Civil Infrastructure Researches, Vol. 5, Issue.2, Winter 2020, pp. 165-177

A. Shishegaran*

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology.

e-mail: aydin_shishegaran@civileng.iust.ac.ir

M.R. Mohammadkhani

School of Progress Engineering, Iran University of Science and Technology.

e-mail: mkhanimr57n@chmail.ir

M.A. Tavakoli

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology.

e-mail: mintavakoli908@gmail.com

Determination of Discharge Flow in Unit Width for the Distinction of Nappe and Skimming Flow in Stepped Spillway Using Flow 3d (Case Study: Siah Bishe Dam)

One of the major challenges in dam engineering is the design of the discharge flow of the stepped spillway. The rate of energy dissipation in downstream currents is higher than that of skimming currents. To achieve this goal, the discharge and skimming slope of the spillway must be low, which makes it economically efficient and applicable. For this reason, in the design process of spillway discharge, flow is assumed to be skimming. In this study, after validation of the Flow-3D model, the discharge flow of the Siah Bishe spillway was simulated. For validation, the values of the flow-Ashle curve were evaluated, and the root means square error of 5.07 was obtained. According to the results of numerical simulation, the flow must be at least 17 m^3/s for the discharge. As the flow rate increases, the flow will discharge and move into the state of transient flow, which will continue to flow with 37 cubic meters per second. Finally, for values of more than 60 cubic meters per second, the flow is definitely skimming.

Keywords: Numerical simulation, Stepped Spillway, Skimming Flow, Flow-3D.

* Corresponding author
Received 13 October 2019, Revised 25 December 2019, Accepted 20 January 2019.
DOI: 10.22091/cer.2020.4890.1176

تعیین دبی در واحد عرض برای تفکیک جریان ریزشی و رویه‌ای در سرریز پلکانی با استفاده از Flow-3D (مطالعه موردی: سد سیاه‌بیشه)

آیدین شیشه‌گران*
دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران.
پست الکترونیک:
aydin_shishegaran@civileng.iust.ac.ir

محمدرضا محمدخانی
دانشکده مهندسی پیشرفت، دانشگاه علم و صنعت ایران.
پست الکترونیک:
mkhanimr57n@chmail.ir

محمد امین توکلی
دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران.
پست الکترونیک:
amintavakoli908@gmail.com

یکی از چالش‌های مهم در مهندسی سد، طراحی دبی جریان سرریزهای پلکانی است. میزان استهلاک انرژی در جریان‌های ریزشی بیشتر از جریان‌های رویه‌ای می‌باشد. برای رسیدن به این نوع جریان، باید دبی و شیب سرریز کم باشد که ساختن چنین سرریزی صرفه اقتصادی ندارد. به همین دلیل در طراحی سرریزهای پلکانی، دبی جریان رویه‌ای لحاظ می‌گردد. در این پژوهش، پس از صحت‌سنجی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D جریان بر روی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه شبیه‌سازی شد. جهت صحت‌سنجی، مقادیر منحنی دبی- اشل مورد ارزیابی قرار گرفته و خطای جذر میانگین مربعات برابر با ۵/۰۷ به‌دست آمد. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، به ازای دبی حداقل تا ۱۷ مترمکعب بر ثانیه، جریان حتما ریزشی است. با افزایش مقدار دبی، جریان از حالت ریزشی خارج گشته و به سمت جریان انتقالی پیش خواهد رفت و این روند تا دبی ۳۷ مترمکعب بر ثانیه ادامه دارد. در نهایت به ازای مقادیر بیش از ۶۰ مترمکعب بر ثانیه جریان قطعا رویه‌ای می‌شود.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی عددی، سرریز پلکانی، جریان ریزشی، Flow-3D.

۱- مقدمه

سدها به صورت کلی از اجزای هیدرولیکی مختلفی تشکیل شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به سازه‌های روگذر، سازه‌های منحرف‌کننده جریان، سازه‌های تخلیه کننده، سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی، تخلیه‌کننده‌های تحتانی و سازه‌های آبگیر اشاره نمود. تخلیه‌کننده‌های تحتانی و سرریزها از جمله سازه‌های مهم سدها هستند که غالبا از آنها برای تخلیه سیلاب استفاده می‌شود. به این صورت که باید قادر باشند تا حجم آبی برابر با حجم بزرگترین سیلاب محتمل در حوزه آبریز سد را در مدت کوتاهی تخلیه کنند. سرریزها به‌عنوان اصلی‌ترین سازه کنترل سد، سهم بسیاری در تأمین ایمنی سدها داشته و هزینه قابل توجهی از کل پروژه را به خود اختصاص می‌دهند [۱].

به طور کلی، طبیعت مملو از انواع انرژی جنبشی و پتانسیلی است. به همین جهت در سازه‌های هیدرولیکی با تبدیل انرژی پتانسیل به جنبشی مواجه بوده که این انرژی جنبشی می‌بایست به نحوی مورد استفاده قرار گیرد و در غیر این‌صورت تلف شود زیرا منجر به سرعت‌های بالا شده و می‌تواند به سازه‌های پایین‌دست صدمه وارد کرده و یا برای ساکنین مشکل‌آفرین شود. استهلاک انرژی در مواردی همچون سرریزها، سازه‌های خروجی و کانال‌های پرشیب مطرح می‌گردد که استهلاک انرژی در سرریزها از

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۷/۲۱، بازنگری ۱۳۹۸/۱۰/۰۴، پذیرش ۱۳۹۸/۱۰۸/۳۰.
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22091/cer.2020.4890.1176

اهمیت بالاتری برخوردار است؛ زیرا که مقادیر انرژی که باید در سدهای بلند مستهلک گردد بسیار زیاد می‌باشد. در مجموع می‌توان به پنج مرحله مجزا در استهلاک انرژی جریان بر روی سرریزها اشاره نمود که عبارتنداز:

۱- روی سطح سرریز
۲- در طول جت ریزشی آزاد
۳- در برخورد با حوضچه پایین‌دست
۴- درون حوضچه آرامش
۵- در محل ورودی به دریاچه [۲].

سرریزها بر طبق بارزترین مشخصه، شامل سرریزهای اوجی، تندآب، جانبی، نیلوفری، آزاد، تونل، کنگره‌ای، پلکانی، آبشاری و سرریز مجهز به بارشکن می‌باشند [۳ و ۴]. در بین سرریزهای موجود، سرریز پلکانی به‌دلیل تأثیر فراوان پلکان‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان، در سال‌های اخیر بیشتر از سایر سرریزها مورد توجه قرار گرفته است. سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پنجه پایین‌دست ادامه دارد. به عبارت بهتر، طبق تعریف، تندآب پلکانی شامل یک کانال باز به همراه مجموعه‌ای از دراپ‌ها (اختلاف ارتفاع یک نقطه با نقطه‌ای دیگر) می‌باشد [۵ و ۶]. یکی از روش‌های مؤثر در استهلاک انرژی بر روی سرریز سدها، ساخت پله بر روی سرریز به‌منظور مشارکت در استهلاک انرژی است. از دیگر مزایای این سرریز، هماهنگی طراحی سرریز پلکانی با روش‌های ساخت بتن‌های غلتکی (RCC[1]) و در نتیجه کاهش هزینه‌های جانبی می‌باشد [۷]. در چند دهه اخیر به دلیل پیشرفت قابل‌توجه در ساخت سدهای RCC و رخداد استهلاک در طول سرریزهای پلکانی و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه آرامش، توجه زیادی به این سازه‌ها معطوف شده است.

جریان‌های عبوری از برخی سدها بیش از چیزی است که در طراحی آن‌ها در نظر گرفته شده و این پدیده منجر به سرریز شدن سد، به‌دلیل عدم کفایت ظرفیت مخزن و ظرفیت سرریز مخزن می‌شود که این امر در سازه‌های خاکی بسیار خطرناک و فاجعه‌آفرین است. برای حل این مشکل از روش‌های محافظت از خاکریزها استفاده می‌شود که رایج‌ترین آن ساخت سرریز پلکانی در شیب پایین‌دست می‌باشد [۸]. اینگونه سرریزهای پلکانی RCC، باعث افزایش ظرفیت سرریز بدون نیاز به تغییر در ابعاد سد (مثلا تراز بالایی سد) می‌شوند. لازم به ذکر است که این سرریزهای پلکانی بر روی خاکریزها یا سرریزهای اضطراری قرار می‌گیرند [۹ و ۱۰]. علاوه‌بر استهلاک انرژی در طول سرریز پلکانی، به‌دلیل کاهش سرعت و افزایش عمق، ریسک وقوع کاویتاسیون نیز کاهش می‌یابد. هرچند امکان وقوع کاویتاسیون در سرریزهای پلکانی وجود دارد؛ اما ریسک خرابی‌های آن با هوادهی، کمتر می‌شود. پله‌های روی این سرریز باعث کاهش ابعاد و عمق مورد نیاز حوضچه آرامش در پای سرریز می‌گردد [۴ و ۱۱]. انواع مختلفی از هندسه پله در این سرریزها به‌کار می‌رود که عبارتنداز: پله افقی، پله شیب‌دار و حوضچه‌ای [۷].

هیدرولیک کانال‌ها و شوت‌های پلکانی اساسا با محاسبات کلاسیک برای شوت‌های با شیب ملایم متفاوت است. برای مدل‌سازی این‌گونه جریان‌ها باید موارد خاصی مدنظر قرار گیرد. نیروهای لزجت و کشش سطحی در اغلب مسائل کاربردی کانال‌های باز، قابل صرف‌نظرکردن هستند؛ ولی در مورد جریان‌های شدیدا هوادهی شده مانند سرریزهای پلکانی به سادگی نمی‌توان آن‌ها را نادیده گرفت و صرف‌نظر نمودن از آن‌ها منجر به رخداد اثرات مقیاس می‌گردد. این اثرات، اختلالاتی هستند که در اثر نادیده گرفتن نیروهای ثانویه در مدل ایجاد می‌گردند که در سرریزهای پلکانی برای مقیاس‌های کمتر از ۱:۱۰ رخ می‌دهند. اکثر تحقیقات صورت پذیرفته بر روی سرریزهای پلکانی به‌صورت مدل‌سازی‌های فیزیکی و آزمایشگاهی بوده است که به بررسی استهلاک انرژی بر روی سرریزهای پلکانی پرداخته‌اند [۹ و ۱۲-۱۶].

[1]- Roller Compact Concrete

کاربرد سرریز، تخلیه کنترل شده و ایمن آب مازاد مخزن در هنگام سیلاب به پایین‌دست سد می‌باشد. در صورت اشتباه در محاسبه ظرفیت سرریز، خسارت مالی و جانی فراوان و جبران‌ناپذیری به‌وجود می‌آید. سرریزهای پلکانی نقش بسزایی در استهلاک انرژی دارند. یکی از عوامل مهم در طراحی سرریزهای پلکانی، دبی جریان می‌باشد. از طرفی در جریان‌های ریزشی، به‌علت وقوع پرش هیدرولیکی کامل، انرژی در بالاترین حد ممکن مستهلک می‌شود که برای رسیدن به این جریان یا باید دبی جریان پایین باشد و یا شیب سرریز کم باشد که ساختن چنین سرریزی از لحاظ اقتصادی قابل‌توجیه نیست. به همین دلیل، برای طراحی سرریزهای پلکانی، دبی جریان رویه‌ای لحاظ می‌گردد. بنابراین مطالعه رفتار سرریزهای پلکانی و به‌ویژه تعیین دبی جریان ریزشی و رویه‌ای بیش از پیش مورد توجه قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که مهمترین هدف از انجام این مطالعه، تعیین مرز جریان ریزشی و لغزشی بر روی سرریز می‌باشد که در ذیل آن به بررسی مسیر حرکت جریان بر روی پلکان پرداخته شده است.

همانطور که اشاره شد اغلب تحقیقات صورت گرفته بر روی سرریزهای پلکانی به مدل‌سازی آزمایشگاهی پرداخته‌اند که اغلب این‌گونه آزمایش‌ها دارای هزینه‌های زیادی هستند [۱۷]. باتوجه به اهمیت موضوع و پیچیدگی مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و همچنین پرهزینه بودن آزمایش‌های مربوطه، نیاز هرچه بیشتر به شبیه‌سازی‌های عددی بیشتر احساس می‌شود. از این‌رو در سال‌های اخیر، مدل‌های عددی مورد توجه بسیاری از محققین قرارگرفته‌اند و توانسته‌اند جایگزین مطمئنی برای کارهای آزمایشگاهی باشند. به همین منظور در این مطالعه از شبیه‌سازی عددی نرم‌افزار Flow-3D جهت شبیه‌سازی میدان جریان بر روی سرریز پلکانی استفاده شده است. در این مقاله، معادلات پیوستگی و ناویراستوکس متوسط‌گیری شده زمانی جهت شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- مواد و روش

۲-۱- نرم‌افزار Flow-3D

نرم‌افزار Flow-3D یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات می‌باشد که توسعه و پشتیبانی آن توسط علم جریان[۲] صورت گرفته است. این برنامه برای جریان‌های سه‌بعدی غیرماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند کاربرد دارد. به لحاظ استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل معادلات گسسته شده مورد استفاده، نظیر معادلات گسسته شده در روش تفاضل محدود می‌باشند. بر این اساس، برنامه Flow-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد [۱۸].

در این نرم‌افزار که مبتنی بر روش حجم محدود است، از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی مرز سیالات و مرزهای صلب استفاده شده است:

۱- روش حجم سیال (VOF[۳])، که از این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- روش کسر مساحت- حجم مانع (FAVOR[۴])، که برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد.

روش‌های VOF و FAVOR مثال‌هایی از روش‌های جزء حجمی هستند. در این روش‌ها ناحیه‌ای که باید مدل شود، ابتدا به شبکه‌هایی از المان‌های کوچکتر و یا حجم کنترل‌هایی تقسیم می‌شود. برای المان‌های حاوی سیال، مقادیر عددی برای هرکدام از متغیرهای جریان نظیر فشار، دما و سرعت در داخل آنها

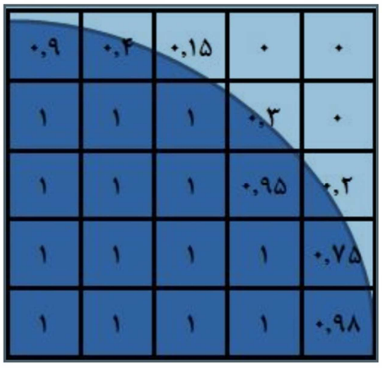
[2]- Flow Science
[3]- Volume of Fluid
[4]- Fractional Area-Volume Obstacle Representation

نگه داشته می‌شود. معمولا این مقادیر نشان‌دهنده مقادیر در هر المان هستند. مطابق رابطه (۱)، زمانی که جریان دارای سطح آزاد است، تمام سلول‌ها از سیال، پر نیستند. روش مناسب برای نشان دادن وضعیت سلول‌ها این است که کمیتی به نام F تعریف گردد که بیانگر جزئی از سلول است که توسط سیال پر شده است.

$$\frac{\partial F}{\partial t}+u\frac{\partial F}{\partial x}+v\frac{\partial F}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، F نسبت سیال در سلول محاسباتی و u و v مؤلفه‌های سرعت سیال می‌باشند.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در حل معادله فوق در سلولی که پر از سیال می‌باشد، مقدار F برابر یک می‌باشد، ولی در سلول خالی از سیال این مقدار برابر صفر است و در سلول سطحی این مقدار بین صفر و یک می‌باشد.



شکل ۱- نمونه‌ای از مقادیر F در نزدیکی سطح آزاد

به هنگام استفاده از معادلات ناویراستوکس و معادله VOF، پارامترهای لزجت (μ) و چگالی سیال (ρ) در هر سلول طبق روابط (۲) و (۳) معین می‌گردد، که در سلول‌های سطحی ترکیب دو فاز سیال در چگالی و لزجت هر سلول دیده می‌شود.

$$\mu=\sum F_i\times\mu_i \qquad (۲)$$

$$\rho=\sum F_i\times\rho_i \qquad (۳)$$

مطابق شکل ۱، تابع کسر سیال F در محیط سیال برابر با یک و در خارج از آن برابر با صفر است، بنابراین سلول‌هایی با مقادیر تابع F بین صفر و یک متناظر با سطح آزادند. با داشتن مقدار کسر F می‌توان مکان عمومی و زاویه سطح آزاد در المان سطحی را به‌دست آورد و در این حالت با سیال موجود در المان‌های مجاور کنترل می‌شود. بعد از تعیین موقعیت و زاویه سطح جریان، اعمال شرایط مرزی مناسب در سطح جریان برای محاسبه حرکت سیال مقدور خواهد بود. با حرکت سیال مقادیر F نیز با آن حرکت می‌کنند.

مزیت عمده روش VOF این است که سیال در داخل یک شبکه ثابت جریان دارد و هیچگونه تغییرشکل و جابه‌جایی شبکه وجود ندارد. همچنین توده‌های سیال می‌توانند براساس اثر نیروها با هم مخلوط یا از هم جدا شوند بدون اینکه منطق اصلی برای تعیین سطوح مشترک نیاز باشد. این ویژگی باعث می‌شود تا روش VOF در مدل‌سازی فرآیندهای با تر و خشک شدن متناوب، نظیر موج در ساحل یا امواج جزر و مدی، روش مناسب‌تری باشد.

روش FAVOR یکی دیگر از فنون جزء حجمی است که برای تعیین هندسه به‌کار برده می‌شود. همان‌طور که جزء حجمی سیال در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال استفاده می‌شود، یک کمیت جزء حجمی دیگر نیز می‌تواند برای تعیین سطح بدنه صلب استفاده شود. از طرفی، این کمیت می‌تواند در مشخص‌کردن حجمی از سلول که توسط بدنه صلب اشغال نشده است نیز استفاده شود. زمانی که در هر سلول حجم اشغال شده توسط بدنه صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش VOF می‌توان مرز صلب را در داخل شبکه ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، به‌کار برده می‌شود.

نرم‌افزار FLOW-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریبات حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود که برای هر سلول مقادیر میانگین

کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند، به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. موانع منحنی شکل، دیواره‌های مرزی و اشکال هندسی دیگر، به‌وسیله تعیین کسر مساحت وجوه و کسر حجم باز به جریان سلول، در شبکه جای می‌گیرد (روش FAVOR).

یکی از موارد استثنایی روش صریح، استفاده از آن در محاسبه نیروهای فشاری معادله اندازه حرکت است. مقادیر فشار و سرعت به‌طور ضمنی، به‌وسیله استفاده از فشارهای گسترش‌یافته در معادلات مومنتوم و سرعت‌های گسترش‌یافته زمانی در معادلات گسسته شده، باعث می‌شود که حل پایداری برای مسائل تراکم‌ناپذیر و سرعت‌های پایین به‌دست آید. در روش‌های شبه ضمنی، نتایج با استفاده از ترکیب یک سری از معادلات به‌دست می‌آید و توسط روش‌های تکراری حل می‌شود. روش عددی اصلی که در Folw-3D استفاده می‌شوند، روش دقت مرتبه اول، نسبت به افزایش زمان و مکان است. وقتی که شبکه مورد استفاده در روش حجم‌محدود غیریکنواخت است، می‌بایست در انتخاب درجه دقت حل عددی توجه کرد. دقت مرتبه دو در این حالت، مناسب‌تر است. در همه حالات دست‌کم می‌توان از دقت درجه یک برای شرایط مرزی استفاده کرد. مثلا، در سلول‌هایی که بخشی از سلول توسط مانع اشغال شده است، روش FAVOR معادل یا استفاده از درون‌یابی خطی برای شرایط مرزی در این سلول است.

۲-۲- مدل‌های آشفتگی

اساس معادلات حاکم برای حل جریان‌های آرام و متلاطم، یکسان بوده و از معادلات پیوستگی و ناویراستوکس استفاده می‌شود. با این تفاوت که برای حل جریان متلاطم، معادلات ناویراستوکس را متوسط‌گیری زمانی می‌کنند. با این عمل، یکسری عبارت‌های اضافی در معادلات ناویراستوکس ظاهر می‌شود که از نوع تنش تفسیر می‌شوند و آنها را تنش‌های آشفتگی (تنش‌های رینولدز) می‌نامند. مدل‌های آشفتگی برای حل عبارت‌های اضافی ظاهر شده در معادلات ناویر استوکس مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مدل‌های آشفتگی که در نرم افزار Flow-3D مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل مدل آشفتگی طول اختلاط پرانتل، معادلات آشفتگی تک معادله‌ای انرژی آشفتگی، معادله آشفتگی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استاندارد، مدل آشفتگی $\mathrm{RNG}\,k-\varepsilon$ و شبیه‌سازی گردابی بزرگ می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود تعداد مدل‌های آشفتگی ارائه شده قابل‌توجه می‌باشد که این به علت کاربرد وسیع نرم‌افزار Flow-3D در زمینه‌های متفاوت می‌باشد. توجه به این نکته ضروریست که در مدل آشفتگی $\mathrm{RNG}\,k-\varepsilon$، آشفتگی جریان براساس یک تکنیک آماری دقیق به‌کمک روابط ریاضی به‌دست می‌آید. در این مدل، یک ترم اضافی در معادله ε وارد می‌شود که باعث افزایش دقت محاسباتی می‌گردد. این مدل نسبت به مدل $k-\varepsilon$ استاندارد در مدل‌های انتقال رسوب کارایی بیشتری دارد، و برخلاف مدل استاندارد به‌منظور تعیین اعداد آشفتگی پرانتل از رابطه تحلیلی استفاده می‌کند.

۳- بحث و نتایج

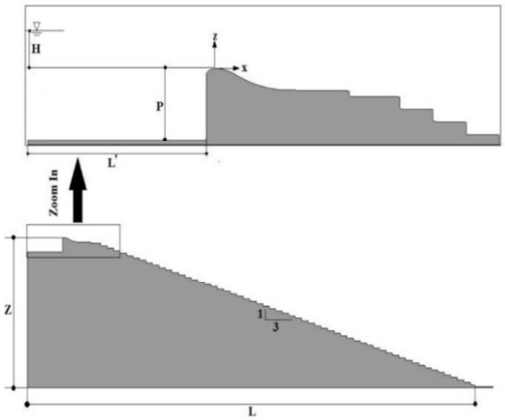
به‌طور کلی، شناخت یک پدیده و کشف زوایای مختلف آن از سه طریق، بررسی پدیده مزبور در شرایط واقعی (اندازه‌گیری متغیرهای مشهود به‌صورت درجا یا آزمایش صحرایی)، ساخت مدل فیزیکی پدیده با مقیاس کوچکتر و انجام آزمایش بر روی آن و بیان پدیده به صورت معادلات تئوریک و حل روابط تئوریک از طریق اعمال شرایط موجود در طبیعت بر مدل، صورت می‌گیرد. علی‌رغم قابلیت بالای نرم‌افزارهای محاسباتی در تحلیل مسائل، نتایج ارائه شده توسط این نرم‌افزارها تنها در صورتی قابل استناد خواهد بود که نتایج آنها با نتایج به‌دست آمده در آزمایشگاه و یا با نتایج تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفته و صحت‌سنجی شوند. در این مطالعه،

با توجه به قابلیت‌ها و محدودیت‌های هریک از روش‌های تحقیق، از روش عددی برای به‌دست آوردن مرز دبی جریان ریزشی و رویه‌ای بر روی سرریزهای پلکانی استفاده شده است.

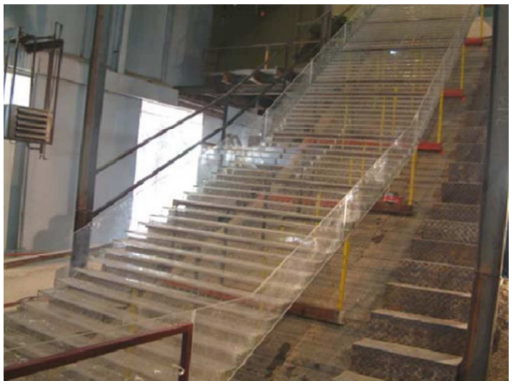
همانطور که اشاره شد، استفاده از نتایج نرم‌افزارهای محاسباتی بدون صحت‌سنجی با نتایج آزمایشگاهی یا تحلیلی قابل‌قبول نمی‌باشد. بنابراین برای استفاده از مدل عددی در هر مسئله‌ای، نخست باید نتایج آن را با نتایج آزمایشگاهی یا تحلیلی مورد ارزیابی و مقایسه قرار داد و بعد از اطمینان از صحت نتایج و انطباق آن با نتایج آزمایشگاهی به آن نتایج استناد نمود. در این صورت می‌توان تغییرات مورد نظر را اعمال نمود و مدل‌سازی‌های جدید را انجام داد.

در این مطالعه از اطلاعات مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا که مطالعات آن در مؤسسه تحقیقات آب انجام شده برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی استفاده شده است. مدل فیزیکی این سرریز با مقیاس ۱:۱۵ ساخته شده است. مطابق شکل ۲، این سرریز شامل کانال تقرب ورودی، سرریز اوجی و سرریز پلکانی می‌باشد. در این شکل P، L`، L و Z به‌ترتیب ارتفاع سرریز، طول کانال تقرب، طول سرریز از ابتدای کانال تا انتهای سرریز پلکانی و فاصله قائم تاج سرریز تا انتهای پله آخر و مقدار آنها به‌ترتیب برابر ۴، ۱۱/۶، ۱۳۳/۳ و ۴۲/۶۵ متر است. همچنین ارتفاع هد جریان در ورودی نسبت به تاج سرریز (H) و عرض سرریز (B) برابر ۲۰ متر و شیب سرریز پلکانی ۱:۳ می‌باشد. ارتفاع پله (h) و طول افقی (L_s) پله اول برابر ۰/۳۳ و ۳/۲ متر و برای سایر پله‌ها برابر ۰/۷ و ۲/۱ متر است. همچنین جهت درک بهتر مدل آزمایشگاهی مدل ساخته شده آن در شکل ۳ ارائه شده است.

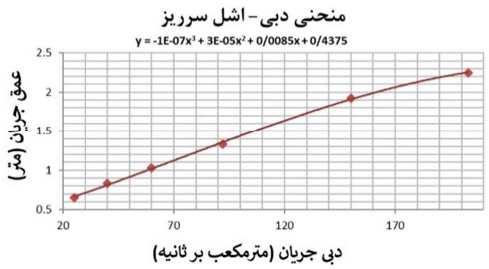
در شکل ۴، منحنی دبی- اشل سرریز تندآب پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا که توسط مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو تهیه گردیده، ارائه شده است. در این مطالعه، آزمایش‌های متعددی صورت پذیرفته که در ادامه جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی از آن نتایج استفاده شده است.



شکل ۲- شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه [۱۹]



شکل ۳- نمایی از مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا [۲۰]



شکل ۴- منحنی دبی- اشل سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا [۲۰]

یکی از مسائل اصلی در حل عددی معادلات با مشتقات جزئی، ایجاد شبکه‌بندی مناسب می‌باشد. با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب می‌توان حل یک سیستم معادلات دیفرانسیل را تا حد زیادی ساده نمود و بالعکس، انتخاب نامناسب شبکه می‌تواند باعث ناپایداری یا عدم

همگرایی در محاسبات گردد. برای تنظیم شبکه‌بندی میدان حل، در ابتدا یک شبکه درشت و یکنواخت استفاده شد. سپس شبکه‌بندی موردنظر در چندین مرحله ریزتر شد تا به یک مقدار معینی که در آن حدود تغییرات پارامترهای انتخاب شده برای بررسی، از مقدار مشخصی تجاوز نمی‌کرد، رسید. در این حالت، نتایج حاصل شده مستقل از ابعاد شبکه بوده و این ابعاد به‌عنوان شبکه‌بندی نهایی انتخاب گردید. جهت آنالیز حساسیت برای ۴ الگوی شبکه‌بندی با تعداد سلول‌های محاسباتی متفاوت، به ازای دبی ۱۵۰ مترمکعب برثانیه، مقادیر اندازه‌گیری شده عمق آب، فشار و سرعت (در عمق ۰/۶ ازکف) بر روی سرریز برای این چهار الگو، با مقدار محاسباتی از مدل‌سازی، با یکدیگر مقایسه شده است. براساس جدول ۱، از آنجاکه بین نتایج حاصل شده از الگوی ۳ و ۴ تفاوت بسیار کمی وجود دارد و مقدار خطای مطلق مقادیر این دو الگو بسیار نزدیک می‌باشد، ولی زمان اجرای الگوی ۴ بیش از ۱/۵ برابر الگوی ۳ می‌باشد، در نهایت الگوی شماره ۳ جهت شبکه‌بندی نهایی لحاظ گردید.

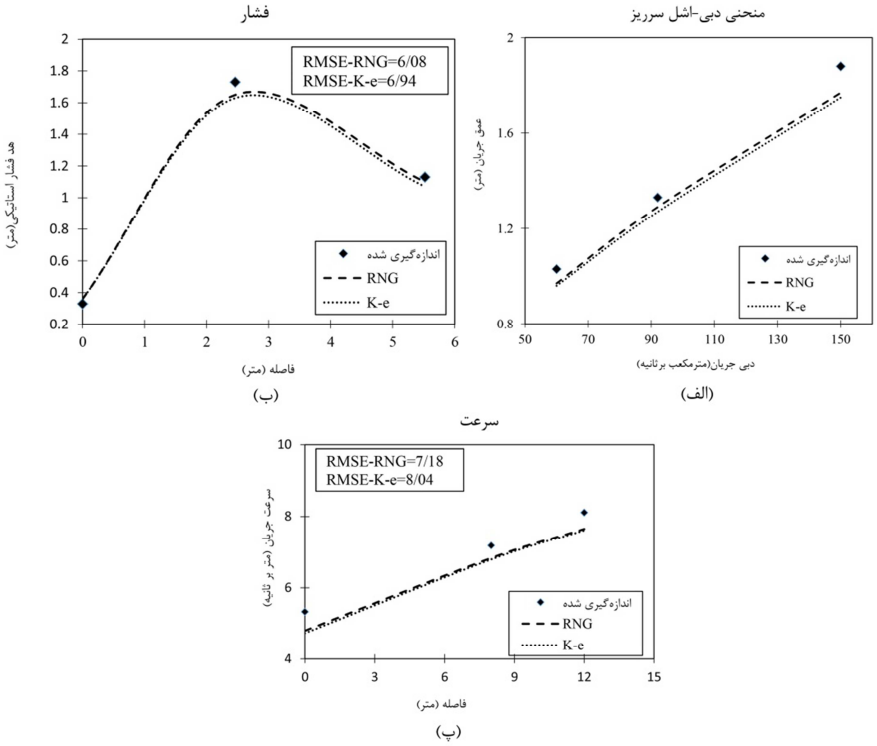
جدول ۱- نتایج حساسیت‌سنجی شبکه‌بندی مدل‌سازی

الگو	تعداد سلول محاسباتی	اندازه سلول محاسباتی	زمان محاسبه (دقیقه)	عمق آب روی سرریز (متر)	هد فشار (متر)	سرعت در عمق ۰/۶	درصد خطای عمق آب	درصد خطای فشار	درصد خطای سرعت
مقادیر آزمایشگاهی به ازای دبی ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه				۱/۸۸	۰/۳۳	۵/۳۳			
۱	۱۱۵×۴×۴۰۶	۲۳/۴۷×۲۵×۲۳/۴	۱۲	۱/۶۷	۰/۳۹	۴/۵۷	۰/۱۱۲	۰/۱۸۲	۰/۱۴۳
۲	۱۴۵×۵×۵۱۰	۱۸/۶×۲۰×۱۸/۶	۳۰	۱/۷۱	۰/۳۸	۴/۶۳	۰/۰۹۰	۰/۱۵۲	۰/۱۳۱
۳	۲۰۰×۵×۵۵۰	۱۳/۵×۲۰×۱۷/۳	۵۰	۱/۷۷	۰/۳۶	۴/۸	۰/۰۵۹	۰/۰۹۱	۰/۰۹۹
۴	۲۵۰×۵×۶۵۰	۱۰/۸×۲۰×۱۴/۶	۸۵	۱/۷۸	۰/۳۶	۴/۸۲	۰/۰۵۳	۰/۰۹۱	۰/۰۹۶

در نرم‌افزار Flow-3D جهت شبیه‌سازی مدل آشفتگی، پنج مدل آشفتگی وجود دارد. مطالعات قبلی در کنار تحقیقات انجام شده توسط چنگ[5] و همکاران نشان می‌دهد مدل آشفتگی RNG نتایج بهتری در شبیه‌سازی عددی سرریز پلکانی نسبت به مدل $k-\varepsilon$ استاندارد به‌دست می‌آورد [۱۷-۱۹]. بنابراین برای انتخاب مدل آشفتگی، یک‌بار از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و بار دیگر با مدل آشفتگی RNG، در الگوی مش‌بندی شماره ۳،

[5]- Chang

برنامه اجرا گردید. در منحنی‌های شکل ۵، مقایسه بین دو مدل آشفتگی جهت انجام محاسبات ارائه شده است. در این مقایسه نمودار دبی جریان نسبت به عمق جریان بر روی سرریز رسم شده و برای هریک از مدل‌های آشفتگی نمودار جداگانه ارائه شده و هر دو با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرکز تحقیقات آب [۲۰] مقایسه گردیده‌اند. همچنین جهت اطمینان بیشتر برای انتخاب مدل آشفتگی صحیح این مقایسه برای مقادیر فشار و سرعت به ازای دبی ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه انجام گرفت که در شکل ۵ ارائه شده است.



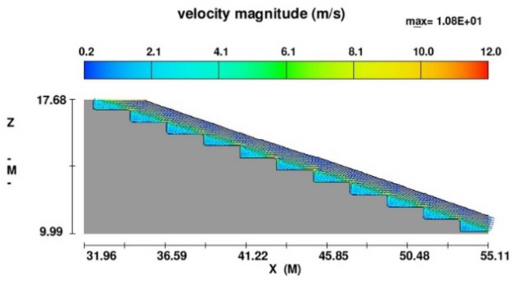
شکل ۵- مقایسه مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ و RNG به‌ازای مقادیر (الف) منحنی دبی- اشل، (ب) فشار و (پ) سرعت

همانطور که در شکل ۵ نیز مشهود است، از آنجاکه مدل آشفتگی RNG مدل توسعه یافته‌تری نسبت به مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد می‌باشد، از دقت بالاتری نسبت به این مدل برخوردار است. همچنین در جدول ۲ مقایسه‌ای از مقادیر خطای جذر میانگین مربعات برای دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و RNG ارائه شده است. همانطور که در جدول آمده است، خطای مدل آشفتگی RNG کمتر از خطای مدل $k-\varepsilon$ استاندارد می‌باشد. بنابراین در این تحقیق برای حل مدل سرریز پلکانی از مدل آشفتگی RNG استفاده می‌شود.

جدول ۲- مقایسه خطای مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ و RNG

نوع مدل آشفتگی	منحنی دبی-اشل		فشار		سرعت	
	خطای جذر میانگین مربعات	خطای میانگین	خطای جذر میانگین مربعات	خطای میانگین	خطای جذر میانگین مربعات	خطای میانگین
$k-\varepsilon$	۶/۱۶	۶/۰۷	۶/۹۴	۶/۷۰	۸/۰۴	۷/۶۱
RNG	۵/۰۷	۴/۸۹	۶/۰۸	۵/۵۱	۷/۱۸	۶/۸۳

جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی جریان بر روی سرریز پلکانی، پس از مدل‌سازی تندآب پلکانی و شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی، برنامه به حالت اجرا درآمده و خروجی‌های آن مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۶، که جهت بردارهای سرعت در پله‌های میانی تندآب را نشان می‌دهد به خوبی می‌توان دریافت که مدل عددی توانسته جریان رویه‌ای در سرریز پلکانی را شبیه‌سازی کند.

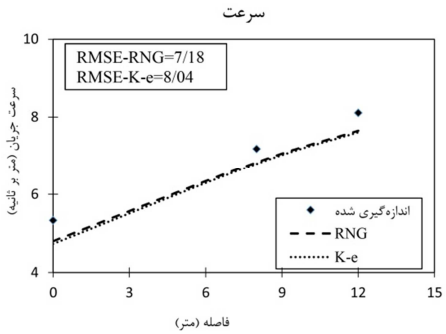


شکل ۶- جهت بردارهای سرعت و کانتور سرعت در مدل عددی در پله‌های میانی

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود جریان رویه‌ای به ازای دبی‌های بالا تشکیل شده است و تشکیل جریان گردابی بر روی پله‌ها به‌خوبی قابل تشخیص می‌باشد. همچنین جهت مقایسه نتایج عددی با مدل آزمایشگاهی، به ازای اعماق مختلف آب در مخزن متناسب با منحنی دبی- اشل که در شکل ۵ ارائه شده است، از نرم‌افزار خروجی گرفته شد و نتایج حاصل از مدل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده مدل فیزیکی موجود در مرکز تحقیقات آب مقایسه گردید. در منحنی شکل ۷، مقایسه بین منحنی دبی- اشل حاصل از نتایج اندازه‌گیری شده با مقادیر به‌دست آمده از مدل‌سازی ارائه شده است.

جهت آنالیز آماری نمودار شکل ۷، برای هر دبی به‌طور جداگانه خطا محاسبه شده و در جدول ۳ ارائه شده است. از نتایج جدول ۳ می‌توان اینگونه برداشت نمود که، نتایج مدل‌سازی عددی اختلاف کمی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد و درصد خطای کم بین آن‌ها نشان می‌دهد مدل عددی از تطابق بسیار خوبی برخوردار است و همچنین می‌توان از نرم‌افزار Flow-3D جهت شبیه‌سازی سرریز پلکانی استفاده نمود.

مطابق جدول ۳، در این مدل‌سازی، خطای جذر میانگین مربعات برای مقایسه منحنی دبی- اشل ۵/۰۷ و خطای کل برابر با ۴/۸۹ درصد محاسبه شده است که این اعداد نمایانگر تطابق مناسب مدل عددی با مدل آزمایشگاهی می‌باشد. با استناد به نتایج به‌دست آمده از مدل صحت‌سنجی شده، می‌توان مدل‌سازی عددی و دینامیک سیالات محاسباتی را قادر به پیش‌بینی موارد مشابه دانست و در مسائلی از این قبیل از آن استفاده نمود. در این تحقیق پس از حصول اطمینان از عملکرد نرم‌افزار Flow-3D در مدل کردن جریان بر روی سرریزهای پلکانی، به محاسبه دبی در واحد عرض متناسب با جریان ریزشی و رویه‌ای پرداخته شد.



شکل ۷- مقایسه منحنی دبی- اشل سرریز بین مدل عددی و آزمایشگاهی

جدول ۳- مقایسه خطا در دبی‌های مختلف منحنی دبی- اشل

شبیه‌سازی میدان جریان	
دبی (مترمکعب بر ثانیه)	محاسبه خطا (درصد)
۶۰	۵/۸۲
۹۲	۳
۱۵۰	۵/۸۵
خطای جذر میانگین مربعات	۵/۰۷
خطای کل	۴/۸۹

طبق تحقیقات راجاراتنام[6]، برای $y_c/h > 0.8$ جریان پیوسته برقرار می‌شود و مقادیر کوچک‌تر منجر به جریان ریزشی می‌شود. در ادامه، چانسون[7] در سال ۱۹۹۴ معادله زیر را ارئه نمود [۳ و ۱۱]:

$$\frac{y_c}{\mathrm{h}} = 1.057 - 0.465\frac{h}{\mathrm{L}} \qquad (۴)$$

محققان در سال ۲۰۰۱ با بررسی نتایج حاصل از آزمایشات محققین مختلف که حد بالایی جریان ریزشی و یا پایینی جریان پیوسته را معلوم می‌کنند، به مقایسه با روابط ارائه شده در زیر پرداختند [۵]:

تبدیل ریزشی به گذرا:

$$\frac{y_c}{\mathrm{h}} = 0.89 - 0.4\frac{h}{\mathrm{L}} \qquad (۵)$$

که حد بالایی ریزشی است و تبدیل گذرا به پیوسته:

$$\frac{y_c}{\mathrm{h}} = 1.2 - 0.325\frac{h}{\mathrm{L}} \qquad (۶)$$

که حد پایین پیوسته است.

در نهایت، طبق رابطه بی‌بعدی که در گزارش‌های مرکز تحقیقات آب ارائه شده است، چناچه پارامتر بی‌بعد عدد آبشار که در ذیل آورده شده از مقدار ۰/۳۶ کمتر باشد، جریان ریزشی است و اگر بیشتر باشد جریان رویه‌ای می‌شود. در این رابطه، q دبی در واحد عرض، S ارتفاع پله و g شتاب زمین می‌باشد [۲۰]:

$$D = \frac{q^2}{gs^3} \qquad (۷)$$

روابط تجربی جهت تعیین دبی جریان‌های ریزشی و رویه‌ای در جدول ۴ گزارش شده است. با توجه به جدول ۴، طبق رابطه راجاراتنام به ازای دبی کمتر از ۱۴ مترمکعب بر ثانیه جریان ریزشی و برای مقادیر بالاتر از آن جریان رویه‌ای است. براساس رابطه چانسون دبی ۲۱ مترمکعب بر ثانیه مرز بین جریان ریزشی و رویه‌ای می‌باشد که در ادامه این رابطه تکمیل‌تر شده و بازه جریان انتقالی نیز در آن دیده می‌شود به‌طوری که در بازه دبی ۱۱ تا ۳۴ مترمکعب بر ثانیه جریان از نوع انتقالی بوده و به ازای دبی بیشتر از ۳۴ مترمکعب بر ثانیه جریان رویه‌ای خواهد بود. در آخر، طبق پارامتر بی‌بعد عدد آبشار به ازای دبی‌های بیش از ۲۲ مترمکعب بر ثانیه جریان از نوع رویه‌ای است.

به‌طور خلاصه با بررسی نتایج به‌دست آمده از مطالعات مرکز تحقیقات می‌توان این‌گونه برداشت نمود که جریان عبوری از تندآب پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا به‌ازای دبی کمتر از ۱۵ مترمکعب بر ثانیه حتما ریزشی بوده و در بازه دبی ۲۵ تا ۴۰ مترمکعب بر ثانیه جریان انتقالی است و در نهایت به ازای دبی بیش از ۶۰ مترمکعب بر ثانیه جریان قطعا از نوع رویه‌ای می‌باشد [۲۰]. این نوع تقسیم‌بندی جریان توسط مرکز تحقیقات بدان معناست که تبدیل جریان ریزشی به انتقالی و انتقالی به رویه‌ای دارای مرز دقیق و مشخصی نیست و جریان به‌طور یک‌باره تغییر حالت نمی‌دهد. به‌عنوان مثال، در بازه دبی ۴۰ تا ۶۰ جریان هم خصوصیات جریان انتقالی را دارد و در عین‌حال به سوی جریان رویه‌ای تغییر حالت می‌دهد که در نهایت در دبی ۶۰ مترمکعب بر ثانیه به طور کامل رویه‌ای می‌شود. به همین ترتیب برای دبی در بازه ۱۵ تا ۲۵ مترمکعب بر ثانیه همین‌گونه می‌باشد.

جهت مدل‌سازی جریان ریزشی، با توجه به پودری بودن جریان در این حالت و کوچک بودن ذرات آب، بایستی اندازه مش‌ها به‌قدری باشد تا بتواند ذرات آب را شبیه‌سازی کند. از طرفی چون در مدل تمام مقیاس (یک به یک) سرریز پلکانی شبیه‌سازی شده با کوچک کردن اندازه مش‌ها به یک‌باره تعداد سلول‌های محاسباتی از چندین هزار تا به چندین میلیون عدد می‌رسد و به تبع آن مقدار محاسبات و زمان مدل‌سازی به‌شدت افزایش می‌یابد. از آنجاکه هدف از این شبیه‌سازی به‌دست آوردن دبی جریان ریزشی با توجه به تحلیل خروجی‌های دوبعدی و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد،

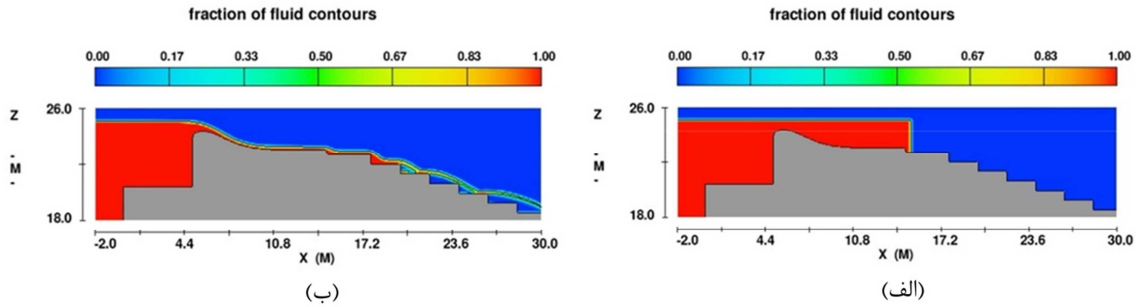
[6]- Rajaratnam
[7]- Chanson

جهت حل مشکل زمان مدل‌سازی، به‌جای یک متر از عرض سرریز، ۲۰ سانتی‌متر از عرض آن مورد مطالعه قرار گرفت و ابعاد مش‌ها در راستای طول و عمق جریان به نسبت آن کوچک شده و تقریبا در سه جهت اندازه مش‌ها به ۱۰ سانتی‌متر کاهش پیدا کرد. لازم به ذکر می‌باشد که تمامی شرایط مرزی همانند شرایط واسنجی شده در مدل صحت‌سنجی شده می‌باشد.

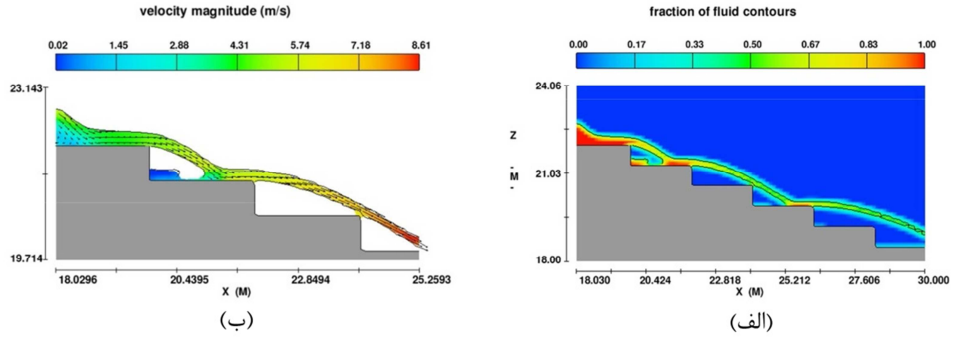
جدول ۴- تعیین دبی جریان‌های ریزشی و رویه‌ای با استفاده از روابط تجربی

فرمول تجربی		محاسبه عمق بحرانی (متر)	محاسبه دبی (مترمکعب بر ثانیه)	دبی در واحد عرض
راجاراتنام (۱۹۹۱)		۰/۵۶	۱۴	۰/۷
چانسون (۱۹۹۴)		۰/۶۳	۲۱	۱/۰۵
چانسون (۲۰۰۱)	تبدیل ریزشی به گذرا	۰/۵۳	۱۱	۰/۵۵
	تبدیل گذرا به رویه‌ای	۰/۷۶	۳۴	۱/۷
پارامتر بی‌بعد عدد آبشار (مرکز تحقیقات آب)			۲۲	۱/۱

در ادامه به‌منظور تفکیک دبی جریان‌های ریزشی و رویه‌ای با توجه به نتایج به‌دست آمده از روابط تجربی و داده‌های آزمایشگاهی از دبی ۵ مترمکعب بر ثانیه شروع کرده و با مقیاس ۵ واحد دبی را افزایش داده و از برنامه خروجی گرفته شد. در دبی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه جریان ریزشی و در دبی ۲۰ مترمکعب بر ثانیه تبدیل به جریان انتقالی شد که جهت تعیین مرز دقیق دبی جریان ریزشی و انتقالی از دبی ۱۵ تا ۲۰ مترمکعب بر ثانیه یک واحد یک واحد دبی را افزایش داده تا اینکه دبی مرز جریان ریزشی ۱۷ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد. این مرز به این معناست که به‌ازای دبی‌های پایین‌تر از ۱۷ مترمکعب بر ثانیه در مدل‌سازی عددی، جریان حتما به‌صورت ریزشی می‌باشد. همچنین به‌ازای مقادیر بزرگ‌تر از آن، جریان به‌صورت انتقالی می‌شود. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مراحل مدل‌سازی جریان ریزشی ارائه شده است.

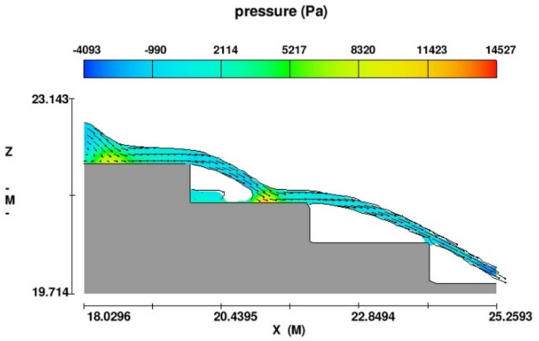


شکل ۸- کانتور کسر سیال به ازای دبی ۱۷ مترمکعب بر ثانیه در (الف) ابتدای مدل‌سازی و (ب) انتهای مدل‌سازی



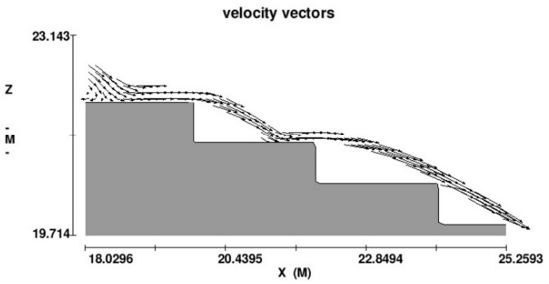
شکل ۹- کانتور (الف) کسر سیال و (ب) تغییرات سرعت به‌همراه بردار آن، در انتهای مدل‌سازی به ازای دبی ۱۷ مترمکعب بر ثانیه در پله‌های میانی سرریز پلکانی

شکل ۸، کانتور کسر سیال در ابتدا و انتهای مدل‌سازی را نشان می‌دهد که برای درک بهتر موضوع در شکل ۹- (الف) نمای نزدیک‌تر از این کانتور ارائه شده است. طبق این شکل‌ها به‌خوبی وقوع جریان ریزشی بر روی سرریز پلکانی مشاهده می‌شود. از شکل ۹- (الف) به خوبی این استنباط می‌شود که نرم‌افزار حتی قادر به شبیه‌سازی ذرات آب پخش شده به اطراف، در اثر پرش هیدرولیکی ناشی از جریان ریزشی بر روی پله است. در ادامه در شکل ۹- (ب) کانتور بزرگی سرعت در انتهای اجرای برنامه را نشان می‌دهد که به‌خوبی دیده می‌شود که پس از گذشت مدتی از شروع برنامه جریان به‌صورت ریزشی بر روی پله اول اتفاق می‌افتد و با ادامه آن در زمان ۵۰ ثانیه تکمیل می‌گردد. همچنین کانتور تغییرات فشار در پله‌های میانی سرریز پلکانی در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که مشخص می‌باشد فشار در لحظه برخورد جریان ریزشی با سطح پله‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- کانتور تغییرات فشار به‌همراه بردار سرعت در انتهای مدل‌سازی به ازای دبی ۱۷ مترمکعب بر ثانیه در پله‌های میانی سرریز پلکانی

همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است از روی لبه هر پله، جریان به‌صورت فورانی سقوط و بر روی پله بعدی می‌ریزد. در این حالت اتلاف انرژی از طریق پراکنده شدن جریان آب در هوا، اختلاط جریان آب بر سطح پله و شکل‌گیری پرش هیدرولیکی ناقص بر سطح پله صورت می‌گیرد.



شکل ۱۱- کانتور بردار سرعت در انتهای مدل‌سازی به ازای دبی ۱۷ مترمکعب بر ثانیه در پله‌های میانی سرریز پلکانی

۴- نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ حالت RNG به شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا پرداخته شده است. با توجه به درصد خطای قابل‌قبول در مقایسه نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی و حصول اطمینان از عملکرد نرم‌افزار، می‌توان بیان کرد که این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز پلکانی می‌باشد. در این راستا از مدل آشفتگی RNG جهت شبیه‌سازی شرایط آشفتگی استفاده شد. در ادامه جهت اعمال شرایط مرزی از منحنی دبی- اشل که در گزارشات مرکز تحقیقات آب وجود داشت استفاده گردید به طوری‌که در بالادست، شرط مرزی فشار مشخص با ارتفاع آب معلوم، در پایین‌دست سرریز شرط مرزی جریان خروجی، کف سرریز شرط مرزی دیواره و در اطراف سرریز و سطح آن شرط مرزی متقارن اعمال گردید. پس از شبکه‌بندی و واسنجی، صحت‌سنجی در چهار حالت بررسی شد. حالت اول با استفاده از منحنی دبی- اشل که از گزارش مطالعات مرکز تحقیقات آب استخراج گردید، انجام شد که در این حالت خطای جذر میانگین مربعات برابر با ۵/۰۷ و خطای میانگین برابر با ۴/۸۹ درصد بود. در نهایت، طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، به‌ازای دبی حداقل تا ۱۷ مترمکعب بر ثانیه جریان حتما ریزشی است. با افزایش

مقدار دبی جریان از حالت ریزشی خارج گشته و به سمت مترمکعب بر ثانیه ادامه دارد.
جریان انتقالی پیش خواهد رفت. این روند تا دبی ۳۷

مراجع

[1] AskariNezahad, A. H. (2018). *Evaluation of Triangular Shape Spillways' Effects on Flow Energy Dissipation Regime Using Flow-3D Computer Model*, in Faculty of Civil Engineering. Islamic Azad University, Marvdasht Branch.

[2] Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2017). *Hydraulic structures*. CRC Press.

[3] Khatsuria, R. M. (2004). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. CRC Press.

[4] Torabi, H., Parsaie, A., Yonesi, H., & Mozafari, E. (2018). "Energy dissipation on rough stepped spillways", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, *42*(3), 325-330.

[5] Chanson, H. (2001). "Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators", *Dam Engineering*, *11*(4), 205-242.

[6] Li, S., Li, Q., & Yang, J. (2019). "CFD Modelling of a Stepped Spillway with Various Step Layouts", *Mathematical Problems in Engineering*, *2019*.

[7] Chanson, H. (1993). "Stepped spillway flows and air entrainment", *Canadian journal of civil engineering*, *20*(3), 422-435.

[8] Felder, S., & Chanson, H. (2009). "Energy dissipation, flow resistance and gas-liquid interfacial area in skimming flows on moderate-slope stepped spillways", *Environmental fluid mechanics*, *9*(4), 427-441.

[9] Hunt, S. L., & Kadavy, K. C. (2010). "Energy dissipation on flat-sloped stepped spillways: Part 1. Upstream of the inception point", *Transactions of the Asabe*, *53*(1), 103-109.

[10] Krisnayanti, D. S., Dermawan, V., & Legono, D. (2019). "The Effect of Inception Point on Dissipation Energy in Stepped Spillways Modeling", *Journal of Southwest Jiaotong University*, *54*(3).

[11] Chanson, H. (1994). "Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes", *Journal of hydraulic research*, *32*(2), 213-218.

[12] Parsaie, A., Haghiabi, A. H., Saneie, M., & Torabi, H. (2018). "Applications of soft computing techniques for prediction of energy dissipation on stepped spillways", *Neural Computing and Applications*, *29*(12), 1393-1409.

[13] Mooselu, M. G., Nikoo, M. R., Rayani, N. B., & Izady, A. (2019). "Fuzzy multi-objective simulation-optimization of stepped spillways considering flood uncertainty", *Water Resources Management*, *33*(7), 2261-2275.

[14] Peng, Y., Zhang, X., Yuan, H., Li, X., Xie, C., Yang, S., & Bai, Z. (2019). "Energy Dissipation in Stepped Spillways with Different Horizontal Face Angles", *Energies*, *12*(23), 4469

[15] Bayon, A., Toro, J. P., Bombardelli, F. A., Matos, J., & López-Jiménez, P. A. (2018). "Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non-aerated, skimming flow in stepped spillways", *Journal of hydro-environment research*, *19*, 137-149.

[16] Barani, G. A., Rahnama, M. B., & Bagheri, H. (2005). "Optimization of stepped spillway dimensions and investigation of flow energy dissipation over a physical model", *Journal of Applied Sciences*, *5*(5), 878-882.

[17] Tabbara, M., Chatila, J., & Awwad, R. (2005). "Computational simulation of flow over stepped spillways", *Computers & structures*, *83*(27), 2215-2224

[18] Flow Science , I. (2008). *FLOW3D User Manual Version 9.3*.

[19] Hojjati, S. H., Ahmadi, H., & Zerati, A. R. (2017). "Numerical Simulation of gated stepped spillway and its Cavitation Potential", J*ournal of Dam and Hydraulic Power Plants*, *4*(14), 1-14.

[20] Center, W.R. (2006). *Final report on: Hydraulic model of Flood Outlet System of Siah-Bishe Pumped Srorage Project*, Water Research Center.