

## تأثیر هندسه مقاطع میله‌ها در عملکرد آبگیر کفی با استفاده از مدل عددی

خسرو حسینی<sup>۱\*</sup>، شهاب ریخته‌گر مشهد<sup>۲</sup>، حجت کرمی<sup>۳</sup> و کیوان بینا<sup>۴</sup>

### چکیده

آبگیرهای کفی با توجه به سادگی اجرا و هزینه به نسبت کم، کاربردهای وسیعی در انحراف آب برای نیروگاه‌های کوچک برقابی، صنعت و کشاورزی در رودخانه‌های کوهستانی دارند. یک مدل ریاضی واسنجی شده با مدل فیزیکی، امکان تعیین برخی از پارامترها را که در مدل فیزیکی قابل اندازه‌گیری نیستند و یا ابزار مناسب اندازه‌گیری در دسترس نیست فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر از مدل سه‌بعدی Flow-3D برای شبیه‌سازی عملکرد آبگیر کفی یک نمونه آزمایشگاهی استفاده شد. نتیجه واسنجی دبی استحصال شده، در مدل عددی در خصوص ارتفاع زبری ( $0.02$  میلی‌متر) و مدل آشفتگی (RNG k- $\epsilon$ ) منجر به ضریب همبستگی  $0.98$  بین نتایج عددی و مشاهدات شد. پس از واسنجی مدل عددی، میزان آبگذری، پروفیل سرعت، پروفیل فشار و شیوه خروج آب از آبگیر برای هشت نوع مقطع عرضی جدید کف مشبک با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت، مقاطع عرضی میله با هندسه دایره‌ای، لوزی و ترکیب دایره و لوزی از لحاظ عملکرد، کارایی و اجرایی بودن با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد آبگذری در میله‌های با مقطع بالا مثلی و پایین دایره‌ای بیشتر بوده؛ اما در مقاطع بالا دایره‌ای و پایین مثلی، توزیع سرعت در طول میله یکنواخت‌تر است.

**واژه‌های کلیدی:** آبگیر کف، پروفیل میله‌های آبگیر، دبی منحرف‌شده، کف مشبک، نرم‌افزار Flow3D.

**ارجاع:** خسرو حسینی خ. ریخته‌گر مشهد ش. کرمی ح. و بینا ک. ۱۳۹۸. تأثیر هندسه مقاطع میله‌ها در عملکرد آبگیر کفی با استفاده از مدل عددی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۲: ۹-۱۸.

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۴- استادیار گروه عمران، مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی غیر دولتی خاوران مشهد.

\* نویسنده مسئول: [khoseini@semnan.ac.ir](mailto:khoseini@semnan.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۲۴

## مقدمه

کمترین رسوب وارد آبگیر می‌شود. کمان‌بدست و شفاعی بجستان (۱۳۸۷) خصوصیات شیب و درصد بازشدگی کف مشبک را با استفاده از مدل فیزیکی با میله‌های دارای مقطع دایره‌ای و موازی جریان مطالعه کردند و یک رابطه رگرسیونی خطی برای ضریب تخلیه کف مشبک در حالت آب زلال (بدون رسوب) پیشنهاد دادند. کمان‌بدست و همکاران (۲۰۱۲) به‌وسیله نرم‌افزار Flow-3D مدل آزمایشگاهی کف مشبک خود را مدل‌سازی عددی کردند و با نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده کمان‌بدست و شفاعی بجستان (۱۳۸۷) مقایسه نمودند؛ لیکن در مدل عددی کمان‌بدست و همکاران (۲۰۱۲) به نحوه مدل‌سازی اشاره‌ای نشده است. بینا و همکاران (۱۳۸۸) روی انواع مختلف آبگیرهای کفی با آرایش امتداد میله‌ها در امتداد جریان و عمود بر جریان آزمایش‌هایی انجام دادند. مطابق این تحقیقات، آبگیرهای کفی ساخته شده از میله‌های طولی (در امتداد جریان رودخانه) قادر به انحراف دبی بیشتری نسبت به کف‌های مشبک ساخته شده از میله‌های عرضی (عمود بر امتداد جریان) هستند. ریگتی و لانزونی (۲۰۰۸) تحقیقاتی را روی یک مدل فیزیکی از آبگیر کفی با میله‌های طولی، در کانالی با طول ۱۲ متر و عرض ۰/۲۵ متر که آبگیر کفی در فاصله ۶ متری از بالادست کانال نصب شده بود، انجام دادند. آن‌ها دو آزمایش را در شرایط آب زلال (بدون رسوب) و حالت جریان فوق بحرانی در بالادست کف مشبک، انجام دادند و در نهایت رابطه‌ای برای ضریب آبگذری سرریز ارائه کردند. یادآوری می‌شود که هزینه زیاد مدل‌های فیزیکی، نتایج غیرقابل‌تعمیم، محدودیت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری و زمان‌بر بودن آن‌ها، استفاده از این مدل‌ها را با محدودیت روبرو می‌کند. هدف از انجام پژوهش حاضر، تهیه یک مدل عددی بر پایه مدل فیزیکی است؛ به‌صورتی که نتایج عددی با اطلاعات اندازه‌گیری شده تطابق کامل داشته باشند. در ادامه، هندسه مناسب مقاطع عرضی میله‌ها با بررسی عملکرد هیدرولیکی آن‌ها و با استفاده از مدل عددی تعیین شده است.

## مواد و روش‌ها

## مدل آزمایشگاهی

ریگتی و لانزونی در سال ۲۰۰۸ تحقیقاتی را روی یک مدل فیزیکی از آبگیر کفی با میله‌های طولی، در کانالی با

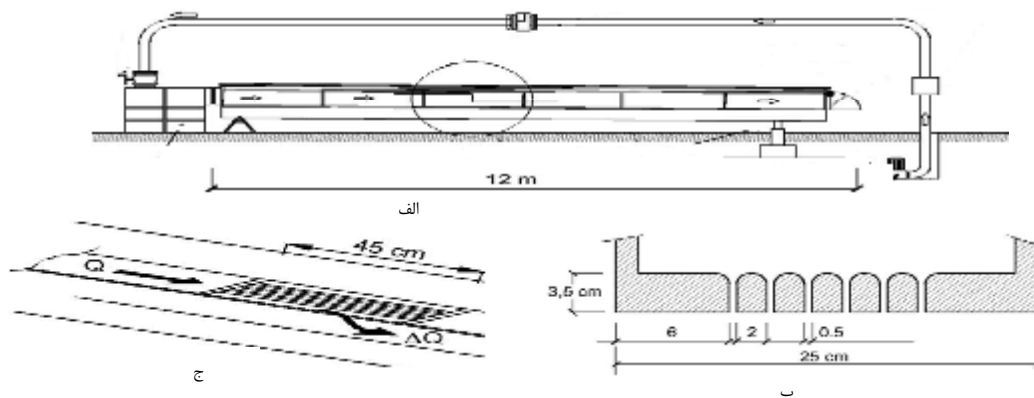
در کف مشبک یا آبگیر کفی، سازه‌ای است که وظیفه آبیگری از رودخانه‌های با شیب تند و انتقال آن به منظورهای مختلف از جمله به حرکت درآوردن توربین‌های نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک را بر عهده دارد. در این‌گونه رودخانه‌ها، آبیگری به روش‌های متعارف هزینه‌های زیادی را در دارد و در مواردی نیز پایدارترین سازه‌ها به‌شدت در معرض خطر هستند (بینا و همکاران، ۱۳۹۱). از جمله راه‌های رایج در شبیه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی، استفاده از روش‌های عددی است. در این روش‌ها، برخلاف مکانیک سیالات تجربی، تغییر در پارامترها و شرایط مرزی به‌راحتی برای نیل به اهداف طراحی میسر است. اورث و همکاران (۱۹۵۴) نخستین توصیف هیدرولیکی آبگیر تحتانی را ارائه دادند و به بررسی آبیگرهایی با شیب طولی ۲۰٪ و پنج نوع هندسه گوناگون مقاطع عرضی میله‌های آبگیر تحتانی پرداختند. براساس تحقیقات ایشان، کمترین طول آبگیر با استفاده از میله‌هایی با مقطع تخم‌مرغی به دست آمد. خواجه و همکاران (۱۳۸۸) هیدرولیک جریان در آبیگرها با کف مشبک را با استفاده از نتایج مدل فیزیکی ساخته‌شده به‌وسیله دوربیر و همکاران (۲۰۰۳)، با نرم‌افزار Fluent به‌صورت سه‌بعدی، شبیه‌سازی و طول خیس‌شدگی را در این آبگیر تحلیل و بررسی کردند. افزون بر مقایسه نتایج عددی با نمونه فیزیکی یادشده، محاسبات تحلیلی دیگر پژوهشگران از جمله نوسدا (۱۹۵۶) و کونترمن و بووارد (۱۹۵۴) نیز در خصوص عملکرد کف مشبک نیز با نتایج عددی به‌دست‌آمده، مقایسه شد. نظر به این که شرایط یکسانی در مدل‌های ارائه شده وجود نداشت، خواجه و همکاران (۱۳۸۸) نتوانستند به یک نتیجه‌گیری قطعی دست یابند. کاستیلو و همکاران (۲۰۱۳) مدل‌سازی عددی آبگیر کفی را با استفاده از نرم‌افزار Flow3D برای جریان با غلظت‌های مختلف رسوب انجام دادند و نتیجه گرفتند پروفیل سطح آب و طول خیس‌شدگی میله‌های آبگیر با افزایش غلظت رسوب، افزایش می‌یابد. کمان‌بدست و شفاعی بجستان (۱۳۸۵) درباره فلومی به عرض ۶۰ سانتی‌متر آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر شیب‌های مختلف در تعیین ضریب تخلیه آبگیر کفی با تکیه بر هیدرولیک رسوب انجام دادند. بررسی آن‌ها با شیب‌های مختلف کف و دانه‌بندی‌های متفاوت مصالح بستر نشان داد که در شیب کف ۳۰ درجه

که در آن،  $x$  فاصله افقی از ابتدای کف مشبک؛  $E_0$  انرژی مخصوص جریان نزدیک‌شونده به کف مشبک؛  $C_{d0}$  ضریب تخلیه در شرایط استاتیکی (مقدار ضریب تخلیه در شرایطی که  $Fr_H$  به سمت صفر میل کند) و  $Fr_H$  عدد فرود اصلاح‌شده جریان نزدیک‌شونده به کف مشبک ( $Fr_H = V_0 / \sqrt{gE_0}$ ) و ( $V_0$  سرعت جریان نزدیک‌شونده به کف مشبک) هستند.

طول ۱۲ متر و عرض ۰/۲۵ متر که آبگیر کفی در فاصله ۶ متری از بالادست کانال نصب‌شده بود، انجام دادند. شکل ۱ مشخصات فلوم و هندسه آبگیر کف مشبک استفاده‌شده را نشان می‌دهد. این پژوهشگران مطالعات خود را روی ضریب تخلیه آبگیر کف مشبک متمرکز و معادله (۱) را براساس آنالیز ابعادی ارائه کردند.

$$C_d = C_{d0} \left( -0.1056 \frac{x}{E_0} Fr_H + 1 \right) \quad (1)$$

$$\tanh \left[ 1.5 (\sqrt{2} - Fr_H)^{0.6093} \right]$$



شکل ۱- طرح کانال آزمایشگاهی و ویژگی‌های هندسی آبگیر کفی (ریگتی و لانزونی، ۲۰۰۸)  
الف - نمای کلی از فلوم، ب - مقطع عرضی فلوم و ج - جانمایی میله‌ها

$$t_{ij} = \left[ r(n + n_t) \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right] \quad (4)$$

$$- \left[ \frac{2}{3} r(k_T + n_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d_{ij} \right]$$

که در معادله بالا،  $v_i$  و  $v_j$  به ترتیب بیان‌کننده ویسکوزیته سینماتیکی سیال و ویسکوزیته آشفتگی،  $k_T$  انرژی جنبشی آشفتگی و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونیکر است.

#### مدل‌سازی عددی نمونه آزمایشگاهی

مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار Flow3D از سه جزو، کانال بالادست، کف مشبک و کانال پایین‌دست به‌منظور انطباق مناسب شرایط مدل آزمایشگاهی و مدل عددی تشکیل شده است (شکل‌های ۲ و ۳). آب، سیال مورد مطالعه است که تمامی خواص فیزیکی آن در دمای ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته و شتاب گرانش ۹/۸۱ متر

#### معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر حرکت سیال برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر شامل معادله پیوستگی جریان و ممتموم به‌صورت روابط دو و سه نوشته می‌شوند که به معادلات ناویر استوکس معروف هستند (رامشواران و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

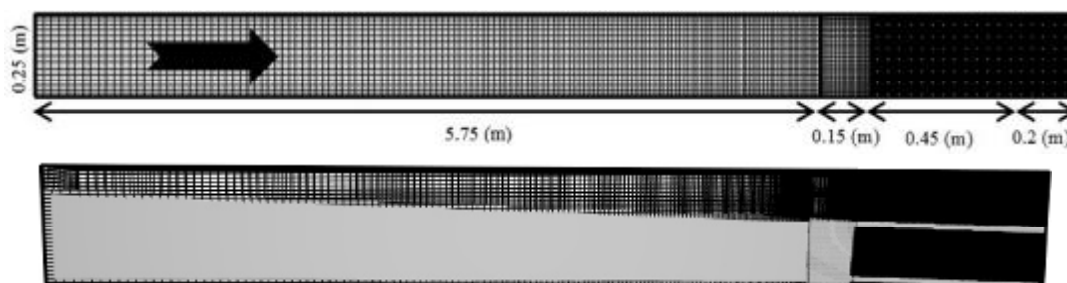
$$r \frac{\partial u_i}{\partial u_j} (u_i u_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} + r g_i \quad (3)$$

که در این معادلات،  $u_i$  مؤلفه سرعت در جهت  $i$ ؛  $P$  فشار کل؛  $g_i$  مؤلفه شتاب ثقل در جهت  $i$ ؛  $\tau_{ij}$  تانسور تنش و  $\rho$  چگالی سیال بوده است که در حالت جریان آشفته به‌صورت معادله (۴) نوشته می‌شود:

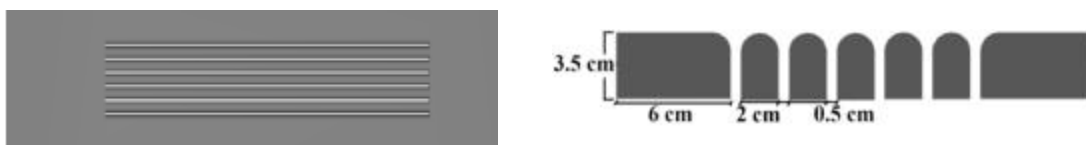
۸ میلی‌متر، در ۱۵ سانتی‌متری بالادست کف مشبک و ۲۰ سانتی‌متری پایین‌دست آن معادل ۴ میلی‌متر و روی کف مشبک برای مدل‌سازی دقیق شکل هندسی میله‌ها و فاصله بین آن‌ها معادل ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد (شکل ۲). در شکل سه پلان کف مشبک و هندسه مقطع عرضی C1 نشان داده شده است.

بر مجذور ثانیه و فشار اتمسفر  $1.013 \times 10^5$  پاسکال منظور شده است.

در مدل‌سازی عددی هندسه فلوم شامل کف مشبک به طول ۴۵ سانتی‌متر بوده و ۵/۹ متر از بالادست آن و ۲۰ سانتی‌متر از پایین‌دست آن شبکه‌بندی شده است. اندازه شبکه در طول ۵/۷۵ متر کانال بالادست کف مشبک، برابر



شکل ۲- پلان دوبعدی هندسه کانال ایجادشده در نرم‌افزار Flow-3D



شکل ۳- پلان کف مشبک و هندسه مقطع عرضی C1

§ ضریب انطباق  $(R^2)$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N O_i^2 - \left( \frac{\sum_{i=1}^N P_i^2}{N} \right)} \quad (6)$$

§ میانگین قدر مطلق خطا (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (7)$$

در روابط فوق  $O_i$  مقدار واقعی متغیر وابسته (دبی منحرف‌شده)،  $P_i$  مقدار پیش‌بینی‌شده متغیر (دبی منحرف‌شده) توسط مدل عددی، زیرنویس  $i$  معرف شماره پارامتر اندازه‌گیری شده و  $N$  تعداد متغیرها است. هرچه مقدار عددی RMSE و MAE به عدد صفر و مقدار عددی  $R^2$  به عدد یک نزدیک‌تر باشند، جواب بهتری برای مدل حاصل شده است. شایان ذکر است که MAE و RMSE نشان‌دهنده میزان خطای مدل و  $R^2$  نشان‌گر میزان بازده

انتخاب مدل آشفتگی

مدل آشفتگی بسته به میدان جریان و شرایط مرزی و مشخصه‌ای از جریان است که با مدل عددی تعیین می‌شود (رودی، ۱۹۸۰ و پوپ، ۲۰۰۰). در تحقیق حاضر، برای تعیین مدل مناسب آشفتگی، از مقایسه نتایج عددی با پنج مدل مختلف آشفتگی و نتایج آزمایشگاهی درخصوص دبی که آبیگر کف مشبک آن را منحرف کرده، استفاده شده است. برای تعیین بهترین مدل آشفتگی از نتایج شانزده آزمایش انجام شده برای دبی ورودی متغیر از ۱۷/۸ تا ۳۷/۳ لیتر بر ثانیه استفاده شد و با ارزیابی سه معیار زیر (معادلات (۵)، (۶) و (۷)) دبی منحرف‌شده در مدل آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده‌اند.

§ ریشه مربع متوسط خطا (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (8)$$

انتهای کانال به صورت پیوسته تعریف شده است که با توجه به آن بتوان میزان دبی عبوری از روی کف مشبک را محاسبه کرد. همچنین در سطح آب شرایط متقارن و در کف آبیگر شرط مرزی جریان خروجی تعریف شده است.

### انتخاب مدل زبری

پس از مشخص کردن شرایط مرزی مناسب، مقادیر اولیه آزمایش‌ها در مدل عددی اعمال شد و دبی جریان منحرف شده توسط کف مشبک، بررسی گردید. پارامتر زبری کانال ( $K_s$ ) با سعی و خطا به گونه‌ای به دست آمد که پروفیل سطح آب با پروفیل سطح آب در نمونه آزمایشگاهی مطابقت پیدا کند (رامشوران و همکاران، ۲۰۱۳). بر این اساس مقدار  $K_s$  برابر  $0.002$  میلی‌متر تعیین گردید. شکل ۴ مقایسه‌ای بین پروفیل‌های سطح آب و بردار سرعت حاصل از شبیه‌سازی مدل عددی، با نتایج و مشاهدات مدل آزمایشگاهی (جدول ۲) را برای به دست آمدن زبری مناسب نشان می‌دهد. در جدول ۲،  $S1$  شیب طولی کانال،  $Fr_0$  عدد فرود جریان در بالادست آبیگر،  $Q_t$  دبی ورودی در کانال و  $y_0$  عمق جریان در ورودی کانال است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای زبری  $0.002$  بردارهای سرعت مشاهداتی و محاسباتی انطباق خوبی دارند.

جدول ۲- شرایط مدل آزمایشگاهی ریگتی و لانزونی (۲۰۰۸)

آزمایش	$y_0$ (cm)	$Q_t$ (l/s)	$Fr_0$	$S1$ (%)
T1	۸/۰	۳۶/۳	۴/۰۰	۴/۰۰
T2	۸/۰	۲۱/۳	۱/۲۰	۰/۷۰

### حساسیت‌سنجی نسبت به ابعاد مش

برای شانزده شبیه‌سازی انجام شده با اندازه مش با ابعاد ۲ و ۴ و ۸ میلی‌متر، نتایج عددی میزان دبی منحرف شده توسط کف مشبک در مدل عددی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند (شکل ۵). در این شکل، خط برازش داده شده و همچنین خط مایل با زاویه ۴۵ درجه به منظور مقایسه بهتر میزان انطباق نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل‌سازی عددی با مش با ابعاد ۲ و ۴ میلی‌متر نزدیک به خط مایل با زاویه ۴۵ درجه است که

مدل هستند. نتایج به دست آمده از مدل عددی برای پنج نوع مدل آشفتگی در جدول یک ارائه شده است.

جدول ۱- ارزیابی عملکرد مدل‌های آشفتگی

نوع مدل آشفتگی	MAE (l/s)	RMSE (l/s)	$R^2$
تک معادله‌ای	۰/۳۰	۰/۳۸	۰/۹
k-ε استاندارد	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۹۲
k-ε RNG	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۹۸
اختلاط پرنتل	۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۸۹
شبیه‌ساز گردابه‌های بزرگ	۰/۳۶۳	۰/۴۵	۰/۸۸

همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مدل آشفتگی k-ε RNG دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین باقیمانده، نسبت به مدل‌های دیگر و این مدل دارای بهترین پیش‌بینی است. محدوده دبی منحرف شده بین  $20/2$  تا  $7/4$  لیتر بر ثانیه است.

### انتخاب گام زمانی

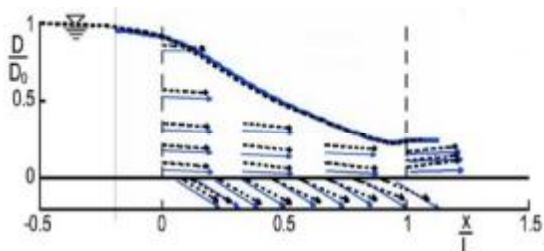
محدودیت‌های مختلفی در اندازه گام زمانی در FLOW-3D وجود دارد که برای جلوگیری از ناپایداری حل عددی در محاسبات باید بر آن‌ها نظارت شود. نرم‌افزار، توانایی اعمال گام زمانی را به صورت خودکار دارد؛ بنابراین اگر این انتخاب به نرم‌افزار داده شود، نرم‌افزار یک گام زمانی را به صورتی که شرایط پایداری نقض نشود، در نظر می‌گیرد و پارامترهایی مانند فشار و دما را برای گام مورد نظر محاسبه و با مقدار شاخص مقایسه می‌کند؛ به گونه‌ای که اختلاف قابل توجهی با این مقادیر شاخص نداشته باشد. با توجه به توضیحات داده شده مقدار گام زمانی توسط نرم‌افزار، براساس  $1/100$  زمان پایان عملیات شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. برای هر اجرا (به طور متوسط ۶۰ ثانیه)، گام زمانی انتخابی توسط نرم‌افزار  $0/6$  ثانیه است. پس از واگذاری انتخاب گام زمانی به نرم‌افزار، گام زمانی کوچک‌تر هم برای یکی از داده‌های آزمایش در نظر گرفته شد که ضمن افزایش زمان اجرا، تغییرات محسوسی در جواب نهایی حاصل نشد.

### شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل در ورودی کانال جریان با دبی و عمق معلوم، در کنارهای مرز صلب شرط مرزی دیوار و در

ابعاد ریزتر زمان محاسبات را افزایش می‌دهد؛ بنابراین انتخاب ابعاد مش ۴ میلی‌متر ضمن تأمین دقت مورد نظر، از جنبه زمان محاسباتی نیز بهینه خواهد بود.

ب

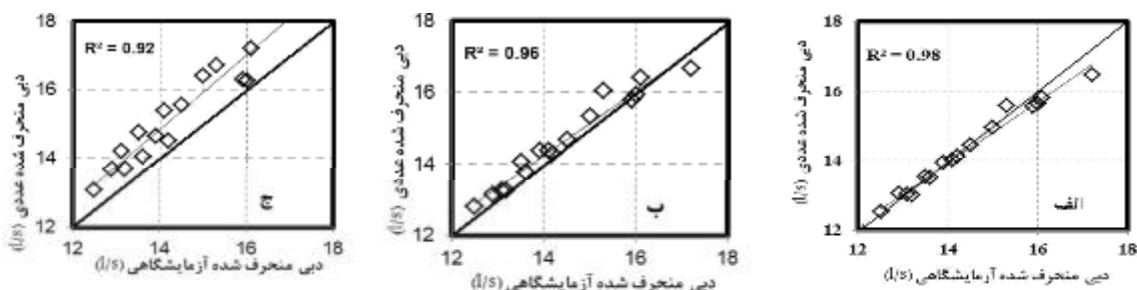


شکل ۴- الف) مقایسه پروفیل سطح آب و بردار سرعت بین مدل آزمایشگاهی و عددی در آزمایش T1، ب) مقایسه پروفیل سطح آب و بردار سرعت بین مدل آزمایشگاهی و عددی در آزمایش T2 (خطوط منقطع: نتایج آزمایشگاهی، خطوط پیوسته: نتایج عددی) ریخته‌گر و همکاران (۱۳۹۲)

می‌شود، نتایج مدل‌سازی عددی با مش به ابعاد ۲ و ۴ میلی‌متر نزدیک به خط مایل با زاویه ۴۵ درجه است که گویای انطباق نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی است. با توجه به این که ابعاد ۴ میلی‌متر برای مش نتایج قابل قبولی را در اختیار قرار داد و همچنین انتخاب مش با ابعاد ریزتر زمان محاسبات را افزایش می‌دهد؛ بنابراین انتخاب ابعاد مش ۴ میلی‌متر ضمن تأمین دقت مورد نظر، از جنبه زمان محاسباتی نیز بهینه خواهد بود.

#### حساسیت‌سنجی نسبت به ابعاد مش

برای شانزده شبیه‌سازی انجام شده با اندازه مش با ابعاد ۲ و ۴ و ۸ میلی‌متر، نتایج عددی میزان دبی منحرف شده توسط کف مشبک در مدل عددی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند (شکل ۵). در این شکل، خط برازش داده‌شده و همچنین خط مایل با زاویه ۴۵ درجه به منظور مقایسه بهتر میزان انطباق نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده



شکل ۵- حساسیت‌سنجی نسبت به ابعاد مش برای دبی منحرف شده در ابعاد مش الف) ۲، ب) ۴ و ج) ۸ میلی‌متر

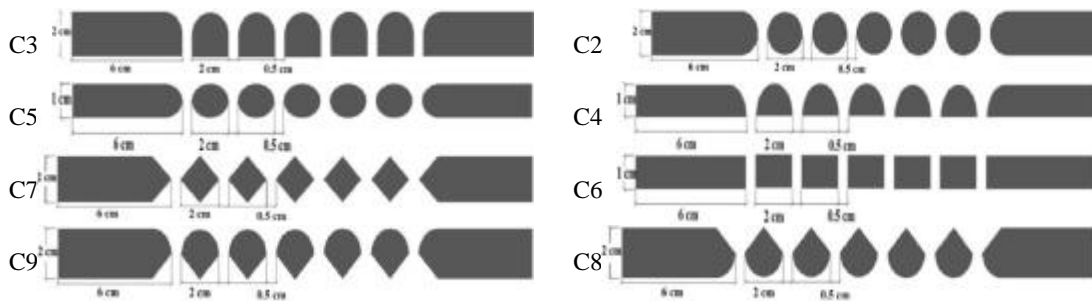
دبی  $Q_t=29.5 \text{ lit/s}$  و شیب کف  $S=2\%$  در مدل عددی اعمال شد. نتایج آنگذری کف مشبک برای هشت هندسه مختلف کف مشبک تعیین و در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول  $Q_t$  مقدار دبی کل ورودی به کانال،  $Q_d$  میزان دبی منحرف شده و  $Q_f$  میزان دبی عبوری از روی آبیگر کفی می‌باشد. در کلیه این مقاطع، فضای باز بین میله‌ها با یکدیگر مساوی است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، کف مشبک با مقطع C8 با انحراف

#### نتایج و بحث

پس از حصول اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی، به مقایسه عملکرد میله‌های کف مشبک در خصوص گذردهی جریان پرداخته شده است. بدین منظور، آزمایش شاهد از مدل آزمایشگاهی (T3) انتخاب و از هشت هندسه مختلف برای مدل‌سازی عددی مطابق شکل ۶ استفاده شد. شرایط جریان در بالادست آبیگر کف مشبک در آزمایش شاهد که عبارتند از: عمق جریان  $y_0=8.0 \text{ Cm}$ ،

مشبک با هندسه بالا نیم‌دایره و پایین مثلثی C9 و لوزی شکل در ردیف‌های بعدی از نظر میزان آبگذری قرار دارند.

۵۸/۲۵ درصد کل دبی، بهترین عملکرد را نسبت به سایر مقاطع کف مشبک برای انحراف جریان را دارد. کف



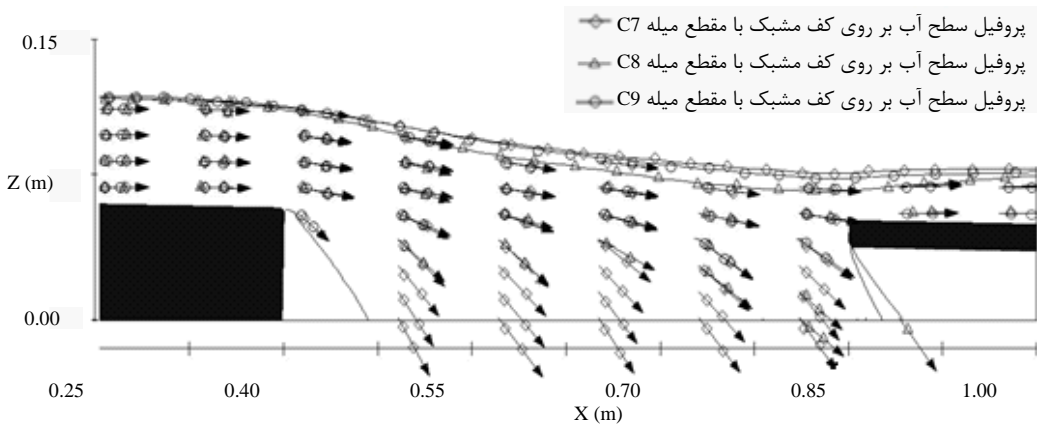
شکل ۶- مقاطع عرضی استفاده‌شده در مدل‌سازی عددی (کد مقاطع در سمت چپ هر شکل درج شده است).

جدول ۳- مقایسه دبی عبوری و منحرف‌شده (با آبیگر کف مشبک) برای میله‌های با هندسه مختلف

کد مقاطع	شکل مقطع	$Q_r$ (l/s)	$Q_d$ (l/s)	$(Q_d/Q_r)\%$
C <sub>1</sub>	بالا نیم‌دایره و پایین مستطیلی با اضلاع ۲/۰×۲/۵ سانتی‌متر	۱۴/۵۳	۱۴/۹۴	۵۰/۶۵
C <sub>2</sub>	دایره با قطر ۲ سانتی‌متر	۱۴/۴۵	۱۵/۰۶	۵۴/۴۳
C <sub>3</sub>	نیم‌دایره بالا و مستطیل پایین با اضلاع ۲×۱ سانتی‌متر	۱۴/۸۸	۱۴/۵۹	۴۹/۴۶
C <sub>4</sub>	نیم‌دایره با قطر ۲ سانتی‌متر	۱۳/۵۷	۱۴/۸۴	۵۳/۷۰
C <sub>5</sub>	بیضوی با قطر ۲×۱ سانتی‌متر	۱۳/۶۷	۱۵/۸۱	۵۳/۵۹
C <sub>6</sub>	مستطیلی با اضلاع ۲×۱ سانتی‌متر	۱۵/۶۱	۱۳/۸۸	۴۷/۰۶
C <sub>7</sub>	لوزی با اقطار برابر ۲ سانتی‌متر	۱۲/۷۸	۱۶/۷۲	۵۶/۶۸
C <sub>8</sub>	بالا مثلثی با ارتفاع ۲ سانتی‌متر و پایین نیم‌دایره با قطر ۲ سانتی‌متر	۱۲/۲۶	۱۷/۲۱	۵۸/۲۵
C <sub>9</sub>	بالا نیم‌دایره با قطر ۲ سانتی‌متر و پایین مثلثی با ارتفاع ۲ سانتی‌متر	۱۲/۷۳	۱۷/۲۱	۵۶/۷۸

این شکل پروفیل سطح آب بر روی کف مشبک با مقطع C8 پایین‌تر از پروفیل سطح آب بر روی کف مشبک با مقطع C9 و C7 است.

در شکل ۷، مقایسه بین پروفیل‌های سطح آب و بردارهای سرعت در سه مقطع متفاوت کف مشبک با شرایط هیدرولیکی یکسان (آزمایش T3) نشان داده شده است. در



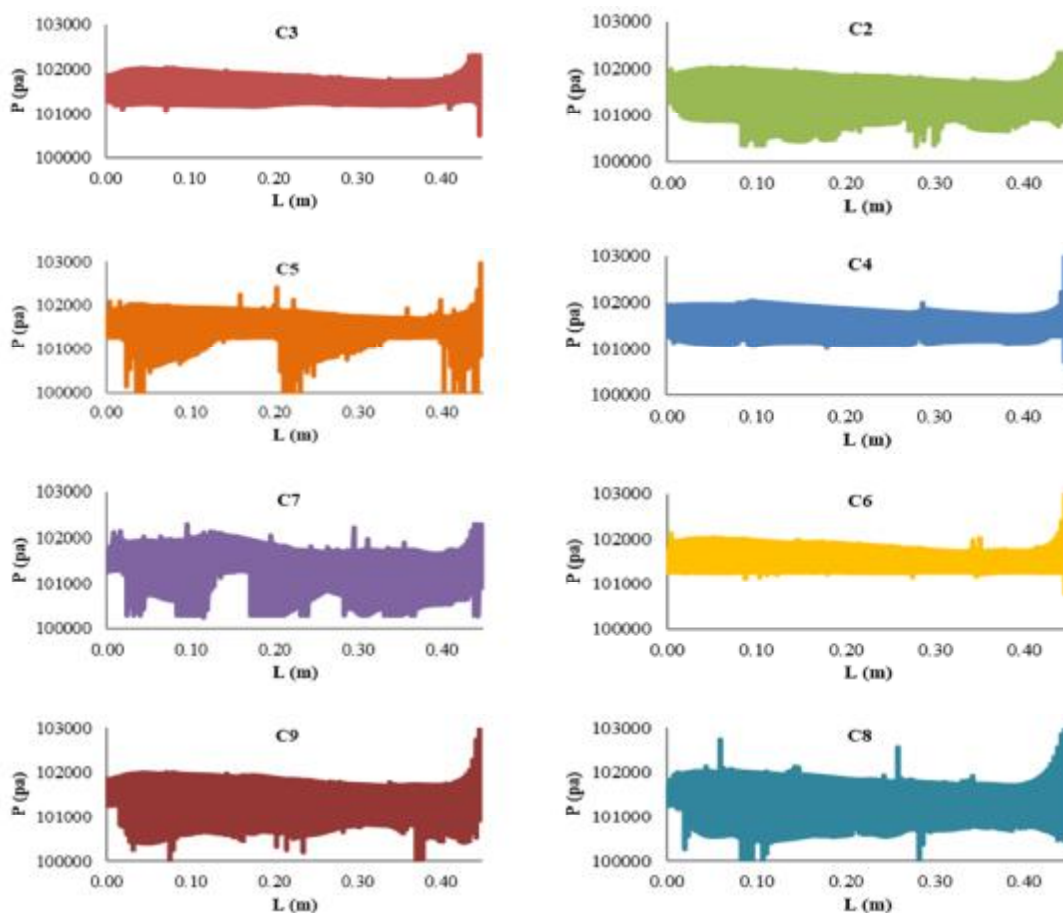
شکل ۷- پروفیل سطح آب روی کف مشبک با مقاطع مختلف (x طول کف مشبک، z ارتفاع بر حسب متر)

بهرتر مقطع C8 نسبت به مقطع C9، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر مقطع فوقانی نسبت به مقطع زیرین در منحرف کردن آب از رو کف مشبک بیشتر است. به هر صورت مقطع C8 با دارا بودن بیشترین اختلاف فشار بین قسمت زیرین و بالای میله‌ها میزان آبگذری بیشتری نسبت به مقاطع دیگر دارد.

برای بررسی وضعیت گذر آب از بین میله‌های کف مشبک، پروفیل سرعت در طول میله‌ها محاسبه شده با نرم‌افزار برای پروفیل‌های C2، C3 و C7 در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. تغییرات سرعت در طول پروفیل برای هر سه مورد بین ۱/۱ تا ۱/۶ متر بر ثانیه متغیر است. پروفیل با مقطع C3 شرایط یکسان‌تری نسبت به پروفیل‌های C2 و C7 دارد. این تغییرات سرعت در طول کف مشبک می‌تواند شرایط جریان در کانال آبرسانی به نیروگاه را تحت تأثیر قرار دهد.

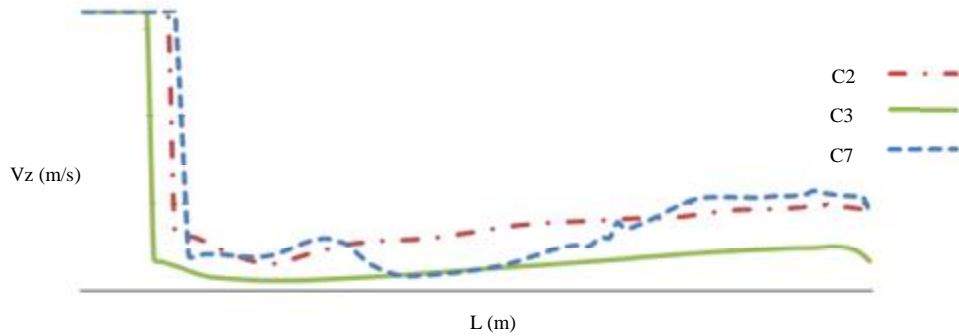
### بررسی پروفیل فشار در اطراف میله‌های کف مشبک

یکی از مزایای مدل‌سازی عددی، این است که به وسیله آن می‌توان برخی از پارامترها را که در مدل‌سازی فیزیکی به دلایل محدودیت در ابزارهای اندازه‌گیری، به دست آوردن اطلاعات آن میسر نبوده است به روش عددی تعیین کرد و به علل وقوع برخی از پدیده‌ها با بررسی آن پارامترها پی برد. به منظور بررسی علل تفاوت‌ها در میزان آبگذری کف مشبک، به بررسی توزیع فشار مطلق در اطراف میله‌های کف مشبک پرداخته شده است (شکل ۸). برای مقاطع با قسمت زیرین صاف و افقی با عملکرد به نسبت پایین مانند مقاطع C3، C4 و C6، نوسانات فشار اطراف میله‌ها کم و همچنین دامنه فشار منفی کمتری نسبت به سایر مقاطع دارند. تأثیر فشار منفی را در آبگذری مقطع بیضوی (C5) می‌توان مشاهده کرد. آبگیر با مقاطع شکل C8 و C9 از لحاظ شکلی مشابه یکدیگر هستند؛ اما با جانمایی معکوس مقاطع، با توجه به عملکرد



شکل ۸ - توزیع فشار اطراف میله‌های کف مشبک





شکل ۹- توزیع سرعت قائم آب بین دو میله مجاور در فاصله ۳ سانتی‌متر از زیر کف مشبک در طول آبگیر

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، جریان روی آبگیر کفی به صورت عددی مدل و با استفاده از روش حجم محدود شبیه‌سازی شد. در مدل‌سازی از معادلات ناویر-استوکس برای حل میدان جریان استفاده شده است. مدل انتقال آشفتگی RNG k-ε بهترین ضریب همبستگی (R2) را بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل‌سازی شده توسط نرم‌افزار برای دبی منحرف شده از آبگیر کف مشبک نشان داد. همچنین حساسیت‌سنجی نسبت به شبکه انجام گرفت و شبکه مناسب، به گونه‌ای که بتواند دقت مناسب را ارائه کند و زمان انجام محاسبات طولانی نشود، بررسی شد و در نتیجه در کف مشبک، اندازه سلول‌ها چهار میلی‌متر و در بالادست و پایین‌دست این ناحیه، اندازه سلول‌ها بزرگ‌تر و با رعایت حداکثر نسبت بلوک‌ها انتخاب گردید. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، مقاطع مختلف میله‌ها از نظر آبگذری و توزیع فشار اطراف میله‌های کف مشبک برای هشت نمونه مدل‌سازی شده به دست آمد. این مقایسه نشان می‌دهد که مقطع C8 (بالا مثلثی و پایین نیم‌دایره) از نظر عملکرد هیدرولیکی برای آبگذری جریان نسبت به دیگر مقاطع مناسب‌تر است. همچنین توزیع سرعت خروجی در طول کف مشبک برای مقاطع عرضی لوزی، دایره‌ای و نمونه آزمایشگاهی ریگتی و لانزونی (مقطع C1) با یکدیگر مقایسه شدند. توزیع یکنواخت‌تری را نشان می‌دهد.

بررسی‌های انجام شده برای انحراف آب از طریق آبگیر کف مشبک در شرایط جریان آب صاف صورت گرفته است. پیشنهاد می‌شود پژوهش برای شرایط آب دارای رسوبات معلق و بار بستر نیز انجام شود و تأثیر شکل مقاطع پیشنهاد شده در این مقاله بر نحوه هیدرولیک رسوب روی آبگیر کفی ارزیابی شود.

همچنین پیشنهاد می‌شود عملکرد کانال آبرسانی به نیروگاه با مقاطع مختلف عرضی کف مشبک نیز مطالعه شود. برای رسیدن به یک هندسه مناسب، لازم است کلیه جوانب از جمله آبگذری، سهولت اجرا، امکان انسداد کف مشبک با رسوب و عملکرد کانال آبرسانی به نیروگاه با تهیه یک مدل عددی جامع آب و رسوب مطالعه شود.

### منابع

۱. بینا ک.، فغفور مغربی م. و ابریشمی ج. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی ضریب تخلیه در آبگیرهای کفی مشبک با میله‌های متقاطع. فصلنامه علمی-پژوهشی آب فاضلاب. ۲۳(۱): ۲۴-۳۳.
۲. خواجه م.، فتاحی م.، ه. و شمسایی ا. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی هیدرولیک جریان در آبگیرهای دارای آشغال‌گیر تحتانی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی. مجله مهندسی منابع آب. ۲(۳): ۴۹-۵۹.
۳. ریخته‌گر مشهد ش.، حسینی خ.، کرمی ح. و بینا ک. ۱۳۹۲. مدل‌سازی عددی آبگیر با کف مشبک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش سازه‌های هیدرولیکی. دانشگاه سمنان. ۱۶۵ ص.
۴. کمان‌بدست ا. ع. و شفاعی بجستان م. ۱۳۸۵. بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک و رسوب در آبگیرهای کفی به عنوان گزینه مناسب آبگیری برای نیروگاه‌های برق-آبی جریانی. دفتر تحقیقات و استانداردهای سد و نیروگاه سازمان آب و برق خوزستان. ۲۳۵ ص.
۵. کمان‌بدست ا. ع. و شفاعی بجستان م. ۱۳۸۷. بررسی خصوصیات شیب و درصد بازشدگی کف مشبک در آبگیرهای کفی با استفاده از مدل

فیزیکی. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز: ۲۳۶۵-۲۶۳۱.

6. Castillo L.G. Carrillo J. M. Garcia J. T. 2013. Flow and sediment transport through bottom intakes, CFD application and verification with experimental measurements. 35th IAHR Congress, 8-13 September, Chenguda, China. 10 p.
7. Dorbir H. Kienberger V. And Krouzecky N. 2003. The wetted rack length of the tyroless weir. Institute of Hydraulic Engineering, Vienna University of Technology. 325 p.
8. Kamanbedast A. Masjedi A. Assareh A. 2012. Investigation of hydraulics of flow in bottom intake structures by software modeling. Journal of Food, Agriculture & Environment. 10: 776-780.
9. Kuntzmann J. and Bouvard M. 1954. Theoretical Study Grids Intakes Water Type. La Houille Blanche. (5): 569-574.
10. Nosedo G. 1956. Operation and design of bottom intake racks. Politecnico di Milano. 11 p.
11. Orth J. Chardonnet E. and Meynardi G. 1954. Study of bottom type water intake Grids. La Houille Blanche. (3): 343-351.
12. Pope S. 2000. Turbulent Flows. Cambridge University Press. 771 p.
13. Rameshwaran J. P. Naden P. Wilson C. A. M. E. Malki R. Shiono K. and Shukla D. 2013. Inter-comparison and validation of computational fluid dynamics codes in two-stage meandering canal flows. Applied Mathematical Modeling. 37: 8652-8672.
14. Righetti M. and Lanzoni S. 2008. Experimental study of the flow field over bottom intake racks. Journal of Hydraulic Division. ASCE. 134: 15-22.
15. Rodi W. 1980. Turbulence Models and Their Application in Hydraulics. International Association of Hydraulic Research publication. 124 p.