

## مدل سازی پارامترهای جریان در مسیر تنداب سرریزهای با تغییر شیب ناگهانی

(مطالعه موردی: سرریز سد سورک)\*

«یادداشت پژوهشی»

سهیل عباسی<sup>(۱)</sup> حسین صمدی بروجنی<sup>(۲)</sup> روح الله فتاحی نافچی<sup>(۳)</sup> بهزاد قربانی<sup>(۴)</sup>

**چکیده** یکی از موارد مهم در طراحی تنداب سرریزها، بررسی خصوصیات و شرایط جریان در مسیر تنداب به واسطه فوق بحرانی بودن جریان است. در تحقیق حاضر ویژگی های هیدرولیکی جریان در تنداب سرریز سد سورک با استفاده از مدل سازی فیزیکی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل از جنس پلکسی گلاس با مقیاس ۱:۵۰ ساخته شد و برای مدل سازی ریاضی از نرم افزار فلونت استفاده گردید. آزمایش ها در ۵ دبی متفاوت انجام گرفت و پارامترهای فشار، سرعت و عمق جریان در محور مرکزی و کنار دیواره برداشت گردید. نتایج نشان داد در بین پارامترهای اندازه گیری شده نرم افزار فلونت، پارامتر سرعت با کمترین درصد خطا (۴/۳ درصد) و پارامتر عمق با بیشترین درصد خطا (۱۶/۹ درصد) شبیه سازی شده است. همچنین ضریب نش-سانتکلیف و ضریب تعیین محاسبه شده برای پارامترهای مورد نظر نشان دادند که نرم افزار فلونت توانایی شبیه سازی جریان را بر روی سرریزهای با تغییر شیب ناگهانی دارا می باشد. با توجه به نتایج شبیه سازی شده و معیارهای RMSE و NRMSE می توان دریافت در نرم افزار فلونت در صورت استفاده از روش حل عددی حجم محدود، مدل آشفتگی RNG k-ε روش تصحیح فشار SIMPLE و روش دو فازی VOF، بیشترین دقت در محاسبه پارامترهای فشار، سرعت و عمق جریان آب در تنداب سرریز مورد مطالعه حاصل می گردد.

**واژه های کلیدی** فشار، سرعت، سرریز، مدل فیزیکی، مدل سازی عددی.

### Modeling of the Flow Parameters of Chute Spillway with Change Slope (Case Study: Surk Dam Spillway)

S.Abbasi

H.Samadi-Boroujeni

R.Fattahi Nafchi

B.Gorbani

**Abstract** One of the important issues in the design of chute spillway is to study the flow characteristics in the chute path because the flow is supercritical. In this study, the hydraulic characteristic of flow in the chute spillway of Surk dam has been investigated using both physical and numerical modeling. The plexiglass physical model was made with a geometry scale of 1:50 and FLUENT software was used for mathematical modeling. The experiments were carried out at 5 different discharges and the parameters of pressure, velocity and depth of flow were measured in the central axis and at the side of the wall. The results showed that among the measured parameters of FLUENT model, the velocity parameter was simulated with the lowest average error rate (4.3%) and the depth parameter with the highest average error rate (16.9%). Also, the Nash-Sutcliff coefficient and the correlation coefficient for the parameters, indicated that FLUENT software has a good ability to simulate flow characteristics over the chute spillway with a suddenly change slope. Regarding the RMSE and NRMSE criteria, FLUENT model have had the highest accuracy in calculating the flow parameters by using finite volume numerical method, turbulent model k-ε, RNG, SIMPLE pressure correction method and VOF two-phase method.

**Key Words** Pressure, Velocity, Spillway, Physical and Numerical Modeling.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۸/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۲/۱۸ می باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

Email: Soheil.abbasi91@yahoo.com.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

(۴) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

### مقدمه

کنترل نسبت به تنداب بزرگتر است، بنابراین یک تبدیل بین این دو لازم است؛ البته پهنای تنداب به وسیله عواملی از قبیل توپوگرافی، هزینه ساخت و پهنای رودخانه پایاب محدود می شود.

بنابراین بررسی رفتار هیدرولیکی و شناخت پارامترهای هیدرولیکی سرریز در دبی های مختلف به کمک مدل های فیزیکی و عددی امکان پذیر است. تغییر شیب های ناگهانی در این نوع سازه ها می تواند زمینه ساز جدایش جریان شود و الگوی جریان را تغییر دهد که این امر می تواند مسائلی را در پایداری تنداب ایجاد نماید؛ بنابراین بررسی پارامترهای جریان (توزیع فشار و سرعت) در تغییر شیب های ناگهانی به خصوص در جریان های با سرعت زیاد که می تواند موجب عملکرد نامطلوب هیدرولیک جریان و ایجاد خسارت های شدید و یا شکست سازه گردد، کاملاً الزامی است [1]. مہری [۳] به شبیه سازی رفتار هیدرولیکی جریان بر روی سرریز سد بالارود با استفاده از مدل فیزیکی با مقیاس کوچک پرداخت. در این تحقیق مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۱۱۰ ساخته شد و در ۱۴ دبی مختلف پارامترهای مهم جریان شامل عمق، سرعت، فشار، نوسانات لحظه ای فشار، مشخصات جت پرتابی و بی نظمی های جریان با هدف حصول اطمینان از عملکرد مطلوب سرریز در دوران بهره برداری مورد اندازه گیری و مشاهده قرار گرفت. اهم نتایج وی نشان داد که تراز حداکثر بازشدگی در پیچه های سرریز و ارتفاع دیواره های جام پرتابی نیاز به اصلاح دارند و باتوجه به این که ضریب خوردگی اندازه گیری شده بیش از مقدار بحرانی آن است احتمال به وجود آمدن پدیده کاویتاسیون وجود ندارد. عارف پور [۴] به بررسی هیدرودینامیک جریان و منحنی تراژکتوری جت پایین دست در پرتابه جامی شکل سرریز سد بالارود در مقیاس ۱:۴۰ پرداخته است که نتایج وی حاکی از قابل قبول بودن دامنه تغییرات فشارهای دینامیکی بوده است. دورقی [۵] به بررسی رفتار هیدرودینامیک آب بر روی

سرریز یکی از سازه های مهم هر سد برای عبور سیلاب ها می باشد که تنداب آن باتوجه به شرایط توپوگرافی و شیب طبیعی زمین در مسیر ممکن است با شیب های مختلف طراحی و اجرا شود این امر تغییر شیب هایی ناگهانی در تنداب به وجود می آورد. بدیهی است در این وضعیت، سازه تنداب باید از نظر شرایط هیدرولیکی، به گونه ای طراحی شود که پدیده هایی همچون کاویتاسیون، ایجاد امواج ثانویه و... در محل تغییر شیب ناگهانی حادث نشوند و شرایط عبور ایمن سیلاب فراهم باشد [1].

بر اساس اطلاعات موجود، در موارد زیادی دلیل تخریب سرریزها، طراحی نامناسب تنداب ها بوده است. به دلیل اقتصادی و هیدرولیکی، مناسب تر است که تنداب، مستقیم و شیب کف آن از شیب بحرانی بیشتر باشد. با این حال شرایط زمین شناسی و مورفولوژیکی شیب دره و تکیه گاه که تنداب باید از آن پیروی کند، گاهی ممکن است موجب شود که در مسیر تنداب خم حاصل شود و هم چنین شیب کف آن در مسیر تغییر نماید. به طور کلی اصول زیر در طراحی تنداب مورد توجه قرار می گیرند [2].

۱. هرگونه هدایت و یا تغییر مسیر جریان، باید محدود به مکان هایی واقع در بالادست سازه کنترل (جایی که سرعت جریان کم است) باشد.
۲. در منطقه ای که جریان شتاب می گیرد، هدایت جریان باید مستقیم و متقارن باشد.
۳. هنگام عبور جریان از روی سازه کنترل، جریان به سرعت شتاب می گیرد. پایین دست آستانه، جریان فوق بحرانی است، سرعت آن افزایش می یابد و امکان ایجاد کاویتاسیون را فراهم می کند؛ بنابراین هرگونه تغییر در انحنای دیواره هادی جریان و کف تنداب واقع در پایین دست آستانه، باید با دقت زیاد انجام شود. از آنجایی که پهنه های بالادست آستانه وابسته به دبی عبوری از مقطع کنترل می باشد و اغلب پهنای در مقطع

کالویج [8] با استفاده از معادلات رینولدز میانگین‌گیری شده در زمان و نیز معادلات  $k-\varepsilon$  استاندارد به روش حجم محدود، جریان عبوری از روی سرریز را به صورت دوبعدی و سه‌بعدی تحلیل کردند. یوامی و همکاران [9] با ترکیب دو روش حجم محدود و المان محدود، جریان سطح آزاد روی سرریز را به صورت دوبعدی با شبکه نامنظم مثلثی شکل شبیه‌سازی کردند. چنرسری و همکاران [10] به بررسی جریان در یک سرریز پله‌کانی و هم‌چنین بدون پله با استفاده از روش‌های عددی پرداختند. این محققان برای اجرای مدل عددی، روش VOF را برای حل جریان دوفازی (آب و هوا) و مدل  $k-\varepsilon$  را برای حل آشفتگی جریان انتخاب کردند. حیدری [11] نیز جریان آشفته عبوری روی سرریز اوجی را با نرم‌افزار فلونتت به صورت دوبعدی بررسی کرد.

در این راستا در این پژوهش به بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در سرریز سد سورک و تغییر شیب ناگهانی موجود در تنداب این سازه با بهره‌گیری از مدل فیزیکی و مدل عددی فلونتت، در ۴ دبی مختلف پرداخته شده است. ضمن اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان در طول سرریز، بررسی تغییرات فشار، تغییرات سرعت و تغییرات عمق آب با استفاده از شبیه‌سازی جریان در نرم‌افزار فلونتت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و کاربرد این مدل در جریان از روی این قبیل سازه‌ها ارزیابی شده است.

### روش تحقیق

#### موقعیت و مشخصات سد و سرریز سد سورک

سد سورک، سدی خاکی با هسته رسی است که دارای یک سرریز اوجی با تنداب می‌باشد. این سد در نزدیکی روستای سورک در ۴۵ کیلومتری شهرکرد، مرکز استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد. حداکثر ارتفاع سد از بستر ۳۹ متر، طول تاج سد ۵۹۰ متر، حجم کل بدنه این سد ۱۲۵۰۰۰۰ مترمکعب، حجم مفید مخزن MCM ۲۵

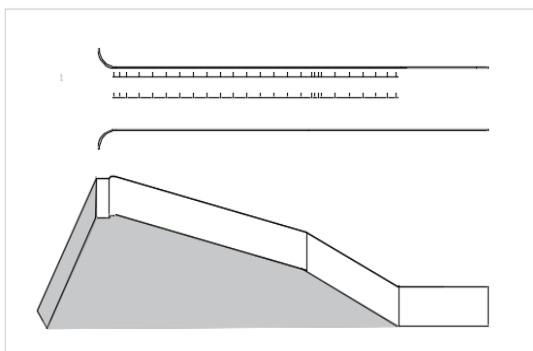
سرریز اوجی سه‌دهانه و تعیین رابطه دبی اشل و بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت سرریز سد بالارود در مقیاس ۱:۴۰ پرداخت. در این تحقیق وی در ابتدا به بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت سرریز پرداخت و بهینه‌سازی هم به صورت کمی و هم به صورت کیفی (مشاهده الگوی جریان، امواج عرضی، تلاطم و جداشدگی جریان) انجام شد. این تحقیق در ۶ دبی مختلف پارامترهای مهم جریان شامل عمق، سرعت، فشار استاتیکی، نوسانات لحظه‌ای فشار و بی‌نظمی‌های جریان را با هدف حصول اطمینان از عملکرد مطلوب سرریز در دوران بهره‌برداری، مورد اندازه‌گیری و مشاهده قرار داد. بررسی عمق آب روی سرریز و کفایت دیواره‌ها مشخص کرد که از دبی ۲۷۴ لیتر بر ثانیه بلافاصله بعد از تبدیل ابتدایی، عمق آب به بالای دیواره سرریز می‌رسد که نیازمند اصلاح می‌باشد. حداقل ضریب خوردگی که در آستانه سرریز و در دبی ۱۹۰/۳ لیتر بر ثانیه رخ داد، ۰/۸۷ بود ولی باتوجه به ضریب خوردگی بحرانی ( $\alpha$ ) احتمال رخ دادن پدیده کاویتاسیون در طول محور سرریز وجود ندارد.

علاوه بر مدل‌های فیزیکی، در مورد استفاده از مدل‌های عددی و کامپیوتری درباره جریان روی سرریزها کارهای زیادی صورت گرفته است. ساویج و جانسون [6] به بررسی پارامترهای جریان بر روی یک سرریز اوجی به وسیله مدل فیزیکی و مدل عددی (FLOW 3D) با روش متوسط‌گیری رینولدز (Reynolds- Averaged Navier- Stokes) پرداختند. آنها اظهار داشتند که همواره روش‌های عددی در صورتی که معادلات حل جریان به درستی انتخاب کردند جایگزین خوبی برای مدل‌های فیزیکی می‌باشند. ایشان از دیگر مزیت‌های مدل عددی، صرفه‌جویی در هزینه و زمان را برشمردند. کسدی [7] براساس جریان پتانسیل، به صورت دوبعدی فشار روی تاج سرریز را به وسیله مدل عددی بررسی کرد که نتایج آن تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. در اولسن و

درجه نسبت به افق نصب می‌گردد. در نهایت با برقراری ۴ دبی مختلف، سرعت جریان به وسیله لوله پیتوت، فشار به وسیله پیزومتر و پارامترهای مهم دیگر مثل عمق با وسایل موجود (عمق‌سنج) اندازه‌گیری می‌گردد. شکل (۱) طرح شماتیک مدل سرریز سد سورک را نشان می‌دهد. در شکل (۲) موقعیت اندازه‌گیری پارامترها نشان داده شده است.



شکل ۱ تصاویری از مدل فیزیکی سرریز سد سورک و تابلوی پیزومترها



شکل ۲ مکان اندازه‌گیری پارامترها

### تحلیل ابعادی

جریان در سرریزهای همراه تنداب براساس خصوصیات هندسی، سینماتیکی و دینامیکی جریان به صورت تابع (۱) به دست آمد:

و حجم مرده آن  $MCM \ 1/15$  است. عرض آستانه سرریز و تنداب برابر ۲۰ متر و شیب وجه بالادست آن ۱:۱ می‌باشد. باتوجه به مطالعات هیدرولوژی منطقه دبی طرح این سرریز ۲۳۱ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است. تنداب این سرریز در ابتدا زاویه‌ای ۱۴ درجه نسبت به افق دارد که در قسمت انتها به طور ناگهانی با زاویه ۲۸ درجه نسبت به افق به حوضچه آرامش متصل می‌گردد.

### ساخت مدل فیزیکی سرریز

آزمایش‌های این تحقیق در فلوم شیب‌پذیر به طول ۲۰ متر و ارتفاع و عرض ۶۰ سانتی‌متر مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام گرفته است به منظور انجام آزمایش‌ها، مدل فیزیکی در انتهای این فلوم نصب شده است. سیستم تغذیه و گردش آب نیز به تبع همان سیستم فلوم مذکور می‌باشد که شامل ایستگاه پمپاژ با ظرفیت ۷۰ لیتر بر ثانیه است. برای اندازه‌گیری دبی جریان، از سرریز مثلی واقع در انتهای سیستم استفاده می‌شود. باتوجه به امکانات آزمایشگاه، مقیاس مدل طوری تعیین شده است که اولاً فضای آزمایشگاهی از نظر هندسی کفایت ابعاد را داشته باشد، ثانیاً حداکثر دبی مورد نیاز در آزمایش مدل در رنج دبی سیستم تغذیه قرار گیرد. باتوجه به مطالب گفته شده و بررسی‌های صورت گرفته مقیاس مدل ۱:۵۰ انتخاب شده است که با این مقیاس امکان تشابه چه از نظر هندسی و چه از نظر دینامیکی فراهم می‌گردد. در این تحقیق برای ساخت مدل از مصالحی با جنس پلگسی گلاس استفاده شده است. صفحات برش خورده پلگسی به هم وصل می‌شوند و روی شاسی فلزی قرار داده می‌شوند. برای اندازه‌گیری فشار، در سرتاسر سرریز در مناطق با تغییر ناگهانی در شیب و ارتفاع، پیزومترهای با تراکم بیشتر نصب می‌شوند. برای سهولت کار پیزومترها روی یک تابلو قرار داده می‌شوند. برای رسیدن به دقت بیشتر در اندازه‌گیری ارتفاع آب در پیزومترها، تابلو با زاویه ۳۰

برای شبیه‌سازی جریان آشفتۀ چند فازی از مدل VOF و برای شبیه‌سازی جریان آشفتۀ از روش آشفتگی k-ε و مدل RNG استفاده می‌شود. در این مدل حل معادلات مربوط به روش حجم محدود می‌باشد. روش VOF که غالباً به‌عنوان روش حجم سیال نامیده می‌شود بر این اساس استوار است که دو یا چند سیال با هم ترکیب نمی‌شوند. برای هر فاز یک متغیر در مدل در نظر گرفته می‌شود که همان نسبت حجمی آن فاز در سلول محاسباتی است. در هر حجم کنترل مجموع نسبت‌های حجمی تمامی فازها یک می‌باشد. چن و همکاران [14] بیان می‌کنند که مرز بین دو فاز در روش حجم سیال نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که مقدار عددی پارامتر کسر حجمی در آن ۰/۵ باشد. اگر نسبت حجمی سیال در سلول به‌صورت  $aq = 0$  نشان داده شود یکی از سه شرط (الف)  $aq = 0$  سلول از سیال خالی می‌باشد، (ب)  $aq = 1$  سلول از سیال پر می‌باشد، (ج)  $0 < aq < 1$  سلول دارای سطح مشترک بین دو یا چند سیال است، وجود دارد [15]. اندرسون و همکاران [16] از معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر-استوکس به‌عنوان معادله حاکم بر جریان در سرریز استفاده کردند. در این تحقیق از روش متوسط رینولدزی برای حل معادلات در جریان آشفتۀ استفاده شده‌است. معادله پیوستگی رینولدز به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} (\overline{pu_j} + \overline{p'u'_j}) = 0 \quad (3)$$

فرم کلی معادله مومنتوم ناویر-استوکس متوسط رینولدزی به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta}{\delta t} [(\overline{p} + p')(\overline{u} + u')] + \\ & \frac{\delta}{\delta x} [(\overline{p} + p')(\overline{u} + u')(u + \overline{u}) + (\overline{p} + p') - \tau_{xx}] + \\ & \frac{\delta}{\delta x} [(\overline{p} + p')(\overline{u} + u')(v' + \overline{v})] + \\ & \frac{\delta}{\delta x} [(\overline{p} + p')(\overline{u} + u')(w' + \overline{w}) - \tau_{zx}] \end{aligned} \quad (4)$$

$$F(V, Y, B, P, H, S, Q, \sigma, \rho, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $B$  عرض کانال،  $V$  سرعت جریان،  $P$  فشار وارد روی سطح سرریز،  $S$  شیب طولی کانال،  $Q$  دبی جریان،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\mu$  لزجت دینامیکی و  $\rho$  چگالی مخصوص سیال می‌باشند.  $H$  ارتفاع استاتیکی روی سرریز و  $Y$  عمق آب است. تحلیل ابعادی با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام صورت می‌گیرد و پارامترهای مؤثر جریان به‌صورت معادله (۲) به‌دست می‌آید:

$$f_1 \left( \frac{p}{\rho V^2}, \frac{V^2}{gy}, \frac{\mu}{\rho V Y}, S, \frac{\sigma}{\rho V^2 Y}, \frac{B}{Y}, \frac{H}{Y} \right) \quad (2)$$

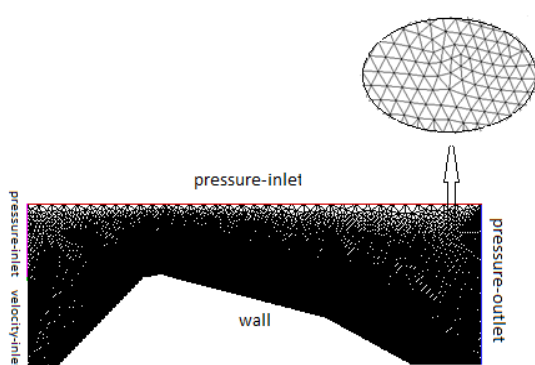
باتوجه به این‌که عرض در کانال تغییر نمی‌کند و شیب‌های موجود در مدل در طول آزمایش‌ها ثابت است می‌توان از این دو پارامتر چشم‌پوشی کرد. یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی سازه‌های آبی به حداقل رساندن اثر مقیاس می‌باشد و همواره باید توجه نمود برای ناچیز کردن اثر ویسکوزیته باید عدد رینولدز حداقل  $10^5$  و برای به حداقل رساندن اثر کشش سطحی عدد وبر برابر  $10^6$  باشد تا بتوان اثرات نامطلوب مقیاس را به حداقل رساند. گونزالس و جانسون [12] و باس و هاگر [13] باتوجه به نتایج این پژوهش و وجود شرایط ذکرشده در این پژوهش کشش سطحی و نیروی ویسکوزیته حداقل تأثیر را در اندازه‌گیری‌ها دارند.

### مدل عددی فلونت

در تحقیق حاضر جریان بر روی سرریز سد سورک با استفاده از مدل فیزیکی بررسی و سپس با مدل فلونت به‌روش حجم محدود شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی جریان در سرریز سد سورک با حل معادلات پیوستگی و مومنتوم با استفاده از مدل‌های آشفتگی، روش‌های بررسی جریان چند فازی، روش حل عددی حجم محدود و الگوریتم‌های حل هم‌زمان سرعت فشار SIMPLE انجام شد و نتایج با مدل فیزیکی مقایسه گردید.

بیشتر گردید. به طوری که در مدل با تعداد المان ۴۴۶۳۱ خطا مدل به صورت چشم گیری افزایش پیدا کرد؛ به همین منظور برای کلیه مدل ها شبکه یکسان با تعداد المان ۷۵۴۳۲ در نظر گرفته شد و برای شبیه سازی دقیق تر از المان لایه مرزی نیز در شبیه سازی عددی استفاده گردید.

شرایط مرزی مدل عددی همانند شرایط مدل فیزیکی در نظر گرفته شد که در شکل (۳) می توان نمای شبکه بندی مدل و شرایط مرزی را مشاهده نمود.



شکل ۳ شبکه بندی و شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای اجرای مدل عددی

### صحت سنجی و درصد خطای مدل فلوئنت

برای صحت سنجی مدل تعدادی از نتایج آزمایش هایی که در واسنجی شرکت داده نشده بودند استفاده گردید. در این تحقیق برای صحت سنجی (تشخیص میزان تقارب نتایج محاسبه ای و مشاهده ای) از معیار نش-ساتکلیف (معادله ۷) استفاده شد؛ این شاخص در بازه منفی بی نهایت و یک تغییر پذیر است و هر چه مقدار آن به عدد ۱ نزدیک باشد بیانگر تقارب بیشتر است و مقادیر کمتر از نیم برای این شاخص نشانه عدم تطابق و تقارب دو دسته داده خواهد بود. میانگین ضریب نش برای داده های آزمایشگاهی و عددی در جدول (۱) ارائه شده است.

مدل k-ε در واقع یکی از مدل های آشفتگی در حل معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر-استوکس متوسط رینولدزی به شمار می رود، که بر سه نوع استاندارد، RNG و Realizable می باشد. این مدل دارای دو معادله براساس k و ε است. در این مدل k معرف انرژی جنبشی اغتشاش و ε معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاش می باشد. چادری [17] معادلات انتقال در مدل RNG را به صورت زیر ارائه داده است.

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho k) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\rho k u_i) = \frac{\delta}{\delta x_i}(a_k u_{eff} \frac{\delta}{\delta x_i}) + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho \varepsilon) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\delta}{\delta x_i}(a_\varepsilon u_{eff}) + \quad (6)$$

$$C_{1z} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{az} G_b) - C_{2z} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_z$$

در معادلات مذکور  $a_k$  و  $a_\varepsilon$  به ترتیب عکس اعداد اغتشاش پراکتل برای  $\varepsilon$  و  $k$  و  $\mu_{eff}$ ، ویسکوزیته مؤثر می باشند.

برای معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ استهلاک انرژی اغتشاش، از روش گسسته سازی مرتبه دوم بالادست و برای معادله کسر حجمی از روش بازسازی هندسی و برای معادله فشار از روش PRESTO استفاده شده است.

### شبکه بندی مدل و شرایط مرزی

مدل سرریز سد سورک به کمک نرم افزار گمبیت و با استفاده از المان های مثلثی مش بندی شد. به منظور انجام فرایند مستقل از مش سه مدل با تعداد المان های ۸۷۴۱۲ و ۷۵۴۳۲ و ۶۴۶۲۴ و ۴۴۶۳۱ اجرا شد. در مقایسه نتایج دو مدل اول اختلاف محسوسی وجود نداشت. با کاهش تعداد المان های شبکه به ۶۴۶۲۴ و ۴۴۶۳۱ سلول اختلاف نتایج مدل فیزیکی و عددی

عددی نیز به همین صورت شبیه‌سازی شد. در چهار دبی ۷۳/۷۳، ۲۳۴/۷۳، ۱۷۶/۷۳، ۱۱۰/۸۰، ۷۳/۴۱ مترمکعب بر ثانیه مقدار ارتفاع آب نسبت به تاج سرریز در مدل فیزیکی پس از تبدیل به نمونه اصلی به ترتیب ۲، ۲/۵۳، ۱/۵۷، ۱/۲ متر و در مدل عددی به ترتیب ۲/۲، ۱/۶، ۱/۲۴ متر محاسبه گردید که این نتایج نشان می‌دهد مدل عددی به‌ازای دبی‌های فوق دارای بیشترین درصد خطا در کمترین دبی به میزان ۱۱/۸۴ بوده‌است. نتایج مدل عددی و مدل فیزیکی با توجه به میانگین RMSE و NRMSE، در جدول (۱) نزدیک به یکدیگر هستند و می‌توان به نتایج مدل عددی فلونت اعتماد کرد. در شکل‌های (۴) و (۶) داده‌های اندازه‌گیری مدل فیزیکی و محاسبات مدل عددی تغییرات عمق جریان در مسیر تنداب نشان داده شده‌است. برای بررسی هم‌خوانی نتایج مدل فیزیکی و عددی در شکل‌های (۵) و (۷) این داده‌ها نسبت به خط آرمانی (۴۵ درجه) ترسیم گردید و مدل برازش داده‌ها و هم‌چنین ضریب تعیین آن‌ها ( $R^2$ ) محاسبه شد که نشان‌دهنده هم‌خوانی قابل قبول آنها می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد به‌ازای دبی حداقل ضریب تعیین کمتر بوده‌است. در این دبی، مقادیر محاسباتی با مدل عددی ارقام کمتری نسبت به مدل فیزیکی به‌دست داده‌است. هم‌چنین براساس معیارهای RMSE و NRMSE همان‌گونه که در جدول (۲) دیده می‌شود، مقادیر این ضریب برای کلیه داده‌ها مقدار قابل قبولی بوده‌است و نشان‌دهنده قابلیت مناسب مدل عددی می‌باشد. شایان ذکر است، با کاهش دبی، میزان خطای مدل افزایش داشته‌است چراکه کالیبراسیون مدل برای دبی حداکثر صورت گرفته‌است.

هم‌چنین نتایج نشان می‌دهند نوسانات عمق آب در کناره دیواره تنداب بیشتر از نوسانات در محور مرکزی می‌باشد. کلیه اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند دیواره‌های هدایت سرریز و تنداب از نظر طراحی کفایت لازم را برای عبور آب دارند. موضوع دیگر

$$RE = 1 - \frac{\left( \frac{x_i - x_0}{x_i - \bar{x}} \right)^2}{\left( \frac{x_i - x_0}{x_i - \bar{x}} \right)^2} \quad (7)$$

در رابطه (۷) RE ضریب نش،  $x_i$  مقدار مشاهده‌ای،  $x_0$ : مقدار محاسبه‌ای،  $\bar{x}$ : میانگین مقدار مشاهده‌ای می‌باشد.

به‌منظور محاسبه درصد خطای مدل فلونت نسبت به مدل آزمایشگاهی از رابطه (۸) استفاده شده‌است که نتایج آن در جدول (۱) قابل مشاهده است.

$$\Delta d = \left| \frac{d_m - d_1}{d_1} \right| \times 100 \quad (8)$$

در رابطه فوق  $d_m$  مقدار پارامتر اندازه‌گیری شده در مدل عددی،  $d_1$  مقدار پارامتر محاسبه شده در مدل و  $\Delta d$  درصد خطای مدل می‌باشد.

جدول ۱ میانگین ضریب نش - ساتکلیف و میانگین خطا

نام پارامتر	میانگین ضریب نش - ساتکلیف	میانگین درصد خطا
فشار	۰/۸۵	۹/۳
سرعت	۰/۸۷	۴/۳
عمق آب	۰/۶۷	۱۶/۹

## نتایج و بحث

اندازه‌گیری پارامترهای جریان در مدل فیزیکی در چهار دبی ۷۳/۴۱ و ۱۱۰/۸۰ و ۱۷۶/۷۳ و ۲۳۷/۷۴ مترمکعب بر ثانیه و در ۵۲ موقعیت در امتداد خط وسط و کناره‌های مدل صورت گرفت مدل عددی نیز با استفاده از بحرانی‌ترین حالت یعنی دبی ۲۳۷/۷۴ مترمکعب بر ثانیه کالیبره و با استفاده از داده‌های مرتبط با دبی‌های دیگر، مدل صحت‌سنجی شد. در ادامه به بررسی نتایج به‌دست آمده از مدل فیزیکی و عددی پرداخته شده‌است.

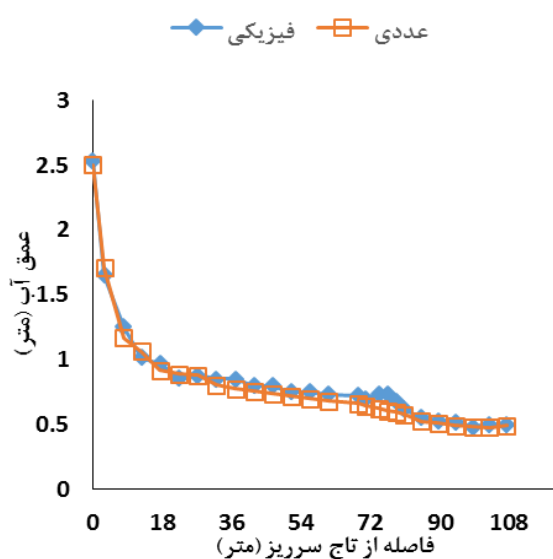
## بررسی تغییرات عمق جریان

تغییرات عمق آب از تاج سرریز تا انتهای تنداب به‌صورت کاهشی مشاهده گردید. این روند در مدل

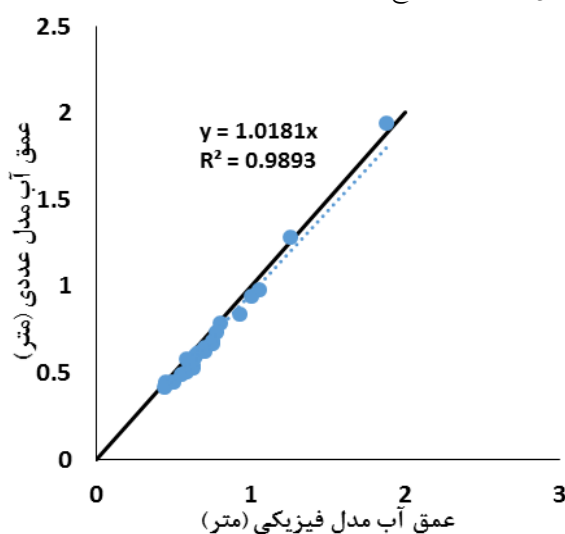
مسئله جدایش جریان در محل تغییر شیب است که در کلیه آزمایش‌ها، نتایج نشان می‌دهند در قسمت تغییر شیب ناگهانی مدل هیچ‌گونه جدایش جریان از سطح مشاهده نگردید اما در آزمایش‌های با دبی‌های مختلف، در ابتدای شیب دوم به دلیل اختلاط زیاد آب و هوا مقداری عمق آب افزایش پیدا کرده است.

جدول ۲ مقدار RMSE و NRMSE نتایج عمق آب به دست آمده مدل عددی نسبت به اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی

Q(m <sup>3</sup> /s)	۲۳۴/۷۳	۱۷۶/۷۳	۱۵۱/۸	۱۱۰/۸	۷۳/۴۱
RMSE (متر)	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹	۰/۰۵۸	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳
NRMSE (%)	۶/۹۸	۸/۱۲	۱۰/۰۸	۱۱/۷۷	۱۱/۸۴



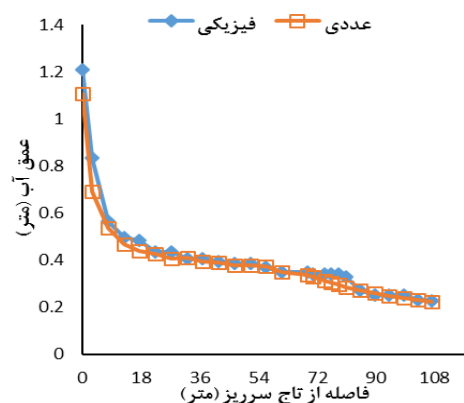
شکل ۳ تغییرات سطح آب در مدل فیزیکی و عددی به ازای دبی حداکثر



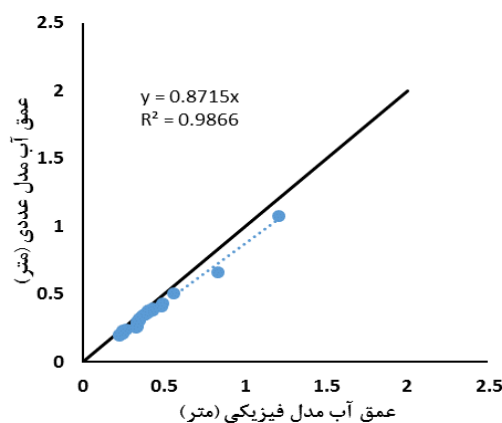
شکل ۴ مقایسه داده‌های عمق آب در مدل فیزیکی و مدل عددی به ازای دبی حداکثر



شیب تندتر کاهش پیدا کرده‌است و به‌نظر می‌رسد علت آن افت سطح آب از تاج سرریز به قسمت تنداب باشد. کاهش فشار در طول مدل فیزیکی سرریز سد سورک به‌صورتی بود که در هیچ‌یک از موقعیت‌های نصب پیزومتر، فشار منفی مشاهده نگردید. باتوجه به وجود سرعت‌های بالا در این تنداب اگر در بتن این قسمت درز و شکاف و ناهمواری به‌وجود آید، ایجاد فشار منفی که زمینه‌ساز کاویتاسون می‌باشد دور از انتظار نیست. علاوه‌بر آن هرچه دبی کاهش پیدا کرده‌است نوسانات مقدار فشار در طول سرریز افزایش پیدا کرده‌است. این نوسانات از دبی چهارم به بعد نمایان‌تر شده‌است. احتمال می‌رود باتوجه به این نکته که با کاهش دبی، عمق آب نیز کاهش پیدا کرده‌است، عملکرد پیزومترها برای اندازه‌گیری فشار در عمق کم و سرعت بالا، کاهش یافته‌است. هم‌چنین در کلیه دبی‌ها نوسانات فشار در طول سرریز در محور مرکز کمتر از محور کناری بوده‌است و علت این نکته می‌تواند علاوه‌بر ضعف پیزومتر در اندازه‌گیری فشارهای کم تأثیر دیواره‌های هدایت و امواج عرضی (cross wave) تولیدشده بر روی جریان و سطح آب باشد که در اندازه‌گیری پارامتر فشار، در سرعت بالا تأثیر داشته‌اند. هم‌چنین برای بررسی هم‌خوانی نتایج مدل فیزیکی و عددی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) این داده‌ها نسبت به خط آرمانی (۴۵ درجه) ترسیم و مدل برازش داده‌ها و هم‌چنین ضریب تعیین آنها ( $R^2$ ) محاسبه شد که نشان‌دهنده هم‌خوانی قابل قبول آنها می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند به‌ازای دبی حداقل ضریب تعیین کمتر بوده‌است. در این دبی، مقادیر محاسباتی با مدل عددی ارقام بیشتری نسبت به مدل فیزیکی به‌دست داده‌است. هم‌چنین براساس معیارهای RMSE و NRMSE همان‌گونه که در جدول (۳) دیده می‌شود، مقادیر این ضریب برای کلیه داده‌ها مقدار قابل قبولی است و نشان‌دهنده قابلیت مناسب مدل عددی می‌باشد. شایان ذکر است، با کاهش دبی، میزان خطای مدل افزایش داشته‌است چراکه کالیبراسیون مدل برای دبی حداکثر صورت گرفته‌است.



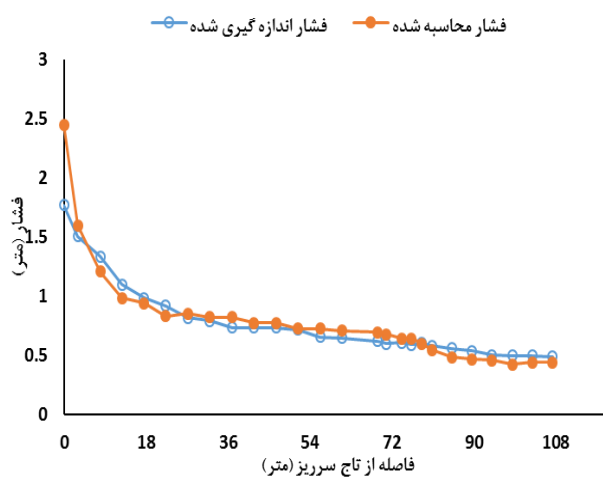
شکل ۴ تغییرات سطح آب در مدل فیزیکی و عددی به‌ازای دبی حداکثر



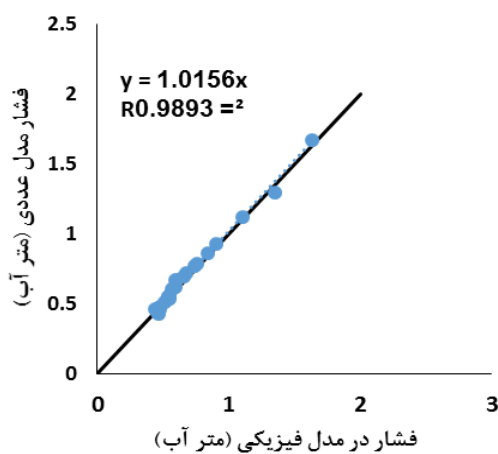
شکل ۷ مقایسه داده‌های عمق آب در مدل فیزیکی و مدل عددی به‌ازای دبی حداقل

### بررسی توزیع فشار

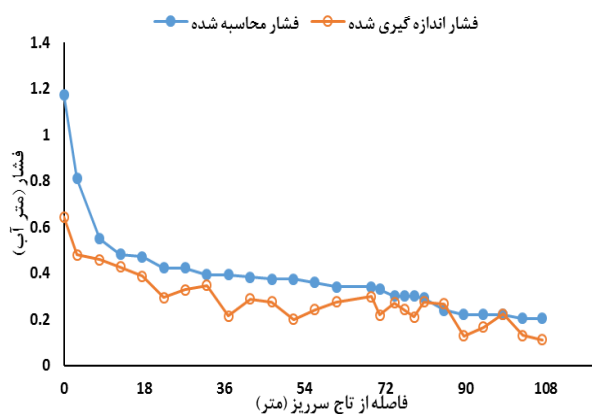
اندازه‌گیری فشار به‌وسیله پیزومتر انجام شد و ۵۱ موقعیت برای اندازه‌گیری پارامتر انتخاب گردید. این موقعیت‌ها به‌صورتی بود که ۲۶ ایستگاه در محور مرکزی و ۲۵ ایستگاه در محور کناره دیواره در فاصله ۳ سانتی‌متری مدل فیزیکی یا ۱/۵ متری نمونه اصلی اندازه‌گیری شد. شکل‌های (۸) و (۱۰) فشار را بر روی سرریز در محور مرکزی تنداب به‌ترتیب به‌ازای دبی‌های حداقل و حداکثر نشان می‌دهند. روند هر دو نمودار مشابه بوده و از تاج تا پای تنداب مقدار فشار کاهش پیدا کرده‌است. روند نمودارها در این شکل‌ها نشان می‌دهد که در پیزومترهای شماره ۱ تا ۳ مقدار فشار با



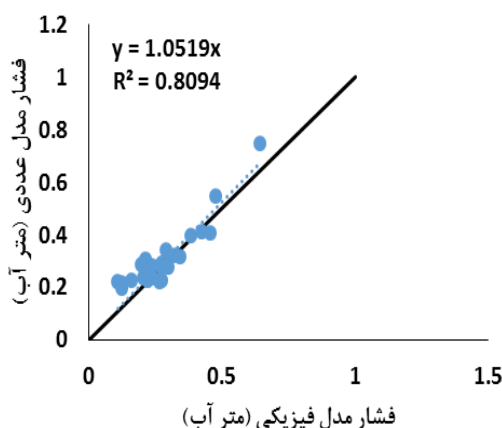
شکل ۸ تغییرات فشار اندازه گیری شده و فشار محاسبه شده به ازای دبی حداکثر



شکل ۹ مقایسه داده های فشار در مدل فیزیکی و عددی به ازای دبی حداکثر



شکل ۱۰ تغییرات فشار اندازه گیری شده و فشار محاسبه شده به ازای دبی حداکثر



شکل ۱۱ مقایسه داده‌های فشار در مدل فیزیکی و عددی به‌ازای دبی حداقل

جدول ۳ مقدار RMSE و NRMSE نتایج فشار به‌دست‌آمده در مدل عددی نسبت به اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی

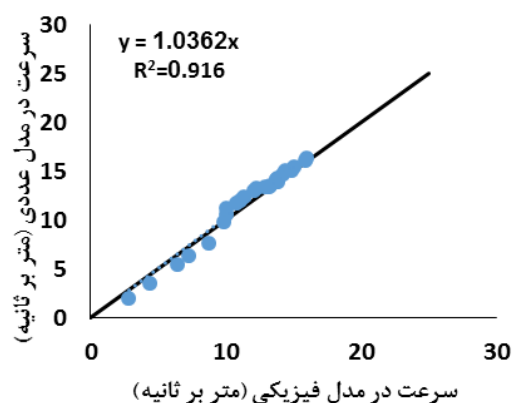
Q (m <sup>3</sup> /s)	۲۳۴/۷۳	۱۷۶/۷۳	۱۵۱/۸	۱۱۰/۸	۷۳/۴۱
RMSE (متر)	۰/۰۴۱	۰/۰۴۳	۰/۰۴۸	۰/۰۵۱	۰/۰۵۹
NRMSE(%)	۵/۳۴	۶/۳۷	۸/۵۵	۱۱/۶۵	۱۶/۱۴

نسبت به خط آرمانی (۴۵ درجه) ترسیم گردید و مدل برازش داده‌ها و هم‌چنین ضریب تعیین آنها ( $R^2$ ) محاسبه شد که نشان‌دهنده هم‌خوانی قابل قبول آنها می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که به‌ازای دبی حداقل ضریب تعیین کمتر بوده‌است. هم‌چنین براساس معیارهای RMSE و NRMSE همان‌گونه که در جدول (۴) دیده می‌شود، مقادیر این ضریب برای کلیه داده‌ها مقدار قابل قبولی است و نشان‌دهنده قابلیت مناسب مدل عددی می‌باشد. شایان ذکر است با کاهش دبی، میزان خطای مدل افزایش داشته چراکه کالیبراسیون مدل برای دبی حداکثر صورت گرفته‌است.

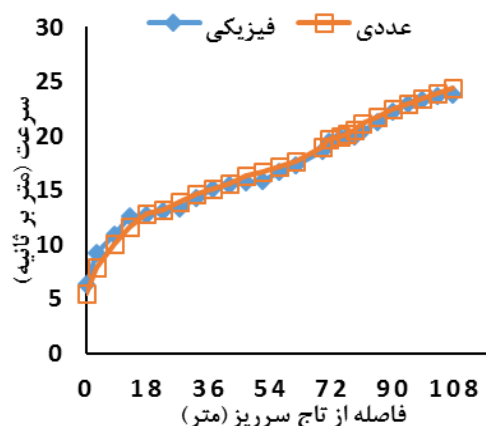
باتوجه به میانگین ضریب نش-ساتکلیف و میانگین درصد خطای داده‌های سرعت، در جدول (۱) نتایج عددی تشابه خوبی با مشاهدات آزمایشگاهی داشته‌است. شکل‌های (۱۱ و ۱۲) مقایسه نتایج سرعت در مرکز و دیواره را نشان می‌دهد. به‌دلیل نوسانات موجود در کناره دیواره مدل نتایج اندازه‌گیری‌شده در محور مرکزی دارای ضریب تعیین ( $R^2$ ) بهتری می‌باشد.

### بررسی تغییرات سرعت

شکل‌های (۱۲) و (۱۴) تغییرات سرعت جریان را بر روی سرریز در محور مرکزی تنداب به‌ترتیب به‌ازای دبی‌های حداقل و حداکثر نشان می‌دهند. روند هر دو نمودار مشابه بوده و از تاج تا پای تنداب مقدار سرعت افزایش پیدا کرده‌است. باتوجه به این نتایج، بعد از تغییر شیب ناگهانی تنداب، سرعت جریان با آهنگ تندتری افزایش یافته‌است. بیشترین سرعت اندازه‌گیری‌شده در دبی ۲۳۴/۷۳ و در فاصله ۱۰۷/۳ متری از تاج سرریز به‌دست آمده‌است و مقدار آن در مدل فیزیکی ۲۳/۱۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده‌است. این مقدار در مدل عددی فلونت معادل ۲۴/۵۸ متر بر ثانیه محاسبه گردید که نشان‌دهنده خطای ۶/۴ درصدی در مدل عددی است. وجود سرعت‌های بالا در این تنداب در صورتی که در بتن این قسمت درز و شکاف و ناهمواری به‌وجود آید، زمینه‌ساز وقوع کاویتاسون می‌باشد. هم‌چنین برای بررسی هم‌خوانی نتایج مدل فیزیکی و عددی در شکل‌های (۱۳) و (۱۵) این داده‌ها



شکل ۱۵ مقایسه داده‌های سرعت در مدل فیزیکی و عددی (دبی پنجم)



شکل ۱۲ تغییرات سرعت در مدل فیزیکی و عددی (دبی اول)

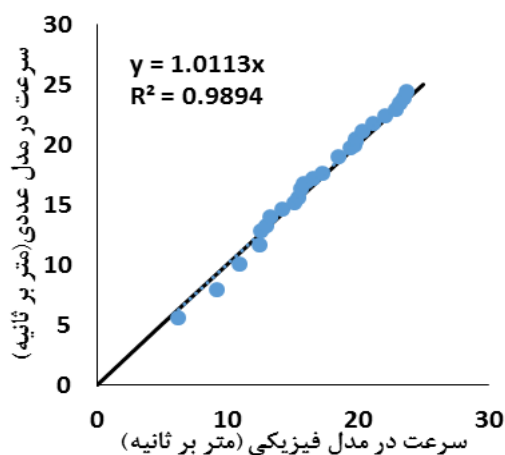
جدول ۴ مقدار RMSE و NRMSE نتایج سرعت به دست آمده در مدل عددی نسبت به اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی

Q(m <sup>3</sup> /s)	۲۳۴/۷۳	۱۷۶/۷۳	۱۵۱/۸	۱۱۰/۸	۷۳/۴۱
RMSE	۰/۵۷	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۸۷	۰/۷۹
NRMSE	۳/۴	۵/۲	۶/۷	۶/۶	۶/۸

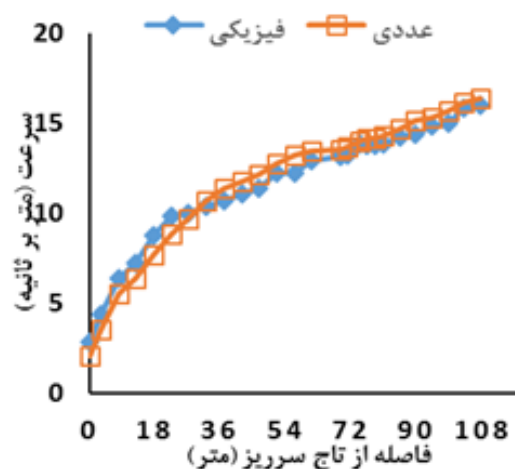
### نتیجه گیری

با بررسی نتایج مدل فیزیکی و عددی می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- با اندازه‌گیری و محاسبه فشار در ۴ دبی متفاوت به ویژه دبی طرح، در طول سرریز سد سورک هیچ‌گونه فشار منفی مشاهده و محاسبه نگردید.
- بررسی پارامتر عمق جریان در ۲۶ موقعیت مورد نظر در مسیر تنداب سرریز سورک نشان می‌دهد که دیواره‌ها هدایت کفایت لازم را برای عبور دبی طرح دارند و در مکان تغییر شیب ناگهانی جدایش جریان وجود ندارد.
- در این پژوهش در بین پارامترهای اندازه‌گیری‌شده، نرم‌افزار فلونت پارامتر سرعت را با کمترین میانگین در صد خطا (۴/۳ در صد) و پارامتر عمق را با بیشترین میانگین در صد خطا (۱۶/۹ درصد) شبیه‌سازی نمود.



شکل ۱۳ مقایسه داده‌های سرعت در مدل فیزیکی و عددی (دبی اول)



شکل ۱۴ تغییرات سرعت در مدل فیزیکی و عددی (دبی پنجم)

فازی VOF به خوبی می‌توان پارامترهای فشار، سرعت و عمق آب را برای بررسی تذبذب‌های با تغییر شیب ناگهانی شبیه‌سازی نمود. همچنین از مدل فلونتت واسنجی شده در این تحقیق می‌توان برای بهبود عملکرد سرریز و تذبذب سد سورک استفاده نمود.

### سپاس‌گزاری

تحقیق حاضر با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد به انجام رسید که بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی اعلام می‌گردد.

۴. ضریب نش - ساتکلیف و ضریب تعیین محاسبه شده برای پارامترهای موردنظر در محدوده قابل قبولی توانایی نرم‌افزار فلونتت را برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای با تغییر شیب ناگهانی اثبات می‌کنند. باتوجه به ضریب تعیین به‌دست آمده برای داده‌های مدل عددی، مشخص گردید مدل عددی پارامترهای محور مرکزی تذبذب را با دقت بیشتری نسبت به داده‌های کناره دیواره شبیه‌سازی نموده است.

۵. باتوجه به نتایج شبیه‌سازی شده و معیارهای RMSE و NRMSE می‌توان ادعا نمود در نرم‌افزار فلونتت با استفاده از روش حجم محدود، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ ، RNG، روش تصیح فشار SIMPLE و روش دو

### مراجع

- Ozemtsev, Y. P., "Cavitation Destruction of Concrete and Protective Facings under Natural Conditions", *Power Technology and Engineering*, Vol. 3, No.1, Pp.24-29, (1969).
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR), *Design of Small Chanel*. 3rd edn. USA 860p, (1978).
- مهری، م، «مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی جریان روی سرریز سد بالارود با مقیاس کوچک»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، (۱۳۸۵).
- عارف پور، م، «بررسی هیدرودینامیک جریان و منحنی تراژکتوری جت پایین دست در پرتابه جامی شکل (مطالعه موردی سد بالارود)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، (۱۳۸۸).
- دورقی، ا، «رفتار هیدرولیکی آب بر روی سرریز اوجی سه‌دهانه و تعیین رابطه دبی-اشل و بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت (مطالعه موردی سد بالارود)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، (۱۳۸۸).
- Savage, M. And Johnson, "Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical model Case Study", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No.8, Pp. 640-649, (2001).
- Cassidy, J. J., "Irrotational Flow over Spillways of Finite Height", *Journal of Hydraulic Engineering*, Division ASCE, Vol. 91, No.6, Pp.155-173, (1965).
- Olsen, N. R. B. And Kjellesvig, H. M., "Three Dimensional Numerical Flow Modeling for Estimation of Spillway Capacity, USA", *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 36, No.5, Pp.775-784, (1998).
- Unami, K., Kawachi, T., Munir Babar, M. and Itagaki, H., "Two Dimensional Numerical Model of Spillway Flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No.4, Pp.369-375, (1999).

10. Chinnarasri, D. K and Pierre, Y., "Model of Flow over Spillways by Computational Fluid Dynamics", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 167, No.3, Pp. 164-175, (2012).
۱۱. حیدری، م. «شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
12. Gonzalez, A.C. and Chanson, H "Scale effects in moderate slope stepped spillways experimental studies in air-water flows", *In The 8<sup>th</sup> National Conference on Hydraulics in Water Engineering*, Gold Coast, Australia, (2004).
13. Boes, R. and Hager, W. H., "Two-phase characteristics of stepped spillways", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No.9, Pp. 661–670, (2003).
14. Chen, Q. Dai, G. and Liu, H. "Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128: Pp. 683-688, (2002).
15. Dargahi, B., "Experimental Study and 3D Numerical Simulations for a Sree over Flow Spillway", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, pp. 899-907, (2004).
16. Anderson, D., Tannehill, J. and Pletcher, R., "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation", New York, (1984).
17. Chaudhury, D., "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling. Fluent Inc", Technical Memorandum TM-107, (1993).