

Experimental Study of the Effect of Bed Roughness on Wave Characteristics Resulting from Dam Break in Curve Channel


Razieh Kavand ¹, Mehdi Ghomeshi ^{2*}, Mehdi Daryaei ³

1 -MSc Student, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2-Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*ghomeshi@scu.ac.ir

Received: 15 January 2020, Accepted: 3 March 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Considering the comparison between the number of the constructed dams around the globe and the number of dam failures, the estimated probability of failure in each dam is 10-4 dams per year. Although this probability seems low, the experiences of these accidents through the history indicate that it is irrational and unreasonable to overlook the importance of this issue. Despite the extremely high accuracy of calculations and studies conducted for the construction of reservoir dams as well as the comprehensive, complete, and highly accurate research, the probability of dam failure and the need for preparedness for crisis management and floods caused by dam failures cannot be overlooked due to some limitations such as the lack of accurate statistics on the hydrology and flood characteristics on dam construction sites, the complicated geological problems and issues, foundation construction and full waterproofing challenges, flaws in dam construction, and unpredicted problems in the construction or the operation phase. The construction of most reservoir dams in meanders and rocky river beds explains the rationale for this research, which was carried out in a flume with a tangent path.

Methodology: The experiments were conducted at a flume located at the physical modelling laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz. The rectangular flume used in this research consisted of three 90-degree bends including a severe, moderate and a mild bends. A gate was installed at the entrance of the bend to play a role of dam in the flume. The gate installed divided the flume into an upstream section (the dam reservoir) and a downstream section (the downstream river). A pneumatic jack was installed on the gate. The jack suddenly acted and sent a wave to the flume downstream by using a pressure compressor, thereby simulating the wave caused by the dam failure. The experiments in this study were conducted in the moderate-angle bend in this flume. The wave speed and the wave front height of the wave originating from the dam failure were calculated with high accuracy using a fast-switching camera.

Results and Discussion: In the case of dry downstream bed, there was no opportunity for the formation of the wave body after it flowed from the gate due to the considerable depth height difference between the upstream and downstream sections and the enormous energy; so, the

wave was broke at the beginning before it entered to the curved path. The wave continued traveling without showing any fungal shape. Moreover, the wave height at the bend inlet was at its peak and it continued towards the end of the flume with a considerably decreasing the slope. In the case when the upstream water depth was 25 cm and the downstream bed was dry and smooth, the wave speed difference from the angle of 0 to the angle of 45 degrees and the angle of 45 to the angle of 90 degrees showed 30% increase and 7% decrease as compared to the velocity of the beginning of the bend, respectively. This trend showed 29% increase and 11% decrease in the case of the 10-mm bed roughness height. It also showed 25% increase and 5% decrease with the 16-mm bed roughness and 13% increase and 4% decrease with the 20-mm bed roughness height as compared to the beginning of the bend. The aforesaid trend decreased with an increase in the upstream height because the volume of water released from the reservoir increased, and the wave was less contact the bed of the flume.

Moreover, the wave height at the bend inlet was at its peak and it continued moving towards the end of the channel with a considerably decreasing slope. In the case of water upstream height of 45 cm, when the downstream bed was dry smooth, the wave speed difference from the angle of 0 to 45 degrees and the angle of 45 to 90 degrees showed 23% and 15% decrease as compared to the beginning of the bend, respectively. This trend showed a 21% and a 23% decrease in the case of 10-mm roughness height. It also showed 23% and 13% decrease with the 16-mm roughness height, and a 23% and an 8% decrease with the 20-mm roughness height as compared to the beginning of the bend.

Conclusions: Since the speed increased at the apex of the bend, the speed was higher at the distances following the apex as compared to a direct channel, and the construction of pumping stations or water intakes in the second half of the meander it is recommended to take protective methods to control and reduce the losses caused by dam failure.

Keywords: Dimensional analysis, Flood routing, 90-degree bend, Wave velocity, Wave height.

ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر زبری کف بر ویژگی‌های سیلاب موج ناشی از شکست سد در مسیرهای نامستقیم

راضیه کاوند^۱، مهدی قمشی^{۲*}، مهدی دریایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*ghomeshi@scu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳  وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: اغلب سدهای مخزنی روی رودخانه‌های کوهستانی ساخته می‌شود؛ لذا ارزیابی تاثیر قوس و زبری بستر روی ویژگی‌های موج سیلاب ناشی از شکست سد ضرورت می‌یابد. بدین منظور آزمایش‌هایی در فلومی با قوس ۹۰ درجه در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده علوم و مهندسی آب واقع در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. سرعت موج در زاویه ۴۵ درجه قوس بیشینه است. همچنین با کارگذاری زبری در طول قوس سرعت کاهش پیدا می‌کند. به طوری که در ارتفاع آب بالا دست ۳۵ سانتی‌متر سرعت موج در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس در بستر صاف ۲۵ و ۱۸ درصد افزایش و در بستر با زبری ۱۶ میلی‌متر ۱۸ و ۸ درصد افزایش می‌یابد. ارتفاع موج در طول قوس به علت افت انرژی جریان کاهش می‌یابد. کارگذاری زبری باعث افزایش ارتفاع موج می‌شود. در آزمایش‌های با بستر صاف ارتفاع موج در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس ۱۹ و ۳۸ درصد کاهش داشته است. درحالی‌که در آزمایش‌ها با میانگین اندازه زبری ۲۰ میلی‌متر، ارتفاع موج در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس ۳۳ و ۴۴ درصد کاهش داشته است.

کلید واژگان: آنالیز ابعادی، روندیابی سیل، قوس ۹۰ درجه، سرعت موج، ارتفاع موج.

و افزایش ارتفاع دارند. چنین شرایطی موجب ایجاد یک حالت نامتقارن در نیم‌رخ موج می‌شود. ایجاد عدم تقارن بر

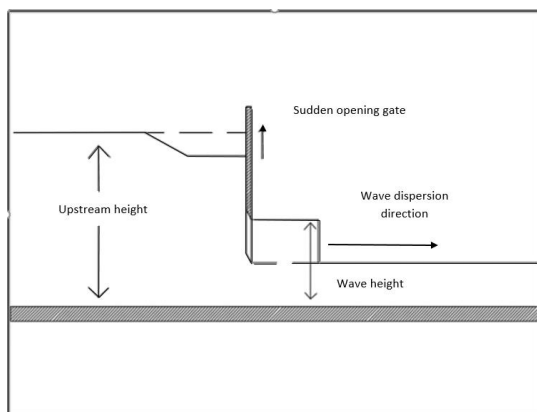


Fig.1 Surface profile due to sudden opening gate.

شکل ۱ نیم‌رخ سطح آب در نتیجه باز شدن ناگهانی دریچه در آبراهه.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در ارتباط با سدها، مسئله شکست می‌باشد. با توجه به اینکه این مسئله می‌تواند آسیب‌های زیادی را در پایین دست به همراه داشته باشد بنابراین آگاهی از ویژگی‌های موج سیلاب ناشی از شکست سد در پایین دست آن دارای اهمیت زیادی است. هرگونه خرابی جزئی یا کلی در بدنه یک سد که منجر به رهاسازی حجم غیرقابل مدیریت و مهاری از آب در زمان کوتاه شود شکست سد نامیده می‌شود (Khouband Kashefipour, 2012).

شکل ۱ نیم‌رخ (پروفیل) سطح آب در نتیجه باز شدن ناگهانی دریچه در آبراهه (کانال) را نشان می‌دهد. پس از شکست سد موج‌هایی که به تدریج از ناحیه آب عمیق به سوی آب کم عمق پیشروی می‌کنند، کاهش طول

دریافتند که مدل عددی ارائه شده توسط آنان با دقت زیاد توان پیش‌بینی سرعت سیلاب ناشی از شکست سدها در رودخانه گنگ نونگ را خواهد داشت.

Hasanzadeh et al. (2010) شکست احتمالی سد و نیار در استان آذربایجان شرقی را تحت پیش‌فرض (سناریو) های روگذری جریان و رگاب با استفاده از مدل های ریاضی بررسی و به این نتیجه رسیدند که شکل، زبری و شیب بستر تاثیر به‌سزایی در سرعت انتشار امواج ناشی از شکست سد دارد.

Khoub and kashesipour (2012) به بررسی تاثیر زبری بر گسترش ابتدایی موج ناشی از شکست سد پرداختند. در این تحقیق پدیده شکست سد به صورت آزمایشگاهی در یک آبراه افقی مستطیلی با بازشدن ناگهانی یک دریچه سد کننده‌ی مسیر جریان و با استفاده از سامانه (سیستم) تصویربرداری مدل شد. پس از پردازش تصویرها به بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی سیلاب ناشی از شکست سد و تأثیر پذیری موج شکل گرفته به دلیل انواع مختلف زبری طبیعی و مصنوعی و چگونگی آرایش آنها در پایین دست و عمق آب بالادست پرداخته شد. مقایسه نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها نشان داد که زبری در زمان‌های بسیار کوتاه و در حد کمتر از یک دهم ثانیه تأثیر چندانی روی شکل موج نداشته اما با گذشت زمان زبری روی شکل گسترش موج اثرگذار می‌باشد.

Salemnia et al. (2018) به بررسی ویژگی‌های موج ناشی از شکست سد در مسیر های نا مستقیم پرداختند. اندازه‌گیری سرعت و ارتفاع سیلاب ناشی از شکست سد در این تحقیق نشان داد که در زاویه صفر درجه، در کمینه و بیشینه نسبت پایاب به سرآب، میزان‌های سرعت ۳۳ درصد کاهش، در زاویه ۴۵ درجه ۵۸ درصد کاهش، در زاویه ۹۰ درجه ۵۷ درصد کاهش و در زاویه ۱۰۵ درجه ۶۲ درصد کاهش سرعت موج، اندازه‌گیری شده است. افزون بر این بیشینه ارتفاع سیلاب در مسیر یک قوس در زوایه‌های ۲۵ تا ۳۵ درجه رخ داده و پس از آن کاهش چشمگیری در آن مشاهده شد.

Mothghianshoeywi et al. (2018) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر کارگذاری زبری طبیعی روی سرعت موج ناشی از

افزایش سرعت ذرات در تاج موج تاثیر دارد، زیرا سرعت ذرات تاج متناسب با ارتفاع موج می‌باشد و با افزایش ارتفاع، سرعت ذرات تاج نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که در ناحیه آب کم عمق، سرعت پیشروی موج به عمق آب وابسته بوده و با کاهش عمق، سرعت پیشروی رو به کاهش می‌گذارد. و نتیجه با کاهش عمق، سرعت ذرات تاج بیشتر از سرعت پیشروی موج می‌شود. از سوی دیگر سرعت ذرات نزدیک قله بیشتر از سرعت ذرات نزدیک بستر بوده که عامل ایجاد ناپایداری‌هایی در نیم‌رخ و در نهایت شکست موج می‌باشد. با افزایش ارتفاع و کاهش طول، تیزی موج افزایش یافته و در نقطه‌ای به اوج خود می‌رسد. در آن هنگام ارتفاع موج نیز بیشینه است. شکست موج به منزله قائم شدن وجه جلویی موج می‌باشد (Davoudi, 2018). شکل ۲ تعریف مرحله‌های شکست موج را نشان می‌دهد.

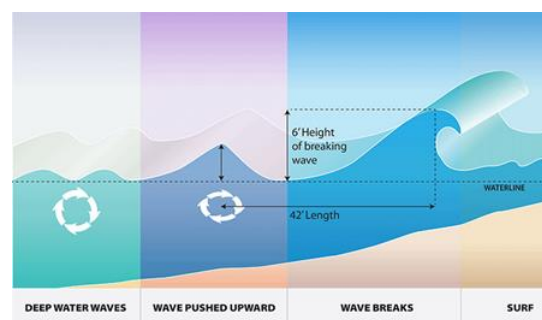


Fig. 2 Image of waves breaks evolution
شکل ۲ تصویری از سیر تکامل شکست موج

با توجه به اهمیت موضوع تاکنون بررسی‌های بسیاری توسط محققان مختلف در زمینه شناخت پدیده شکست سد و اثرگذاری ناشی از آن صورت گرفته است. Ritter (1892) پیشگام بررسی‌ها در زمینه جریان ناشی از شکست سد می‌باشد. او یک مدل عددی با به کارگیری معادله‌های سنت-وانت ارائه داد که بر مبنای آن توانست سطح آزاد جریان آب ناشی از شکست سد را مدل سازی کند.

Kim and Sanders (2016) به بررسی شکست سدهای پشت سر هم پرداختند. آنان در این بررسی موردی دو سد بزرگ بر روی رودخانه گنگ نونگ را انتخاب کرده که به علت رخداد بارندگی شدید در ۳۱ اوت (آگوست) ۲۰۰۲ تا نزدیکی شکست پیشرفته‌اند. افزون بر این بررسی‌ها عدم قطعیت در پژوهش آنان انجام گرفته و پس از پایان پژوهش

حسگر بار دینامیک پرداختند. نتایج نشان داد که فشار ضربه‌ای، متأثر از ضربه پیشانی بوده که ظرف مدت زمان کوتاهی تاثیر می‌کند و در ادامه با حرکت بدنه اصلی موج که تأثیر آن تداوم بیشتری دارد، جریانی شبه‌ماندگار با سازه برخورد می‌کند که نیروی آن در هر لحظه مجموع نیروهای هیدروستاتیک و هیدرودینامیک می‌باشد. Salemnia et al. (2018) به بررسی موج ناشی از شکست سد روی بستر صاف در نتیجه قوس ۹۰ درجه ملایم و تاثیر آن روی سرعت موج پیش رونده ناشی از شکست سد پرداختند. نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد سرعت موج پیش‌رونده در زاویه ۴۵ درجه قوس از دیگر زاویه‌ها بیشتر بوده و سرعت موج به علت تاثیر قوس و شکست موج‌ها در این زاویه بیشینه است. Bornschein (2018) به بررسی تاثیر همزمان عوارض و زبری زمین در شبیه سازی موج ناشی از شکست سد پرداخت. این بررسی محاسبه شکستن سد برای سه سد مختلف را به منظور ارزیابی عدم قطعیت ناشی از مدل انتخاب‌شده (یک بعدی و دو بعدی) مدل‌های زمین مختلف و میزان‌های مختلف ضریب زبری مانینگ ارائه داد. مقایسه نتایج محاسبه روی بیشینه تخلیه، بیشینه سطح آب و زمان رسیدن موج سیل متمرکز است. همه نتایج مدل در رابطه با زمان رسیدن موج سیل، نبود اطمینان بیشتر در طول مسیر انتشار را نشان داد. برای مقابله با آن در مواقع اضطراری، باید سرعت موج واقعی سیل مهار شود و اقدام‌های متناسب با آن تنظیم شود. به طور کلی، نتایج مدل تأیید کرد که اطلاعات مربوط به ارتفاع سطح در مدل سازی سد باید بمبنای مدل زمینی دیجیتال با آشکاری بالا باشد.

Von Häfen et al. (2019) به بررسی معیارهای باز کردن دریچه برای تولید امواج شکست سد پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که تاثیر زمان باز شدن دریچه با گذر زمان از انتشار آب محصور پشت دریچه، و همچنین فاصله رو به پایین از دریچه کاهش یافته است. نتایج به دست آمده همچنین برآوردی از خطاهای مرتبط با زمان باز کردن دریچه برای کمک به مهندسان و محققان در فرآیند برنامه‌ریزی برای ایجاد موج‌های ناشی از شکست سد را فراهم می‌کند.

شکست سد در مسیر غیرمستقیم پرداختند. آزمایش در فلوم با قوس ۹۰ درجه ملایم انجام شد. نتایج به دست آمده از آزمایش نشان داد که زبری روی شکل گسترش موج و سرعت موج در طول قوس اثر گذار می‌باشد.

Lobofsky et al. (2013) به بررسی جریان ناشی از شکست سد با تاکید بر اندازه‌گیری فشار پویایی (دینامیکی) روی بستر خشک پرداختند. آنان در یک فلوم مستطیلی افقی با برداشتن ناگهانی دریچه، جریان ناشی از شکست سد را شبیه‌سازی کردند. آنان در انتهای فلوم با قرار دادن ۵ ترانسدویسر فشار، فشار پویایی موج ناشی از شکست سد را اندازه‌گیری کردند. همچنین با مش‌بندی کردن یک وجه از فلوم آزمایشگاهی و همچنین عکس برداری با فریم بالا، سرعت حرکت موج و نیمرخ سطح آب را نیز برداشت کردند. در نتیجه، مجموعه گسترده‌ای از داده‌ها برای اعتبارسنجی ابزار محاسباتی ارائه شد.

Naderkhanloo et al. (2017) به بررسی تاثیر شکست سد در انتقال بار رسوب در یک بستر قابل شستشو پرداختند. آنان با استفاده از مدل Mike 3 توانستند به شبیه سازی موج ناشی از شکست سد و پیش‌بینی قابل قبولی از روند رسوب‌گذاری و فرسایش در یک بستر قابل شستشو دست یابند. نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایش‌های مدل فیزیکی انجام شده در دانشگاه UCL بلژیک همپوشانی داشتند. همچنین، تحقیق آنان نشان داد که فراسنجه (پارامتر) هایی مانند عمق جریان، دامنه سیلاب و زمان پخش موج سیلاب توسط مدل یاد شده به خوبی شبیه سازی می‌شوند. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که مدل سه بعدی موجود، دقت تغییر پذیرهای ریخت شناختی (مورفولوژیکی) محاسبه شده را در مرحله‌های اولیه جریان شکست سد و در نزدیکی جبهه موج بهبود می‌بخشد. فرسایش قابل توجه در مقابل باز شدن جزئی در نتیجه تنش برشی زیاد در بستر رخ می‌دهد.

Shafiei et al. (2016) با هدف بررسی توزیع فشار توده جریان وارد بر سازه منشوری با زاویه‌های قرارگیری مختلف نسبت به جهت جریان انجام شد. آنان ضمن برداشت اطلاعات توزیع قائم فشار بر روی صفحه مقابل جریان یک سازه منشوری با قاعده مربعی به اندازه‌گیری نیرو به وسیله



Fig. 3 Top view of laboratory flume
شکل ۳ نمای بالای فلوم آزمایشگاهی

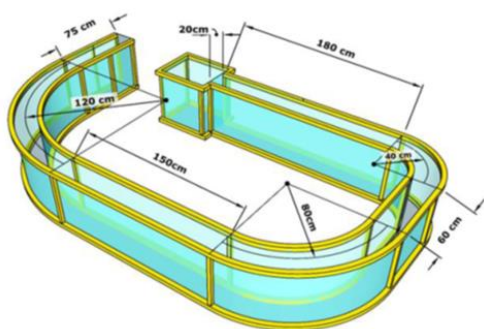


Fig. 4 Schematic view from the top of the laboratory flume
شکل ۴ نمای کلی از بالای فلوم آزمایشگاهی

دریچه‌ای در فلوم برای شبیه‌سازی شکست سد تعبیه شد. دریچه با جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر که توسط جک پنوماتیک به صورت ناگهانی و با سرعت $3/8$ متر بر ثانیه باز می‌شد، استفاده شد. دریچه در فاصله ۲۰ سانتی متری از ابتدای قوس متوسط با شعاع نسبی ۴ قرار داشت که با آن فلوم به دو بخش بالادست (مخزن سد) که آب پشت آن ذخیره شود و پایین دست تقسیم شد. در محل قوس زبری‌های طبیعی با اندازه‌های متوسط (D_{50}) ۱۰، ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر و با تراکم ۱۰۰ درصد تعبیه شد. شکل ۵ نمایی از زبری‌های نصب شده در فلوم را نشان می‌دهد. به منظور بررسی تاثیر تراز سطح آب از ۴ تراز آب مختلف در بالادست (H_U) دریچه (۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵ سانتی متر) استفاده شد. در همه آزمایش‌ها بستر پایین دست خشک (بدون آب) در نظر گرفته شد. همچنین ۴ آزمایش به عنوان شاهد و بدون در نظر گرفتن زبری در پایین دست صورت پذیرفت. در مجموع ۱۶ آزمایش صورت پذیرفت. پیش فرض آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جریان ناشی از شکست یک سد در طبقه بندی جریان‌های غیردائمی قرار می‌گیرد. جریان‌های غیردائمی خود به جریان‌های متغیر تدریجی و متغیر سریع تقسیم می‌شوند. در جریان متغیر تدریجی، انحناى نیمرخ موج ملایم بوده و تغییرپذیری عمق با زمان به صورت تدریجی رخ می‌دهد، افزون بر این شتاب قائم جریان در مقایسه با شتاب زمین ناچیز تلقی شده ولی تاثیر اصطکاک جدارها در نظر گرفته می‌شود. درحالی‌که در جریان‌های متغیر سریع، انحناى پروفیل آب تند، تغییرات عمق جریان نسبت به زمان سریع، مولفه قائم شتاب ذرات محسوس و تاثیر اصطکاک جدارها قابل صرف نظر کردن می‌باشد. به بیانی دیگر هر جریان غیردائمی عبارت از حرکت موجی است که با تغییر مکان خود و برحسب شرایط، عمق جریان، دبی و یا هر دو را از مقطعی به مقطع دیگر و از زمانی به زمان دیگر تغییر می‌دهد (Hosseini and Abrishami, 2007).

با توجه به این موضوع که اغلب سدهای مخزنی روی رودخانه‌های کوهستانی ساخته می‌شود و این رودخانه‌ها دارای بستر سنگلاخی بوده و در مسیر خود دارای پیچ و خم می‌باشند، لذا بررسی و ارزیابی قوس و زبری بستر روی ویژگی‌های سیلاب ناشی از شکست سد ضرورت می‌یابد. با توجه به این نکته که ساختگاه اصلی سدهای مخزنی دره‌های تنگ کوهستانی است، لذا در صورت شکست سد سیلاب ناشی از آن ناگزیر به عبور از مسیرهای پرپیچ و خم کوهستانی است؛ لذا هدف از این تحقیق بررسی و ارزیابی تاثیر قوس و زبری بستر روی ویژگی‌های موج ناشی از شکست سد در پایین دست آن می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور شبیه‌سازی شکست سد در این تحقیق برای مدل کردن جریان سیلاب ناشی از شکست در مسیرهای غیر مستقیم از یک فلوم مستطیلی ۹۰ درجه با عرض ۲۰ سانتی‌متر و ۳ شعاع‌های نسبی $R/B = 2, 4, 6$ در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. شکل‌های ۳ و ۴ نمایی کلی (شماتیک) از فلوم را نشان می‌دهد.

$$f(H_U, D_{50}, \theta, U_F, \rho, g, \mu, H_F) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه؛

H_F = ارتفاع پیشانی موج، ρ = جرم واحد حجم، μ = لزجت پویایی و g = شتاب ثقل است.

دیگر فراسنجه‌ها در بخش پیشین معرفی شده اند. با در نظر گرفتن H_U, g, ρ به عنوان متغیر تکراری و استفاده از روش π باکینگهام رابطه ۲ به دست آمد.

$$\frac{H_F}{D_{50}} \cdot \frac{U_F}{\sqrt{gH_F}} = f\left(\theta, \frac{H_U}{D_{50}}\right) \quad (2)$$

به عنوان نمونه، $U_{25}\theta_{45}K_{S_{16}}$ در شرایطی تعریف می‌شود که سطح آب بالادست ۲۵ سانتی‌متر، اندازه‌گیری در مقطع ۴۵ درجه قوس و در بستر با زبری ۱۶ میلی‌متر باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر زاویه قوس بر اوج ارتفاع موج در حالت

شاهد

بنابر نتایج بررسی‌های انجام شده توسط محمد Mohamed (2008) و (Salemnia et al. (2018) به دلیل اختلاف انرژی اولیه زیاد ناشی از تراز آب در بالادست و پایین دست دریچه، در واقع فرصتی برای تشکیل بدنه موج پس از عبور از زیر دریچه وجود نداشته و در همان آغاز پیش از ورود موج به مسیر قوسی، موج به صورت شکسته شده از زیر دریچه خارج شده و به حرکت خود ادامه می‌دهد. همه موج‌های شکل‌گرفته در این بررسی از نوع موج شکسته شده می‌باشند. با ملاحظه شکل ۶ می‌توان موقعیت نقطه‌های بحرانی به لحاظ افزایش ارتفاع موج در طول مسیر قوسی را تشخیص داد. منظور از نقطه‌های بحرانی، نقطه‌های است که سیلاب ناشی از برداشت ناگهانی دریچه در بالاترین ارتفاع (اوج) خود قرار دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود موج ایجاد شده در طول مسیر قوسی کاهش ارتفاع می‌دهد. برای مثال موج تشکیل شده در حالت‌های $U_{35}\theta_0K_{S_0}$ ، $U_{35}\theta_{45}K_{S_0}$ و $U_{35}\theta_{90}K_{S_0}$ دارای ارتفاع موج ۸، ۱۱ و ۶ سانتی‌متر هستند؛ بدین معنی که ارتفاع موج در انتهای قوس نسبت به ابتدای آن ۴۵ درصد کاهش داشته است.



Fig. 5 View of the roughness installed in the flume
شکل ۵ نمایی از زبری‌های نصب شده در فلوم

جدول ۱ الگوی آزمایش‌ها

Table 1 experiments pattern

Number of experiments	Upstream height (cm)	Row
4	25	1
4	35	2
4	45	3
4	55	4
16	Total number of experiments	

برای اندازه‌گیری سرعت موج تشکیل شده و ثبت ارتفاع موج از سامانه عکس‌برداری با سرعت‌های بالا استفاده شده است. بدین صورت که سه پایه دوربین به صورت عمود در مقابل جریان قرار داده شده و عکس‌برداری متوالی انجام می‌شد. سپس دریچه به صورت ناگهانی باز شده و حرکت آب تا انتهای قوس توسط دوربین ثبت می‌شد. برای خواندن دقیق ارتفاع موج (H_F) در زاویه‌های مختلف در مقطع‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه از قوس اشل‌هایی نصب شد. میزان سرعت موج (U_F) با احتساب فاصله مکانی و زمانی حرکت قله موج از کنار دریچه موج ساز تا رسیدن به هر یک از مقطع‌های یادشده، اندازه‌گیری شد. به منظور به‌دست آوردن فراسنجه‌های بدون بعد موثر در جریان فراسنجه‌های دخیل در این تحقیق را می‌توان به صورت رابطه ۱ بیان کرد.

منتقل می شود. علت این پدیده، تولید جریان های ثانویه در درون مقطع های عرضی است، به طوری که این جریان ها که در نزدیک سطح آب به طرف دیواره بیرونی و در نزدیکی بستر به طرف دیواره درونی برقرار هستند، بر گرادیان طولی فشار غالب شده باعث انتقال عرضی مومنتم طولی جریان و یا به عبارتی باعث باز توزیع آن می شوند. در مقطع های انتهایی قوس سرعت در نزدیکی دیواره بیرونی افزایش می یابد که علت این پدیده، همسان ورودی قوس، تاثیر گرادیان عرضی فشار است که در این قسمت از میدان، در امتداد دیواره بیرونی گرادیان طولی منفی و در امتداد دیواره درونی گرادیان طولی مثبت حاکم است. در نتیجه، دو عامل جریان ثانویه و گرادیان طولی فشار در این حالت به عنوان عامل های همسو عمل کرده و باعث افزایش بیشتر سرعت در ناحیه نزدیک دیواره بیرونی می شوند (McDonald, 2013). با دقت در نمودار شکل ۷، مشاهده می شود که نتیجه آزمایش ها با نتایج بررسی های پیشین همخوانی قابل قبولی دارد. افزون بر این می توان بیان نمود که با افزایش اختلاف بین اعماق پایاب و سرآب سرعت موج افزایش می یابد. با افزایش اختلاف سطح آب بالادست و پایین دست، انرژی اولیه موج بیشتر بوده که منجر به افزایش سرعت موج، به ویژه در زاویه صفر درجه می شود. با دقت بیشتر در شکل ۶ ملاحظه می شود که بیشینه سرعت در زاویه ۴۵ درجه رخ می دهد. هرچند با توجه به شمار آزمایش ها و هیدرولیک پیچیده موج ها نمی توان به طور قطع یک زاویه را به عنوان محل قطعی رخداد بیشترین

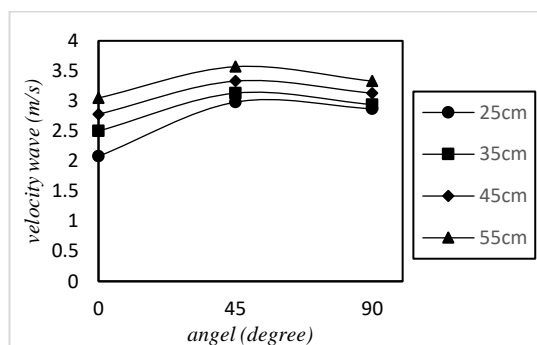


Fig. 7 The effect of different angles on the bend on the wave velocity at different depths of the upstream

شکل ۷ تاثیر زاویه های مختلف در قوس روی سرعت موج در عمق های مختلف سرآب

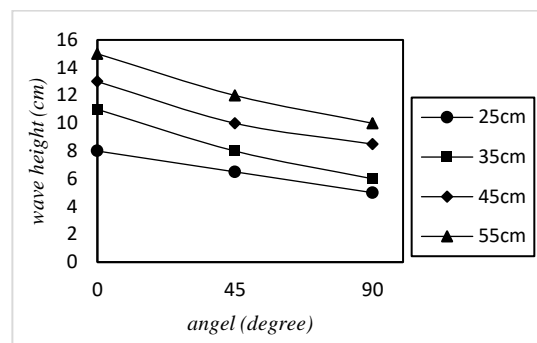


Fig. 6 The effect of different angles on the bend on the wave height at different depths of the upstream

شکل ۶ تاثیر زاویه های مختلف در قوس روی ارتفاع موج در عمق های مختلف سرآب

۲-۳- تاثیر عمق های مختلف سرآب در قوس روی سرعت موج در حالت شاهد

پیش بینی زمان رسیدن موج به یک محدوده مهم مانند نقطه های راهبردی (استراتژیک) و یا مناطقی با (ترافیک) جمعیتی بالا، از جمله نکته های اساسی برای ارائه راهکارهای مهار و کاهش تخریب ناشی از شکست سد می باشد. به همین دلیل، در این بررسی، اندازه گیری سرعت در مقطع های مختلف مورد نظر بوده است. در همه موارد میزان سرعت موج در زاویه صفر درجه از همه سرعت های موج پیش رونده در زاویه های ۴۵ و ۹۰ درجه کمتر می باشد. به بیانی دیگر سرعت موج از محل باز شدن ناگهانی دریچه تا رسیدن به ابتدای قوس دارای سرعت کمتری بوده و پس از ورود به قوس سرعت آن افزایش می یابد. دلیل این پدیده را در این امر می توان جستجو کرد که با ورود جریان به درون قوس و به دلیل گرادیان طولی فشار ناشی از شتاب جانب مرکز (در بازه کوتاهی از ورودی قوس، به خاطر تغییر ناگهانی انحنای، در امتداد جداره درونی کاهش فشار و در امتداد جداره خارجی افزایش فشار رخ می دهد)، سرعت موج افزایش یافته و به طرف دیواره درونی منتقل می شود. در قسمت کوتاهی از ابتدای قوس، گرادیان فشار طولی منفی در نزدیکی دیواره درونی رخ داده و باعث شتاب گرفتن ذرات آب می شود و در مقابل، در نزدیکی قوس بیرونی با گرادیان فشار طولی مثبت همراه بوده و سرعت سیال در این ناحیه کم می شود. این روند تا زوایای بین ۲۵ و ۳۵ درجه ادامه داشته و پس از آن، بیشینه سرعت به نزدیکی دیواره بیرونی

بستر با زبری ۱۶ میلی‌متر سرعت نسبت به حالت نبود بار بستر موج حدود ۹ درصد کمتر از حالت شاهد در زاویه ۴۵ درجه قوس با ارتفاع سرآب ۳۵ سانتی‌متر است. بنابر مشاهده‌های صورت گرفته، مشخص شد در ارتفاع سرآب ۵۵ سانتی‌متر سرعت موج در حضور زبری‌ها افزایش چشمگیری نداشته است. علت را می‌توان با در نظر گرفتن نسبت خیلی کم بین ارتفاع زبری و عمق سرآب دانست. در سرآب ۵۵ سانتی‌متر به علت زیاد بودن حجم خروجی از پشت دریچه، موج زبری را لمس نکرده و به مسیر خود ادامه می‌دهد. همچنین در بستر با زبری ۱۰ میلی‌متر تغییرپذیری‌های چشمگیر سرعت مشاهده نشد.

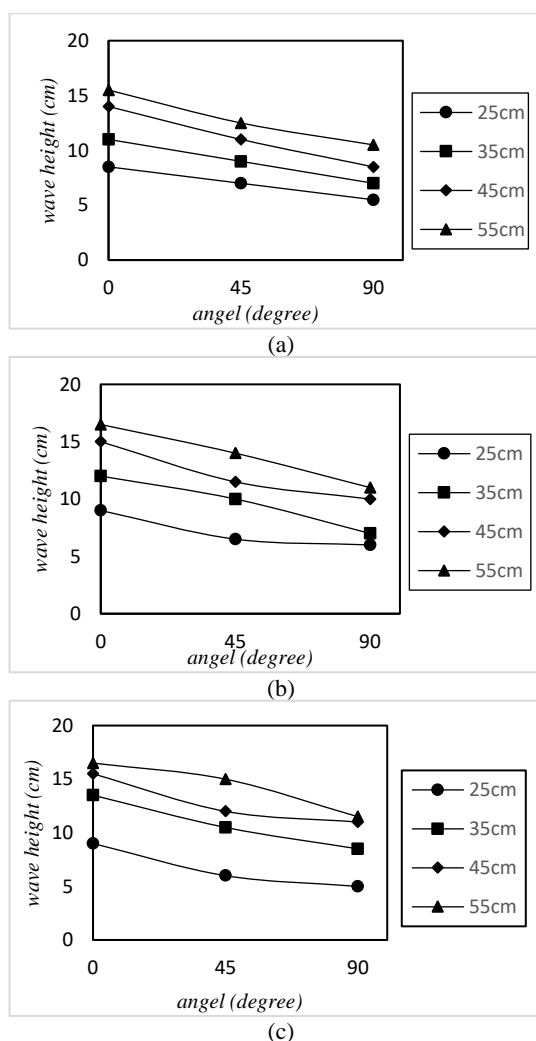


Fig. 8 The effect of different angles on the bend on the wave height at different upstream in the presence of roughness. (a) 10 mm, (b) 16 mm, (c) 20 mm

شکل ۸ تاثیر زاویه‌های مختلف در قوس روی ارتفاع موج در عمق‌های مختلف سرآب در حضور زبری، (a) ۱۰ میلی‌متر، (b) ۱۶ میلی‌متر، (c) ۲۰ میلی‌متر

سرعت موج مشخص نمود، اما با نگاهی کلی می‌توان دریافت در زاویه ۴۵ درجه به طور معمول بیشترین میزان سرعت موج پیش رونده مشاهده شده است. با توجه به نتایج بررسی‌های (Souzhepour et al. (2016) بیشترین سرعت مطلق جریان در زاویه ۴۰ درجه قوس تند رخ داده است.

۳-۳- تاثیر زبری بر سرعت و ارتفاع موج در سرآب و زاویه‌های مختلف

همان‌طور که در شکل شماره ۸ نشان داده شده است، بسته به اندازه زبری‌ها ارتفاع موج نیز متفاوت خواهد بود. با دقت در این شکل می‌توان نتیجه گرفت که هرچه اندازه زبری‌ها بزرگ‌تر باشد، ارتفاع موج بیشتر خواهد بود. به طوری‌که ارتفاع موج در حالت $U_{45}\theta_0K_{S_{20}}$ حدود ۱۳ درصد بیشتر از حالت $U_{45}\theta_0K_{S_0}$ است. این در حالی است که در حالت $U_{45}\theta_0K_{S_{10}}$ حدود ۷ درصد بیشتر از حالت $U_{45}\theta_0K_{S_0}$ است. همچنین در آزمایش‌ها $U_{35}\theta_{45}K_{S_{16}}$ و $U_{35}\theta_{45}K_{S_{20}}$ مشاهده می‌شود که ارتفاع موج نسبت به ابتدای قوس ۱۶ و ۴۲ درصد کاهش داشته است. افت انرژی آب در طول قوس باعث کاهش ارتفاع موج می‌شود. بنابر نتایج بررسی‌های (Hasanzadeh et al. (2010) با افزایش ارتفاع زبری، ارتفاع موج افزایش می‌یابد. برای همه حالت‌ها مشاهده می‌شود که این میزان همواره مقدار مثبتی است. بنابر مشاهده‌های صورت گرفته، مشخص شد در ارتفاع سرآب ۵۵ سانتی‌متر ارتفاع موج در حضور زبری‌ها افزایش چشمگیری نداشته است. علت را می‌توان با در نظر گرفتن نسبت خیلی کم بین ارتفاع زبری و عمق سرآب دانست. در سرآب ۵۵ سانتی‌متر به علت زیاد بودن حجم خروجی از پشت دریچه، موج به بستر فلوم برخورد نکرده و به مسیر خود ادامه می‌دهد. در این عمق، زبری‌های کف فلوم مقاومت زیادی برای جریان به‌شمار نمی‌آیند.

در بررسی سرعت امواج ناشی از شکست سد در حضور زبری بستر می‌توان این‌گونه بیان کرد که افزایش زبری بستر باعث کاهش در میزان سرعت موج‌ها خواهد بود. با دقت در نمودارهای ارائه شده در شکل ۹ مشاهده می‌شود که سرعت در زاویه ۴۵ درجه به دلایل گفته شده، بیشینه است؛ با این تفاوت که میزان سرعت کاهش یافته است. به طوری‌که در

نمی کند. حساسیت عدد فرود به ارتفاع کمتر از سرعت است. با کارگذاری زبری در طول قوس میزان عدد فرود کاهش می یابد. تغییر پذیرهای اشاره شده در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

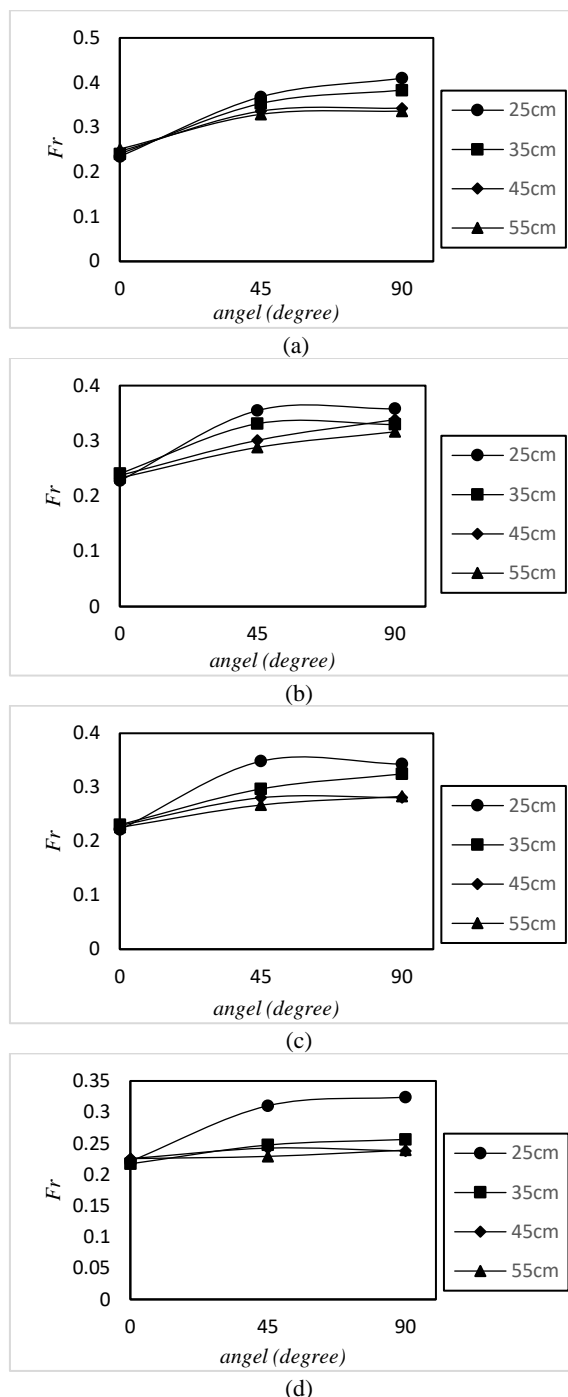


Fig. 10 The effect of different angles on the bend on the Froude number at different upstream in the presence of roughness, (a) smooth bed, (b) 10 mm, (c) 16 mm, (d) 20 mm

شکل ۱۰ تاثیر زاویه های مختلف در قوس روی سرعت موج در عمق های مختلف سرآب در حضور زبری، (a) بستر صاف، (b) ۱۰ میلی متر، (c) ۱۶ میلی متر، (d) ۲۰ میلی متر

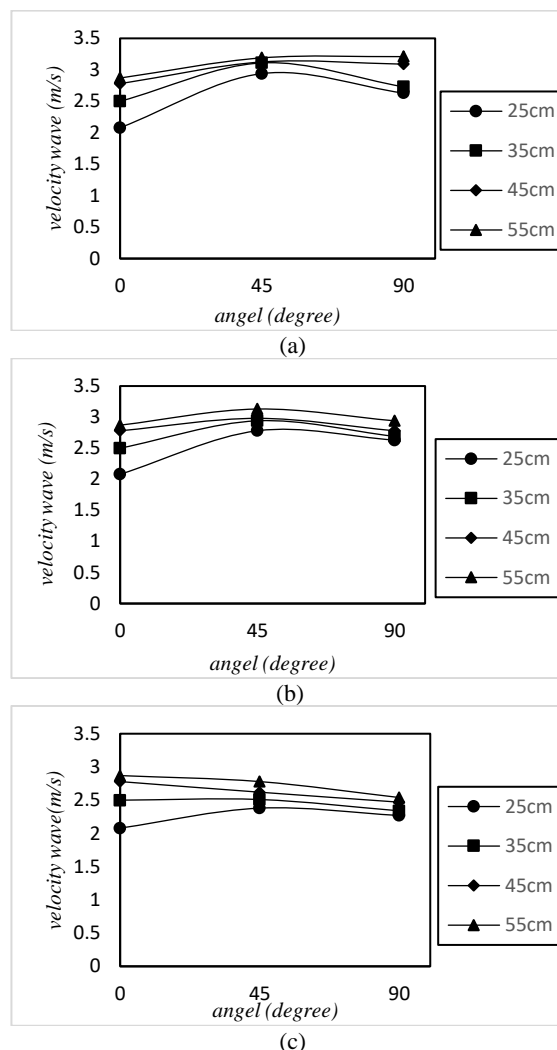


Fig. 9 The effect of different angles on the bend on the wave height at different upstream in the presence of roughness, (a) 10 mm, (b) 16 mm, (c) 20 mm

شکل ۹ تاثیر زاویه های مختلف در قوس بر روی سرعت موج در عمق های مختلف سرآب در حضور زبری، (a) ۱۰ میلی متر، (b) ۱۶ میلی متر، (c) ۲۰ میلی متر

۴-۳- تاثیر زبری بر عدد فرود در سرآب و زاویه های مختلف

بنابر نتایج به دست آمده از نمودارها، عدد فرود در عمق های سرآب پایین تر، بیشتر است. به طوری که در عمق سرآب ۲۵ سانتی متر عدد فرود بیشینه است. در بستر صاف (حالت شاهد) عدد فرود در طول قوس افزایش می یابد. به طوری که عدد فرود در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس ۵۷ و ۷۵ درصد افزایش داشته است. عدد فرود در عمق های سرآب ۴۵ و ۵۵ سانتی متر بسیار نزدیک بهم است. زیرا با افزایش ارتفاع آب بالادست، ارتفاع موج تغییر چندانی

۴- نتیجه گیری

با توجه به خشک بودن پایاب، همه‌ی موج‌ها به صورت شکسته شده از زیر دریچه خارج می‌شوند. در این گونه موج‌ها، عمق آب در ابتدای آبراهه بیشینه بوده و تا انتهای آبراهه با شیب کاهشی قابل ملاحظه‌ای ادامه می‌یابد. با توجه به بیشینه بودن سرعت در زاویه ۴۵ درجه قوس و به طور کلی بیشتر بودن سرعت در نیمه دوم قوس، امکان احداث ایستگاه پمپاژ و نقطه‌های آگیری در این قسمت بیشتر است. به همین علت تمهیدهای حفاظتی و در صورت لزوم برش مسیر قوسی و تبدیل آن به مسیر مستقیم در نیمه دوم قوس انجام می‌شود.

کارگذاری زبری در طول قوس سبب کاهش سرعت موج می‌شود. هرچه اندازه میانگین زبری‌ها بیشتر باشد، میزان کاهش سرعت بیشتر می‌شود. به طوری که در آزمایش‌ها با بستر صاف (حالت شاهد) سرعت در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس به ترتیب ۴۳ و ۳۸ افزایش داشته است. در آزمایش‌ها با اندازه میانگین زبری ۱۰ میلی‌متر، سرعت در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس به ترتیب ۴۱ و ۲۶ درصد افزایش داشته است. همچنین در آزمایش‌ها با اندازه میانگین زبری ۱۶ میلی‌متر، سرعت موج در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس به ترتیب ۳۴ و ۲۷ درصد افزایش داشته است. این روند در زبری‌ها با اندازه میانگین ۲۰ میلی‌متر نیز حاکم است. به طوری که سرعت موج در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه قوس نسبت به ابتدای قوس به ترتیب ۱۴ و ۹ درصد افزایش داشته است.

به طور کلی ارتفاع موج در طول قوس به علت افت انرژی جریان، کاهش می‌یابد. با کارگذاری زبری بستر در طول قوس، ارتفاع موج افزایش می‌یابد. در آزمایش‌ها با بستر صاف (حالت شاهد) ارتفاع موج در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس ۱۹ و ۳۸ درصد کاهش داشته است. در آزمایش‌ها با اندازه میانگین زبری ۱۰ میلی‌متر، ارتفاع موج در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس ۲۸ و ۳۳ درصد کاهش داشته است. در آزمایش‌ها با اندازه میانگین زبری ۱۶ میلی‌متر، ارتفاع موج در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس ۲۸ و ۳۳ درصد کاهش داشته است. در آزمایش‌ها با اندازه میانگین زبری ۲۰ میلی‌متر،

ارتفاع موج در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به ابتدای قوس ۳۳ و ۴۴ درصد کاهش داشته است.

۵- فهرست نشانه‌ها

H_F	ارتفاع پیشانی موج
U_F	سرعت پیشانی موج
D_{50}	اندازه میانگین زبری
H_U	ارتفاع آب بالادست
θ	مقطع اندازه‌گیری در قوس
K_S	ارتفاع زبری
ρ	چگالی
μ	لزوجت پویایی
g	شتاب

۶- منبع‌ها

- Bornschein, A. (2018). Combined Influence of Terrain Modell and Roughness in Dam Break Wave Simulation, In International conference on River Flow, Lyon-Villeurbanne, France.
- Davoudi, L. (2018). Momentum absorption of single waves in coastal green belt using physical modeling, PhD Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, 201 p. (in Persian)
- Hasanzadeh, Y., Nourani, V., Sepehri, V. and Delafrouz, H. (2010). Modeling the Fission and Possible Breakdown of Veynar Dam under Flow and Storm Overflow Scenarios, 8th International River Engineering Conference, Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Hosseini, S.M. and Abrishami, J. (2007). Open-Channel Hydraulics. Emam Reza, Mashhad, 613 p. (in Persian)
- Khoub, A. and Kashefipour, M. (2012). Investigation of the Effect of Downstream Dam Height on Wave Development Due to its Breakdown, 3rd National Conference on Comprehensive Water Resources Management, Sari, Iran. (in Persian)
- Kim, B. and Sanders, F. (2016). Dam-break flood model uncertainty assessment: case study of extreme flooding with multiple dam failures in Gangneung, South Korea. Journal of Hydraulic Engineering. 142(5), 113-125.
- Lobovsky, L., Botia-Vera E., Castellana F., Mas-Soler J. and Souto-Iglesias, A. (2013). Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break, Journal of Fluids and Structures. 48(5), 407-

zeitschrift verein deutscher ingenieure. 36(33), 947-954.

Salemnia, A., Fazloula, R. and Ghomeshi, M. (2018). Investigation of flood velocity and height due to dam failure in indirect paths under laboratory conditions, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 6(11), 1009-1023.

Shafiei, S. R., Melville, W. B. and Shamseldin, Y. A., (2016). Experimental investigation of tsunami bore impact force and pressure on a square prism. *Journal of Coastal Engineering*. 110(1), 1-16.

Souzeppour, A., Shafaeibajestan, M. and sheykhrezazadehnikou, N. (2016). Effect of floor roughness on shear stress and the power of vortices in 90-degree sharp bend rectangular duct, *Iranian Water Research Journal*. 9(1), 81-88.

Von Häfen, H., Goseberg, N., Stolle, J. and Nistor, I. (2019). Gate-Opening Criteria for Generating Dam-Break Waves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(3), 04019002.

434.

McDonald, A.T., Pritchard, P.J. and Fox, R.W. (2011). *Introduction to Fluid Mechanics*. JOHN WILEY & SONS, INC.

Mohamed, A. (2008). Characterization of tsunami-like bores in support of loading on structures, M.Sc. Thesis, University of Hawaii, 86 p.

Motaghianshoeysi, R., Ghomeshi, M. and Daryaei, M. (2018). Experimental Investigation of the Effect of Natural Roughness Application on the Wave Speed Due to Dam Breakdown Indirectly, 17th Iranian Hydraulic Conference, Shahrekord, Iran. (in Persian)

Naderkhanloo, V., Soudi, M., Hemmati, M. and Ahmad Hamidi, S. (2017). 3D Numerical simulation of dam-break flows with sediment transport over movable beds. *World Environmental and Water Resources Congress*, California, USA.

Ritter, A. (1892). *Die Fortpflanzung der Wasserwellen*.