the numerical simulation. The present simulations considered four convergence angles of the chute, including 0, 3, 5 and 7°. Also, the simulation was performed using three discharge rates consist of 3000, 7000 and 9000 m³/s. The convergence angle of the Khairabad Dam spillway is approximately 5 degrees and the convergence angles were changed during the chute until the chute width reached from 66 m to 40 m. The chute width is kept constant after the convergence.

Results and discussion: The model validation was performed using the laboratory data of the Kheirabad Dam spillway Model developed by the Iran Water Research Institute. Since the size and number of the cells in the model affect the accuracy of the results and computational cost, this study concentrates in finding the optimum value of dimensions and

number of cells for the simulation domain. This procedure could result in acceptable accuracy and suitable computational cost. The results of the verification showed that the smaller grid size and the greater number of cells, result in the higher correlation of the numerical results and the laboratory data. Hence, based on the above-mentioned method and available computational device, the best size and number of the cells were selected for simulating the effect of chute convergence on the three waves height.

Simulation results show that the height of the first wave increases with increases in the flow discharge, and the spillway convergence has not a significant effect on the first wave height. Also, the second wave height is increased by the increase in flow discharge. It should be mentioned, the second wave doesn't appear when there is no convergence in the chute, but with increasing the convergence angle the wave height increases and the maximum wave height will move to upstream stations of the chute. In other words, with the increase of the angle of convergence of the chute, the location of the second wave formation will be closer to the spillway crest and its height will increase. The simulation results demonstrated that the increase in the flow discharge could lead to an increase of third waves heights. Also, the results show that the third waves could not be formed when the channel convergence angle is equal to zero, and increase of convergence angle could result in an increase of the third wave height. Also, the increase in the angle of convergence of the chute results in transport of the location of the third wave formation into upstream stations. In other words, the third waves will form closer to the spillway axis by an increase in convergence angle. Numerical simulation results show that the height of the third wave which formed beside the wall can be more than twice the average flow depth at the same point. This fact should be considerate in the design of the chute with convergence. The results also showed that increasing the flow discharge will cause to increase of the wave height, but it led to the decrease of the ratio of the third wave height to the average flow depth. This means that increasing the discharge has less effect on increasing the transverse wave height.

Conclusion: Simulation results show that the height of transverse waves increases by increasing the discharge. But the ratio of the maximum height of the waves to the average depth of the same station will reduce by the increase of the discharge. Also, Results show that, by increasing the chute's convergence angle, the height of the transverse waves will increase and the location of the primary transverse waves will transmit to upstream locations of the chute.

Keywords: Numerical Simulation of Spillway, Chute Convergence, Kheir-Abad Dam, Transverse Waves, FLOW-3D, Rooster tail waves.

شبیه‌سازی عددی تاثیر همگرایی دیواره‌های شوت بر شکل‌گیری امواج عرضی در سیستم‌های تخلیه سیلاب

سحر بیابانی^۱، مهدی حمیدی^{۲*}، بهرام نوایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

۳- دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

*Hamidi@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۳۱ ☞ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: برخورد جریان با پایه‌های روی سرریز باعث شکل‌گیری امواج دم‌خروسی و توسعه امواج عرضی در طول سیستم تخلیه سیلاب می‌شود. از این رو دستیابی به اطلاعات مربوط به ارتفاع و محل تشکیل این امواج در طراحی دیواره‌های سرریز بسیار پرکاربرد می‌باشد. از طرفی در بسیاری از طرح‌ها برای کاهش هزینه‌های اجرا از جمله هزینه‌های حفاری و بتن‌ریزی سعی می‌شود تا شوت به صورت همگرا طراحی گردد و این همگرایی در بسیاری از مواقع موجب به وجود آمدن جریان‌های عرضی شده که باعث افزایش عمق آب می‌گردد. بنابراین تحقیق و بررسی در مورد تأثیر زوایای همگرایی سرریز بر عمق و محل تشکیل امواج ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، از نرم‌افزار Flow3D برای مدل‌سازی سه‌بعدی سرریز سد خیرآباد و بررسی تأثیر همگرایی دیواره‌های شوت بر شکل‌گیری و توسعه امواج عرضی استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش دبی ورودی سرریز و همچنین زاویه همگرایی سرریز، ارتفاع این امواج افزایش می‌یابد و در برخی موارد به ازای یک دبی ثابت ارتفاع موج به بیش از دو برابر عمق متوسط جریان در مقطع موردبررسی خواهد رسید. نتایج شبیه‌سازی به ازای یک همگرایی معین نشان داد با افزایش دبی نسبت به‌شینه ارتفاع موج به عمق متوسط جریان در همان نقطه، کمتر خواهد شد. به‌عبارت‌دیگر در دبی‌های پایین‌تر موج عرضی بلندتری نسبت به عمق متوسط تشکیل خواهد شد. همچنین نتایج تحقیق نشان داد با افزایش زاویه همگرایی شوت، علیرغم افزایش ارتفاع امواج شکل‌گرفته، محل شکل‌گیری امواج با حداکثر ارتفاع به سمت بالادست شوت منتقل می‌شود.

کلید واژگان: شبیه‌سازی عددی سیستم تخلیه سیلاب، همگرایی شوت، سد خیرآباد، امواج عرضی، امواج دم‌خروسی، FLOW-3D

۱- مقدمه

دم‌خروسی^۱ گفته می‌شود. عموماً حاصل این جریان سه موج است. موج اول در پایین‌دست پایه‌ها شکل می‌گیرد. جریان عبوری از دو طرف پایه در فاصله‌ای بعد از پایه به هم برخورد می‌کنند که به آن موج اول می‌گویند. در اثر اندرکنش امواج اول و همچنین همگرایی کانال، موجی وسط سرریز رخ می‌دهد که به آن موج دوم می‌گویند و در اثر برخورد این امواج با دیواره‌های کانال، موج سوم شکل می‌گیرد. شکل ۱ محل تشکیل این امواج را در یک مدل

در سازه‌های هیدرولیکی به دلیل نصب دریچه در سرریزها و یا ساخت پل از پایه استفاده می‌گردد که جریان هنگام عبور از پایه‌ها موج‌هایی را تولید می‌کنند که باعث به وجود آمدن معضلاتی برای عبور جریان از روی شوت سرریز می‌شود. جریان بعد از عبور از پایه به‌طور کلی فوق بحرانی است. در اثر برخورد این جریان با پایه‌های سرریز امواجی تشکیل می‌شود که به این امواج، امواج

¹ Rooster tail

و نشان دادند هواده‌ها باعث ایجاد امواج دم‌خروسی می‌شود و افزایش طول و زاویه قرارگیری هواده با افق باعث افزایش ارتفاع امواج عرضی حاصله در طول کانال آب خواهد شد. همچنین آن‌ها در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۲ برای جلوگیری از این امواج به بررسی زاویه بهینه قرارگیری رمپ‌های هواده با افق پرداختند (Pagliara et al. 2012). (Xue et al. (2018) برای محاسبه ارتفاع امواج دم‌خروسی یک فرمول تجربی برحسب شکل پایه ارائه نمودند و همچنین شکل جدیدی از پایه با هزینه کم طراحی کردند که ارتفاع این امواج را به حداقل ممکن می‌رساند. (Wu et al. (2008) نیز به طراحی نوعی پایه که باعث به حداقل رساندن امواج دم‌خروسی در تونل تخلیه سیلاب می‌گردید پرداختند. (Kavianpour et al. 2013) مطالعاتی را بر روی پروفیل طولی و عرضی امواج دم‌خروسی انجام دادند و روشی را برای کاهش این امواج ارائه نمودند.

بررسی تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که بیشتر آن‌ها بر بررسی آزمایشگاهی موج دم‌خروسی تولید شده بعد از پایه، تعیین فرمولی تجربی برای محاسبه عمق این موج و همچنین بررسی تأثیر پایه‌ها، عدد فرود و هواده‌ها روی ایجاد این امواج متمرکز بوده‌اند. از طرفی در بسیاری از طرح‌ها برای کاهش هزینه‌های اجرایی سعی می‌شود تا شوت به‌صورت همگرا طرح گردد و این همگرایی در بسیاری از مواقع موجب ایجاد جریان‌های عرضی و به دنبال آن باعث افزایش ارتفاع آب می‌گردد. بنابراین لحاظ نمودن تأثیر زوایای همگرایی شوت بر تغییرات عمق امواج عرضی ضروری به نظر می‌رسد. شایان‌ذکر است، در تحقیقات انجام‌شده پیرامون علل ایجاد امواج دم‌خروسی و امواج عرضی حاصله تأثیر تغییرات هندسه شوت از جمله همگرایی دیواره‌های شوت به دلیل هزینه و زمان‌بر بودن ساخت مدل آزمایشگاهی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین استفاده از مدل عددی در بررسی جریان روی شوت به‌منظور کاهش هزینه‌های آزمایش و تسریع در کسب نتایج ضروری می‌نماید. از این‌رو با توسعه مدل‌های عددی و نرم‌افزارهایی که بر اساس مفاهیم دینامیک سیالات محاسباتی شکل گرفته‌اند، مدل‌سازی یکپارچه

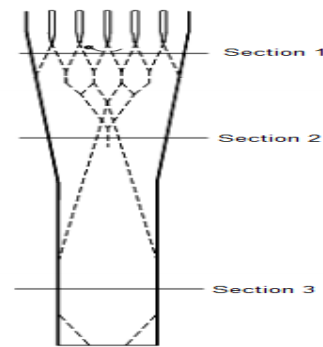


Fig. 1 The location of transverse waves formation on the convergent spillway (adopted from Mousavi mehr et al. 2014)

شکل ۱ محل شکل‌گیری امواج عرضی روی سرریز همگرا (Mousavi Mehr et al. 2014)

یک موج عرضی می‌تواند به راحتی به دیواره‌های شوت ضربه بزند و باعث خساراتی از جمله خوردگی دیواره‌ها شود (Wu et al. 2005; Sheng et al. 2013). بنابراین در طراحی سرریزها باید محل شکل‌گیری و ارتفاع موج‌ها محاسبه شود. امواج عرضی حتی می‌توانند در مرز یک تغییر ناگهانی مانند ستون یک کشتی رخ دهند (Maki et al. 2015; 2006; 2007; Ghadimi et al. 2015). این امواج در هنگامی که مقدار تخلیه سیلاب (دبی) کم است در سرریزهای پلکانی نیز رخ می‌دهد (Rajaratnam 1990). با توجه به خطرات و خسارات ناشی از امواج دم‌خروسی و امواج عرضی حاصل از آن مطالعاتی بر روی این امواج به‌صورت آزمایشگاهی صورت گرفت. (Reinauer and Hager (1994) مطالعاتی بر روی امواج دم‌خروسی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که ارتفاع این امواج به نسبت عرض کانال به عرض پایه روی سرریز بستگی دارد. آن‌ها با ثابت نگه داشتن عرض پایه نشان دادند ارتفاع و عرض امواج دم‌خروسی با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. همچنین این محققین در تحقیقی دیگر در سال ۱۹۹۶ برای کاهش امواج دم‌خروسی روی سرریز به امتداد پایه از یک طرف به وسیله تیغه پرداختند. این تیغه نقطه برخورد جت آب از دو طرف پایه را به نوک آن منتقل می‌کند و مانع از تشکیل امواج دم‌خروسی بعد از پایه می‌گردد (Reinauer and Hager, 1997). (Pagliara et al. (2011) مطالعاتی بر روی این امواج در سرریز با هواده انجام دادند

انتهای آن ۴۰ متر است و عرض بازه ۴٪ ثابت بوده و ۴۰ متر می‌باشد.

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق از نتایج مدل آزمایشگاهی سرریز سد خیرآباد ساخته شده در موسسه تحقیقات آب ایران استفاده شده است (Iran Water Research Institute, 2012). مدل فیزیکی سرریز با مقیاس ۱:۵۰ و از جنس پلکسی گلاس ساخته شده است. در طول تنداب ۸ مقطع عرضی برای اندازه‌گیری عمق و سرعت آب تعیین شد که در شکل ۲ موقعیت مقاطع این نقاط در مقاطع طولی مشخص شده است. به ازای بازشدگی کامل دریچه‌های شش‌گانه، در هر مقطع عرضی در ۳ مکان راست، وسط و چپ شوت به ازای ۶ دبی (معادل دبی ۱۱۰۰ تا ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه پروتوتایپ) عمق آب اندازه‌گیری شده است. در این تحقیق برای واسنجی نتایج نرم‌افزار از داده‌های آزمایشگاهی عمق آب به ازای دبی ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه پروتوتایپ استفاده شده که در بخش ۳-۱ نتیجه بررسی‌ها و صحت‌سنجی‌های مربوطه ارائه شده است.

سازه‌های هیدرولیکی و بررسی جزئیات جریان امکان‌پذیر گردیده است. در این تحقیق سعی می‌شود از مدل سه‌بعدی سرریز سد خیرآباد برای بررسی تأثیر زاویه همگرایی دیواره‌های شوت بر شکل‌گیری امواج دم‌خروسی و توسعه امواج عرضی شوت استفاده گردد.

۲-۲ مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای تطابق بیشتر مطالعات با واقعیت از مدل آزمایشگاهی سیستم تخلیه سیلاب سد خیرآباد استفاده گردید. این سد دارای سامانه تخلیه سیلاب از نوع سرریز شوت دریچه‌دار (شامل کانال تقرب، سرریز اوجی دریچه‌دار، تنداب و پرتاب‌کننده) می‌باشد که در سمت راست بدنه سد قرار گرفته است. تجهیزات هیدرودینامیک سرریز شامل ۶ دریچه قطاعی به عرض ۹ متر و ارتفاع ۱۱/۷ متر است و ۵ پایه با مقطع دوکی‌شکل می‌باشد. عرض پایه ۲.۴ متر که در انتهای دوک به ۱ متر می‌رسد همچنین طول پایه‌ها در سرریز ۳۳.۸ و فاصله پایه‌ها از هم ۹ متر است. سازه سرریز از نوع اوجی می‌باشد. شوت سرریز متشکل از دو بازه با شیب‌های به ترتیب ۱۲٪ و ۴٪ است که عرض آن در ابتدای بازه ۱۲٪ برابر با ۶۶ متر و در

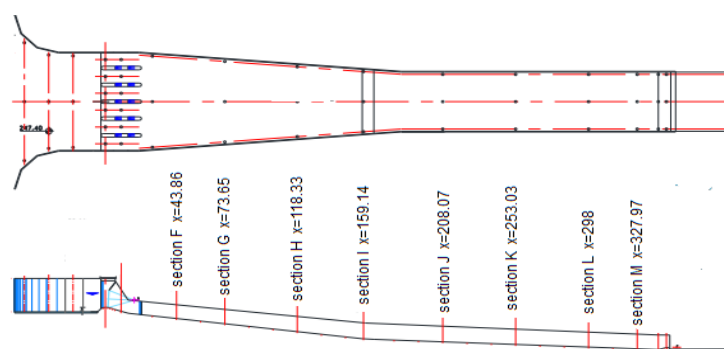


Fig. 2 The Position of the investigated sections in Khairabad Dam spillway (Iran Water Research Institute, 2012)
 شکل ۲ موقعیت مقاطع مورد بررسی در سیستم سرریز سد خیرآباد (Iran Water Research Institute, 2012)

حاکم بر جریان و روش حجم سیال برای محاسبه سطح آزاد آب در مجاری باز استفاده می‌کند و همچنین برای جریان‌های سه‌بعدی غیر ماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند کاربرد دارد. این نرم‌افزار قابلیت

۲-۲-۲ مدل عددی

در این تحقیق از نرم‌افزار Flow3d برای مدل‌سازی عددی جریان عبوری از سیستم تخلیه سیلاب استفاده شده است. این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad (6)$$

که در معادلات بالا G_x, G_y, G_z مربوط به شتاب حجمی می‌باشند. پارامترهای f_x, f_y, f_z شتاب‌های ناشی از جریان‌های لزج بوده و b_x, b_y, b_z نیز شامل روابط مربوط به افت در محیط‌های متخلخل هستند (Flow3D, Help, Ver. 10.0.1, Flow Science Inc)

۲-۴- شرایط مرزی و مدل تلاطمی

شرایط مرزی کف و دیواره‌های جانبی، دیوار^۱ در نظر گرفته شده است. این شرایط مرزی دقیقاً مشابه یک دیوار عمل می‌کند و می‌توان بر اساس لغزش یا عدم لغزش جریان روی دیواره مولفه‌های سرعت روی دیواره را نیز معرفی کرد. سمت بالای شبکه‌بندی شرایط متقارن^۲ منظور شد که در این شرایط کلیه گرادیان‌های عمود بر مرز صفر بوده و هیچ جریانی از آن عبور نمی‌کند. شرایط اولیه ورودی مقدار دبی^۳ و شرایط خروجی جریان از نوع جریان خروجی^۴ انتخاب شد که اجازه می‌دهد سیال در تماس با فشار هوا به‌طور آزادانه حرکت کند. برای مقایسه اثر مدل آشفتگی بر دقت نتایج در شرایط مشابه از دو مدل آشفتگی RNG و K-ε برای شبیه‌سازی سرریز استفاده گردید که نتایج تا حد زیادی مشابه هم شد و با اختلاف کمی مدل RNG نسبت به مدل K-ε نتایج عمق آب در طول تندآب را به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر پیش‌بینی کرد لذا مدل RNG برای ادامه تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. زمان مناسب جهت استخراج نتایج نیز ۸۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

۲-۵- معرفی مدل‌های هندسی

مطالعات حاضر بر اساس ۴ زاویه همگرایی شوت سرریز شامل زوایای صفر، ۳، ۵ و ۷ درجه و سه دبی ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه انجام گردید. اشاره به

تحلیل یک، دو و سه‌بعدی جریان را دارد. در این نرم‌افزار از معادلات پیوستگی و ناویر استوکس استفاده شده است. در ویرایش نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق امکان استفاده از پنج مدل آشفتگی شامل مدل اختلاط پرانتل، مدل تک معادله‌ای، مدل شبیه‌سازی گرداب‌های بزرگ، مدل دو معادله‌ای K-ε و مدل RNG برای شبیه‌سازی جریان‌های متلاطم فراهم می‌باشد. (Flow3D, Help, Ver. 11.0.4, Flow Science Inc)

۲-۳- معادلات حاکم

قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر و لزج توسط معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی بیان می‌شوند. فرم کلی معادلات پیوستگی به صورت معادله ۱ بیان می‌شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

که V_F ضریب حجم آزاد به سمت جریان و مقدار R در معادله بالا ضریب مربوط به مختصات به صورت کارترزین و یا استوانه‌ای هست. اولین عبارت در سمت راست معادله پیوستگی مربوط به انتشار تلاطم بوده و به صورت معادله ۲ قابل تعریف است:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v \rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v \rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v \rho A_x}{x} \quad (2)$$

عبارت دوم در سمت راست معادله ۱ بیانگر منشأ چگالی است و به صورت معادله ۳ قابل تعریف است:

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{RSOR}{\rho} \quad (3)$$

همچنین فرم کلی معادلات حرکت (مومنتم) در حالت سه‌بعدی به صورت معادلات ۴، ۵ و ۶ می‌باشد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \zeta \frac{A_y V^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \zeta \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial P}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (5)$$

¹ Wall

² Symmetry

³ volume flow rate

⁴ out flow

رابطه‌ی ۹ نشان‌دهنده تغییرات خطای نسبی می‌باشد که حاصل تقسیم خطای مطلق بر مقدار واقعی کمیت یا همان مقدار داده‌های آزمایشگاهی است و معمولاً برحسب درصد نیز می‌توان بیان کرد و بدون بُعد است.

$$\text{درصد خطای نسبی} = \frac{X_i - Y_i}{Y_i} \quad (9)$$

در این رابطه X_i مقادیر داده‌های بدست آمده در نرم‌افزار و Y_i مقادیر داده‌های آزمایشگاهی و i تعداد داده‌ها می‌باشد (Chai et al. 2014).

رابطه ۱۰ مقدار ضریب همبستگی که بیان‌کننده همبستگی میزان داده‌های محاسبه‌شده در نرم‌افزار و مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد را نشان می‌دهد. بدیهی است که هرچه مقدار R به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده نزدیکی بیش‌تر داده‌های نرم‌افزار و آزمایشگاهی است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{act} - \bar{y}_{act})(y_{est} - \bar{y}_{est})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{act} - \bar{y}_{act})^2 \sum_{i=1}^n (y_{est} - \bar{y}_{est})^2}} \quad (10)$$

در رابطه بالا y_{act} مقدار داده‌های آزمایشگاهی \bar{y}_{act} میانگین داده‌های آزمایشگاهی y_{est} مقادیر داده‌های نرم‌افزاری و \bar{y}_{est} میانگین داده‌های نرم‌افزاری برآورد شده است (Chai et al. 2014).

۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا صحت سنجی مدل‌سازی انجام شده ارائه گردیده و پس از آن با ارائه نتایج، به بحث در مورد آنها پرداخته خواهد شد.

۳-۱- صحت سنجی

برای حصول اطمینان از صحت شبیه‌سازی انجام‌شده، راستی آزمایی مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مدل سرریز سد خیرآباد، ساخته‌شده در موسسه تحقیقات آب ایران انجام‌شده است. به همین منظور ابتدا یک مدل هندسی سه بعدی منطبق بر مشخصات سرریز سد خیرآباد ساخته شد. یکی از مهم‌ترین نکاتی که باید در شبیه‌سازی عددی مورد توجه قرار گیرد شبکه‌بندی مناسب جهت حل معادلات حاکم است. در این مدل‌سازی ابعاد شبکه طوری تعیین شد که پارامترهای کنترل شبکه از قبیل حداکثر

این نکته حائز اهمیت است که زاویه همگرایی سرریز سد خیرآباد تقریباً ۵ درجه می‌باشد و تغییر زوایای همگرایی در طول سرریز تا جایی انجام شد که عرض سرریز از ۶۶ متر به ۴۰ متر رسید و بعد از آن عرض سرریز ثابت نگه داشته شد. در شکل ۳ نمای سه بعدی مدل سرریز سد خیرآباد با زاویه همگرایی ۷ درجه ارائه شده است.

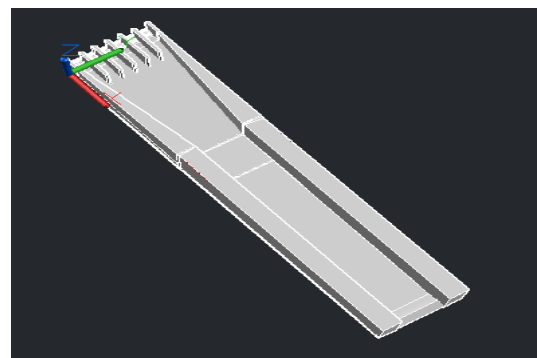


Fig. 3 The geometry of the spillway and chute hydraulic model with 7 degrees convergence

شکل ۳ هندسه مدل هیدرولیکی سرریز و شوت با زاویه همگرایی ۷ درجه

در پایین‌دست دریچه‌ها پروفیل امواج اول، دوم و سوم اندازه‌گیری و ترسیم گردید. اندازه‌گیری‌ها برای موج اول دقیقاً بعد از پایه، برای موج دوم در میانه مسیر شوت و برای موج سوم بر روی دیواره‌های کانال انجام شد.

۲-۶- معرفی خطاهای محاسباتی

رابطه‌های ۷ و ۸ به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات خطای جذر میانگین مربعات و میانگین مطلق خطا می‌باشد که تفاوت میان مقدار پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار و مقدار داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n} \quad (8)$$

که در روابط بالا e_i تفاضل مقادیر داده‌های نرم‌افزار با داده‌های آزمایشگاهی و n تعداد داده‌ها می‌باشد (Chai et al. 2014).

محاسبه گردید. نمودارهای ۴، ۵ و ۶ عمق آب را به ازای تعداد المان‌های متفاوت در طول سرریز و به همراه نتایج آزمایشگاهی برای دبی ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهد. در نمودارهای زیر Expr نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی سرریز می‌باشد.

جدول ۱ تعداد و ابعاد تقریبی سلول‌های مش

Table 1 Approximate number and dimensions of mesh cells

	M1	M2	M4	M8	M16
Number of Cells	760000	1520000	3040000	6080000	12160000
Dimensions of Cells	1.57	1.03	0.81	0.64	0.51

ابعاد شبکه در راستای طولی و عمقی و ضریب نسبت ابعاد شبکه در راستاهای مختلف و در مجاور یکدیگر مناسب انتخاب شده باشد. از آنجاکه ابعاد شبکه محاسباتی بر دقت نتایج تأثیرگذار است و از طرفی هزینه محاسباتی نیز در مدل‌سازی عددی بسیار حائز اهمیت می‌باشد، در این تحقیق سعی گردید مقدار بهینه ابعاد و تعداد سلول انتخاب شود تا علاوه بر دقت مناسب نتایج، هزینه محاسباتی نیز قابل قبول گردد. ابعاد سلول‌های انتخابی و تعداد آن‌ها برای ۵ حالت مورد بررسی در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

در ۸ نقطه از مقطع طولی مورد بحث در مدل آزمایشگاهی و در سه مکان چپ، وسط و راست شوت و به ازای پنج حالت مش‌بندی M1 تا M16، عمق آب در نرم‌افزار

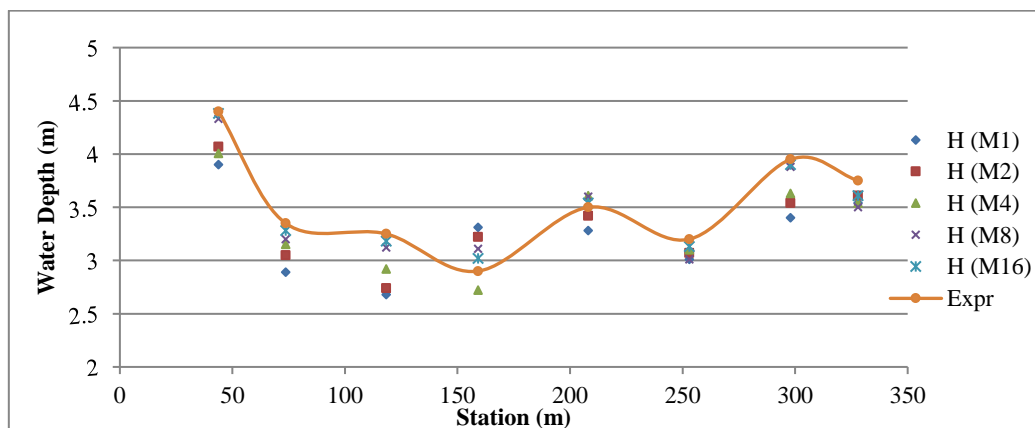


Fig. 4 Flow depth along the left wall of the chute, in the laboratory and numerical model

شکل ۴ عمق جریان در امتداد دیواره سمت چپ شوت در مدل آزمایشگاهی و عددی

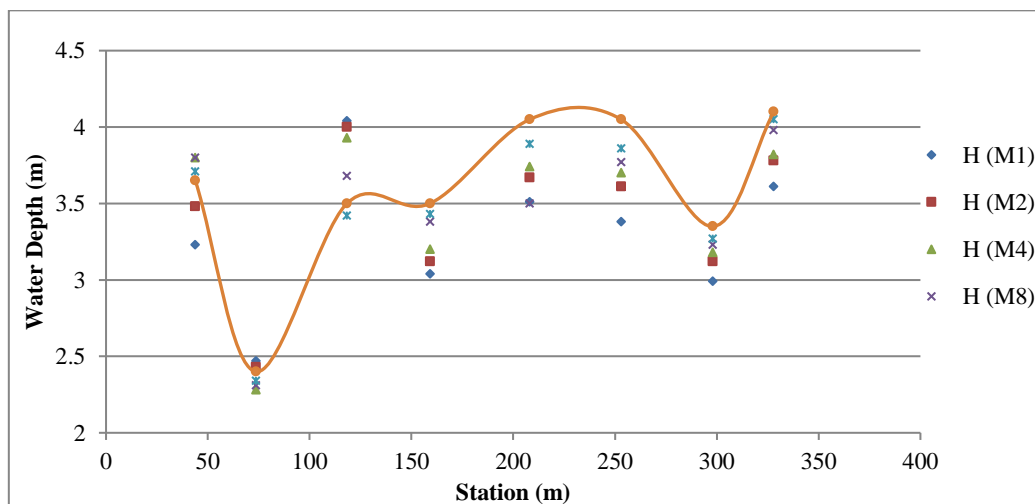


Fig. 5 Flow depth along the middle of the chute, in the laboratory and numerical model

شکل ۵ عمق جریان در امتداد وسط شوت در مدل آزمایشگاهی و عددی

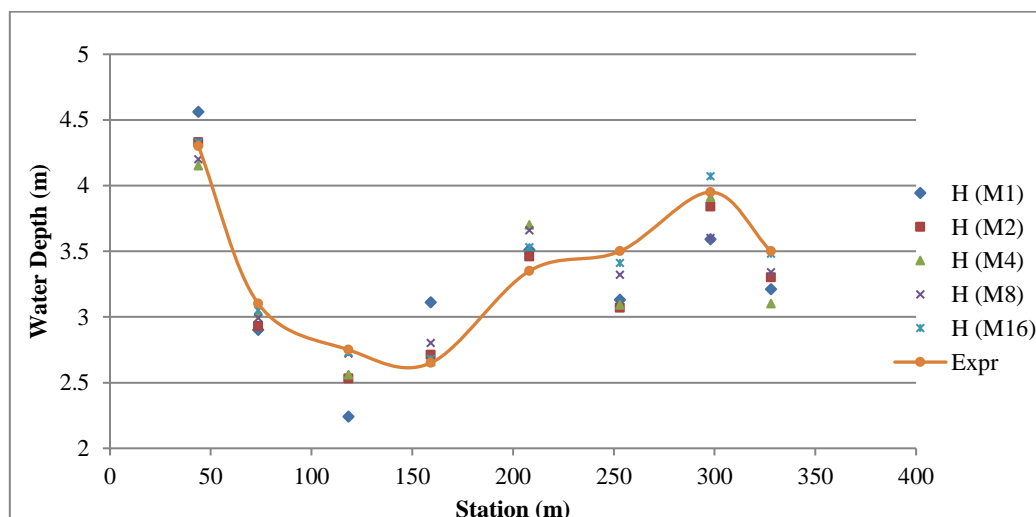


Fig. 6 Flow depth along the right wall of the chute, in the laboratory and numerical model

شکل ۶ عمق جریان در امتداد دیواره سمت راست شوت در مدل آزمایشگاهی و عددی

انجام محاسبات مدل‌سازی به ازای تعداد مش‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار C-7 و D-7 با افزایش تعداد سلول‌های مش از ۶۰۸۰۰۰۰ در (M8) به ۱۲۱۶۰۰۰۰ در (M16) خطای نسبی و ضریب همبستگی به ترتیب به میزان ۳۸ درصد کاهش و ۱.۲ درصد افزایش می‌یابد در حالیکه با توجه به نمودار ۸ زمان انجام محاسبات به میزان ۱۳۴۰ درصد افزایش می‌یابد. در نتیجه با توجه به شکل ۸ به ازای تعداد مش بیشینه (M16) اگرچه خطا نسبت به حالت قبل کاهش می‌یابد ولی زمان محاسبات به مقدار زیادی افزایش یافت. در نتیجه بررسی‌های بعدی با استفاده از ترکیب سلول‌ها (M8) با تعداد مش ۶۰۸۰۰۰ و اندازه مش ۰/۶۴ متر که دارای دقت و هزینه محاسباتی قابل قبول هست انجام شد. در ادامه مبحث صحت سنجی، مدل سرریز سد خیرآباد با تعداد سلول‌های M8 برای دبی‌های ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل حجم بالای نمودارهای پروفیل طولی آب روی شوت سرریز، مقدار خطاها و ضریب همبستگی بصورت خلاصه در جدول ۲ ارائه گردیده است.

نمودارهای ۴، ۵ و ۶ نشان می‌دهند هرچه شبکه‌بندی ریزتر و تعداد سلول‌ها بیشتر باشد نتایج عددی به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر خواهد بود. با توجه به این نمودارها به ازای تعداد سلولی که ۱۶ برابر تعداد سلول‌ها در حالت اولیه بوده و اندازه هر سلول ۰/۵۱ متر است (M16) نتایج حاصل از شبیه‌سازی دقیق‌تر از حالت‌های دیگر می‌باشد. نمودارهای شکل ۷ به ترتیب خطاهای RMSE، MAE، خطای نسبی و ضریب همبستگی برای مقاطع راست، چپ و وسط شوت سرریز را نشان می‌دهد. مطابق نمودار A-7 و B-7 میزان خطای RMSE و MAE در مقاطع چپ، وسط و راست با افزایش تعداد سلول‌های مش، تقریباً از ۰/۴۵ به ۰/۱ کاهش یافته است. در نتیجه هرچه قدر تعداد سلول‌های مش افزایش یابد مقادیر خطاهای RMSE و MAE کم‌تر می‌شود. همچنین مطابق نمودار C-7 نیز میزان خطای نسبی برای حالت M1 تقریباً ۰/۱۱ و برای حالت M16 تقریباً ۰/۰۲ می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش تعداد سلول‌های مش تا ۱۶ برابر حالت اولیه خطا به مقدار ۸۲ درصد کاهش یافته است. نمودار D-7 نشان می‌دهد ضریب همبستگی تقریباً از مقدار ۰/۷ برای حالت M1 به حدود عدد ۱ برای حالت M16 افزایش یافته است. در نتیجه هر قدر تعداد سلول‌های مش زیاد شود میزان همبستگی داده‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزار و داده‌های آزمایشگاهی بیشتر خواهد شد. نمودار ۸ زمان

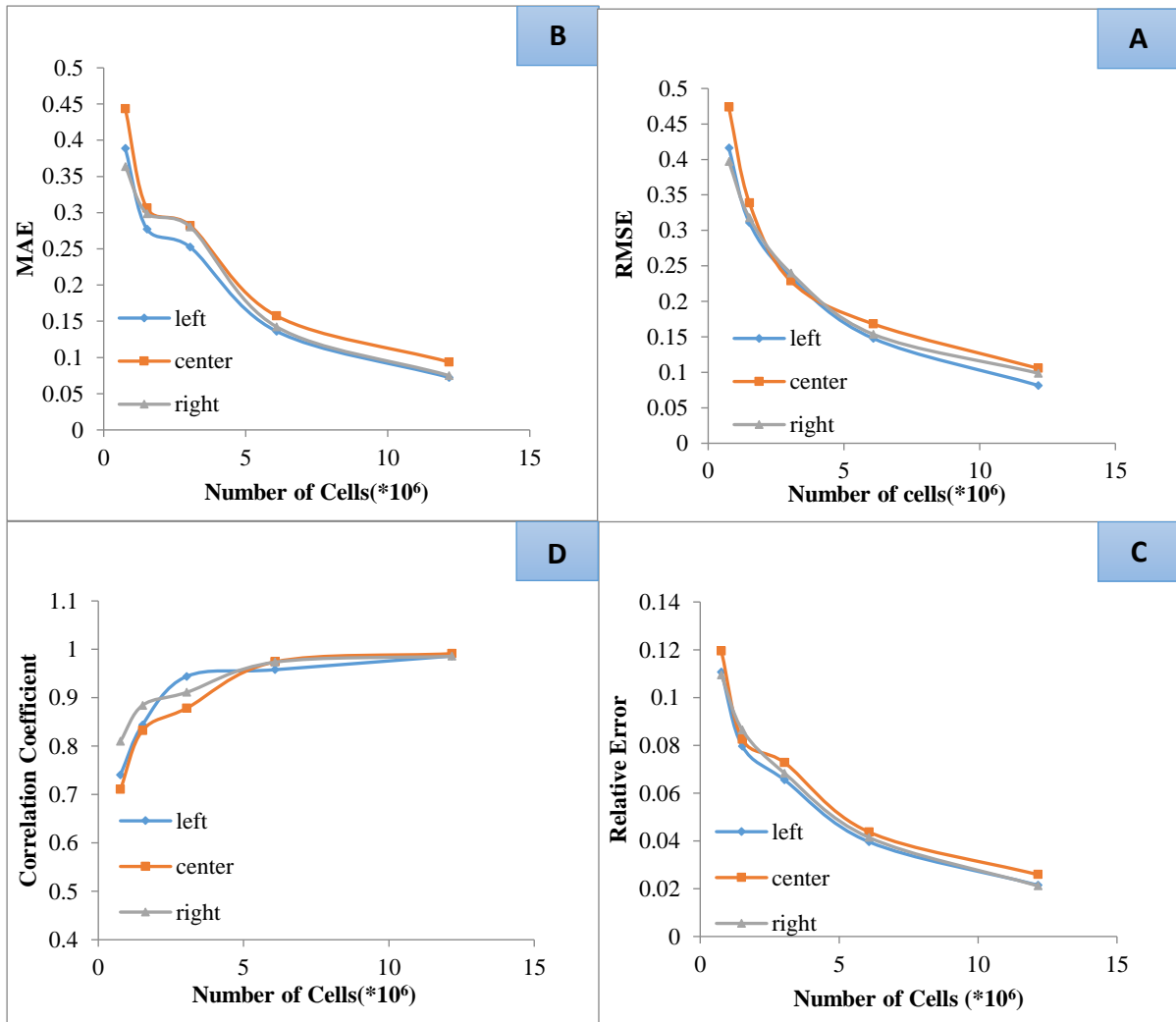


Fig. 7 Calculated errors: A:RMSE, B:MAE, C:Relative error, D:Correlation coefficient

شکل ۷ خطاهای محاسبه‌شده: A: خطای RMSE, B: خطای MAE, C: خطای نسبی، D: ضریب همبستگی

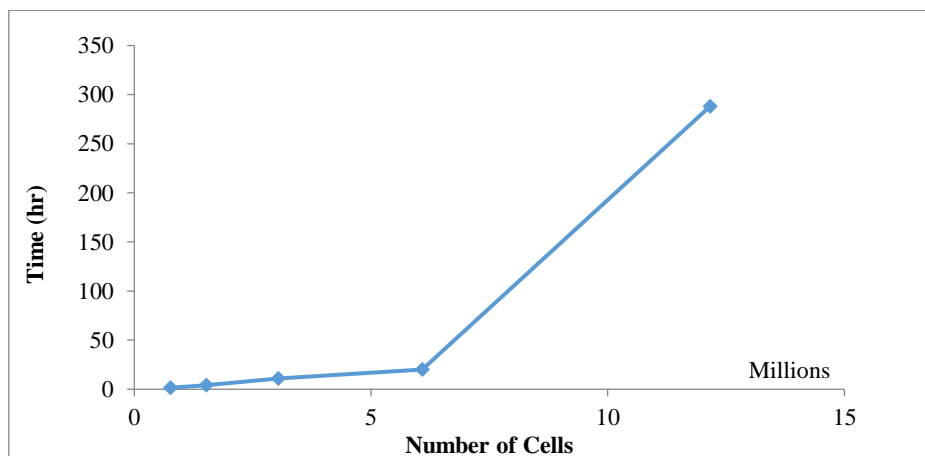


Fig. 8 Calculation times of the numerical models with different cells number

شکل ۸ زمان انجام محاسبات بر اساس تعداد سلول مش

جدول ۲ مقدار خطاها و ضریب همبستگی به ازای دبی‌های ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه

Table 2 Error value and correlation coefficient for 7000 and 9000 m³/s flow discharges

Discharge (m ³ /s)	7000	9000	7000	9000	7000	9000
Error	Right		Center		Left	
MAE	0.14	0.15	0.15	0.14	0.13	0.15
RMSE	0.15	0.17	0.16	0.15	0.14	0.17
Relative Error	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05
Correlation Coefficient	0.97	0.96	0.97	0.97	0.98	0.96

خروجی‌های شبیه‌سازی استخراج و موردبررسی قرار گرفت. شکل ۹ شکل‌گیری امواج اول، دوم و سوم روی شوت سرریز سد خیرآباد را در فضای نرم‌افزار نمایش می‌دهد.

۳-۲- بررسی شکل‌گیری امواج اول، دوم و سوم با

توجه به زاویه همگرایی و تغییرات دبی

با توجه به توضیحات ارائه شده پروفیل طولی جریان برای ۳ دبی ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و ۴ زاویه همگرایی دیواره‌های شوت ۰، ۳، ۵ و ۷ درجه از

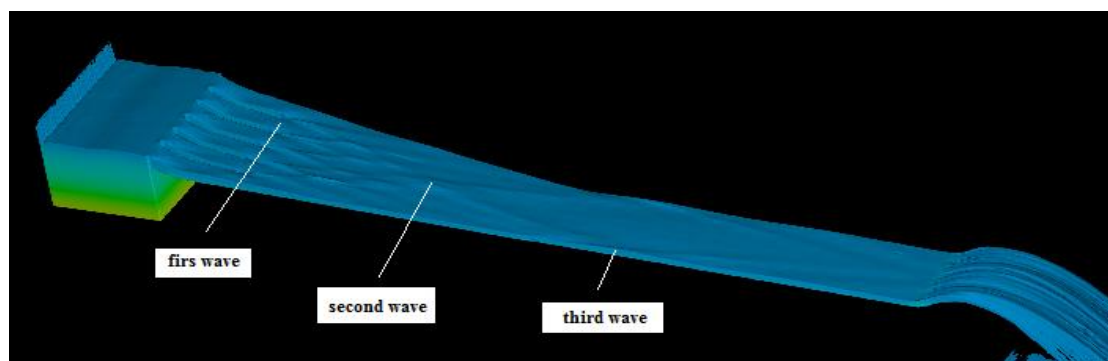


Fig. 9 The simulated first, second and third waves in the spillway

شکل ۹ امواج اول، دوم و سوم شکل‌گرفته در شبیه‌سازی جریان روی سرریز

دنبال آن ارتفاع این امواج نیز افزایش می‌یابد. بیشینه ارتفاع موج اول برای تمامی زوایای همگرایی و دبی‌ها در جدول شماره ۳ ارائه شده است. مطابق با جدول زیر برای دبی ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه موج اول از ۰ تا ۷ درجه تقریباً ۵ درصد و برای دبی ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه حدوداً ۲۱ درصد و برای دبی ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه ۱۴ درصد افزایش عمق داشته است. بنابراین می‌توان گفت، همگرایی سرریز روی موج اول تأثیر محسوسی نخواهد داشت و با افزایش زاویه انقباض ارتفاع موج اول به مقدار کمی روند افزایشی می‌یابد زیرا شروع انقباض شوت فاصله کمی تا محل تشکیل موج اول که در انتهای پایه می‌باشد دارد.

در ادامه به تأثیر تغییرات دبی و زوایای همگرایی بر روی هر یک از امواج اول، دوم و سوم به صورت جداگانه پرداخته شده است.

۳-۲-۱- بررسی موج اول

نمودارهای شکل A-۱۰، B-۱۰ و C-۱۰ پروفیل طولی جریان آب روی شوت و شکل‌گیری موج اول را برای پایه اول سمت راست سرریز به ازای زوایای همگرایی ۰، ۳، ۵ و ۷ درجه و دبی‌های ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهد. مطابق نمودارهای شکل ۱۰ برای دبی‌های ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه عمق موج اول با افزایش دبی افزایش می‌یابد. بدیهی است که با افزایش دبی ورودی به سرریز عمق آب افزایش یافته و به

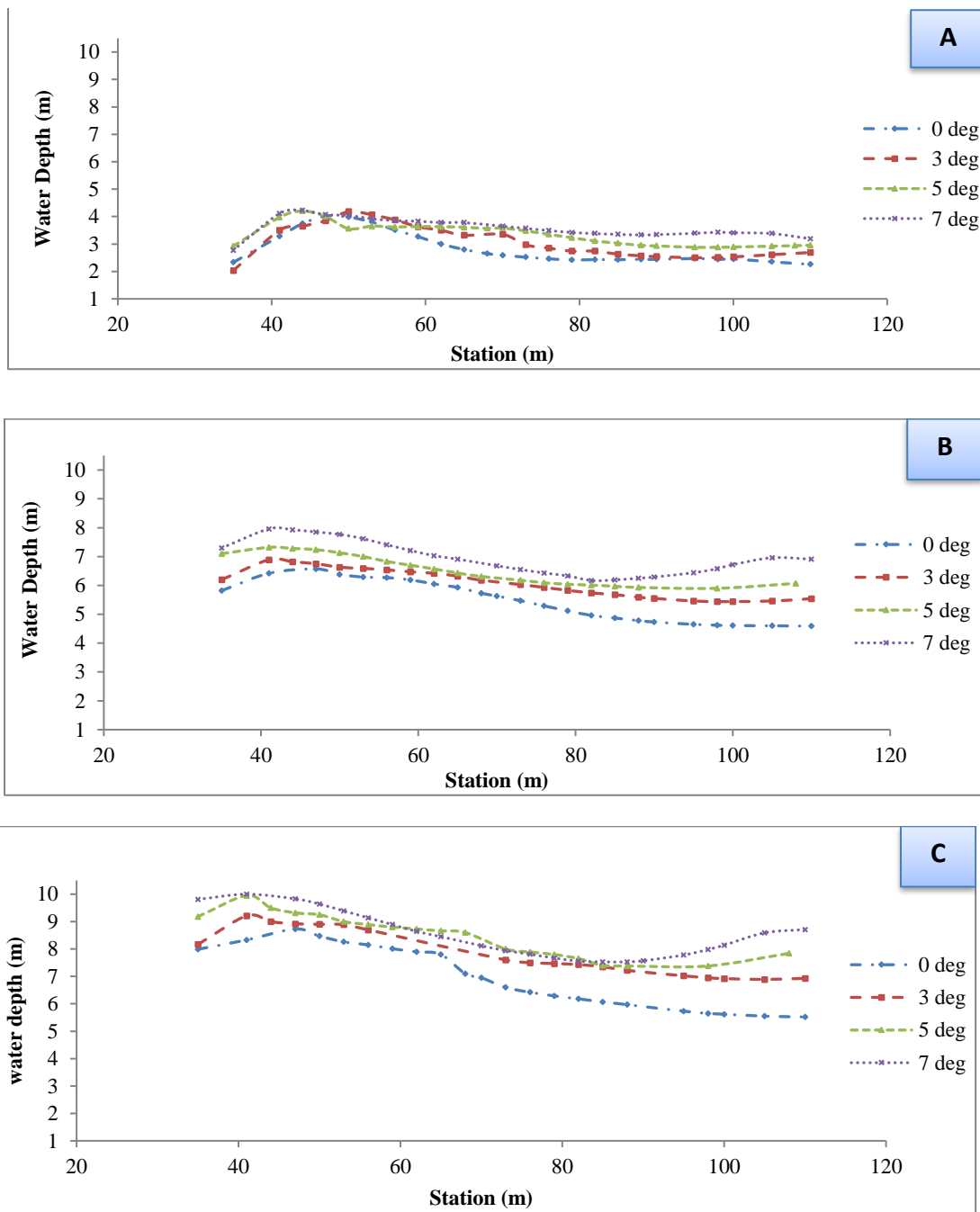


Fig. 10 Longitudinal profile of flow over the chute, along the first pier, A: 3000 m³/s, B:7000 m³/s, C:9000 m³/s
 شکل ۱۰ پروفیل طولی جریان روی شوت سرریز در راستای پایه اول، A: ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، B: ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، C: ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه

جدول ۳ بیشینه ارتفاع موج اول برای زوایای همگرایی و دبی‌های مختلف (متر)

Table 3 Maximum depth of the first wave for different convergence angles and different discharges (m)

convergence angle	0 deg	3 deg	5 deg	7 deg
Discharge (m ³ /s)				
3000	4.05	4.18	4.22	4.25
7000	6.57	6.95	7.32	7.97
9000	8.73	8.44	10	10.03

۳-۲-۲- بررسی موج دوم

ورودی ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهد.

نمودارهای شکل ۱۱-A، ۱۱-B و ۱۱-C پروفیل طولی جریان آب روی شوت و شکل‌گیری موج دوم را به ازای زوایای همگرایی ۰، ۳، ۵ و ۷ درجه و برای دبی‌های

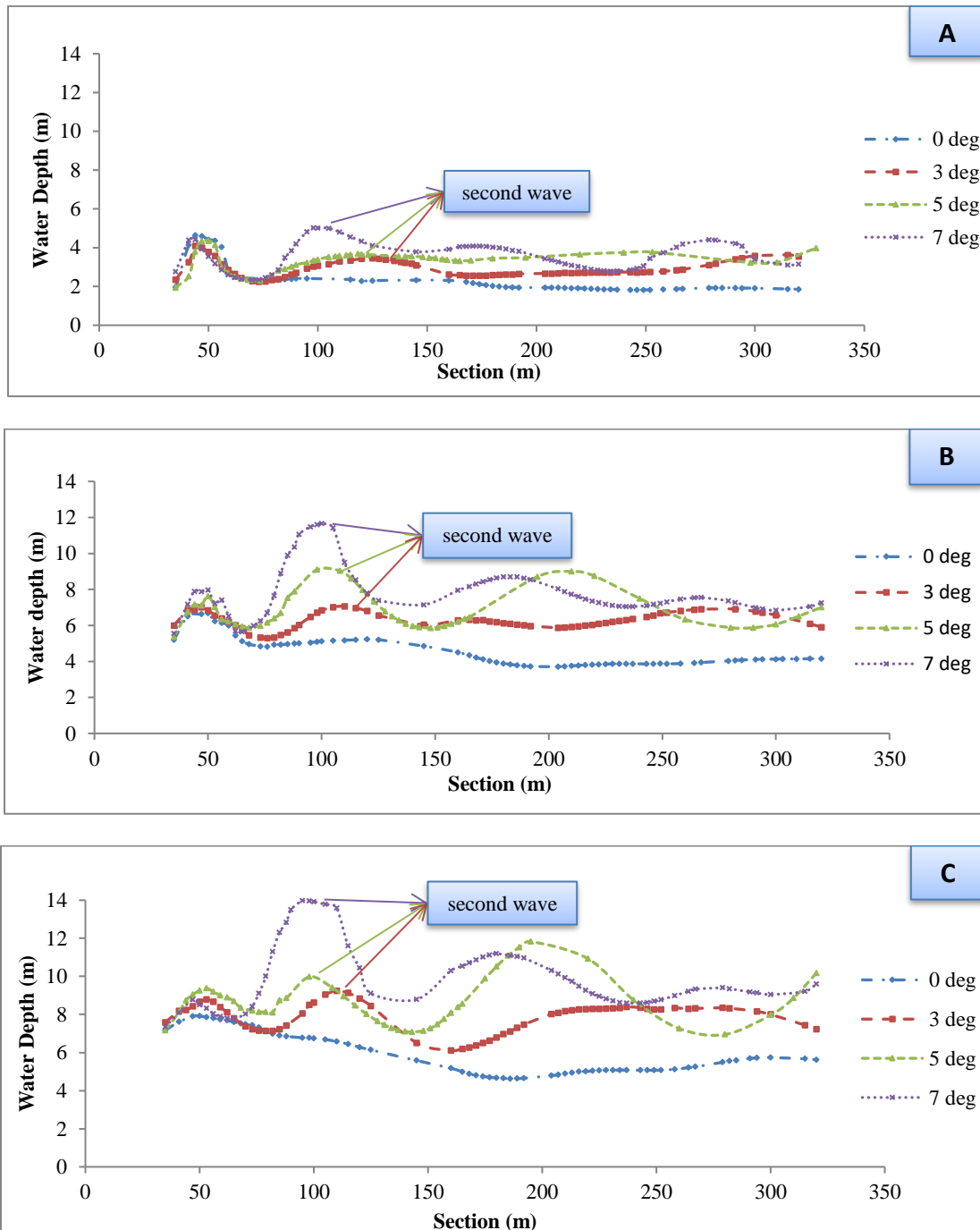


Fig. 11 Longitudinal profile of flow over the chute, along the middle axis, A: 3000 m³/s, B: 7000 m³/s, C: 9000 m³/s
 شکل ۱۱ پروفیل طولی جریان در طول شوت سرریز در محور میانی سرریز برای دبی A: ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، B: ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، C: ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه

۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه به مقدار ۵۲ درصد افزایش یافته است. همچنین ارتفاع امواج تشکیل شده برای مدل با زاویه همگرایی ۷ درجه به مقدار قابل ملاحظه‌ای از مدل با زاویه همگرایی ۳ و ۵ درجه بیشتر است بنابراین با افزایش زاویه همگرایی ارتفاع امواج افزایش می‌یابد. همچنین همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است با افزایش انقباض شوت، بیشینه ارتفاع موج به سمت بالادست شوت حرکت خواهد کرد. به عبارت دیگر با افزایش زاویه همگرایی شوت محل تشکیل موج دوم در طول شوت در فاصله نزدیک‌تری نسبت به تاج سرریز و با عمق بیش‌تری خواهد بود.

همانگونه که پیشتر ذکر گردید یکی از دلایل تشکیل موج عرضی همگرایی دیواره‌های سرریز می‌باشد. از اینرو برای سرریزی که زاویه همگرایی آن صفر درجه است موج دوم تشکیل نخواهد شد. مطابق با نمودارهای فوق‌الذکر افزایش دبی باعث افزایش ارتفاع موج دوم نیز در طول سرریز می‌گردد. در جدول شماره ۳ بیشینه ارتفاع موج دوم و فاصله محل تشکیل آن تا ابتدای پایه ارائه شده است. مطابق با داده‌های موجود در جدول زیر برای دبی ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه عمق موج دوم از زاویه همگرایی ۳ تا زاویه ۷ درجه به مقدار ۴۴ درصد و برای دبی ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه به میزان ۶۲ درصد و در برای دبی

جدول ۴ بیشینه ارتفاع و فاصله محل تشکیل موج دوم با ابتدای پایه برای زوایای همگرایی و دبی‌های مختلف (متر)

Table 4 Maximum depth and the location of the second wave for different convergence angles and discharges (m)

Convergence angle	3 deg	5 deg	7 deg
Discharge (m ³ /s)			
3000	125 , 3.47	118 , 3.68	98 , 5.03
7000	110 , 7.07	100 , 9.1	98 , 11.5
9000	110 , 9.2	98 , 9.98	95 , 13.98

۳-۲-۳- بررسی موج سوم

می‌گردد با افزایش زاویه همگرایی شوت ارتفاع موج دوم و به تبع آن ارتفاع موج سوم که پس از موج دوم در کناره دیواره‌های شوت تشکیل می‌شود نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به جدول زیر همانند موج دوم با افزایش زاویه همگرایی شوت محل تشکیل موج سوم نیز به سمت بالادست حرکت می‌کند و در محلی نزدیک‌تر به محور سرریز تشکیل خواهد شد.

مقادیر ارتفاع موج سوم به ازای ۴ زاویه همگرایی و ۳ دبی متفاوت همچنین عمق متوسط آب در مقطع تشکیل بیشینه ارتفاع موج در جدول شماره ۶ ارائه شده است که H_{max} بیشینه ارتفاع موج سوم و H_{avr} عمق متوسط آب در همان نقطه می‌باشد. در جدول زیر ملاحظه می‌شود ارتفاع موج سوم برای دبی ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه به ازای زاویه ۳ درجه به ترتیب به ۱/۹۱، ۱/۷۲ و ۱/۳۸ برابر عمق متوسط جریان در همان مقطع امواج و برای زاویه همگرایی ۵ درجه به ترتیب ۲/۰۱، ۱/۸۵ و ۱/۶۹

نمودارهای شکل ۱۲-A، ۱۲-B و ۱۲-C پروفیل طولی جریان آب روی شوت و شکل‌گیری موج سوم که در امتداد دیواره سمت راست سرریز تشکیل می‌شوند را به ازای زوایای همگرایی ۰، ۳، ۵ و ۷ درجه و برای دبی ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به دست آمده در مدل سرریز با زاویه همگرایی صفر درجه موج سوم تشکیل نمی‌شود در نمودارهای شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود با افزایش دبی ارتفاع موج سوم نیز در طول سرریز افزایش می‌یابد. در جدول شماره ۵ بیشینه ارتفاع موج سوم و فاصله محل تشکیل آن تا ابتدای پایه ارائه شده است. مطابق با داده‌های موجود در جدول زیر برای دبی ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه عمق موج سوم از زاویه همگرایی ۳ تا زاویه ۷ درجه به مقدار ۳۸ درصد، برای دبی ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه به میزان ۳۲ درصد و همچنین برای دبی ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه ۲۹ درصد افزایش یافته است. بنابراین مشاهده

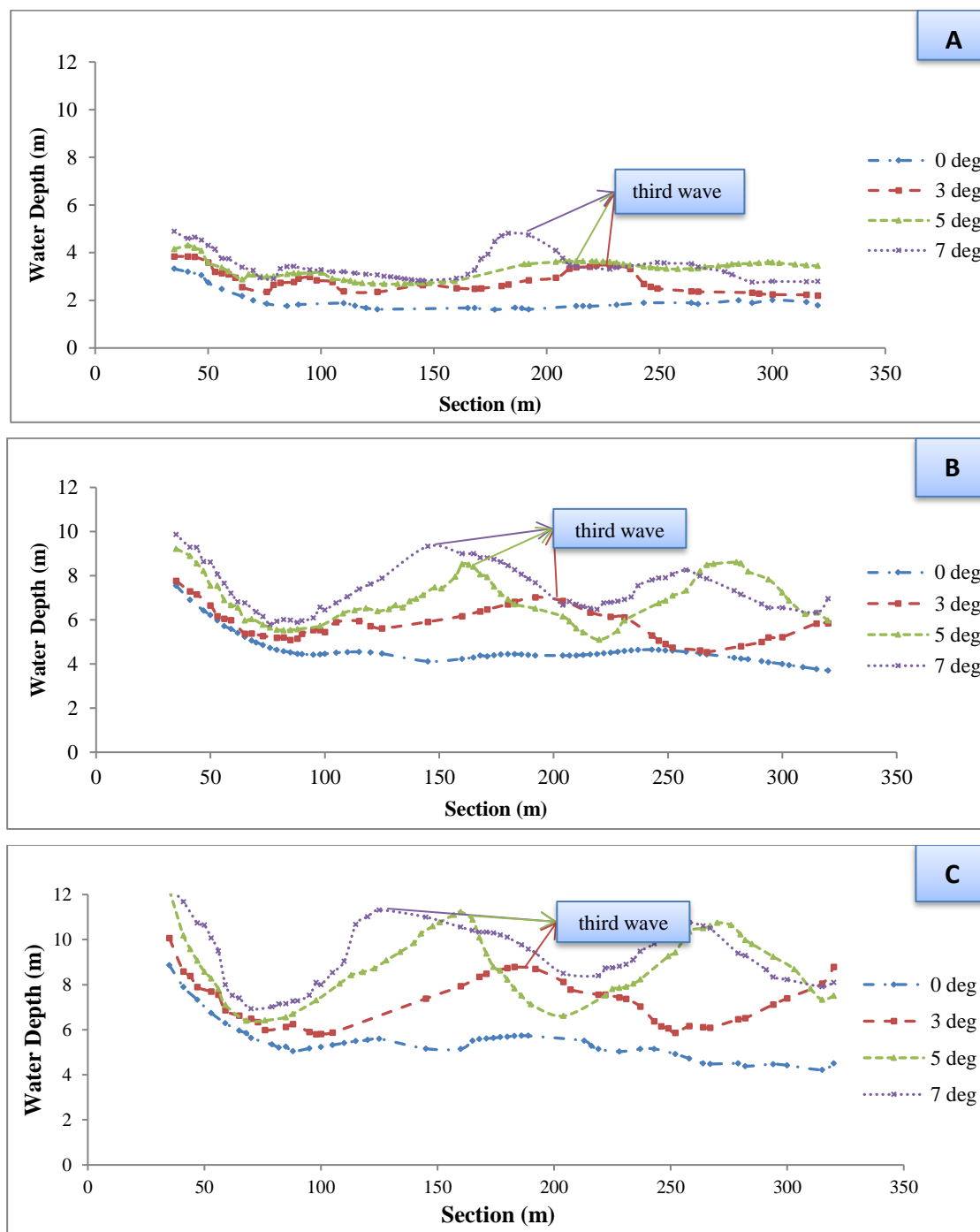


Fig. 12 Longitudinal profile of the flow over the chute, along the right wall, A: 3000 m³/s, B:7000 m³/s, C:9000 m³/s
 شکل ۱۲ پروفیل طولی روی شوت سرریز سمت راست سرریز برای دبی A: ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، B: ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، C: ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه

جدول ۵ بیشینه ارتفاع و فاصله محل تشکیل موج سوم با ابتدای پایه برای زوایای همگرایی و دبی‌های مختلف (متر)

Table 5 Maximum depth and the location of the third wave for different convergence angles and discharges (m)

Convergence angle	3 deg	5 deg	7 deg
Discharge (m ³ /s)			
3000	228 , 3.48	208 , 3.66	183 , 4.81
7000	192 , 7.03	160 , 8.5	145 , 9.33
9000	183 , 8.78	160 , 11.1	125 , 11.4

جدول ۶ مقادیر بیشینه ارتفاع موج سوم و عمق متوسط به ازای دبی و زوایای همگرایی متفاوت

Table 6 Maximum depth of the third wave and the mean depth of the flow for different convergence angles and discharges

	3 deg		5 deg		7 deg	
Discharge 3000 m ³ /s	H _{max} =3.48	H _{avr} =1.82	H _{max} =3.64	H _{avr} =1.82	H _{max} =4.81	H _{avr} =2.19
Discharge 7000 m ³ /s	H _{max} =7.03	H _{avr} =4.07	H _{max} =8.5	H _{avr} =4.58	H _{max} =9.33	H _{avr} =4.76
Discharge 9000 m ³ /s	H _{max} =8.78	H _{avr} =6.35	H _{max} =11.22	H _{avr} =6.62	H _{max} =11.31	H _{avr} =6.23

بیشتر بوده و می‌بایست مدنظر قرار گیرد. همچنین نمودار زیر نشان می‌دهد نسبت ارتفاع بیشینه موج سوم با عمق متوسط در همان نقطه با افزایش دبی کاهش یافته است و در تمام زوایای همگرایی ارتفاع بیشینه موج برای دبی ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه دارای کمترین اختلاف با عمق متوسط خود در آن نقطه می‌باشد. بنابراین نتایج نمودار نشان می‌دهد اگرچه افزایش دبی باعث بیشتر شدن ارتفاع موج خواهد شد اما اختلاف آن با عمق متوسط آب روی سرریز کمتر می‌شود. این بدان معناست افزایش دبی تأثیر کمتری روی افزایش ارتفاع امواج عرضی دارد و نسبت به عمق متوسط موج کوتاه‌تری را روی دیواره‌ها تولید می‌کند. هرچند در بررسی‌های مربوط به نتایج با زاویه همگرایی و دبی حداکثر، ارتفاع موج ایجاد شده اختلاف قابل‌ملاحظه حدود هشتاد درصدی با عمق متوسط روی سرریز دارد.

برابر عمق متوسط جریان در همان مقطع امواج و همچنین برای زاویه ۷ درجه به ترتیب ۲/۱۹، ۱/۹۶ و ۱/۸۲ برابر عمق متوسط جریان در همان مقطع امواج می‌رسد. در نتیجه اختلاف بیشینه ارتفاع موج سوم با عمق متوسط آب در همان نقطه برای دبی ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه بیشتر می‌باشد و برای دبی ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه این اختلاف کاهش یافته است.

نمودار ۱۳ نسبت ارتفاع بیشینه موج سوم با عمق متوسط در همان نقطه برای ۴ زاویه همگرایی ۰، ۳، ۵ و ۷ درجه به ازای ۳ دبی ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، ارتفاع موج سوم که در کناره‌ی دیواره تشکیل می‌شود در برخی مواقع می‌تواند به بیش از دو برابر عمق متوسط آب در همان نقطه برسد که لازم است این امر در طراحی‌های مربوط به دیواره‌های شوت مدنظر قرار گیرد این اختلاف بین ارتفاع موج سوم و عمق متوسط در زوایای جمع شدگی بالاتر

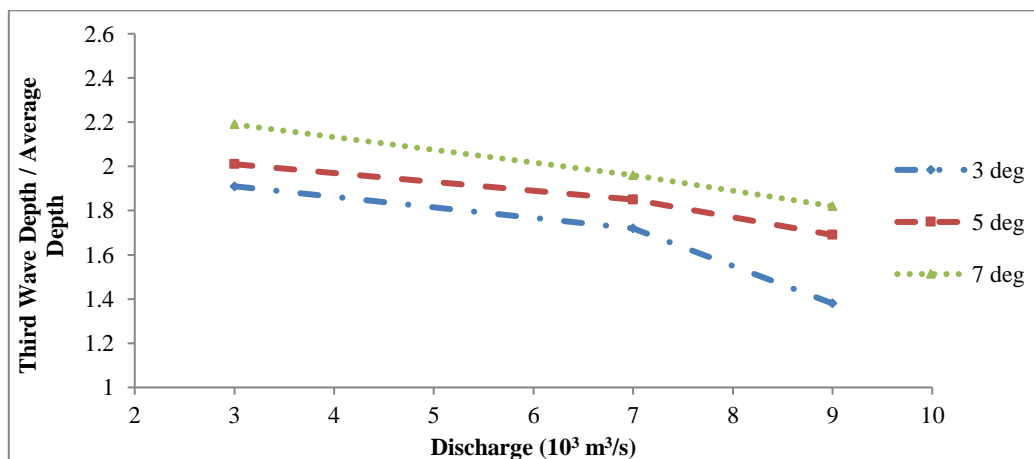


Fig. 13 The ratio of the maximum depth of the third wave to the average flow depth of the same station

شکل ۱۳ تغییرات نسبت بیشینه ارتفاع موج سوم با عمق متوسط آب در همان نقطه با دبی جریان

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق شبیه سازی سه بعدی جریان روی شوت سیستم تخلیه سیلاب به منظور بررسی امواج عرضی و شکل گیری امواج سه گانه انجام گردید. با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی سد خیرآباد شبیه سازی عددی مورد ارزیابی و صحت سنجی قرار گرفت. برای دستیابی به یک ابعاد مش بندی بهینه که دقت و هزینه محاسباتی قابل قبول را دارا باشد، ۵ حالت مختلف اندازه و تعداد سلول های شبیه سازی در نظر گرفته شد و نهایتاً حالت بهینه اندازه و تعداد سلولها در شبیه سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده از شبیه سازیهای انجام شده در این تحقیق را می توان به دو دسته نتایج عددی و همچنین نتایج حاصل از تحلیل و تفسیر نتایج عددی دسته بندی نمود. بخش عمده ای از نتایج عددی حاصل در بخش ۳ مقاله ارائه شده است و برای پرهیز از تکرار مباحث، در این بخش مجدداً ذکر نمی گردد. این نتایج عددی نشان می دهد، با افزایش دبی و زاویه همگرایی ارتفاع آب شوت زیاد می شود و در پی آن ارتفاع امواج عرضی تشکیل شده نیز افزایش می یابد اما نسبت این افزایش نسبت به عمق متوسط در دبی های مختلف متفاوت می باشد. به عنوان نمونه ارتفاع امواج سوم برای دبی ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه از زاویه همگرایی ۳ تا ۷ درجه بین ۱.۹ تا ۲.۲ عمق متوسط جریان در همان مقطع امواج تغییر می کند در حالیکه با افزایش دبی به ۹۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه این نسبت از ۱/۴ به ۱/۸ می رسد. تحلیل نتایج عددی نشان می دهد جمع شدگی شوت اگرچه باعث افزایش عمق متوسط جریان می شود ولی با افزایش زاویه همگرایی اختلاف ارتفاع موج حاصل و عمق متوسط افزایش می یابد و با توجه به نتایج بدست آمده این اختلاف ارتفاع در برخی مواقع در موج سوم به بیش از دو برابر می رسد. بنابراین می بایست این امر در طراحی دیواره ها مورد توجه قرار گیرد. همچنین نتایج نشان می دهد، با افزایش دبی ورودی به سرریز اگرچه ارتفاع امواج اول، دوم و سوم افزایش می یابد اما اختلاف بیشینه موج سوم با عمق متوسط مربوط به همان دبی در نقطه

محل تشکیل آن کمتر خواهد شد. به عبارت دیگر می توان گفت اگرچه با افزایش دبی عبوری از شوت نسبت اختلاف ارتفاع موج سوم و عمق متوسط کاهش می یابد ولی این اختلاف برای دبی های بالا همچنان معنادار می باشد و می بایست توسط طراحان مورد توجه قرار گیرد. همچنین تحلیل نتایج بدست آمده نشان داد با افزایش زاویه همگرایی علاوه بر افزایش ارتفاع امواج، محل پیک امواج دوم و سوم به سمت ایستگاه های بالادستی سرریز منتقل می شود و در فاصله نزدیک تری نسبت به تاج سرریز شکل می گیرند.

۵- سپاسگزاری

این پژوهش در قالب پایان نامه دانشجویی و با حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و با اعتبار پژوهشی شماره BNUT/392034/97 انجام پذیرفته است.

۶- فهرست نشانه ها

A_x	نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت x
A_y	نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت y
A_z	نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت z
K	تعداد داده ها
R	مشخصه مربوط به نوع سیستم مختصات
t	زمان
u	مولفه سرعت در جهت محور مختصات X
v_F	نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان در جهت X
v	مولفه سرعت در جهت محور مختصات Y
w	مولفه سرعت در جهت محور مختصات Z
X_K, Y_{act}	مقادیر داده های بدست آمده در نرم افزار
Y_K, Y_{est}	مقادیر داده های بدست آمده از آزمایشگاه
\bar{Y}_{act}	میانگین مقدار نرم افزاری
\bar{Y}_{est}	میانگین مقدار نرم افزاری

Pagliara, S., Kurdistani, S. M. and Palermo, M. (2012). Effects of vertical deflectors on rooster tail geometry. In 2nd IAHR European Congress. Technische Universität München- Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt.

Pagliara, S., Kurdistani, S. M. and Roshni, T. (2011). Rooster tail wave hydraulics of chutes. Journal of Hydraulic Engineering, 137(9), 1085-1088.

Rajaratnam, N. (1990). Skimming flow in stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering. 116(4), 587-591.

Reinauer, R. and Hager, W. H. (1997). Pier waves in sloping chutes. Int. J. Hydropower Dams. 4(3), 100-103.

Reinauer, R. and Hager, W. H. (1994). Supercritical flow behind chute piers. Journal of Hydraulic Engineering. 120(11), 1292-1308.

Sheng, C., Jian, Z., Ming, H. and Hazrati, A. (2013). Experimental study on water-wing characteristics induced by piers in flood drainage culverts. Scientia Iranica Transaction A, Civil Engineering, 20(5), 1320.

Wu, J. H., Cai, C. G., Ji, W., Ruan, S. P. and Luo, C. (2005). Experimental study on cavitation and water-wing for middle-piers of discharge tunnels. Journal of Hydrodynamics, Series B, 17(4), 429-437.

Wu, J. H. and Yan, Z. M. (2008). Hydraulic characteristics of bottom underlay-type pier for water-wing control. Journal of Hydrodynamics, 20(6), 735-740.

Xue, H., Diao, M., Ma, Q. and Sun, H. (2018). Hydraulic Characteristics and Reduction Measure for Rooster Tails Behin Spillway Piers Arabian Journal of Science and Engineering, 1-8.

ξ مشخصه مربوط به نوع سیستم مختصات

ρ دانسیته سیال

۷- منابع

Chai, T. and Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)-Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific model development, 7(3), 1247-1250.

Doctors, L. J. and University of New South Wales. (2007). A numerical study of the resistance of transom-stern monohulls. Ship Technology Research. 54(3), 134-144.

Flow3D, Help, Ver. 11.0.4, Flow Science Inc.

Ghadimi, P., Dashtimanesh, A., Zamanian, R., Feizi Chekab, M.A. and Mirhosseini, S.H.R. (2015). Rooster tail depression by originating a modified transom stern form using a Reynolds averaged Navier Stokes solver. Sc. Iran.Trans. B Mech. Eng 22.3 765-777.

Iran Water Research Institute. (2012). The final report of Khairabad dam hydraulic tests, Iran Ministry of Energy. (in Persian)

Kavianpour, M., Mousavi mehr, S., Mokhtarpour, A., Roshan, R. (2013). Investigating the pier Effect on rooster tail Structure Profiles on gated chute spillway. Seventh National Congress on Civil Engineering. (in Persian)

Maki, K. J., Doctors, L. J., Beck, R. F., & Troesch, A. W. (2006). Transom-stern flow for high-speed craft. Australian Journal of Mechanical Engineering, 3(2), 191-199.

Mousavi Mehr, M., Kavianpour, M., Mokhtarpour, A. (2014). Investigation of the waves caused by the pier on the gated spillway. journal of Hydraulic. 8(2), 1-18. (in Persian)