



## تحلیل فرودی جریان غیر ماندگار سریع ناشی از شکست سد روی بستر ثابت

علیرضا خوش کنش<sup>۱</sup>، حسین بانژاد<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- عضو هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد ( [banejad@um.ac.ir](mailto:banejad@um.ac.ir) )

تحلیل انواع جریان در مجاری روباز با به کارگیری معیار عدد فرود (آنالیز فرودی) روشی سودمند و نسبتاً دقیق در طراحی سازه های هیدرولیکی و روندیابی هیدرولیکی سیلاب به شمار می رود. این پژوهش با هدف تعیین رفتار جریان غیرماندگار سریع ناشی از شکست سد روی بستر ثابت افقی انجام شد. روش پژوهش به شکل شبیه سازی عددی نرم افزاری بود. نرم افزار Flow-3D نسخه 11.1 به عنوان ابزار پژوهش جهت انجام شبیه سازی ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که با بهره گیری از معیار عدد فرود و مطالعه تغییرات هندسی- حرکتی سطح آزاد جریان می توان بسیاری از ویژگی های جریان غیرماندگار سریع ناشی از شکست سد روی بستر ثابت را پیش بینی نمود.

**کلمات کلیدی:** عدد فرود، آنالیز فرودی، جریان غیرماندگار سریع، شکست سد، بستر ثابت، سطح آزاد جریان، Flow-3D، سیلاب، موج مثبت، جبهه موج

### ۱. مقدمه

عدد فرود، معیاری کاربردی و دقیق در مطالعه و پیش بینی رفتار انواع جریان در مجاری روباز و سازه های هیدرولیکی می باشد. شکل های متعدد محاسبه این عدد با تغییر ترم های سرعت و مسافت به ترتیب در صورت و مخرج آن صورت می گیرد. هر یک از این شکل ها، در محاسبه حالت جریان تحت شرایط هندسی و فیزیکی مشخصی کاربرد دارند. از جمله می توان به کاربرد های این عدد (در فرمولاسیون های متفاوت) در محاسبات جریان در کانال های انتقال و توزیع آب، مطالعات سیلاب، انتقال رسوب، جریان روی سازه های هیدرولیکی، پرش هیدرولیکی و مطالعه انواع جریان های ماندگار و غیرماندگار اشاره نمود.



قره باغی و ستار [۱]، جریان ناشی از شکست سد و انتقال آلودگی در انهار طبیعی را به عنوان تابعی از عدد فرود جریان و زبری مصالح بستر مطالعه نموده و روابط تجربی را مورد مقایسه قرار دادند. در پژوهشی دیگر، آمارا و همکاران [۲]، با به کارگیری یک مدل دو بعدی و حل معادلات سنت و نانت، جریان سطح آزاد فوق بحرانی در یک بازشدگی ناگهانی را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، تغییرات عدد فرود به عنوان معیاری جهت تعیین رفتار سطح آزاد مورد استفاده قرار گرفت. در یک پژوهش عددی، استلینگ و همکاران [۳]، یک شمای عددی پایستار را برای تعیین عدد فرود در جریان های آب سطحی متغیر سریع ارائه نمودند. در این پژوهش، مشخص گردید که در جریان متغیر سریع، فرض فشار استاتیک با فرمولاسیون متوسط گیری در عمق همخوانی ندارد. در این پژوهش بر لزوم به کارگیری یک مدل سه بعدی با فرض فشار هیدرودینامیک تاکید گردید. در مطالعه ای دیگر، بازن و همکاران [۴]، جریان ناشی از سیلاب روی یک تقاطع مانع دار را به صورت دوبعدی حل نمودند. در این پژوهش، خصوصیات جریان سیل تحت اعداد فرود متفاوت جریان بالادست مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، سباستین و همکاران [۵]، لبریز نمودن جریان ناشی از شکست یک دایک آبرفتی با خاک غیرچسبنده را به صورت آزمایشگاهی - عددی مطالعه نمودند. در این پژوهش، از بازتعریف عدد فرود جریان بر اساس دبی و سطح مقطع جریان عبوری از دایک جهت مطالعه خصوصیات جریان استفاده شد. در پژوهش هایی مشابه [۶-۱۰]، جریان ناشی از شکست سد تحت اعداد فرود متفاوت جریان بالادست مورد مطالعه قرار گرفت. در پژوهش های عددی با بهره گیری از نرم افزار فلوتری دی، جریان ناشی از شکست سد روی بستر فرسایش پذیر با بهره گیری از مدل های آشفتگی جریان مورد مطالعه قرار گرفت.

در این پژوهش، از نرم افزار Flow-3D نسخه 11.1 برای شبیه سازی جریان ناشی از شکست سد روی بستر ثابت یک مدل آزمایشگاهی [۶] استفاده شد.

## ۲. معادلات حاکم

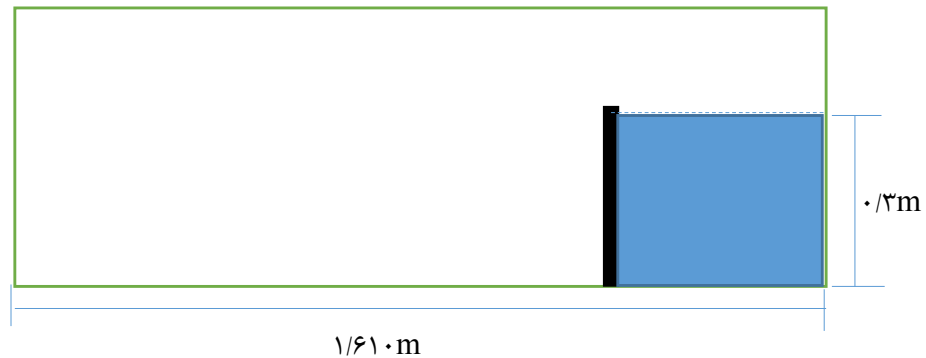
در این پژوهش، از فرمولاسیون عدد فرود  $Fr$  جریان به صورت ذیل استفاده شد.

$$Fr = \frac{V_{da}}{\sqrt{gy}} \quad (1)$$

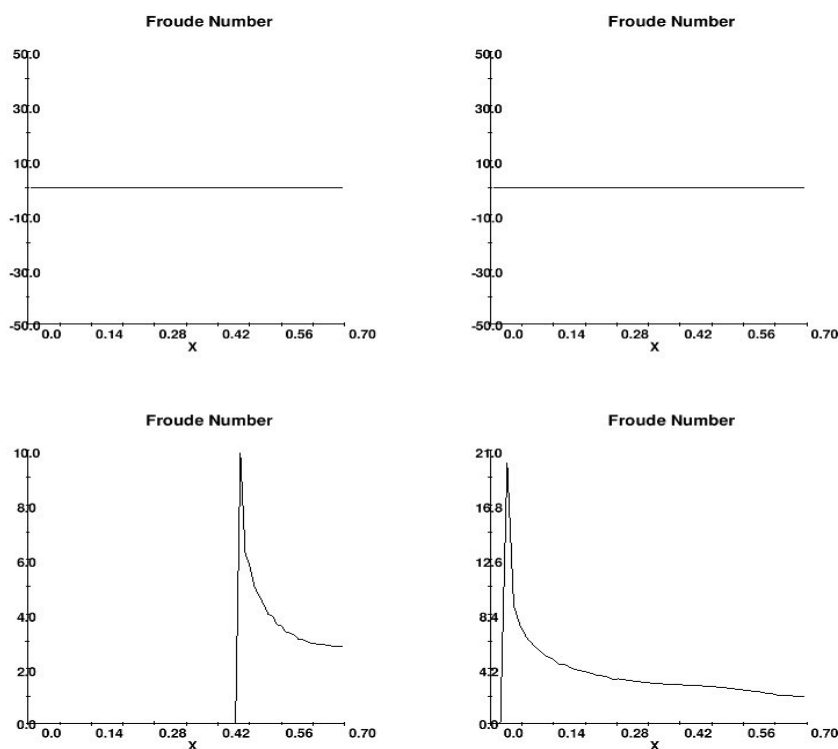
در رابطه (۱)،  $V_{da}$  سرعت متوسط گیری شده در عمق،  $y$ ، عمق متوسط جریان و  $g$  شتاب ثقل می باشد [۱۱].

## ۳. یافته ها و بحث

نتایج حاصل از شبیه سازی ها و حل رابطه (۱) در نرم افزار فلو تری دی، جهت مطالعه رفتار سطح آزاد جریان ناشی از شکست سد مطابق نمودارهای شکل های ذیل می باشد.



شکل ۱. ستاپ آزمایشگاهی شکست سد منبع [۶]

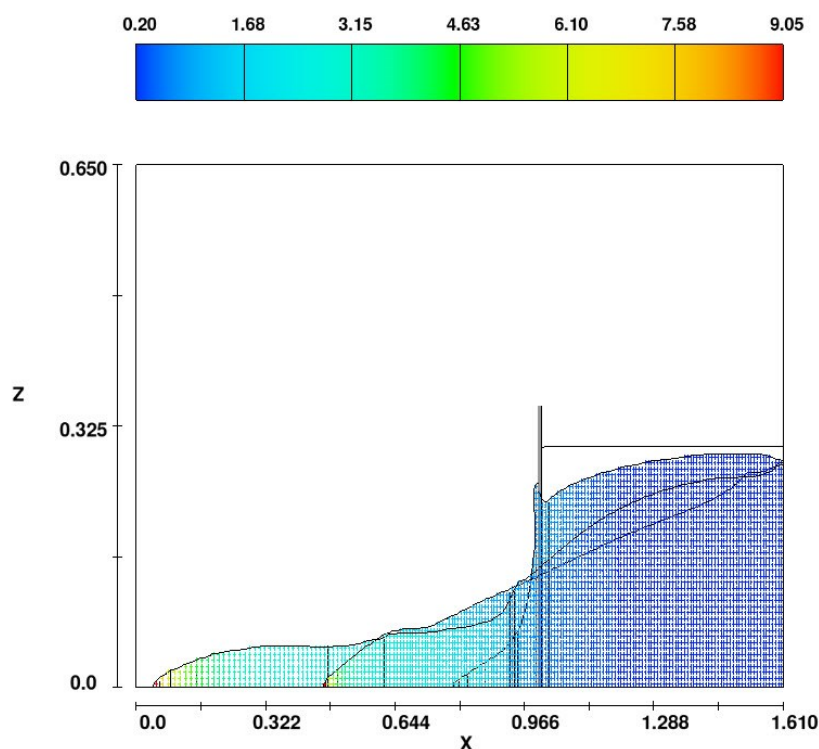


شکل ۲. تغییرات عدد فرود جریان در راستای طولی مخزن

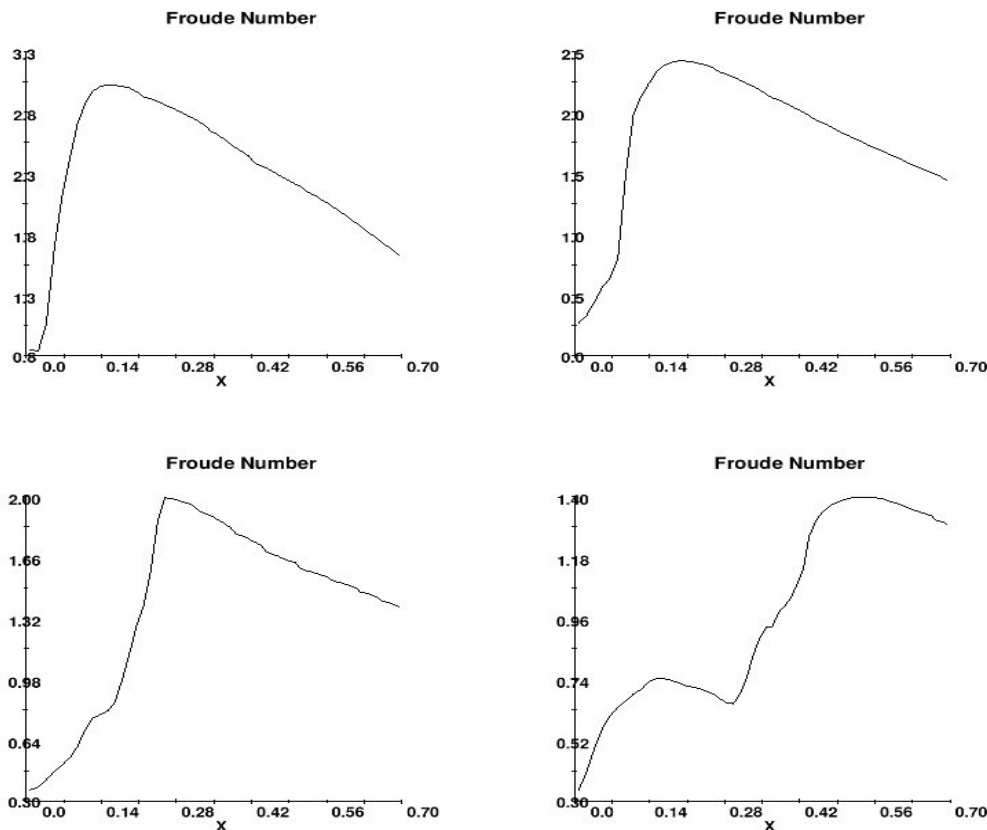
در حالت کلی، تغییرات منحنی های فرود جریان در امتداد طولی  $X$  به چهار شکل خط صاف، منحنی مقعر، منحنی زنگوله ای نامتقارن و منحنی  $Z$  برعکس خمیده رخ می دهد. در منحنی های شکل ۲ (بالا)، در لحظات ۰ تا ۰/۱۶۳ ثانیه، از آنجایی که موج مثبت هنوز به فاصله ۰/۷ متر از دیواره پائین دست نرسیده است، مقدار فرود جریان، در این فاصله، برابر صفر می باشد و شکل منحنی فرود جریان به صورت خط صاف (مقدار صفر) می باشد. در لحظه ۰/۳۲۵ ثانیه از شبیه سازی (شکل ۱، پائین



چپ)، حداکثر عدد فرود جریان ( $Fr_{max}$ ) برابر ۱۰، در فاصله ۰/۴۲ متر از دیواره پائین دست رخ می دهد. این به دلیل پیشروی ناحیه راس جبهه موج روی بستر تانک و حرکت شتابدار تند شوند موج مثبت می باشد. در ادامه (شکل ۱، راست پائین)، در لحظه ۰/۴۸۹ ثانیه از شبیه سازی، بالاترین عدد فرود جریان  $Fr_{max}$  برابر ۲۱ مشاهده می گردد. در این حالت، منحنی فرود جریان کاملاً شکل مقعر دارد.

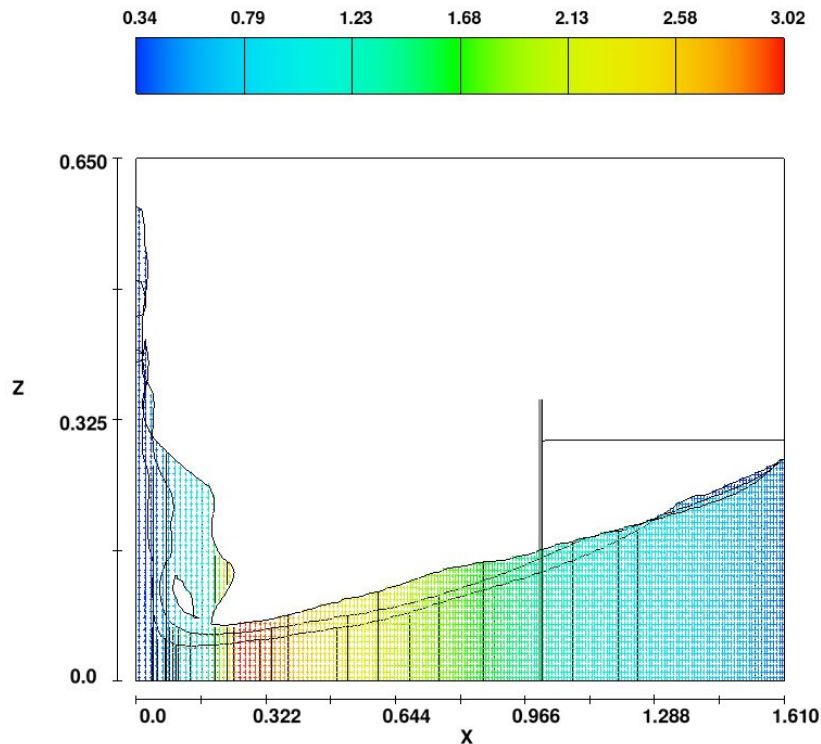


شکل ۱-۲. تغییرات منحنی سطح آزاد جریان متناظر شکل ۲ (شاخص رنگی نمایانگر مقادیر  $Fr$  می باشد)



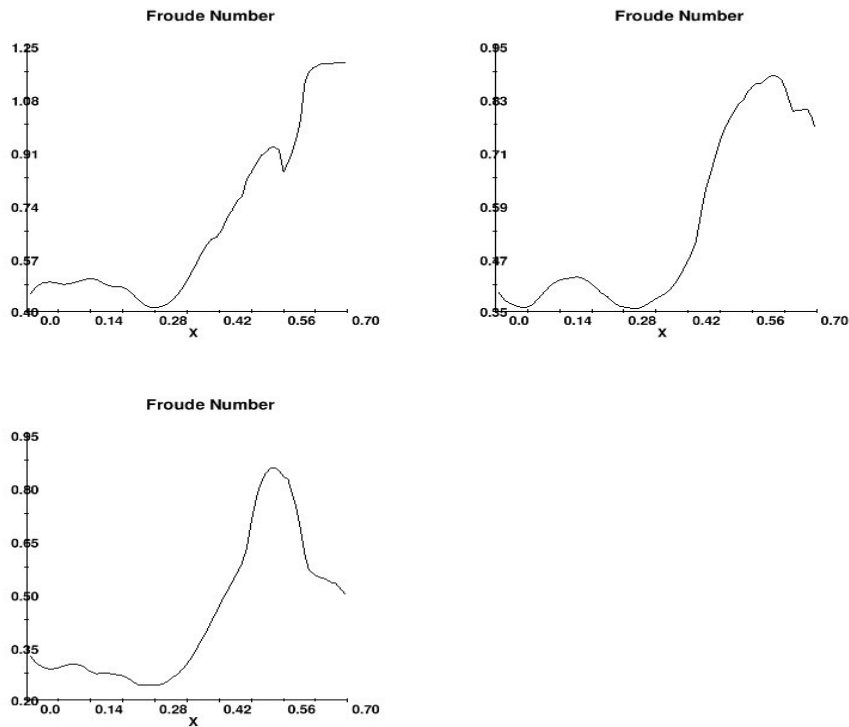
شکل ۳. تغییرات عدد فرود جریان در راستای طولی مخزن

در لحظه ۰/۶۵۲ ثانیه (شکل ۳، بالا چپ)، در فاصله میان راس جبهه موج تا بالادست ( $x = 0.14 - 0.7$  m)، منحنی فرود جریان بین مقادیر ۱/۵ تا ۳، جابه جا می گردد. در این حالت، چند نکته حائز اهمیت می باشد. نخست، نمودار فرود جریان شکل زنگوله ای نامتقارن به خود می گیرد. دوم، در فاصله زمانی  $t = 0.489 - 0.652$  s پیشروی جبهه موج از حالت تند شونده با  $Fr_{max} \approx 2.1$  به حالت کند شونده با  $Fr_{max} \approx 3$  تغییر می یابد. تغییر تقعر منحنی فرود جریان از حالت مقعر به محدب رخ می دهد. در لحظه ۰/۸۱۴ ثانیه (شکل ۳، بالا راست)، حرکت کند شونده موج مثبت تداوم می یابد. در حالی که، نمودار فرود جریان، همچنان شکل زنگوله ای نامتقارن دارد. در این وضعیت،  $Fr_{max} \approx 2.5$  می باشد که در فاصله  $x = 0.2$  از دیواره پائین دست رخ می دهد. همچنین، حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی، یعنی  $Fr > 1$  به  $Fr < 1$  تغییر می نماید. در لحظه ۱/۱۴ ثانیه (شکل ۳، راست پائین)، منحنی فرود جریان کاملاً به شکل Z برعکس، متمایل می گردد. این منحنی دارای دو اکسترمم  $Fr_{max} \approx 0.7$  و  $Fr_{max} \approx 1.4$  به ترتیب در فواصل  $x \approx 0.13$  و  $x \approx 0.5$  از دیواره پائین دست می باشد. در این لحظه، جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل می شود.

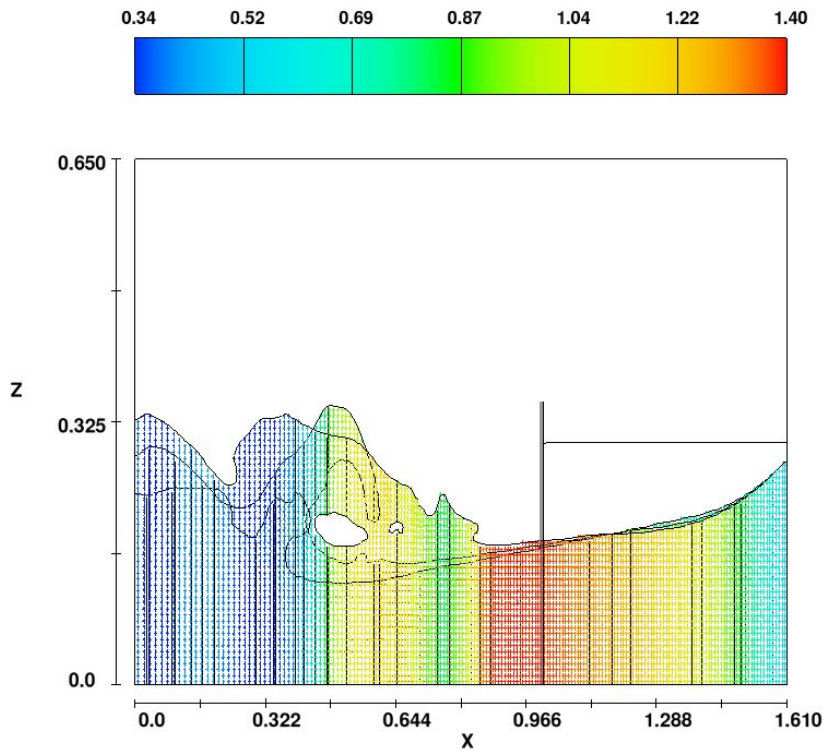


شکل ۱-۳. تغییرات منحنی سطح آزاد جریان متناظر شکل ۳ (شاخص رنگی نمایانگر مقادیر  $Fr$  می باشد) مطابق شکل ۱-۳، در لحظات  $0/625$  تا  $1/14$  ثانیه از شبیه سازی، به ترتیب بالاروی جریان ناشی از برخورد موج مثبت به دیواره پائین دست، تا شکل گیری جریان برگشتی از دیواره و استغراق جریان (شکل گیری موج ثانویه) رخ می دهد. در این حالت، شکل گیری فشار دینامیکی روی دیواره پائین دست به دلیل تبدیل هد سرعت ناشی از برخورد موج، به هد فشار، حائز اهمیت می باشد [۶].

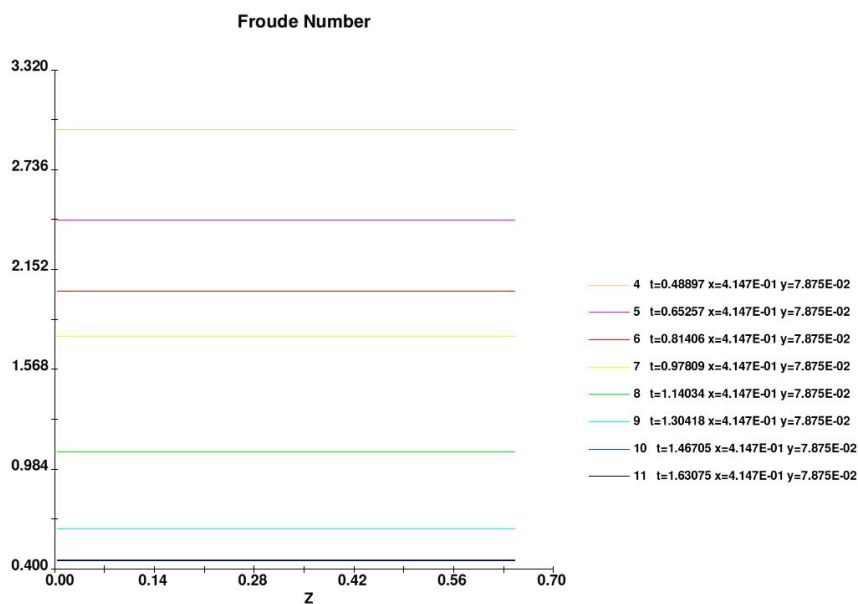
در شکل ۴، در فواصل زمانی  $1/316$  تا  $1/63$  ثانیه، تغییر شکل منحنی فرود، از  $Z$  برعکس به مقعر، با کاهش تعداد نقاط اکسترمم منحنی فرود جریان صورت می گیرد. در این حالت، جریان برگشتی (موج ثانویه) و استغراق جریان به طور کامل قابل مشاهده است. همچنین، جریان حالت زیر بحرانی تا نزدیک به بحرانی دارد.



شکل ۴. تغییرات عدد فرود جریان در راستای طولی مخزن



شکل ۴-۱. تغییرات منحنی سطح آزاد جریان متناظر شکل ۴ (شاخص رنگی نمایانگر مقادیر  $Fr$  می باشد)

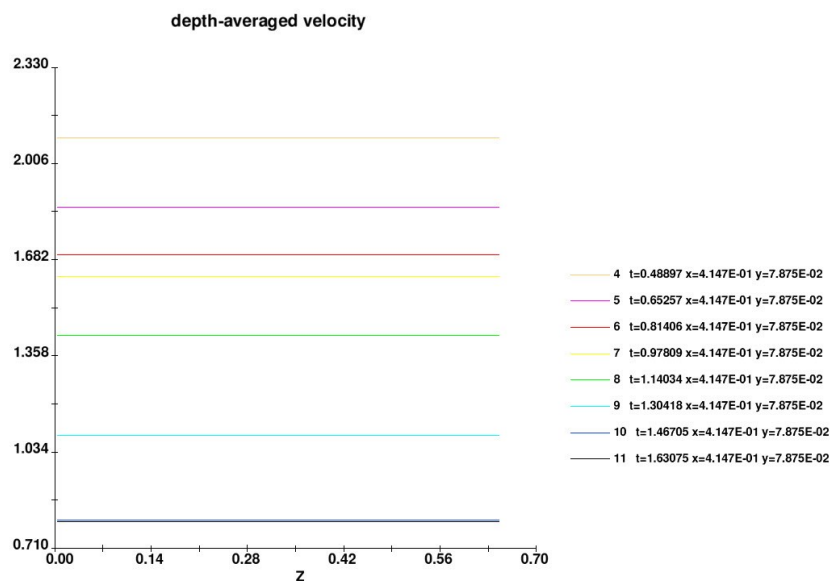


شکل ۵. مقادیر  $Fr$  در راستای عمقی  $z$





مطابق شکل ۵، مقادیر  $Fr$  جریان در راستای عمقی  $z$ ، متناظر با مقادیر  $Fr_{max}$  در راستای طولی جریان  $X$  می باشد. در این شکل، کلیه منحنی های  $Fr$  جریان، به صورت خط صاف می باشند. به طور بدیهی، علت این امر، محاسبه عدد فرود بر اساس سرعت متوسط گیری شده در عمق  $V_{da}$  می باشد.



شکل ۶. مقادیر  $V_{da}$  در راستای عمقی  $z$

در شکل ۶ مقادیر محاسبه شده سرعت  $V_{da}$  در لحظات زمانی ۰/۴۸۹ تا ۱/۶۳ ثانیه نمایش داده شده است. بیشترین و کمترین مقدار  $V_{da}$  در لحظات ۰/۴۸۹ و ۱/۶۳ ثانیه، متناظر با جریان های فوق بحرانی سریع و زیر بحرانی می باشد.

#### ۴. نتیجه گیری

با مطالعه جریان غیرماندگار سریع ناشی از شکست سد روی بستر ثابت افقی با معیار عدد فرود مشخص می گردد که نخست، تغییر حالت جریان به ترتیب بین حالات فوق بحرانی، بحرانی و زیر بحرانی از لحظه شروع تا پایان پدیده رخ می دهد. دوم، جریان در لحظات ابتدائی تا میانی، از حالت تندشونده با نرخ ملایم به تندشونده با نرخ سریع تبدیل می شود (به دلیل حاکم بودن رژیم جریان ثقلی). در لحظات میانی تا پایانی از تند شونده با نرخ سریع به کند شونده با نرخ ملایم تبدیل می شود (به دلیل اثرات اتلافی انرژی). سوم، گسیختگی نیمرخ سطح آزاد جریان بین لحظات میانی تا پایانی، از شدت قابل ملاحظه ای برخوردار است (شکل گیری جریان برگشتی و اثرات پس آیند آن). جابه جایی نیمرخ محدب شکل سطح آزاد جریان از دیواره بالادست به دیواره پائین دست مخزن صورت می گیرد.

می توان نتیجه گیری نمود که تحلیل فرودی جریان غیرماندگار سریع ناشی از شکست سد، یا مطالعه این نوع جریان بر اساس معیار عدد فرود، روشی قابل اطمینان و سودمند در تبیین مساله شکست سد و مطالعه رفتار جریان محسوب می شود.



۵. مراجع

1. Gharabaghi, B. and Sattar, A.M.A. (2017), Empirical models for longitudinal dispersion coefficient in natural. Journal of hydrology, DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.01.022.
2. Amara, L., Berreksi, A. and Achour, B. (2017), Quasi-2D Model for Computation of Supercritical Free Surface Flow in Sudden Expansion, Journal of applied mathematical modeling, DOI: 10.1016/j.apm.2017.01.071
3. Stelling, G.S. and Duinmeijer, S.P.A. (2003), A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows, International journal for numerical methods in fluids, 43, pp 1329-1354, DOI: 10.1002/flid.537
4. Bazin, P-H, Mignot, E. and Paquier, A. (2016), Computing flooding of crossroads with obstacles using a 2D numerical model, Journal of hydraulic research, DOI: 10.1080/00221686.2016.1217947.
5. Sebastien, E., Pierre, A. Michel, P. Abderrezzak Kamal, E.K, (2016), Overtopping-induced failure of non-cohesive, homogenous fluvial dikes, DOI: 10.1002/2016WR020053
6. Lobovsky, L., Botia-Vera, E., Castellana, F., Mas-Soler, J. and Souto-Iglesias, A. (2014), Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break, Journal of fluids and structures, DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.009.
7. Heydari, M., Khoshkonesh A. (2016), The comparison of the performance of Prandtl mixing length, turbulence kinetic energy, K-e, RNG and LES turbulence models in simulation of the positive wave motion caused by dam break on the erodible Bed, Indian journal of science and technology, 9 (7), pp 2-33, DOI: 17485/ijst/2016/v9i7/87856.
8. Banejad, H., Heydari, M. and Khoshkonesh, A. (2015), The comparison of the performance of single-equation models of turbulence kinetic energy and two k-e equation models in hydraulic simulation of dam failure on the mobile bed, International Conference on Modern Research in Agricultural Science and Environment, At Kuala Lumpur Malaysia.
9. Khoshkonesh, A., Banejad, H., Heydari, M. and (2015), Simulation of the dam-break on mobile bed by RANS equations, International Conference on Science and Engineering, At Dubai, UAE.
10. Khoshkonesh, A. and Mohajer B. (2016), Fundamentals of physical and hydraulic models design. Nazari publication, ISBN: 978-600-289-609-4.
11. Flow science, (2008), Flow-3D v 9-3 user manual, pp 393-394