

مطالعه عددی پارامترهای موثر بر استهلاك انرژی سراسیب‌های بلوکی

زهرا شریف‌نژاد عزیزی^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

salehi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۵/۲۴]

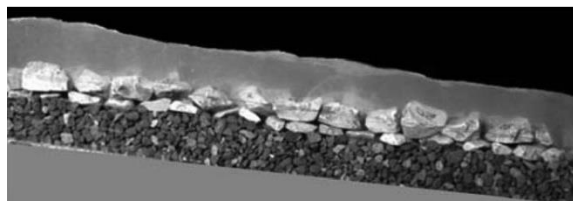
تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۲۲]

چکیده- یکی از کارآمدترین انواع مستهلک کننده‌های انرژی در کانال‌های باز، سراسیب‌های بلوکی است، که آنها را می‌توان نوع خاصی از شیب شکن‌های همراه با بلوک اغتشاشی، ولی با ساختار طبیعی سنگدانه‌ای و غیر سیمانی، در نظر گرفت. در آزمایشگاه‌ها برای بررسی رفتار جریان روی این سازه‌ها، مدل‌های فیزیکی مختلفی ساخته شده‌اند، که با چشم پوشی از هزینه و زمان‌بر بودن آزمایش‌ها، مشکلات ناشی از تغییرات مقیاس را نیز به همراه دارند. امروزه با استفاده از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، رفتار هیدرولیکی سیال بررسی می‌شود. در این پژوهش به شبیه‌سازی جریان روی یکی از انواع سراسیب‌های بلوکی پرداخته شده و سازوکار استهلاك انرژی روی آن بررسی می‌شود. برای این منظور از نرم‌افزار FLOW-3D، مدل سطح آزاد VOF و مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) استفاده شده است. نتایج حاکی از استهلاك انرژی بیشتر برای آشفتگی بیشتر جریان و افزایش آشفتگی با تشکیل جریان برگشتی است. در نتیجه، استهلاك انرژی به ترتیب در جریان غیر مستغرق و سپس در حالت‌های تداخل دنباله‌ها و زبری منفرد از جریان مستغرق بیشتر است. برای افزایش بیشتر استهلاك انرژی باید یا تا حد امکان از مساحت مقطع عرضی موثر کاست و یا با ثابت نگه داشتن مقطع عرضی موثر و حجم دبی عبوری و استغراق، عوامل زبری را کاهش داد.

واژگان کلیدی: سراسیب بلوکی، استهلاك انرژی، شبیه‌سازی عددی، نرم‌افزار FLOW-3D.

۱- مقدمه

اساس^۳ گفته شده؛ و اگر اندازه مصالح بستر بزرگتر از مصالح اساس باشد، به آن سراسیب بلوکی^۴ گفته می‌شود [۳]. در صورت بروز مشکلات استقامتی در سراسیب‌های با مصالح اساس، می‌توان از تقویت استفاده نمود؛ به این صورت که سنگ‌هایی با اندازه درشت‌تر از مصالح اصلی روی سراسیب کار گذاشته شده تا تنش‌های برشی منجر به فرسایش مصالح بستر را کم کنند. به این ترتیب سراسیب با مصالح اساس به سراسیب بلوکی تبدیل می‌شود [۲] (شکل (۱)).



شکل (۱) سراسیب‌های بلوکی [۴]

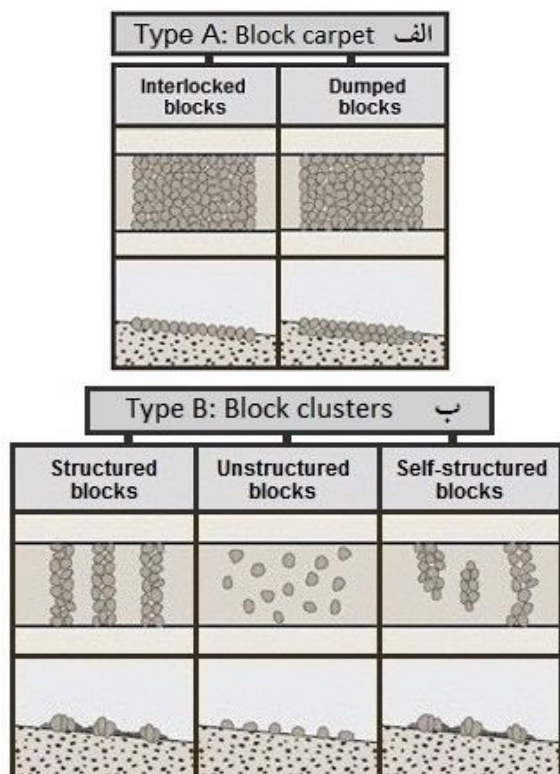
یکی از کارآمدترین انواع مستهلک کننده‌های انرژی در کانال‌های باز، سراسیب‌های بلوکی^۱ هستند که به دلیل اجرای ساده در سال‌های اخیر مورد توجه واقع شده‌اند. سراسیب قسمتی از سازه‌های انتقال آب با ساختار غیر سیمانی و طبیعی شامل شن و سنگریزه است که با یک شیب تند که در ادامه ملایم می‌شود، توصیف می‌شود. این سازه را می‌توان نوعی از شیب شکن‌های بلوک اغتشاشی در نظر گرفت [۲ و ۱]. سراسیب‌ها بر اساس نسبت اندازه مصالح بسترشان به مصالح اساس (اولین لایه روی لایه نفوذ ناپذیر زمین) طبقه‌بندی می‌شوند، به این صورت که: اگر اندازه مصالح بستر کوچکتر از مصالح اساس باشد، به آن سراسیب صاف^۲ گفته می‌شود؛ اگر اندازه مصالح بستر مساوی با مصالح اساس باشد، به آن سراسیب با مصالح

3 Ramp With Base Material
4 Block Ramp

1 Block Ramps
2 Smooth Ramp

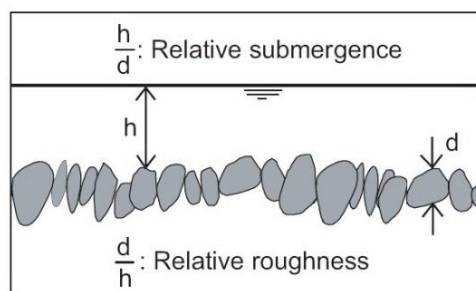
تراکم مشخص (حالت ساختار نیافته^۸) شناخته شده‌اند (شکل (۳) ب) [۶].

تاثیر موقعیت نسبی المان‌های زبری به وسیله‌ی مورس^۹ (۱۹۵۹) بررسی شد. او سه رژیم پایه متمایز را برای جریان آشفته برشمرد که در شکل (۴) نشان داده شده است. در قسمت الف این شکل، جریان زبری منفرد^{۱۰}، المان‌های زبری مجزا به گونه‌ای چیده شده‌اند که جریان در مجاورت المان‌ها تحت تاثیر ناحیه دنباله المان بالایی نیست. اگر المان‌های زبری نزدیکتر بهم چیده شده باشند، جریان از نوع برهم نهی دنباله‌ها^{۱۱} است (شکل (۴) ب). اگر المان‌های زبری باز هم بهم نزدیکتر باشند، دنباله پشت هر المان زبری به المان زبری بعدی رسیده و با آن تداخل پیدا می‌کند. در این حالت المان‌های زبری تشکیل یک شبه دیوار^{۱۲} کم و بیش صاف را داده‌اند و تاج المان‌ها محدوده بسته‌ای از سیال را بوجود آورده‌اند که این جریان، جریان شبه صاف^{۱۳} نامیده می‌شود (شکل (۴) ج) [۵].



شکل (۳) انواع سراسیب‌های بلوکی الف: نوع A، ب: نوع B [۶]

سراسیب‌های بلوکی بر اساس زبری مصالح بسترشان نیز طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به مطالعات پژوهشگران، مقیاس زبری به ترتیب با استغراق نسبی^۱ و زبری نسبی^۲ تعریف می‌شود؛ به این صورت که استغراق نسبی به عنوان نسبت عمق متوسط جریان به اندازه مشخصه دانه‌های بستر h/d ، و زبری نسبی با معکوس آن یعنی d/h ، تعریف می‌شود. در شکل (۲) طرح شماتیک این تعریف نشان داده شده است. از نقطه نظر هیدرولیکی، وضعیت موضعی h/d و شکل بستر به طور گسترده‌ای بر حوزه آشفتگی جریان تاثیر گذاشته و انرژی در مجاورت المان‌های زبری مستهلک می‌شود. به این ترتیب سه نوع وضعیت زبری بستر تعریف می‌شود: وضعیت زبری کوچک مقیاس برای استغراق نسبی بین 0.5 و $6/6$ ، و زبری متوسط مقیاس برای استغراق نسبی بین $2/5$ و $6/6$ و زبری بزرگ مقیاس برای استغراق نسبی کمتر از $2/5$ [۵ و ۱].



شکل (۲) تعریف زبری نسبی و استغراق نسبی [۵]

تاماگنی^۳، و همکاران با توجه به ترکیب بولدرها تقسیم بندی جدیدی ارائه نمودند. این تقسیم‌بندی در شکل (۳) نشان داده شده است [۶]. نوع A یا فرش بلوکها^۴، طرح کلاسیک سراسیب‌های بلوکی بوده که در آن بلوک‌ها به صورت فشرده و مانند سنگفرش کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند (شکل (۳) الف). نوع B، سراسیب‌های بلوکی همراه با بولدر است که با بلوک-شاخه‌های^۵ متمایز که به صورت دسته‌ای با ترکیب‌های هندسی (حالت ساختار یافته^۶ و خود ساختار یافته^۷)، و یا متفرق با

8 Unstructured
9 Morris
10 Isolated Roughness Flow
11 Wake-interference flow
12 Pseudo-wall
13 Quasi-smooth Flow

1 Relative Submergence
2 Relative Roughness
3 Tamagni
4 Block Carpet
5 Block Clusters
6 Structured
7 Self-structured

بررسی شکل‌گیری جریان بر روی این سازه و مقایسه ارتفاع سطح آب به ارتفاع بولدرها، سه نوع رژیم جریان حوضچه‌ای^۷، موج^۸ و کانال^۹ برشمرده است.

بیشتر تقسیم‌بندی‌های بالا در آزمایشگاه و با مطالعه میدانی روی مدل‌های فیزیکی صورت گرفته‌اند که با چشم‌پوشی از هزینه و زمانبر بودن آزمایش‌ها، دسترسی به بعضی از شرایط مقیاس و ابعاد مانند شیب‌های تندتر در آزمایشگاه ممکن نیست. از اینرو امروزه با استفاده از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی رفتار هیدرولیکی سیال به طور گسترده‌تری بررسی می‌شود. در همین راستا اُرتل (۲۰۱۱) با مدل‌سازی عددی و مقایسه نتایج آن با مدل آزمایشگاهی سعی در به دست آوردن فرمولی برای محاسبه نیروی درگ، ضریب اصطکاک و استهلاك انرژی برای انواع خاصی از سراشیبه‌های بلوکی نمود. نکته‌ی دیگر اینکه سراشیبه‌های بلوکی در ابتدا برای سیستم رودخانه‌ای طراحی شده‌اند که عمق آب چندانی نداشته و هدف از تعبیه آنها در شیب‌های بیش از ۶٪ بیشتر پایداری بستر بوده است تا مقوله استهلاك انرژی [۵]. پس در این پژوهش، با استفاده از مدل‌سازی عددی به بررسی الگوی جریان عبوری از روی سراشیبه‌های بلوکی پرداخته شده است. هدف مشاهده چگونگی استهلاك انرژی و طراحی بهینه این نوع سازه برای استهلاك هرچه بیشتر انرژی است.

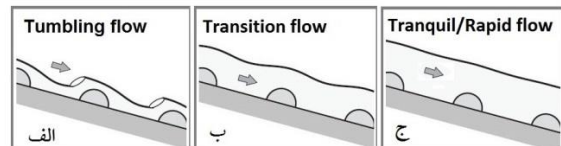
۲- روش انجام پژوهش

در این پژوهش از نرم‌افزار Flow-3D استفاده شده که برای حل معادلات پیوستگی و حرکت از روش احجام محدود بهره می‌برد. این نرم‌افزار از شبکه‌بندی مستطیلی استفاده می‌کند. برای شبیه‌سازی سطح آزاد، این برنامه به طور پیش فرض از تکنیک حجم سیال (VOF)^{۱۰} استفاده می‌کند [۷].

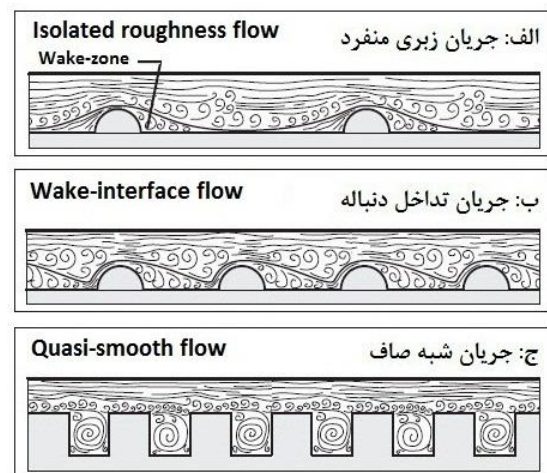
۲-۱- درستی آزمایشی مدل عددی

برای درستی آزمایشی مدل‌سازی عددی، از مدل آزمایشگاهی

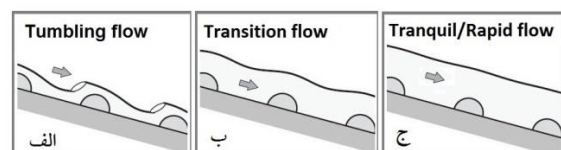
فاصله زبری‌ها در رابطه با ارتفاع جریان در کانال باز، منجر به طبقه‌بندی پیشنهادی پیترسون^۱ و موهانتی^۲ (۱۹۶۰) به سه نوع رژیم جریان می‌شود: جریان غلتشی^۳، انتقالی^۴ و سریع یا بی-جنبش^۵. در رژیم جریان غلتشی، ممکن است جریان فوق بحرانی مشاهده شود، که روی المان‌های زبری با پرش‌های هیدرولیکی منفرد دنبال می‌شود (



شکل (۵) الف. در جریان سریع، پرش‌های هیدرولیکی به علت مومتوم طولی بالا محو شده و جریان با سرعت فوق بحرانی به صورت روگذر از روی المان‌های زبری عبور می‌کند.



شکل (۴) انواع شرایط جریان موریس (۱۹۵۹) [۵]



شکل (۵) رژیم جریان پیترسون و موهانتی [۵]

اُرتل (۲۰۱۱)، تقسیم‌بندی رژیم جریان را به‌طور خاص برای سراشیبه‌های بلوکی با بولدر ردیفی عرضی^۶ انجام داد. وی با

7 Basin Flow
8 Waved Flow
9 Channel Flow
10 Volume of Fluid

1 Peterson
2 Mohanty
3 Tumbling flow
4 Transition
5 Tranquil
6 Cross-bar Block Ramps

می‌کند، اما به اندازه‌ای ریز نیست که بتواند مانند DNS همه جزئیات حرکت آشفته را محاسبه نماید. در واقع در LES حرکت و تبادلات ما بین گردابه‌های بزرگ مستقیماً حل شده، در حالی که تأثیرات گردابه‌های کوچک بر روی گردابه‌های بزرگ مدل می‌شود.

۲-۳- شبکه بندی

در این پژوهش، از یک بلوک شبکه‌بندی استفاده شده و شبکه‌های مختلفی امتحان شده‌اند. درشت‌ترین شبکه استفاده شده، شامل $160000 \times 200 \times 40$ سلول محاسباتی است که از 140 گره از آن در فاصله بین دو نقطه $200 \times X$ گره در راستای ثابت $1/1$ تا $3/3$ متر از ابتدای سرریز لبه پهن بوده است. در فاصله بین این دو نقطه، شیب سراسیب حاوی بولدرها قرار دارد که برای اینکه لبه‌های برجستگی‌های سازه به وسیله‌ی مدل عددی شناخته شود، به شبکه بندی ریزتری نیاز شد. در کل اندازه سلول‌ها در نواحی با گرادیان سرعت بالا، کوچکتر و در نواحی با گرادیان سرعت پایین، بزرگتر است [۹]. در ادامه با استفاده از خاصیت کاهش محدوده در نرم‌افزار که قسمت‌های جامد را از محاسبات حذف می‌کند، تعداد سلول‌های محاسباتی فعال به حدود 135000 کاهش پیدا کرد. حالات دیگر، شبکه‌بندی متوسط شامل $806000 \times 20 \times 64 \times 30$ سلول با 680000 سلول محاسباتی فعال و شبکه‌بندی ریز شامل $16/2$ میلیون $(600 \times 90 \times 40)$ سلول با $78/1$ میلیون سلول محاسباتی $y=20$ فعال‌اند. سپس نیمرخ‌های طولی سطح آزاد جریان در (در این عرض در همه‌ی ردیف‌ها بولدر حضور دارد)، در دبی پنج لیتر بر ثانیه، برای سه شبکه مختلف برداشت شد و با نیمرخ طولی سطح آزاد تجربی اُرتل (۲۰۱۱) مقایسه شد. برای مقایسه کمی نتایج عددی با داده‌های تجربی نیز تعداد 20 مقطع عرضی انتخاب شدند که خطاهای متوسط $8/3$ ، $5/4$ و $1/12$ درصد به ترتیب برای سه شبکه ریز، متوسط و درشت به دست آمدند. مقایسه ارتفاع سطح آب محاسباتی و آزمایشگاهی در 28 نقطه از سراسیب برای سه شبکه‌بندی مذکور در شکل (۸) نشان داده شده است. از آنجائی که تفاوت چندان بین خطای دو شبکه ریز و متوسط وجود ندارد، حالت بهینه شبکه متوسط با هزینه محاسباتی کمتر در نظر گرفته شد. سپس نرم-

اُرتل (۲۰۱۱) که در دانشگاه ووپرتال ۱ آلمان به انجام رسید، استفاده شده است. مشخصات این سازه، یک سراسیب بلوکی به طول ۲ متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر و اختلاف ارتفاع بالادست و پایین‌دست $7/6$ سانتی‌متر با بلوک‌های عرضی ردیفی است. ارتفاع بلوک‌های بزرگتر ۶ سانتی‌متر و ارتفاع بلوک‌های کوچکتر ۲ سانتی‌متر است [۸]. برای رسیدن به شرایط دائمی، در ابتدای سراسیب یک سرریز لبه پهن به طول $2/1$ متر و در انتهای آن یک کفریز به طول $5/1$ متر در نظر گرفته شد. یک حفره آبستگي فرضی نیز بلافاصله پس از سراسیب منظور شد. مدل فیزیکی در شکل (۶) و نمای شماتیک مدل عددی در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۶) نمای مدل فیزیکی از پایین‌دست با دبی سه لیتر بر ثانیه [۸]

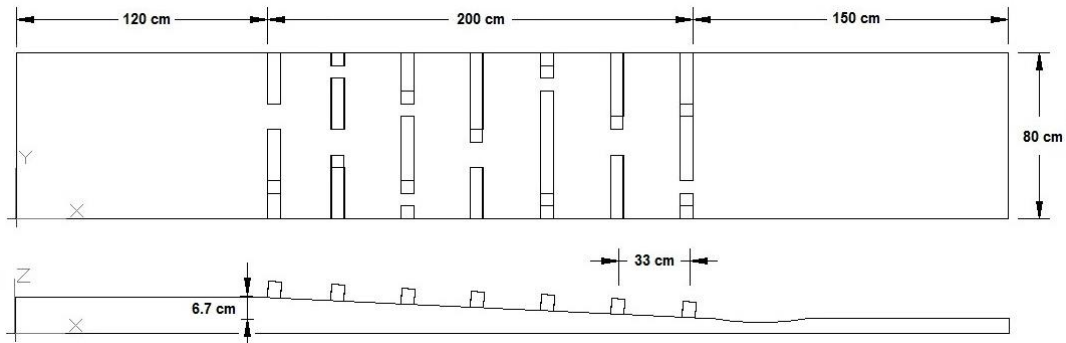
۲-۲- مدل عددی و مشخصات هیدرولیکی

برای استخراج مقادیر درست داده‌های یک مدل عددی یا آزمایشگاهی، رسیدن جریان به یک حالت پایدار ضروری است. بنابراین در این مدل عددی پس از اجراهای متعدد با شرایط متغیر دبی (بین ۱ تا ۷۵ لیتر بر ثانیه)، زمان مناسب برای دستیابی به جریان شبه دائم^۲، 60 ثانیه در نظر گرفته شد. برای شرط مرزی ورودی از نرخ حجم جریان برای عبور دبی معین و برای شرط مرزی خروجی از جریان خروجی استفاده شد که اجازه می‌دهد جریان در تماس با فشار هوا آزادانه به جریان بیفتد.

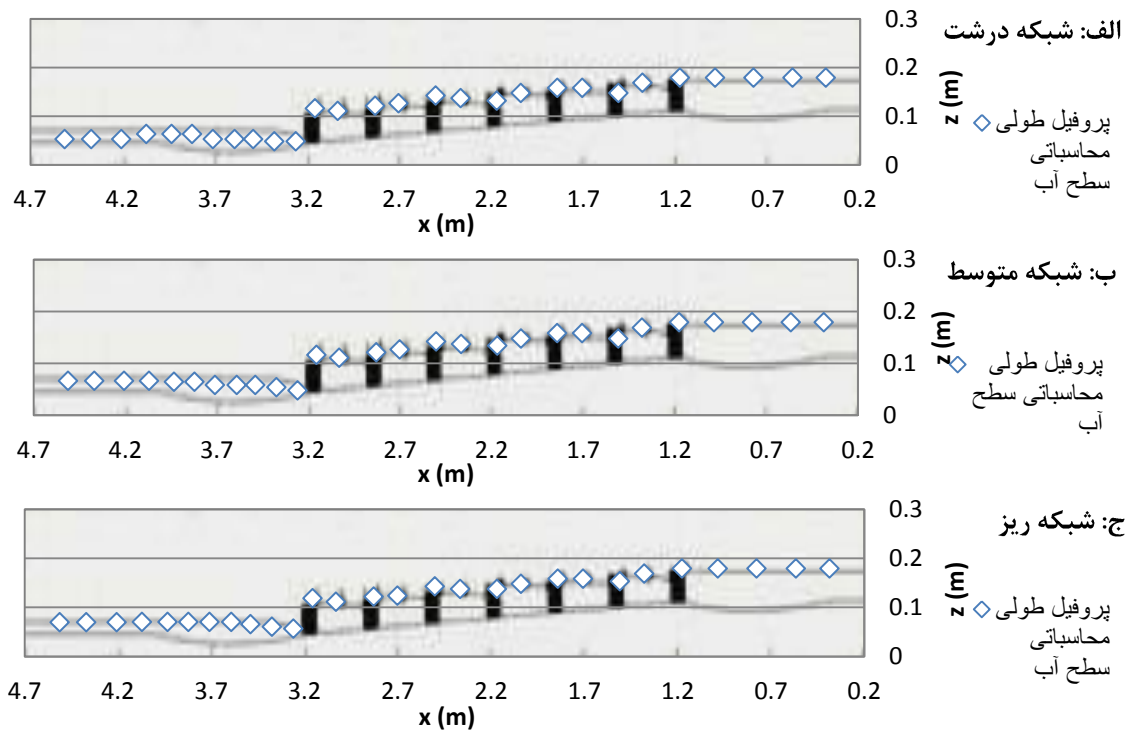
از بین مدل‌های آشفتگی موجود برای حل میدان جریان، مدل شبیه-سازی گردابه‌های بزرگ (LES)^۳ در نظر گرفته شد که به عنوان یک روش میانه از لحاظ هزینه بین روش حل مستقیم (DNS)^۴ و روش متوسط‌گیری رینولدز (RANS)^۵ است، که در آن شبکه محاسباتی از RANS ریزتر بوده، تا حدی که بعضی از ساختارهای آشفته را حل

- 1 Wuppertal
- 2 Quasi Steady Flow
- 3 Large Eddy Simulation
- 4 Direct Numerical Simulation
- 5 Reynolds-averaged Navier-Stokes

افزار با شبکه بهینه برای رژیم‌های جریان ۱۵، ۳۵ و ۷۵ لیتر بر ثانیه اجرا شده و به ترتیب خطاهای ۵/۸، ۷/۱۱ و ۳/۱۳ به دست آمد. مشخص است، در دبی‌های کمتر (زبری بزرگ مقیاس) نتایج از دقت بیشتری برخوردار بوده است.



شکل (۷) نمای شماتیک مدل عددی



شکل (۸) مقایسه نیم‌رخ طولی محاسباتی سطح آب با داده‌های تجربی اُرتل (۲۰۱۱) برای سه شبکه مختلف

آزمایی، الگوی جریان و چگونگی شکل‌گیری آن روی سراشیب-های بلوکی با بولدر بررسی شده و پارامترهای موثر بر میدان جریان و استهلاك انرژی معرفی می‌شود.

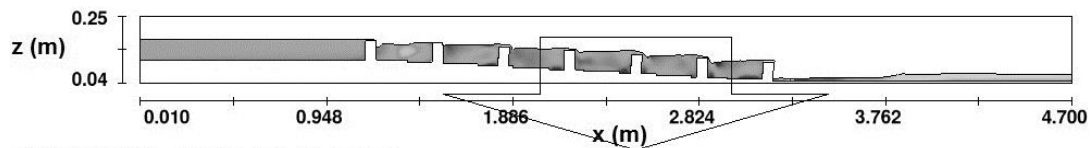
۳- مطالعه کیفی مقدماتی

در مساله مورد بررسی عامل اصلی استهلاك انرژی تغییر سرعت جریان است، پس در ادامه چگونگی تغییرات سرعت با تغییر دبی و تاثیر دبی بر الگوی جریان در کانال بررسی می‌شود.

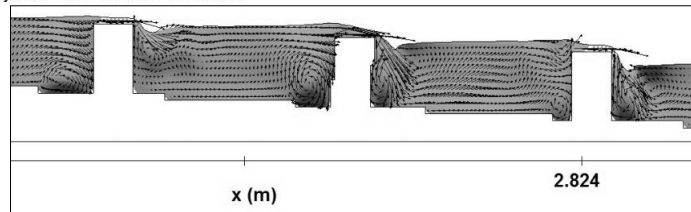
دلیل خطای بیشتر در دبی‌های بالاتر می‌تواند به ساز و کار روش VOF برگردد که در عمق به صورت تک‌فاز عمل کرده و از حالت دوفازی فقط برای محاسبه سطح آزاد سیال استفاده می‌کند. بنابراین با افزایش عمق از میزان حجمی از میدان جریان سیال که بصورت دوفازی و با دقت بالاتر حل می‌شود کاسته می‌شود. به این ترتیب، به قابلیت نرم‌افزار برای حل میدان جریان روی این سازه صحنه گذاشته شد. در ادامه، با به‌کارگیری مدل استفاده شده در درستی

هیدرولیکی به طور جداگانه قابل رویت است (شکل (۱۰)). با افزایش بیشتر دبی تا ۷۵ لیتر بر ثانیه، جریان انتقالی پیترسون و موهانتی، تشکیل می‌شود که مومتموم طولی نسبتاً بالایی دارد، ولی نه تا آنجا که پرش‌های هیدرولیکی کاملاً ناپدید شوند. در این شرایط در پشت و جلوی بولدرها دنباله تشکیل شده و وضعیت تداخل دنباله موریس نیز مشاهده می‌گردد. می‌توان این حالت را جریان موج‌آرتل نیز در نظر گرفت (شکل (۱۱)).

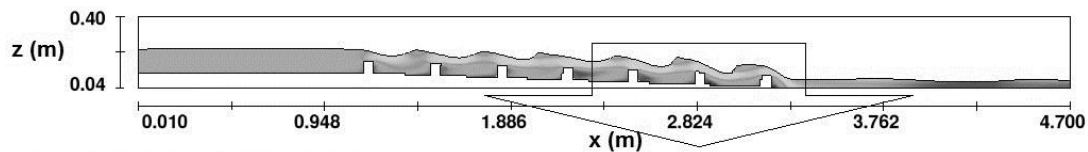
برای بررسی تغییرات سرعت در طول و عمق جریان از پروفیل‌های دوبعدی استفاده شده‌است. برای دبی پنج لیتر بر ثانیه، در نواحی غیر مستغرق، گردابه حول محور عرضی، در پشت و جلوی بولدرها شکل می‌گیرد و در سایر قسمت‌ها که جریان حالت ریزشی دارد، در پشت بولدرها گردابه و در جلوی آنها دنباله تشکیل می‌شود (شکل (۹)). با افزایش دبی تا ۳۵ لیتر بر ثانیه، جریان کاملاً مستغرق شده و آرام آرام، جریان غلغشی پیترسون و موهانتی با زبری منفرد موریس شکل می‌گیرد که در آن برای هر بولدر، گردابه و پرش



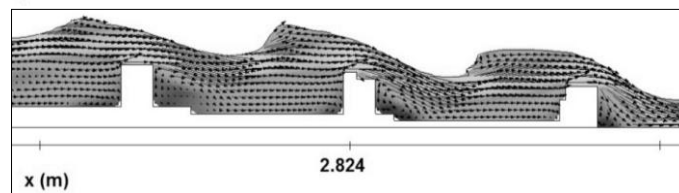
FLOW-3D t=60.000061 y=2.089E-01 ix=2 to 521 kz=2 to 36
16:47:30 01/10/2012 iykc hydr3d: version 9.3.2 win32-ifi 2008



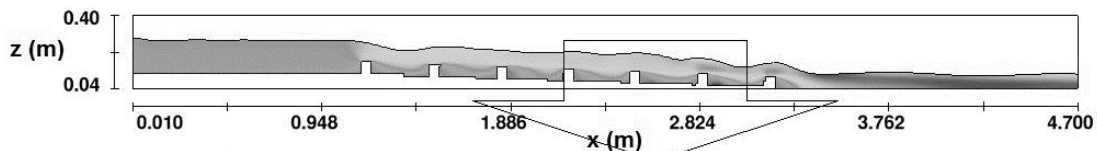
شکل (۹) الگوی جریان حول بولدرها در دبی ۵ لیتر بر ثانیه



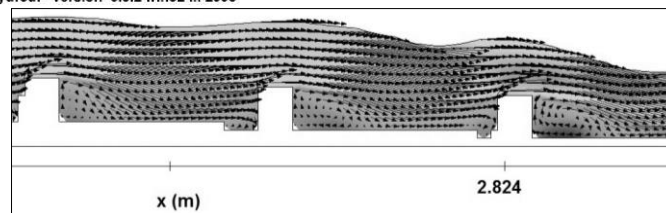
FLOW-3D t=60.000164 y=2.015E-01 ix=2 to 341 kz=2 to 36
18:21:48 12/25/2011 hval hydr3d: version 9.3.2 win32-ifi 2008



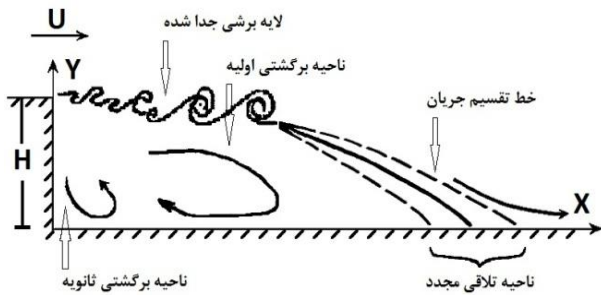
شکل (۱۰) الگوی جریان حول بولدرها در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه



FLOW-3D t=60.000710 y=2.015E-01 ix=2 to 331 kz=2 to 31
18:34:23 12/26/2011 qina hydr3d: version 9.3.2 win32-ifi 2008



شکل (۱۱) الگوی جریان حول بولدرها در دبی ۷۵ لیتر بر ثانیه



شکل (۱۳) نمای شماتیک برخورد پشت جریان با پله [۱۳]

۴- مطالعه کمی و پارامتریک

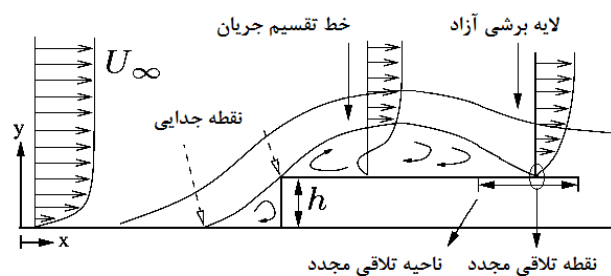
با توجه به مطالعه مقدماتی، الگوی جریان در عبور از سرایشب بلوکی شناخته شده است. در این بخش به بررسی تاثیر برخی پارامترهای هندسی سازه، روی پدیده‌های مؤثر بر استهلاک انرژی سرایشب‌های بلوکی مانند نواحی جریان گردابی پرداخته می‌شود. در جدول (۱) این پارامترها و سطوح تغییر آنها نشان داده شده‌اند. هندسه سازه اولیه، فلوم مشابه نمونه درستی آزمایی است. چگونگی نام‌گذاری انواع متفاوت سرایشب‌ها با این پارامترها به این صورت است که برای نمونه، سرایشب بلوکی با شیب ۵ درصد، با بولدرهای مکعبی با ابعاد $D=6\text{cm}$ در فاصله عرضی $3D$ (18cm) و طولی $2D$ (12cm) با چینش یکی در میان، با نام $D1S3C2L1A2$ در نمودارها خوانده می‌شود که پلان آن در شکل (۱۴) ارائه شده است.

۴-۱- تاثیر میزان دبی و شیب بر استهلاک انرژی

همان‌گونه که در شکل (۱۵) دیده می‌شود، برای یک دبی ثابت با افزایش شیب سرایشب استهلاک انرژی بیشتر می‌شود. نکته اول این است که با افزایش شیب سازه در یک دبی معین، سرعت جریان عبوری از روی سازه بیشتر شده و در نتیجه عمق سیال کمتر می‌شود که معادل است با کاهش استغراق نسبی که خود به تنهایی نقش کلیدی در افزایش استهلاک انرژی دارد.

می‌توان این مساله را به این صورت بیان کرد که با افزایش سرعت جریان ثقلی با شیب، بولدرها در برابر سرعت و نیروی درگ بیشتری مقاومت می‌کنند.

با پیشروی جریان در طول کانال و افزایش سرعت، انتظار پایین آمدن عمق آب می‌رود. در نیم‌رخ‌های طولی شکل (۱۰) و شکل (۱۱) وضعیت جریان غلتشی ناشی از کاهش عمق، در قسمت‌های پایین دست سازه مشاهده می‌شود. برخورد جریان با مانعی مانند بولدر را می‌توان با برخورد جلوی جریان^۱ با پله و سپس پشت جریان^۲ با پله مشابه‌سازی نمود. هنگامی که جریان در مسیر خود به پله می‌رسد، قسمتی از جریان در پشت مانع حالت چرخشی پیدا کرده و بقیه خطوط شروع به جدا شدن از بستر کرده و از روی آن عبور می‌کنند. با پیشرفتن جریان پس از شروع جداشدگی، ضخامت ناحیه چرخشی افزایش یافته و ناحیه گردابی تشکیل می‌شود که از دیدگاه انرژی یک منبع استهلاک محسوب می‌شود، زیرا انرژی را برای چرخیدن به دور خودش مصرف می‌کند [۱۰]. مرز بین ناحیه چرخشی و جریان عبوری از روی پله، خط تقسیم جریان نامیده می‌شود که اگر طول پله کافی باشد. در نقطه‌ای از طول پله که نقطه تلاقی مجدد نام دارد، به کف پله می‌رسد (شکل (۱۲) [۱۱]).



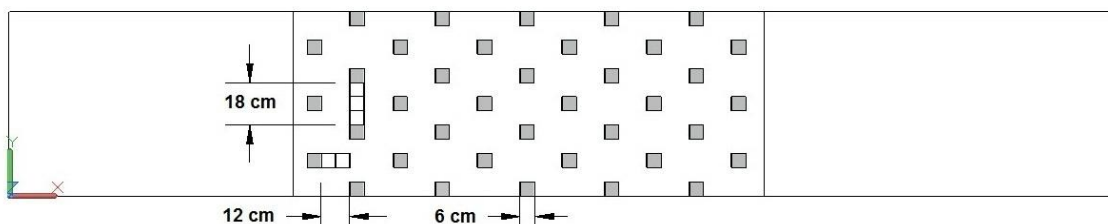
شکل (۱۲) نمای شماتیک برخورد جلوی جریان با پله [۱۱]

در اینجا، خط تقسیم جریان پس از عبور از بولدر به بستر کانال برخورد کرده که در این حالت، برخورد پشت جریان با پله بیشتر قابل بحث است. یکی از نواحی که در برخورد پشت جریان با پله تشکیل می‌شود نواحی برگشتی است که موجب کاهش انرژی و مومنتوم می‌شود؛ زیرا تنش برشی ناحیه اصطکاکی آن نیز نسبت به لایه برشی صفحه‌ای زیاد است. ناحیه تلاقی مجدد نیز از آن جهت دارای اهمیت است که با تغییر مکان آن طول جریان برگشتی افزایش یافته و تاثیر آن در اتلاف انرژی بیشتر می‌شود (شکل (۱۳) [۱۲]).

1 Forward-facing
2 Backward-facing

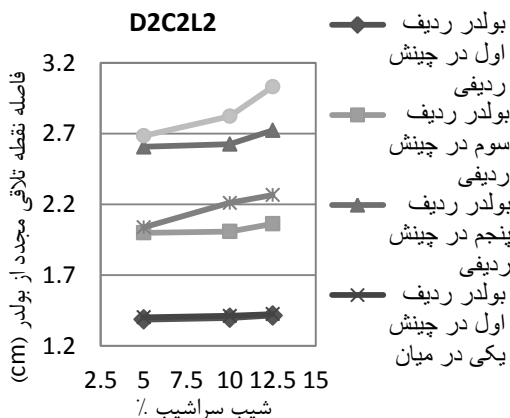
جدول (۱): محدوده تغییرات پارامترهای مورد بررسی

پارامتر هندسی	علامت اختصاری	۱	۲	۳	۴
ابعاد یک بولدر (cm)	D	(6*6)*6	(9*9)*9	(9*9)*9	(9*9)*6
شیب سراسیبه (%)	S	12.50%	10%	5%	
فاصله عرضی بولدرها	C	2D	3D		
فاصله طولی بولدرها	L	2D	4D	5D	
چینش بولدرها	A	ردیفی	یکی در میان		



شکل (۱۴): پلان سراسیبه مدل D1S3C2L1A2

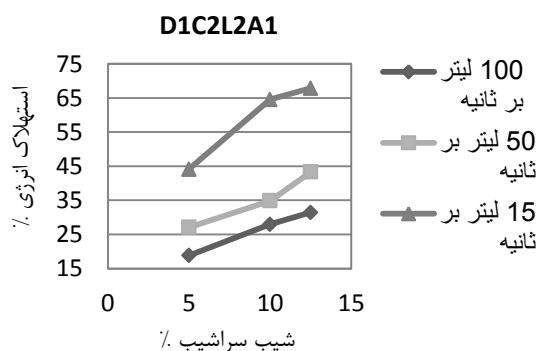
نسبی کاهش پیدا کرده و در درجه دوم فاصله نقطه تلاقی مجدد از بولدر و طول ناحیه برگشتی تحت تاثیر وزن آب کاهش پیدا می‌کند. هر دو این موارد موجب کاهش استهلاک انرژی می‌شوند که در شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) نیز به روشنی مشخص است.



شکل (۱۶): تغییر فاصله نقطه تلاقی مجدد از بولدر با شیب سراسیبه برای سه ردیف بولدر در دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه

۲-۴- تاثیر ابعاد بولدرها بر استهلاک انرژی

در این پژوهش، برای بررسی تاثیر ابعاد بولدرها بر استهلاک انرژی، بولدرها با ابعاد متفاوت در همان مکان قبلی در مقطع عرضی جایگزین شده‌اند. در این صورت دیگر فاصله عرضی و طولی بین بولدرها ثابت باقی نمی‌ماند. در واقع این بخش به تاثیر باهم ابعاد بولدرها و فاصله‌ی طولی و عرضی می‌پردازد. همان‌گونه که بیشتر



شکل (۱۵): تغییر استهلاک انرژی نسبی با شیب و دبی برای مدل D1C2L2A1

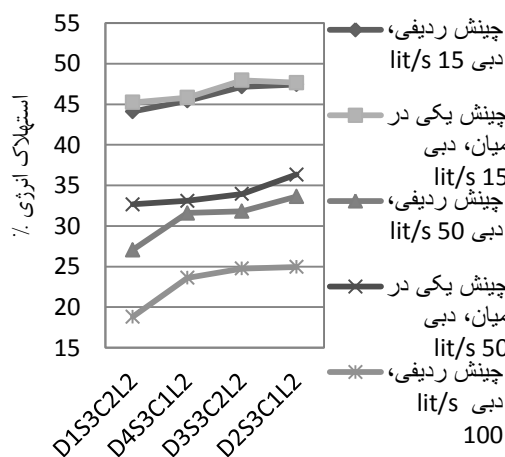
نکته‌ی دیگر در تغییر طول ناحیه برگشتی است. در شکل (۱۶) تغییر فاصله نقطه تلاقی مجدد از بولدر با شیب سراسیبه برای مدل‌های D1C2L2A2 و D1C2L2A1 نشان داده شده است. برای هر دو مدل سراسیبه در دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه برای بولدرهای هر سه ردیف اول، سوم و پنجم از ابتدای سراسیبه، طول ناحیه برگشتی در خط مرکزی کانال (y=40 cm) با تندتر شدن شیب، افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در بخش قبل گفته شد با افزایش فاصله نقطه تلاقی مجدد از بولدر و افزایش طول ناحیه برگشتی، استهلاک انرژی بیشتر می‌شود. در نتیجه برای هر سه دبی، استهلاک انرژی با افزایش شیب بیشتر می‌شود.

همان‌گونه که در شکل (۱۵) مشخص است، در مورد دبی این قضیه برعکس است. هر چه دبی بیشتر باشد، در درجه اول اینکه استغراق

هموارتر بوده و هم در خطوط جریان و هم در شکل سطح آب اغتشاش کمتری دیده می‌شود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Flow3D، جریان بر روی انواعی از سراسیمب بلوکی با تغییر در نسبت استغراق بولدرها و تغییر در چینش بولدرها شبیه‌سازی شده و الگوی جریان به دست آمد. نتایج نشان داد که در تمام موارد بالا، استهلاك انرژی در کنار استغراق نسبی کاملاً مرتبط به فاصله نقطه تلاقی مجدد از بولدر و طول ناحیه برگشتی است. در نتیجه استهلاك انرژی در ابتدا در جریان غیر مستغرق و سپس در حالت‌های تداخل دنباله‌ها و سپس زبری مفرد از جریان مستغرق بیشتر است. از این پژوهش بر می‌آید که برای افزایش استهلاك انرژی باید یا تا حد امکان از مساحت مقطع عرضی موثر کاست، یا با ثابت نگه داشتن مقطع عرضی موثر و حجم دبی عبوری، از استغراق بولدرها کم کرد و یا با تنظیم مواردی مانند فاصله طولی بین بولدرها، جریان را به سمت وضعیت جریان تداخل دنباله‌ها سوق داد. در نتیجه استفاده از بولدرهای بلندتر به جای بولدرهای عریض‌تر پیشنهاد می‌شود. همچنین برای استهلاك هرچه بیشتر، باید جریان تا حد ممکن به سمت تشکیل ناحیه برگشتی و نه گردابی سوق داده شود.



شکل (۱۷) تغییر استهلاك انرژی نسبی با ابعاد بولدرها برای سه دبی

۶- فهرست علائم

- h عمق متوسط جریان
d اندازه مشخصه دانه های بستر

در جدول (۱) ارائه شد، اندازه بولدرها در چهار حالت متفاوت انتخاب شده است. دو حالت یک و دو، مکعب شکل و متقارن است. شکل حالت‌های سه و چهار، مکعب مستطیل است که در حالت سه، ارتفاع بولدر بیشتر از بعد سطح مقطع مربعی و در حالت چهار ارتفاع بولدر کمتر از بعد سطح مقطع مربعی است. سطح مقطع عرضی موثر در هر سه حالت اخیر، یا با افزایش بعد بولدرها و یا با کاهش فاصله عرضی و یا ترکیب هر دو، کم می‌شود. مدلسازی برای هر چهار حالت ابعاد بولدرها، در شیب پنج درصد، چینش ردیفی در سه دبی ۱۵، ۵۰ و ۱۰۰ لیتر بر ثانیه و چینش یکی در میان در دو دبی ۱۵ و ۵۰ لیتر بر ثانیه انجام شده و نتایج در شکل (۱۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، افزایش استهلاك انرژی با افزایش ابعاد بولدرهای مکعبی از شش سانتی‌متر (مدل D1S3C2L2A1) به نه سانتی‌متر (مدل D2S3C1L2A1)، در هر سه دبی کاملاً قابل پیش‌بینی بود. موضوع جالب توجه در اینجا افزایش بیشتر استهلاك انرژی مدل D3S3C2L2 نسبت به مدل D4S3C1L2 است. شیب و فاصله طولی هر دو مدل یکسان و به ترتیب برابر ۵٪ و 24 cm است، در حالی که در D3، ارتفاع بولدر ۹ سانتی‌متر و عرض آن ۶ سانتی‌متر است و در D4، ارتفاع بولدر ۶ سانتی‌متر و عرض آن ۹ سانتی‌متر است. این تغییر ابعاد بولدرها، فاصله عرضی بین بولدرها را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین در دبی‌های ۵۰ و ۱۰۰ لیتر بر ثانیه که بولدرها کاملاً مستغرق می‌شوند، از لحاظ مقطع عرضی موثر (سطح مقطع عمود بر امتداد جریان که در مقابل سرعت سیال مقاومت می‌کند)، تفاوتی وجود ندارد. نکته‌ای که وجود دارد این است که با توجه به پروفیل سرعت طولی در پشت بولدرها، سرعت بیشینه جایی نزدیک به سطح آب است؛ در نتیجه جریان با مومنتوم بیشتر به بولدرهای بلندتر برخورد کرده و استهلاك بیشتری رخ می‌دهد. دلیل دیگر اینکه در مدل D3C2 به علت افزایش ارتفاع بولدر، طول ناحیه بازگشتی پس از بولدر، افزایش یافته و به پشت بولدر بعدی می‌رسد که این موضوع به میزان آشفستگی و استهلاك می‌افزاید. برای مدل D4C1، نیز به علت کاهش فاصله طولی، دنباله به طور کامل شکل نگرفته و جریان شبه صاف مورس تشکیل می‌شود که از استهلاك کمتری برخوردار است. در مجموع برای مدل D4C1، هم مسیر خطوط جریان

۷- مراجع

- [8] Oertel, M. (2011). "Strömungsvisualisierung auf Blocksteinrampen in Riegelbauweise." WasserWirtschaft, Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden, Germany, 34-41.
- [9] Cook, C.B., Richmond, M.C., Serkowski, J.A., and Ebner L.L., (2002), "Free-surface computational fluid dynamics modeling of a spillway and tailrace: Case study of the Dalles project," paper no. 120. HCI Publications, Kansas City, MO.
- [10] Schlichting, H., (1979) "Boundary-Layer Theory," University of Braunschweig, Trans. by Kestin, J., 7th ed. McGraw-Hill, New York.
- [11] Sherry, M.J., Jacono, D.L, and Sheridan, J., (2009). "Flow separation characterization of a forward facing step immersed in a turbulent boundary layer." 6th Int. Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Seoul, Korea, 22-24.
- [12] Darbandi, M., Taebi-Rahni, M., and Naderi, A., (2006) "Firm structure of the separated turbulent shear layer behind modified backward-facing step geometries." Int. Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, Vol. 16, No.7, pp. 803-826.
- [13] Spazzini, P.G., Iuso, G., Zurlo, N., and Di Cicca, G.M., (2001). "Unsteady behavior of back-facing step flow." Experiments in fluids, Vol. 30, pp: 551-561.
- [1] Pagliara, S., and Chiavaccini, P. (2006a). "Energy dissipation on block ramps." J. of Hyd. Engng., 132(1), pp: 41-48.
- [2] Pagliara, S., and Chiavaccini, P. (2006b). "Energy dissipation on reinforced block ramps." J. of Irrig. and Drainage Engng. 132(3), pp: 293-297.
- [3] Ghare, A. D., Ingle, R. N., Porey, P. D., and Gokhale, S. S. (2010), "Block ramp design for efficient energy dissipation." J. of Energy Engng., 136(1), pp 1-5.
- [4] Pagliara, S., and Lotti, I., (2009). "Surface and subsurface flow through block ramps." J. of Irrigation and Drainage Engng., 135(5), pp: 366-374.
- [5] Weichert, R., (2006). "Bed morphology and stability of steep open channels", Versuchsanstalt für wasserbau hydrologie und glaziologie der eidgenössischen technischen hochschule Zürich, No 192.
- [6] Tamagni, S., Weitbrecht, V., and Boes, R. (2010), "Design of unstructured block ramps: A state-of-the-art review," River Flow 2010, Ditttrich, Koll.
- [7] Flow-3D v.9.3.2 user manual (2007), http://www.flow3d.com/resources/news_10/FLOW-3D-newsletter-simulation-contest-winner-fall-2010.html

Research Note:

Numerical Study on Energy Dissipation of Block Ramps

Z. Sharifnejad Azizi¹, S. A. Salehi Neyshabouri^{2*}

1- M.Sc. of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Professor of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

salehi@modares.ac.ir

Abstract:

One of the most efficient energy dissipation structures in open channel flow are block ramps; which have been considered and used most often recently because of the simple performance. This kind of energy dissipators can be assumed as a particular type of baffle block chutes, but with natural base materials like sands and gravels and without cement. In laboratories, several physical models have been built and examined regarding their efficiencies to dissipate energy of flow. These experimental studies are not only too expensive and time consuming, but also some of the hydraulic conditions like higher velocities could not be obtained in controlled conditions of laboratories. Moreover, there are always problems with changing scales in laboratory studies. Hence, using computational fluid dynamics (CFD) codes are to some extent more favorable to engineers with which fluid hydraulic behavior is more widely examined. This paper at first, reviews the classifications of these structures regarding their fabrication and roughness from various point of views, and then deals with the formation of some types of flow regimes with different volume flow rates on them. In continuation, to study the three dimensional flow field around block ramps, Flow-3D software is utilized and hence, the mechanism of energy dissipation on various flow regimes on these structures has been surveyed. In this research, incompressible fluid assumption is made and Large Eddy Simulation (LES) turbulence model is used. Since it was a shallow water condition, Volume of Fluid (VOF) method is used to calculate the free surface elevation. The numerical results showed the more energy dissipation with more turbulence and more turbulence with forming the recirculating flow and extending the distance of the reattachment point from the boulders. Consequently, energy dissipation is maximum for lower volume flow rate and higher slope of the ramp. Since in these two conditions, the flow involves with roughness of the ramp more and more; hence it gets easier for turbulent flow to happen. In other words, energy dissipation is also maximum for the non-submerged boulders. Flows for the cases in which boulders are submerged have different mechanism of energy dissipation. In these types of flows, energy dissipation is maximum for the wake-interface flow condition and isolated roughness flow condition, respectively. Therefore, in order to enhance the energy dissipation in flow over block ramps, it is advised to reduce the effective cross section or reduce the submergence of scale roughness while maintaining the same effective cross section and the volume of fluid flowing over the structure. Changing the boulder ordering from rows to staggered would be another way to increase the energy dissipation.

Keywords: Block ramp, Energy dissipation, Numerical simulation, Flow-3D software.